



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



面向 21 世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century

工程电磁场原理

第三版

倪光正 主编

高等教育出版社



“十二五”普

及规划教材



面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

工程电磁场原理

第三版

倪光正 主编

GONGCHENG DIANCICHANG YUANLI

高等教育出版社·北京

内容提要

《工程电磁场原理》(第三版)源于教育部高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划的研究成果,其第1版是面向21世纪课程教材,同时还被列入普通高等教育“十五”国家级教材规划。第2版继续被列入普通高等教育“十一五”“十二五”国家级教材规划,以及教育部“2011年度普通高等教育精品教材”。全书体系面向高等工程教育,以电气信息类学生拓宽专业培养口径为立足点,依循日益发展的电磁场工程学科与相关学科融合的特点,突出强电与弱电的结合,电磁理论与工程实践的结合,较好地处理了与物理学中电磁学的关系,并引入“工程应用示例”,专题展示了电磁场与前沿科学、工程技术之间的结合点。全书主要内容为:电磁场的数学物理基础、静态电磁场Ⅰ(静电场)、静态电磁场Ⅱ(恒定电流的电场和磁场)、动态电磁场Ⅰ(基本理论与准静态电磁场)、动态电磁场Ⅱ(电磁辐射与电磁波)和电磁场数值分析与综合专题导引。

《工程电磁场原理》(第三版)可供普通高等学校电气信息类专业作为“电磁场”课程教材,也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程电磁场原理/倪光正主编. -- 3版. -- 北京:高等教育出版社,2016.9

ISBN 978-7-04-046030-8

I. ①工… II. ①倪… III. ①电磁场-高等学校-教材 IV. ①O441.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第198878号

策划编辑 张江漫 责任编辑 张江漫 封面设计 于文燕 版式设计 于婕
插图绘制 杜晓丹 责任校对 刘春萍 责任印制 朱学忠

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	高教社(天津)印务有限公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×960mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	27	版 次	2002年5月第1版
字 数	500千字		2016年9月第3版
购书热线	010-58581118	印 次	2016年9月第1次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	42.80元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 46030-00

第 3 版 前 言

《工程电磁场原理》(第 1、2 版)自 2002 年出版以来,已连续 16 次印刷,总印数达 5 万余册。正是继续在本书规模效应激励下,遵循与时俱进地深化教学改革成果的指导思想,对原教材进行第三版的修订。

当前,完善我国高等工程教育质量,提升我国高等工程教育的国际竞争力,是我国高等教育事业持续发展的重要目标任务之一。“电磁场”课程作为电气类、电子信息类专业本科生必修的一门重要技术基础课,其定位为面向国际化工程教育,为电气类、电子信息类学生的专业课学习提供必备的知识基础,并服务于高素质创新型科技人才培养目标的需求。

因此,本书在保持第 1、2 版原有特色的基础上继续以“电磁场”课程面向工程教育的定位,及其在电气类、电子信息类专业学生知识、能力和素质培养上日益发展的需求,提炼全书的教学体系、内容和方法,主要归结为:首先,第三版继承已构建的理论体系,即运用演绎法,从麦克斯韦方程组出发,基于矢量场的亥姆霍兹定理,由一般到特殊进行推理和论述。其中,在理论联系实际的前提下,继续突出数学建模为学生学习的主线索;基于边值问题的构造,延拓了特殊函数的应用;进而适度展示了结合工程应用的涡流分析的知识点。其次,继承了编写中“三结合”的指导思想,即突出强电与弱电的结合;电磁理论与工程实践的结合;电磁理论与相关学科交叉、渗透的结合。其中,在分解原第 6 章工程电磁场应用专题的基础上,本书进一步予以提炼、充实,使之成为对应于各类电磁场问题分析中的“工程应用示例”,以有助于学生自主学习,增强分析和解决工程电磁场问题的能力。最后,面向电磁场学科与电磁场工程科学技术前沿的进展,以第 6 章电磁场数值分析与综合专题导引,集中展示电磁场理论与当今前沿科学和工程技术间的结合点及其工程应用前景。

