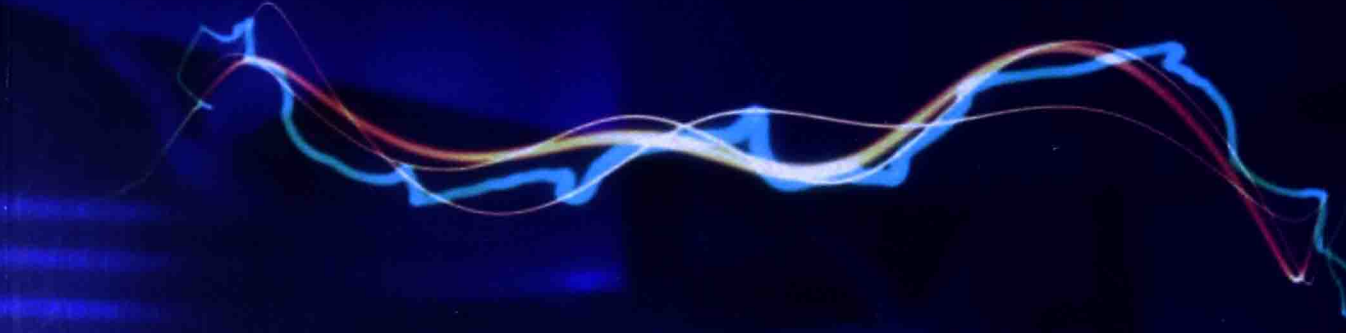
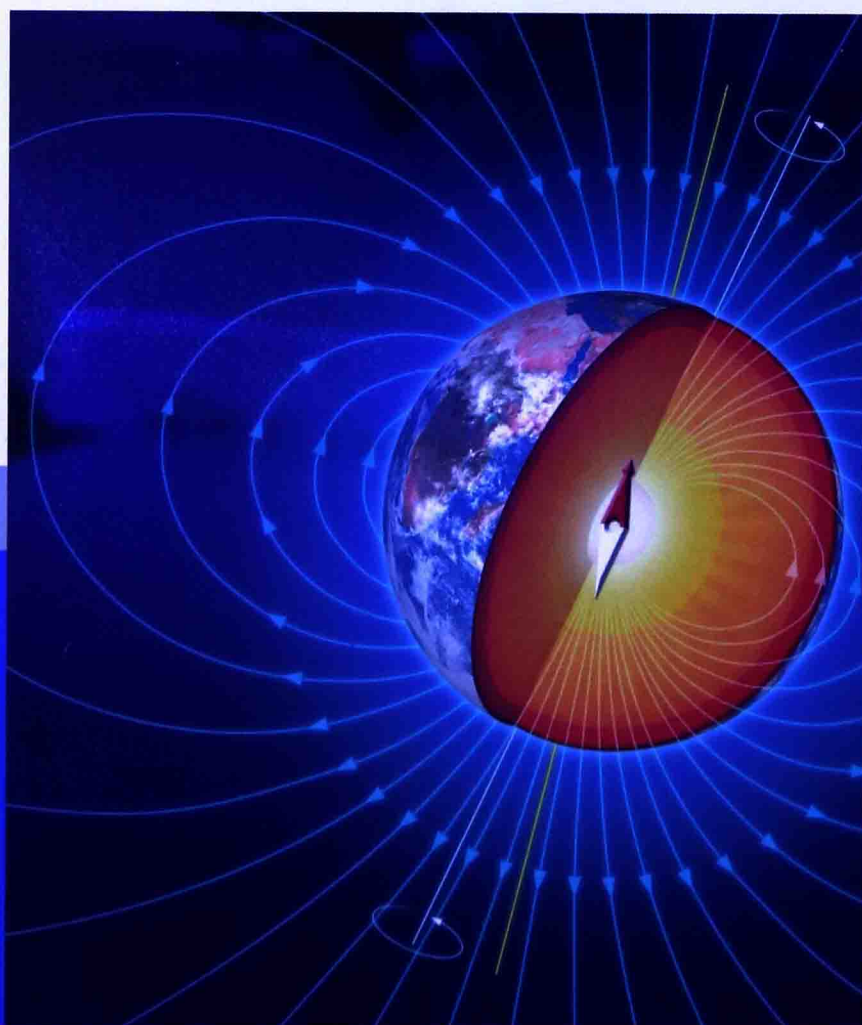




