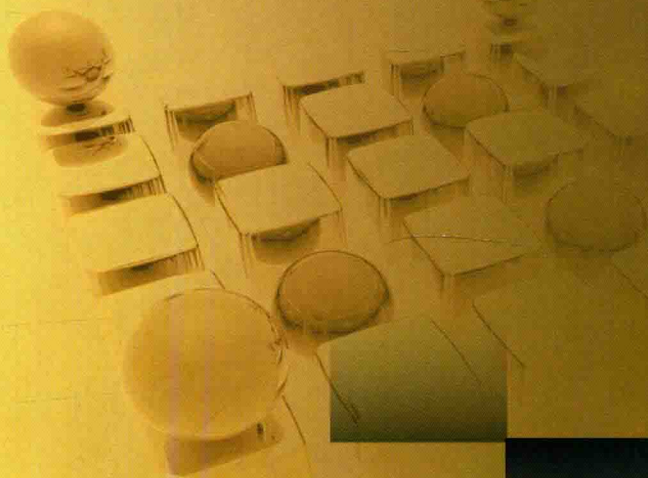


高等学校工程应用型 “十二五” 系列规划教材



工程电磁理论与 应用基础

李哲英 钮文良 吕彩霞 编著



科学出版社

高等学校工程应用型“十二五”系列规划教材

工程电磁理论与应用基础

李哲英 钮文良 吕彩霞 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书为电类应用型本科专业电磁场基础课程教学而编写。本书采用突出基本概念和应用、避免复杂数学计算的编写思路,侧重工程所需的基本电磁概念和简化分析方法。全书从介绍工程电磁技术基本概念入手,在简单介绍相关数学工具后,从 Maxwell 方程出发,重点讨论静态电磁场、时变电磁场、电磁波的工程应用基本概念。为突出与电路技术的关系,在相关章节讨论场与路之间的物理关系和磁路概念,引入信号完整性和电磁兼容技术的最基本概念,目的是讨论电磁场参数与电路参数的关系,这些都是工程电磁技术应用的重要内容。本书第 2~7 章后附有思考题与练习题,有的章节还配备了基本概念应用和工程测试相关的实验。

本书可作为电气、电子、通信、机电一体化、生物医学工程、物联网工程等工程应用型本科教材,也可作为应用工程师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程电磁理论及应用. 钮文良, 吕彩霞编著. —北京: 科学出版社, 2015.6

高等学校工程应用型“十二五”系列规划教材

ISBN 978-7-03-044589-6

I. ①工… II. ①钮… ③吕… III. ①电磁学-高等学校-教材 IV. ①0441

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 126214 号

责任编辑: 潘斯斯 张丽花 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 霍 兵 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 6 月第一次印刷 印张: 17

字数: 400 000

定价: 38.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前言

电磁场课程、电磁场与电磁波课程是电气电子工程专业的学科基本课程,可以统称为电磁场课程。电磁场课程面向电气工程、自动化、机电一体化等专业。电磁场与电磁波课程则面向电子工程、通信工程、电子信息工程等专业。

电磁场课程属于工程分析理论课程,其核心内容是物理学的电磁基本规律,所使用的分析方法则来自场论、偏微分方程等数学分支。电磁基本规律作为物理电磁学的一部分,对场论、数理方程、复变函数等课程的要求比较高,所以物理电磁分析是物理学与数学的有机结合。同时,电磁场课程是电机学、低压电器、高压电器、微波技术、电波与天线等专业工程分析理论的基础。在电磁场课程学习中,既要求具有较强的形象思维能力,又要求具有较高的逻辑思维能力。由于课程内容复杂,对数学知识要求比较高,多年来,电磁场课程一直是相关本科专业,特别是应用型本科专业的教学难点之一。

工程师日常工作中,最常用的是工程电磁分析的基本概念和分析技术。例如,电磁理论对无源器件的定义、电能的存在方式、电磁波的传播特性、介质对电场或电路的影响等。因此,在实际教学工作中,除非专业特殊需要,对于技术应用型学生,没有必要深入学习相关的数学基础和电磁理论,关键在于对电能存在形式的理解及工程电磁分析概念的应用。特别是随着信息技术的发展,各种仿真分析工具不断出现,这就大大地简化了分析过程及对分析的要求。重要的是通过电磁场课程掌握工程电磁分析的基本概念。

工程上实际对工程师的要求是知识和技术创新应用。特别是对于应用工程师,更多的是把知识和技术的基本概念融汇到技术工作中。所以,电气电子技术应用工程师要把理论和技术体系的核心转变成自身的基本概念,成为日常工作中的“本能反应”。电磁场课程所包含的基本概念构成了应用工程师技术能力的支撑,体现了电气电子应用工程师的基本素质。这就需要应用型本科工程专业在电磁场理论与技术的教学中,必须突出基本概念、工程分析方法、技术应用练习。

