

电 动 力 学

教 学 指 导

张维坝
虞炎华 主编
忻正大



西安交通大学出版社

电动力学教学指导

张维垣 虞炎华 忻正大 主编

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书是以吴寿煌、丁士章主编的《电动力学》为教材的教学参考书，对使用其它电动力学教材的师生也有相当的参考价值。

全书包括电磁场的一般规律，静电场，静磁场，电磁场的辐射、传播，狭义相对论，带电粒子和电磁场的相互作用等七章。每章包括教材分析、例题分析和习题指导三个部分。

本书可作为综合性大学、理工科大学和师范院校物理类各专业的教学参考书。

电 动 力 学 教 学 指 导

张维坝 虞炎华 忻正大 主编

责任编辑 李亚东

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安电子科技大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/32 印张 9.25 插页 2 字数：194 千字

1990年5月第1版 1990年5月第1次印刷

印数：1—2000

ISBN7—5605—0302-0/O·56 定价：1.95 元

序

电动力学是一门很重要，而又比较难教难学的课程。各种教材限于篇幅及体例，难以对教材难点或学生学习中发生疑难之处详加讨论分析，师生们迫切希望出版一本适用的教学指导书，成为他们教好学好电动力学课程的良好益友。

据我们所知，本书是国内第一次成功编写的电动力学教学指导书，编者总结了他们多年的教学经验，对基本概念和定律作了较深刻的分析，对教材各章节的内在联系作了详尽的阐述，对学生在掌握理论或解答习题时容易发生的疑难问题也作了明确的回答。特别是：本书对我们主编的《电动力学》(西安交通大学出版社)教材中的某些地方进行了适当补充，使教学内容更加完整，因此，本书不仅是与主要教材配套使用的辅助性教材，本身也具有独立存在的价值，是教材建设工作中的一项新成果。我们在这里向从事电动力学(包括工科电磁场理论)教、学的师生郑重推荐这本书。

吴寿镠 丁士章

1989年10月

编 者 的 话

本书是以吴寿镠、丁士章主编的《电动力学》为教材(以下简称“教材”)的教学参考书。由于电动力学这门学科发展得已相当成熟,内容与框架已基本定型,不同教材虽各具特色,但它们在基本方面都是相通的,因而本书对使用其它电动力学教材的师生们也不失其参考价值。

本书共分七章,与教材中的章次相对应,每章内容包括:教材分析、例题分析与习题指导三个部分。教材分析中包括各章教材的知识结构和研究方法,教材重点内容的加深与拓宽,教材难点的处理方法。例题分析中包括对常见习题类型的概括,每种类型题的解题思路、方法与技巧,尽量做到一题多解和一法多用。习题指导部分对教材中难度较大的习题(B组)进行提示,帮助学生掌握方法,克服困难,但并不代替他们解题。本书的导言是一篇有关电动力学学习方法的论述,对初学者如何学好电动力学提出了指导性意见。

本书的编委是(按姓氏笔划为序):丁士章、毛镇山、王勤诚、许庆琳、忻正大、吴寿镠、李英华、宋福、陈琪兮、张维坝、俞文光、虞炎华。在分工编写的基础上,于1989年5月在芜湖集体统稿,最后由张维坝、虞炎华、忻正大负责定稿,吴寿镠、丁士章负责审稿,宋福参加了定稿的具体工作。

由于编者水平有限,本书的缺点与错误在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

1989年7月

目 录

序

导言——谈谈如何学好电动力学

第一章 电动力学基本方程

- 一 教材分析 (10)
- 二 例题分析 (30)
- 三 习题指导 (43)

第二章 静电场

- 一 教材分析 (46)
- 二 例题分析 (71)
- 三 习题指导 (84)

第三章 静磁场

- 一 教材分析 (103)
- 二 例题分析 (116)
- 三 习题指导 (134)

第四章 电磁波的辐射

- 一 教材分析 (146)
- 二 例题分析 (160)
- 三 习题指导 (175)

第五章 电磁波的传播

- 一 教材分析 (184)
- 二 例题分析 (200)

三	习题指导	(209)
第六章	狭义相对论	
一	教材分析	(214)
二	例题分析	(239)
三	习题指导	(252)
第七章	带电粒子和电磁场的相互作用	
一	教材分析	(259)
二	例题分析	(275)
三	习题指导	(282)

导 言

——谈谈如何学好电动力学

“电动力学难学”是大学物理专业学生的普遍反映，因为学生从普通物理电磁学的学习进入电动力学的学习要跨上一个不小的台阶，两者在思维方法、数学工具及习题难度等方面都有明显的变化。不少学生由于学习方法的不适应，不能很好地掌握这门课程并用来解决实际电磁场问题，使得教学效果不够理想。如何解决好这个教学难题，使学生掌握正确的学习方法，从而提高这门课程的教学质量，是广大物理专业的学生和从事电动力学教学的老师们所关心的问题，下面就此问题谈几点意见。

