



中学物理教师用书



电磁场与电磁波

张维善

北京教育出版社

电 磁 场 与 电 磁 波

张 维 善

北京教育出版社

内 容 提 要

本书是《中学物理教师用书》中的一种，内容分四部分：一、电磁场理论，二、电磁场理论与电路理论的关系，三、电磁理论中的参考系，四、电磁波。本书逐步深入地揭示了电磁场的规律，运用电磁场理论剖析了电路理论，并讲述了电磁波知识。

电磁场与电磁波

diàncíchǎng yǔ diàncíbō

张 维 善

*

北 京 教 育 出 版 社 出 版

(北京北三环中路6号)

新华书店北京发行所发行

北京市顺义永利印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 5.5印张 119,000字

1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷

印数：1—3,600

ISBN 7-5303-0022-9/G·17

书号：7327·30 定价：1.00元

编 者 的 话

中学物理教学的不断发展和改革,对广大物理教师在业务上提出了新的要求。为了帮助教师深入理解物理学基础理论的主要内容,以便高屋建瓴地驾驭教材,我们编写了这套《中学物理教师用书》。

这套丛书按照全日制重点中学教材系统选题,每个选题自成系统,分册出版(书目见后)。每一分册基本上与中学物理课本的一章相对应。这套书不是供教师直接用于讲课的教学参考资料。它是从普通物理的高度或运用理论物理的观点,对中学物理中重要概念、规律的来龙去脉以及与有关知识的联系,进行较系统的分析和阐述,把高等师范院校物理课与中学物理课的知识加以沟通。书中对中学物理教师在教学中遇到的学生难于理解、掌握的内容和常见的错误,进行了深入的分析。为了开阔教师思路,本套书也适当提供了一些与基本概念、规律、方法有关的物理学史资料;对中学物理课所涉及的物理学内容至今的发展状况以及近代物理知识,也做了一些介绍。

这套书是应广大中学物理教师的要求而写的。在确定选题、制定编写方针的过程中,北京师范大学的阎金铎同志、北京15中学的周誉蔼同志和北京师范学院的乔际平同志提了许多有益的建议,做了很多工作。本套书各册的提纲都是经王天谔、王杏村、申先甲、乔际平、周誉蔼、张维善、

唐树德、常利、钱玄、梁敬纯、阎金铎、缪秉成、魏凤文等同志集体讨论确定的。

我们希望这套书能够对中学物理教师进修提高和钻研教材都有用处。但由于我们的水平所限，很难如愿。盼望广大中学物理教师在使用中提出宝贵意见。

一九八五年十二月

前 言

电磁现象是自然界的重要现象之一，它的运动规律在人类进一步认识和改造世界的过程中起着重要而广泛的作用。因此，在中学物理教材中，电磁学的知识也占了很大的篇幅，而且涉及了电磁理论的众多领域。

但是，由于电磁理论是一幢巨大而复杂的“建筑”，它的各个部分都有密切的联系，彼此相辅相成，因而就出现了这样的局面：一方面许多问题难于在中学教材中讲深讲透；另一方面又不可能将它们断然割舍。这样，无论在学生的学习中，还是在教师们的讲授中，就经常出现一些疑难和需要进一步研究和讨论的问题。

其中，有的问题涉及电磁理论建立的历史渊源和前辈物理学家的思考及其根据。例如，一般都知道，与牛顿定律及其数学方程在力学中的地位一样，麦克斯韦方程组是电磁理论的核心与基础。然而，麦克斯韦方程组是怎样建立起来的？各个方程的物理意义又该如何理解？在头脑中却不象牛顿定律那样清晰。

另外有些问题涉及电磁现象的本质。例如，无论是在历史上的研究中，还是在当前的实际教学上，都是把电路理论和电磁场理论分开来的。但是，它们之间有什么联系与区别，哪个理论才真正揭示了电磁现象的本质呢？

还有一些问题，乍看起来似乎非常简单，但真要给予正

确而清楚的答案，却绝非易事。例如，在讲完点电荷激发的静电场是球对称的分布之后，有的学生会问：一个运动的点电荷将激发怎样的电场？在观察了两条平行且载有同向电流的导线互相吸引之后，有的学生会问：两个同向等速运动的同号电荷会不会在运动过程中逐渐靠拢？它们之间的磁场力怎样计算？电场力怎样计算？哪一个大，哪一个小？在计算电场力时，库仑定律还能不能应用？等等。这些问题都涉及电磁学中的参照系问题。在描述机械运动时，必须选择参照系，并在必要时进行参照系之间的变换，这是人们所熟知的。其实，在电磁理论中，参照系问题更有其特殊的重要意义。