在第三版中,凡以星号(*)标识,并以小字排印的有关章节,均可满足本课程多层次教学的需求,其内容之选择、使用并不影响基于本课程教学基本要求讲授的系统性与完整性。

本书在修订过程中,得益于全国高等学校电磁场教学与教材研究会的关注,

国内同仁之间在“电磁场”课程教学改革上的共识,以及使用本书的师生与广大读者反馈的各种积极的意见和建议。为此,编写组谨向关心和支持本书修订的国内广大同仁和读者们致以深切的谢意。

参加本书编写的有浙江大学倪光正、华北电力大学崔翔、西安交通大学邱捷以及浙江大学杨仕友、熊素铭、倪培宏同志,倪光正担任主编。本书承钱秀英教授再次审阅,作者谨致以衷心的感谢,并衷心感谢高等教育出版社对本书出版的全力支持。

限于编者的能力和水平,书中不够完善乃至缺点和错误之处,敬请使用本书的师生和广大读者批评指正。

《工程电磁场原理》(第三版)编写组

2016年3月

第 2 版 前 言

《工程电磁场原理》(第 1 版)自 2002 年出版以来,已连续 7 次印刷,总印数达 2.2 万余册。正是在这样的规模效应激励下,随着我国高等教育事业持续发展的历史进程,遵循与时俱进地深化教学改革成果的指导思想,对原教材的修订进入议事日程。经评审,本书继续被列入普通高等教育“十一五”国家级教材规划。

当前,在经济全球化、工程技术的国际合作与交流日趋频繁的背景下,不断完善我国高等工程教育质量,提升我国高等工程教育的国际竞争力,是我国高等教育事业持续发展的重要目标任务之一。“电磁场”课程作为电气信息类专业本科生必修的一门重要技术基础课,其定位为面向国际化工程教育,应为电气信息类学生的专业课学习提供必备的知识基础,并服务于高素质创新型科技人才培养目标的需求。

因此,本书是在保持第 1 版原有特色的基础上继续以“电磁场”课程面向工程教育的定位,及其在电气信息类专业学生知识、能力和素质培养上日益发展的需求,提炼全书的教学体系、内容和方法,主要归结为:首先,第 2 版继承第 1 版所构建的理论体系,即运用演绎法,从麦克斯韦方程组出发,基于矢量场的亥姆霍兹定理,由一般到特殊进行推理和论述。其中,以教学经验和方法为依据,对时变电磁场知识点的处理,在第 2 版中,修订为第 4 章动态电磁场 I:基本理论与准静态电磁场和第 5 章动态电磁场 II:电磁辐射与电磁波,以求更完善的教学效果。同时,也将更有利于在动态电磁场范畴内表述电磁场科学内涵的统一性与对称性。其次,第 2 版继承了第 1 版编写中“三结合”的指导思想,即突出强电与弱电的结合;电磁理论与工程实践的结合;电磁理论与相关学科交叉、渗透的结合。其中,以提升工程分析能力为背景,在修订中,增加“数值计算方法(FDM)”入门;加强矢量磁位并相应地压缩标量磁位的阐述;修改逆问题优化设计的计算实例;引入电磁无损检测技术概述等相关内容。最后,在第 2 版修订中,增加了 1~5 章的“提要”,以有助于学生自学,归纳并总结所学知识;同时,增设了第 1 章习题,并面向当今科学技术的发展,进一步提炼了电磁兼容、电磁辐

射曝露限值与电磁屏蔽、电磁探测、涡流等与工程实践相关的知识点的阐述。总之,修订后,全书内容更显丰富和充实,行文更为流畅。

本书在修订过程中,得益于全国高等学校电磁场教学与教材研究会的关注,国内同仁之间在“电磁场”课程教学改革上的共识,以及使用本书的师生与广大读者反馈的各种积极的意见和建议。为此,编写组谨向关心和支持本书修订的国内广大同仁和读者们致以深切的谢意。

