

附件 6

河南省高等教育教学成果奖 附件材料

成果名称： 基于《数字电子技术》课程线上线下
混合式“金课”的研究与实践

第一完成单位： 河南师范大学

主要完成人： 史水娥 詹华伟 吴耀武 李少玉
王建信 阮 宁 鲍伟娜 张 瑜

推 荐 序 号 ①⑦①④

附件目录：

- 一、《教学成果总结报告》（附查新查重证明）。
- 二、国家级和省级教学项目、奖励。
- 三、国家级和省级科研项目、奖励。
- 四、教育教学类论文、论著。
- 五、其他奖励及荣誉。
- 六、省级及以上新闻媒体报道。
- 七、教学成果校外推广应用及效果证明材料

教学成果总结报告

目 录

| | |
|---------------------|---|
| 一、成果简要介绍 | 1 |
| 二、成果主要内容 | 2 |
| 三、主要的改革成果和实践过程..... | 5 |
| 四、成果解决的问题和方法..... | 7 |
| 五、成果特色与创新 | 8 |

一、成果简要介绍

1. 成果简况

该成果创新了以学生为中心的教育理念,学生线上自主学习基础知识,并与课堂的深度学习充分融合,做到线上课程与线下课堂的混合;教师在课堂上利用课件、视频等多媒体手段,将抽象的理论知识直观地展示给学生,利用智慧教学工具随机点名、实时检测、弹幕、分组讨论、投稿、红包奖励等多个功能,营造生生互动、师生互动的良好课堂氛围,加深课堂互动,做到信息技术与课堂教学的混合,构建了模式基于MOOC+智慧教学工具的混合式创新教学模式,建立了基于混合式“金课”的教学体系,解决了“课堂低头族”、“重理论、轻技能”、“重成绩,轻过程”的现状。课程资源建设成效显著,具有教学设计案例库、试题库、课程思政教学设计案例库、授课视频、课件和多个校外实习基地,在本校电子信息专业、电气专业和微电子专业教学中,课程资源应用情况优良。

2. 成果意义

随着信息技术和教育理论的发展,慕课具有大规模性、网络性、开放性特征外,还具有以下特点:

(1) 视频时间较短:视频时长一般为几分钟左右。与传统一节课的教学比较,慕课更利于学生注意力的集中,便于学生对知识的掌握。

(2) 教学内容简练:慕课突出知识点的教学,与传统课堂的教学内容相比,慕课内容更加精简。

(3) 学习方式灵活:慕课视频的容量一般在几十兆左右,视频格式便于在电脑和手机上移动学习、灵活学习。

(4) 交流互动突出:教学过程的基础是学生课堂上有极大的学习兴趣,这正是慕课的亮点。只有良好的沟通,才能共同完成学习的目标。

在当今时代，移动互联逐步取代微机互联，手机、网络是生活中一刻也离不开的东西。在教育环境发生巨大变化的同时，作为学习的主体学生，其学习和接收信息的方式也发生了很大变化。主要体现在以下方面：

(1) 学习习惯变化：现在学生最爱看的“抖音”或短视频就是最好的例证，这些视频一般持续的时间是2分钟左右，学生看了之后，印象深刻，那么学习也是一样，学生获取知识越来越碎片化。

(2) 学习态度变化：伴随社会主义市场经济的迅速发展，当代大学生要务实进取，努力提高自己的知识能力水平，合理调整知识结构，才能提高市场竞争力。

(3) 学习方式变化：通过网络和手机，学生可以随时随地的进行学习各种各样的知识，信息来源丰富化。

基于教育环境的改变和学生的变化情况，迫切需要改革传统的教育模式，转变思路，教学模式要转变为以学生学习、学生发展、学习效果为中心的教学模式。教师的任务不再是在有限的时间内将教学内容，以简洁明了的方式讲授，转变为以提高学生创新能力为目的，以学生发展为中心，来规划自己的教学设计，变革自己的教学方式。

二、成果主要内容

我们处在一个优质教育资源不再稀缺的移动互联时代，面对主动获取知识和意愿显著增强的学生，高校的教育者必须更新教学理念、变革传统的教学基本逻辑，提出适应新时代教学的新逻辑、新模式，否则，高校真的有可能退化为“考试院”。

疫情的发生，迫使学校改变教学方式，也让互联网教学模式在更大范围内得到普及。教师从起初的被动进行线上授课，到逐渐认识到线上授课的优势，再到主动想办法创新网上教学方式、提高在线授课质量，

为高校推进线上教学按下了“加速键”。大规模在线教学资源，使信息技术充分融入到教学过程中，让时时学、处处学变为现实。

面对新的形势和新的教育对象，我们要始终坚信，在线教学资源的丰富并不能冲淡教师的角色，相反，教师可以充分利用这些资源，打造线上线下混合式“金课”，充分适应学生移动学习的习惯和求新求变的心理，从而强化自己在课堂教学中的重要角色，有效推进学生的专业学习和落实立德树人的教育目标。

在这种情况下，混合式教学模式应运而生。学生线上自主学习基础知识，并与课堂的深度学习充分融合，做到线上课程与线下课堂的混合；教师在课堂上利用课件、视频等多媒体手段，将抽象的理论知识直观地展示给学生，有效利用智慧教学工具得功能：随机点名、实时检测、弹幕、分组讨论、投稿、红包奖励等，营造生生、师生互动的良好课堂氛围，加深课堂互动，做到信息技术与课堂教学的混合。

成果内容主要包括三个方面：改革课程内容、改革教学方法、改革成绩评价机制。

1. 改革课程内容

在混合式“金课”建设中要强调课程内容提炼、融合和创新。数字电子技术发展突飞猛进，在教学内容上体现前沿性和时代性，将基础知识与前沿技术相结合、基础理论与实际应用相结合。坚持知识传授、能力塑造、素质培养有机融合，体现课程建设的高阶性。在确保创新性和高阶性的前提下，课程教学设计体现研究性、创新性和综合性，增强课程的挑战度，将知识内化为学科素养，内化于心，并付诸于“行”，提升学生解决复杂问题的能力。

此外，紧扣时代脉搏，深入挖掘国际形势、热点时事、脱贫攻坚、党史国史内的思政元素，引出家国情怀、创新精神和大国工匠精神等教

育,实施忧患意识和工程伦理教育,将课程思政内容融入到教学实践中,达到润物无声的育人效果。

具体课程内容改革包括两方面:第一,精选在线学习资源,做到线上内容紧扣时代前沿。结合学习者的实际情况,在网络平台上选取内容权威、更新快的资源,根据本校教学大纲,进行线上线下知识点的划分。让学生线上学习概念、原理等基础知识,线下以深度学习和能力提升为主来实现培养方案的要求。第二,实时掌握学生学习状态,做到有的放矢。借助本校在中国大学 MOOC 网上运行的《数字电子技术基础》课程,在线上进行课前知识点的相关资料的发布,包括授课视频、课程 PPT、随堂测验和课前讨论互动等。通过课程管理后台了解学习者的学习情况,包括视频观看时长、测验的正确率以及互动讨论主题等。任课教师根据对这些数据的分析和研判,规划线下课堂的教学内容和设计,做到因材施教。

2. 改革教学方法

基于 MOOC+智慧教学工具的教学方法,构建线上、线下的深度融合模式,实现课上、课下的紧密连接,突破了时间、空间的界限,打造良好的学习闭环。课前推送线上预习资料,完成线上基础知识的学习;课堂上通过使用智慧教学工具,实现以学生学习为中心的线下课堂,完成深度学习和知识的内化,适时加入知识点测试、随机提问、小组讨论、弹幕等,激发课堂氛围,构造有温度的课堂;课下采集学生线上学习行为数据,给出有针对性、有目的的“课后小结”,更好地实现深度学习。

3. 改革成绩评价机制

课程成绩评定采用过程化评价和终结评价、线上和线下互补的方法。线上成绩占总成绩的 40% , 线下期末考试占总成绩的 60% 。其中线上过程考核环节包括:课件视频学习、作业单元测试、讨论和科技前沿和

思政资料的阅读等，线下过程考核环节包括：作品展示、课外实践、期末考试等。课程资源丰富，线上、线下混合式教学模式新颖，课程思政元素时刻体现在整个课堂中，学习积极性明显提高，课堂气氛良好，课时利用率高。实施改革以来，学生考试成绩和考研率明显提高，同时学生参加各类电子竞赛也取得优异成绩。

三、主要的改革成果和实践过程

1. 改革成果

通过以上三个方面的改革，根据工程教育专业认证和一流课程“两性一度”建设要求，结合学校的办学定位，以新工科专业建设为目标，以创新人才培养为核心，以立德树人为根本任务，坚持与时俱进，通过课程育人、实践育人、思政育人等途径，有效实现三位一体的培养目标。

(1) 知识传授目标：掌握数字逻辑电路的基本概念和理论；掌握数字逻辑电路的分析设计方法。

(2) 能力培养目标：具备解决复杂数字逻辑电路相关问题的能力；具备一定的创新能力和深度学习能力。

(3) 价值塑造目标：激发家国情怀和使命担当；培养大国工匠精神和创新意识；提升学以致用和终身学习能力；增强沟通表达和团队协作能力。

通过改革，实现线上课堂与线下课堂的结合，转变以“学生为主体”课堂教学方式。同时，完善和丰富教学资源，整合《数字电子技术》课程内容，结合线上、线下学习效果，开发出一整套适合《数字电子技术》课程线上线下教学的课程资源，并在部分章节后增加了设计和实现相关电子电路的内容，切实提升高校工科专业的课程实践性。

2. 实践过程

第一阶段：

(1) 查阅中国大学 MOOC 网上相关的教学资源,找出适合本校学习者的课程。

(2) 查阅其他高校《数字电子技术》的教学大纲和专业培养方案,规划本课程线上线下的知识点。

(3) 提高课件制作能力和掌握雨课堂等智慧教学工具的使用方法。

第二阶段:

(1) 制作线上每个知识点的教学设计,每周作业,在线考核,在线论坛等,准备课后相关或前沿资料及资料的上传。

(2) 制作线下课堂教学的教学设计,充分利用智慧教学工具来设计 PPT。

第三阶段:

(1) 探索线上、线下混合式教学模式。课后提前上传要预习的知识点,让学生课前做好准备,然后在课堂上侧重深度学习和能力提升,例如:采用案例式,首先提出设计要求,然后进行小组探讨、分享交流,最后教师总结、问题解决。

(2) 引入适度平时成绩的考核机制,解决线上学习自主力不足的问题。

第四阶段:

依据整个学期的线上教学数据和线下教学效果,深入探索线上、线下混合式教学模式的优势、不足和提升方向等问题,力开发出一套可推广的标准化教学管理模式。

(1) 有效提高学生的自学能力。鉴于线上学习评价机制的约束和课堂学习的要求,学习获得积极自学的动力,对学生最终养成借助网上开放资源自我学习的习惯具有积极意义。

(2) 有效提高学生的学习兴趣。通过教学模式的革新和智慧学习

工具的引入，能够活跃课堂气氛，较好的激发学生的学习兴趣。

四、成果解决的问题和方法

1. 成果解决的关键问题

数字电子技术内容更新快，实践性强等特点，传统教学方法单一、考核方式“重理论，轻技能”、“重成绩，轻过程”的现状，以及当代大学生的学习习惯和生活方式的转变，如何让学生摆脱课堂低头族，积极有效的利用手机和网络，制定目标导向，让课程优起来，改革教学方法，让课堂活起来，建立过程化评价制度，让学生忙起来，这是本项目解决的重点问题。本课程是理论和实际紧密结合的应用性很强的课程，在教学过程中要体现课程实践性的特点。针对应用性强的章节，课前线上发布设计任务，进行基础知识学习的同时，讨论设计方案，进行电路制作，课堂上以任务驱动开展翻转教学，采用智慧教学工具的多种功能，开展小组讨论、成果展示活动。课后查阅资料，进一步完善电路制作，提交作业，也可以线上分享自己的成果。

具体内容如下：

(1) 引入过程化成绩评价机制，采用线上、线下评价相结合的方法，从水平测试到过程监管，改善学习者线上学习深度不够的问题，通过线上学习的深入来提升线下课堂学习的效果。

(2) 采用智慧教学工具（如：雨课堂）来丰富线下课堂教学形式和效果。

(3) 实现线上《数字电子技术》MOOC与线下课堂讲授完美结合，建立科学高效的线上线下混合式的新型教学模式，并通过总结和凝练，探索一条可推广、可复制的适合高等学校工科专业课堂教学改革的新路径。

2. 实施方法

本成果采用了文献研究法、比较研究、理论分析与实证验证等方法进行研究，将理论与实践相结合，将智慧教学工具融入教学实践中。

(1) 文献研究法

查阅国内外各种相关材料，进行《数字电子技术》线上线下教学模式改革研究。

(2) 调查访谈法

为突出科学性和客观性，以相关专业骨干教师以及在校生的毕业生作为调研对象，以调查问卷方式就线上、线下混合式教学效果进行调查，对结果进行分析。

(3) 比较研究法

比较国内外混合式教学相关成果，找出差距并进行改进研究。

(4) 理论与实证分析法

通过混合式教学在我校电子信息类专业的教学实践，根据教学效果反馈，进一步修正改进线上、线下课的教学设计。

五、成果特色与创新

1. 成果特色

(1) 师生创意线上共享：师生将每次制作电路的设计方案、制作过程、成品展示、演示视频和创意心得等上传至线上教学平台，实现资源共享。通过相互分享和探讨，激发思想碰撞，达到融合贯通、学以致用，提升学生的高级思维能力和实践创新能力，突显课程的高阶性和创新性。

(2) 成绩评定多种维度：采用过程性评价和终结性评价相结合、线上评价和线下评价相结合的方法，从水平测试到过程监管，保证学生全面发展。

(3) 教学内容更新及时：紧扣前沿科技和时代脉搏，将前沿科技信息和最新思政元素融入课程教学，突出课程的前沿性和时代性。

2. 成果创新

(1) 教学方法创新：针对应用性强的章节，布置有一定难度的设计任务，开展探究式和任务驱动式互动教学，创建“任务-理论-实践-创新”环环紧扣的创新教学法，提高挑战度的同时，引导学生的“问题发掘”与“自主创新”能力，激发创新意识。

(2) 教学手段创新：紧扣章节教学内容，自行设计、制作每章节的电路教具，用于线下课堂教学研讨和实操演练，提升学生学习热情和动手能力。

(3) 评价方式创新：教学过程借助数字化平台运行，教师查看学生线上资源的进度、速度、题目测试，结合课堂反馈、研讨、线下考试和实操情况，对学生知识点掌握情况、创新能力及综合素质进行多元评价。

文本复制检测报告单(简洁)

检测时间: 2022-01-11 19:20:43

检测文献:

作者: 史水娥

检测范围: 中国学术期刊网络出版总库

中国博士学位论文全文数据库/中国优秀硕士学位论文全文数据库

中国重要会议论文全文数据库

中国重要报纸全文数据库

中国专利全文数据库

图书资源

优先出版文献库

互联网资源(包含贴吧等论坛资源)

英文数据库(涵盖期刊、博硕、会议的英文数据以及德国Springer、英国Taylor&Francis 期刊数据库等)

港澳台学术文献库

互联网文档资源

源代码库

CNKI大成编客-原创作品库

个人比对库

时间范围: 1900-01-01至2022-01-11

检测结果

去除本人已发表文献复制比: **4.5%**

跨语言检测结果: **0%**

去除引用文献复制比: **4.5%**

总文字复制比: **4.5%**

单篇最大文字复制比: **2.0%**(“后疫情时代”高校教学模式转变成新常态)

| | | | |
|-------------|----------|---------|----------|
| 重复字数: | [239] | 总段落数: | [1] |
| 总字数: | [5343] | 疑似段落数: | [1] |
| 疑似段落最大重合字数: | [239] | 前部重合字数: | [3.46] |
| 疑似段落最小重合字数: | [239] | 后部重合字数: | [4.73] |

指 标: 疑似剽窃观点 疑似剽窃文字表述 疑似自我剽窃 过度引用 疑似整体剽窃

表格: 0 公 式: 没有公式 疑似文字的图片: 0 脚注与尾注: 0

1. **2407739871038081267_史水娥_基于《数字电子技术》课程线上线下混合式“金课”的研究与实践.d** 总字数: **5343**

相似文献列表

去除本人已发表文献复制比: 4.5% 文字复制比: 4.5% 疑似剽窃观点 (0)

| | | |
|---|---|-----------------|
| 1 | “后疫情时代”高校教学模式转变成新常态 本报记者 唐召怡 钟继辉- 四川政协报-2020-05-29 | 2.0% 是否引证: 否 |
| 2 | “数字电子技术”课程改革与建设的研究 方星;- 无锡职业技术学院学报-2018-09-20 | 1.3% 是否引证: 否 |
| 3 | 新工科背景下电路分析课程线下“金课”建设的思考与探索 田丽鸿;包永强;张健;梁瑞宇;- 科教文汇(中旬刊)-2021-01-20 | 1.1% 是否引证: 否 |

- 说明：
1. 仅可用于检测期刊编辑部来稿，不得用于其他用途。
 2. 总文字复制比：被检测文章总重合字数在总字数中所占的比例。
 3. 去除引用文献复制比：去除系统识别为引用的文献后，计算出来的重合字数在总字数中所占的比例。
 4. 去除本人已发表文献复制比：去除作者本人已发表文献后，计算出来的重合字数在总字数中所占的比例。
 5. 指标是由系统根据《学术期刊论文不端行为的界定标准》自动生成的。
 6. 本报告单仅对您所选择比对资源范围内检测结果负责。

7. Email: amlc@cnki.net



<http://e.weibo.com/u/3194559873>



http://t.qq.com/CNKI_kycx



打印



保存

<http://check.cnki.net/>

教学质量工程项目

| 序号 | 成员姓名 | 立项时间 | 立项单位 | 类别 | 项目级别 | 项目名称 | 参与名次 | 承担主要工作 |
|----|------|------|--------|----|------|---|------|--------------|
| 1 | 史水娥 | 2020 | 河南省教育厅 | 教改 | 省级 | 河南省首批课程思政样板课程《数字电子技术基础》建设 | 主持 | 主持项目建设整体规划实施 |
| 2 | 史水娥 | 2021 | 河南省教育厅 | 教改 | 省级 | 河南省一流本科课程线上“金课”《数字电子技术基础》建设项目 | 主持 | 主持项目建设整体规划实施 |
| 3 | 史水娥 | 2020 | 河南省教育厅 | 教改 | 省级 | 河南省一流本科课程线上线下混合式“金课”《数字电子技术》建设项目 | 主持 | 主持项目建设整体规划实施 |
| 4 | 史水娥 | 2019 | 河南省教育厅 | 教改 | 省级 | 河南省高等教育教学改革研究与实践项目，名称：基于《数字电子技术》课程线上线下混合式“金课”的研究与实践 | 主持 | 主持项目建设整体规划实施 |
| 5 | 张瑜 | 2020 | 河南省教育厅 | 教改 | 省级 | 河南省一流本科课程线下混合式“金课”《电磁场与电磁波》建设项目 | 主持 | 主持项目建设整体规划实施 |
| 6 | 张瑜 | 2019 | 河南师范大学 | 教改 | 校级 | 河南师范大学高等教育教学改革研究与实践重点项目，名称：电子信息专业学位研究生教育改革研究与实践 | 主持 | 主持项目建设整体规划实施 |
| 7 | 詹华伟 | 2018 | 河南省教育厅 | 教改 | 省级 | 河南省示范性虚拟仿真实验教学项目，名称：共射共基组合放大电路 | 主持 | 主持项目建设整体规划实施 |
| 8 | 史水娥 | 2018 | 河南省教育厅 | 教改 | 省级 | 河南省精品在线开放课程《数字电子技术基础》建设项目 | 主持 | 主持项目建设整体规划实施 |

河南省教育厅

教高〔2020〕426号

河南省教育厅 关于开展本科高校课程思政项目建设的 通知

各本科高校：

| A | B | C | D | E |
|-------------------|--------|-----|------------|--------------------|
| 本科高校课程思政样板课程拟认定名单 | | | | |
| 序号 | 学校名称 | 负责人 | 课程名称 | 团队成员 |
| 28 | 河南农业大学 | 刘艳君 | 大学英语课程思政 | 李筱洁 张乾 闫彬彬 邓然 李沛 |
| 29 | 河南师范大学 | 冯小莉 | 中华优秀传统文化概论 | 王守谦 金相超 魏静 |
| 30 | 河南师范大学 | 陈子雷 | 社会学概论 | 李洪河 韩万渠 胡笑雨 毛哲山 王玲 |
| 31 | 河南师范大学 | 孙文梅 | 普通心理学 | 殷建萍 李德俊 徐亚萍 李小娟 |
| 32 | 河南师范大学 | 张磊 | 大学计算机文化基础 | 孙全党 赵娜 张新玲 孔德宇 |
| 33 | 河南师范大学 | 史水娥 | 数字电子技术基础 | 张瑜 徐世周 吴雪冰 王子月 |
| 34 | 河南师范大学 | 贾光瑞 | 热学 | 侯新杰 高书燕 杨春洁 翟海法 |
| 35 | 河南师范大学 | 赵先鹤 | 近世代数 | 董乐 董会莉 陈瑞芳 左红亮 |
| 36 | 河南理工大学 | 闫海燕 | 建筑学概论 | 王璐 毕小芳 张萍 陈静 |

河南省一流本科课程

证 书

课 程 类 别：线上课程

课 程 负 责 人：史水娥

其它团队主要成员：彭玉峰、王长清、马涛、王燕

课 程 名 称：数字电子技术基础

主 要 建 设 单 位：河南师范大学



证书编号：豫教〔2021〕21102

文件号：教高〔2021〕174号



河南省一流本科课程 证书



课 程 名 称：数字电子技术

课 程 负 责 人：史水娥

课程团队主要成员：徐世周 张林庆 李少玉
杨豪强

课 程 类 型：线上线下混合式一流课程

主 要 建 设 单 位：河南师范大学



文件号：教高〔2020〕193号

证书编号：豫教〔2020〕13204号

中国大学MOOC

课程 学校 下载APP



史水娥 河南师范大学 - 副教授
关注2人 | 粉丝47人

史水娥，河南师范大学副教授，硕士生导师，负责主讲本科各专业基础课“模拟电子技术基础”和“数字电子技术基础”，并担任CDO课程教授、毕业设计、金工实习等各个环节的教学工作。2015年获得河南师范大学第三届青年教师教学技能大赛一等奖，获得“河南师范大学课堂型教学十佳教师”称号，2015年获得河南...

查看全部

定制计划赚取你的专属学习日历
可以获得10元优惠券~

[立即定制](#)

MOOC课程 11 SPOC课程 1 专栏 讨论 115 证书

全部 | 正在进行 | 即将开始 | 已结束

[制定学习计划](#) [进入老师主页](#)

- | | | | |
|---|---|--|---|
|  <p>数字电子技术基础 河南师范大学 已更新47课时 2020年11月7日学期结束</p> |  <p>数字电子技术基础 河南师范大学 已更新59课时 已于2019年7月10日结束 5.00分</p> |  <p>职业技能等级证书 电子组装工艺 苏州工业园区职业技术学院 已学3/89课时 已于2019年6月29日结束</p> |  <p>微纳技术基础 你进技术基础 厦门大学 已学1/60课时 已于2019年5月30日结束</p> |
|---|---|--|---|

高频电子电路分析基础

高频电子电路分析基础

课程管理后台

最近发表

1. 大家可以将在自己在做四位检验器...
2. 大家可以将在自己在做四位检验器...
3. 组合逻辑电路设计方法讨论
4. 转换过程
5. 结构类型
6. 555定时器
7. 晶振

名师专栏

19节高情商提升课
让你拥有好人缘

查看全部 >>



慕课君邀请你一起签到
坚持因为不止是知识的重要，
还为了那个努力的自己。

签到

期末不挂科

附件 2

2016 年以来立项建设的本科高校省级精品 在线开放课程评价结果

| 序号 | 学校 | 课程名称 | 课程负责人 | 立项年度 | 立项类型 | 评价轮次 | 评价等次 |
|----|------|-------------|-------|------|------|------|------|
| 1 | 郑州大学 | 金融风险管 | 郭战琴 | 2018 | 自主类 | 2 | 优秀 |
| 2 | 郑州大学 | 改变生活的信息电子技术 | 刘晓旻 | 2018 | 自主类 | 2 | 优秀 |
| 3 | 郑州大学 | 现代生物学实验技术 | 鲁吉珂 | 2019 | 自主类 | 1 | 良好 |
| 4 | 郑州大学 | 荷球运动 | 马嘉城 | 2018 | 自主类 | 2 | 良好 |

| | | | | | | | |
|----|--------|-------------------|-----|------|-----|---|----|
| 70 | 河南师范大学 | 基因工程 | 陈建军 | 2017 | 自主类 | 3 | 合格 |
| 71 | 河南师范大学 | 数值线性代数 | 申培萍 | 2017 | 自主类 | 3 | 良好 |
| 72 | 河南师范大学 | 数字电子技术基础 | 史水娥 | 2018 | 自主类 | 2 | 优秀 |
| 73 | 河南师范大学 | 数据库系统原理 | 史霄波 | 2018 | 竞争类 | 2 | 合格 |
| 74 | 河南师范大学 | Python+ | 张磊 | 2018 | 竞争类 | 2 | 良好 |
| 75 | 河南师范大学 | 三维模型制作基础 | 高义栋 | 2018 | 自主类 | 2 | 优秀 |
| 76 | 河南师范大学 | “互联网+”时代教师信息化教学素养 | 朱珂 | 2018 | 竞争类 | 2 | 良好 |
| 77 | 河南师范大学 | 分子生物学 | 杨献光 | 2018 | 自主类 | 2 | 合格 |
| 78 | 河南师范大学 | 概率论基础 | 苗雨 | 2018 | 竞争类 | 2 | 合格 |
| 79 | 河南师范大学 | 水产动物营养与饲料学 | 聂国兴 | 2018 | 竞争类 | 2 | 合格 |
| 80 | 河南师范大学 | 传统文化与审美素养 | 李占伟 | 2018 | 自主类 | 2 | 合格 |
| 81 | 河南师范大学 | 现代汉语 | 刘志芳 | 2018 | 竞争类 | 2 | 良好 |
| 82 | 河南师范大学 | 核物理技术 | 马春旺 | 2018 | 自主类 | 2 | 良好 |
| 83 | 河南师范大学 | 毛泽东思想概论 | 李洪河 | 2018 | 自主类 | 2 | 合格 |
| 84 | 河南师范大学 | 工程测量 | 鲍林林 | 2019 | 自主类 | 1 | 合格 |
| 85 | 河南师范大学 | 计算机组成原理 | 孙林 | 2019 | 自主类 | 1 | 良好 |
| 86 | 河南师范大学 | 教育技术学导论 | 梁存良 | 2019 | 自主类 | 1 | 延期 |
| 87 | 河南师范大学 | 微观经济学 | 李荣华 | 2019 | 自主类 | 1 | 合格 |
| 88 | 河南师范大学 | 水生生物学 | 张曼 | 2019 | 自主类 | 1 | 合格 |
| 89 | 河南师范大学 | 唐宋词研究与欣赏 | 刘育霞 | 2019 | 自主类 | 1 | 合格 |

附件

2019 年度河南省高等教育教学改革研究与实践项目立项评审结果名单

一、本科高等教育

| 序号 | 项目名称 | 主持人 | 主要成员 | 完成单位 | 层次类别 |
|----|---|-----|---|--|-----------|
| 1 | 区块链技术背景下的现代大学人才培养机制改革研究和实践 | 刘焯天 | 王忠勇、陈红杰、王飞、田权魁、王晓川、魏海深、宋玉、钱慎一、潘恒、王红利、杨德仕、刘芳华 | 郑州大学、郑州轻工业大学、中原工学院 | 重大项目 A 类* |
| 2 | 以立德树人为导向的课程思政教育教学改革研究与实践 | 贾少森 | 房勋、祁秀香、冯军芳、贾昕、赵冉、李萍萍、乔石磊、曹玉涛、褚德安、吴胜峰、谭宇、郑泉军、田江太、刘冉 | 郑州大学、河南大学、华北水利水电大学、洛阳师范学院 | 重大项目 A 类 |
| 3 | 新时代地方本科高校基层教学组织改革研究—基于河南高校落实立德树人根本任务推进基层教学组织改革的实践探索 | 宋伟 | 李捷、王星霞、孟艳、张炳林、穆云超、杨志敏、卢娜、王方、闫永志、杨雪梅、王军胜、段丹阳、夏雁兵 | 河南大学、中原工学院、黄河科技学院 | 重大项目 A 类* |
| 4 | 高校实验室育人平台搭建与育人功能提升的实践研究 | 李利英 | 马国杰、左红亮、王志武、张高君、杨贺羽、唐超智、李春广、祁文彩、付晓莉、刘学军、曹矿林、侯建华、乔德旗、朱靖玉、赵鹏、张万青 | 河南工业大学、郑州大学、河南师范大学、中原工学院、河南省高校实验室研究会 | 重大项目 A 类* |
| 5 | 基于智慧化管理的大学体育教学综合改革模式构建与实践研究 | 卢志文 | 钱文军、白云庆、张振东、齐曙光、孙利伟、孔冲、郭素艳、张华、邓凤莲、王晏、姚洁、高晓娟、唐洪洲、袁林、金仓、李永辉、付子承、黄慧、杨帅 | 南阳师范学院、黄河科技学院、郑州大学、河南省体育科学研究所、上海昱泓教育科技有限公司 | 重大项目 A 类 |
| 6 | 基于立德树人的“以学习者为中心”大学内部教育生态建构与实践 | 司林胜 | 冯蔚、贾丽、常忠伟、徐华伟、张彤、孟现志、姚润田、赵好、杜永青、张凯 | 商丘师范学院、河南师范大学新联学院 | 重大项目 A 类 |

3

| 序号 | 项目名称 | 主持人 | 主要成员 | 完成单位 | 层次类别 |
|-----|---------------------------------|-----|-----------------------------|-------------------------------------|------|
| 250 | “新工科”背景下地方高校环境工程专业建设研究与实践 | 鲍林林 | 金彩霞、皮运清、祁巧艳、蒋凯、李晓品、罗亚红 | 河南师范大学 | 一般项目 |
| 251 | 基于混合式“金课”的现代汉语课程内容优化研究与实践 | 刘志芳 | 秦法跃、张雪平、李瑞萍、王宁 | 河南师范大学、河南大学 | 一般项目 |
| 252 | 卓越教师背景下汉语言文学专业师范生教学设计能力提升研究 | 刘安娜 | 张恒君、闫记红、李霞、王立、王杰、从汉林、荆文茹 | 河南师范大学、河南师范大学新联学院、河南师范大学附属中学、商丘师范学院 | 一般项目 |
| 253 | 项目教学法在美术专业创作人才培养中的改革实践与研究 | 王霄 | 马燃、董明慧、杜旭光、郭锐、张喆 | 河南师范大学 | 一般项目 |
| 254 | 基于项目式教学法的数学建模教学研究与实践 | 穆晓霞 | 范海菊、贾育强、于红斌、杨育捷、刘艳芳 | 河南师范大学 | 一般项目 |
| 255 | 从“进化课堂”到“进化课程”——大学数学教学方法探索 | 董乐 | 赵先鹤、马迎宾、李海峰、张二朋、朱亚丽、蔡新童、田长安 | 河南师范大学、郑州财经学院 | 一般项目 |
| 256 | 基于《数字电子技术》课程线上线下混合式“金课”的研究与实践 | 史水娥 | 詹华伟、吴耀武、李少玉、王建信、阮宁、鲍伟娜、张瑜 | 河南师范大学 | 一般项目 |
| 257 | 基于教学基本状态数据库的高校教学质量内部保障机制研究与实践 | 史璞 | 张根付、夏冰、陈艳浩、王世威、孙同梅、王雯雯 | 河南师范大学 | 一般项目 |
| 258 | 基于大学英语的金课体系建设与实践研究 | 张喆 | 张丹、张中美、沈海波、温玲霞、刘红、王丽慧 | 河南科技大学 | 一般项目 |
| 259 | “一带一路”视域下河洛文化教育资源的整合与利用 | 王东洋 | 郭红梅、薛瑞泽、王云红、王旭、韩宏韬、于增环 | 河南科技大学 | 一般项目 |
| 260 | 卓越农林人才培养过程中创新创业教育模式的构建与应用 | 侯小改 | 赵威、宋程威、马占强、范丙友、王林生、王贺正 | 河南科技大学 | 一般项目 |
| 261 | “新工科”建设背景下地方院校设计类专业人才培养模式的改革与实践 | 刘刚田 | 尤慧颖、廖亮、朱丹君、刘丽娜、张晋、尤阳、田磊 | 河南科技大学 | 一般项目 |
| 262 | 地方高校数学与应用数学一流专业人才培养模式的研究与实践 | 冯爱芬 | 尚育林、侯海龙、刘长河、徐勇、许建楼、李策策、殷萍 | 河南科技大学 | 一般项目 |