针对电磁理论和分析计算方法复杂的问题,根据教育部电气电子基础课程教学指导委员会发布的电磁场课程教学基本要求(2010年),作者把建立基本电磁工程概念、突出概念应用作为本书的编写指导思想,在编写中以物理概念和基本工程分析概念为重点,通过对电磁场课程知识点的整合,放弃了复杂的理论分析和计算,强化了与工程应用相关的应用练习。

本书重点讨论两个方面的问题:

- (1) 电磁分析的基本概念和分析内容;
- (2) 工程电磁分析的基本概念和应用技术。

本书的内容安排如下。

绪论作为引子,简单介绍工程中的电磁问题、工程电磁分析和工程电磁技术发展。

第1章介绍电磁问题相关的基本数学工具,以此作为其他各章分析讨论的基础。电磁场课程教学的一个基本难点就是矢量分析,从电路的时间分析扩展到三维空间和时间分析,无论物理概念还是数学工具都产生了巨大的差异,所以了解有关矢量场的基本分析方法是十分重要,也是必要的。必须指出,这里并不是要求学生通过课程完全掌握这些基本数学工具,

而是要掌握这些数学方法所提供的基本概念。例如,场论方法提供的梯度、散度、旋度是分析和确定矢量场的基本方法,散度定理提供了体积分和面积分的转换等。

第2章结合物理电磁学的内容,讨论基本电磁量、电磁基本方程,并对工程电磁分析的基本内容做介绍。本章包含电磁场课程所需要的全部基本概念,可以看作全书的分析和学习基础。通过本章的学习,学生可以对工程电磁分析有一个基本认知框架,从而为其他各章的分析讨论和应用练习奠定基础。

第3章讨论静电场、恒定电场和恒定磁场的重要工程特征和分析概念。

第4章讨论电磁感应、交变场和电磁波的问题,建立电磁感应、趋肤效应、电容效应、电感效应、电波极化与传播模式、电磁波的辐射与接收,以及电磁波传播过程中的衰减与吸收等基本概念。这些都是工程电磁分析中的基本概念。

第5章讨论电磁能量的传输。电磁能量的转换和传输是电磁现象和理论应用的重要概念,没有能量分析就不会有完整的工程分析,也不可能获得正确的工程电磁分析结果。所以,在工程电磁分析中必须十分重视电磁能量。

第6章讨论电磁测量问题,包括电荷与电流测量、电磁场分布测量、电磁波辐射测量等。电磁测量不仅是工程电磁分析技术的重要组成部分,也是其他相关工程领域的关键技术之一。

第7章是工程电磁分析应用的内容,讨论电子系统所关心的信号完整性和现代工程技术中的电磁兼容问题。本章的相关内容工程电磁分析概念的基本应用。

第8章对电磁场分析的数学方法做了简单的讨论,希望能为读者提供有关数学方法的基本指南。

附录提供了电磁工程的部分国家标准。这些都是通过理论分析和工程实践获得的工程知识。了解本专业相关的国家标准是工科学校教学的重要内容之一。

根据作者的教学经验,本书第1~5章可作为基本教学内容,在教学中突出基本概念和简化方法,第6~8章可作为以学生阅读为主的教学内容。为突出教学内容,第2~7章后面配备了适当数量的思考题、练习题和实验题。作者希望通过思考、练习和实验使学生能够初步具备基本工程电磁分析素质,并能自觉地把工程电磁分析应用到专业课程学习和工程实践中。本书中带“*”号的章节为以学生阅读为主的学习章节,不作为课程学习的基本内容。

李哲英编写绪论和第1~3章和第8章,吕彩霞编写第4、5章,钮文良编写第6、7章并整理附录,全书由李哲英统稿。

北京航空航天大学的张晓林教授等审阅了本书,并提出了许多宝贵的意见和建议。本书的编写得到了北京联合大学应用科技学院的教师与有关领导的大力支持。作者在此对他们表示衷心的感谢。

由于是一种新的尝试,加之作者水平有限,本书中难免存在不妥之处,欢迎读者批评指正。

李哲英

2015年3月

于北京联合大学

目 录

前言	1
绪论	1
0.1 工程中的电磁问题	1
0.1.1 工程电磁技术	1
0.1.2 工程中的基本电磁问题	3
0.1.3 应用技术中的基本电磁问题	5
0.1.4 工程电磁环境问题	5
0.2 工程电磁分析概述	6
0.2.1 基本电磁理论	6
0.2.2 基本数学概念与方法	7
0.2.3 工程电磁分析基本内容	7
0.3 工程电磁技术发展	8
第 1 章 基本数学工具	10
1.1 矢量与场分析基本概念	10
1.1.1 标量、标量函数与标量场	10
1.1.2 矢量与矢量场	12
1.2 三种基本正交坐标系	14
1.2.1 直角坐标系	15
1.2.2 柱坐标系	16
1.2.3 球坐标系	16
1.2.4 坐标系转换	17
1.2.5 微变元矢量	18
1.3 矢量计算	23
1.3.1 矢量加法	23
1.3.2 矢量乘法	27
1.3.3 矢量微分与求导	28
1.3.4 矢量积分	29
1.4 矢量场分析基本概念	31
1.4.1 梯度	31
1.4.2 散度	32
1.4.3 旋度	34
1.4.4 高斯公式与斯托克斯公式	37
1.4.5 矢量场的位函数	37
1.4.6 亥姆霍兹定理	39