Electromagnetism

电磁学方法论

© 童国平 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

电 磁 学 方 法 论

童国平 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电磁学方法论 / 童国平著. —杭州:浙江大学出版社, 2014. 12

ISBN 978-7-308-14146-8

I. ①电… II. ①童… III. ①电磁学—方法论 IV. ①O441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 284764 号

电磁学方法论

童国平 著

责任编辑 石国华

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州星云光电图文制作有限公司

印 刷 杭州日报报业集团盛元印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 16.5

字 数 420 千

版 印 次 2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-14146-8

定 价 37.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式: 0571-88925591; <http://zjdxcbbs.tmall.com>



童国平 教授，1955年11月28日生于浙江临安，浙江师范大学数理信息学院理论物理硕士点负责人，硕士生导师。1978年浙江师范学院物理教育专业毕业，1982年中山大学进修理论物理，1985年至1987年苏州大学核物理专业研究生班，1989年至1990年复旦大学访问学者，师从孙鑫院士从事导电高聚物的研究工作。长期从事低维凝聚态物理理论的研究工作，已在国内外学术期刊发表学术论文50余篇，其中SCI收录20篇，EI收录7篇。国内外发表教学研究论文19篇。国际合著学术专著3部：*Physics and Applications of Graphene - Theory, New Progress on Graphene Research, Computational Studies New Materials II*；主编《当今物理学前沿问题选讲》教材1部，获得实用新型专利4项。

内容提要

本书根据作者在浙江师范大学多年从教电磁学的教学经验撰写而成。全书选取了22种基本科学方法,分成基本原理、问题构建、问题求解、问题研究以及知识盘点五个模块;每个模块由若干种方法组成,每种方法都给以界定,又以若干范例说明之,易学易懂。本书集实用性、逻辑性、创新性、研究性和能力培养于一体,内容基本涵盖了电磁学的各个方面。

本书可作为理工科大学的本科生自主学习电磁学或普通物理学(电磁学部分)或大学物理(电磁学部分)的参考书,也可供讲授电磁学或普通物理学的教师参考。

前 言

电磁学是物理学专业的基础课程,在物理学中占有重要的地位。随着现代科学技术的飞速发展,它与我们的日常生活之关系也越来越密切。对于物理学专业的学生来说,学好电磁学是必需的。而学生普遍反映,电磁学不大容易学,其困难主要体现在做习题上。从客观而言,学生从力学和热学的直觉或可感知的课程马上转入抽象的课程有些不适应。而从主观来说,由于电磁学的内容与高中学习的内容大致相近,容易造成学习的一种错觉。怎样才能学好电磁学一直是学生关心的一个问题,也是教师时常思考或较为困惑的问题。作者从事电磁学和电动力学的教学30余年,逐渐积累了一些教学资料,多年在脑海中形成了这样一种想法,即为物理学专业的本科学生撰写一本电磁学方法论方面的书,以助学生的自主学习之用。然而,电磁学是一门古老而经典的课程,方法和内容博大精深,选取哪些题材、哪些方法作为支撑却又使作者犯难。经过长期的反复思考与酝酿,决定分模块进行撰写,这才形成了本书的框架。首先,对于基本原理与理论体系中的方法,比如,演绎法、归纳法、例证法、反证法、类比法、模型法、假设法等,这些古老而经典的科学方法在教科书中“隐隐约约”可见,不大容易吸引初学者的眼球,能够注意到其中的只是寥寥无几。其次,与课程内容相配套的习题是为巩固所学原理而设计的“问题”,初学者通过这些“问题”的训练,可以检验自己所学知识点是否已经掌握。实际上,在这些问题的构建与设计中也隐藏着某些方法,例如,形变法、组合法、切割法、旋转法等,这些方法隐藏较深不易引起读者的注意,只有通过收集大量的习题,并给予归纳整理才能初显端倪。再次,习题的求解是初学者最关注的问题,也是教师所注重的。通过做习题不仅可以温习课程中的基本概念和规律,而且能够扩大知识面,灵活运用初等数学和高等数学,从而达到培养自己解决实际问题的能力。这部分内容中出现的方法相对来说是比较显现的,读者比较熟悉,作者收集了若干经常使用且具有代表性的方法,如叠加法、对称法、镜像法、能量法、等效法、补偿法、排除法等,作为第三模块加以论述。除了这些模块以外,作者考虑到对初学者研究能力的培养需要,设计了问题研究方法模块。在这一模块中,作者着重表述怎样以研究问题的眼光去发现电磁学中的问题并加以研究,其中的范例是以论文形式书写的。作者的目的是让初学者通过电磁学的学习尽快学会或掌握问题的研究方法和写作方法,为今后的毕业论文撰写打下一个良好的基础。另一方面,也让初学者知道,电磁学虽是一门经典的课程,但是仍有许多问题等待大家去发现和解决。最后一个板块,涉及的是电磁学知识点的盘点问题。因为初学者不大善于对所学知识的总结与归纳,学完电磁学以后,总觉得知识点一大堆,无从下手复习。在这一模块中,根据电场和磁场的性质和特点,作者采用列表对比法的手段,循着场的概念、场的性质、场的定义、场的规律、场的功和能以及场与物质的相互作用等这样一条路线加以归纳总结。实践表明,这种方法容易被初学者接受,教学中收到了较好的效果。