参加本书编写的有浙江大学倪光正、华北电力大学崔翔、西安交通大学邱捷以及浙江大学杨仕友、熊素铭、倪培宏等同志,倪光正担任主编。本书承钱秀英教授审阅,提出了很多宝贵的意见和建议,谨致以衷心的感谢。作者还要感谢高等教育出版社对本书出版的全力支持。

限于编者的能力和水平,书中不够完善乃至缺点和错误之处,敬请使用本书的师生和广大读者批评指正。

《工程电磁场原理》(第2版)编写组

2009年3月

第 1 版 前 言

自 1977 年“电磁场”课程单独设课以来,20 余年的教学实践已经证明,以分析各类电磁现象的基本规律和应用原理与方法为核心的电磁场课程,是培养合格的电气信息类专业本科生所应具备的知识结构的必要组成部分。近代科学技术发展进程有力地证明,电磁场理论又是众多相关的交叉学科的生长点,是日益延拓的新兴边缘学科发展的基础。因此,作为电气信息类专业本科生必修的一门重要技术基础课,本课程在为学生专业课学习准备必要的知识基础的同时,还关系到增强学生适应和创造能力,完善其基本素质的需要。

多年来,经过全国“电磁场”课程教学工作者矢志不移的努力,已有了一套既不同于苏联、又不同于西方的教学内容和课程体系。但是,随着面向 21 世纪科学技术的新发展,以及国民经济对教育事业、人才培养的新需求,电磁场教学的改革是非常必要、非常迫切的。毫无疑问,在电磁场教学内容和体系上的革新,应是在继承基础上的发展与创新。也就是说,应充分肯定现有电磁场教学内容和体系的成功之处,立足于更高质量人才培养的需求,以现代科学技术发展的强大推动力为背景,实现电磁场教学内容和体系的一种螺旋式上升的发展。

本书提出的体系将以电气信息类学生拓宽专业培养口径为立足点,依循日益发展的电磁场工程学科与相关学科,以及基础技术交叉融合的特点,突出强电与弱电的结合;电磁理论与工程实践的结合;电磁理论与相关学科交叉、渗透的结合。

本书内容立意于:首先,在保持必需的理论系统性考虑下,力求避免与物理电磁学之间的重复性叙述,而是务实地在深化概念、具体化理论应用上下功夫,以体现学生“温故而知新”,学以致用学习成效;其次,在理论联系实际的总前提下,突出电磁场课程学习的方法论指导,以数学建模的思想为学生学习的主线,以“电磁场的数学物理基础”为学习的起点,精选、充实例题,丰富有启发性的典型习题内容等;再次,面向科学技术发展的集成化、系统化,本书以“工程电磁场应用专题”展示电磁场基本理论与前沿科学间的结合点,用以扩大学生知识面,激发学习兴趣,从而有助于加强学生运用基础理论解决工程实际问题的

能力。

综上所述,并结合作者群体在电磁场课程教学,以及电磁场应用研究实践中多年积累的经验、体会,作者寄望本书在面向 21 世纪电磁场课程的教学改革中,有助于学生生动活泼地主动学习,学以致用,并对学生的知识、能力与素质培养产生应有的深远影响。

本书在编写过程中,得益于教育部原电工课程教学指导委员会的指导,全国高等学校电磁场教学与教材研究会的关注,以及国内同仁之间在有关电磁场课程的教学内容、教材体系等方面深化教学改革的共识。这正是形成上述本书编写体系和内容的基础,同时,也是本书作者群体由多所院校合作组成的来由。为此,编写组谨向关心和支持本书编写的国内广大同仁,各有关学校、课委会、研究会致以深切的谢意。

经评审,本书被列为“面向 21 世纪课程教材”,并列入普通高等教育“十五”国家级教材规划。

参加本书编写的有浙江大学倪光正、华北电力大学崔翔、西安交通大学邱捷、西安石油学院晁立东以及浙江大学杨仕友、熊素铭、李玉玲等同志,由倪光正主编。本书初稿承马信山、钱秀英教授初审,其后,马信山教授还对本书定稿仔细审阅,提出了很多宝贵的意见和建议,此外,钱金根、张鸣柳同志对本书的编写给予莫大的关心和支持。谨在此一并致以衷心的感谢。作者还要感谢高等教育出版社对本书出版的全力支持。