本章小结	40
思考题与练习题	40
第2章 工程电磁基本理论	42
2.1 基本电磁量	42
2.1.1 电荷与电荷密度	43
2.1.2 电场强度、电位移矢量、电位	45
2.1.3 电流	48
2.1.4 磁感应强度、磁场强度和磁通	52
2.1.5 导体、电介质、导电介质与磁介质	55
2.2 电磁基本方程	58
2.2.1 Maxwell 方程	58
2.2.2 电流连续性定理	62
2.2.3 电位函数	63
2.2.4 磁位函数	65
2.2.5 波动方程	69
2.2.6 坡印亭定理	70
2.3 工程电磁分析基础	74
2.3.1 静态电磁场与时变电磁场	74
2.3.2 复数表示法	76
2.3.3 边界条件分析	78
2.3.4 工程电磁分析中的定性分析	79
本章小结	86
思考题与练习题	87
第3章 静态电磁场分析	91
3.1 静电场	91
3.1.1 静电场基本特征	91
3.1.2 静电场中的导体与电容	95
3.1.3 定解问题与边界条件分析	98
3.2 恒定电场	106
3.2.1 恒定电场基本特征	106
3.2.2 电动势	111
3.2.3 弛豫时间与欧姆定律	113
3.2.4 定解问题与边界条件	114
3.3 恒定磁场	115
3.3.1 恒定磁场基本特征	115
3.3.2 磁通	117
3.3.3 磁链与电感	120
3.3.4 磁介质与磁路分析	123
3.3.5 定解问题与边界条件	126

本章小结	128
思考题与练习题	129
第4章 电磁感应与电磁波	132
4.1 电磁感应与时变电磁场	132
4.1.1 电磁感应	132
4.1.2 电磁波——时变电磁场	136
4.2 交变电磁场	140
4.2.1 交变电磁场基本特征	140
4.2.2 交变电磁场复数分析	142
4.2.3 工频感应与趋肤效应	146
4.2.4 电容效应	148
4.2.5 电感效应	150
4.2.6 交变电磁场中的电路元件	151
4.3 电磁波传播	153
4.3.1 平面波	153
4.3.2 介质的波阻抗	157
4.3.3 垂直入射	160
4.3.4 斜入射	166
4.3.5 导行波与波导	174
4.4 辐射与接收	182
4.4.1 辐射	182
4.4.2 接收	185
4.5 电磁波衰减与吸收	186
4.5.1 传输衰减	187
4.5.2 电磁波吸收	188
本章小结	188
思考题与练习题	189
第5章 电磁能量转换、传输与接收	193
5.1 电磁能量转换	193
5.1.1 静态电磁能量转换	193
5.1.2 时变电磁能量转换分析	198
5.1.3 电磁干扰的能量分析	200
5.2 电磁能量传输	202
5.2.1 电磁能量传输的基本特征	202
5.2.2 电磁能量传输效率	204
5.2.3 电子系统能量传输分析	205
5.3 天线	206
5.3.1 发射天线分析概念	206
5.3.2 接收天线分析概念	207

5.3.3 电子线路的天线效应分析	208
本章小结	209
思考题与练习题	209
第6章 电磁测量	212
6.1 电荷与电流测量	212
6.1.1 基本物理概念	212
6.1.2 电荷测量	215
6.1.3 电流测量	217
6.2 电磁场分布测量	220
6.2.1 基本测量概念	220
6.2.2 电场分布测量基本概念	222
6.2.3 磁场测量的基本概念	224
6.3 电磁波辐射测量	225
6.3.1 电磁辐射测量概念	225
6.3.2 测量方法分析	226
本章小结	227
思考题与练习题	227
*第7章 信号完整性与电磁兼容概念	229
7.1 信号完整性基本概念	229
7.1.1 理想信号与误差	229
7.1.2 动态逻辑电平信号	235
7.1.3 传输损失	235
7.2 电场能量转换的影响	236
7.2.1 静态电磁能量转换的影响	237
7.2.2 时变电磁能量交换的影响	238
7.3 电场效应	239
7.3.1 恒定电场效应	239
7.3.2 交变电场效应	239
7.4 磁场效应	240
7.4.1 恒定磁场效应	240
7.4.2 交变磁场效应	241
7.5 接地	241
7.5.1 接地的基本概念	241
7.5.2 接地串扰	244
7.6 电磁兼容基本概念	245
7.6.1 电磁兼容概述	245
7.6.2 电力电子系统的电磁兼容特征	246
本章小结	248
思考题与练习题	249