这本书取名为电磁学方法论,读者乍一看觉得理论性特强,好像不是为初学者而写的,

这也是作者所困惑的地方。作者觉得理论性太强不适合初学者阅读,因此,只注重实用性的一面,主要以范例的形式进行阐述,从而避免理论化。另一方面,以方法论为题的电磁学方面的书籍几乎没有,出版这本书心里有些忐忑不安。这主要是作者学识浅薄很难把握其中的分寸,肯定存在不少不妥或者错误之处,恳请读者提出批评意见。

最后,想说明一下,书中有不少范例中的问题是选自作者多年教学中设计的例题、习题或考试题;也有的范例没有经过教学实践的检验,是首次与大家见面,也有待于读者的检验;还有一些范例是选自作者在国内外发表的教学研究论文。此外,在书后附上了电磁学中较为常用的积分公式、级数和最新的物理常数表以便初学者备查。

童国平

2012 年秋于浙江师范大学丽泽花园

目 录

第 I 部分 基本原理方法模块

第 1 章 演绎法	(3)
1.1 演绎法界定	(3)
1.2 演绎法范例	(4)
1.2.1 电场强度	(4)
1.2.2 介质中的高斯定理	(7)
1.2.3 填充有 n 层同心介质的球形电容器	(9)
1.2.4 电源两端的电压(路端电压)	(11)
1.2.5 有限长直均匀带电细线的电场	(12)
1.2.6 磁感应强度	(14)
1.2.7 电动势	(16)
第 2 章 归纳法	(20)
2.1 归纳法界定	(20)
2.2 归纳法范例	(20)
2.2.1 连续电荷分布的电场	(20)
2.2.2 连续电荷分布的静电能	(21)
2.2.3 静电场的高斯定理	(23)
2.2.4 稳恒磁场的安培环路定理	(24)
第 3 章 例证法	(26)
3.1 例证法界定	(26)
3.2 例证法范例	(26)
3.2.1 电容器的电容	(26)
3.2.2 互感	(29)
3.2.3 自感	(31)
第 4 章 反证法	(34)
4.1 反证法界定	(34)
4.2 反证法范例	(34)
4.2.1 无限长直螺线管的磁场	(34)
4.2.2 无穷大均匀带电平面的电场	(35)
4.2.3 无限长直空心载流圆柱面	(36)