除上述之外，关于电磁波的理解也存在一系列问题。例如，一个LC振荡电路中，电场和磁场的相位差为 $\pi/2$ ，但它辐射出的电磁波中，为什么电场和磁场却是同相位了呢？等等。

本书试图以电磁理论研究与发展中的重大事件为背景，对上述种种问题尽可能地予以深入浅出的阐述，并给出较为清晰的物理图象。但必须申明，这绝不意味着本书会是一本轻松的读物。因为，要准确地解答上述问题，不可避免地要用到一些高等数学知识。近七、八年来，本人一方面进行大学物理课程的教学；另一方面又从事中学物理教学的研究。这种经历使我深深感到，必要的高等数学知识对于中学物理教师的进一步提高是至关重要的。因为在某种意义上可以说，数学是读懂物理学的语言。美籍俄国物理学家伽莫夫曾经说过：“在解决自然之谜的努力中，物理学家往往要求助于纯数学，并且在许多情况下得到了它的帮助”。当代著名英国物理学家狄拉克也曾写道：“数学是特别适合于处理任何种类的抽象概念的工具，在这个领域内，它的力量是有限。

制的。正因为这个缘故，关于新物理学的书如果不是纯粹描述实验工作的，就必须基本上是数学性的。”尽管如此，我们还是应该更重视借助于数学形式而掌握住物理思想和概念。所以，在本书中，我们始终把物理内容放在首位，并尽可能地考察所用到的数学形式的物理意义。

为了提高中学物理教学质量，还有大量问题需要探讨与研究。本书所提出的问题可以说只是九牛中之一毛，而且很可能会有论述错讹与不同之处，恳请读者指教。

作者 于北京教育学院 1985.12

目 录

一、电磁场理论	1'
(一) 概述	1
(二) 麦克斯韦方程组与洛伦兹力公式	6
1. 麦克斯韦第一方程式	6
2. 麦克斯韦第二方程式	27
3. 麦克斯韦第三方程式	33
4. 麦克斯韦第四方程式	44
5. 麦克斯韦方程式的微分形式	53
6. 洛伦兹力公式	58
(三) 电磁场的能量和能流	59
1. 电磁场的能量 能量密度	59
2. 电磁场的能流 能流密度	64
二、电磁场理论与电路理论的关系	67
(一) 概述	67
(二) 从静电场到稳恒电场	68
1. 电源的静电场	68
2. 稳恒电场的建立	69
3. 稳恒情况下, 导线内电场强度的方向	75
4. 稳恒情况下, 电路上电荷的分布	76
(三) 电路定律的理论基础	82
1. 欧姆定律	82
2. 焦耳定律	84

3. 全电路欧姆定律	86
(四) 稳恒电路中能量的传输与转化	88
1. 电源不直接向导线提供能量	89
2. 能量是怎样输入导线的	90
3. 整体情况的综述	91
4. 能量的转化	93
(五) 电路理论的局限性与似稳条件	94
三、电磁理论中的参照系	98
(一) 概述	98
(二) 伽里略变换与洛仑兹变换	101
1. 经典时空观与伽里略变换	101
2. 洛仑兹变换与相对论时空观	106
(三) 物理量的变换	120
1. 洛仑兹变换的四维形式	120
2. 物理量的分类与变换	122
(四) 电磁场量的变换	127
1. 电磁场量变换的一般形式	127
2. 匀速运动点电荷的电磁场	130
3. 同向等速运动着的两个点电荷的受力问题	136
四、电磁波	140
(一) 被埋没了的预言	140
(二) 电磁波的论证	141
1. 超越法拉第的思维	141
2. 电磁波的数学论证	144
3. 电磁波的实验验证	147
(三) 电磁波的辐射	150
1. LC 电路与偶极振子	150

2. 偶极振子辐射电磁波的描述	154
3. 偶极振子辐射电磁波的计算	157
(四) 电磁波谱	160

一、电磁场理论

(一) 概 述

人类对电现象和磁现象的了解和观察可以追溯到十分遥远的古代，但是真正对它们进行比较系统的研究却是从十六世纪下半叶才开始的。当时，英国女王伊丽莎白一世的私人医生吉尔伯特仔细地研究了磁的相互作用，并且在《论磁》一书中记述了他的研究结果，描绘了磁石的所有基本性质。然而，他的全部研究都还是定性的。只是到了十七世纪，特别是从十八世纪起，由于社会生产力发展的推动，人类才在自然科学的许多领域，逐渐地展开了积极的探索和定量的研究。电磁现象的性质和规律就是其中的一个重要方面。

1785年，静止点电荷之间相互作用的库仑定律通过著名的扭秤实验被确立了，它奠定了静电学的基础。

1796年前后，电化效应发现导致了伏打电池的制造，人类第一次掌握了有效的电源。

1820年，奥斯特发现了电流的磁效应，随之，安培定律、毕奥—萨伐尔定律相继确立，从而人们开始认识到电现象和磁现象之间存在着内在的联系，电学和磁学开始统一成为电磁学。