*第 8 章 电磁分析求解方法介绍	250
8.1 镜像法	250
8.1.1 静电场的镜像法	250
8.1.2 恒定磁场镜像法	251
8.2 分离变量法	252
8.2.1 格林定理与解的唯一性	252
8.2.2 偏微分方程的分离变量求解方法	253
8.3 复变函数分析	253
8.3.1 复位函数方法	254
8.3.2 保角变换法	254
8.4 数值分析法	255
8.4.1 有限差分法	255
8.4.2 有限元法	256
8.4.3 矩量法	257
本章小结	258
参考文献	259
附录 电磁兼容相关国家标准	260

绪 论

电磁现象是自然界最基本的现象之一，正是因为电磁现象的存在，才有了电气工程、电子信息工程等一系列工程技术的基础。电磁现象的基本规律及其应用研究，是现代科学技术的重要分支。

物理电磁学指出，电磁能量以场或波的形式存在，电磁场或电磁波不仅是随时间变化的物理能量，还是全空间分布的物理量。因此，电磁问题的精确分析和计算要比电路问题复杂得多。

在工程实际中，如果直接采用物理电磁学的复杂分析和研究方法，必然会加剧工程技术的复杂性，甚至无法在实际中使用。因此，与电路问题相似，在工程技术中采用了相应的简化措施，把复杂的工程电磁问题简化为可以分析和研究的对象，以满足工程应用的需要。

本书的目的，就是讨论电磁场理论与工程电磁分析的相关概念和简化分析问题，为工程技术人员提供必要的工程电磁场基本概念和分析方法。

作为绪论，本章简单介绍电磁工程问题、工程电磁分析的有关概念，使读者能基本了解本书的全貌。

0.1 工程中的电磁问题

电磁问题不仅是电气工程、电子工程、通信工程等领域的基本问题，也是目前几乎所有工程技术领域（包括生物工程领域）都直接相关的一个基本问题。

0.1.1 工程电磁技术

为了更好地理解工程电磁分析，首先需要了解工程电磁技术的基本内容。

工程电磁技术是指基于电磁原理的设备或系统的分析、设计、制造技术。在现代社会中几乎没有不涉及工程电磁技术的工程领域。

工程电磁技术可概括为如下两个方面。

1. 电磁产品设计分析技术

从能量大小上看，电磁产品可以分为功率电磁设备和信号电磁设备两大类。

功率电磁设备是指产生电能、传输电能以及大型用电的装置，如发电机、电动机、无功补偿设备、功率变压器、电焊机、感应加热炉等。这些设备的特点是消耗功率大，功率设备的任务是产生、传输或使用电能。功率电磁设备的特点是电磁能量大，电压电流幅度大，频率低，不易受到高频电磁环境的干扰。同时，功率设备对其附近的电磁环境影响大，但不具有电磁功率辐射的能力。图 0-1-1 和图 0-1-2 是电力系统的发电机、变压器及工程中使用的单相电动机等设备。

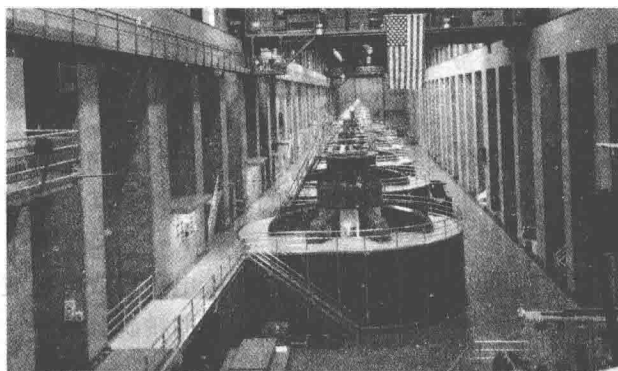
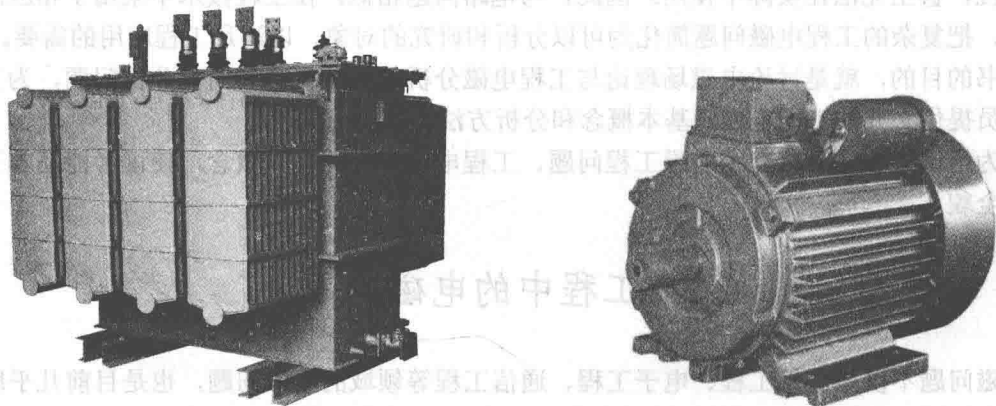