限于作者的能力和水平,书中不够完善乃至缺点和错误之处,敬请使用本书的师生和广大读者批评指正。

《工程电磁场原理》编写组

2002 年 3 月

常用物理量的符号与 SI 单位

符号	量的名称	单位
A	矢量磁位或动态矢量位	Wb/m
B	磁感应强度或磁通[量]密度	T
C	电容	F
D	电位移矢量或电通[量]密度	C/m ²
d	电磁波在有损媒质中的透入深度	m
E	电场强度	V/m (N/C)
e	电子的电荷量($1.602\ 177\ 33 \times 10^{-19}$ C)	C
	感应电动势	V
e_x	x 轴方向的单位矢量	
e_y	y 轴方向的单位矢量	
e_z	z 轴方向的单位矢量	
e_n	法向单位矢量	
e_t	切向单位矢量	
F	力	N
	矢量函数的数学表达式	
f	频率	Hz
f_c	波导的截止频率	Hz
G	电导	1/ Ω (S)
H	磁场强度	A/m
I, i	电流	A
J	体电流密度(电流密度)	A/m ²
J_c	传导电流密度	A/m ²
J_D	位移电流密度	A/m ²
J_v	运流电流密度	A/m ²
j	虚数($j^2 = -1$)	
K	面电流密度	A/m

k	波矢量	rad/m
k	波数、相位系数	rad /m
L	电感、自感	H
l	长度、距离	m
M	磁化强度	A/m
M	互感	H
m	磁偶极距	A · m ²
m	质量	kg
N	线匝数	
P	电极化强度	C/m ²
p	电偶极距	C · m
Q, q	电荷	C
R	源点与场点间的距离矢量	m
R	电阻	Ω
	电磁波的反射系数	
r	场点的位置矢量(位矢)	m
r'	源点的位置矢量(位矢)	m
r_{12}	由点 1 指向点 2 的位矢	m
r	球坐标	m
S	坡印廷矢量	W/m ²
S	面积	m ²
T	力矩	N · m
T	电磁波的透射系数	
	周期	s
t	时间	s
$\tan \delta$	介质损耗角的正切	
U	电压	V
V	体积	m ³
v	速度	m/s
ν	相速	m/s
W	功、能	J
W_e	电场能量	J
W_m	磁场能量	J
w'_e	电场能量密度	J/m ³
w'_m	磁场能量密度	J/m ³
x	直角坐标	m

y	直角坐标	m
Z	阻抗	Ω
z	直角坐标	m
γ	电导率	$1/(\Omega \cdot \text{m})$ (S/m)
ε	介电常数	F/m
ε_r	相对介电常数	
ε_0	自由空间的介电常数(8.85×10^{-12} F/m)	F/m
ε'	复介电常数的实部	F/m
ε''	复介电常数的虚部	F/m
$\tilde{\varepsilon}$	复介电常数	F/m
η	介质的特性阻抗	Ω
η_c	有损媒质的特性阻抗	Ω
θ	球坐标	rad
λ	波长	m
λ_c	波导的截止波长	m
μ	磁导率	H/m
μ_r	相对磁导率	
μ_0	自由空间的磁导率($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)	H/m
μ'	复磁导率的实部	H/m
μ''	复磁导率的虚部	H/m
$\tilde{\mu}$	复磁导率	H/m
π	圆周率(3.141 592 6)	
ρ	电阻率	$\Omega \cdot \text{m}$
	电荷体密度	C/m^3
	圆柱坐标	m
σ	电荷面密度	C/m^2
τ	电荷线密度	C/m
Φ	磁通量	Wb
φ	电位或动态标量位	V
φ_m	标量磁位	A
ϕ	圆柱坐标或球坐标	rad
χ_c	电极化率	
χ_m	磁化率	
Ψ, ψ	磁链	Wb
ω	角频率	rad/s