1822年，法拉第在研究磁力的作用时首先提出了“场”的概念，后来又把它推广到电力的作用中去。接着，他于1831

年发现了电磁感应定律。这不仅是制造更加有效和实用的电源的理论基础，同时也开辟了物理学的新时代。

从1861年开始，麦克斯韦分析了当时已有的关于电磁现象的实验定律，把法拉第“力场”的观念用数学形式加以概括，并且天才地引入了“感应电场”和“位移电流”的假说，从而得出了著名的麦克斯韦电磁场方程组。它不仅揭示了电磁场的运动规律，而且还预言了电磁波的存在。

麦克斯韦方程组以其公式的完善和简便，引起物理学家和数学家们的赞叹，以致著名的奥地利物理学家波尔兹曼在谈到麦克斯韦的公式时说：“这种符号难道不是出自上帝之手吗？”然而，麦克斯韦方程式所表达的电磁理论本身，当时，并没有被物理学家立即承认。这一方面是由于电的传统的机械论观念在物理学家们的意识中根深蒂固；另一方面也是因为这种新的理论的正确性，特别是它所预言的电磁波尚未得到实验上的证明。

麦克斯韦也是一位杰出的实验物理学家。1871年，他出任剑桥大学卡文迪什实验室主任，这里拥有良好的实验设备。即使如此，他并不试图以实验途径去确定他从理论上预言过的电磁波的存在，甚至根本没有对此提出任何研究计划。显而易见，麦克斯韦认为自己的数学证明是如此可信，以致对它的结论再作实验证明显得是多余的了。

麦克斯韦逝世后十年，1888年，赫兹终于从实验中得到了电磁波。

通过对麦克斯韦方程组求解，可以研究电磁场的运动状态，电磁场的质量和能量，以及电磁场独立于场源而存在和传播等问题，从而能够确认电磁场不仅仅是一种描述电磁现象的方法或手段，而是物质存在的一种形态。电磁场和一般的物

质一样,具有能量和动量,同时又表现出波动性和叠加性,并且几乎无时无处不在,因而它是物质世界的重要组成部分。

对于一种新的物质形态的属性的了解,一般总要通过对它与已知物质形态之间的相互作用的研究与分析才能得到。从对带电物体与电磁场相互作用的研究中,发现了运动电荷在电磁场中受力的洛仑兹力公式。反过来,以洛仑兹力公式和麦克斯韦方程组为依据,去进一步分析和解算电磁场与带电物体相互作用的各种问题,又能够进一步揭示电磁场的重要属性。

所以,麦克斯韦方程组、洛仑兹力公式和电荷守恒定律是电磁理论的核心。但是,一直到十九世纪末叶,电磁场理论仍然只是把电磁场解释为某种充满整个宇宙空间的、类似于弹性介质的“以太”的振动状态。最初,惠更斯认为以太是传播光波的基础,后来在法拉第年代,以太被认为是引起带电体之间和磁体之间相互作用的原因,麦克斯韦把这两者统一了起来,指出光是传播的电磁波,并以优美的数学公式把所有涉及光、电和磁的现象和谐地结合在一起。然而,在取得了这一切成就之后,物理学家们却不无遗憾和困惑地发现,要用描述气体、固体和液体这类常见介质的方法来描写这种宇宙以太的特性,简直是不可能的,因为在这方面的所有尝试都导致了一系列难以解决的矛盾。

例如,光的偏振现象无可置疑地表明光是一种横波,即光所涉及的是一种横向振动,而横向振动只能在固体中存在,因此必须把以太看作是一种固体物质。又由于光波的传播速度很大,而波的传播速度又与传播波动的媒质的刚劲程度有关,这就要求以太是一种刚性极大的弹性固体媒质。然而,如果真是这样的话,即如此坚硬的固体媒质——以太——充

满了整个宇宙空间的话，那我们又怎么能够在地球上跑来跑去，鸟儿又怎样能在空中自由翱翔，行星如何能千百万年地绕着太阳转动而并不明显地遇到阻力呢？

以太的属性是如此之奇异，以致即使是在以太观念盛行的日子里，人们也不能不认为它是一种虚无缥缈的东西。这也是“以太”名称的原意。

另一方面，物理规律都是相对于一定的参照系表达出来的。如果承认以太的存在，而且确信电磁场是以太的某种振动的观念是正确的话，那就意味着麦克斯韦方程组和洛仑兹力公式都是在相对以太静止的参照系中表述的。那么，在其他的相对于以太作匀速运动的惯性参照系中，麦克斯韦方程组和洛仑兹力公式是否仍然成立？电磁场量，即电场强度 E 和磁感应强度 B 将如何变换？特别是由于从麦克斯韦方程组可以导出电磁波在真空中以光速 c 传播，因而就只有在对以太静止的参照系中，电磁波在真空中的传播才是各向同性的，所以这一参照系便具有了特殊的地位，而在其他参照系中，一切都要作相应地变动。可是，人们当时所了解的力学规律的核心是牛顿定律。但在伽里略变换下，牛顿定律在不同的惯性参照系中却具有完全相同的形式，并不需要作任何变动。难道电磁运动的规律与机械运动的规律真会有这种原则性的区别吗？