4.2.4	静电势的极值问题	(38)
4.2.5	静电场的唯一性定理	(38)
4.2.6	静电场的电力线不能构成闭合曲线	(39)
4.2.7	均匀带电半球面及其底面是等电势的	(40)
4.2.8	球形螺线管内的磁场是均匀的	(40)
第5章	类比法	(43)
5.1	类比法界定	(43)
5.2	类比法范例	(43)
5.2.1	螺线管中变化磁场所产生的感生电场(涡旋电场)	(43)
5.2.2	静电场的电势	(45)
5.2.3	电容器的充电与电感器的充磁暂态过程	(46)
5.2.4	电路与磁路	(47)
5.2.5	铁电体与铁磁体的类比	(48)
5.2.6	能流密度与电流密度的类比	(49)
5.2.7	旋转带电圆柱面与螺线管的类比	(51)
5.2.8	均匀极化介质球的电场与电偶极子的电场类比	(54)
第6章	模型法	(58)
6.1	模型法界定	(58)
6.2	模型法范例	(59)
6.2.1	电偶极子模型及其应用	(59)
6.2.2	磁偶极子模型及其应用	(62)
第7章	假设法	(64)
7.1	假设法界定	(64)
7.2	假设法范例	(65)
7.2.1	安培的分子电流假设	(65)
7.2.2	麦克斯韦的位移电流假设	(66)

第Ⅱ部分 问题构建方法模块

第8章	形变法	(71)
8.1	形变法界定	(71)
8.2	形变法范例	(71)
8.2.1	长直载流导线的形变	(71)
8.2.2	圆形导线回路的形变	(73)
8.2.3	“飞机型”圆形载流回路的变形	(77)
8.2.4	与长直载流导线共面的圆形回路的变形	(78)
8.2.5	两根平行长直线的变形	(81)
8.2.6	矩形平面的变形	(82)

8.2.7 一根带电细棒的变形	(84)
第9章 组合法	(87)
9.1 组合法界定	(87)
9.2 组合法范例	(87)
9.2.1 点电荷的组合	(87)
9.2.2 长直细线的组合	(88)
9.2.3 导体平板的组合和平面的组合	(90)
9.2.4 导体球(或球面)的组合	(93)
9.2.5 直导线段与导线圆弧的组合	(94)
9.2.6 带电线段与其他带电体的组合	(96)
9.2.7 带电圆环与其他带电体的组合	(98)
9.2.8 载流圆环的组合	(101)
9.2.9 螺线管线圈的组合	(104)
9.2.10 电场与磁场的组合	(106)
9.2.11 电介质的组合	(110)
第10章 切割法	(113)
10.1 切割法界定	(113)
10.2 切割法范例	(113)
10.2.1 球面切割	(113)
10.2.2 圆环切割	(118)
10.2.3 圆锥的切割	(120)
10.2.4 平板的切割	(123)
10.2.5 圆平面与正方平面的切割	(126)
第11章 旋转法	(127)
11.1 旋转法界定	(127)
11.2 旋转法范例	(127)
11.2.1 点电荷的定点转动	(127)
11.2.2 均匀带电体的定轴转动	(128)
11.2.3 导体棒的定点或定轴转动	(131)
11.2.4 线圈的定轴转动	(133)

第Ⅲ部分 问题求解方法模块

第12章 叠加法	(139)
12.1 叠加法界定	(139)
12.2 叠加法范例	(140)
12.2.1 一根带电细棒的电场	(140)
12.2.2 两块平行带电导体平板	(141)