图 0-1-1 水力发电机组



(a) 电力变压器

(b) 交流电动机

图 0-1-2 电力变压器和交流电动机

信号电磁设备是指微小功率的电路系统，如雷达、集成电路、计算机、通信基站、手机、电话机等。信号设备的任务是产生、收集、传输、处理电压或电流信号。信号电磁设备的特点是电磁能量小（大型雷达除外），电压电流幅度低、频率高，易于受电磁的干扰。同时，信号电磁设备对其附近的电磁环境影响较大，并且具有功率辐射。信号电磁设备如图 0-1-3 和图 0-1-4 所示。

当然，信号设备中也有大量消耗功率的设备，如大型计算机、计算机阵列等。这些由微小功率集合形成的大功率消耗系统的核心任务仍然是信号处理，而不是把电能转换为热能或机械能，因此仍然属于信号设备。

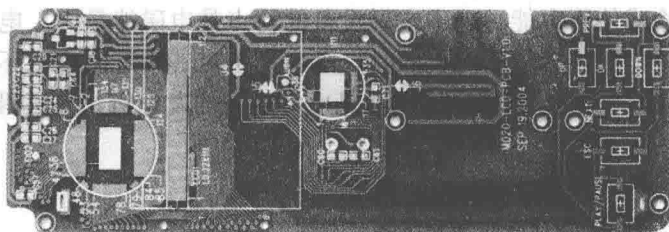
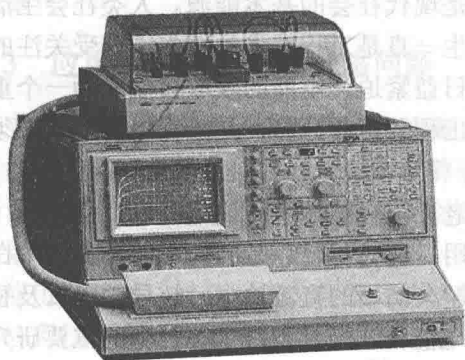
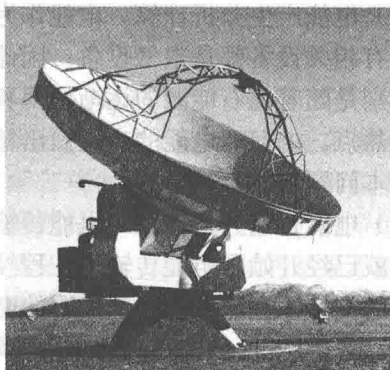


图 0-1-3 信号电磁设备中的印制电路



(a) 电子测量仪器



(b) 抛物面天线

图 0-1-4 功率较大的信号电磁设备

2. 电磁兼容性分析技术

电磁兼容 (Electron Magnetic Compatible, EMC) 是现代重要的电磁工程技术。电磁兼容技术的目的是要保证各种功率设备、信号设备能够在给定的电磁环境下正常工作。电磁兼容技术包括干扰抑制、抗干扰、电磁安全等, 如信号电路中的信号完整性。电磁兼容技术不仅涉及电磁环境的分析, 还涉及电气电子设备的设计方法。随着信息技术的飞速发展, 电气电子系统或产品的电磁兼容性分析技术已经逐渐成熟, 各种电气电子系统和产品必须符合国家或国际的电磁兼容标准。电磁兼容技术已成为各类电气电子工程的重要生产技术。电磁兼容检测对电磁环境要求十分严格。图 0-1-5 是用于电磁兼容测试的电磁屏蔽环境。

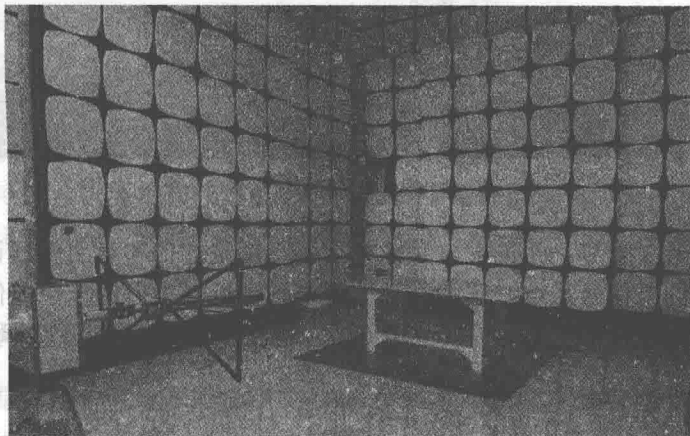


图 0-1-5 用于电磁兼容测试的电磁屏蔽环境

可以看出, 工程电磁技术一方面要为生产、设计所需的设备服务, 另一方面要为电磁环境和设备安全提供相关的技术。

0.1.2 工程中的基本电磁问题

在工程实际中, 电磁设备和系统的分析是十分重要的, 是工程技术应用的基础。例如, 要设计一条从发电厂到用户的输电线路, 就需要根据电能量的需要完成传输线、开关、保护装置、能量转换、用电器的电气结构等多种设备的设计和分析。