一 明确电动力学的地位

物理学是研究物质结构和相互作用以及物质运动规律的科学。物质的结构按线度大小可分为微观领域的原子、原子核与“基本”粒子，宏观领域的各类物体和宇观领域中的各种天体；从表现形式上又可分为实物与场（引力场、电磁场、强弱相互作用场）。物质最基本、最普遍的运动形式包括机械运动、热运动、电磁运动以及微观粒子的运动等。以上这些都是物理学的研究对象和内容。根据不同的研究对象和内容，物理学目前可包括五种较成熟的基本理论，即经典力学、热力学与统计物理、经典电磁场理论、相对论和量子力学。前

两种主要适用于物质处在宏观低速($v \ll c$)运动的情况,第三、四种主要适用于物质处于宏观高速($v \rightarrow c$ 或 $v = c$)运动的情况,第五种主要适用于物质处在微观低速运动的情况,建立在这几种基本理论基础上的量子场论研究的是物质处于微观高速状态下的规律,目前正在发展之中。五种基本理论中以第一种发展最早,在17世纪末已趋成熟,第二、三种均于19世纪后半叶趋于成熟,第四、五种发展较晚,都是在20世纪初才提出来的,然而发展很迅速,成为现代物理学的两大支柱。经典电磁场理论研究的是物质的电结构和电磁相互作用以及电磁场的运动规律,它在整个物理学中占有重要的地位。

物理学的发展对科学技术以及人类社会的进步起着重要的推动作用。经典力学和热力学推动了热机与机械工业的发展,引起了第一次工业革命;经典电磁场理论推动了电机和无线电电讯工程的发展,使人类进入了应用电能的时代,这就是第三次工业革命;相对论和量子力学加深了对原子、原子核的认识,在此基础上人类社会进入了原子能以及其它许多新技术(如计算机)的时代。相信今后物理学的进一步发展将会给人类社会带来更巨大的影响。

以上我们将经典电磁场理论放在整个物理学中做了概括的论述,目的是为了使学生对它的地位和意义有一个恰当的认识,避免过份强调本学科的作用,造成“只见树木,不见森林”的错觉。

二 明确电动力学的知识结构和逻辑体系

普通物理电磁学是电动力学的先修课程,它更偏重于实

验方面，从电磁现象的观察与实验中提出电磁场的一些基本概念，总结出实验定律，由实验定律在特殊条件下导出个别类型场（静态场、似稳场）的积分形式的场方程，最后归纳出麦克斯韦方程组的积分形式。它的逻辑体系是，实验-定律-理论，是一种以归纳法为主线的知识结构。由于积分形式的场方程只能从一个空间区域的整体上对电磁场进行总体的描述，一般说是不能够逐点地确定场的空间分布的，只有借助于某些场的特殊对称性才能解出这些场的空间局域分布。因此，电磁学的应用是有限的，只能解决一些简单电磁场问题。

电动力学是电磁学的后继课程，它属于理论物理范畴，是以麦克斯韦方程组（包括积分形式和微分形式）、洛伦兹力公式和物质的电磁性质方程为出发点，分别讨论在静态（ $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ ）、时变态（ $\frac{\partial}{\partial t} \neq 0$ ）、含源区（ $\rho \neq 0, j \neq 0$ ）、自由空间（ $\epsilon = \epsilon_0, \rho = j = 0$ ）、介质内部与表面处（包括导体与绝缘体）、有界空间（以导体为边界）等不同条件下电磁场的空间分布和运动变化的规律。其逻辑体系是以演绎法为主线的。电动力学应用了较复杂的数学工具解电磁场的微分方程，因而能够相当精确地描绘出较复杂的电磁场在空间中的局域分布与变化情况，因此电动力学在电力与电讯工程技术中有重要的实际应用。

电动力学的知识结构中还包括了狭义相对论基础，一方面是由于狭义相对论的发展历史与电动力学有不可分割的联系，另一方面，狭义相对论使电动力学继续得到发展，成为相对论电动力学。

在国内外，有些电动力学书的逻辑体系与上述不同。其

中一类是以归纳法和演绎法并重，先详细讨论静态场与似稳场，然后用归纳法得出麦克斯韦方程组，以后就用演绎法讨论电磁波的辐射、传播等问题；第二类是以静电场为起点，应用狭义相对论对库仑力进行洛伦兹变换，从中引出磁场的概念，导出磁场的场方程，继续推出麦克斯韦方程组，然后讨论辐射、传播等问题，基本逻辑体系仍属于演绎法范畴；此外，还有采用“逐步公理法”的逻辑体系，它以矢量场的亥姆霍兹定理为核心，对每种具体电磁场，根据实验规律对该场的源和“涡源”提出假设（即公理），然后对每种场做深入地研究，这也是一种以演绎法为主的逻辑体系；还有人采用分析力学方法，引入电磁场的拉格朗日函数，导出电磁场的基本规律等。