24



河南省一流本科课程 证书

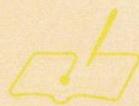
课 程 名 称：电磁场与电磁波

课 程 负 责 人：张 瑜

课程团队主要成员：李雪萍 林方丽 王 旭
武志燕

课 程 类 型：线下一流课程

主 要 建 设 单 位：河南师范大学



文件号：教高〔2020〕193号

证书编号：豫教〔2020〕12981号

中共河南省委 河南省教育厅

河南省教育厅
The Education Department Of Henan Province

河南省教育厅关于公布2018年度河南省示范性虚拟仿真实验教学项目立项建设名单的通知

教高〔2018〕991号

2018-11-21 15:55:08 【浏览序号：大 中 小】 来源：教育厅办公室

各本科院校：

根据《河南省教育厅关于2018-2020年开展示范性虚拟仿真实验教学项目建设的通知》（教高〔2018〕267号）和《河南省教育厅办公室关于开展2018年度省级虚拟仿真实验教学项目认定工作的通知》（教办高〔2018〕518号）要求，经学校申报、会评答辩公示，我厅确定郑州大学等100个虚拟仿真实验教学项目为2018年度立项建设名单，予以公布（名单见附件）。

各有关高校要发挥主体作用，加大经费投入，强化虚拟仿真实验教学团队建设，完善考核、奖励、监督机制和实验教学评价评价体系。项目建设团队要在坚持“虚实不虚”的基础上加大虚拟仿真实验教学项目建设力度并坚持对外开放，提供优质服务，为全省高等学校提供示范。各高校要积极探索和应用虚拟仿真实验教学项目建设成果，探索线上线下相结合的新型实验教学模式，促进实验教学数量稳步提高。我厅将适时组织示范性虚拟仿真实验教学项目的教学实践与效果、服务质量、持续更新等方面的跟踪监督和综合评价，对未达标的实验项目，将取消其立项建设资格。

附件：河南省示范性虚拟仿真实验教学项目立项建设名单.pdf

2018年11月15日

附件

2018年度河南省示范性虚拟仿真实验教学项目立项建设名单

（按照项目申报院校名称拼音排序）

| 序号 | 申报院校 | 项目名称 | 负责人 | 所属类别 | 有效链接网址 |
|----|----------|-----------------------|-----|-------|---|
| 1 | 安阳工学院 | 航空活塞发动机气缸磨损诊断虚拟仿真实验 | 杨庆祥 | 航空航天类 | http://www.aerosim.cn/admin.html |
| 2 | 安阳工学院 | 机械装置三维建模与仿真实验 | 王美美 | 机械类 | http://jxgcxy.bce184.ayqingfeng.cn |
| 3 | 安阳师范学院 | 第一印象形成的神经机制 | 王运彩 | 心理学类 | http://jyx.aynu.owvlab.net/virexp/xljy |
| 4 | 安阳师范学院 | 基于PLC控制的邮件分拣系统虚拟仿真实验 | 丁电宽 | 电子信息类 | http://xnfzsy.aynu.edu.cn/content.aspx?cid=3123 |
| 5 | 安阳师范学院 | 企业全景运营虚拟仿真实训 | 刘君 | 经济管理类 | http://xnfzsy.aynu.edu.cn/content.aspx?cid=3173 |
| 6 | 安阳师范学院 | 虚拟仿真情景心理训练项目 | 王宝玲 | 心理学类 | http://xnfzsy.aynu.edu.cn/content.aspx?cid=3127 |
| 7 | 河南财经政法大学 | 基于BIM-VR技术的工程造价虚拟仿真实验 | 张杨 | 经济管理类 | http://gc.huel.edu.cn/info/1085/3228.htm |

| 序号 | 申报院校 | 项目名称 | 负责人 | 所属类别 | 有效链接网址 |
|----|---------|------------------------------|-----|-------|---|
| 47 | 河南师范大学 | 淀粉酶高产菌的筛选、诱变、鉴定及应用虚拟仿真实验教学项目 | 陈广文 | 生物科学类 | http://www.obrsim.com:88/?id=hnsfswxy |
| 48 | 河南师范大学 | 共射共基组合放大电路 | 詹华伟 | 电子信息类 | http://ceee.henannu.owvlab.net/virexp/gsgj |
| 49 | 河南师范大学 | 红色场馆虚拟仿真教学资源开发与应用实验教学项目 | 李学志 | 教育学类 | http://www.htu.cn/vs1 |
| 50 | 河南中医药大学 | 怀菊规范化栽培3D虚拟仿真实训 | 苏秀红 | 药学类 | http://hjh.hactcm.edu.cn |
| 51 | 河南中医药大学 | 基于智能化的虚实结合吸痰术技能训练项目 | 秦元梅 | 护理学类 | http://hactcm.misrobot.com/pages/ostp/self-train.html |
| 52 | 河南中医药大学 | 家兔实验基本操作 | 李伟 | 医学基础类 | http://xnfz.hactcm.edu.cn/jcyx/jtsy.html |
| 53 | 河南中医药大学 | 头颈部危险穴位针刺安全操作实训 | 张大伟 | 中医类 | http://xnfz.hactcm.edu.cn/zyx/TBZC/TBZC.html |
| 54 | 河南中医药大学 | 中药百药煎饮片发酵技术 | 张振凌 | 药学类 | http://byj.hactcm.edu.cn/ |

河南师范大学文件

师大研〔2019〕19号

关于公布2019年河南师范大学 高等教育教学改革研究与实践项目（研究生 教育）立项名单的通知

校内各有关单位：

根据《关于申报2019年河南师范大学高等教育教学改革研究与实践项目（研究生教育）的通知》精神，经过个人申报、

附件

2019年河南师范大学高等教育教学改革研究与实践项目 （研究生教育）立项名单

| 项目批准号 | 项目名称 | 项目主持人 | 主要成员 | 项目类别 |
|-------------|--------------------------------|-------|-----------------------------|------|
| YJS2019JG01 | 基于创新能力的理工科研究生数学核心素养培养模式探索与实践 | 高福根 | 柴新宽、田长安、侯学萍、李海英、王振平、李晓春、赵振华 | 重点项目 |
| YJS2019JG02 | 分子模拟方法教学内容改革与实践 | 吕庆章 | 赵玉灵、曹益林、张霞光、杨英杰 | 重点项目 |
| YJS2019JG03 | 学科教学专业学位研究生科研创新能力培养的研究与实践 | 耿红卫 | 赵黎波、许相全、王晓丽、王子涵、高朝冉、钟佳霖、丛洋 | 重点项目 |
| YJS2019JG04 | 学科教学（美术）专业“硕师计划”研究生培养模式创新研究与实践 | 闫庆来 | 陈巍、张鹏飞、张玮玮、王贝贝、董心雨、李欣原 | 重点项目 |
| YJS2019JG05 | 电子信息专业学位研究生教育改革研究与实践 | 张瑜 | 史水娥、詹华伟、王旭、林芳丽、杨豪强 | 重点项目 |
| YJS2019JG06 | 交互式、立体式教学模式的构建——以基础代数为例 | 赵先鹤 | 左红亮、陈瑞芳、董会莉、化小会、董乐、杜蛟 | 一般项目 |



河南师范大学
Henan Normal University

结项证书

项目类别：河南师范大学高等教育教学改革研究与实践项目
(研究生教育) 重点项目

项目名称：电子信息专业学位研究生教育改革与实践

项目编号：YJS2019JG05

主持人：张瑜

主要成员：史水娥 詹华伟 王旭 林方丽 杨豪强

证书号：JXYJS2021003

该项目经审核，准予结项，特发此证。



河南师范大学
2021年12月28日

科研项目

| 序号 | 成员姓名 | 立项时间 | 立项单位 | 类别 | 项目级别 | 项目名称 | 参与名次 | 承担主要工作 |
|----|------|------|--------|----|------|--|------|--------------|
| 1 | 史水娥 | 2019 | 河南省教育厅 | 科研 | 省级 | 河南省高等学校重点科研项目，名称：基于 FPGA 的数字图像拼接算法的研究 | 主持 | 主持项目建设整体规划实施 |
| 2 | 张瑜 | 2020 | 河南省科技厅 | 科研 | 省级 | 河南省高等学校重点科研项目，名称：精密气体湿度测试仪研制 | 主持 | 主持项目建设整体规划实施 |
| 3 | 詹华伟 | 2019 | 河南省教育厅 | 科研 | 省级 | 河南省高等学校重点科研项目，名称：基于无线传感器网络的智能煤矿井下人员定位系统设计 | 主持 | 主持项目建设整体规划实施 |
| 4 | 詹华伟 | 2018 | 河南省科技厅 | 科研 | 省级 | 河南省高新技术领域科技攻关项目，名称：基于 Zigbee 技术的矿用无线定位感知管理系统设计 | 主持 | 主持项目建设整体规划实施 |

立 项 通 知

河南师范大学：

你单位申报的下列研究课题，经专家评审、省教育厅审核，已列为河南省高等学校重点科研项目计划，并以教科技〔2018〕506号文件批准下达。现通知如下：

项目编号：19B510006

项目名称：基于FPGA的数字图像拼接算法的研究

项目负责人：史水娥

项目研究期限：2019年01月01日--2020年12月31日

项目组成员：

| 排序 | 姓名 | 性别 | 单位 |
|----|-----|----|-----------------|
| 2 | 杨豪强 | 男 | 河南师范大学电子与电气工程学院 |
| 3 | 王芳 | 女 | 河南师范大学电子与电气工程学院 |
| 4 | 王燕 | 女 | 河南师范大学电子与电气工程学院 |
| 5 | 伍博 | 男 | 河南师范大学电子与电气工程学院 |
| 6 | 李春辉 | 男 | 河南师范大学电子与电气工程学院 |
| 7 | 马超 | 男 | 河南师范大学电子与电气工程学院 |
| - | - | - | - |
| - | - | - | - |
| - | - | - | - |
| - | - | - | - |

(项目组共7人)



河南省高新技术领域科技攻关项目

结项证书

豫科高（2020）420号

项目名称：精密气体湿度测试仪研制

立项时间：2017年1月

项目编号：172102210046

承担单位：河南师范大学

项目负责人：张瑜

项目参加者（共伍名）：

李雪萍 杨豪强 张洁寒 王富亮

王召迎

该项目提交的研究资料完整，总结报告系统详实，经审查，符合结项要求，准予结项。

河南省科学技术厅

高新技术发展及产业化处

2020年11月18日

结项形式：论文论著 研究报告 新设备

河南省高新技术领域科技攻关项目

结项证书

豫科高（2018）54号

该项目提交的研究资料完整，总结报告系统详实，经审查，符合结项要求，准予结项。

项目名称：基于 Zigbee 技术的矿用无线定位感

知管理系统设计

立项时间：2017年1月

项目编号：172102210336

承担单位：河南师范大学

项目负责人：詹华伟

项目参加者（共柒名）：

李雪萍 史水娥 杨豪强 刘伟娜

张瑜 李小青 刘洁

结项形式： 论文论著 研究报告 其他

河南省科学技术厅

高新技术发展及产业化处

2018年5月2日

河南省高等学校重点科研项目结项证书

【2019】0464号

该项目提交的研究资料完整，结项报告系统详实，经审查符合结项要求，准予结项。



项目名称：基于无线传感器网络的智能煤矿井下人员定位系统设计

立项时间：2016年07月01日

项目编号：17B510004

承担单位：河南师范大学

项目负责人：詹华伟

项目参加者（共7名）：

| 排序 | 姓名 | 性别 | 单位 |
|----|-----|----|-----------------|
| 2 | 史水娥 | 女 | 河南师范大学电子与电气工程学院 |
| 3 | 刘伟娜 | 女 | 河南师范大学电子与电气工程学院 |
| 4 | 杨豪强 | 男 | 河南师范大学电子与电气工程学院 |
| 5 | 张瑜 | 男 | 河南师范大学电子与电气工程学院 |
| 6 | 李小青 | 女 | 河南师范大学电子与电气工程学院 |
| 7 | 刘洁 | 女 | 河南师范大学电子与电气工程学院 |
| - | - | - | - |
| - | - | - | - |
| - | - | - | - |
| - | - | - | - |

结项等级：合格

教改论文类

| 序号 | 刊物名称 | 刊物期号 | 论文名称 | 作者类型 | 作者姓名/名次 |
|----|-------|---------------|------------------------------|------|---------|
| 1 | 教育现代化 | 2021. 3 (21) | 电子信息专业学位硕士研究生培养中的课程教学体系建设 | 主持 | 史水娥/1 |
| 2 | 教育现代化 | 2021. 11 (19) | 新工科背景下课程思政在电子信息类专业课教学中的探索与实践 | 主持 | 史水娥/1 |
| 3 | 高教学刊 | 2021. 7 (16) | 地方院校电子信息专业学位硕士研究生培养模式探索 | 主持 | 张 瑜/1 |
| 4 | 高教论坛 | 2021. 2 (2) | 电子信息类专硕学位论文的过程管理方法初探 | 主持 | 张 瑜/1 |

中华人民共和国工业和信息化部主管

ISSN 2095-8420

CN 11-9354/G4

教育现代化

光明课题

EDUCATION MODERNIZATION

第8卷

JIAOYU XIANDAIHUA 2021年3月第21期



ISSN 2095-8420



中國電子音像出版社

CHINA NATIONAL ELECTRONICS AUDIO-VIDEO PRESS



电子信息专业学位硕士研究生培养中的课程教学体系建设

史水娥, 张瑜

(河南师范大学 电子与电气工程学院, 河南 新乡)

摘要: 与学术型硕士研究生相比, 专业学位硕士更加突出实践能力和工程应用能力的培养, 更加能体现适应现代社会对工程应用型高层次人才的需求。要达到满足社会要求的专业学位研究生培养质量, 前提条件是建立科学的课程体系。针对目前高校电子信息专业学位硕士研究生培养中因课程体系不科学而引起的研究生质量较低, 不能满足经济社会对应用型人才的需求现状, 从课程体系构建、教学内容更新、教学方法改革、导师队伍组建等方面对课程教学体系进行了探索。

关键词: 电子信息; 专业学位; 课程体系

本文引用格式: 史水娥, 张瑜. 电子信息专业学位硕士研究生培养中的课程教学体系建设[J]. 教育现代化, 2021, 8(21):35-38.

The Construction of Course Teaching System in the Cultivation of Master Degree of Electronic Information Major

SHI Shuie, ZHANG Yu

(College of Electronic and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xinxiang Henan)

Abstract: Compared with academic postgraduates, professional postgraduates pay more attention to the cultivation of practical ability and engineering application ability, and can better meet the needs of modern society for engineering application-oriented high-level talents. In order to meet the social requirements of professional degree postgraduate training quality, the prerequisite is to establish a scientific and reasonable curriculum system. In view of the current situation that the quality of postgraduates is low due to the unscientific curriculum system, which can not meet the demand of economic society for applied talents, this paper explores the curriculum teaching system from the aspects of curriculum system construction, teaching content update, teaching method reform, and the formation of guidance team.

Keywords: electronic information; professional degree; curriculum system

一 引言

为了适应社会发展和经济建设对应用型人才的需要, 2009年, 国家开始面向本科应届毕业生招收全日制专业学位硕士研究生。教育部下发了《关于做好全日制硕士专业学位研究生培养工作的若干意见》, 文件中明确指出: 专业学位人才培养与学术型学位人才培养的是高层次人才培养的两个重要方面, 并指出了专业学位研究生的培养目标, 即专业学位

人才的培养应以市场为导向, 应具有较强的解决实际问题的能力, 能够承担专业技术或管理工作, 具有良好的职业素养^[1]。

2018年, 国务院学位委员会下发的《关于转发〈关于制订工程类硕士专业学位研究生培养方案的指导意见及说明的通知〉》文件中指出, 为更好适应国家经济和社会对高层次应用型人才的新需求, 全面贯彻党的教育方针, 落实立德树人根本任务,

基金项目: 本文系 2019 年河南省高等教育教学改革研究与实践项目 (2019SJGLX256) 及 2019 年河南师范大学高等教育教学改革研究与实践重点项目《电子信息专业学位研究生教育改革研究与实践》(YJS2019JG05) 的研究成果。

作者简介: 史水娥, 女, 河南省武陟人, 河南师范大学电子与电气工程学院, 副教授, 目前主要从事教学和教学改革研究工作; 张瑜, 男, 河南省沁阳市人, 河南师范大学电子与电气工程学院, 教授/高级工程师, 目前主要从事市场波类课程教学和电磁场与微波技术理论与应用研究工作。

进一步突出“思想政治正确、社会责任合格、理论方法扎实、技术应用过硬”的工程类专业学位研究生培养特色^[2]。

经过多年的建设和发展,专业学位研究生教育已培养了大量的高层次人才,培养的人才在我国的社会发展和经济建设中起到了很大的作用。然而,随着社会的快速发展和需求变化,专业学位研究生教育方法已呈现出较多的不适应,这就需要建立适合现代社会需求的培养模式^[3]。

为了提高电子信息专业学位硕士研究生的培养质量,满足社会对该领域人才的新要求,针对目前专业学位研究生培养方面出现的许多不足^[4-5],通过分析对电子信息专业学位研究生培养质量起关键作用的课程体系的现状,从课程体系构建、教学内容更新、教学方法改革、导师队伍组建等方面对课程教学体系进行了研究和探索。

二 电子信息专业学位研究生培养中课程教学体系现状

课程教学体系是教学大纲中最重要的组成部分,是指导各个教学环节的主要依据,更是决定人才培养质量的关键因素。通过对目前多数高校,尤其是地方院校电子信息专业学位硕士研究生培养中的课程教学体系分析,存在的不足主要体现在如下几个方面:

(1) 培养特色不明显。我国在设置专业学位之前进行了长时间大量的学术型学位研究生培养,建立了一套较为完整的学术型学位研究生培养的课程体系,也对研究生的培养积累了较好的经验。在构建专业学位研究生培养的课程体系时,基本上都是借用学术型学位研究生培养的课程体系,或在此体系上进行一定量的修改,增加教育部要求的公共课,减少理论课,适当增加实践课程。这种课程体系由于与学术型学位研究生课程没有本质差别,且理论与实践应用结合不够紧密,或者缺乏实际可操作性,更缺少真正与实际工程应用相关的校内外实践课程,因此相对学术型学位研究生培养,这种课程体系没有明显的专业学位研究生培养特色,不可能培养出具有较强实践和工程能力的应用型高层次技术人才。

(2) 课程内容不完善。目前,专业学位研究生教学中的教材大都与学术型学位研究生的教材相同,甚至很多课程都是两类研究生一起上课。这些课程一是理论性较强且相对较难,超过了对专业学位研究生的要求,学生学习比较吃力;二是课程的部分内容已经陈旧,在现实工程中已经很少应用,且许多内容与实际工程应用联系也不紧密;三是课程内容涉及到的新技术和前沿技术较少,不能体现时代

发展需要。另外,目前专门针对专业学位硕士研究生培养的教科书还很少。

(3) 教学方法不灵活。目前,绝大部分理论课仍采用“纯理论课堂讲授”方式,很少引入实际工程案例教学;实验课程教学也采用“教师统一指导”方式,很少能够针对不同的学生实行“单独定制”。这种授课方式使得教师与学生在课堂上互动性不强,学生只是单纯学习理论知识,不了解知识的实际应用,不能学以致用,更不利于激发学生理论学习理论的积极性和为解决问题而进行实验的热情。

(4) 导师队伍不健全。由于高校入门政策的限制,目前高校中具有学术与工程兼顾的“双师”型教师较少,绝大多数教师,尤其是青年教师的学术水平较高,但是绝大多数由于缺乏工程过程的历练,其工程应用能力较低。由于专业学位研究生更注重实践和工程应用能力的培养,因此,这些教师可以是一个优秀的学术型学位研究生导师,但不是优秀的专业学位研究生导师。这类教师很难将较多的实际工程案例融入到教学内容中,也不易指导好具有实际工程应用的学位论文,更不利于培养出应用型高层次技术人才。

三 电子信息专业学位硕士研究生培养课程教学体系建设

为提高我校电子信息专业学位研究生的培养质量,结合我省本专业的发展现状和我校所处环境条件,树立“面向国家需求、立足区域发展、强化工程应用、发挥特色创新”的培养理念,确定“宽认知、厚基础、强实践、促创新”的人才培养思路。针对专业学位研究生培养中课程体系中存在的不足,从以下几个方面对课程教学体系进行了改革。

(1) 课程体系构建

在课程体系构建中,遵循“坚守硕士学位应有的理论性、突出专业学位注重的应用型、坚持技术发展的前沿性”思路,通过公共基础课程、专业基础课程、专业课程和拓展课程建立了课程体系的基本架构。在具体课程设置上,以拓宽知识解决学生知识广度不足,以夯实基础解决学生专业技术深度不够、以强化实践解决学生工程实践能力不强、以发展个性激发潜能解决学生创新素养不强为原则,以电子信息产品设计、科研项目完成、工程问题解决为导向,构建电子信息专业学位硕士研究生课程体系。不同的课程培养学生不同的能力,培养能力及其对应的课程主要分为三方面:

①理论课程不仅培养学生具有较好的科学素养,而且要使得学生掌握的理论知识强于本科生的深度,更注重理论课程与工程实践的密切联系。在理论课

到课程实践的目的。强实践性课程采用项目驱动式教学方法。如当实践课程为课程设计、CDIO等课程时,先设定要解决某个问题或完成某个项目,然后根据这个问题或项目进行分析、论证,给出论证方案与指导教师进行讨论。确定方案框架后再进行方案详细设计,并进行仿真实验和优化。最后在校内外实践平台进行制作、测量、检验等过程,直至最后完成项目或解决问题。当课程为工程型强的课程时,让学生直接参与到实际工程项目中去,在教师的指导下组团或独立完成工程项目。这些工程项目来源于教师科研项目、实践基地提供的项目、大学生创新项目、学生自定项目。

(4) 导师队伍组建

根据目前高校教师的现状,按分类聘任和分类管理模式组建导师队伍。第一类是学术水平和实际工程能力都较高的“双师型”导师,他们可以直接作为专业学位研究生导师。第二类是学术水平较高,但工程应用能力较弱的导师采用组合式导师制。将该类教师与具有实际工程经验的其它教师组成导师组来一起指导学生。第三类是年轻导师,他们大多数具有较好的理论功底,某一方面的学术水平较高,但是知识面可能较窄,尤其是缺乏工程实践经验,因此就更需要进行实际工程项目的锻炼和知识的拓展。进入到相关的企业、院所进行工程能力学习和锻炼,或积极介入到其它教师的工程项目中进行锻炼和提高,从而尽快提高自己的工程应用能力和拓展知识。这类导师最好与有大量实际工程经验的企业导师一起组成双导师制来指导专业学位研究生。

无论哪一类导师,最好都应根据相近的研究方向组建导师组,本导师组中的导师之间可以相互学

习、相互借鉴、相互补充,该导师组内的学生们也可以得到组内其它导师的指导,这样不仅有利于发挥各位导师的优势,而且也有利于学生间相互学习、共同促进,更能增强学生之间的团队合作精神。

四 结语

课程教学体系是研究生培养的基础,也是培养人才质量的关键。尽管根据电子信息专业学位研究生的培养目标以及目前在课程体系上存在的问题构建了相对科学的新课程教学体系,能有效地提高专业学位研究生培养人才质量,也能够培养具有一定的理论知识和前沿技术、实践能力和工程应用能力高的技术人才,但是由于电子信息领域行业发展很快,新理论、新技术层出不穷,再加上本文建立的新课程体系也肯定不是最优,因此需要根据时代和社会发展不断进行优化和改进。

参考文献

- [1] 教育部关于做好全日制硕士专业学位研究生培养工作的若干意见[EB/OL].[2009-03-19]. http://www.moe.gov.cn/srsite/A22/moe_826/200903/t20090319_82629.html.
- [2] 关于转发《关于制订工程类硕士专业学位研究生培养方案的指导意见》及说明的通知[EB/OL].[2018-05-04]. http://www.moe.gov.cn/s78/A22/tongzhi/201805/t20180511_335692.html.
- [3] 桂志国,赵冬娥,王晨光.电子与通信工程全日制专业学位硕士人才培养模式的研究实践[J].中国教育技术装备,2014(4):7-9.
- [4] 于爱国,梁德东,马本华,等.综合性研究型大学发展专业学位研究生教育面临的问题与对策[J].学位与研究生教育,2013(1):53-56.
- [5] 贾丙辉,薛小强,王云霞,等.以创新应用能力为核心的专业学位研究生课程体系构建[J].教育现代化,2020,7(39):114-117.

中华人民共和国工业和信息化部主管主办

ISSN 2095-8420

CN 11-9354/64

教育现代化

教育现代化

现代教育

EDUCATION MODERNIZATION

第8卷

JIAOYU XIANDAIHUA

2021年11月第91期

2021年11月第91期



ISSN 2095-8420



中国电子音像出版社

CHINA NATIONAL ELECTRONICS AUDIO-WORD PRESS



“新工科”背景下课程思政在电类专业课教学中的探索与实践

史水娥, 张瑜, 张林庆

(河南师范大学 电子与电气工程学院, 河南 新乡)

摘要:为培养高素质创新型复合型人才,要牢固树立“育人为本、德育为先”的理念,围绕“高道于教、高德于教、高教于乐”的建设目标,实现价值塑造、知识传授和能力培养“三位一体”的紧密融合,全面推进课程思政建设。本文以《数字电子技术》课程为例,将课程思政元素有机融入课程教学,系统介绍了课程思政的总体设计情况以及教学实践情况、课程特色与创新以及课程评价方法等。

关键词:课程思政;数字电子技术;三位一体;混合式教学法;两性一度

本文引用格式:史水娥,张瑜,张林庆.“新工科”背景下课程思政在电类专业课教学中的探索与实践[J].教育现代化,2021,8(91):104-107.

Exploration and Practice of Course Ideology and Politics in the Teaching of Electrical Specialty under the Background of New Engineering

SHI Shuie, ZHANG Yu, ZHANG Linqing

(School of Electronic and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xinxing, Henan)

Abstract:In order to cultivate high-quality innovative and versatile talents, it is necessary to firmly establish the concept of “educating-oriented, moral education first”, centering on the construction goal of “combining Tao with teaching, combining morality with teaching, and combining teaching with fun”, realize the close integration of value shaping, knowledge impart and ability cultivation, and comprehensively promote the ideological and political construction of the curriculum. This article takes the course of “Digital Electronic Technology” as an example, integrates the ideological and political elements into the course teaching, systematically introduces the overall design of the ideological and political course, the teaching practice, the characteristics and innovation of the course, and the course evaluation methods.

Keywords:course education; digital electronics technology; trinity; mixed teaching method; once the sexes

一 引言

在全国高校思想政治工作会议上,习近平总书记明确强,在课堂教学过程中,各类课程要与思想政治理论课程同向同行,形成协同效应。

课程思政指的是以构建全员、全程、全课程育人格局的形式,将各类课程与思想政治理论课同向同行,形成协同效应,把“立德树人”作为教育的根本任务的一种综合教育理念。数字电子技术作为电类专业的基础课,在培养方案中占有重要的地位,该课程具有很强的实践性,为后续学好通信类课程和数字集成电路设计等做铺垫。

本文以《数字电子技术》课程为例,深入挖掘和梳理课程教学中蕴含的深刻哲学道理和现实意义,

将课程思政有机融入到教学中,在向学生传授课程知识的同时,让学生树立正确的价值观,激发学生浓厚的爱国情怀,承载起实现中国民族伟大复兴中国梦的责任。

二 课程思政建设总体设计情况

以立德树人为根本任务,结合工科类专业特点和师范学校特色,坚持问题导向,遵循教学规律,坚持与时俱进,坚持协同育人,通过实践育人、课程育人、组织育人、网络育人四种途径,有效实施三位一体的课程思政目标。

(一) 课程思政目标

在引导学生进行知识学习与能力培养的工程中,

基金项目:2019年河南省高等教育教学改革研究与实践项目,项目编号:2019SJGLX256;2019年河南师范大学高等教育教学改革研究与实践重点项目,项目编号:YJS2019JG05。

作者简介:史水娥,女,河南武陟县人,河南师范大学副教授,硕士生导师,研究方向:射频电路系统设计。

修炼工程伦理素养,培养创新精神和大国工匠精神,增强忧患意识和民族意识,厚植家国情怀,强化责任担当,弘扬奉献精神,成就师德养成,寓道于教、寓德于教、寓理于教。

(二) 课程思政内容

深入发掘和梳理课程教学中蕴含的深刻哲学道理和现实意义,紧扣时代脉搏,结合国际形势、热点时事、脱贫攻坚、国史与党史的思想政治素材,灵活地将课程思政目标融入到课程的专业实践、理论教学和竞赛指导等各个环节,达到润物细无声的良好育人效果。

以《数字电子技术基础》课程为例,课程思政教学内容和目标是:

(1) 在深刻理解逻辑电路的工作原理的基础上,学会使用辩证唯物主义思维和科学严谨的态度来分析问题、解决问题。

(2) 在掌握常用逻辑器件的使用方法基础上,注重强化学生的工程伦理教育。

(3) 在学习逻辑电路的设计与制作基础上,培养学生精益求精的大国工匠精神。

(4) 在了解集成芯片的发展历程基础上,了解当前的“卡脖子”技术,培养学生科技报国的家国情怀,增强科技强国的使命担当。

(5) 在掌握较复杂逻辑电路设计的基础上,培养学生以改革创新为核心的时代精神。

(6) 数电子技术发展迅速,扩充前沿知识,了解国际形势,正确认识我国集成电路现状和发展方向,培养学生的全球视野,扩大他们的思考问题的格局。

(三) 课程思政方法

实操演练法:通过一系列小器件的设计、制作指导,引出科学精神、创新精神和大国工匠精神教育。

由小见大法:从小小的芯片引出“卡脖子”技术问题,实施忧患意识教育和家国情怀教育。

正反结合法:从定时器的正反应用、信息加密解密,提升工科学生的工程伦理素养。

场景体验法:通过参观高技术企业和体验虚拟现实,提升学生奉献社会的责任担当。

三 课程思政教学实践情况

基于对专业特色和课程特点的把握,多层次挖掘思政教育资源,丰富课程内容,通过借助现代教育手段以及任务驱动模式,有效地开展课程思政教学实践任务,将立德树人根本任务落实。

(一) 把握课程基础性、实践性特征

本课程讲授的是现代数字电子技术中最基础、最重要的知识,既有一般工科类专业的实践性,又

有为后续课程学习以及电子、电气、通信和计算机课程学习做铺垫的基础性。对该特征的深刻把握,是课程思政教育资源挖掘和教学模式选择的基本依据。

(二) 多层次挖掘课程思政教育资源

在理论知识教学方面,通过讲授本学科发展历程,选取代表人物的典型事迹,引导学生树立为国家、为真理奋斗的拼搏精神;通过讲授数字电路的基本原理,来印证马克思主义辩证法和唯物历史主义的正确性;通过介绍中国在该技术领域所处地位以及面临的挑战,结合“瓦森纳协定”和“中兴、华为事件”,引导学生将个人专业学习与社会发展、国家富强结合起来,培养他们的科学精神、奉献精神和家国情怀,进而端正世界观、人生观、价值观,树立远大理想,担负起民族复兴的伟大使命。

在实践教学方面,通过一系列特定器件的设计,培养学生精益求精的大国工匠精神,激发学生科技报国的爱国热情,如讲授倒计时牌的设计可以和国庆70周年相结合,激励学生为国奉献、分秒必争;还可以通过器件特定功能的应用探讨,融入工程伦理教育,如定时器应该用于提醒和自动控制,以节约人力资源,提升工科学生应具备的伦理意识、质伦理规范和伦理决策三大工程伦理素养。

在竞赛指导、毕业设计方面,通过比赛项目辅导和过程管理以及设计目标的确立与实现,逐步培养学生的竞争意识和创新精神,引导学生平衡自我与他人、理论与实践、理想与现实的关系。