相关工程理论所涉及的基本电磁问题如下。

(1) 电能产生分析计算。电能作为二次能源,是现代社会的的基本能源。人类社会生活的几乎所有相关设备都是电气设备。因此,电能的产生一直是工程技术领域中十分受关注的问题。特别是随着化石能源的逐渐枯竭和环境保护的日益紧迫,电能的获取日益成为一个重要的工程热点。如何对电能的产生做出精确而简单的工程分析与计算,是工程电磁理论必须解决的基本问题之一。

(2) 电能传输分析计算。电能传输是一个既古老又年轻的技术。说其古老,是因为 150 多年前就已经开始了电能传输的工程技术研究;说其年轻,是因为电能传输技术在信息技术的支持下不断发展,从简单的交流输电,到超大功率的直流输电、超导输电以及智能电网等。图 0-1-6 所示为超高压电力传输线。同时,电能传输又是现代工程技术的重要研究领域,如集成电路中的电能量传输对其功耗和可靠性等有重要影响。而对于一个信息系统设备,其电能的传输方式和方法也会对系统的性能产生影响。不过,物理电磁学指出,电与磁是共生的、全空间分布的。就是说,电能不仅是时间的函数,还是空间坐标的函数,同时,在考虑电能传输时是否需要考虑磁能的问题?这是一项十分复杂的工作,如果直接采用物理电磁学的分析理论与方法,必将引起巨大的工程分析障碍。

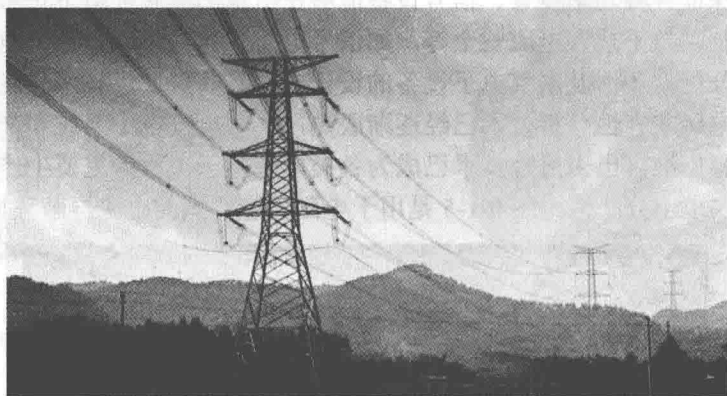


图 0-1-6 超高压输电线

(3) 电信号分析与计算。无论发电和输电设备,还是通信和家用电器设备,实际上都是一个不同能量级别的电信号系统。这就要求工程电磁理论必须提供一个电信号的基本分析理论与方法,以满足工程技术应用的需要。图 0-1-7 是通信领域经常使用的调频信号波形。

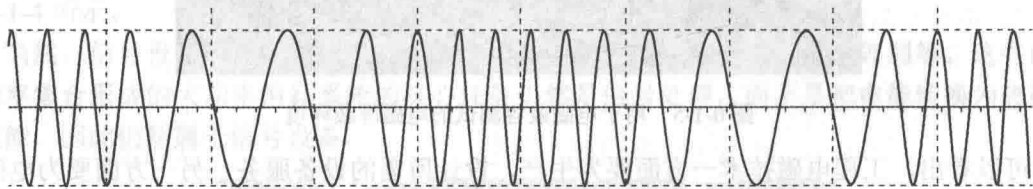


图 0-1-7 调频信号

(4) 电磁能量转换分析与计算。在工程应用中,往往需要在人为控制下实现电能与磁能的相互转换,这就需要对相关材料、设备结构和转换方式进行周密的分析与计算。由于电磁能量在全空间分布,毫无疑问,这种分析面临着巨大的计算障碍。

从物理电磁学可知,电能量和磁能量是全空间分布的,从严格意义上讲,所有的电信号和使用电能量的机器设备,电磁能量必然是全空间分布的。这就为工程分析理论带来了极大

的困难。

0.1.3 应用技术中的基本电磁问题

工程电磁分析提供了电路和磁路的概念,为简化工程分析奠定了基础。但是在实际工作中,由于电磁能量的近似性会使分析计算结果与工程实际有较大的差别。这种差别在不足以影响设备或系统的正常工作,或者不足以引起人身安全问题时是可以忽略的。但如果近似分析结果不足以满足工程实际的精度要求,或者在某种环境条件下,这种近似的结果不能满足工程应用需要时,就必须对这种近似的结果进行矫正,以满足工程应用的要求。