引言	1
1. 电磁现象的研究·电磁场理论的建立	1
2. 场的描述	2
3. 电磁场学科与电磁场工程	3
4. 课程体系与内容的考虑	4
第 1 章 电磁场的数学物理基础	6
1.1 电磁场物理模型的构成	6
1.1.1 电磁场的基本物理量——源量和场量	7
1.1.2 电磁场中的媒质及其电磁性能参数	11
1.2 矢量分析	12
1.2.1 矢量代数	12
1.2.2 坐标系统	15
1.2.3 矢量积分	16
1.2.4 标量场的梯度	19
1.2.5 矢量场的散度	21
1.2.6 矢量场的旋度	23
1.3 场论基础	25
1.3.1 散度定理	25
1.3.2 斯托克斯定理	26
1.3.3 无散场与无旋场	27
1.3.4 亥姆霍兹定理	29
1.4 电磁场的基本规律——麦克斯韦方程组	30
1.4.1 电磁感应定律	31
1.4.2 全电流定律	36
1.4.3 麦克斯韦方程组	40
习题	42
提要	43

第 2 章 静态电磁场 I : 静电场	48
2.1 基本方程与场的特性	48
2.1.1 静电场的基本方程	49
2.1.2 真空中的高斯定理 · 静电场的有散性	50
2.1.3 静电场的无旋性	51
2.2 自由空间中的电场	52
2.2.1 自由空间中的 E 和 φ	52
2.2.2 场分布: 基于场量 E 的分析	54
2.2.3 场分布: 基于位函数 φ 的分析	60
2.2.4 电场线和等位面(线)	63
2.3 导体和电介质	66
2.3.1 静电场中的导体	66
2.3.2 静电场中的电介质 · 电介质的极化	66
2.4 电介质中的电场	69
2.4.1 电介质中的高斯定理	70
2.4.2 介电常数 · 击穿场强	70
2.4.3 不同媒质分界面上的边界条件	75
2.5 边值问题	79
2.5.1 数学模型——边值问题	79
2.5.2 直接积分法	81
2.5.3 分离变量法	83
2.5.4 静电场解的唯一性	94
2.6 镜像法	96
2.6.1 点电荷与无限大接地导电平面系统的电场	96
2.6.2 电轴与无限大接地导电平面系统的电场	98
2.6.3 电轴法	100
2.6.4 点电荷与无限大介质平面系统的电场	103
2.6.5 点电荷与导体球系统的电场	104
2.7 数值计算方法——有限差分法	108
2.7.1 引言	108
2.7.2 差分与差商	109
2.7.3 有限差分法(FDM)	110
2.8 电容 · 部分电容	115
2.8.1 两导体系统的电容	115
2.8.2 多导体系统的电荷与电位 · 部分电容	117
2.8.3 静电屏蔽	120
2.9 静电场能量	121

2.9.1	带电体系统中的静电场能量	122
2.9.2	静电能量的分布及其分布密度	123
2.10	电场力	125
* 2.11	工程应用示例	129
2.11.1	分裂导线系统	129
2.11.2	避雷线(架空地线)	131
2.11.3	屏蔽电极	132
	习题	134
	提要	141