(三) 多模式开展课程思政教学实践

采用“线上+线下”混合式教学方法。灵活运用自媒体、网络资源、AR技术、VR技术等,借助本课程在中国大学MOOC(慕课)的线上资源,让学生在完成基础知识的自我学习,进而预留出更多时间用于线下课堂答疑和器件设计探讨。通过线上线下的生生互动、师生互动、言传身教等,切实增强学生对待事物勇于探索的进取精神与善于解决问题的实践能力,引领学生学思结合、知行统一。

运用“任务驱动”的实践指导模式。在实践活动中,以特定任务为驱动,结合自主学习、团队协作和作品评估,在提高学生们的学习效果、发现问题解决问题的能力与创新意识的同时,培养出学生们探索未知、追求真理、勇攀科学高峰的责任感和使命感。

四 课程特色与创新

在分析课程教学内容的基础上,深入挖掘每个知识点蕴含的思政元素,充分发挥线上、线下混合教学的优势,开发出一整套适合本门课程混合式教学的课程思政案例库,有效实现课程思政立德树人、育人功能。

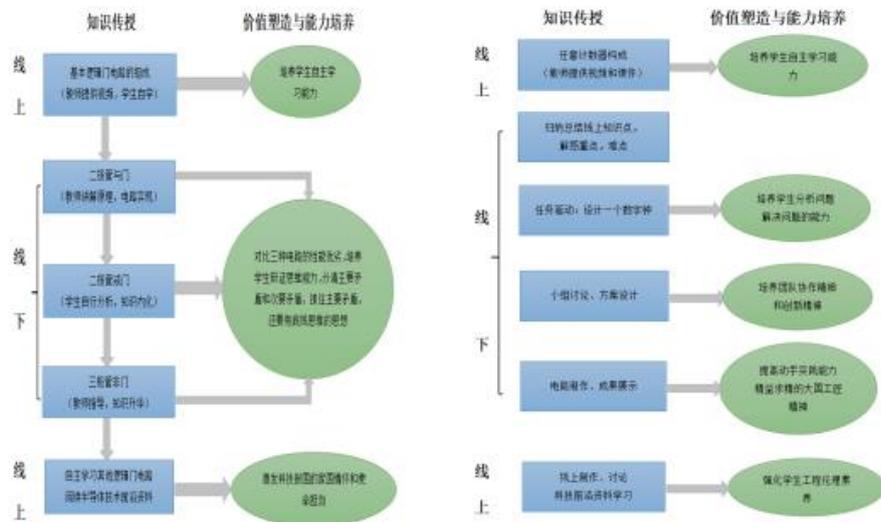


图1 线上线下混合式教学

在以学生为中心教学理念的指导下,采用线上线下混合式教学,学生通过观看线上视频完成线上测试与作业,参与线上讨论等形式,主动参与教学,营造良好学习氛围,进一步提升教学的效果;在线下课堂讲授时,应与多媒体教学相结合,根据教学内容,组织小组讨论和案例演示等活动,以培养学生的创新精神和团队合作精神;同时,通过为学生推送科技前沿和学科最新研究成果等方面的资料,激发大学生科技报国的情怀。在线下教学过程中要注重理论联系实际,培养学生勇于探索的创新精神和解决实际问题的能力。

采用线上线下混合式教学模式,课程资源丰富,教学设计新颖,课程思政元素体现在课堂的角角落落,有效调动了学生学习的积极性,课堂气氛活跃,提高了课堂教学效率和教学效果。以打造为课程思政样板课程为主要目标,并实现与本地课堂的紧密结合,同时将进行实践课程的思政教学,做到思政元素在理论课和实践课的双融合,提高学习效果,达到思政元素润物无声的育人目标。

五 典型教学设计案例

案例1:在讲述CMOS电路的优势时,将PMOS、NMOS与CMOS三种电路的开关工作速度和功耗方面进行列表对比,得出结论:CMOS电路具有明显的优势,CMOS制造工艺是当今的主流。此

时,不禁要问:中国的集成电路现状如何呢?集成电路已成为支撑中国发展的战略物资,而集成电路技术是国家实力竞争的战略制高点。2018年4月,美国政府宣布启动对中兴通讯制裁,断绝其美国供应链,对中国集成电路产业进行限制。所以中国在制造工艺必须走自主研发道路。从2008年国内130纳米工艺量产到现在整体水平达到28纳米,部分产品进入14-7纳米,已经形成综合制造能力。从这些事实和数据上,学生无形当中感受到爱国主义教育,增强科技报国的决心,意识到自己的社会责任和使命担当。同时课堂上让同学们查阅阻碍中国高科技发展的“卡脖子技术”有哪些,或推送资料《2021-2025年中国集成电路产业投资分析及前景预测报告》到线上教学平台,全方位地培养学生的家国情怀和忧患意识。

案例2:在组合逻辑电路设计过程中,第一步就是对所需设计进行逻辑抽象,许多情况下,所提出的设计需求是以文字形式表达出一个具有一定因果关系的事件,因此就需要分清何为因、何为果,因不能在果之后发生。然后通过抽象的方法确定输入输出变量,再用一个逻辑函数来描述这一因果关系。教师通过质疑或提问的形式,逐步列出逻辑抽象结果。若倒因为果,或者倒果为因,就会歪曲事实,得出荒谬的结论。很自然地培育学生用因果辩论关系增强认识问题与解决问题的能力,只有全面把握发展的方向运行,才能达到所需要的结果,培育学

生的辩证唯物主义世界观。

案例3:在讲授由门电路组成的施密特电路时,必须重点阐述电路中正反馈的过程,才能让同学们更好地理解施密特触发器的工作过程。输入信号由0逐渐升高到门电路的阈值电压时,迅速激发一个正反馈过程,使电路的状态迅速地转换为高电平,加速了输出信号的变化过程。此时教师可以举一个形象的例子,如在企业中,将企业工人工作积极性调动起来,就会使企业的经济效益变好,工人的收入也会增加。而企业的经济效益好,企业工人的收入增加,反过来又进一步调动工人的生产积极性。这就像一个正反馈过程。同样的也可以让同学们发散思维引申到人民幸福、国家富强、民族振兴三者的关系,这不正是中国梦的本质吗?人民幸福又都与国家和民族的前途命运紧密相关。国家好,民族好,人民才会好。无形之中培养同学们的国家、民族、人民三者合一的爱国情怀,增强归属感、责任感和使命感。

案例4:在介绍选频网络的基本概念时,首先介绍它的基本功能和特点:选频网络可以提取出信号中我们所需频率分量,同时滤除无用频率分量;然后介绍它的构成,LC的串联连接或者并联连接形式。大学时期是学生世界观、人生观形成的重要时期,在这个知识点准备采取形象比喻方式,利用对专业知识体系的形象比喻,引导学生回归学习本位。一个人要提高学习效率,必须最大限度规避各种外界和自身的干扰,必须要有抑制其他干扰的自制能力。比如上课时关掉手机,不挂念微信、QQ、各种游戏、抖音,同学们自身还要有强烈的学习愿望和定力,有自己的学习奋斗目标。当下学生学习效果普遍不佳,重要原因之一就是干扰太多,需要告诫同学们静心学习的重要性。只有全身心地投入学习,才能提高效率,取得好的学习效果。

案例5:在介绍电流概念时候,可以引入西汉《淮南子·坠训形》中对电学方面的相关记载,如“阴阳相薄为雷,激扬为电”,这句话的意思是阴阳两气彼此相迫产生雷,相互急剧作用产生电,让学生了解到中华民族文化的源远流长,培养学生的民族自信心和自豪感;同时结合其他古代电学相关的记载,指出我国由于近代封建统治者盲目自大闭关锁国,而造成了我国近代科学的严重落后,处处受制于人,以及我国目前科技发展现状,从而激发学生们对祖国命运的责任感,使他们能把目前的学习与将来的祖国现代化建设密切联系起来,培养学生对祖国前途命运的忧患意识,增强民族复兴的责任感。

六 课程评价机制建设

课程考核评价采用过程评价和终结评价、线上线下相结合的方法。线上过程化评价成绩占总成绩的40%,线下期末考试占总成绩的60%。其中线上过程考核环节包括课件视频学习、作业单元测试、

讨论参与度和科技前沿资料阅读等,线下过程考核环节包括考勤、小组讨论作品展示、课外实践、思政基地参观学习 and 期末考试等。

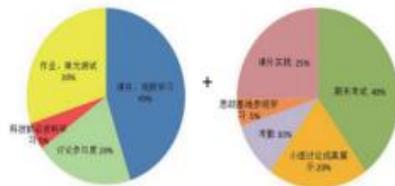


图2 线上过程化评价40% 线下过程化评价60%

七 结语

课程思政的提出由来已久,更好地将专业课与思政教学结合起来需要团队的不懈努力,不断结合教师学生的需求以及现代化技术持续的探索前进的方向。本文通过挖掘工科专业基础课程里所含有的思政元素,在课程建设资源和教学知识点讲述时加以巧妙地融入,通过“数字电子技术”的教学实践,灵活有效地实现了价值塑造、知识传授和能力培养“三位一体”的紧密融合。并且基于MOOC平台的线上资源,采用线上线下的教学模式,培养了学生的自主学习能力以及创新意识。在传授知识的同时也将思政元素潜移默化地深入人心,使社会主义核心价值观内化于心,外化于行。

参考文献

- [1] 戚凤敏.《数字电子技术》课程思政建设探讨[J].电子世界,2019,0(6):106-106.
- [2] 刘悦婷.将课程思政融入《数字电子技术》课程的教学探索[J].兰州文理学院学报:自然科学版,2019,33(3):120-122.
- [3] 魏丹丹,李文轩,于银山.应用型本科院校《数字电子技术基础》课程教学改革探讨[J].黑龙江科学,2019,0(5):90-91.
- [4] 于跃,徐今强,杨燕霞.应用型高校自动化专业电力电子技术教学改革探索[J].科技资讯,2020,18(10):74-74.
- [5] 高德毅,宗爱东.课程思政:有效发挥课堂育人主渠道作用的必然选择[J].思想理论教育导刊,2017,0(1):31-34.
- [6] 罗翰然.“课程思政”视域下高校课程教育与思政教育协同育人路径研究[J].吉林教育,2020(26):93-94.
- [7] 李丽,岳娇,袁阿娟.“课程思政”与“线上+线下”实践教学模式的探索与构建[J].教育教学论坛,2020,(52):59-60.
- [8] 陈洪彦.高校思政线上线下混合教学模式研究与实践[J].长江丛刊,2020,(34).
- [9] 把思想政治工作贯穿教育教学全过程[N].人民日报,2016(010).
- [10] 廖宇峰.《数字电子技术》课程中应用混合式教学的实践与研究[J].科技视界,2021(2):25-26.
- [11] 林树森.《电子技术基础》混合式课程教学设计与探索[J].电子测试,2020(23):119-120.
- [12] 胡本海.高校课程思政的价值内涵和实施策略[J].贵州工程技术学院学报,2019,37(6):139-143.

双一流·中文核心期刊
教育学学科最受欢迎期刊
中国人文社会科学核心期刊
(2018版新刊入库)

高教学刊

Journal of Higher Education

- 《中国人文社会科学引文数据库》收录期刊
- 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊
- 《国家哲学社会科学学术期刊数据库》收录期刊
- CNKI系列数据库收录期刊
- 《中国期刊全文数据库》收录期刊
- 《中国学术期刊网络出版总库》收录期刊
- “万方数据—数字化期刊群”全文上网
- 《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊
- 《中文科技期刊数据库》收录期刊
- 《中教数据库》收录期刊
- 《超星期刊域出版系统》全文收录期刊



第7卷 第16期
Vol.7 No.16

2021年6月(上)

地方院校电子信息专业学位硕士研究生培养模式探索*

张瑜,史水斌,詹华伟

(河南师范大学 电子与电气工程学院,河南 新乡 453007)

摘要:专业学位研究生是我国根据社会和经济的发展需要而设立的一种与学术型学位研究生地位等同的研究生学位类型,它着重培养具有实际工程应用能力的复合型高层次技术人才。通过对目前专业学位硕士研究生实践能力不足的原因分析,对地方院校电子信息专业学位硕士研究生培养方法进行了探索,从培养目标、课程体系、教学内容与方式、导师队伍建设、实践基地建设、评价体系建设等方面建立了与地方院校电子信息专业学位研究生培养目标相适应的人才培养模式。

关键词:专业学位;电子信息;培养模式;地方院校

中图分类号:G643

文献标志码:A

文章编号:2096-000X(2021)16-0008-05

Abstract: According to the needs of social and economic development, professional degree postgraduates are established in China, which is a kind of postgraduate degree equivalent to academic degree graduate student. It focuses on cultivating integrated high level specialists with practical engineering application ability. Through the analysis of the current professional degree postgraduates lack of practical ability, the cultivation methods of professional degree postgraduates in electronic information major in local colleges has been explored. From the aspects of training objective, course system, teaching content and method, construction of tutor team, construction of practice base and construction of evaluation system, a talent training mode suitable to the training objective of electronic information major postgraduates in local colleges and universities has been established.

Keywords: professional degree; electronic information; training model; local colleges

社会和经济的发展需要科技,科技的进步需要各种高级人才,具有硕士、博士学位的高级人才在我国的各行各业做出了很大贡献。随着现代社会、国防和经济的快速发展,不仅需要能够进行科学研究的学术型研究生,也需要能够解决工程实际问题的应用型研究生。

1985年,我国开始了工程类硕士研究生培养,当时主要侧重于科学研究和教学,培养的研究生授予工学硕士学位^[1]。为了适应我国经济和社会的快速发展的需要,1997年,国务院批准设立工程硕士专业,授予工程硕士学位,主要以在职研究生培养为主。2009年,国务院调整优化研究生教育类型结构,开始面向本科应届毕业生招收全日制专业学位硕士研究生^[2]。目前,专业学位研究生已占研究生培养总数的50%以上,培养的人才在社会发展和经济建设中起到了很大的作用,取得了优异成绩。

2009年前,电子信息领域的专业学位研究生专业名

称为电子与通信工程。2018年,国务院学位委员会对工程专业学位类别进行了调整,电子与通信工程和其他几个相关方向的专业学位统一归属为电子信息专业学位。

随着以物联网、新一代移动通信技术、人工智能、机器人、无人飞机等为代表的电子信息技术高速发展,对电子信息领域高层次应用型技术人才的需求也日渐增长,社会对于电子信息专业学位硕士研究生的要求也呈现出了新的特征。不仅要求学生具备扎实的理论专业知识,而且更要具备较好的实践能力和对实际工程项目的处理能力,同时也要具备宽广的知识结构和较多的技术前沿知识。针对目前社会和经济建设对专业学位硕士研究生的新要求,以及目前专业学位硕士研究生培养方面出现的许多不足,结合国家、省电子信息行业的需要和学校所处的环境,对属于地方院校的电子信息专业学位硕士研究生教育进行了新的人才培养模式探索。

* 基金项目:2019年河南省高等教育教学改革研究与实践项目“基于《数字电子技术》课程线上线下混合式‘金课’的研究与实践”(编号:2019SJGLX256);2019年河南师范大学高等教育教学改革研究与实践重点项目“电子信息专业学位研究生教育改革研究与实践”(编号:YJS2019JG05)

作者简介:张瑜(1963-),男,汉族,河南沁阳人,本科,教授,院系主任,曾先后主持国家863项目、自然科学基金、国防预先研究项目8项,省部级研究项目14项,参与研究项目数10项,在不同的学术刊物上发表论文100余篇,获得授权专利56项,获部、省、市科技成果奖多次。研究方向:场效应课程教学和电磁场与微波技术理论与应用研究;史水斌(1976-),女,汉族,河南武陟人,硕士,副教授,研究方向:教学和教学改革研究;詹华伟(1979-),男,汉族,河南驻马店人,硕士,副教授,研究方向:智能电子设计与应用类教学和教学改革研究。

一、专业学位研究生培养现状

我国设立专业学位研究生学位已有二十多年,由于受学术型学位研究生培养模式的影响,以及地方院校的许多条件所限,在培养上没有能紧跟社会和经济发展的步伐,使得专业学位研究生的教育远远落后于社会与经济发展的需要。其毕业生实际应用能力较低,不能直接为用人单位所使用。形成这一现象的原因,就是专业学位研究生教育与社会需要的实际应用产生了较大的脱节,主要体现在培养模式上存在较大的不足。通过对国内许多地方高校电子信息专业学位研究生教育培养模式的调研和分析,结合国家和现今社会对该领域专业学位研究生的能力要求,培养中主要体现以下几方面的不足:

(一)培养目标定位不准,管理部门重视程度不够

部分地方高校可能没有充分认识到在高层次人才培养方面专业学位与学术学位具有同等重要作用,因此没有将两者的培养放到同等地位,或者说重视程度不够,从而不自觉地降低了培养标准,使得毕业生的质量不高。

(二)课程体系不完善

高校在培养专业学位研究生的课程体系上主要有三种方式。一是基本上按照学术型硕士研究生的课程体系进行教学,或者只是在原来学术型研究生的课程体系上进行了较小部分改进。这类情况目前在重点学校较少,在地方院校较多。二是在原来学术型研究生的课程体系上进行了一定改进,增加了一定量的实践课程,但理论与实践结合不够紧密。这一类的学校目前较多,尤其是地方院校最多。三是基本构建了专业学位研究生培养的课程体系,也增加了工程应用型课程。这类学校绝大多数是重点高校,地方院校很少。

(三)导师队伍质量不高

电子信息专业学位研究生培养的导师和授课教师不仅要具备较高的专业知识,同时要懂工程且要具有工程实践经验。事实上,在高校内部这样的导师较少。近年来,进入到高校的教师绝大多数都要求具有博士学位,且有高水平的论文或承担高级别的项目,但是承担的工程应用项目很少,工程实践能力不足,因此不适合作为更注重工程实践能力培养的专业学位研究生导师,从而使得专业学位研究生培养的师资力量欠缺。

(四)产学研合作培养困难

产学研合作培养是完成专业学位研究生教育的重要组成部分。在学校建立实践实训基地是可行的,学校的所有实验室也可对研究生培养进行开放,但是受学生人数较多、担心商业秘密外泄、缺少相关的鼓励政策、实习经费很少等因素所限,在与企业建立校外实践基地方

面存在较大的困难。

(五)评价体系不完善

目前按同学术型研究生一样的学习成绩评价体制不能够对学生的知识和能力进行有效评价。不仅不利于激励学生在注重专业知识学习的同时加强实践能力的培养,而且在一定程度上还会打击学生进行工程实践能力培养的积极性。

二、电子信息专业学位研究生培养模式探讨

为了进一步提高电子信息专业学位硕士研究生的培养质量,针对目前存在的不足,在培养模式上着重关注五个方面。1.以培养素养、提高综合知识应用和解决实际工程问题能力等为目标设置核心课程;2.以理论与应用的有机结合,突出案例分析和实践优化教学内容;3.以奠定坚实基础理论和拓宽知识领域重构专业知识;4.以较强解决实际问题,能够承担专业领域技术或管理工作强化专业技能;5.以良好职业素养、团队协作、创新思维等培养职业素质。具体的培养模式如图1所示。



图1 电子信息专业学位硕士研究生培养模式框图

(一)明确培养目标,彰显培养特色

根据2018年国务院学位委员会发布学位办[2018]14号文件中对专业学位研究生培养提出了突出“思想政治正确、社会责任合格、理论方法扎实、技术应用过硬”的工程类专业学位研究生培养特色的要求^[1],结合我校办学总的指导思想和我们电子信息专业学位硕士研究生教育这一工科性质而在师范院校中开办的实际情况,又考虑我们尽管处于电子工业不太发达的省份,但是学校周边又有几个可以为本专业提供较好支撑平台的电子信息行业的央企和研究所,这些有利条件,在坚持“面向国家需求、立足区域发展、强化工程应用、发挥特色创新”的培养理念下,确定了“宽认知、厚基础、强实践、促创新”的特色人才培养目标。

(二)设置科学合理的课程体系和改革教学内容与方式

1. 课程体系构建

在课程设置上,以拓宽知识解决学生知识广度不足,以夯实基础解决学生专业技术深度不够、以强化实践解决学生工程实践能力不强、以发展个性激发潜能解决学生创新素养不强为原则,以电子信息产品设计、项

目完成、工程问题解决为导向,通过整合现有课程,拓宽基础课程,强化实践课程等构建具有工程型、复合型的高层次电子信息专业学位硕士研究生课程体系。课程体系主要由专业基础课、专业课和拓展课程三类组成,并用必修和选修的方式以理论课程、实践课程与拓展课程来呈现。

(1)理论课程的设置上既要能够培养学生较好的理论素养,又能使得理论知识相比本科生有一定的深度和广度,并且更加注重理论的实用性,使理论与实践紧密结合。

在理论课程中,内容、学时上都少于学术型学位研究生的相应课程,去掉了学术型学位研究生课程中理论复杂且实用性很少的内容。根据电子信息专业学位研究生解决实际问题时所应用数学知识较多且相对较深的现实,增加了一定量的工程数学课程。在专业课程中,首先根据专业培养确定的研究方向分成两个课程群,即智能电子设计与应用课程群和场波信号处理与应用课程群。每个课程群下由几门课程组成,这些课程一定要在本科知识的基础上有一定的深度。

(2)实践类课程是专业学位研究生培养的重点,主要分为三类。第一类为基础综合实践课程,不仅设置专门的综合基础实验课程,而且在每门专业课程中几乎都增加了随课程实验,以便对电子信息领域内应掌握的实践技能进行实训、综合应用。第二类为应用实践类课程,不仅设置了较大量课程设计、CDIO等实践课程和小项目工程实践,而且专门增加了一定量的专业综合实践课程,真正让学生利用校内实践基地进行项目或课题全过程的实践或实训,以达到培养实际工程能力的目的。第三类为工程实践课程,以必修和选修课形式给出了较大量的典型工程项目(来源于教师科研子项目、企业联合工程项目、大学生创新项目、教师研究项目等)。学生在教师的指导下不仅自己可以独立完成,也可以组建团队完成,从而进一步进行工程实践能力的锻炼^[9]。

(3)增设一定广度的前沿技术拓展课程,不仅有利于不同方向的学生选修,也可以拓宽学生视野,更符合新工科形式下对创新型人才的要求。在拓展课中,增加了一些有关新技术和前沿技术的课程,对新技术了解方面以课程形式设置。对前沿技术了解方面主要通过讲座形式设置,每年都聘请一些本领域的院士、杰青、博导等知名专家来校做讲座。

2. 教学内容改革

主要从四个方面进行教学内容改革,一是根据电子信息产业具有技术更新换代周期短、速度快的特点,以及当前存在的教学中专业知识老化,不适应产业技术发

展要求的现状,进行教学内容的更新,即去掉旧知识,增添新技术。二是根据国家对本专业的要求和社会需要,删除理论性太强、在实际中应用又少的教学内容,将更多的时间调整到培养学生技能和能力的实践性教学环节上。三是以课程群的方式将相关课程有机结合起来,避免课程之间内容的重复。不仅使教师能以相关知识有机联系的方式传授,更使学生能以多元因素合理联想的方式掌握专业知识。四是增设大量的实践课程。在每门专业课程中尽量增加课程实验,且实验内容与理论紧密结合,可以使得学生在“做中学”和“学中做”。充分利用学校的开放实验室和实践平台进行丰富的综合性实验和实践课程的实践,培养了学生较强的实践能力。让学生组团在校外的实习、见习基地和实践实训基地等进行实际工程项目实践,加强学生学习的主动性、实践性和团队合作精神。

3. 教学方法改革

在教学方法上,要彻底改变本科课程或学术型学位研究生培养时的授课方式,每门课都要特别强调学习的相关知识和能力与实际应用的有机联系。根据不同的课程将常规的教师课堂讲授变为讲授与实践相结合、教师指导与工程实践相结合的方法。

对于理论性较强的课程,主要采用常规的讲授和案例式教学方式,不仅要在理论上讲清、讲细,让学生的理论水平得到提高,而且更要通过案例式教学方法讲清楚知识点在实际工程中的应用情况。另外,再采用启发式教学方法,使得学生能够根据所学教学内容在现实社会的实际应用中思考,提出问题,应用所学知识探究技术的深入应用和创新。

对于理论与实践并重课程,采用探究式和讨论式教学方式。学生可以通过自学理解大部分理论问题,再加上教师与学生的讨论、答疑等就可以使得学生掌握课程的理论部分。课程的实践部分可先在教师的指导下,学生进行探究得到预测结果,然后再通过校内实践平台进行实际验证,从而对结果进行检验、改进和优化等,最后达到课程实践的目的。

对于强实践性课程,采用问题驱动式、项目驱动式、工程项目介入式等教学方法。首先根据问题或项目进行分析、论证,给出论证方案并与指导教师进行讨论后确定方案框架。然后再进行方案详细设计,并进行仿真实验和优化。最后在校内外实践平台进行制作、测量、检验等过程,直至最后完成项目或解决问题。

(三)建立和完善校内外实践基地

实现实践能力培养首先需要建立较为完整的实践平台,针对不同的实践课程建立多元化的校内外实践基

地是实现产学研联合培养的重要基础。

建立专业学位研究生培养的校外实践基地,首先应根据课程体系,尤其是体系中的实践课程按照实践目的、实践要求、实践过程和实践结果等将需要满足条件的实践基地进行分类,然后按照所需要的环境条件、仪器设备、人员支撑、配套条件等分别进行校外实践基地的建设。

校内实践基地分为三种,第一种是适应于基础综合实验、理论课程中的随课程实验的实践平台。由于开展这种实践需要的大都是基本的实验仪器,校内能够完全满足开展实验的条件,因此这种实践平台建立在校内,由校内相关的实验室组成。第二种是适应于专业综合实验课程和课程设计实践课程的实践基地。这些实践需要的设备仪器种类较多,但是同类数量较少,可以通过购买部分新设备、组合部分原有设备组成综合实践基地。由于这种综合实践基地需要的经费不多,且学校有一定的仪器设备储备,因此这种实践基地建立在校内为好。第三种是适应于创新项目或基于工程问题的小项目实践课程,这种实践课程有的可以通过综合实践基地完成,但是也有一部分由于需要的设备精度较高、造价高、利用率较低,一般的校内综合实践基地不具有。但是这类仪器设备的科研平台拥有,因此可利用学校设备处的贵重设备统计信息建立泛在实践基地。

校外实践基地主要承担学生企业实践和工程问题或项目完成的实践任务。它主要分成两种,第一种是根据培养的方向紧密对应的央企建立主要的实践基地,如我们将智能电子与控制方向的专业学位研究生校外实践基地建立在主要从事电子通信设备设计与研制的央企;场波信息类方向的实践基地主要建立在与我们培养关联度极大的中电科的某一专业研究所。这样,不仅可以让学生能够参与从设计到产品全过程的实践,而且也能够解决具有大量人才或仪器设备的央企完成学生承担的项目或解决实际的工程问题。第二种就是选择在学校周边城市或少部分电子信息行业发达城市的高科技公司建立实践基地,主要完成学生的见习、企业文化熏陶、高新技术学习、拓展创新思维等实践任务。

(四)加强导师队伍建设

由于专业学位研究生既要具有一定的学术修养,更要具有解决实际问题的能力,因此对于导师的要求需要兼顾学术和实用技术应用两方面的能力。

由于目前高校中研究生导师的科技水平参差不齐,有的导师学术水平很高,但是其工程应用能力较弱,还有的导师几乎没有接触过应用性项目,只有少部分导师学术水平和工程应用能力都较高。针对这样情况,应通

过分类聘任方式加强专业学位研究生导师队伍建设。针对学术水平和实际工程能力都较高的导师,可以直接作为专业学位研究生导师。针对学术水平较高,而工程应用能力较弱的导师,采用组合式导师制,将该类教师与具有实际工程经验的其他教师组成导师群来一起指导学生。针对具有较好理论功底、实践能力很弱的年轻导师,采取与有大量实际工程经验的企业导师一起组成双导师制来共同指导专业学位研究生。无论哪类导师,最好都应根据相近的研究方向组建导师组,本导师组中的导师之间可以相互学习、相互借鉴、相互补充。另外,为了弥补高校中教师工程应用能力相对较弱的现状,需从长期合作的企业中聘任行业专家作为兼职导师,充实到专业学位研究生教育师资队伍中。通过这些导师的组合和聘用,最终形成具有较高学术水平和较强工程应用能力兼备的专业学位研究生导师队伍。

(五)创新成绩评价

要实现对学生的知识掌握和实际工程应用能力的评 价,依靠本科或学术型学位研究生的评价方法显然是不合适的,这就需要采用多样化的形式来测评学生的学习效果。针对不同的课程根据不同标准和评价方式,加大平时考核力度,将一次考核改为全程考核,进而实现对学生的专业知识、实践能力、工程应用能力、团队合作能力、创新能力等全方位的评价。

对于较少的纯理论课程,采用类似学术型学位研究生的期末考核方法。对于理论与实验并重的课程,采用理论一次考核、实验每次考核的方法。这两种课程的理论考核中一定要增加一定分量的理论应用考试题目,以便使得学生能够在理论学习的过程中更加注重理论知识的实际应用。对于基础综合实践课程,采用阶段目标和最终目标的完成多个环节进行考核。对于在校内实践基地进行的较小的工程问题和项目实践课程,增加方案、项目报告、设计评估等过程评定形式,各个过程占据一定的考核比例分数。学生要想获得较高的分数,就必须严格要求完成各个阶段和全部项目任务。这种评价方式,不仅可以使得学生处理工程问题的各阶段能力都得到锻炼,而且也可使学生对今后承担工程项目时的程序、过程等得到训练和掌握。对于需要学生在校内外实践基地完成的实践课程,采用校内教师和校外教师共同考核方式,校内教师主要对学生的理论水平、项目方案、项目设计等进行评价,校外教师对学生的实际动手能力、处理工程问题能力、项目优化与创新能力等进行评价。对于最后的学位论文,主要根据论文是否属于应用型论文,是否能解决某一实际工程问题、理论和解决过程是否合理、对问题的解决是否结果完整和正确等内容

进行分别评价。然后再经过校外具有学术和工程应用水平较高的专家组对学位论文进行评阅、审阅、外审、答辩等环节,最后综合给出学位论文的成绩。

三、结束语

采用新的专业学位研究生培养模式对2019级的电子信息专业学位硕士研究生进行培养。对2019级学生着重在理论与实践并重的课程进行了试验,发现其学习课程的积极性远远大于2018级,学生对专业课程的兴趣大增,上课提问的积极性很高,并且提出的大都是与解决实际相关的问题。同时也能够积极进行课前预习,且预习的程度也较深。在与课程相伴的实验中,除了完成规定的实验外,还积极进行试验的扩展,并提出了较新的实验思路和解决试验的新方法。产生这种效果的原因一是理论与实践的紧密结合对学生将理论知识学以致用,能解决实际问题带来的吸引力;二是根据实验或现实生活中遇到的问题,促使学生需要到理论中找到解决问题的

方法。下一步是按新的培养模式继续对2020级电子信息专业学位研究生的实践能力和工程应用能力进行培养,以检验新的培养模式的有效性和实用性。

参考文献:

- [1]孙淑芬,刘晖,李建勇.论我国工程硕士专业学位设置的必要性[J].中国冶金教育,1997(3):28-31.
- [2]教育部关于做好全日制硕士专业学位研究生培养工作的若干意见[Z].教研[2009]1号,2009-03-19.
- [3]于爱国,梁德东,马本华,等.综合性研究型大学发展专业学位研究生教育面临的问题与对策[J].学位与研究生教育,2013(1):53-56.
- [4]中华人民共和国国务院学位委员会.关于转发《关于制订工程类硕士专业学位研究生培养方案的指导意见》及说明的通知[EB/OL].2018-05-04.
- [5]沈艳,章洁.基于新工科的专业型研究生实践教学体系构建——以电子与通信工程为例[J].大学教育,2019(10):8-10.