应用技术中的基本电磁问题如下。

(1) 电气设备设计与分析。电气设备包括发电、输电、配电和用电四方面的设备。电气设备的基本工作原理就是根据需要利用电磁现象基本原理实现电能的产生、传输和应用。如何设计合理、合适、满足要求的电气设备是工程实际中需要解决的一个基本电磁问题。

(2) 信号干扰问题。信号干扰问题是各种电气和电子设备中普遍存在的问题。信号干扰严重时,系统就会失去原有的功能。引起电气电子系统信号干扰是现代工程技术中的一个重要工程问题。

(3) 信号传输问题。信号传输是现代信息技术的核心技术之一。由物理电磁学的基本理论可知,电信号的传输实际上就是电磁能量的传输。

(4) 设备的电磁兼容问题。各种设备在工作时,都会形成各种辐射或扰动信号。这就意味着,各种电气电子设备实际上都是其他设备的干扰源。因此,当不同的设备在同一个系统中使用时,就必须解决各种设备之间的相互影响问题。这就是工程中的电磁兼容问题。

(5) 环境电磁问题。生物学指出,人体和动植物都可以被看成导体。当人体周围环境出现电磁能量时,是否会对人体或动植物产生不利的影响及什么情况下会危及人或动植物的生命安全等就是环境电磁学问题。

150 年以来,特别是在 20 世纪,为了解决电磁原理的工程应用问题,在物理电磁学基础之上,提出了工程电磁分析理论和技术,形成了工程电磁分析理论体系,为工程电磁分析和应用提供了应用理论和技术。随着科学技术的不断发展和进步,工程电磁分析技术也在不断完善和发展。

0.1.4 工程电磁环境问题

工程电磁环境是指由电气电子设备引起的空间电磁环境变化。这种由人工设备引发的电磁环境与电气电子设备关系密切,是各种电气电子设备设计者必须关心的一个重要问题。电气电子工程师必须掌握足够的工程电磁分析技术,才能满足工程电磁环境分析和处理的需要。

工程电磁环境问题可以概括为如下几个基本问题。

(1) 电磁辐射问题。在设计一个电气电子设备时,要保证设备正常工作和操作人员的人身安全,就必须考虑设备应用场合中是否存在电磁辐射、辐射在什么强度下是安全的、如果超过安全指标应当采取什么措施等问题。因此,电气电子工程师甚至机械工程师,都要考虑其所设计设备工作环境的电磁辐射问题。同时,除了要考虑和处理来自其他源的电磁辐射外,还必须考虑所设计设备自身的电磁辐射,就是说,不仅要考虑防护其他电磁源的辐射,还必须尽量降低自身的电磁辐射。

(2) 电源质量问题。电源质量问题是一个关乎电气电子设备能否正常工作的核心问题。

电源的实际电压电流、频率、波形等指标是考察电源质量的主要技术指标。高质量电源的各项技术指标与标称值的差别可以忽略不计,而低质量电源的各项技术指标与标称值有较大的差别。例如,直流稳压电源应当提供具有稳定输出电压和额定输出电流的能力,其输出电压中不能含有交流成分等。但实际中,直流稳压电源的输出中总会带有相应的交流电压成分。当这种交流电压成分不足以引起设备故障时,这个电源的质量是可以满足设备需要的,但如果存在引起设备故障的隐患,这个电源就是一个低质量的电源。低质量电源不仅会引起设备故障,还会形成电磁辐射,从而恶化电磁环境。

(3) 信号频率问题。在电路系统理论中,任何一种工程信号都可以利用傅里叶变换进行展开。就是说,信号由各种不同频率的正弦波组成。根据物理电磁学,不同频率的正弦波电压或电流都会引起不同的空间能量分布。同时,由于电气电子设备由导体、半导体和绝缘材料组成,电子系统中的信号会在导体中形成感应电势,这种感应电势的强度与频率成正比。因此,在工程实际中,信号频率是关乎信号正确传输、系统抗电磁干扰能力的一个重要参数。

(4) 传输技术问题。电气电子系统中,电能的传输是无处不在的。输电线传输大规模的电能,电子电路中传输的是微小电能。这些电能的传输方式是否会对其周围产生电磁影响?如果有,如何避免这些影响?在考虑这个问题时,就需要考虑电磁能量的传输方式。传输技术对电磁能量传输的结果有重大影响。传输技术是电气电子工程的重要研究领域,人们希望通过采用不同的传输方式,实现最高的能量传输效率、最低的环境影响以及最安全可靠的传输过程。