12.2.3	内导体球接地的情况	(142)
12.2.4	有源网络的电流	(143)
第13章	等效法	(145)
13.1	等效法界定	(145)
13.2	等效法范例	(145)
13.2.1	接地导体平面前的点电荷	(145)
13.2.2	均匀磁场中旋转的金属棒	(146)
13.2.3	磁场中金属棒的电动势	(148)
13.2.4	磁场中弧形载流导线的安培力	(149)
13.2.5	等效电压源与等效电流源	(149)
13.2.6	电阻、电容、电感三种网络的 Δ -Y形等效变换	(151)
第14章	对称法	(155)
14.1	对称法界定	(155)
14.2	对称法范例	(156)
14.2.1	无穷正方网络的电阻	(156)
14.2.2	桥式电阻网络	(159)
14.2.3	立方电阻网络	(160)
14.2.4	带电正方形与载流正方形的场分布	(161)
14.2.5	直线电流与圆电流共面的安培力	(164)
14.2.6	圆形线圈在均匀磁场中转动所产生的电动势	(165)
第15章	镜像法	(167)
15.1	镜像法界定	(167)
15.2	镜像法范例	(168)
15.2.1	接地导体球外的点电荷	(168)
15.2.2	内导体球接地的同心导体球系统	(169)
15.2.3	两个相交导体球的电容	(170)
15.2.4	两个接触导体球	(171)
15.2.5	一对点电荷电场中的两个接触导体球	(175)
第16章	补偿法	(178)
16.1	补偿法界定	(178)
16.2	补偿法范例	(178)
16.2.1	均匀带电球的球形缺损(阴阳法)	(178)
16.2.2	均匀带电长直圆柱的柱形缺损(阴阳法)	(180)
16.2.3	均匀载流长直线中的柱形空腔(正反法)	(181)
16.2.4	无限大均匀带电平面上的圆孔	(183)
16.2.5	长直载流导线的中间缺损	(185)
16.2.6	充有两种介质的电容器的电容	(186)
16.2.7	电位差计	(189)

16.2.8 有小缺口的均匀带电圆环	(189)
第 17 章 电容系数与电势系数法	(191)
17.1 电容系数法与电势系数法界定	(191)
17.2 电容系数与电势系数法范例	(191)
17.2.1 内导体球被球壳同心包围的情况	(191)
17.2.2 两块带电的平行导体板	(192)
17.2.3 用导线连接的两个导体球	(194)
第 18 章 能量法	(197)
18.1 能量法界定	(197)
18.2 能量法范例	(197)
18.2.1 内导体球接地的同心导体球组	(197)
18.2.2 电容器的电容	(198)
18.2.3 同轴电缆的自感	(200)
18.2.4 导体的静电平衡	(201)
第 19 章 排除法	(203)
19.1 排除法界定	(203)
19.2 排除法范例	(203)
19.2.1 确定无穷大载流平面的磁场方向	(203)
19.2.2 确定无限长均匀带电线的电场方向	(204)
19.2.3 导体上的感应电荷绝对值小于施感电荷	(205)
19.2.4 确定无限长直螺线管感生电场的方向	(206)

第Ⅳ部分 问题研究方法模块

第 20 章 研究法	(211)
20.1 研究法界定	(211)
20.2 研究法范例	(212)
20.2.1 长直螺线管轴线上的磁场与其截面形状是否有关	(212)
20.2.2 螺线管轴线上磁场的离散模型与连续模型的比较	(214)
第 21 章 实验法	(218)
21.1 实验法界定	(218)
21.2 实验法范例	(218)
21.2.1 利用平板电容器测量海水的电导率	(218)
21.2.2 通过导线电量的测量	(219)
21.2.3 螺线管中磁场的测量	(220)
21.2.4 平行载流导线间的相互作用力测量	(221)
21.2.5 同轴电缆自感的测量	(223)

第 V 部分 知识盘点方法模块

第 22 章 对比法	(227)
22.1 对比法界定	(227)
22.2 静电场与静磁场的对比	(227)
22.2.1 电场和磁场的特点对比	(227)
22.2.2 电场和磁场定义对比	(228)
22.2.3 库仑力与安培力的对比	(228)
22.2.4 电荷与电流激发场之规律的对比	(229)
22.2.5 电场和磁场的方程对比	(231)
22.2.6 电场和磁场的标势描绘对比	(231)
22.2.7 电场和磁场的功和能对比	(232)
22.2.8 静止电荷与匀速运动电荷的对比	(233)
22.3 电场和磁场与物质相互作用的对比	(234)
22.3.1 电场和磁场与导体的相互作用	(234)
22.3.2 电容和电感(自感或互感)的对比	(234)
22.3.3 电介质与磁介质的对比	(236)
22.3.4 电路与磁路对比	(238)
22.3.5 电源电动势与感应电动势的对比	(239)
22.4 非静态场	(240)
22.4.1 与时间有关的电场与磁场对比	(240)
22.4.2 电流密度与能流密度的对比	(242)
参考文献	(243)
附录 A 电磁学中常用积分公式	(244)
附录 B 常用函数的级数展开式	(248)
附录 C 基本物理常量表(2006)	(250)