(上接7页)

递、教学接受、教学互动和教学调节对课堂教学效果作用的关系路径。

3. 高校不同学院、不同学科、不同专业开设了众多的不同属性课程,对相应课堂教学效果的评价要求有所不同,采用完全相同或差异微小的评价指标体系可能有失公正,难以反映不同属性课程的真实课堂教学效果。基于课堂教学效果的内涵,最大程度考虑衡量课堂教学效果的共性因素,构建了包括学习改善、知识收获、能力发展和品质养成4类17个二级指标的高校本科课堂教学效果评价指标体系,并确定了其内涵。为提高课堂教学效果评价的客观性和准确性,设计了课堂教学效果评价指标测量量表,将抽象的概念性指标转化为能够直接观察和判断的测量题项,实现精准评价。

4. 基于评价指标的属性和评价者(学生)的主观属性和复杂性,构建了课堂教学效果模糊综合评价模型,通过问卷调查采集了数据,据此确定了课堂教学效果评价各级指标的权重,并进行了“整体课程”课堂教学效果综合评价和单项评价。数据表明被调查对象对各二级指标的评价均值差异较大(最大值4.18,最小值3.44),其70项测量题项的评价均值差异也较大(最大值4.52,最

小值2.98),整体上不平衡,“整体课程”课堂教学效果相应评价指标有着不同的改善和提升空间。综合评价和单项评价可针对某一课程、某课程组或某单元(教研室、学院和学校)开设全部或部分课程课堂教学效果进行评价,相应指标权重确定采用专家评审法为宜。

5. 由于问卷调查对象不同,评价课程不同,其具体评价结果是不同的。因此,本文没有针对“整体课程”课堂教学效果实际状况的评价给出相应的改善和提升建议。由于本次问卷调查对象和范围的局限,各指标权重及其测量题项实际状况的评价受限,相关数据分析的结果不能简单推而广之。

参考文献:

- [1]刘路.从三效维度谈有效教学评价[J].教学与管理,2014(7):4-6.
- [2]刘亚琼.高校课堂教学质量发展性评价研究——基于学生学习的角度[D].南宁:广西大学,2012.
- [3]哈斯巴根.高校课堂教学质量结构方程模型构建与应用——教师评价的视角[J].高校教育管理,2013,7(4):105-109.
- [4]张瑜,沈玉洁,段其伟.高校课堂教学质量评价的现状与对策研究[J].教育教学论坛,2018(9):28-29.
- [5]冯利英,任良玉,刘益东.高校教师课堂教学效果评价存在的问题及对策[J].上海教育评估研究,2014(2):19-23.

RCCSE中国核心学术期刊(扩展版)
《中国学术期刊(光盘版)》全文收录期刊
万方数据-数字化期刊群全文收录期刊
《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊
首届《CAJ-CD规范》执行优秀期刊
《国家哲学社会科学学术期刊数据库》收录期刊
第八届广西优秀期刊

ISSN 1671-9719
CN 45-1312/G4

高教论坛

HIGHER EDUCATION FORUM

本期导读

- 形势政策课落实习近平关于高校思想政治教育工作精神的若干思考/侯典芹
- 一次办好：高校行政工作转型升级路径探析/姜珊
- 基于互动仪式链理论高职院校主题班会的策略探析/董建伟 高永超
- 如何评价大学高层次人才——基于CiteSpace可视化分析/赵映川，梅舒婷
- 被误读的过程模式——斯坦豪斯课程观辨正/池挺钦
- 美国退役军人在高等教育中的困境及高校的应对举措/苏原正

总第256期 2021年第2期

电子信息类专硕学位论文的过程管理方法初探

张瑜, 吴雪冰, 史水娥

(河南师范大学 电子与电气工程学院, 河南 新乡 453007)

摘要:由于专业学位硕士研究生培养更强调较强的实践动手能力和实际工程应用能力,因此相应的学位论文就应该具有专业背景和应用价值,能够运用所学理论和方法解决工程实际问题,并具有一定的技术难度和工作量。学位论文完成中的各个环节都对学位论文的质量有一定的影响,要保证学位论文的质量,就必须严格学位论文的过程管理。通过对现有电子信息专业学位论文管理中出现问题的改正、不足之处的优化、重点环节的强化等,建立了一套较为合理的学位论文过程管理方法,从而能够保证专业学位硕士研究生学位论文质量。

关键词:电子信息;专业学位;学位论文;过程管理

中图分类号:G643

文献标识码:A

文章编号:1671-9719(2021)2-0094-03

作者简介:张瑜(1963-),男,河南省沁阳市人,教授,高级工程师,主要从事教学和电磁场与微波技术理论与应用研究工作;吴雪冰(1980-),女,河南省太康人,副教授,主要从事教学和教学改革研究工作;史水娥(1976-),女,河南省武陟人,副教授,主要从事教学和教学改革研究工作。

收稿日期:2020-09-06 **修稿日期:**2020-09-29

一、引言

2009年,教育部下发的《关于做好全日制硕士专业学位研究生培养工作的若干意见》明确指出专业学位研究生的培养目标是培养以市场为导向,具有较强的解决实际问题的能力,能够承担专业技术或管理工作,具有良好的职业素养的人才。2018年,国务院学位委员会下发的《关于转发〈关于制订工程类硕士专业学位研究生培养方案的指导意见及说明的通知〉》指出,为更好适应国家经济和社会发展对高层次应用型人才的新需求,全面贯彻党的教育方针,落实立德树人根本任务,进一步突出思想政治正确、社会责任合格、理论方法扎实、技术应用过硬的工程类专业学位研究生培养特色。这些政策都为专业学位研究生教育注入更大的活力,更加需要各类高校重视专业学位研究生教育。

目前各个高校的专业学位研究生与学术学位研究生的数量基本相当,有的学校甚至存在专业学位研究生远远大于学术学位研究生数量。专业学位与学术学位两种研究生培养类型处于相同的地位,是高层次人才培养的两个重要方面,但培养的重点不同。专业学位研究生主要培养具有较强实践和工程应用能力的高层次技术人才,能够满足现代社会经济发展对应用型人才的需要,相比学术型研究生,其学术水平相对较弱,但是实践应用能力较强^[1-2]。

高等教育对研究生学习和能力的检验和评价分

为许多环节或阶段,每所高校的各个评价环节基本上相类似,只是各环节在时间安排上可能有所不同。各高校都具有学位论文环节,且在时间安排上也基本相同,即在学生入校第1年学完理论课程的基础上,第2年就陆续进入研究生学位论文阶段。由于完成学位论文阶段历经的实践时间长,经过的环节较多,在实际操作过程中,只要哪个环节没有控制好,就可能最终影响学位论文的质量。尽管目前各个高校都在狠抓学位论文阶段,也出台了较多的管理规定,但是执行起来不尽如人意,经常出现各种各样的问题,进而影响学位论文质量,因此必须对学位论文的各个环节严格把关。

专业学位硕士研究生培养由于更强调较强的实践动手能力和实际工程应用能力,因此对其学位论文就不能采用与本科学位论文和学术型研究生学位论文相同的要求和管理方式,而应该建立一套适合专业学位研究生学位论文的过程管理方法。通过对学位论文过程中各个环节的精细化管理,确保专业学位研究生的学位论文质量。

这里,针对地方院校电子信息专业学位硕士研究生培养中的学位论文管理过程出现的问题^[3-4],从合理选题、集中开题、中期检查、后期检验、论文评阅和论文答辩等环节较为详细地给出了专业硕士学位论文的过程管理方法和措施。

二、学位论文的过程管理方法

学位论文是培养过程中必不可少的一个重要环

节,是对学生各方面能力的综合检阅。要保证学位论文的质量,首先,要建立学位论文质量评价体系,并对完成学位论文的过程进行管理。对于电子信息专业学位硕士研究生的学位论文质量,主要应体现在论文研究的项目是否具有实践性和应用性,学生是否具有综合运用所学理论和技术独立研究、开发、解决工程实际问题的能力,研究成果是否具备先进性等。其次,强化导师是学位论文主要责任人的意识,导师要积极发挥指导作用。由于学生的学位论文需要导师签字才能进行答辩申请,导师签字就意味着认可了学位论文从选题到论文终稿的全部工作,因而应承担起论文主要责任人的责任。学位论文的完成过程时间长、环节多,这里按时间顺序对完成学位论文过程中的主要环节给出较为详细的管理方法和措施。

(一)合理选题

论文题目是论文内容最精准的浓缩,优秀的学位论文肯定有科学合理的论文题目。当然,受解决问题思路、结构框架、写作水平等较多因素的影响,好的题目不一定能写出高质量的论文。但是,没有好的题目一定不可能产生高质量论文。确定专业学位硕士研究生学位论文的题目时,特别应注意以下几点:(1)论文题目一定要与培养目标紧密结合,具有明确的工程背景和使用价值。不仅能够展现出学生处理实际问题的实践能力和工程应用能力,而且在理论上有一定的深度和前瞻性。(2)论文题目主要从三种途径获得,一是来源于导师的应用性科研项目的子项目,二是来源于研究生在校外实践基地实习时企业导师给定的项目,三是学生自己提出的应用型新项目。(3)由理论和工程应用水平较高的校内、外导师组成题目审查导师组,对学生提交的题目进行科学价值、实用价值、应用前景等的评价,并给出修改意见。只有经过导师组评定通过的题目才能成为正式的学位论文题目。

(二)集中开题

论文开题环节主要是对学位论文的研究思路、技术路线、主要研究内容、拟采取的研究方法和处理问题的方法、方法的可行性和先进性、论文的工作量、工作进度安排等方面进行审查,是决定论文内容的关键环节。

为了避免因导师自请专家而引起的要求不高、把关不严的情况出现,采用集中审查的开题方式。即由学院直接聘请外校的相关教师和本校公认的铁面无私的高水平教师组成学位论文开题审查小组,所有需要开题的学生一起集中开题。导师不能参加自己开题学生的审查小组,只能在开题时列席旁听,不能发表意见。

为了有利于帮助学生进一步理清工作思路,及早发现问题,切实做好学位论文开题,要求开题审查小组的每位教师都必须对每一个开题报告严格把关,明确指出学生开题报告中的不足,提出修改建议,鼓励提出建设性意见。学院对指出问题较多,且能够给出详细修改建议或建设性意见的小组成员进行较大的奖励,对不太认真履行职责的小组成员将列入下次开题黑名单。

(三)中期检查

学位论文的中期检查主要是检查学位论文进度和实际工作量以及完成论文工作中出现的问题,以便对学生的工作进行督促和对错误进行改正。

专业学位研究生学位论文开题通过后,学生在完成学位论文过程中,要定期向导师报告工作进展,不明确的地方可以请求导师的指导。学生间也需要经常交流和讨论,互通消息,相互借鉴经验和相互帮助。本校指导导师组成中期检查组,承担学生的中期检查任务。不仅要对学生学位论文的进展和质量进行详细检查,激励学生加紧高质量完成学位论文工作,更要对出现的不足提出建议,便于学生立即改进。导师对学生的学位论文进展和存在的问题要做到心中有数,并在中期检查后经常检查和指导。

(四)后期检验

当专业学位研究生在学位论文撰写完成后开展后期检验工作,主要由导师和导师组承担。后期检验主要包括三部分工作,一是导师对学生学位论文的研究成果进行检查和检验。检查论文中的实验数据是否准确可靠,程序能否正常运行,建立的模型是否正确,产品是否稳定,结论是否正确可信。二是导师对学生的学位论文进行全方面的审阅和指导,不仅要检查学位论文的结构、内容阐述方法等,也要检查论文的格式、表述的严谨性等,从而指导学生进行修改和优化。三是进行学位论文的预答辩。预答辩由学院统一组织,根据相近研究方向将专业学位研究生和导师组成几个预答辩小组。每个预答辩小组必须邀请两名以上校外专家,其预答辩小组组长由校外专家担任,秘书则可由本校教师担任。预答辩小组按照学位论文最后的答辩形式开展工作,对学生在预答辩中出现的论文问题指出不足,提出改进意见,对出现的其他问题则给出建议,做出示范。从而帮助学生积累答辩经验,为较好地完成最后的学位论文答辩奠定坚实基础。

(五)论文评阅

经过对后期检验环节提出的意见进行修改后,专业学位研究生要提交正式的学位论文供专家评阅。提交的学位论文是学生在近一年时间内完成的主要成果,也是综合展现知识和能力水平的主要依

据。只有通过学位论文的审阅和答辩才能获得工程硕士学位,因此学位论文的专家审阅和答辩是所有的研究生们最为关切的环节。

目前专业学位论文进行专家审阅基本上都是按一定比例采用“双盲”审阅,即由学校将隐去学生和导师姓名的两份学位论文随机送到不同的两所高校,再由两所高校按照专业送给本校高水平专家进行审阅。同一学位论文由两名校外专家分别匿名评审。只有两位专家对同一学位论文的审阅意见都是通过,则该学位论文才可以申请论文答辩。如果两位专家审阅意见都是不通过,则不能申请论文答辩。如果两位专家中一个审阅意见是通过,另一个审阅意见是不通过,则再增选两位专家进行复审阅。只有当两个复审阅意见都通过才可以申请答辩,否则不能申请答辩。

为了确保专业学位研究生的学位论文质量,建议以后所有研究生的学位论文都采用“双盲”审阅。

(六) 论文答辩

专业学位研究生答辩工作由学院根据学校的统一安排进行。答辩委员会由7名左右校内外专家共同组成,其中校外专家至少两名,从学校建立的校外专家库中抽取,以免产生因学院邀请熟悉专家而放松要求的情况发生。为避嫌,导师不能作为自己学生答辩小组的校内专家。学位论文答辩时,首先学生要在规定的时间内完成学位论文主要内容的阐述,然后回答答辩委员的提问,最后答辩委员根据每位学生的学位论文和答辩情况进行成绩评议和投票。

(上接第93页)

供实践场所。高校应加大投入,建设实训中心、模拟实验室等,使学生在仿真实践教学环境中运用专业知识,施展专业技能;还应加强校企合作,建立稳定的校外实习基地,使学术型硕士研究生能够在课余时间参加顶岗实习,在真实工作环境中锻炼学生的执行力与应变力等。

参考文献:

- [1] 孙怀林,肖鹏.基于实践能力提升的专业学位硕士研究生培养模式研究[J].黑龙江高教研究,2018(8):95-98.
- [2] 王应密,张乐平,朱敏.试论研究型大学全日制专业学位研究生专业实践能力的培养[J].学位与研究生教育,2012(12):6-10.
- [3] 孙友莲.硕士研究生分类培养需“研用合一”[J].教育发展研究,2014,34(19):62-66.
- [4] 侯佛钢,张学敏.应用型高校教师专业实践能力提升的制度困境及其变革逻辑[J].教师教育研究,2019,31(4):34-39.

票。通过综合成绩评议和投票结果,给出每个学位论文的最终成绩。

三、结语

专业学位硕士研究生的学位论文是综合衡量学生知识和能力的关键环节,也是培养人才质量的关键。本文给出的学位论文过程管理方法可以保证学位论文的各个环节有效进行,保证学位论文的高质量。同时,不仅可以提高学生对理论知识的综合利用,而且更能锻炼学生分析和解决实际工程项目的的能力,从而满足现代社会和经济发展对应用型高层次人才的需求。

参考文献:

- [1] 桂志国,赵冬城,王晨光.电子与通信工程全日制专业学位硕士人才培养模式的研究与实践[J].中国教育技术装备,2014(4):7-9.
- [2] 杨平,张达敏,刘国敏.电子与通信工程领域专业学位研究生培养模式探讨[J].软件导刊,2016(4):34-35.
- [3] 周玲玲.关于提高硕士学位论文质量的实践与思考[J].教育现代化,2017,4(52):19-20,23.
- [4] 马婧婧,吕家宝.优化研究生学位论文管理措施及对策研究[J].教育现代化,2020,7(27):171-173.

基金项目:2019年河南省高等教育教学改革研究与实践项目(2019SJGLX256);2019年河南师范大学高等教育教学改革研究与实践重点项目“电子信息专业学位研究生教育改革研究与实践”(YJS2019JG05)。

(责任编辑:王金珊)

[5] 王洪才.地方高校学科建设重在培育教学和科研融合机制[J].重庆高教研究,2018,6(6):11-15.

[6] 刘磊,傅维利.实践能力:含义、结构及培养对策[J].教育科学,2005(2):1-5.

[7] 孙智昌.论学生的实践能力及其培养[J].教育研究,2016,37(2):110-118.

[8] 傅维利,刘磊.个体实践能力要素构成的质性研究及其教育启示[J].华东师范大学学报(教育科学版),2012,30(1):1-13.

[9] 向兴华,李晴虹,刘捷.全日制专业学位硕士研究生实践能力结构的质性研究[J].学位与研究生教育,2016(3):62-68.

基金项目:上海工程技术大学研究生教学建设项目“现代城市社会治理专业实践基地建设研究”(19XJG005)。

(责任编辑:秦福利)

教材论著类

| 序号 | 教材名称 | 出版社 | 出版时间 | 印刷册数 | 对象（填写主持人/成员） | 作者位次 |
|----|-----------|-------------|------|------|--------------|------|
| 1 | 电磁场与电磁波基础 | 西安电子科技大学出版社 | 2016 | 1000 | 张瑜 | 1 |

21

高等学校信息工程类“十三五”规划教材

电磁场与电磁波基础

张瑜 李雪萍 付喆 编著

DIANCHANGYUDIAN
CIBOJICHU



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

内 容 简 介

本书主要以麦克斯韦方程组为核心,介绍宏观电磁场与电磁波的基本概念、基本原理、基本分析计算方法,电磁场和电磁波与物质的相互作用以及电磁波的传播规律等内容。

全书分为基础知识、电磁场理论以及电磁波的传播、传输与辐射三篇进行阐述。在基础知识篇中,介绍了学习电磁场与电磁波课程必备的数学知识,如矢量运算、常用正交坐标系、矢量分析、场论基础等。在电磁场理论篇中,根据学生学习的思维习惯,采用由典型到一般的叙述方式。首先分别介绍静电场、恒定电场、静磁场的基本特性和分析方法,总结出静态场中麦克斯韦方程组及其边界条件;然后介绍静态场的典型计算方法;最后介绍时变电磁场的基本特性和分析方法,总结出适应于静态和时变情况下的一般麦克斯韦方程组和波动方程。在电磁波的传播、传输与辐射篇中,分别介绍了电磁波在无界空间和有界空间中的传播特性、规律和产生的相关效应,最后简要介绍了电磁波辐射特性和规律(属于天线技术领域)。其中电磁波在有界空间中的传输特性和电磁辐射特性可为电子信息类专业学生进一步学习后续课程奠定基础。

本书可作为高等学校电子信息工程、通信工程、电子科学与技术、光电子科学与工程等本科电子信息类专业的教材,也可供通信技术、雷达技术、微波技术、天线技术、射频技术、电波传播、电磁兼容等领域的科研工程人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁场与电磁波基础/张瑜,李雪萍,付喆编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2016.4
高等学校信息工程类“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5606-4015-0

I. ①电… II. ①张… ②李… ③付… III. ①电磁场—高等学校—教材 ②电磁波—高等学校—教材 IV. ①O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 061767 号

策划编辑 马乐惠
责任编辑 雷鸿俊
出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)
电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071
网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com
经 销 新华书店
印刷单位 陕西大江印务有限责任公司
版 次 2016年4月第1版 2016年4月第1次印刷
开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 21
字 数 499千字
印 数 3000册
定 价 39.00元
ISBN 978-7-5606-4015-0/O
XDUP 4307001-1

如有印装问题可调换

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

目 录

第一篇 基础知识

| | | | |
|------------------|----|------------------|----|
| 第1章 矢量分析 | 2 | 2.1 标量场与矢量场 | 21 |
| 1.1 标量与矢量 | 2 | 2.1.1 标量场与等值面 | 21 |
| 1.1.1 标量 | 2 | 2.1.2 矢量场与矢量线 | 22 |
| 1.1.2 矢量 | 2 | 2.2 哈密顿算子与拉普拉斯算子 | 23 |
| 1.2 矢量代数 | 3 | 2.2.1 哈密顿算子 | 23 |
| 1.2.1 矢量的加法 | 3 | 2.2.2 拉普拉斯算子 | 24 |
| 1.2.2 矢量的减法 | 4 | 2.3 标量场的方向导数与梯度 | 24 |
| 1.2.3 矢量的数乘 | 4 | 2.3.1 方向导数 | 25 |
| 1.2.4 矢量的点积 | 5 | 2.3.2 梯度 | 26 |
| 1.2.5 矢量的叉积 | 5 | 2.4 矢量场的通量与散度 | 29 |
| 1.2.6 矢量的组合运算 | 6 | 2.4.1 矢量场的通量 | 29 |
| 1.3 常用正交坐标系 | 7 | 2.4.2 矢量场的散度 | 31 |
| 1.3.1 直角坐标系 | 7 | 2.4.3 散度定理 | 33 |
| 1.3.2 圆柱坐标系 | 11 | 2.5 矢量场的环量与旋度 | 35 |
| 1.3.3 球坐标系 | 13 | 2.5.1 矢量场的环量 | 35 |
| 1.3.4 各坐标系间的转换 | 17 | 2.5.2 矢量场的旋度 | 36 |
| 1.4 矢量分析 | 18 | 2.5.3 斯托克斯定理 | 39 |
| 1.4.1 标量函数与矢量函数 | 18 | 2.6 若干常用定理与场的分类 | 43 |
| 1.4.2 矢端曲线 | 18 | 2.6.1 格林定理 | 44 |
| 1.4.3 矢量函数的导数与微分 | 19 | 2.6.2 唯一性定理 | 44 |
| 1.4.4 矢量函数的积分 | 19 | 2.6.3 亥姆霍兹定理 | 45 |
| 习题 | 20 | 2.6.4 场的分类 | 46 |
| 第2章 场论基础 | 21 | 习题 | 47 |

第二篇 电磁场理论

| | | | |
|-------------------|----|-----------------------|----|
| 第3章 静电场及其特性 | 50 | 3.3.3 真空中的静电场方程 | 58 |
| 3.1 电荷与电荷密度 | 50 | 3.4 电介质中的静电场方程 | 60 |
| 3.1.1 电荷与电荷守恒定律 | 50 | 3.4.1 电介质的极化 | 60 |
| 3.1.2 电荷密度 | 50 | 3.4.2 极化强度与极化电荷密度 | 61 |
| 3.2 库仑定律与电场强度 | 52 | 3.4.3 电位移矢量与电介质中的高斯定理 | 63 |
| 3.2.1 库仑定律 | 52 | | 63 |
| 3.2.2 电场强度 | 53 | 3.4.4 电介质分类与本构关系 | 64 |
| 3.3 真空中的静电场方程 | 55 | 3.4.5 电介质的静电场方程 | 65 |
| 3.3.1 静电场的散度与高斯定理 | 55 | 3.5 电位与电位差 | 67 |
| 3.3.2 静电场的旋度与环路定理 | 57 | 3.5.1 电位 | 67 |

| | | | | | |
|------------|-----------------|-----------|------------|---------------------|------------|
| 3.5.2 | 电位差 | 68 | 5.1.2 | 磁感应强度 | 99 |
| 3.5.3 | 静电场的电位方程 | 69 | 5.1.3 | 洛伦兹力 | 100 |
| 3.6 | 静电场的边界条件 | 70 | 5.2 | 真空中的静磁场方程 | 101 |
| 3.6.1 | 电位移矢量的法向边界条件 | 70 | 5.2.1 | 静磁场的散度与磁通连续性原理 | 102 |
| 3.6.2 | 电场强度的切向边界条件 | 71 | 5.2.2 | 静磁场的旋度与安培环路定理 | 103 |
| 3.6.3 | 电场矢量线在分界面上的折射 | 72 | 5.2.3 | 真空中的静磁场方程 | 104 |
| 3.6.4 | 电位在分界面上的边界条件 | 73 | 5.3 | 磁介质中的静磁场方程 | 106 |
| 3.7 | 导体系统的电容 | 75 | 5.3.1 | 介质的磁化 | 106 |
| 3.7.1 | 电容与电容器 | 75 | 5.3.2 | 磁化强度与磁化电流 | 107 |
| 3.7.2 | 多导体间的部分电容 | 76 | 5.3.3 | 磁场强度与磁介质中的安培环路定理 | 108 |
| 3.8 | 静电场的能量与力 | 78 | 5.3.4 | 磁介质的本构关系 | 109 |
| 3.8.1 | 静电场的能量 | 78 | 5.3.5 | 介质中的静磁场方程 | 111 |
| 3.7.2 | 静电场的力 | 81 | 5.4 | 矢量磁位与标量磁位 | 113 |
| 习题 | | 83 | 5.4.1 | 矢量磁位 | 113 |
| 第4章 | 恒定电场及其特性 | 85 | 5.4.2 | 标量磁位 | 114 |
| 4.1 | 电流与电流密度 | 85 | 5.4.3 | 磁矢位与磁标位的拉普拉斯方程和泊松方程 | 114 |
| 4.1.1 | 电流 | 85 | 5.5 | 静磁场的边界条件 | 116 |
| 4.1.2 | 电流密度 | 85 | 5.5.1 | 磁感应强度的法向边界条件 | 116 |
| 4.2 | 导电媒质中的欧姆定律和焦耳定律 | 87 | 5.5.2 | 磁场强度的切向边界条件 | 117 |
| 4.2.1 | 欧姆定律 | 87 | 5.5.3 | 磁力线在分界面上的折射 | 118 |
| 4.2.2 | 焦耳定律 | 88 | 5.5.4 | 磁矢位和磁标位在分界面上的边界条件 | 119 |
| 4.3 | 恒定电场方程 | 88 | 5.6 | 电感 | 120 |
| 4.3.1 | 电流连续性方程 | 88 | 5.6.1 | 自感 | 120 |
| 4.3.2 | 恒定电场的散度 | 89 | 5.6.2 | 互感 | 120 |
| 4.3.3 | 恒定电场的旋度 | 89 | 5.7 | 静磁场的能量与力 | 123 |
| 4.3.4 | 恒定电场的电位 | 90 | 5.7.1 | 静磁场的能量 | 123 |
| 4.3.5 | 导电媒质中的恒定电场方程 | 90 | 5.7.2 | 静磁场的力 | 126 |
| 4.4 | 恒定电场的边界条件 | 91 | 习题 | | 128 |
| 4.4.1 | 电流密度与电场的边界条件 | 91 | 第6章 | 静态场的计算 | 130 |
| 4.4.2 | 电力线在分界面上的折射 | 92 | 6.1 | 静态场的边值与唯一性定理 | 130 |
| 4.4.3 | 导电媒质分界面上的电荷面密度 | 93 | 6.1.1 | 边值问题 | 130 |
| 4.4.4 | 电位在分界面上的边界条件 | 93 | 6.1.2 | 边值问题类型 | 131 |
| 4.5 | 恒定电场与静电场的比拟 | 93 | 6.1.3 | 唯一性定理 | 131 |
| 4.6 | 电导与接地电阻 | 94 | 6.2 | 镜像法 | 132 |
| 4.6.1 | 电导 | 94 | 6.2.1 | 镜像法的基本思想 | 133 |
| 4.6.2 | 接地电阻 | 95 | 6.2.2 | 导体平面镜像法 | 133 |
| 习题 | | 97 | 6.2.3 | 导体球面镜像法 | 138 |
| 第5章 | 静磁场及其特性 | 98 | | | |
| 5.1 | 安培定律与磁感应强度 | 98 | | | |
| 5.1.1 | 安培定律 | 98 | | | |

| | | | |
|------------------------------------|------------|---------------------------------------|-----|
| 6.2.4 导体圆柱面镜像法 | 142 | 7.4 时变电磁场的边界条件 | 179 |
| 6.2.5 介质平面镜像法 | 146 | 7.4.1 时变电磁场的法向边界条件 | 179 |
| 6.3 分离变量法 | 149 | 7.4.2 时变电磁场的切向边界条件 | 180 |
| 6.3.1 直角坐标系中的分离变量法 | 149 | 7.4.3 典型情况下的边界条件 | 181 |
| 6.3.2 圆柱坐标系中的分离变量法 | 154 | 7.5 场量与位函数的波动方程 | 182 |
| 6.3.3 球坐标系中的分离变量法 | 157 | 7.5.1 场量波动方程 | 183 |
| 6.4 有限差分法 | 160 | 7.5.2 位函数波动方程 | 184 |
| 6.4.1 有限差分方程 | 161 | 7.6 时变电磁场的能量与能流 | 188 |
| 6.4.2 有限差分方程求解方法 | 162 | 7.6.1 坡印廷定理 | 189 |
| 习题 | 167 | 7.6.2 坡印廷矢量 | 190 |
| 第7章 时变电磁场及其特性 | 168 | 7.7 时谐电磁场 | 193 |
| 7.1 法拉第电磁感应定律 | 168 | 7.7.1 时谐电磁场的复数形式 | 193 |
| 7.2 位移电流 | 172 | 7.7.2 复数形式的麦克斯韦方程 | 194 |
| 7.3 麦克斯韦方程组与辅助方程 | 174 | 7.7.3 复介电常数与复磁导率 | 196 |
| 7.3.1 麦克斯韦方程组的积分形式 | 175 | 7.7.4 时谐电磁场的波动方程 | 197 |
| 7.3.2 麦克斯韦方程组的微分形式 | 175 | 7.7.5 时谐电磁场的位函数 | 198 |
| 7.3.3 麦克斯韦方程组的辅助方程—— 本构关系 | 177 | 7.7.6 时谐电磁场的平均能量密度与 平均能流密度矢量 | 199 |
| 7.3.4 洛伦兹力 | 178 | 习题 | 202 |
| 7.3.5 麦克斯韦方程组的讨论 | 178 | | |

第三篇 电磁波的传播、传输与辐射

| | | | |
|----------------------------------|------------|------------------------------|------------|
| 第8章 均匀平面波在无界媒质中传播 | 206 | 习题 | 228 |
| 8.1 均匀平面电磁波 | 206 | 第9章 电磁波的反射与折射 | 230 |
| 8.2 理想介质中的均匀平面波传播 | 207 | 9.1 平面电磁波在媒质界面上的反射和折射 | 230 |
| 8.2.1 理想介质中的均匀平面波 | 207 | 9.1.1 平面波的电场与磁场 | 230 |
| 8.2.2 理想介质中均匀平面波的 传播特性 | 209 | 9.1.2 平面电磁波的反射和折射 | 231 |
| 8.2.3 理想介质中沿任意方向的 均匀平面波 | 212 | 9.2 平面电磁波对媒质分界面的垂直入射 | 232 |
| 8.3 导电媒质中的均匀平面波传播 | 215 | 9.2.1 对导电媒质分界面的垂直入射 | 233 |
| 8.3.1 导电媒质中的均匀平面波 | 215 | 9.2.2 理想导体分界面的垂直入射 | 235 |
| 8.3.2 导电媒质中的均匀平面波的 传播特性 | 216 | 9.2.3 理想介质分界面的垂直入射 | 237 |
| 8.3.3 弱导电媒质中的均匀平面波 | 217 | 9.3 平面电磁波对多层媒质分界面的垂直入射 | 242 |
| 8.3.4 强导电媒质中的均匀平面波 | 218 | 9.3.1 多层媒质面上的电磁场量关系 | 243 |
| 8.3.5 趋肤深度和表面电阻 | 219 | 9.3.2 多层媒质的应用 | 246 |
| 8.4 电磁波的特性 | 221 | 9.4 平面波对理想介质平面的斜入射 | 248 |
| 8.4.1 电磁波的极化 | 222 | 9.4.1 反射定律和折射定律 | 249 |
| 8.4.2 电磁波的色散 | 225 | 9.4.2 菲涅尔公式 | 250 |
| 8.4.3 相速与群速 | 225 | 9.4.3 全反射与全透射 | 254 |

| | | | |
|----------------------------|-----|-----------------------|-----|
| 9.5 平面波对理想导体平面的斜入射 | 259 | 10.4.2 圆柱形波导的传输特性 | 292 |
| 9.5.1 垂直极化波对理想导体平面的斜入射 | 259 | 习题 | 294 |
| 9.5.2 平行极化波对理想导体平面的斜入射 | 261 | 第 11 章 电磁辐射与天线 | 296 |
| 9.6 平面波对导电媒质平面的斜入射 | 263 | 11.1 电偶极子与磁偶极子的辐射 | 296 |
| 习题 | 265 | 11.1.1 电偶极子的辐射 | 296 |
| 第 10 章 导电电磁波与传输 | 267 | 11.1.2 磁偶极子的辐射 | 300 |
| 10.1 导电电磁波 | 267 | 11.2 天线的基本参数 | 303 |
| 10.1.1 导波系统中的场方程 | 268 | 11.2.1 天线的方向性函数和方向性系数 | 303 |
| 10.1.2 TEM 波、TE 波及 TM 波 | 270 | 11.2.2 效率与增益 | 306 |
| 10.1.3 TE 波及 TM 波在波导中的传输特性 | 272 | 11.2.3 天线的极化 | 307 |
| 10.2 双导体传输线系统及其传输特性 | 272 | 11.2.4 有效长度 | 308 |
| 10.2.1 传输线方程 | 273 | 11.2.5 输入阻抗 | 308 |
| 10.2.2 均匀传输线方程的解 | 275 | 11.2.6 频带宽度 | 309 |
| 10.2.3 传输线特性参数和状态参量 | 277 | 11.3 线天线 | 309 |
| 10.2.4 同轴线及其特性 | 283 | 11.3.1 对称振子天线 | 309 |
| 10.3 矩形规则金属波导系统及其传输特性 | 285 | 11.3.2 阵列天线 | 312 |
| 10.3.1 矩形波导中的场分布 | 286 | 11.4 面天线 | 313 |
| 10.3.2 矩形波导中的电磁波传输特性 | 288 | 11.4.1 惠更斯元的辐射 | 313 |
| 10.4 圆柱形规则金属波导系统及其特性 | 290 | 11.4.2 平面口径面的辐射 | 315 |
| 10.4.1 圆柱形波导中的场分布 | 290 | 11.4.3 抛物面天线 | 316 |
| | | 11.4.4 卡塞格伦天线 | 318 |
| | | 习题 | 321 |
| | | 附录 A 常用矢量运算 | 323 |
| | | 附录 B 常用物理常数 | 326 |
| | | 参考文献 | 327 |