总之,在工程实际中,电磁环境问题是每一个工程师必须认真对待并加以解决的重要问题。

0.2 工程电磁分析概述

物理电磁学是一门十分复杂的学科,无论研究对象还是研究手段都具有相当大的复杂性。同时,有关电磁学问题分析计算中使用的数学工具要复杂一些。这就提出了一个问题,能否提供一些工程中必要的电磁学分析方法和基本概念,从而避免在工程实际中直接采用物理电磁学分析方法。这就引出了工程电磁分析理论与方法。

工程电磁分析,是在物理电磁学基本概念和分析方法之上,通过对工程问题的简化来提供必要的工程电磁问题分析方法和技术。工程电磁分析的基本内容包括电磁基本理论与分析方法、工程电磁问题简化分析方法等。

0.2.1 基本电磁理论

工程电磁分析的基础是物理电磁学,物理电磁学给出的基本理论也就是工程电磁分析的核心。若要了解、掌握和使用工程电磁分析方法,首先要了解并掌握基本电磁理论。工程电磁分析的基本电磁理论可以概括为如下内容。

(1) Maxwell 方程及其辅助方程。Maxwell 方程及其辅助方程提供了宏观物理现象的基本规律,揭示了电与磁的物理特征以及相互之间的定量关系,也提供了电介质、磁介质、导电介质、导体等材料对电磁现象的影响和作用。

(2) 位函数描述电磁场。根据 Maxwell 方程提供的基本规律和力学有关保守场的概念,

物理电磁学给出了利用标量函数描述矢量场的原理和方法,这就是电位函数、磁位函数。标量函数的基本概念、分析理论和方法是工程电磁分析的重要内容之一。

(3) 波动方程与坡印亭定理。物理电磁学通过研究给出的波动方程和坡印亭定理,是分析电磁波现象的重要工具。波动方程确认了电磁波的波动特性,坡印亭定理则给出了电磁波功率流的具体分析概念和方法。这些为工程电磁波应用分析提供了重要的计算分析概念和方法。

工程电磁分析的所有基本概念和分析方法与技术都来自这些基本电磁理论。

0.2.2 基本数学概念与方法

物理电磁学指出,电磁现象是矢量场空间分布或随时间变化的结果。所以基本电磁理论以矢量分析和场论为基本工具,只有对基本电磁量进行矢量分析,才能获得正确的物理电磁现象的基本特征。同时,也利用矢量分析和场论分析方法,建立了电磁分析基本理论。

在矢量和场分析中,首先要确立分析对象,即空间分布的矢量,然后分析矢量场的梯度、散度和旋度。矢量场中的矢量,以及矢量场的梯度、散度和旋度描述了矢量场的基本特征。因此,任何物理量的分析,都是首先确定空间相关的基本物理量(矢量),然后考察这个物理量的梯度、散度和旋度。通过梯度、散度和旋度的分析,确定基本物理量的基本特征,同时,可以获得相关的位函数分析方法。

基本电磁理论相关的基本数学概念和方法,是从确定基本电磁量开始,通过对基本电磁量的梯度、散度和旋度进行分析,完成如下工作:

- (1) 确定电磁场的基本特性;
- (2) 确定空间物质对电磁场的影响;
- (3) 确定电磁场的分析计算方法。

由于是对三维空间的分析,所以基本电磁理论应用的数学概念和方法都以空间坐标为基础。而工程电磁分析的重要内容,就是寻找有关三维空间和时间的简化分析方法。

0.2.3 工程电磁分析基本内容

工程电磁分析的任务是完成电磁设备和电磁环境的分析与设计。工程电磁分析从基本电磁理论出发,通过对工程电磁问题分析建立符合要求的简化分析模型,同时,工程电磁分析还提供了简化的分析计算方法和技术,进而提供了简单实用的工程电磁分析理论与技术。

工程电磁问题也是物理电磁现象的一种表现,具有完全的物理电磁学特征。但工程电磁问题还具有自身的工程特征,就是要根据需求和给定条件构建一个独立的电磁系统。这是与物理电磁学完全不同的,物理电磁学讨论的是电磁学的一般理论,并不针对某种特殊情况。例如,物理电磁学研究电磁感应现象的目的是发现电磁感应的一般规律,而工程电磁分析则是要设计一个利用电磁感应产生电能的设备,这就要针对给定的材料设计相应的电磁结构、边界形状等,使这些材料构成的边界空间内能够满足发电要求。所以,工程电磁分析总是针对一类具体条件完成分析,这也就是工程电磁分析能够提供简化分析和计算方法的原因。

在工程中,主要关心那些对电气电子设备的电磁行为产生重要影响的因素,这就形成了工程电磁问题的简化分析。例如,如果磁场主要集中在导磁介质中,则可以忽略磁场在导磁物质以外空间的分布,这样就可以建立与电路分析类似的磁路分析方法。

除了提供简化分析方法与技术外,工程电磁分析还担负着把电场参数转化为电路参数或磁路参数的任务。这是因为电路分析要比电磁场分析简单,电路是针对具体物理元器件,具