第 I 部分

基本原理方法模块

电磁学的基本原理与理论体系是经过长期的科学实验检验和科学逻辑演绎所得到的,它是前人集体智慧的结晶。电磁学的内容丰富、逻辑性强并与现代科学技术和日常生活息息相关。在这一理论体系中,逻辑演绎过程始终贯穿全过程,其中演绎法、归纳法、例证法、反证法、类比法、模型法等是课程中常用的一些科学方法。初学者往往只注意知识点的理解和运用的学习,而忽视或不清楚这些论述的方法,其后果是所学到的知识是肤浅的或“一知半解的”。另一方面,电磁学是一门基础性很强的课程,物理专业或非物理专业的学生都应该牢固掌握,就像游泳运动员一样,要想获得好的游泳成绩,就要平时进行各项体能训练。在这一部分中论述这些较为古老的方法,其动机之一是将这些“古老”的科学方法从“后台”走向“前台”,凸现这些方法在电磁学的地位和作用;其动机之二是使读者对这些科学方法引起足够的重视或注意,丰富学习内容,并能在实际中加以运用,提高电磁学学习的“附加值”。初学者不要忽视这些逻辑的论述过程,因为这些内容是电磁学理论不可或缺的一部分。

值得指出的是,由于电磁学的基本原理部分蕴涵着众多的科学方法,除了本模块中列举的几种方法以外,还有平移法、数学方法等都是常见的科学方法,在此不再一一论述。

第1章 演绎法

电磁学的基本理论体系是建立在库仑定律、毕奥—萨伐尔定律和法拉第电磁感应定律这三大实验定律基础上的。整个理论体系逻辑推理严密,演绎过程遵循一般到特殊或特殊到一般的原则。逻辑是一种思维规律,而逻辑学是关于思维规律的学说,它由亚里士多德创立。逻辑学的发展经历了传统逻辑(形式逻辑)和辩证逻辑两大阶段。辩证逻辑又发展为矛盾逻辑和对称逻辑两大分支。对称逻辑是逻辑学发展的最新成果,是辩证逻辑发展的高级阶段,也是逻辑学发展的最高阶段。对称逻辑学就是对称逻辑的概念、范畴与范畴体系,由我国著名学者陈世清创立。在这一章中,我们通过几个范例来阐明这种演绎的逻辑推理过程,以便读者加深对电磁学概念和规律的认识和理解。

1.1 演绎法界定

演绎(deduce)这个词作名词其基本意思是:一种推理方法,由一般原理推出关于特殊情况下的结论。

三段论(syllogism)就是演绎的一种形式,是传统逻辑中的一类主要推理,又称直言三段论。古希腊哲学家亚里士多德首先提出了关于三段论的系统理论。

三段论包含大前提、小前提和结论。大前提是一般事理;小前提是论证的个别事物;结论就是论点。对三段论推理过程的表述可以灵活处理,有时省略大前提,有时省略小前提。一个正确的三段论仅有三个词项,其中联系大小前提的词项叫中项;出现在大前提中,又在结论中做谓项的词项叫大项;出现在小前提中,又在结论中做主项的词项叫小项。

所谓演绎法(deduction)或称演绎推理(deductive reasoning)是指人们以一定的反映客观规律的理论认识为依据,从服从该认识的已知部分推知事物的未知部分的逻辑推理方法,由一般原理推出关于特殊情况下的结论,即从一般到特殊的思想推理方法。因此,演绎法也可称之为认识“隐性”知识的方法。