第 7 章 时变电磁场及其特性

在前面几章中，分别讨论了由静电场、恒定电场和静磁场组成的静态场问题。在静态场中，电场和磁场是相互独立存在的，电场与磁场之间没有相互关系。电场由电荷产生，磁场由电流产生。然而，当电荷和电流随时间变化时（称为时变场），他们产生的电场和磁场也随时间变化。变化的电场会在其周围空间激发变化的磁场，变化的磁场也会在其周围空间激发变化的电场。这样，电场和磁场就不再相互独立，两者之间相互激励、相互转化，构成了一个不可分割的统一整体，称为电磁场，或称为时变电磁场。在时变情况下，电场与磁场相互激励，在空间形成电磁波。时变电磁场的能量以电磁波的形式进行传播。

本章首先通过对法拉第电磁感应定律和麦克斯韦关于位移电流和涡旋电场的假设，结合静态场的性质引入了描述包括静态场和时变场的麦克斯韦方程组。然后讨论时变电磁场的边界条件、电磁场的能量关系和能流密度概念，以及电磁场的波动方程和位函数；最后讨论随时间按正弦函数变化的时变电磁场，这种时变电磁场称为时谐电磁场或正弦电磁场。

7.1 法拉第电磁感应定律

自1820年奥斯特发现电流的磁效应之后，根据自然界的对称原理，人们开始研究磁场能否产生电流的问题。经过10年的艰苦探索，1831年英国科学家法拉第最早发现，当穿过导体回路的磁通量发生变化时，回路中就会出现感应电流和感应电动势，且感应电动势与磁通量的变化有密切关系，由此总结出了著名的法拉第电磁感应定律。

法拉第电磁感应定律表述为：通过导体回路所围面积的磁通量 ψ 发生变化时，回路中产生的感应电动势 ε_i 为

$$\varepsilon_i = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \vec{e}_n dS \quad (7.1-1)$$

式中， ε_i 为一个导体回路上的感应电动势， ψ 为导体回路所围面积 S 的磁通量， \vec{B} 为导体回路所围面积 S 中的磁感应强度， \vec{e}_n 为导体回路所围面积 S 的单位法向矢量。

导体回路中既然有感应电动势存在，则导体回路则必有感应电流产生。电动势 ε_i 的大小等于导体回路中的磁通量的时间变化率的负值，其方向服从楞次定律，即感应电动势在导体回路中引起的感应电流的方向是由它产生的磁场阻止回路中磁通量的改变，如图7.1-1所示。可见当导体回路中的磁通量增加时，感应电动势的实际方向与磁通量方向构成左旋关系（感应电流产生的磁场阻止原磁通量的增加）；反之，当磁通量减少时，感应电动势的实际方向与磁通量方向构成右旋关系（感应电流产生的磁场阻止原磁通量的减小）。

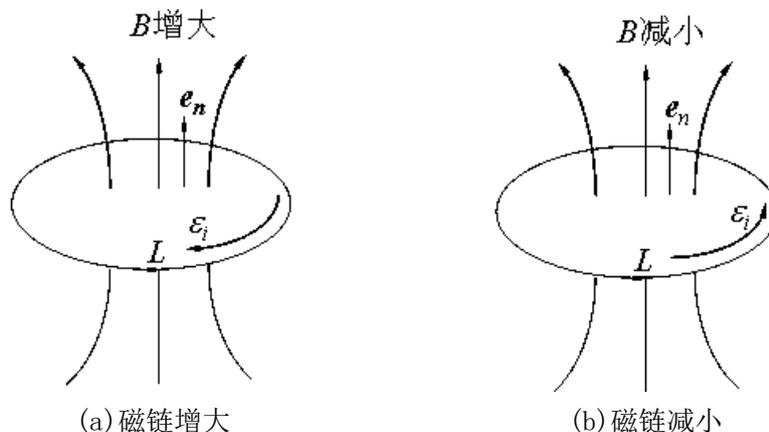


图7.1-1 法拉第电磁感应定律

法拉第定律和楞次定律的结合就是法拉第电磁感应定律，法拉第电磁感应定律是时变电磁场的

基本定律之一。

如果形成回路的导体不止一匝时，则导体回路所围面积中的磁通量 ψ 可看成全磁通量，称为磁链 Ψ 。设一个由 N 匝线圈组成的导体回路，则磁链 Ψ 可视为由 N 个单匝线圈的磁通量串联而成，即

$$\Psi = \sum_{j=1}^N \psi_j, \text{ 此时的感应电动势为}$$

$$\varepsilon = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left(\sum_{j=1}^N \psi_j \right) \quad (7.1-2)$$

导体回路中感应电流的产生意味着导体回路中存在电场，这种电场称为感应电场 \vec{E}_i ，它是一种沿导体回路的涡旋电场。因此，感应电场强度 \vec{E}_i 沿线圈回路 C 的闭合线积分应等于线圈中的感应电动势，即

$$\varepsilon = \oint_C \vec{E}_i \cdot d\vec{l} \quad (7.1-3)$$

由(7.1-1)和(7.1-3)式可以得到，导体回路中感应电场与穿过回路所围面积中的磁感应强度的关系为

$$\oint_C \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (7.1-4)$$

可见，只要与回路交链的磁通发生变化，回路中就有感应电动势和感应电场存在。感应电动势和感应电场与构成回路的材料性质无关，回路的材料仅决定感应电流的大小。因此，感应电动势和感应电场不仅存在于导体回路中，也可存在于导体回路之外的空间。对于空间中的任意回路（不一定是导体回路），电磁感应定律都成立，也就是说，(7.1-4)适应于任意回路。

一般情况下，在空间不仅有时变磁场产生的感应电场（涡旋电场） \vec{E}_i ，还可能同时存在静止电荷产生的静电场 \vec{E}_C （称为库伦电场），这样，空间的总电场 \vec{E} 就是这两个电场的矢量和，即

$$\vec{E} = \vec{E}_C + \vec{E}_i. \text{ 此时有}$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint_C \vec{E}_C \cdot d\vec{l} + \oint_C \vec{E}_i \cdot d\vec{l} \quad (7.1-5)$$

从静电场中的基本方程可知， $\oint_C \vec{E}_C \cdot d\vec{l} = 0$ ，则有

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint_C \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (7.1-6)$$

(7.1-6)式为推广了的法拉第电磁感应定律，它是用场量表示的法拉第电磁感应定律的积分形式，适用于所有情况。它表明，穿过回路所围面积的磁链变化是产生感应电动势的惟一条件。

当然，有三种情况可以使得穿过回路所围面积的磁链发生变化，其一是磁感应强度 \vec{B} 随时间变化；其二是回路运动（大小、形状、位置的变化）使得磁链发生变化；其三是不仅磁感应强度 \vec{B} 随时间变化，同时回路也运动。下面对着三种情况分别讨论。

① 回路静止（相对于磁场回路没有机械运动），只有磁感应强度 \vec{B} 随时间变化情形

由于回路没变化，则它所围的面积也不变化，这样(7.1-6)式右边的求导应是只对变化的磁感

应强度 \vec{B} 的求导，这样有

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (7.1-7)$$

此为回路不变、磁感应强度随时间变化情形下电磁感应定律的积分形式。利用斯托克斯定理可以得到

$$\int_S (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{S} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (7.1-7)$$

由于上式对于任意回路所围面积都成立，则有

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (7.1-8)$$

此为回路不变、磁感应强度随时间变化情形下电磁感应定律的微分形式。它表明变化的磁场将激发电场；时变电场是一有旋场，它的源就是时变磁场。该电场通常称为感应电场，它是一种涡旋场，不同于静止电荷产生的库仑电场。回路不变、磁感应强度随时间变化情形下产生的感应电动势称为感生电动势，它是由感应场力而产生的非静电力，电动机就是根据这一原理制成的。

② 导体回路在恒定磁场 \vec{B} 中运动情形

在导体回路中，如果组成导体回路的一个导体棒以速度 \vec{v} 在恒定磁场 \vec{B} 中运动时，由于导体回路的磁链发生变化，则必定有感应电场存在。磁场力（也称为洛伦兹力） $\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$ 将使导体棒中的自由电荷朝一端移动，使得导体棒一端带正电荷，另一端带负电荷，这两端的正负电荷又形成了库仑力 $\vec{F}_i = \vec{E}_i q$ ，如图7.1-2所示。当导体棒中的库仑力与磁场力达到平衡时，使得运动导体棒中自由电荷的净受力为零。此时，有 $\vec{F}_m = \vec{F}_i$ ，从而可以得到

$$\vec{E}_i = \vec{v} \times \vec{B} \quad (7.1-9)$$

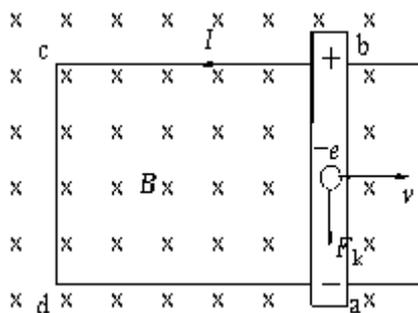


图7.1-2 导体回路在恒定磁场中运动

由于导体棒是导体回路的一部分，则导体回路在恒定磁场中运动引起的感应电动势为

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (7.1-10)$$

此为导体回路在恒定磁场中运动情形下电磁感应定律的积分形式。

根据 (7.1-10) 式，利用斯托克斯定理可得

$$\nabla \times \vec{E} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (7.1-11)$$

此为导体回路在恒定磁场中运动情形下电磁感应定律的微分形式。它表明即使磁感应强度 \vec{B} 不随时间变化，只要导体回路在恒定磁场中运动也将激发电场。该感应电场通常称为动生电场，它不同于静止电荷产生的库伦电场。导体回路在恒定磁场中运动情形下产生的感应电动势称为动生电动势，它是由洛伦兹力而产生的非静电力，发电机就是根据这一原理制成的。

③ 导体回路在时变磁场 \vec{B} 中运动情形

当导体回路在时变磁场中运动时，随时间变化的磁感应强度 \vec{B} 和导体回路的运动都会使导体回路所围面积中的磁链发生变化，因此产生的感应电动势应是这两种情况各产生感应电动势的叠加，即

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} + \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (7.1-12)$$

此为导体回路在时变磁场 \vec{B} 中运动情形下电磁感应定律的积分形式。利用斯托克斯定理可以得到

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (7.1-13)$$

此为导体回路在时变磁场 \vec{B} 中运动情形下电磁感应定律的微分形式。它表明导体回路在时变磁场 \vec{B} 中运动时产生的感应电动势有两部分组成：一是由时变磁场引起的感生电动势，二是由回路运动引起的动生电动势。这两种电磁感应现象是两种物理性质不同的现象，但都服从统一的法拉第电磁感应定律。

至此，我们知道，产生电场的源不仅有静止电荷，变化的磁场也能产生电场，电场与磁场紧密相连。电场的源有两种，即静止电荷和时变磁场。电磁感应定律揭示了时变磁场产生电场的规律。

【例题7-1】假设半径为30cm的细圆形导电环位于xoy平面，圆环的电阻为10Ω。当通过圆环所围面积的磁感应密度 $\vec{B} = \vec{e}_x 3 \cos 300t + \vec{e}_y 4 \sin 500t + \vec{e}_z 5 \sin 314t$ 特斯拉时，求圆环内产生的感应电流的有效值。

解：采用圆柱坐标 (ρ, ϕ, z) 。由于细圆形导电环位于xoy平面，则圆环所围面积的单位法线矢量为 \vec{e}_z 。

则圆环所围微分面积 ds 为

$$ds = \rho d\rho d\phi$$

在任一时间内圆环内的总磁链 ψ 为

$$\psi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_S B_z ds = B_z \int_S ds = 5 \sin(\omega t) \int_0^{0.3} \rho d\rho \int_0^{2\pi} d\phi = 0.45\pi \sin(\omega t)$$

因为总磁链变化的角频率 ω 变化，则产生的感应电动势为

$$\varepsilon = - \frac{d\psi}{dt} = -0.45\pi\omega \cos(\omega t)$$

则感应电动势的最大值为： $\varepsilon_M = 0.45\pi\omega$ ，其有效值为 $\varepsilon_p = \frac{\varepsilon_M}{\sqrt{2}} = \frac{0.45\pi\omega}{\sqrt{2}}$ 。

这样，圆环内产生的感应电流的有效值为

$$I = \frac{\varepsilon_p}{R} = \frac{\varepsilon_p}{10} = \frac{0.45\pi\omega}{10\sqrt{2}} = \frac{0.45 \times 3.14 \times 314}{10\sqrt{2}} \approx 31.738, A$$

7.2 位移电流

我们知道，静态情况下的电场基本方程之一为 $\nabla \times \vec{E} = 0$ ，非静态（时变）情况下的电场基本方程之一为 $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ ，可见静态情况下的电场基本方程在非静态时发生了变化。这不仅是方程形式的变化，而是一个本质的变化。其中包含了重要的物理事实，也就是法拉第提出的电磁感应定律，即时变磁场可以激发电场。根据对称性原理，随时间变化的磁场要产生电场，那么随时间变化的电场（时变电场）是否会产生磁场呢？回答是肯定的。英国物理学家麦克斯韦根据将恒定磁场中的安培环路定理用于时变电磁场时出现的矛盾，提出了位移电流的假说。麦克斯韦利用位移电流这一假设，通过对安培环路定理的修正，揭示了随时间变化的电场也要激发磁场。

从第4章我们知道，静磁场中的安培环路定理的微分方程为

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (7.2-1)$$

式中， \vec{H} 为磁场强度， \vec{J} 为环路的传导电流密度。

对（7.2-1）式两面取散度，则有

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{H}) = \nabla \cdot \vec{J} \quad (7.2-2)$$

由矢量恒等式 $\nabla \cdot (\nabla \times \vec{H}) = 0$ 可知

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (7.2-3)$$

此式为静磁场的安培环路定理，也称为恒定电流的连续性方程。

对于时变电磁场，因电荷随时间变化，不可能根据电荷守恒原理推出电流连续性方程。根据电荷守恒定律，电荷密度 ρ 与电流密度 \vec{J} 之间的关系为

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (7.2-4)$$

由（7.2-3）与（7.2-4）式可见，静态场与时变场情况下所得到的电流密度的散度不相等，也就是说两者之间产生了矛盾。因此，静态场情况下的安培环路定理对时变电磁场不成立。

可以用串联到电路中的一个电容器来说明这种矛盾现象，如图7.2-1所示。假设电路中有随时间变化的传导电流 $i(t)$ ，则可相应地建立时变磁场。选取以一个以闭合路径 C 为边界的开放曲面 S_1 ，闭合路径 C 包围导线。根据静磁场中的安培环路定理可得 $\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = i(t)$ 。由于 $\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = i(t)$ 对环路 C 没有限制，它可以是任意包围电流 $i(t)$ 的任意环路，因此再选定一个以闭合路径 C 为边界的开放曲面 S_2 ，它的曲面包围了电容器的一个极板，由于穿过 S_2 曲面的传导电流等于0，则 $\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = 0$ 。可见对于同一个磁场强度 \vec{H} 在闭合路径 C 上的环量得到相矛盾的结果，这是电容器破坏了电路中传导

电流连续性的缘故。说明静磁场中的安培环路定理不适用于时变电磁场，也就是说安培环路定理的应用受到了限制。也可以说安培环路定律和电荷与电流连续性定理只有在恒定情况下是一致的，在时变情况下是矛盾的。

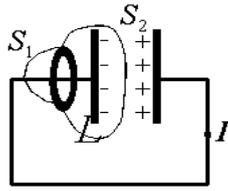


图7.2-1 含有一个电容器的电路

麦克斯韦通过对产生这一矛盾结果的深入研究，于1862年提出了位移电流的假说。认为在电容器的两个极板间必定有另一种形式的电流存在，其量值与传导电流 $i(t)$ 相等。事实上，电容器极板上的电荷分布随外接时变电压源而变化。极板上的时变电荷形成了电容器极板间的时变电场。电容器两个极板间存在的另一种形式的电流就是由两极板之间的时变电场产生的，称为位移电流。

假设静电场中的高斯定理 $\nabla \cdot \vec{D} = \rho$ 对时变场仍然成立，将其代入电荷守恒定律后有

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot \vec{D}) = -\nabla \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (7.2-5)$$

这样可以得到

$$\nabla \cdot \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = 0 \quad (7.2-6)$$

此式称为时变电磁场中的电流的连续性方程。式中的 $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ 是电位移矢量 \vec{D} 随时间的变化率，单位为

A/m^2 （安培/米²），它与传导电流密度的单位相同，麦克斯韦将它称为位移电流密度 \vec{J}_d ，即

$$\vec{J}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (7.2-7)$$

(7.2-6) 式也称为时变条件下的电流连续性方程。位移电流的引入解除了安培环路定理不适用于时变电磁场的限制，也解决了含有电容器的电路在同一个磁场强度 \vec{H} 在闭合路径 C 上的环量产生矛盾的问题。与静态场的电流的连续性方程 $\nabla \cdot \vec{J} = 0$ 相比，时变电磁场中的电流的连续性方程

$\nabla \cdot \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = 0$ 只是增加了位移电流密度一项。这样就对安培环路定理微分形式进行了修正，即

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (7.2-8)$$

对安培环路定理积分形式修正为

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S} \quad (7.2-9)$$

位移电流的引入扩大了电流的概念。在导体中自由电子的定向运动形成的电流称为传导电流，当导电媒质的电导率为 σ 时，传导电流的密度为 $\vec{J} = \sigma\vec{E}$ ；在真空或气体中，带电粒子的定向运动也形成电流，称为运流电流，当带电粒子以速度 v 运动时，运流电流的密度为 $\vec{J}_v = q\vec{v}$ ；位移电流不代表电荷运动，只是在产生磁的效应方面与传导电流等效，这与传导电流和运流电流不同。

如果将传导电流、运流电流和位移电流之和称为全电流，则全电流无论是对于静态场还是时变场，安培环路定理都成立。因此，(7.2-8)和(7.2-9)式称为全电流定律，也称为全电流连续性方程，或称为推广的安培环路定理。由于在实际应用中，绝大多数情况都是针对固体导电媒质，它只有传导电流而没有运流电流，因此在今后的讨论中除非有特别说明，所有的电流都不涉及运流电流这一项。

从(7.2-8)和(7.2-9)式的全电流定律可以看出，位移电流（电位移矢量随时间的变化率的积分）能像传导电流一样能够产生磁场。在时变场中，单纯的传导电流是不连续的，传导电流加位移电流才是连续的。位移电流的引入是建立麦克斯韦方程组的至关重要的一步，它揭示了时变电场产生磁场这一重要的物理概念。但是位移电流只表示电场的变化率，与传导电流不同，它不产生热效应。

在绝缘介质中，无传导电流但有位移电流；在理想导体中，无位移电流但有传导电流；在一般介质中，既有传导电流又有位移电流。

全电流定律揭示的不仅是传导电流可以激发磁场，而且也揭示了变化的电场也可以激发磁场。它与变化的磁场激发电场形成了自然界的一个对偶关系。全电流定律适用于时变场也适用于恒定场。全电流定律反映了电场和磁场作为一个统一体相互制约、相互依赖的另一个方面，它和法拉第电磁感应定律处于同一地位。

【例题7-2】假设铜中的电场为 $\vec{E} = E_0 \sin \omega t$ ，铜的电导率为 $\sigma = 5.8 \times 10^7, S/m$ ，介电常数为 ϵ_0 。求铜中的最大位移电流密度和最大传导电流密度之比。

解：铜中的传导电流密度大小为 $J_c = \sigma E = \sigma E_0 \sin \omega t$

铜中的位移电流密度大小为 $J_d = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} = \epsilon_0 \omega E_0 \cos \omega t$

则铜中的位移电流密度和传导电流密度的最大值之比为

$$\frac{J_d|_{\max}}{J_c|_{\max}} = \frac{\epsilon_0 \omega}{\sigma} = \frac{2\pi f (1/36\pi) \times 10^{-9}}{5.8 \times 10^7} = 9.6 \times 10^{-19} f$$

【例题7-3】在无源的自由空间中，已知磁场强度为 $\vec{H} = \vec{e}_y 4 \times 10^{-5} \cos(5 \times 10^9 t - 30z), (A/m)$ ，求位移电流密度 \vec{J}_d 。

解：由于在无源自由空间中的传导电流密度 $J = 0$ ，则麦克斯韦方程的第一式变为

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J}_d$$

这样，位移电流密度 \vec{J}_d 为

$$\vec{J}_d = \nabla \times \vec{H} = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 4 \times 10^{-5} \cos(5 \times 10^9 t - 30z) & 0 \end{vmatrix}$$

$$= -\vec{e}_x 1.2 \times 10^{-3} \sin(5 \times 10^9 t - 30z), (A/m^2)$$

7.3 麦克斯韦方程组与辅助方程

库伦定律、安培定律和法拉第电磁感应定律是电磁学的三大实验定律。由于它们分别在各自的特定条件下总结出来，因此只适用在静态场或缓变电磁场中应用。1864年，麦克斯韦根据他提出的位移电流、涡旋电场等假设，在对前人得到的实验结果和总结的基础上，总结出了适合静态场和时变场的著名麦克斯韦方程组。

麦克斯韦方程组描述了宏观电磁现象所遵循的基本规律，是电磁场理论的基本方程。它揭示了电场与磁场、电场与电荷、磁场与电流之间的相互关系，是自然界电磁运动规律最简洁的数学描述，是分析研究电磁问题的基本出发点。

麦克斯韦方程组是表示场结构的定律，说明了带电体电场和磁场之间相互联系和相互制约的规律。然而电磁理论被建立后并没有被马上被公认，一方面电磁理论太深邃了，仅用几个数字符号组成的方程就包罗电荷、带电体、电流、磁场、光等许多现象中的众多规律，太不可思议了。同时代的人都用“科学不是游戏”表示对方程组的怀疑。就连法拉第也是忧心忡忡，担心所有的物理意义都丧失了。

新的理论违背了过去的传统，必将遭到习惯势力的阻挠。然而，真正的科学理论必将被实践证明。1886~1888年，赫兹用一系列的实验证实了光的电磁本质，证实了麦克斯韦方程组，从此将光学与电磁学统一起来。1899年列别捷夫完成了光压测定实验，从另一方面证实了麦克斯韦理论。至此，麦克斯韦的电磁理论得到了全面的证实。

7.3.1 麦克斯韦方程组积分形式

麦克斯韦方程组积分形式描述了任意闭合曲面或闭合曲线所占空间范围内场与场源（电荷、电流、时变的电场与磁场）相互之间的关系。静态场中的高斯定理及磁通连续性原理对于时变电磁场仍然成立。对于时变电磁场，麦克斯韦归纳为四个方程，其积分形式为：

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S} \quad (7.3-1)$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (7.3-2)$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (7.3-3)$$

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho dV \quad (7.3-4)$$

麦克斯韦积分方程组中的第一方程（7.3-1）式事实上就是全电流定律，它表明磁场强度沿任意闭合曲线的环量，等于穿过以该闭合曲线为周界的任意曲面的传导电流与位移电流之和，它是麦克斯韦积分方程组的核心方程之一。

麦克斯韦积分方程组中的第二方程（7.3-2）式事实上就是推广的法拉第电磁感应定律，它表明电场强度沿任意闭合曲线的环量，等于穿过以该闭合曲线为周界的任意曲面的磁通量变化率的负值，它也是麦克斯韦积分方程组的核心方程之一。

麦克斯韦积分方程组中的第三方程（7.3-3）式事实上就是磁通连续性原理，它表明穿过任意闭合曲面的磁感应强度的通量恒等于0。

麦克斯韦积分方程组中的第四方程（7.3-4）式事实上就是高斯定律，它表明穿过任意闭合曲面

的电位移矢量的通量等于该闭合面所围体积内自由电荷的代数和。

7.3.2 麦克斯韦方程组微分形式

麦克斯韦方程组微分形式描述了空间任意一点场的变化规律。麦克斯韦方程组微分形式为：

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (7.3-5)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (7.3-6)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (7.3-7)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (7.3-8)$$

麦克斯韦微分方程组中的第一方程(7.3-5)式表明,传导电流和变化的电场都能产生磁场,时变磁场的激发源除了传导电流以外,还有变化的电场。时变磁场是有旋场,时变电场能够产生磁场,它是麦克斯韦微分方程组的核心方程之一。

麦克斯韦微分方程组中的第二方程(7.3-6)式表明,变化的磁场能够产生电场,该电场的激发源是变化的磁场,时变电场是有旋场,它也是麦克斯韦微分方程组的核心方程之一。

麦克斯韦微分方程组中的第三方程(7.3-7)式表明,磁场是无源场,磁力线总是闭合曲线,时变磁场是无散场。

麦克斯韦微分方程组中的第四方程(7.3-8)式表明,电荷可以产生电场,电荷也是电场的激发源,时变电场是有散场。

从麦克斯韦方程组中的四个方程联合来看,时变电场是有旋有散场,时变磁场是有旋无散场。由于时变电磁场中的电场与磁场是不可分割的,因此时变电磁场是有旋有散场。当电荷及电流均不存在的无源区中,时变电磁场是有旋无散场。

电场的激发源除了电荷以外,还有变化的磁场;磁场的激发源除了传导电流以外,还有变化的电场。电场和磁场互为激发源,相互激发。时变电磁场的电场和磁场不再相互独立,而是相互关联,构成一个整体——电磁场,电场和磁场分别是电磁场的两个分量。

麦克斯韦方程组的四个方程并不都是独立的。麦克斯韦方程组的第一、二方程是独立方程,三、四方程可以借助一、二方程和电流连续性方程推导得出。

如将第一方程(7.3-5)式两边取散度,则

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{H}) = \nabla \cdot \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = \nabla \cdot \vec{J} + \nabla \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \vec{D}$$

根据矢量恒等式 $\nabla \cdot (\nabla \times \vec{H}) = 0$ 和电流连续性方程 $\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$ 可以得到

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \vec{D} = -\nabla \cdot \vec{J} = \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

化简上式,可以得到麦克斯韦方程组的第四个方程,即

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

可见,麦克斯韦方程组的第四个方程可由第一个方程与电流连续性方程导出。

同理,将第二方程(7.3-6)式两边取散度,则

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{E}) = \nabla \cdot \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \vec{B})$$

根据矢量恒等式 $\nabla \cdot (\nabla \times \vec{E}) = 0$ 可以得到

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot \vec{B}) = 0$$

如果某一时刻在空间任一点处 $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ ，则在整个空间区域中任意时刻任意点处处为零，则可以得到麦克斯韦方程组的第三个方程，即

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

总之，麦克斯韦方程组中只有三个方程是独立的，其中第一、二方程是独立的，它们与第三或第四方程可以组成独立方程，另一个方程可由这三个方程得到。由于第一、二方程是矢量方程，每个方程都可以等价为三个标量方程。第三或第四方程是标量方程，因此，麦克斯韦方程组可以说是由七个独立的标量方程组成。

7.3.3 麦克斯韦方程组的辅助方程—本构关系

在电磁场理论中，描述场量的参数有四个，即电场强度 \vec{E} 、电位移矢量 \vec{D} 、磁场强度 \vec{H} 和磁感应强度 \vec{B} 。前述的麦克斯韦方程组没有限定这四个量的相互关系，因此称为麦克斯韦方程组的非限定形式。在麦克斯韦方程组的非限定形式中共有电场强度 \vec{E} 、电位移矢量 \vec{D} 、磁场强度 \vec{H} 、磁感应强度 \vec{B} 、电流密度 \vec{J} 等五个矢量和电荷密度 ρ 这一个标量。由于一个矢量在常用坐标系中可以分解为三个标量，因此麦克斯韦方程组的非限定形式中共有十六个标量。由麦克斯韦方程组可以建立七个独立的标量方程。为了求解麦克斯韦方程组，还需要另外提供九个独立的标量方程。这九个方程就是对麦克斯韦方程组进行限定的辅助方程，也是描述电磁媒质与场矢量之间关系的本构关系。

一般情况下，表征电磁媒质与场矢量之间关系的本构关系为：

$$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \\ \vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \\ \vec{J} = \sigma \vec{E} \end{cases} \quad (7.3-9)$$

对于各向同性的线性媒质（常用，除非特殊说明，今后只讨论此种情况），(7.3-9) 变为

$$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon \vec{E} \\ \vec{B} = \mu \vec{H} \\ \vec{J} = \sigma \vec{E} \end{cases} \quad (7.3-10)$$

式中， ϵ 、 μ 、 σ 为电磁媒质的介电常数、磁导率和电导率， ϵ_0 、 μ_0 表示真空中的介电常数和磁导率。

\vec{P} 、 \vec{M} 为电磁媒质的极化强度和磁化强度。

方程 (7.3-1) 是三个矢量方程，它在常用坐标系中可以分解为九个标量独立的标量方程。再与麦克斯韦方程组可以给出的七个标量方程，就可以完全对非限定形式的麦克斯韦方程组进行求解。

将电磁媒质的本构关系代入到麦克斯韦方程组中，可以得到仅用电场强度 \vec{E} 和磁场强度 \vec{H} 表示的麦克斯韦方程组微分形式，即

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{H} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \end{cases} \quad (7.3-11)$$

对应的麦克斯韦方程组积分形式为

$$\begin{cases} \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \left(\sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S} \\ \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_S \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \\ \oint_S \vec{H} \cdot d\vec{S} = 0 \\ \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon} \int_V \rho dV \end{cases} \quad (7.3-12)$$

(7.3-11) 和 (7.3-12) 式称为麦克斯韦方程组的限定形式, 它适用于线性、均匀和各向同性的电磁媒质。

7.3.4 洛伦兹力

静止电荷可以激发电场, 电荷运动形成的电流可以激发磁场, 因此可以说电荷激发电磁场。而存在的电磁场反过来又会对电荷产生作用力(电场力和磁场力)。当空间同时存在电场和磁场时, 以速度 v 运动的点电荷 q 所受的电磁场力 \vec{F} 为

$$\vec{F} = q\vec{E} + qv \times \vec{B} \quad (7.3-13)$$

式中, 右边第一项为点电荷 q 所受的电场力, 右边第二项为点电荷 q 所受的磁场力。

当电荷以密度 ρ 连续分布时, 电荷系统所受的电磁场力的密度 \vec{f} 为

$$\vec{f} = \rho\vec{E} + \rho v \times \vec{B} \quad (7.3-14)$$

(7.3-13) 和 (7.3-14) 式称为洛伦兹力公式。近代物理学实验证实, 任意运动的带电粒子所受的电磁场力都满足洛伦兹力公式。麦克斯韦方程组和洛伦兹力公式反映了电磁场的运动规律以及场与带电物质之间的相互作用, 构成了经典电磁理论的基础。

7.3.5 麦克斯韦方程组的讨论

在离开辐射源(如天线)的无源空间中, 电荷密度和电流密度矢量为零, 电场和磁场仍然可以相互激发。在无源空间中, 麦克斯韦方程组的两个旋度方程为

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{cases} \quad (7.3-15)$$

从 (7.3-15) 式可见, 这两个方程左边物理量为磁(或电), 而右边物理量则为电(或磁)。两个方程的右边相差一个负号, 而正是这个负号使得电场和磁场构成一个相互激励又相互制约的关系。当磁场减小时, 电场的旋涡源为正, 电场将增大; 而当电场增大时, 使磁场增大, 磁场增大反过来又使电场减小。这就使得电场和磁场相互激发, 电场线与磁场线相互交链, 自行闭合, 时变电场的方向与时变磁场的方向处处相互垂直, 从而在空间形成电磁振荡并传播, 即在空间形成传播的电磁波。