第3章 静态电磁场 II: 恒定电流的电场和磁场 145

3.1	恒定电场的基本方程与场的特性	145
3.1.1	恒定电场的基本方程·无散、无旋场	146
3.1.2	电功率·电动势	148
3.1.3	不同媒质分界面上的边界条件	149
3.2	恒定电场与静电场的比拟·接地系统	152
3.2.1	静电比拟	152
3.2.2	接地电阻	154
3.2.3	跨步电压	157
3.3	恒定磁场的基本方程与场的特性	158
3.3.1	恒定磁场的基本方程	158
3.3.2	真空中的安培环路定律·恒定磁场的有旋性	159
3.3.3	磁通连续性原理·恒定磁场的无散性	160
3.3.4	毕奥-萨伐尔定律	160
3.4	自由空间中的磁场	161
3.4.1	场分布:基于场量 B 的分析	162
3.4.2	场分布:基于矢量磁位 A 的分析	168
3.4.3	场分布:基于标量磁位 φ_m 的分析	176
3.4.4	磁场线	178
3.5	媒质中的磁场	180
3.5.1	媒质磁化	181
3.5.2	磁场强度 H ·一般形式的安培环路定律	183
3.5.3	不同媒质分界面上的边界条件	185
3.5.4	场分布:基于场量 H 的分析;边值问题;镜像法	187
3.6	电感	195
3.6.1	自感	195
3.6.2	互感	198
3.6.3	线形回路的电感	200

3.7 磁场能量	203
3.7.1 载流回路系统中的磁场能量	203
3.7.2 磁场能量的分布及其分布密度	205
3.8 磁场力	207
* 3.9 工程应用示例	214
3.9.1 电磁探测	214
3.9.2 电机的齿槽结构	218
3.9.3 磁悬浮技术	220
习题	223
提要	229
第 4 章 动态电磁场 I : 基本理论与准静态电磁场	236
4.1 动态电磁场的基本方程与边界条件	236
4.1.1 动态电磁场的基本方程	236
4.1.2 动态电磁场的边界条件	237
4.2 时谐电磁场	240
4.2.1 时谐电磁场的复数表示	240
4.2.2 有损媒质的复数表示	241
4.3 电磁场能量·坡印廷定理	242
4.4 电磁位	246
4.4.1 电磁位·洛伦兹规范	246
4.4.2 非齐次波动方程	247
4.4.3 电磁位的积分解	248
4.5 准静态电磁场	252
4.5.1 电准静态场与磁准静态场	253
4.5.2 导电媒质中自由电荷的弛豫过程	256
4.5.3 导电媒质中的磁扩散·磁屏蔽	259
4.5.4 集肤效应·涡流	266
* 4.6 工程应用示例	273
4.6.1 多股并列导线的组合、换位	274
4.6.2 远场涡流检测技术	278
4.6.3 感应加热	280
习题	284
提要	287
第 5 章 动态电磁场 II : 电磁辐射与电磁波	291
5.1 电磁辐射	291
5.1.1 电偶极子的电磁场	292
5.1.2 近场与远场	292

5.1.3	方向图	294
5.1.4	线天线与天线阵	296
5.1.5	天线的互易性	299
5.1.6	电磁波频谱	300
5.2	理想介质中的均匀平面电磁波	301
5.2.1	波动方程及其解	302
5.2.2	均匀平面电磁波的物理意义	303
5.2.3	波矢量	304
5.3	均匀平面电磁波的反射与透射	306
5.3.1	反射定律与透射定律	306
5.3.2	反射系数与透射系数	308
5.3.3	垂直入射电磁波的反射与透射	310
5.4	琼斯矢量和琼斯矩阵	315
5.4.1	琼斯矢量	315
5.4.2	波的极化	315
5.4.3	琼斯矩阵	318
5.4.4	均匀平面电磁波在各向异性介质中的传播	319
5.5	有损媒质中的均匀平面电磁波	322
5.5.1	波动方程及其解	322
5.5.2	传播系数与波阻抗	323
5.5.3	低损耗介质情况	324
5.5.4	良导体情况	324
5.5.5	电磁屏蔽	326
5.6	导引电磁波	328
5.6.1	均匀传输线	329
5.6.2	平行板波导	331
5.6.3	矩形波导与谐振腔	337
* 5.7	工程应用示例	340
5.7.1	电磁环境与电磁兼容技术	340
5.7.2	生物电磁场	347
5.7.3	感应测井技术	349
5.7.4	探地雷达	350
5.7.5	电场和磁场的光学测量法	352
	习题	356
	提要	358
第 6 章 电磁场数值分析与综合专题导引		364
6.1	电磁场数值分析	364