演绎法的特点是:(1)前提的一般性知识和结论的个别性知识之间具有必然的联系,结论蕴含在前提中,没超出前提知识范围;(2)结论是否正确,既取决于作为出发点的一般性知识是否正确反映客观事物的本质,又取决于前提和结论之间是否正确地反映事物之间的联系。如果前提是经过实践检验的正确反映事物本质的普遍原理或公理,演绎过程中又遵循了逻辑规则,那得出的结论可靠;(3)思维运动方向是由一般到个别,由抽象到具体,即演绎的前提是一般性知识,是抽象性的,而它的结论却是个别性知识,是具体的。

演绎法可分为公理演绎法、假设演绎法、定律演绎法和理论演绎法。公理演绎法的特点是大前提是依据公理(或公设)进行推理;假说演绎的特点是以假说作为推理的大前提;定律演绎是以某个定律或某种规律作为大前提的演绎法,而作为演绎推理前提的规律包括有两类:一类是经验规律,另一类是普遍规律;理论演绎法是以某一理论作为大前提,在该理论范围内的确切事实为小前提的演绎。

演绎推理方法是一种最基本的逻辑推理方法,几乎贯穿整个电磁学中,它不仅适用于电

磁学规律的演绎推理,而且也适用于物理学其他各分支学科以及非物理学科。

1.2 演绎法范例

1.2.1 电场强度

由库仑定律演绎出电场强度的过程是属于实验定律演绎过程。大前提是两个点电荷之间的作用力即库仑定律(一般性),小前提是单位电荷受到的力(特殊性),结论是电场强度。这个演绎过程是从实验定律出发而获得电场强度的结论,可谓之定律演绎法。三段论的框架结构如图 1-1 所示。

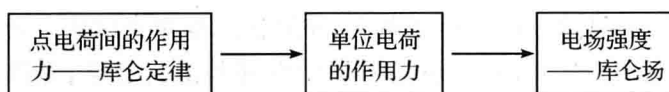


图 1-1 三段论的框架

所有的静电学都基于两个基本原理:库仑定律(Coulomb's law)和叠加原理(principle of superposition)。库仑定律直接建立于实验基础上,是描写两个点电荷(point charge)相互作用力的表达式。点电荷 q_2 对 q_1 的作用力为(参见图 1-2(a))

$$\mathbf{F}_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (1.1)$$

式中, r 是两个点电荷之间的距离, $\hat{\mathbf{r}}$ 是由 q_2 指向 q_1 的单位矢量。两电荷同号为排斥力,异号为吸引力。如果 q_1 是一个单位点电荷($q_1 = 1$),即作用于单位点电荷的力是

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{F}_1 (q_1 = 1) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (1.2)$$

这里用符号 $\mathbf{E}_1$ 来表示单位电荷的力(特殊),以示区别于一般情况的库仑力。上式表明,作用于单位电荷 q_1 的力是由电荷 q_2 实施的。此式等价于

$$\mathbf{E}_1 = \frac{\mathbf{F}_1}{q_1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (1.3)$$

因此,电荷 q_0 (试探电荷) 受到的“单位电量的力”可表示为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} \quad (1.4)$$

我们把这个“单位电量力”称之为电场强度(electric field intensity),这就是电场强度的定义式。由于力 $\mathbf{F}$ 是一个矢量,因而 $\mathbf{E}$ 也是个矢量,且是空间位置的函数,故又称为矢量场(vector field),它完全保留了力 $\mathbf{F}$ 的所有特征(比如:矢量性、叠加性等)。电场强度的方向与该点正电荷的受力方向相同,电场强度的单位是 $\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$ 。

据此,一个点电荷 q 的电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (1.5)$$

如果许多电荷集中在一个非常小的空间区域内(比如,原子核中的质子),可视为这些电荷产生的电场强度是相同的,于是,上式可改写为微分式

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (1.6)$$

上式是库仑定律在特殊情况下得到的,因此,(1.6) 或(1.5) 式常称之为库仑场(Coulomb field),也可叫作“库仑定律”。原则上,由(1.6) 式可计算任意带电体的电场强度,因而在这里