也就是说，方程（7.3-15）式中间的等号深刻揭示了电与磁的相互转化，相互依赖，相互对立，共存于统一的电磁波中。正是由于电不断转换为磁，而磁又不断转成为电，才会发生电与磁能量的交换和贮存。

从（7.3-15）式两边运算来看，它反映的是一种作用。方程的左边是空间的运算(旋度)，方程的右边是时间的运算(导数)，中间用等号相连接。它深刻揭示了电(或磁)场任一地点的变化会转化成磁(或电)场时间的变化；反过来，场的时间变化也会转化成空间（地点）的变化。正是这种空间和时间的相互变化构成了波动的外在形式，即一个地点出现过的事物，过了一段时间又会在另一地点出现。

在Maxwell方程（7.3-5）和（7.3-6）式中还存在另一对矛盾对抗，即（7.3-5）式右边有传导电流密度和电位移矢量随时间变化两项，而（7.3-6）式右边只有磁感应强度随时间变化这一项，这就构成了Maxwell方程本质的不对称性。尽管为了找其对称性而一直在探索磁流的存在，但到目前为止始终未果。

在静态场中，电场和磁场都不随时间变化，即 $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0, \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$ ，将此条件代入到时变情况下的

麦克斯韦方程组后可以得到

$$\begin{array}{l} \text{静电场:} \\ \text{静磁场:} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \\ \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho dV \end{array} \right. \quad \text{和} \quad \left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{E} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \\ \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \end{array} \right. \quad \text{和} \quad \left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{H} = \vec{J} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{array} \right.$$

这正是静态场的基本方程，电场与磁场不再相关，彼此独立。可见麦克斯韦方程组不仅适用于时变场，也同样适用于静态场。

麦克斯韦方程组是电磁场的基本方程，其在电磁学中的地位等同于力学中的牛顿定律。爱因斯坦（1879-1955）在他所著的“物理学演变”一书中有一段关于麦克斯韦方程的评述：“这个方程的提出是牛顿时代以来物理学上的一个重要事件，它是关于场的定量数学描述，方程所包含的意义比我们指出的要丰富得多。在简单的形式下隐藏着深奥的内容，这些内容只有仔细的研究才能显示出来，方程是表示场的结构的定律。它不像牛顿定律那样，把此处发生的事件与彼处的条件联系起来，而是把此处的现在的场只与最邻近的刚过去的场发生联系。假使我们已知此处的现在所发生的事件，藉助这些方程便可预测在空间稍为远一些，在时间上稍为迟一些所发生的事件”。

麦克斯韦方程除了对于科学技术的发展具有重大意义外，对于人类历史的进程也起了重要作用。正如美国著名的物理学家费恩曼在他所著的“费恩曼物理学讲义”中写道“从人类历史的漫长远景来看，即使过一万年之后回头来看，毫无疑问，在十九世纪中发生的最有意义的事件将判定是麦克斯韦对于电磁定律的发现，与这一重大科学事件相比之下，同一个十年中发生的美国内战(1861-1865)将会降低为一个地区性琐事而黯然失色”。

7.4 时变电磁场的边界条件

适合静态场的各种边界条件原则上可以直接推广到时变电磁场。时变电磁场中媒质分界面上的边界条件的推导方式与静态场推导方法类同。研究时变电磁场的边界条件出发点是麦克斯韦方程。由于媒质分界面两边的媒质特性不同导致某些场分量发生突变，使得麦克斯韦方程的微分形式失去意义，因此只能应用麦克斯韦方程积分形式来推导。

为了使导出的边界条件不受所采用的坐标系限制，将场矢量在分界面上分解为垂直分界面的法向场矢量和平行于分界面的切向场矢量两部分。从时变电磁场方程中可见，电位移矢量和磁感应强度的通量垂直于分界面，由它可导出这两场矢量在分界面上法向方向的边界条件；电场强度和磁场强度的环量平行于分界面，由它可导出这两场矢量在分界面上切向方向的边界条件。

7.4.1 时变电磁场的法向边界条件

时变电磁场的法向边界条件由时变场的麦克斯韦方程的第三、四个方程推导得到。因为这两个

方程与静态场的相对对应方程形式上完全一样，因此得到的法向方向上的边界条件形式完全一样。它们的差别只是这里的电位移矢量与磁感应强度表示的是时变矢量，而静态场中的相应矢量表示的是稳态场矢量（不随时间变化），因此这里可直接写出时变电磁场的法向分量边界条件，即

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \cdot \vec{e}_n = \rho_s \quad \text{或} \quad \vec{D}_{1n} - \vec{D}_{2n} = \rho_s \quad (7.4-1)$$

和

$$(\vec{B}_1 - \vec{B}_2) \cdot \vec{e}_n = 0 \quad \text{或} \quad \vec{B}_{1n} - \vec{B}_{2n} = 0 \quad (7.4-2)$$

这里， $\vec{D}_{1n}, \vec{D}_{2n}$ 分别表示介质1与介质2中在分界面法向方向的电位移分量； $\vec{B}_{1n}, \vec{B}_{2n}$ 分别表示介质1与介质2中在分界面法向方向的磁感应强度分量。

(7.4-1) 式称为电位移矢量的边界条件。它表明，当分界面上有自由电荷存在时，电位移矢量的法向分量不连续而产生突变，其突变量等于分界面上的自由面电荷密度。

(7.4-2) 式称为磁感应强度的边界条件。它表明，磁感应强度的法向分量在边界两边连续。

如果分界面上的自由面电荷密度为0，则电位移矢量的边界条件变为

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \cdot \vec{e}_n = 0 \quad \text{或} \quad \vec{D}_{1n} - \vec{D}_{2n} = 0 \quad (7.4-3)$$

这表明，分界面上无自由面电荷时，电位移矢量的法向分量连续，不发生突变。

7.4.2 时变电磁场的切向边界条件

时变电磁场的切向边界条件由时变场的麦克斯韦方程的第一、二个方程推导得到。这两个方程与静态场的相对对应方程形式上相似，只是第一个方程的右边为全电流，比静电场对应方程多了位移

电流 $\int_s \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$ ；第二个方程的右边比静电场对应方程多了一项感应电动势 $-\int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$ 。其余形式

上则完全一样。

由于电位移矢量随时间的变化 $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ ，以及磁感应强度随时间的变化 $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ 均为有限值，则在分界面相邻两边 Δl 有

$$\lim_{\Delta l \rightarrow 0} \int_s \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (7.4-4)$$

$$\lim_{\Delta l \rightarrow 0} \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (7.4-5)$$

这样，时变场的麦克斯韦方程的第一、二个方程就变得与静态场的相对对应方程形式上完全相同。只是电场强度与磁场强度表达的意义不同。因此这两个场矢量的边界条件完全等同于静态场的边界条件，因此这里可直接写出时变电磁场的切向分量边界条件，即

$$\vec{e}_n \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = \vec{J}_s \quad \text{或} \quad \vec{H}_{1t} - \vec{H}_{2t} = \vec{J}_s \quad (7.4-6)$$

和

$$\vec{e}_n \times (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = 0 \quad \text{或} \quad \vec{E}_{1t} = \vec{E}_{2t} \quad (7.4-7)$$

式中， $\vec{H}_{1t}, \vec{H}_{2t}$ 分别表示介质1与介质2中在分界面切向方向的磁场强度； $\vec{E}_{1t}, \vec{E}_{2t}$ 分别表示介质1与介质2中在分界面切向方向的电场强度。

(7.4-6) 式称为磁场强度的边界条件。它表明, 当分界面上有自由面电流存在时, 磁场强度切向分量不连续且产生突变, 其突变量等于分界面上的面电流密度。

(7.4-7) 式称为电场强度的边界条件。它表明分界面上电场强度的切向分量连续。

如果分界面上的面电流密度为0, 则磁场强度的边界条件变为

$$e_n \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = 0 \quad \text{或} \quad \vec{H}_{1t} - \vec{H}_{2t} = 0 \quad (7.4-8)$$

表明分界面上无面电流时, 磁场强度的切向分量连续, 不发生突变。

7.4.3 典型情况下的边界条件

同静态场一样, 如果一个介质 (假设介质2) 是理想导体, 则其边界条件为

$$\begin{cases} e_n \times \vec{H}_1 = \vec{J}_s \\ e_n \times \vec{E}_1 = 0 \\ e_n \cdot \vec{B}_1 = 0 \\ e_n \cdot \vec{D}_1 = \rho_s \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} \vec{H}_{1t} = \vec{J}_s \\ \vec{E}_{1t} = 0 \\ \vec{B}_{1n} = 0 \\ \vec{D}_{1n} = \rho_s \end{cases} \quad (7.4-9)$$

表明电力线垂直于理想导体表面, 磁力线平行于理想导体表面。

如果两个媒质都是理想介质, 即 $\rho_s = 0, \vec{J}_s = 0$, 则其边界条件为

$$\begin{cases} e_n \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = 0 \\ e_n \times (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = 0 \\ e_n \cdot (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) = 0 \\ e_n \cdot (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = 0 \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} \vec{H}_{1t} - \vec{H}_{2t} = 0 \\ \vec{E}_{1t} - \vec{E}_{2t} = 0 \\ \vec{B}_{1n} - \vec{B}_{2n} = 0 \\ \vec{D}_{1n} - \vec{D}_{2n} = 0 \end{cases} \quad (7.4-10)$$

表明在两理想介质分界面上, 电场强度和磁场强度的切向分量连续, 电位移矢量和磁感应强度的法向分量连续。

对电磁场的边界条件进行总结后可以得到以下结论: 时变电磁场的边界条件与静态场的边界条件完全相同。

①在两种媒质分界面上, 如果存在面电流, 则磁场强度的切向分量不连续, 两磁场强度切向分量之差等于面电流密度; 如果不存在面电流, 则磁场强度的切向分量连续。

②在两种媒质分界面上, 电场强度的切向分量连续。

③在两种媒质分界面上, 磁感应强度的法向分量连续。

④在两种媒质分界面上, 如果存在自由面电荷, 则电位移矢量的法向分量不连续, 两电位移矢量法向分量之差等于面电荷密度; 如果不存在面电荷, 则电位移矢量的法向分量连续。

【例题7-4】假设在分界面xoy平面的上方 ($z > 0$) 和下方 ($z < 0$) 有两个区域。在 $z > 0$ 的区域中的电磁参数 $\varepsilon_1 = \varepsilon_0, \mu_1 = \mu_0, \sigma_1 = 0$, 在 $z < 0$ 的区域中的电磁参数 $\varepsilon_2 = 5\varepsilon_0, \mu_2 = 20\mu_0, \sigma_2 = 0$ 。 $z > 0$ 的区域

中的电场强度为 $\vec{E}_1 = \vec{e}_x [60\cos(\omega t - 5z) + 20\cos(\omega t + 5z)] (V/m)$, $z < 0$ 的区域中的电场强度为

$\vec{E}_2 = \vec{e}_x A \cos(\omega t - 50z) (V/m)$ 。求(1)常数A; (2)磁场强度 \vec{H}_1 和 \vec{H}_2 ; (3)证明在 $z=0$ 处 \vec{H}_1 和 \vec{H}_2 满足边界条件。

解:

(1) 根据边界条件, 在分界面上电场强度的切线分量连续, 即 $E_{1t} = E_{2t}$ 。由于分界面的切线方向为 x, y 方向, 而两区域中的电场强度都只有 x 分量 (切线分量), 因此在分界面 $z=0$ 处有

$$60\cos(\omega t) + 20\cos(\omega t) = A\cos(\omega t)$$

从而，可以得到 $A = 80$ 。

(2) 根据麦克斯韦方程第二式 $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ 和本构关系 $\vec{B} = \mu \vec{H}$ 可以得到

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{\mu} \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & 0 & 0 \end{vmatrix} = -\frac{1}{\mu} \vec{e}_y \frac{\partial A_x}{\partial z} + \frac{1}{\mu} \vec{e}_z \frac{\partial A_x}{\partial y}$$

由于

$$\begin{cases} A_{x1} = 60 \cos(\omega t - 5z) + 20 \cos(\omega t + 5z) \\ A_{x2} = 80 \cos(\omega t - 50z) \end{cases}$$

则

$$\begin{cases} \frac{\partial A_{x1}}{\partial z} = 300 \sin(\omega t - 5z) - 100 \sin(\omega t + 5z) \\ \frac{\partial A_{x1}}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial A_{x2}}{\partial z} = 4000 \sin(\omega t - 50z) \\ \frac{\partial A_{x2}}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

从而可求得

$$\frac{\partial \vec{H}_1}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \vec{e}_y [300 \sin(\omega t - 5z) - 100 \sin(\omega t + 5z)]$$

$$\frac{\partial \vec{H}_2}{\partial t} = -\frac{1}{20\mu_0} \vec{e}_y 4000 \sin(\omega t - 50z)$$

这样，有

$$\vec{H}_1 = \frac{1}{\omega\mu_0} \vec{e}_y [300 \cos(\omega t - 5z) - 100 \cos(\omega t + 5z)]$$

$$\vec{H}_2 = \frac{1}{20\omega\mu_0} \vec{e}_y [4000 \cos(\omega t - 50z)]$$

(3) 在分界面上，将 $z=0$ 代入 \vec{H}_1 和 \vec{H}_2 中，则有

$$\vec{H}_1 = \frac{1}{\omega\mu_0} \vec{e}_y [200 \cos \omega t]$$

$$\vec{H}_2 = \frac{1}{\omega\mu_0} \vec{e}_y [200 \cos \omega t]$$

可见，由于分界面两边的介质为理想介质，其分界面上没有面电流存在，则分界面两边的磁场强度的切向分量 \vec{e}_y 相等，即 $\vec{H}_1 = \vec{H}_2$ 。

7.5 场量与位函数的波动方程

麦克斯韦方程是一阶矢量微分方程组，描述电场与磁场间的相互作用关系。时变电磁场中，电场与磁场相互激励，在空间形成电磁波。时变电磁场的能量以电磁波的形式进行传播，说明电磁场具有波动性。描述电磁场的波动性需要利用电磁场的波动方程。波动方程是二阶矢量微分方程，揭示了电磁场的波动性。同静态场中引入位函数一样，为了使复杂的问题求解得到简化，在时变电磁场中也需引入位函数。

7.5.1 场量波动方程

电磁场的波动方程表明了时变电磁场的运动规律，可通过麦克斯韦方程来建立。针对常用的条件或环境，这里给出建立无源空间的波动方程的一般方法。

在无源空间 ($\rho = 0, \vec{J} = 0$) 中，设媒质是线性、各向同性且无损耗的均匀媒质，则只用电场强度 \vec{E} 和磁场强度 \vec{H} 两个矢量场来描述的麦克斯韦方程微分形式为

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{H} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{E} = 0 \end{cases} \quad (7.5-1)$$

将 (7.5-1) 式的第二个方程两边取旋度，则有

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla \times \left(-\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H})$$

将 (7.5-1) 式的第一个方程代入上式，有

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

利用矢量恒等式 $\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$ ，以及 (7.5-1) 式的第四个方程，上式可变为

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\nabla^2 \vec{E} = -\varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

即

$$\nabla^2 \vec{E} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (7.5-2)$$

(7.5-2) 式为无源区中电场强度矢量 \vec{E} 满足的齐次波动方程， ∇^2 为矢量拉普拉斯算符。

类似，可以得到无源区中磁场强度矢量 \vec{H} 满足的齐次波动方程，即

$$\nabla^2 \vec{H} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (7.5-3)$$

这样，无源区中的电场强度 \vec{E} 和磁场强度 \vec{H} 可以通过解 (7.5-2) 和 (7.5-3) 式的波动方程获得。当然，在求解这两个波动方程时，可以直接求解矢量方程，但这种方法在实际运算中较为复杂或困难，因此一般是将矢量方程转变为标量方程来进行求解。

在直角坐标系中，由于电场强度 \vec{E} 可以分解为三个标量，即 $\vec{E} = e_x E_x + e_y E_y + e_z E_z$ ，因此可将其矢量波动方程转变为三个标量波动方程，即

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} = 0 \end{cases}$$

同理，磁场强度 \vec{H} 的矢量波动方程也可以转变为相应的三个标量波动方程，即

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 H_x}{\partial t^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 H_y}{\partial t^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2} = 0 \end{cases}$$

当然，也可将矢量波动方程转换为其它坐标系下的标量波动方程，但是转换的结果形式非常复杂。波动方程的解是在空间中沿某一特定方向传播的电磁波。事实上，电磁波的传播问题都可归结为给定边界条件和初始条件下解波动方程。

(7.5-2) 和 (7.5-3) 式是无源理想介质中的波动方程。如果媒质是线性、各向同性的均匀导电媒质时，其波动方程如何呢？

我们知道，在线性、各向同性的均匀导电媒质中，麦克斯韦方程 (7.5-1) 式中的第一个方程右边应加上电流密度 $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ (它是导电媒质中的传导电流密度)，即 $\nabla \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E}$ ，其它三个

方程则不变。同无源理想介质空间推导波动方程一样，将 (7.5-1) 式的第二个方程两边取旋度后，

将 $\nabla \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E}$ 代入，则有

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H}) = -\varepsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

利用矢量恒等式 $\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$ ，以及 (7.5-1) 式的第四个方程，则可得到

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (7.5-4)$$

(7.5-4) 式即为导电媒质中电场强度矢量 \vec{E} 满足的波动方程。

类似, 可以得到导电媒质中磁场强度矢量 \vec{H} 满足的波动方程, 即

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (7.5-5)$$

这样, 导电媒质中的电场强度 \vec{E} 和磁场强度 \vec{H} 可以通过解 (7.5-4) 和 (7.5-5) 式的波动方程获得。同解无源区矢量波动方程一样, 导电媒质中矢量方程也可以变换为标量波动方程进行求解, 只是它要相对复杂一些。

(7.5-2) 和 (7.5-3) 式是无源理想介质空间中的波动方程, (7.5-4) 和 (7.5-5) 式是导电媒质中的波动方程。请思考一下, 如果在有源空间中, 其波动方程是怎样的形式呢? 这里只给出结果, 有兴趣的读者可以加以证明。

在有源空间 ($\rho \neq 0, \vec{J} \neq 0$), 电场强度 \vec{E} 和磁场强度 \vec{H} 满足的矢量波动方程为

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{E} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} + \frac{\nabla \rho}{\varepsilon} \\ \nabla^2 \vec{H} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = -\nabla \times \vec{J} \end{cases} \quad (7.5-6)$$

(7.5-6) 式称为有源区的非齐次矢量波动方程。

7.5.2 位函数波动方程

为了使对静电场、静磁场问题的分析和求解得以简化, 在静电场中引入了电位函数, 在静磁场中引入了矢量磁位和标量磁位辅助函数。类似, 在时变电磁场中也可以引入位函数来使得电磁场问题的分析和求解得以简化, 这里引入了矢量位和标量位这一辅助函数。

1. 矢量位函数与标量位函数

在麦克斯韦方程组中, $\nabla \cdot \vec{B} = 0$, 根据矢量恒等式 $\nabla \cdot \nabla \times \vec{A} \equiv 0$, 可令

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (7.5-7)$$

式中, \vec{A} 称为电磁场的矢量位函数, 简称矢量位, 单位为 $T \cdot m$ (特斯拉·米)。

将 (7.5-7) 式代入到无源区麦克斯韦方程组的第二个方程 $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ 中可得

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{A})$$

即

$$\nabla \times \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0$$

根据矢量恒等式 $\nabla \times (\nabla \phi) = 0$ ，可令

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\nabla \phi \quad (7.5-8)$$

式中， ϕ 称为电磁场的标量位函数，简称标量位，单位为 V （伏）。

这样，用位函数（矢量位和标量位）表示的电场强度为

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (7.5-9)$$

注意，这里的矢量位 \vec{A} 及标量位 ϕ 均是时间及空间函数，故也称为动态位。当它们与时间无关时，矢量位 \vec{A} 及标量位 ϕ 与场量的关系和静态场完全相同。矢量位 \vec{A} 及标量位 ϕ 相互联系，结合在一起才能确定电磁场。在时变场中如求得矢量位 \vec{A} 及标量位 ϕ ，就可以通过位函数求得电场强度 \vec{E} 和感应强度 \vec{B} ，进而利用本构关系求得电位移矢量 \vec{D} 和磁场强度 \vec{H} 。

2. 洛伦兹规范

从引入位函数的过程看，对矢量位 \vec{A} 只是规定其旋度，而没有规定其散度。根据亥姆霍兹定理，此时定义的满足（7.5-7）和（7.5-9）式的矢量位 \vec{A} 不是惟一的。

假设矢量位 $\vec{A}' = \vec{A} + \nabla \phi$ ，标量位 $\phi' = \phi - \frac{\partial \phi}{\partial t}$ ， ϕ 为任意可微标量函数，则根据（7.5-9）式有 $\vec{E}' = -\frac{\partial \vec{A}'}{\partial t} - \nabla \phi' = -\frac{\partial (\vec{A} + \nabla \phi)}{\partial t} - \nabla (\phi - \frac{\partial \phi}{\partial t})$ 。利用恒等式 $\nabla \times (\nabla \phi) = 0$ 可得

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{A}' &= \nabla \times (\vec{A} + \nabla \phi) = \nabla \times \vec{A} + \nabla \times (\nabla \phi) = \nabla \times \vec{A} \\ -\frac{\partial \vec{A}'}{\partial t} - \nabla \phi' &= -\frac{\partial (\vec{A} + \nabla \phi)}{\partial t} - \nabla (\phi - \frac{\partial \phi}{\partial t}) = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi = \vec{E} \end{aligned}$$

由于 ϕ 为任意可取值，因此位函数 (\vec{A}', ϕ') 能有无穷多组。也就是说对一给定的电磁场可用不同的位函数来描述，这是未规定矢量位 \vec{A} 的散度所致。

为了使引入的位函数 \vec{A} 、 ϕ 能够惟一，必须对矢量位 \vec{A} 加一散度条件（称为规范）。在电磁理论中，通常采用洛伦兹规范（也称为洛伦兹条件）来规范矢量位 \vec{A} 的散度，即

$$\nabla \cdot \vec{A} = -\epsilon \mu \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (7.5-10)$$

这样，通过（7.5-7）、（7.5-8）和（7.5-10）式可以惟一确定电磁场的场量。如果标量位函数不随时间变化，则（7.5-10）就变为库伦规范，正好与静态场的情况相同。

3.达朗贝尔方程

我们知道，电磁场的场量满足波动方程，那么，引入的位函数也必定满足波动方程。在线性、各向同性的均匀媒质中，将本构关系 $\vec{D} = \epsilon\vec{E}$ 和 $\vec{B} = \mu\vec{H}$ 代入到麦克斯韦方程组中的第一个方程

$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ 中，可以得到

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J} + \epsilon \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (7.5-11)$$

再将 $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ 和 $\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \varphi$ 代入 (7.5-11) 式，则有

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \mu \vec{J} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} - \epsilon \mu \nabla \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) \quad (7.5-12)$$

利用矢量恒等式 $\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$ 可以得到

$$\nabla^2 \vec{A} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \vec{J} + \nabla \left(\nabla \cdot \vec{A} + \epsilon \mu \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) \quad (7.5-13)$$

将洛伦兹规范 $\nabla \cdot \vec{A} = -\epsilon \mu \frac{\partial \varphi}{\partial t}$ 代入上式，可得

$$\nabla^2 \vec{A} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \vec{J} \quad (7.5-14)$$

(7.5-14) 式称为在洛伦兹规范下矢量位 \vec{A} 满足的微分方程。

同理，将 $\vec{D} = \epsilon\vec{E}$ 、 $\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \varphi$ 、 $\nabla \cdot \vec{A} = -\epsilon \mu \frac{\partial \varphi}{\partial t}$ 代入到麦克斯韦方程组中的第四个方程

$\nabla \times \vec{D} = \rho$ 中，可以得到

$$\nabla^2 \varphi - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (7.5-15)$$

(7.5-15) 式称为洛伦兹规范下标量位 φ 满足的微分方程。

(7.5-14) 和 (7.5-15) 式就是电磁场中矢量位和标量位的波动方程，也称为达朗贝尔方程。达朗贝尔方程适用于各向同性、线性的媒质。

洛伦兹规范的特殊性质是使得矢量位 \vec{A} 及标量位 φ 具有相同形式的微分方程， \vec{A} 和 φ 完全分开，简化了动态位与场源之间的关系，且比较简单，易求解。应用洛伦兹规范，使得矢量位只决定于自由电流密度 \vec{J} ，标量位只决定于自由电荷密度 ρ ，这对求解方程特别有利。只需解出矢量位 \vec{A} ，无需解出标量位 φ 就可得到待求的电场和磁场。

试想一下，如果应用库仑条件，位函数满足什么样的方程？具有什么特点？。注意，电磁场的位

函数只是简化时变电磁场分析求解的一种辅助函数，应用不同的规范条件，矢量位 \vec{A} 及标量位 φ 的解也不相同，但最终得到的电磁场矢量是相同的。

假如电磁场的场量不随时间变化，达朗贝尔方程就蜕变为泊松方程，即

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} \\ \nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \end{cases} \quad (7.5-16)$$

4. 达朗贝尔方程的解

根据洛仑兹规范下标量位 φ 满足的微分方程 (7.5-15) 式，以位于坐标原点的时变点电荷为例来求解达朗贝尔方程。

除点电荷所在位置外的空间，标量位 φ 满足

$$\nabla^2 \varphi - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0 \quad (7.5-17)$$

取球坐标系 (r, θ, ϕ) ，根据球的对称性，标量位 φ 只与 r, t 有关，而与 θ, ϕ 无关。这样 (7.5-17) 式可以简化为

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0 \quad (7.5-18)$$

设该方程的解为 $\varphi(r, t) = \frac{U(r, t)}{r}$ ，并令 $v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}}$ ，称为电磁波的传播速度，则 (7.5-18) 式变为

$$\frac{\partial^2 U(r, t)}{\partial r^2} - \frac{1}{v} \frac{\partial^2 U(r, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (7.5-19)$$

则 (7.5-19) 式的通解为

$$\varphi(r, t) = \frac{1}{r} f_1 \left(t - \frac{r}{v} \right) + \frac{1}{r} f_2 \left(t + \frac{r}{v} \right) \quad (7.5-20)$$

式中， f_1, f_2 为具有二阶连续偏导数的函数，其具体形式与点电荷的变化情况及空间媒质情况有关。

分别讨论通解中的两项。对于通解中的第一项 $f_1 \left(t - \frac{r}{v} \right)$ ，当时间延后一段后， $t \rightarrow t + \Delta t$ ，由于有传播速度，则距离也产生了变化， $r \rightarrow r + v \Delta t$ ，表示距离沿正 r 方向增加。这样，当时间延后一段后有 $f_1 \left(t + \Delta t - \frac{r + v \Delta t}{v} \right)$ 。

由于

$$f_1 \left(t + \Delta t - \frac{r + v \Delta t}{v} \right) = f_1 \left(t - \frac{r}{v} \right) \quad (7.5-21)$$

说明，在一给定时间和位置发生的某一物理现象在下一时间和位置重复发生，且延迟的时间与离开

前一位置的距离成比例, $\Delta r = v\Delta t$, 这种现象称为波。由于 f_1 以有限速度 v 向正 r 方向传播, 表示向外辐射出去的波, 因此对于空间来讲将此波称之为入射波。

对于通解中的第二项 $f_2\left(t + \frac{r}{v}\right)$, 当时间延后一段后, $t \rightarrow t + \Delta t$, 同样, 距离变为 $r \rightarrow r - v\Delta t$,

表示距离沿正 r 方向缩短 (或沿 $-r$ 方向增加)。这样, 当时间延后一段后有 $f_2\left(t + \Delta t + \frac{r - v\Delta t}{v}\right)$ 。

由于

$$f_2\left(t + \Delta t + \frac{r - v\Delta t}{v}\right) = f_2\left(t + \frac{r}{v}\right) \quad (7.5-22)$$

说明, 在一给定时间和位置发生的某一物理现象在下一时间和位置重复发生, 且延迟的时间与离开前一位置的距离成比例, $\Delta r = -v\Delta t$ 。由于 f_2 以有限速度 v 向 $-r$ 方向传播, 表示向内汇集来的波,

因此称之为反射波。我们知道, 在无限大均匀媒质中没有反射波, 即 $f_2 = 0$ 。

由于一般讨论电磁波的传播问题时, 大都关心从发射源到无界空间中的传播, 因此这里只考虑没有反射波, 即 $f_2 = 0$ 的情况。此时, 电磁场中的标量位 φ 的通解为

$$\varphi(r, t) = \frac{1}{r} f_1\left(t - \frac{r}{v}\right) \quad (7.5-23)$$

我们知道, 位于坐标原点的静止点电荷 q , 在静态场的无源空间中的电位函数的解为 $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon}$, 则时变电磁场的标量位 φ 的解可推论为

$$\varphi(r, t) = \frac{1}{r} f_1\left(t - \frac{r}{v}\right) = \frac{q\left(t - \frac{r}{v}\right)}{4\pi\epsilon} \quad (7.5-24)$$

如果在一个小区域 V' 内存在连续分布时变电荷, 其密度为 $\rho(r', t)$, 根据叠加原理, 在不含小区域 V' 的空间中的位函数为

$$\varphi(r, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{V'} \frac{\rho\left(r', t - \frac{|r - r'|}{v}\right)}{|r - r'|} dV' \quad (7.5-25)$$

由于洛伦兹规范下, 矢量位 \vec{A} 与标量位 φ 满足的微分方程形式相同, 因此类似的可由 (7.5-24) 式直接写出矢量位 \vec{A} 解的表达式, 即

$$\vec{A}(r, t) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{V'} \frac{\vec{J}(r', t - \frac{|r-r'|}{v})}{|r-r'|} dV' \quad (7.5-26)$$

(7.5-25) 和 (7.5-26) 式表明, 在 t 时刻空间任意一点 r 处的位函数并不取决于该时刻的电荷或电流, 而是取决于比 t 较早的时刻 $t - \frac{|r-r'|}{v}$ 的电荷或电流分布。换言之, 观察点处位函数随时间的变化总是滞后于源随时间的变化, 即动态位随时间的变化落后于源的变化, 故称为滞后位。

场量变化比场源变化滞后的时间 $\frac{|r-r'|}{v}$ 正好是电磁波以速度 $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ 从源点 r' 传到场点 r 所

需的时间。电磁波是以有限速度以波的形式传播的, 光也是一种电磁波。如日光是一种电磁波, 在某处某时刻见到的日光并不是该时刻太阳所发出的, 而是在大约8分20秒前太阳发出的, 8分20秒内光传播的距离正好是太阳到地球的平均距离。

7.6 时变电磁场的能量与能流

电磁场是一种具有能量的物质。在静态场中, 电场能量储存在电场中, 磁场能量储存在磁场中。在时变电磁场中, 由于电场和磁场都随时间变化, 相应地空间各点的电场能量和磁场能量也随时间变化。这样, 电磁能量按一定的形式存储于空间, 并随着电磁场的运动变化在空间传输, 形成电磁能流。同静态场一样, 一般用能量密度来描述电磁场能量。

根据各向同性的线性媒质中静态场的电场能量密度和磁场能量密度公式, 可以直接写出时变电磁场中电场能量密度 $w_e(r, t)$ 和磁场能量密度 $w_m(r, t)$ 分别为

$$\begin{cases} w_e(r, t) = \frac{1}{2} \vec{D}(r, t) \cdot \vec{E}(r, t) = \frac{1}{2} \epsilon \vec{E}^2(r, t) \\ w_m(r, t) = \frac{1}{2} \vec{B}(r, t) \cdot \vec{H}(r, t) = \frac{1}{2} \mu \vec{H}^2(r, t) \end{cases} \quad (7.6-1)$$

根据能量守恒定理, 时变电磁场中的能量密度 w 应等于时变电场能量密度 w_e 与时变磁场能量密度 w_m 之和, 即

$$\begin{aligned} w(r, t) &= \frac{1}{2} \vec{D}(r, t) \cdot \vec{E}(r, t) + \frac{1}{2} \vec{B}(r, t) \cdot \vec{H}(r, t) \\ &= \frac{1}{2} [\epsilon \vec{E}^2(r, t) + \mu \vec{H}^2(r, t)] \end{aligned} \quad (7.6-2)$$

但要注意, 静态场的能量密度公式中的电、磁场的场矢量 \vec{D} 、 \vec{E} 、 \vec{B} 、 \vec{H} 是不随时间变化的, 而时变电磁场的能量密度 (7.6-1) 和 (7.6-2) 式中的电磁场量 \vec{D} 、 \vec{E} 、 \vec{B} 、 \vec{H} 是随时间变化的。因此, 静态场的能量密度只是空间的函数, 而时变电磁场的能量密度 w 是时间和空间的函数。时变电磁场的相互作用导致电磁波动, 电磁波动伴随电磁能量在空间的流动 (传播)。