著名心理学家布鲁纳认为：“不论我们选教什么学科，务必使学生理解该学科的基本结构”，“课程的中心是学习学科的基本结构”，“学生的学习就是认知结构的重新组织，学生原有的认知结构与所学课程的新知识结构相互作用，使学生原有的认知结构发生同化和顺应，在达到新的平衡时便建立了新的认知结构”。“这个过程叫做 认知结构的迁移。”*学生在学完电磁学的基础上进入电动力学的学习时，一定要注意两者知识结构的差异，努力去顺应后者，以减少迁移过程中的障碍。

三 注意学习电动力学的研究方法

大学物理教学有一条十分重要的教学原则，就是知识掌

* 引自“现代认知派的教学论”，丁栅，《外国教育动态》，1985年第1期。

握和能力培养相结合的原则。能力包含许多种,但其中最重要的能力是物理思维能力,它是现代高级科技人员应具备的一种富有潜力的能力。培养物理思维能力就是要学会研究物理学的科学方法,像一名物理学家那样去思考,以便在将来有能力加入获取新物理知识的探索者的行列。

电动力学的研究方法有很多种,我们就主要几种做些简要论述:

1 归纳法

根据有限的、特殊条件下的实验结果和规律,归纳出在一般情况下的普遍规律。由于总是不完全归纳,所以其结论可能是对的(经得起新实验的检验),也可能是错的(经不起多数实验的检验),还可能是不完全的(被许多实验证实,但有个别例外),就需要进一步修正结论,从而得出新结论。用归纳法得出的结论实际上是猜出来的,谁猜的本领高,谁就能发现真理,这里面包含了科学家天才的想象力与严密的理论思维能力。麦克斯韦方程组的得出就是运用归纳法的光辉范例,它不是对静态场与似稳场的简单归纳,麦克斯韦在归纳过程中提出的两个假说(涡旋电场和位移电流)就体现了他的天才想像力和逻辑思维能力。洛伦兹力公式是洛伦兹运用归纳法将静电力和静磁力两个公式推广到适用一般电磁场的电磁力公式。这个公式经受住了无数次实验检验,没有一个反例,因此可以相信它反映了客观真理。

2 演绎法

全部理论建立在尽可能少的几个出发点之上,把它们作为基石,然后运用严密的逻辑推理和准确的数学推演,建立起完整的理论体系。演绎过程可将我们的认识从基本出发点

引到很遥远的地方,从而大大开拓了眼界,同时也使得基本理论在许多具体的工程技术领域内得到实际的应用。电动力学是如此(这一点在“二”中已做论述),狭义相对论更是如此,它的全部理论只建立在两条基本假设上(相对性原理和光速不变原理),通过缜密的逻辑推理和运用四维时空张量的推演,得出了震惊世界的相对论时空理论、相对论力学和相对论电动力学等。演绎法中,出发点的提出是有创造性的,只要这个前提是对的,那么通过严密地逻辑推理和准确的数学推演所得的结论就是正确的。

3 类比法

这是一种常用的推理方法,由于两个物理对象的内部属性中有某些相似之处,便推论它们的另外一些属性也可能相似。类比法的逻辑不同于归纳法(由特殊到一般),也不同于演绎法(由一般到特殊),而是从特殊性推出另外的特殊性,这种推论不受已有知识的限制,也不受特殊事物的数量限制,它凭的是直觉、预感和猜测,因而最富于创造性,但同时它的可靠性也较差。电动力学中运用类比法的例子有:静电力的平方反比律就是首先由普里斯特利在1767年用类比法提出来的,他观察了软木球在带电金属杯中不受电力作用的现象,联想到质量均匀的球壳对其内部物体的万有引力为零的类似现象,他说:“难道我们就不可以认为电的吸引力遵从与万有引力相同的规律,即具有与距离平方成正比的规律吗?”,8年后库仑用扭秤实验证实了这一点;麦克斯韦于1855年在“论法拉第的力线”一文中,将电磁规律与流体力学进行类比,认为电磁场与流速场相似,力线好比不可压缩流体的流线,把场强比做流速, $\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}$ 与 $\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$ 比做流量,以

后又提出电磁场也具有与流体类似的涡旋性等；许多物理学家(包括麦克斯韦本人)将电磁波与机械波类比，推论应存在有传播电磁波的媒质——以太，实验证明这个类比法的结论是错的；又有许多物理学家将磁场与电场作类比，由于电荷是电场的源，推论也应存在产生磁场的源——磁单极，这个结论至今未被证实，但是它仍然吸引物理学家们朝这个方向继续不断地探索。