所有这些问题纠缠在一起，形成了一个似乎无法解开的“以太顽结”。传说古希腊国王考第耳斯用山茱萸树皮打成了一个结，把自己的战车车轡绑在了柱子上。有一位圣人预言说：谁要能解开这个考第耳斯结，他就会统治整个亚洲。亚历山大大帝挥剑砍断了这个结，达到了统治亚洲的目的。二十世纪初年，爱因斯坦以他精密的思考和清晰的逻辑一举

砍断了“以太顽结”，把宇宙以太拧碎并抛出了物理学的厅堂，从而成为近代物理学中的“亚历山大大帝”。

爱因斯坦是从运动介质中电磁现象的研究向“以太顽结”进攻的。1905年，他发表了题为《论运动物体的电动力学》的论文，指出了以太理论及以太的存在是多余的，提出了物理学的相对性原理，即一切物理规律，不仅是力学的规律，也包括电磁学的规律，在所有惯性参照系中都具有相同的形式。同时，爱因斯坦还注意到，把这种相对性原理从机械运动推广到电磁运动，就要求人们对空间和时间的基本观念来一个彻底的变化，这就导致了新的时空观的建立。

在上述的意义上，可以说爱因斯坦相对论理论的建立是电磁场理论研究的结果。然而，在另一方面，在旧时空观基础上建立的麦克斯韦方程组和洛仑兹力公式，又必须在新时空观的基础上予以分析、研究和改造，从而能够真正成为正确描述电磁场运动规律的科学体系。这样做的结果就是把麦克斯韦方程组和洛仑兹力公式表示为，或者说改造为相对论的协变形式。只是在这项工作完成之后，才可以说人类对于宏观电磁场的属性和规律有了比较全面正确的了解，宏观电磁场理论才算比较完满地建立起来了。

电磁场理论不仅包含着诸多现象的分析，而且还有物理机制的解剖，因此它是一门相当严谨和清晰的科学体系。如果把电磁场理论比喻为一幢大厦，建造它的砖石就是诸多的实验定律和概念，而维系着这些砖石的则是严密的逻辑推理和数学公式。因此准确完整地掌握电磁场理论并不是一件轻而易举的事情。然而，即使在一般电磁学知识中，也要涉及到一些极为重要的电磁场理论问题。例如，电路理论与电磁场理论的关系是什么？用电磁场理论能否处理电路问题？电

路理论有无局限性？它的适用条件是什么？又例如，同向平行电流之间相互吸引，这是一个实验事实。而我们又知道，运动的电荷亦表现为电流，那么两个相同的点电荷在同向平行等速运动时，它们之间是吸引还是排斥呢？作用力的大小和方向又如何计算？库仑定律此时还能否运用？还有，在一般介绍电磁波的传播时，总是强调电场强度 E 和磁感应强度 B 是同相位的，而在讲解电磁波的激发时，又明显地能够看到 LC 振荡回路中，电场强度 E 和磁感应强度 B 具有 $\pi/2$ 的相位差。那么，一个 E 与 B 具有 $\pi/2$ 相位差的波源，激发出的却是 E 和 B 相位差为零的电磁波，这又应该如何理解呢？

所有这些问题，对于中学物理教师应该是心中有数。这样，在处理和讲授中学教材时，就会较好地把握科学性和启发性结合起来，从而在教学中达到有新意有气氛的境界。这必将促进学生对科学的爱好和钻研的热情，收到较好的教学效果。

（二）麦克斯韦方程组与洛伦兹力公式

1. 麦克斯韦第一方程式

（1）普里斯特利的推测。

物体带电的明显特征是带电体之间存在着相互作用力，人们正是从这方面开始认识电现象，并利用这种相互作用来研究物体的带电性质和规律的。那么，这种作用力是怎样依赖于电荷的多少和带电体之间的距离呢？

大约在1775年，富兰克林注意到了——一个奇特的现象：用丝线把一小块软木屑悬挂在带电的金属罐外附近时，软木屑受到强烈的吸引，但是把软木屑用丝线悬挂在带电的金属罐