7.6.1 坡印廷定理

为了描述时变电磁场的能量守恒与转换关系, 1884年英国物理学家坡印廷提出了著名的坡印廷定理, 它可由麦克斯韦方程推导出来。

设在闭合面 S 包围的无源区域 V 中, 存在线性、各向同性的媒质, 且媒质参数不随时间变化, 如图7.6-1所示。

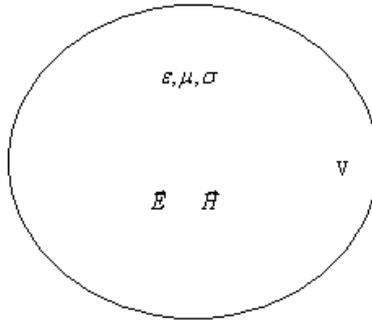


图7.6-1 无源区域

在此区域V中，分别用电场强度 \vec{E} 和磁场强度 \vec{H} 点乘麦克斯韦方程组中的第一、二式的两边，可以得到

$$\vec{E} \cdot \nabla \times \vec{H} = \vec{E} \cdot \vec{J} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\vec{H} \cdot \nabla \times \vec{E} = -\vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

将上两式相减，则可得

$$\vec{E} \cdot (\nabla \times \vec{H}) - \vec{H} \cdot (\nabla \times \vec{E}) = \vec{E} \cdot \vec{J} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (7.6-3)$$

根据电磁场的本构关系 $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ 和 $\vec{B} = \mu \vec{H}$ ，有

$$\begin{cases} \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{E} \cdot \frac{\partial(\epsilon \vec{E})}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial(\epsilon \vec{E} \cdot \vec{E})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \vec{D} \cdot \vec{E} \right) \\ \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{H} \cdot \frac{\partial(\mu \vec{H})}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial(\mu \vec{H} \cdot \vec{H})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H} \right) \end{cases} \quad (7.6-4)$$

将(7.6-4)式代入到(7.6-3)式，则有

$$\vec{E} \cdot (\nabla \times \vec{H}) - \vec{H} \cdot (\nabla \times \vec{E}) = \vec{E} \cdot \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \vec{D} \cdot \vec{E} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H} \right) \quad (7.6-5)$$

利用矢量恒等式 $\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{H} \cdot (\nabla \times \vec{E}) - \vec{E} \cdot (\nabla \times \vec{H})$ 和(7.6-5)式可以得到

$$-\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{E} \cdot \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \vec{D} \cdot \vec{E} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H} \right) \quad (7.6-6)$$

在区域V内对(7.6-6)式积分，并利用散度定理，可以得到

$$\begin{aligned} -\oint_S (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} &= \frac{d}{dt} \int_V \left(\frac{1}{2} \vec{D} \cdot \vec{E} + \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H} \right) dV + \int_V \vec{E} \cdot \vec{J} dV \\ &= \frac{d}{dt} \int_V \left(\frac{1}{2} \epsilon \vec{E}^2 + \frac{1}{2} \mu \vec{H}^2 \right) dV + \int_V \vec{E} \cdot \vec{J} dV \end{aligned} \quad (7.6-7)$$

(7.6-7)式就是表征称为电磁能量守恒与转换关系的坡印廷定理。式中右边第一项是单位时间

区域V内电磁能量的增加量；第二项为单位时间内电场对区域V内的电流所做的功，如果区域V内的媒质为导电媒质，则 $\int_V \vec{E} \cdot \vec{J} dV = \int_V \sigma \vec{E}^2 dV$ ，即为区域V内的总损耗；式中左边项则为单位时间内穿过闭合曲面S进入到区域V中的电磁能量，也可以说是外电源提供给区域V内的功率（总能量），等于区域V内电阻消耗的热功率和电磁能量的增加率。

坡印亭定理是电磁场的能量守恒表达式，反映了电磁能量符合自然界物质运动过程中能量守恒和转化定律，是宏观电磁现象的一个普遍定理。坡印亭定理适用于时变场也适用于恒定场。

7.6.2 坡印廷矢量

坡印亭矢量是描述时变电磁场中电磁能量传输的一个重要物理量。我们知道，坡印亭定理只是描述了电磁能量守恒与转换关系。在时变电磁场中，电磁能量随时间变化，并以电磁波的形式使电磁能量在空间流动。为了衡量这种能量流动的方向及强度，引入能量流动密度矢量，称为坡印亭矢量，用 \vec{S} 表示，单位为 W/m^2 （瓦/米²）。坡印亭矢量 \vec{S} 的方向表示能量流动方向（也是波传播的方向），大小表示单位时间内垂直穿过单位面积的能量。或者说，垂直穿过单位面积的功率，所以又称为功率流动密度矢量。

坡印廷定理（7.6-7）式的左边为单位时间内穿入到闭合曲面S内的电磁能量，它是 $\vec{E} \times \vec{H}$ 矢量的面积分。可见 $\vec{E} \times \vec{H}$ 就相当于能量流动密度矢量，因此坡印亭矢量 \vec{S} 与电场与磁场的关系为

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (7.6-8)$$

（7.6-8）式表明，坡印亭矢量 \vec{S} 、电场强度 \vec{E} 、磁场强度 \vec{H} 在空间相互垂直，三者构成右手螺旋关系。因为时变电磁场中的电场强度 \vec{E} 和磁场强度 \vec{H} 是随时间和空间变化的，因此坡印亭矢量 \vec{S} 也随时间和空间变化。这样，在空间任意一点和任意时刻的坡印亭矢量应是坡印亭矢量的瞬时值 $\vec{S}(r, t)$ ，即

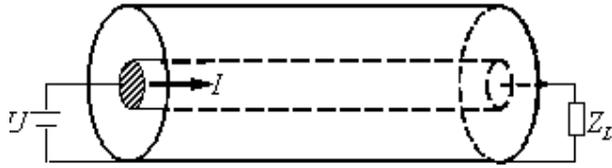
$$\vec{S}(r, t) = \vec{E}(r, t) \times \vec{H}(r, t) \quad (7.6-9)$$

可见，坡印亭矢量的瞬时值等于电场强度和磁场强度的瞬时值的乘积，方向与这两个瞬时场矢量满足右手螺旋关系，大小取决于该时刻的电场强度和磁场强度的瞬时值。若某一时刻电场强度或磁场强度为零，则在该时刻坡印亭矢量为零。

如果电场强度 \vec{E} 和磁场强度 \vec{H} 在空间各用三维坐标的标量表示，则坡印亭矢量 \vec{S} 可直接由这六个标量进行计算，即

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} = \begin{vmatrix} e_x & e_y & e_z \\ E_x & E_y & E_z \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix} \quad (7.6-10)$$

【例题7-5】如图所示，设有一内、外半径分别为 a, b 的同轴线，内外导体间填充均匀理想介质。内外导体间的电压为 U ，导体中流过的电流为 I 。（1）假设导体为理想导体时，求同轴线中传输的功率；（2）假设导体的电导率 σ 为有限值时，求通过内导体表面进入每单位长度内导体的功率。



解:

(1) 由于同轴线的内外导体均为理想导体, 则理想导体内没有电场合磁场, 即 $\vec{E}_{\text{内}} = \vec{H}_{\text{内}} = 0$ 。这样电场和磁场只能存在于内外导体之间的理想介质中。根据边界条件 $\vec{E}_{\text{内}t} = \vec{E}_{\text{外}t} = 0$, 则分界面的内外导体表面的电场无切向分量, 理想介质中只有电场的径向分量 $\vec{E}_{\text{外}n}$ 。

采用圆柱坐标系, 假设理想介质中的电场径向分量为 E_ρ , $a < \rho < b$, 同轴线单位长度为 dz , 内导体的单位线电荷密度为 ρ_l 。根据高斯定理有

$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{S} = E_\rho \cdot 2\pi\rho dz = \frac{\rho_l dz}{\epsilon}$$

则有
$$E_\rho = \vec{e}_\rho \frac{\rho_l}{2\pi\rho\epsilon}$$

由于内外导体之间的电压为 U , 则有

$$U = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_a^b E_\rho \cdot d\rho = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon} \int_a^b \frac{1}{\rho} d\rho = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon} \ln \frac{b}{a}$$

则
$$\rho_l = 2\pi\epsilon U / \ln \frac{b}{a}$$

从而可以得到
$$E_\rho = \vec{e}_\rho \frac{U}{\rho \ln(b/a)}$$

根据安培环路定理有

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = H_\phi \cdot 2\pi\rho = I$$

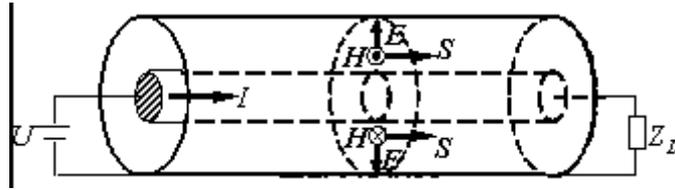
则绕轴线的磁场强度为

$$H_\phi = \vec{e}_\phi \frac{I}{2\pi\rho}$$

内外导体之间任意截面上的坡印廷矢量为

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} = E_\rho \times H_\phi = \vec{e}_z \frac{UI}{2\pi\rho^2 \ln(b/a)}$$

可见, 电磁能量在内外导体之间的介质中沿轴方向流动, 即由电源向负载, 如图所示。



这样，穿过任意横截面的功率为

$$P = \int_s \vec{S} \cdot d\vec{S} = \int_a^b \frac{UI}{2\pi\rho_2 \ln(b/a)} \cdot 2\pi\rho d\rho = UI$$

可见，它与电路中的功率结果一致。但要注意：在同轴线传输电磁能量时，是在内外导体之间介质中传输，而不是在导体中传输，导体仅起着定向引导电磁能流的作用，这个概念非常重要。

(2) 当导体的电导率 σ 为有限值时，说明导体不是理想导体，则导体内部一定有电场存在。内导体表面沿电流方向的切向电场 $\vec{E}_{\text{内}t}$ 为

$$\vec{E}_{\text{内}t} \Big|_{\rho=a} = \frac{\vec{J}}{\sigma} = \vec{e}_z \frac{1}{\sigma} \frac{I}{\pi a^2}$$

根据边界条件，内导体外表面沿电流方向的切向电场 $\vec{E}_{\text{外}t}$ 为

$$\vec{E}_{\text{外}t} \Big|_{\rho=a} = \vec{E}_{\text{内}t} \Big|_{\rho=a} = \vec{e}_z \frac{I}{\pi \alpha^2}$$

则，在内导体外表面介质中的电场强度 \vec{E} 为

$$\vec{E} = \vec{e}_\rho \frac{U}{a \ln(b/a)} + \vec{e}_z \frac{I}{\pi \alpha^2}$$

由于该情况下的磁场强度同理想导体情况下一样，仍为 $H_\phi \Big|_{\rho=a} = \vec{e}_\phi \frac{I}{2\pi a}$ ，因此，在内导体外表面介质中的坡印廷矢量为

$$\vec{S} \Big|_{\rho=a} = \vec{E} \times \vec{H} = \left(\vec{e}_\rho \frac{U}{a \ln(b/a)} + \vec{e}_z \frac{I}{\pi \alpha^2} \right) \times \vec{e}_\phi \frac{I}{2\pi a} = \vec{e}_z \frac{UI}{2\pi a^2 \ln(b/a)} - \vec{e}_\rho \frac{I^2}{2\pi^2 \alpha^3}$$

可见，内导体表面外侧的坡印廷矢量既有轴向分量，也有径向分量，如图所示。



进入每单位长度内导体的功率为

$$P = \int_s \vec{S} \cdot d\vec{S} = \int_s \vec{S} \Big|_{\rho=0} \cdot (-\vec{e}_\rho) dS = \int_0^1 \frac{I^2}{2\pi^2 \alpha^3} \cdot 2\pi a dz = \frac{I^2}{\pi \alpha^2}$$

因为，导体中单位长度的电阻 R 为

$$R = \frac{1}{\sigma \pi a^2}$$

则进入每单位长度内导体的功率为

$$P = RI^2$$

可见，它与电路中电阻焦耳损耗功率结果一致。说明当导体的电导率为有限值时，进入导体中的功率全部被导体所吸收，成为导体中的焦耳热损耗功率。

7.7 时谐电磁场

如果场源以一定的角频率随时间呈时谐（正弦或余弦）变化，则所产生的电磁场也以同样的角频率随时间呈时谐（正弦或余弦）变化，这种以一定角频率作时谐变化的电磁场，称为时谐电磁场或正弦电磁场。时谐电磁场是由随时间按正弦变化的时变电荷与时变电流产生的。虽然场的变化落后于源，但是场与源随时间的变化规律是相同的，所以时谐电磁场的场和源具有相同的频率。

在工程上，应用最多的就是时谐电磁场，如广播、电视和通信的载波等都是时谐电磁场。另外，由傅里叶变换可知，任一周期性或非周期性的时间函数在一定条件下均可分解为许多正弦函数之和，因此讨论时谐电磁场具有重要实际意义。

7.7.1 时谐电磁场的复数形式

时谐电磁场是一种特殊的时变电磁场，其场强的方向与时间无关，但其大小随时间的变化规律为正弦函数。时谐电磁场可用复数方法来表示，使得大多数时谐电磁场问题的分析得以简化。

设 $u(r, t)$ 是一个以角频率 ω 随时间 t 作正弦变化的标量函数，它可以是电场和磁场的任意一个分量，也可以是电荷或电流等变量，它与时间的关系可以表示成

$$u(r, t) = u_m(r) \cos[\omega t + \phi(r)] \quad (7.7-1)$$

式中， $u_m(r)$ 为振幅， $\phi(r)$ 为与空间坐标有关的相位因子， ω 为角频率。 $u_m(r)$ 、 $\phi(r)$ 只是空间坐标的函数，而与时间无关。

采用复数取实部的方法，可以将（7.7-1）式写成用复数形式表示的瞬时量，即

$$u(r, t) = \text{Re} [u_m(r) e^{j\phi(r)} e^{j\omega t}] = \text{Re} [\dot{u}_m(r) e^{j\omega t}] \quad (7.7-2)$$

式中

$$\dot{u}_m(r) = u_m(r) e^{j\phi(r)} \quad (7.7-3)$$

式中， $\dot{u}_m(r)$ 称为复振幅，或称为 $u(r, t)$ 的复数振幅表示形式； $u_m(r)$ 为实数形式的振幅， $\phi(r)$ 为空间相位因子， $e^{j\omega t}$ 为时间因子。为了区别振幅的复数形式与实数形式，以符号上面带“.” 代表为复数形式。由于时间因子是默认的，有时它可以不用写出来，只用与坐标有关的部份就可表示复矢量。这样，瞬时量可用一个与时间无关的复数式来表示，如（7.7-3）式。

当然，矢量函数也可用复矢量来表示，即

$$\vec{A}(r, t) = \text{Re} [\dot{\vec{A}}_m(r) e^{j\omega t}] \quad (7.7-4)$$

$$\dot{\vec{A}}_m(r) = \vec{A}_m(r) e^{j\phi(r)} \quad (7.7-5)$$

但要特别注意，复数量仅为空间函数，与时间无关，只有频率相同的正弦量之间才能使用复数量的方法进行运算。另外，复数式只是数学表示方式，不代表真实的场，真实场是复数式与时间因子相结合的的实部，即瞬时表达式。

为了简化起见，一般将任意时谐函数分解为三个坐标分量，每一个坐标分量都是时谐标量函数。如直角坐标系中的电场强度 $\vec{E}(x, y, z, t)$ 可分为三个坐标的标量分量，即

$$\vec{E}(x, y, z, t) = e_x E_x(x, y, z, t) + e_y E_y(x, y, z, t) + e_z E_z(x, y, z, t) \quad (7.7-6)$$

其中, 每一个坐标分量的瞬时量为

$$\begin{cases} E_x(x, y, z, t) = E_{xm}(x, y, z) \cos[\omega t + \phi_x(x, y, z)] \\ E_y(x, y, z, t) = E_{ym}(x, y, z) \cos[\omega t + \phi_y(x, y, z)] \\ E_z(x, y, z, t) = E_{zm}(x, y, z) \cos[\omega t + \phi_z(x, y, z)] \end{cases} \quad (7.7-7)$$

式中, $E_{xm}(x, y, z)$ 、 $E_{ym}(x, y, z)$ 、 $E_{zm}(x, y, z)$ 分别为各坐标分量的振幅, $\phi_x(x, y, z)$ 、 $\phi_y(x, y, z)$ 、 $\phi_z(x, y, z)$ 分别为各坐标分量的初相位, ω 为角频率。

电场强度的复数表示形式 $\dot{\vec{E}}(x, y, z)$ 为

$$\dot{\vec{E}}_m(x, y, z) = e_x \dot{E}_{xm}(x, y, z) + e_y \dot{E}_{ym}(x, y, z) + e_z \dot{E}_{zm}(x, y, z) \quad (7.7-8)$$

其中, 三个坐标分量复数形式为

$$\begin{cases} \dot{E}_{xm}(x, y, z) = E_{xm}(x, y, z) e^{j\phi_x(x, y, z)} \\ \dot{E}_{ym}(x, y, z) = E_{ym}(x, y, z) e^{j\phi_y(x, y, z)} \\ \dot{E}_{zm}(x, y, z) = E_{zm}(x, y, z) e^{j\phi_z(x, y, z)} \end{cases} \quad (7.7-9)$$

可见, 复数形式只与振幅和初相位有关, 而与时间无关。由复数形式可以写出瞬时量, 即

$$\begin{aligned} \vec{E}(x, y, z, t) &= \text{Re} \left[\dot{\vec{E}}_m(x, y, z) e^{j\omega t} \right] \\ &= \text{Re} \left\{ e_x \dot{E}_{xm}(x, y, z) + e_y \dot{E}_{ym}(x, y, z) + e_z \dot{E}_{zm}(x, y, z) \right\} e^{j\omega t} \\ &= e_x \text{Re} \left[\dot{E}_{xm}(x, y, z) e^{j\omega t} \right] + e_y \text{Re} \left[\dot{E}_{ym}(x, y, z) e^{j\omega t} \right] + e_z \text{Re} \left[\dot{E}_{zm}(x, y, z) e^{j\omega t} \right] \\ &= e_x E_x(x, y, z, t) + e_y E_y(x, y, z, t) + e_z E_z(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (7.7-10)$$

其中

$$\begin{cases} E_x(x, y, z, t) = \text{Re} \left[\dot{E}_{xm}(x, y, z) e^{j\omega t} \right] \\ E_y(x, y, z, t) = \text{Re} \left[\dot{E}_{ym}(x, y, z) e^{j\omega t} \right] \\ E_z(x, y, z, t) = \text{Re} \left[\dot{E}_{zm}(x, y, z) e^{j\omega t} \right] \end{cases} \quad (7.7-11)$$

可见, 直接表示的瞬时量 (7.7-7) 式与用复数形式表示的瞬时量 (7.7-11) 式所得结果相同。给定一个瞬时量, 可用 (7.7-8) 式得到复数形式; 同理, 给定一个复数形式, 可以用 (7.7-10) 式得到瞬时量。

7.7.2 复数形式的麦克斯韦方程

时变电磁场中, 麦克斯韦方程组微分形式中有对时间求导的量, 那么麦克斯韦方程组中的各量能否用复数表示呢? 假设有一时变矢量 $\vec{F}(r, t)$, 它的复数形式为 $\dot{\vec{F}}(r) = \vec{F}_m(r) e^{j\phi(r)}$, 用复数表示的瞬时量则为 $\vec{F}(r, t) = \text{Re} \left[\dot{\vec{F}}(r) e^{j\omega t} \right]$ 。

$$\text{由于} \quad \frac{\partial \vec{F}(r, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \text{Re} \left[\dot{\vec{F}}(r) e^{j\omega t} \right] = \text{Re} \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \left[\dot{\vec{F}}(r) e^{j\omega t} \right] \right\} = \text{Re} \left[j\omega \dot{\vec{F}}(r) e^{j\omega t} \right]$$

根据这种运算规律, 麦克斯韦方程组微分形式中各个方程可变为

$$\begin{cases} \nabla \times \operatorname{Re}(\dot{\vec{H}}(r)e^{j\omega t}) = \operatorname{Re}(\dot{\vec{J}}(r)e^{j\omega t}) + \operatorname{Re}(j\omega\dot{\vec{D}}(r)e^{j\omega t}) \\ \nabla \times \operatorname{Re}(\dot{\vec{E}}(r)e^{j\omega t}) = -\operatorname{Re}(j\omega\dot{\vec{B}}(r)e^{j\omega t}) \\ \nabla \cdot \operatorname{Re}(\dot{\vec{B}}(r)e^{j\omega t}) = 0 \\ \nabla \cdot \operatorname{Re}(\dot{\vec{D}}(r)e^{j\omega t}) = \operatorname{Re}(\dot{\rho}(r)e^{j\omega t}) \end{cases}$$

将上式中的微分算子 ∇ 与实部符号 Re 互换顺序, 则有

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(\nabla \times \dot{\vec{H}}(r)e^{j\omega t}) = \operatorname{Re}(\dot{\vec{J}}(r)e^{j\omega t} + j\omega\dot{\vec{D}}(r)e^{j\omega t}) \\ \operatorname{Re}(\nabla \times \dot{\vec{E}}(r)e^{j\omega t}) = -\operatorname{Re}(j\omega\dot{\vec{B}}(r)e^{j\omega t}) \\ \operatorname{Re}(\nabla \cdot \dot{\vec{B}}(r)e^{j\omega t}) = 0 \\ \operatorname{Re}(\nabla \cdot \dot{\vec{D}}(r)e^{j\omega t}) = \operatorname{Re}(\dot{\rho}(r)e^{j\omega t}) \end{cases}$$

由于上式对任意 t 均成立, 故方程两边相对应的实部符号可以消去, 再令 $t=0$, 可得

$$\begin{cases} \nabla \times \dot{\vec{H}}(r) = \dot{\vec{J}}(r) + j\omega\dot{\vec{D}}(r) \\ \nabla \times \dot{\vec{E}}(r) = -j\omega\dot{\vec{B}}(r) \\ \nabla \cdot \dot{\vec{B}}(r) = 0 \\ \nabla \cdot \dot{\vec{D}}(r) = \dot{\rho}(r) \end{cases} \quad (7.7-12)$$

(7.7-12) 式为时谐电磁场的复矢量所满足的麦克斯韦方程, 也称为麦克斯韦方程的复数形式。

从形式上讲, 只要把麦克斯韦方程中的微分算子 $\frac{\partial}{\partial t}$ 用 $j\omega$ 代替, 把各个参量用复数表示的参量代替, 就可以把时谐电磁场的场量之间的关系, 转换为复矢量之间的关系, 从而得到复矢量的麦克斯韦方程。但要注意, 时谐电磁场的麦克斯韦方程中的场量与场源是包含空间和时间的四维函数, 而复矢量麦克斯韦方程中的场量与场源只是空间的三维函数。维数的减少, 使得利用复矢量麦克斯韦方程更容易求解有关电磁场问题。

由于复矢量的麦克斯韦方程 (存在 $j\omega$) 与时谐电磁场的麦克斯韦方程 (存在 $\frac{\partial}{\partial t}$) 有明显的区别, 因此为了方便起见, 在今后一般都把复矢量的麦克斯韦方程中各个量的上标 “.” 去掉, 这样也不容易会引起混淆。也就是说, 只要麦克斯韦方程中有 $j\omega$, 而没有 $\frac{\partial}{\partial t}$, 方程中的所有参量就表示是复参量。

为了便于比较, 表7.7-1列出了时谐电磁场的麦克斯韦方程和复矢量麦克斯韦方程。类似地, 可以得到复数形式表示的电流连续性方程和本构关系 (请有兴趣的读者自行证明), 它也一起放入到此表中。

表7.7-1 瞬时和复矢量麦克斯韦方程

| 瞬时形式 (r, t) | 复数形式 (r) | 去掉 “.” 的复数形式 (r) |
|---|--|--|
| $\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ | $\nabla \times \dot{\vec{H}} = \dot{\vec{J}} + j\omega\dot{\vec{D}}$ | $\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\vec{D}$ |
| $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ | $\nabla \times \dot{\vec{E}} = -j\omega\dot{\vec{B}}$ | $\nabla \times \vec{E} = -j\omega\vec{B}$ |
| $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ | $\nabla \cdot \dot{\vec{B}} = 0$ | $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ |
| $\nabla \cdot \vec{D} = \rho$ | $\nabla \cdot \dot{\vec{D}} = \dot{\rho}$ | $\nabla \cdot \vec{D} = \rho$ |

| | | |
|--|---|---|
| $\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$ $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$ $\vec{B} = \mu \vec{H}$ $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ <p>各个参量均为瞬时值</p> | $\nabla \cdot \dot{\vec{J}} = -j\omega \dot{\rho}$ $\dot{\vec{D}} = \varepsilon \dot{\vec{E}}$ $\dot{\vec{B}} = \mu \dot{\vec{H}}$ $\dot{\vec{J}} = \sigma \dot{\vec{E}}$ <p>各个参量均为复数形式</p> | $\nabla \cdot \vec{J} = -j\omega \rho$ $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$ $\vec{B} = \mu \vec{H}$ $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ <p>各个参量均为复数形式</p> |
|--|---|---|

7.7.3 复介电常数与复磁导率

我们知道，在电磁场的作用下，媒质存在三种状态：极化、磁化和传导，相应的媒质参数一般用介电常数、磁导率和电导率来表征。在静态场中这三个参数都是实常数。但是在时变电磁场中，这些参数与场的时间变化率有关，在时谐电磁场中则与频率有关。

自然界中的媒质都不是理想介质，因此都存在一定程度的损耗，如：当电导率有限时，导电媒质存在欧姆损耗，电介质受到极化时存在电极化损耗，磁介质受到磁化时存在磁化损耗。损耗的大小与媒质性质、随时间变化的频率有关。一些媒质的损耗在低频时可以忽略，但在高频时就不能忽略。

在时谐电磁场中，对于介电常数为 ε 、电导率为 σ 的导电媒质，根据时谐场的麦克斯韦方程有

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega \vec{D} = \sigma \vec{E} + j\omega \varepsilon \vec{E} = j\omega \left(\varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right) \vec{E} = j\omega \varepsilon_c \vec{E}$$

式中

$$\varepsilon_c = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (7.7-13)$$

式中， ε_c 称为等效复介电常数，有时也称为复电容率。它表明，导电媒质的欧姆损耗存在于等效介电常数的虚部中，是一个大于零的数。

类似地，对于存在电极化损耗的电介质，表征电极化损耗的介电常数为

$$\varepsilon_c = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (7.7-14)$$

式中， ε_c 称为复介电常数或复电容率。其虚部为大于零的数，表示电介质的电极化损耗。在高频情况下，实部和虚部都是频率的函数。

对于同时存在电极化损耗和欧姆损耗的电介质，复介电常数为

$$\varepsilon_c = \varepsilon' - j \left(\varepsilon'' + \frac{\sigma}{\omega} \right) \quad (7.7-15)$$

同理，在时谐电磁场中，对于存在磁化损耗的磁性介质，表征磁化损耗的磁导率为

$$\mu_c = \mu' - j\mu'' \quad (7.7-16)$$

式中， μ_c 称为复磁导率。它表明，磁介质的磁化损耗存在于复磁导率的虚部中，是一个大于零的数。

工程上常用损耗角正切来表示介质的损耗特性，其定义为复介电常数或复磁导率的虚部与实部之比，即有

$$\begin{cases} \tan \delta_\sigma = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon'} & \text{导电媒质} \\ \tan \delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} & \text{电介质} \\ \tan \delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'} & \text{磁介质} \end{cases} \quad (7.7-17)$$

导电媒质的导电性能具有相对性，在不同频率情况下，导电媒质具有不同的导电性能。 $\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$ 描述了导电媒质中传导电流与位移电流的振幅比值。一般根据 $\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$ 可判断导电媒质的导电性能，一般情况下有

$$\begin{cases} \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \gg 1 & \text{良导体} \\ \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \ll 1 & \text{绝缘体} \\ \text{其它} & \text{一般导体} \end{cases} \quad (7.7-18)$$

7.7.4 时谐电磁场的波动方程

电磁场的波动方程表明了时变电磁场的运动规律，对于时谐电磁场也可通过麦克斯韦方程复数形式来建立。在无源空间，设媒质是线性、各向同性且无损耗的均匀媒质，即 $\vec{J} = \sigma\vec{E} = 0, \rho = 0$ ，则只用复电场强度 \vec{E} 和复磁场强度 \vec{H} 两个矢量场来描述的麦克斯韦方程复数形式为

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E} \\ \nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \\ \nabla \cdot \vec{H} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{E} = 0 \end{cases} \quad (7.7-19)$$

将(7.7-19)式的第二个方程两边取旋度，则有

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla \times (-j\omega\mu\vec{H}) = -j\omega\mu(\nabla \times \vec{H})$$

将(7.7-19)式的第一个方程代入上式，有

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \omega^2 \varepsilon \mu \vec{E}$$

利用矢量恒等式 $\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$ ，以及(7.7-19)式的第四个方程，上式可变为

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\nabla^2 \vec{E} = \omega^2 \varepsilon \mu \vec{E}$$

即

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \varepsilon \mu \vec{E} = 0$$

令 $k = \omega\sqrt{\varepsilon\mu}$ ，则上式变为

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (7.7-20)$$

(7.7-20)式为无源区中复电场强度矢量 \vec{E} 满足的复矢量齐次波动方程，也称为复矢量齐次亥姆霍兹方程， ∇^2 为矢量拉普拉斯算符。

类似，可以得到无源区中复磁场强度矢量 \vec{H} 满足的复矢量齐次波动方程，即

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \quad (7.7-21)$$

如果媒质是有耗媒质, 说明媒质为导电媒质, 电磁波在其中传播时 $\vec{J} = \sigma \vec{E} \neq 0, \rho = 0$, 则只用复电场强度 \vec{E} 和复磁场强度 \vec{H} 两个矢量场来描述的麦克斯韦方程复数形式为

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + j\omega \epsilon \vec{E} = j\omega(\epsilon - j\frac{\sigma}{\omega}) \vec{E} = j\omega \epsilon_c \vec{E} \\ \nabla \times \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H} \\ \nabla \cdot \vec{H} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{E} = 0 \end{cases} \quad (7.7-22)$$

式中, $\epsilon_c = \epsilon - j\frac{\sigma}{\omega}$ 为等效复介电常数, 它是一个复数。

(7.7-22) 式与 (7.7-19) 式在形式上完全一样, 只是将 k 变为 k_c 即可。这样, 用推导无损耗媒质的方法可以类似得到导电媒质中的波动方程, 即

$$\nabla^2 \vec{E} + k_c^2 \vec{E} = 0 \quad (7.7-23)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + k_c^2 \vec{H} = 0 \quad (7.7-24)$$

为了便于比较, 表7.7-2列出了时变电磁场的波动方程和时谐电磁场的复矢量的波动方程。

表7.7-2 时变电磁场波动方程和时谐电磁场复矢量波动方程比较

| 媒质 | 瞬时矢量波动方程 | 复矢量波动方程 | 备注 |
|------|--|--|--|
| 理想介质 | $\nabla^2 \vec{E} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$ | $\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0$ | $k = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$ |
| | $\nabla^2 \vec{H} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0$ | $\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0$ | |
| 导电媒质 | $\nabla^2 \vec{E} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$ | $\nabla^2 \vec{E} + k_c^2 \vec{E} = 0$ | $k_c = \omega \sqrt{\epsilon_c \mu_c}$ |
| | $\nabla^2 \vec{H} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0$ | $\nabla^2 \vec{H} + k_c^2 \vec{H} = 0$ | |

7.7.5 时谐电磁场的位函数

在时谐电磁场中, 矢量位和标量位以及它们满足的方程都可以利用 $\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow j\omega$ 表示成复数形式。

如表7.7-3所示。

表7.7-3 矢量位和标量位以及它们满足的方程在时变电磁场与时谐电磁场中的对比

| | 瞬时矢量表示 | 复矢量表示 |
|-------|--|--|
| 矢量位 | $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ | $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ |
| 标量位 | $\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \varphi$ | $\vec{E} = -j\omega \vec{A} - \nabla \varphi$ |
| 洛仑兹规范 | $\nabla \cdot \vec{A} = -\epsilon \mu \frac{\partial \varphi}{\partial t}$ | $\nabla \cdot \vec{A} = -j\omega \epsilon \mu \varphi$ |

| | | |
|--------|---|--|
| 达朗贝尔方程 | $\nabla^2 \vec{A} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \vec{J}$ | $\nabla^2 \vec{A} + k^2 \vec{A} = -\mu \vec{J}$ |
| | $\nabla^2 \varphi - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon}$ | $\nabla^2 \varphi + k^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon}$ |