4 理想模型

电动力学中用到的理想模型是不少的，为什么要用这些模型？主要因为它们具有如下特点：

(1) 简单性。物理现象很复杂，很难一下解释清楚，因此物理学家常用分析方法把研究对象分解成几个简单的部分，对这些简单部分建立模型，通过对模型的研究建立基本规律，最后用综合方法将这些简单部分复合起来得出总的结果。比如研究一个带电体的场，把带电体看成由点电荷组成的，根据点电荷的场和迭加原理得出带电体的场，“点电荷”就是理想模型，我们常把各种带电粒子看做点电荷。

(2) 形象性。当研究物质的微观电结构对宏观电磁现象的影响时，或研究看不见、摸不着的场时，通过建立理想模型把微观的东西宏观化，抽象的东西形象化，从而使人们得到比较直观的认识以便于理解。原子的核模型，介质的分子偶极子模型，散射与吸收的振子模型，场的力线模型等都能起到这种直观的作用。

(3) 近似性。理想模型突出了物理对象的主要因素，忽略其次要因素，因而利用模型得出的结论是近似的。对小范围的电荷分布采取多极矩模型，一般情况下只注意由零极矩

到四极矩这 3 项，八极矩及其以上更高阶的项被忽略了，因而这种电荷分布的势与场只有这 3 项势和场的叠加，是一种近似解。需要指出，一旦夸大了理想模型的近似性，会使我们脱离真实世界，从而使认识陷入困境。例如电子的点模型使它的自能和电磁质量为无穷大，这是经典电动力学无法解决的困难。

5 数学语言

物理学是定量的科学。数学是物理学的语言，即用数学来描述物理现象与物理过程，用数学进行物理思维和逻辑推理，并用数学表达物理学的全部理论。整个电动力学可以归结为几个数学方程式，特别是在相对论电动力学中能用极少数的张量方程将电磁场规律表达得极其简炼完美，令人惊叹不已。电动力学所用的数学语言主要是矢量分析与场论、偏微分方程与特殊函数、张量代数与分析等。

四 树立严谨的学习态度和刻苦的学习作风

电动力学比电磁学难学得多，主要体现在思维抽象、习题难解上。为此，在学习时要注意掌握好概念、原理、结构和方法，这些在听课、阅读、复习、小结和总复习时都要注意做到，既见树木，更见森林。要在数学与物理的结合上下硬功夫，培养物理与数学间相互“翻译”的能力，能熟练地运用数学独立地对教材内容进行推导，并明确它们的物理意义和物理图象。对例题要认真钻研，弄清例题的各种类型及其基本解法，然后自己再重做一遍。做习题时尽量做到“一题多解”和“一法多用”。演题决不能抄袭，实在做不出来可看看题解，看懂后再独立重做，最后认真总结自己的薄弱环节，掌

握所学到的方法。

在学习电动力学过程中，结合教材阅读本书，会使思路更清晰，知识结构更明确，研究方法更条理，解起题来更容易。这就是本书力求达到的目的。

总之，学习电动力学是一个艰苦的过程，只有“衣带渐宽终不悔”的精神，才能做到“独上高楼，望断天涯路”，站得高，看得远，当你一旦掌握了这门课程并学会了研究它的科学方法时，便会产生“众里寻他千百度，蓦然回首，那人却在灯火阑珊处”的那种发自内心的喜悦。

第一章 电动力学基本方程

一 教材分析

电动力学基本方程(即麦克斯韦方程组、介质的状态方程及洛伦兹力公式)全面地总结了电磁场的属性、运动规律以及电磁场与带电物质之间的相互作用。利用它,原则上可以解决各种宏观电磁场问题。本章的主要任务就是从电磁现象的实验定律出发,进行总结、概括、推广和提高,得到电动力学基本方程,为以后的学习奠定基础。

学习本章应理解作为出发点的电磁现象实验定律,熟练掌握电动力学基本方程,并应学会在对各种定律、方程的总结归纳过程中所运用的科学方法。

1 矢量场的亥姆霍兹定理

由于电磁场是矢量场,所以为帮助读者深入了解电磁场问题的讨论方法,先介绍一下关于矢量场的亥姆霍兹定理,作为对一般电动力学教材的补充。

亥姆霍兹定理告诉我们:在空间有限区域 τ 内的任一个矢量场 $\mathbf{F}$,由它的散度、旋度和边界条件(即限定体积 τ 的闭合面 S' 上的矢量场分布)唯一地确定。因而 $\mathbf{F}$ 可表示成一个无旋场($\mathbf{F}_1 = -\nabla\phi$)和一个无源场($\mathbf{F}_2 = \nabla \times \mathbf{A}$)之和。

即
$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 = -\nabla\phi + \nabla \times \mathbf{A}$$