7.7.6 时谐电磁场的平均能量密度与平均能流密度矢量

在一般时变电磁场中，坡印廷矢量是瞬时矢量，表示瞬时能流密度，在其表达式中包含了场量的平方关系，这种关系式称为二次式。二次式本身不能用复数形式表示，其中的场量必须是实数形式，不能将复数形式的场量直接代入，因此，对于谐电磁场，不能将其场矢量的复数形式直接代入求解坡印廷矢量。

设某时谐电磁场的电场强度和磁场强度分别为

$$\begin{cases} \vec{E}(r,t) = \vec{E}_m(r) \cos[\omega t + \phi(r)] \\ \vec{H}(r,t) = \vec{H}_m(r) \cos[\omega t + \phi(r)] \end{cases} \quad (7.7-22)$$

则瞬时坡印廷矢量 $\vec{S}(r,t)$ 为

$$\vec{S}(r,t) = \vec{E}(r,t) \times \vec{H}(r,t) = \vec{E}_m(r) \times \vec{H}_m(r) \cos^2[\omega t + \phi(r)] \quad (7.7-23)$$

将电场强度和磁场强度用复数表示，即有 $\vec{E}(r) = \vec{E}_m(r) e^{j\phi(r)}$ ， $\vec{H}(r) = \vec{H}_m(r) e^{j\phi(r)}$ 。如果直接用复数形式的电场强度和磁场强度来求解坡印廷矢量 $\vec{S}(r,t)$ ，即为

$$\begin{aligned} \vec{S}(r,t) &= \text{Re}[\vec{E}(r) e^{j\omega t} \times \vec{H}(r) e^{j\omega t}] \\ &= \text{Re}[\vec{E}_m(r) e^{j[\omega t + \phi(r)]} \times \vec{H}_m(r) e^{j[\omega t + \phi(r)]}] \\ &= \vec{E}_m(r) \times \vec{H}_m(r) \text{Re}[e^{j2[\omega t + \phi(r)]}] \\ &= \vec{E}_m(r) \times \vec{H}_m(r) \cos[2\omega t + 2\phi(r)] \end{aligned} \quad (7.7-24)$$

比较(7.7-23)和(7.7-24)式可见，直接用复数形式的电场强度和磁场强度来求解坡印廷矢量 $\vec{S}(r,t)$ 显然是错误的。

那么，如何用复数形式的电场强度和磁场强度来求解坡印廷矢量 $\vec{S}(r,t)$ 呢？如果先根据复数形式的电场强度和磁场强度求出其对应的瞬时矢量，然后再进行求出坡印廷矢量 $\vec{S}(r,t)$ ，结果如何呢？

$$\begin{aligned} \vec{S}(r,t) &= \text{Re}[\vec{E}(r) e^{j\omega t}] \times \text{Re}[\vec{H}(r) e^{j\omega t}] \\ &= \text{Re}[\vec{E}_m(r) e^{j[\omega t + \phi(r)]}] \times \text{Re}[\vec{H}_m(r) e^{j[\omega t + \phi(r)]}] \\ &= \vec{E}_m(r) \cos[\omega t + \phi(r)] \times \vec{H}_m(r) \cos[\omega t + \phi(r)] \\ &= \vec{E}_m(r) \times \vec{H}_m(r) \cos^2[\omega t + \phi(r)] \end{aligned} \quad (7.7-25)$$

可见，(7.7-23)和(7.7-25)式的结果相同，也说明这种方法是可行的，此思想符合坡印廷矢量的定义。使用这种方法时应注意：二次式只有实数的形式，没有复数形式；场量是实数式时，直接代入二次式即可；场量是复数式时，应先取实部再代入，即“先取实后相乘”；如复数形式的场量中没有时间因子，取实前应先补充时间因子。

在时谐电磁场中，更有意义的是一个周期内的平均能流密度，即平均坡印廷矢量 $S_{av}(r)$ ，也就

是坡印廷矢量在一个时间周期 T 中的平均值, 即

$$S_{av}(r) = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{S}(r, t) dt = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \vec{S}(r, t) dt \quad (7.7-26)$$

根据由复数电场强度和磁场强度求瞬时坡印廷矢量的方法, 对于一般情况有

$$\begin{aligned} \vec{S}(r, t) &= \text{Re}[\vec{E}(r)e^{j\omega t}] \times \text{Re}[\vec{H}(r)e^{j\omega t}] \\ &= \frac{1}{2} [\vec{E}(r)e^{j\omega t} + (\vec{E}(r)e^{j\omega t})^*] \times \frac{1}{2} [\vec{H}(r)e^{j\omega t} + (\vec{H}(r)e^{j\omega t})^*] \\ &= \frac{1}{4} [\vec{E}(r) \times \vec{H}(r)e^{j2\omega t} + \vec{E}^*(r) \times \vec{H}^*(r)e^{-j2\omega t}] + \frac{1}{4} [\vec{E}(r) \times \vec{H}^*(r) + \vec{E}^*(r) \times \vec{H}(r)] \quad (7.7-27) \\ &= \frac{1}{4} [(\vec{E}(r) \times \vec{H}(r)e^{j2\omega t}) + (\vec{E}(r) \times \vec{H}(r)e^{j2\omega t})^*] + \frac{1}{4} [(\vec{E}(r) \times \vec{H}^*(r)) + (\vec{E}(r) \times \vec{H}^*(r))^*] \\ &= \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E}(r) \times \vec{H}(r)e^{j2\omega t}] + \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E}(r) \times \vec{H}^*(r)] \end{aligned}$$

式中的 “*” 表示取共轭复数。

将 (7.7-27) 式代入到 (7.7-26) 式, 可得

$$\begin{aligned} S_{av}(r) &= \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \left\{ \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E}(r) \times \vec{H}(r)e^{j2\omega t}] + \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E}(r) \times \vec{H}^*(r)] \right\} dt \\ &= \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E}(r) \times \vec{H}^*(r)] \end{aligned} \quad (7.7-28)$$

式中的 $S_{av}(r)$ 称为平均坡印廷矢量, 或平均能流密度, 它是与时间无关的量。 $\vec{E}(r)$ 、 $\vec{H}(r)$ 都是复振幅, $\vec{E}^*(r)$ 、 $\vec{H}^*(r)$ 是共轭复矢量, 它们也都与时间无关。

类似地, 时谐电磁场中的电场能量密度和磁场能量密度也可用复矢量表述为

$$\begin{cases} w_e(r, t) = \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{D}(r)e^{j\omega t}] \times \text{Re}[\vec{E}(r)e^{j\omega t}] = \frac{1}{4} \text{Re}[\vec{D}(r) \times \vec{E}(r)e^{j2\omega t}] + \frac{1}{4} \text{Re}[\vec{D}(r) \times \vec{E}^*(r)] \\ w_m(r, t) = \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{B}(r)e^{j\omega t}] \times \text{Re}[\vec{H}(r)e^{j\omega t}] = \frac{1}{4} \text{Re}[\vec{B}(r) \times \vec{H}(r)e^{j2\omega t}] + \frac{1}{4} \text{Re}[\vec{B}(r) \times \vec{H}^*(r)] \end{cases} \quad (7.7-29)$$

从而可以得到用复矢量表述的电场能量密度和磁场能量密度的时间平均值, 即

$$\begin{cases} w_{eav}(r, t) = \frac{1}{T} \int_0^T w_e(r, t) dt = \frac{1}{4} \text{Re}[\vec{D}(r) \times \vec{E}^*(r)] \\ w_{mav}(r, t) = \frac{1}{T} \int_0^T w_m(r, t) dt = \frac{1}{4} \text{Re}[\vec{B}(r) \times \vec{H}^*(r)] \end{cases} \quad (7.7-30)$$

【例题7-6】 设有两个相距为 d 的无限大理想导体平板, 在平行板间存在时谐电磁场, 假设平板平行于 yoz 平面放置, 其中一个平面在 yoz 平面上, x 轴垂直于平板, k 为常数。平板间的其电场强度为

$$\vec{E}(x, t) = \vec{e}_y E_0 \sin \frac{\pi x}{d} \cos(\omega t - kz), (V/m)$$

试求: (1) 平板间的磁场强度 $\vec{H}(x, t)$; (2) 坡印廷矢量 $\vec{S}(x, t)$ 及平均功率流密度 S_{av} ; (3) 平板导体表面的面电流分布。

解:

(1) 根据已知条件, 复数形式的电场强度为

$$\vec{E}(x, y, z) = \vec{e}_y E_0 \sin \frac{\pi x}{d} e^{-jkz}$$

根据复数形式的麦克斯韦方程有

$$\begin{aligned} \vec{H}(x, y, z) &= -\frac{1}{j\omega\mu} \nabla \times \vec{E}(x, y, z) = \frac{j}{\omega\mu} \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & E_0 \sin \frac{\pi x}{d} e^{-jkz} & 0 \end{vmatrix} \\ &= \frac{jE_0}{\omega\mu} \left[\vec{e}_x jk \sin \frac{\pi x}{d} + \vec{e}_z \frac{\pi}{d} \cos \frac{\pi x}{d} \right] e^{-jkz} \\ &= -\vec{e}_x \frac{kE_0}{\omega\mu} \sin \frac{\pi x}{d} e^{-jkz} + \vec{e}_z \frac{j\pi E_0}{\omega\mu d} \cos \frac{\pi x}{d} e^{-jkz} \end{aligned}$$

则平板间的磁场强度 $\vec{H}(y, z, t)$ 为

$$\begin{aligned} \vec{H}(y, z, t) &= \text{Re} \left\{ \vec{H}(x, y, z) e^{j\omega t} \right\} = \text{Re} \left\{ \frac{jE_0}{\omega\mu} \left[\vec{e}_x jk \sin \frac{\pi x}{d} + \vec{e}_z \frac{\pi}{d} \cos \frac{\pi x}{d} \right] e^{-jkz} e^{j\omega t} \right\} \\ &= -\vec{e}_x \frac{kE_0}{\omega\mu} \sin \frac{\pi x}{d} \cos(\omega t - kz) - \vec{e}_z \frac{\pi E_0}{\omega\mu d} \cos \frac{\pi x}{d} \sin(\omega t - kz) \end{aligned}$$

当然,也可以用瞬时形式的麦克斯韦方程 $\nabla \times \vec{E}(x, y, z, t) = -\mu \frac{\partial \vec{H}(x, y, z, t)}{\partial t}$ 直接求出平板间的磁场

强度 $\vec{H}(x, y, z, t)$, 即

$$\begin{aligned} \vec{H}(x, y, z, t) &= -\frac{1}{\mu} \int \nabla \times \vec{E}(x, y, z, t) dt = -\frac{1}{\mu} \int \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & E_0 \sin \frac{\pi x}{d} \cos(\omega t - kz) & 0 \end{vmatrix} dt \\ &= -\vec{e}_x \frac{kE_0}{\omega\mu} \sin \frac{\pi x}{d} \cos(\omega t - kz) - \vec{e}_z \frac{\pi E_0}{\omega\mu d} \cos \frac{\pi x}{d} \sin(\omega t - kz) \end{aligned}$$

(2) 根据定义,坡印廷矢量 $\vec{S}(x, y, z, t)$ 为

$$\begin{aligned}
\vec{S}(x, y, z, t) &= \vec{E}(x, y, z, t) \times \vec{H}(x, y, z, t) \\
&= \begin{vmatrix} e_x & e_y & e_z \\ 0 & E_0 \sin \frac{\pi x}{d} \cos(\omega t - kz) & 0 \\ -\frac{kE_0}{\omega\mu} \sin \frac{\pi x}{d} \cos(\omega t - kz) & 0 & -\frac{\pi E_0}{\omega\mu d} \cos \frac{\pi x}{d} \sin(\omega t - kz) \end{vmatrix} \\
&= -\vec{e}_x \frac{\pi E_0^2}{4\omega\mu d} \sin \frac{2\pi x}{d} \cos 2(\omega t - kz) + \vec{e}_z \frac{kE_0^2}{\omega\mu} \sin^2 \frac{\pi x}{d} \cos^2(\omega t - kz)
\end{aligned}$$

平均功率流密度 S_{av} 为

$$\begin{aligned}
S_{av}(x, y, z) &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ \vec{E}(x, y, z) \times \vec{H}^*(x, y, z) \} \\
&= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \begin{vmatrix} e_x & e_y & e_z \\ 0 & E_0 \sin \frac{\pi x}{d} e^{-jkz} & 0 \\ -\frac{kE_0}{\omega\mu} \sin \frac{\pi x}{d} e^{jkz} & 0 & \frac{j\pi E_0}{\omega\mu d} \cos \frac{\pi x}{d} e^{jkz} \end{vmatrix} \\
&= \vec{e}_z \frac{kE_0^2}{2\omega\mu} \sin^2 \frac{\pi x}{d}
\end{aligned}$$

(3) 根据导体表面的边界条件可得,

$x=0$ 平板上的面电流 $\vec{J}_s \Big|_{x=0}$ 为

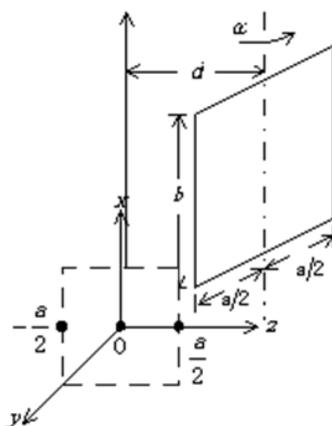
$$\vec{J}_s(t) \Big|_{x=0} = \vec{e}_x \times \vec{H}(x, y, z, t) \Big|_{x=0} = \vec{e}_y \frac{\pi E_0}{\omega\mu d} \sin(\omega t - kz)$$

$x=d$ 平板上的面电流 $\vec{J}_s \Big|_{x=d}$ 为

$$\vec{J}_s(t) \Big|_{x=d} = -\vec{e}_x \times \vec{H}(x, y, z, t) \Big|_{x=d} = \vec{e}_y \frac{\pi E_0}{\omega\mu d} \sin(\omega t - kz)$$

习题

7.1 长直导线中载有电流 I ，其近旁有一矩形线框，尺寸与相互位置如图所示。设 $t=0$ 时，线框与直导线共面时 $t>0$ ，线框以均匀角速度 ω 绕平行于直导线的对称轴旋转，求线框中的感应电动势。



7.2 无源真空中有一磁场强度 $\vec{H}(r,t) = e_x 100 \sin(5x) \cos(\omega t - \beta y) + e_y 50 \cos(5x) \sin(\omega t - \beta y)$ ，求位移电流密度。

7.3 一圆柱形电容器，内、外导体半径分别为 a 和 b ，长为 l 。假设该电容器外加电压为 $U_0 \sin \omega t$ ，试计算电容器极板间的总位移电流，并证明它等于电容器的传导电流。

7.4 在 $z=3\text{m}$ 的平面内，长度 $l=0.5\text{m}$ 的导线沿 x 轴方向排列。当该导线以速度 $\vec{V} = 2e_x + 4e_y, \text{m/s}$ 在磁感应强度 $\vec{B} = e_x 3x^2z + e_y 6 + e_z 3xz^2, \text{T}$ 的磁场中移动时，求感应电动势。

7.5 电子感应加速器中的磁场在直径为 0.5m 的圆柱形区域内是均匀的，若磁场的变化率为 $0.01, \text{T/s}$ ，试计算离开中心距离为 0.1m 、 0.5m 、 1.0m 处各点的感生电场。

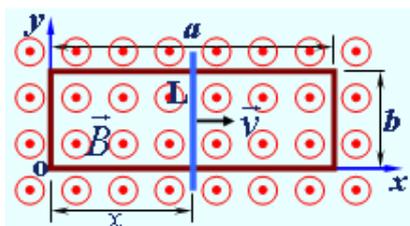
7.6 在坐标原点附近区域内，传导电流密度为 $J = e_r 10r^{1.5}, \text{A/m}^2$ ，求：(1)通过半径 $r=1\text{mm}$ 的球面的电流值；(2)在 $r=1\text{mm}$ 的球面上电荷密度的增加率；(3)在 $r=1\text{mm}$ 的球内总电荷的增加率。

7.7 长为 a 、宽为 b 的矩形环中有均匀磁场 \vec{B} 垂直穿过，如图所示。在以下三种情况下，求矩形环内的感应电动势。

(1) $\vec{B} = e_z B_0 \cos(\omega t)$ ，矩形回路静止；

(2) $\vec{B} = e_z B_0$ ，矩形回路的宽边 b 为常数，但其长边因可滑动导体 L 以匀速 $\vec{V} = e_x v, \text{m/s}$ 运动而随时间增大；

(3) $\vec{B} = e_z B_0 \cos(\omega t)$ ，且矩形回路上的可滑动导体 L 以匀速 $\vec{V} = e_x v, \text{m/s}$ 运动。



7.8 海水的电导率为 4S/m ，相对介电常数为 81 ，求频率为 1MHz 时，位移电流振幅与传导电流振幅的比值。

7.9 自由空间的磁场强度为 $\vec{H} = e_x H_m \cos(\omega t - kz), \text{A/m}$ ， k 为常数，求位移电流密度和电场强度。

7.10 正弦交流电压源 $u = u_m \sin(\omega t)$ 连接到平行板电容器的两个极板上。(1) 证明电容器两极板间的位移电流与连接导线中的传导电流相等；(2) 求导线附近距离连接导线为 r 处的磁场强度。

7.11 在无源的电介质中，若已知电场强度矢量为 $\vec{E} = e_x E_m \sin(\omega t - kz)$, V/m，式中的 E_m 为振幅、 ω 为角频率、 k 为相位常数。试确定 k 与 ω 之间所满足的关系，并求出与 \vec{E} 相应的其它场矢量。

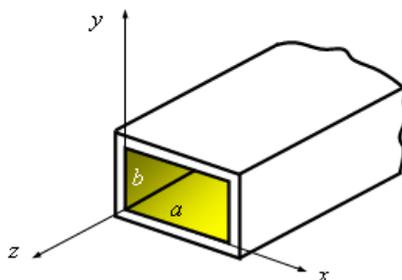
7.12 证明均匀导电媒质内部，不会有永久的自由电荷分布。

7.13 设 $z=0$ 的平面为空气与理想导体的分界面， $z < 0$ 一侧为理想导体，分界面处的磁场强度为 $\vec{H}(x, y, 0, t) = e_x H_0 \sin ax \cos(\omega t - ay)$ ，求理想导体表面上的电流分布、电荷分布以及分界面处的电场强度。

7.14 证明在无初值的时变场条件下，法向分量的边界条件已含于切向分量的边界条件之中，即只有两个切向分量的边界条件是独立的。因此，在解电磁场边值问题中只需代入两个切向分量的边界条件。

7.15 两导体平板 ($z=0$ 和 $z=d$) 之间的空气中，已知电场强度 $\vec{E} = \vec{e}_y E_0 \sin\left(\frac{\pi}{d} z\right) \cos(\omega t - kx)$, V/m，求：(1) 磁场强度；(2) 导体表面的电流密度。

7.16 已知内截面为 $a \times b$ 的矩形金属波导中的时变电磁场各分量为 $E_y = E_{y0} \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right) \cos(\omega t - k_z z)$ ， $H_x = H_{x0} \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right) \cos(\omega t - k_z z)$ ， $H_z = H_{z0} \cos\left(\frac{\pi}{a} x\right) \sin(\omega t - k_z z)$ ，求波导内部为真空时，波导中的位移电流分布和波导内壁上的电荷及电流分布。



7.17 在无源区求均匀导电媒质中电场强度和磁场强度满足的波动方程。

7.18 在无源自由空间有一正弦电磁场， $\vec{E} = E_0 e^{j(\omega t - kr)}$ ， $\vec{H} = H_0 e^{j(\omega t - kr)}$ ，其中 E_0 ， H_0 及 k 均为常矢， r 为位置矢。验证 E 和 H 满足波动方程的条件是 $\frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = c$ ，并讨论之。

7.19 已知时变电磁场中矢量位 $A = e_x A_m \sin(\omega t - kz)$ ，其中 A_m 、 k 是常数，求电场强度、磁场强度和坡印廷矢量。

7.20 设电场强度和磁场强度分别为 $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t + \psi_e)$ ， $\vec{H} = \vec{H}_0 \cos(\omega t + \psi_m)$ ，证明其坡印廷矢量的平均值为 $\vec{S}_{av} = \frac{1}{2} \vec{E}_0 \times \vec{H}_0 \cos(\psi_e - \psi_m)$ 。

7.21 已知正弦电磁场的电场瞬时值为 $\vec{E}(z, t) = e_x 10 \sin(10^8 \pi t - kz) + e_x 15 \sin(10^8 \pi t - kz - \pi/3)$ 。求：(1) 电场的复矢量；(2) 磁场的复矢量和瞬时值。

7.22 一个真空中存在的电磁场为 $\vec{E} = e_x j E_0 \sin kz$ ， $\vec{H} = e_y \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_0 \cos kz$ ，其中 $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$ 。求

$z = 0, \frac{\lambda}{8}, \frac{\lambda}{4}$ 各点的坡印廷矢量的瞬时值和平均值。

7.23 已知无源的自由空间中，时变电磁场的电场强度复矢量 $\mathbf{E}(z) = \mathbf{e}_y E_0 e^{-jkz}$, V/m ，式中 k 、 E_0 为常数。求：(1) 磁场强度复矢量；(2) 坡印廷矢量的瞬时值；(3) 平均坡印廷矢量。

7.24 已知某真空区域中的时变电磁场的电场瞬时值为 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{e}_y \sqrt{2} \sin(10\pi x) \sin(\omega t - k_z z)$ ，求：(1) 其磁场强度的复数形式；(2) 求其能流密度矢量的平均值。

7.25 若真空中正弦电磁场的电场复矢量为 $\vec{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) = (-j\mathbf{e}_x - 2\mathbf{e}_y + j\sqrt{3}\mathbf{e}_z) e^{-j0.05\pi(\sqrt{3}x+z)}$ ，求：(1) 电场强度的瞬时值 $\vec{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, t)$ ；(2) 磁感应强度的复矢量 $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ ；(3) 复能流密度矢量 $S_{av}(\mathbf{r})$ 。

1. 师德师风类

| 序号 | 时间 | 获奖内容 | 颁奖部门 | 姓名 |
|----|------|-----------|--------|-----|
| 1 | 2022 | 立德树人先进个人 | 河南师范大学 | 史水娥 |
| 2 | 2022 | 立德树人先进个人 | 河南师范大学 | 张 瑜 |
| 3 | 2019 | “三育人”先进个人 | 河南师范大学 | 史水娥 |
| 4 | 2021 | “三育人”先进个人 | 河南师范大学 | 詹华伟 |



河南师范大学
HENAN NORMAL UNIVERSITY

荣誉证书

史水娥 同志：

在2020—2021年度工作中表现突出，被评为
为立德树人先进个人。

特发此证，以资鼓励。

河南师范大学
二〇二一年九月



河南师范大学
HENAN NORMAL UNIVERSITY

荣誉证书

张瑜 同志：

在2020—2021年度工作中表现突出， 被评为

为立德树人先进个人。

特发此证，以资鼓励。

河南师范大学
二〇二一年九月

荣誉证书

HONORARY CREDENTIAL

史水娥 同志：

在 2017, 2018 年度教书育人，管理育人，服务育人工作中成绩显著，被评为“三育人”先进个人。
特发此证，以资鼓励。

河南师范大学三育人工作领导小组

二〇一九年九月



荣誉证书

HONORARY CREDENTIAL

詹华伟 同志：

在 2019、2020 年度教书育人、管理育人、服务育人
工作中成绩显著，被评为“三育人”先进个人。
特发此证，以资鼓励。

河南师范大学“三育人”工作领导小组

二〇二一年十月



2. 教学获奖类

| 序号 | 时间 | 获奖内容 | 颁奖部门 | 获奖等级 | 获奖等次 | 获奖名次 |
|----|------|-------------------|--------|------|------|-------|
| 1 | 2019 | 河南省高校青年教师课堂教学创新大赛 | 河南省教育厅 | 省级 | 特等奖 | 史水娥/1 |
| 2 | 2021 | 河南省首届教材建设奖（高等教育类） | 河南省教育厅 | 省级 | 二等奖 | 张 瑜/1 |
| 3 | 2020 | 河南省本科教育线上教学优秀课程 | 河南省教育厅 | 省级 | 二等奖 | 詹华伟/1 |
| 4 | 2019 | 河南省师德主题教育征文 | 河南省教育厅 | 省级 | 一等奖 | 史水娥/1 |
| 5 | 2021 | 河南师范大学第十四届教学成果奖 | 河南师范大学 | 校级 | 一等奖 | 史水娥/1 |

荣誉证书

HONORARY CREDENTIAL

河南师范大学

史水娥老师

在河南省本

科高校青年教师课堂教学创新大赛中荣获特等奖。

特发此证，以资鼓励。

文件编号：教高〔2019〕793号

证书编号：豫教〔2019〕35986

河南省教育厅

2019年11月



河南省教育厅关于首届全省教材建设奖评选（高等教育类） 拟奖励及首届全国教材建设奖（高等教育类）拟推荐名单的公示

2021-01-08 18:07 【浏览字号: 大 中 小】 来源: 教育厅办公室

各本科高等学校:

按照《国家教材委员会关于开展首届全国教材建设奖评选工作的通知》（国教材字〔2020〕4号）要求，根据省委高校工委、省教育厅《关于开展首届全省教材建设奖评选暨首届全国教材建设奖推荐工作的通知》（教思政〔2020〕467号）安排，经各高校初评、推荐申报和省级评审，省委高校工委、省教育厅研究拟评选郑州大学《竞争法教程（第二版）》等181部教材为河南省优秀教材，拟推荐其中49部教材参加全国优秀教材（高等教育类）评选。现将结果予以公示（见附件）。

自发布之日起10日内，任何单位和个人对评选结果持有异议，可以书面形式向我厅高教处提出。单位提出的异议，须在异议材料上加盖本单位公章，并写明联系人工作单位、通讯地址和电话。个人提出的异议，须在异议材料上签署真实姓名，并写明本人工作单位、通讯地址和电话。我对提出异议的单位与个人信息予以保密，并认真组织调查、核实和处理。不符合上述要求的异议，不予受理。

联系人：白威涛

电话：0371—69691868

地址：郑州市正光路11号

邮编：450018

| 序号 | 教材名称 | 国际标准书号 | 主编 | 副主编 | 编写人员 | 出版单位 | 申报高校 | 河南省优秀教材奖励等次 | 是否推荐参加全国优秀教材评选 |
|----|------------|---------------------|-------------|-----------------|--|-------------|--------|-------------|----------------|
| 90 | 作物育种学 | ISBN: 9787030397997 | 唐肇堂、陈景堂、李卫华 | 孙黛珍、刘明久、刘保申、王盛 | 张林、吴连成、欧行奇、穆俊祥、刘芳、渠云芳、郭晋杰、李春红 | 科学出版社 | 河南农业大学 | 二等奖 | 否 |
| 91 | 农业企业管理 | ISBN: 9787040421873 | 吴一平、张正河 | 刘维忠、佟国光、郭锦慧、阮文彪 | 王磊、王彩霞、杨贞、李婷婷、何泽军、张艳荣、陈焱、陈素云、郑伟程、倪冰莉、晋洪涛、戚迪明 | 高等教育出版社 | 河南农业大学 | 二等奖 | 否 |
| 92 | 师幼互动方法与实践 | ISBN: 9787307158344 | 刘晓红 | 闫报刚 | 刘丽红、王兵兵、赵培、王文熙 | 武汉大学出版社 | 河南师范大学 | 二等奖 | 否 |
| 93 | 细胞生物学（第二版） | ISBN: 9787030611970 | 梁卫红 | 杨保胜、王华、杨献光、彭仁海 | 高红云、黄俊波、刘肖飞、吴秋芳、李永海、燕帅国、周棋嘉、陶娟 | 科学出版社 | 河南师范大学 | 二等奖 | 否 |
| 94 | 电磁场与电磁波基础 | ISBN: 9787560640150 | 张瑜 | 李雪萍、付蕊 | 无 | 西安电子科技大学出版社 | 河南师范大学 | 二等奖 | 否 |

河南省 本科教育线上教学优秀课程 证书

为传递抗击疫情正能量，进一步激发教师参与课程改革的热情，促进课堂教学与信息化的深度融合，切实提高教学效率、提升教学质量，省教育厅从疫情防控期间开展线上教学的课程中评选出了一批本科教育优秀课程，特颁此证书。

课 程 名 称：高频电子线路

课 程 负 责 人：詹华伟

团队其他主要成员：高金辉 史水斌 张林庆
杨豪强

所 在 高 校：河南师范大学

评 奖 等 级：二等奖



文件号：教高〔2020〕265号

证书编号：豫教〔2020〕13857号

获奖证书

史水娥 同志：

在河南省“学习时代楷模，成就出彩人生”师德主题教育征文
评选中，所撰写的《学习时代楷模，弘扬奉献精神》
被评为 一等奖。

特颁此证 以资鼓励

证书编号：豫教〔2019〕18400号


河南省教育厅
2019年9月

关于河南师范大学第十四届教学成果奖暨 2021 年河南省 高等教育教学成果奖推荐评审结果的公示

发布者：刘炳辉 发布时间：2022-01-10 浏览次数：45



根据《河南省教育厅关于做好 2021 年河南省高等教育教学成果奖励申报工作的通知》（教高〔2021〕371 号），我校开展了河南师范大学第十四届教学成果奖暨 2021 年河南省高等教育

| | | | | | |
|----|-------------------------------|-----|---------------------------|-----|------|
| | 践 | | 袁国华、赵金彩、郭良栋 | | |
| 14 | 基于《数字电子技术》课程线上线下混合式“金课”的研究与实践 | 史水娥 | 詹华伟、吴耀武、李少玉、王建信、阮宁、鲍伟娜、张瑜 | 一等奖 | 推荐省级 |
| 15 | 基于混合式“金课”的现代汉语课程内容优化研究与实践 | 刘志芳 | 秦法跃、张雪平、李瑞萍、王宁 | 一等奖 | 推荐省级 |
| | 从“进化课堂”到“讲 | | 赵先鹤、马迎宾、李海锋、 | | |

附件 4

教学成果校外推广应用及效果证明

| | | |
|--|-----------------------------|------|
| 成果名称：基于《数字电子技术》课程线上线下混合式“金课”的研究与实践 | | |
| 成果应用单位：河南科技学院机电学院 | | |
| 面向对象及受益人数 | <input type="checkbox"/> 教师 | 5人 |
| | <input type="checkbox"/> 学生 | 500人 |
| 成果应用效果（应用后所取得的成效、应用前后对比等） | | |
| <p>本项目成果水平较高，具有较好的推广效果，课程资源建设成效显著，现具有教学设计案例库、试题库、课程思政教学设计案例库、授课视频、课件和多个校外实习基地。河南科技学院机电学院的电子科学与技术专业、应用电子技术教育专业和电气工程及其自动化专业的教学中，借鉴使用了本成果，较好地解决课堂教学质量问题，该课程资源应用情况优良，受到广大师生的好评，发挥了本成果的示范引领与辐射带动作用。</p> | | |
| 二级单位负责人签字：  | | |
|  (盖章) | | |
|  (学校盖章) | | |
| 年 月 日 | | |

附件 4

教学成果校外推广应用及效果证明

成果名称：基于《数字电子技术》课程线上线下混合式“金课”的研究与实践

成果应用单位：周口师范学院物理与电信工程学院

| | | |
|-----------|-----------------------------|-------|
| 面向对象及受益人数 | <input type="checkbox"/> 教师 | 3 人 |
| | <input type="checkbox"/> 学生 | 300 人 |

成果应用效果（应用后所取得的成效、应用前后对比等）

本项目成果水平较高，具有较好的推广效果，课程资源建设成效显著，现具有教学设计案例库、试题库、课程思政教学设计案例库、授课视频、课件和多个校外实习基地。周口师范学院物理与电信工程学院的电子信息专业教学中，借鉴使用了本成果，较好地解决课堂教学质量问题，该课程资源应用情况优良，受到广大师生的好评，发挥了本成果的示范引领与辐射带动作用。

二级单位负责人签字：



年 月 日