

经典电动力学

绪言

杨焕雄

中国科学技术大学物理学院

hyang@ustc.edu.cn

February 25, 2024

目录

1 一般性资讯

- 教师与助教
- 作业与考试计划

2 绪论

- 为什么学习电动力学？
- 课程概略
- 电动力学理论的出发点

欢迎同学们来到本课堂学习

经典电动力学

几句说在课前的话

任课教师信息：

姓名：杨焕雄

电话：18949882795

邮箱：hyang@ustc.edu.cn

教学经历：此次教学是本人第 16 次主讲本科生的经典电动力学，也是第 3 次采用演绎法讲电动力学的课。

课程助教：

- 刘元彻，19855013703, liuyuanche@mail.ustc.edu.cn
- 李雨桥，13637287104, liyuqiao@mail.ustc.edu.cn

教材：

王振林，现代电动力学，高等教育出版社，2022 年 7 月。

参考书推荐

- ❶ L.D.Landau and E.M.Lifshitz, [The Classical Theory of Fields \(场论\)](#), Butterworth-Heinenann, 1980.
- ❷ M. Maggiore, [A Modern Introduction to Classical Electrodynamics](#), Oxford, 2023.
- ❸ K.Lechner, [Classical Electrodynamics, a modern perspective](#), Springer, 2018.
- ❹ D.J.Griffiths, [Introduction to Electrodynamics](#), 4rd Edition, Pearson Education Inc., 2013.
- ❺ R. Wald, [Advanced Classical Electromagnetism](#) , Princeton, 2022.
- ❻ A. Zangwill, [Modern Electrodynamics](#), Cambridge, 2012.

最后对南京大学王振林教授的著作：

- 现代电动力学, 高等教育出版社, 2022 年 7 月第 1 版.

做些简单介绍. 我认为这个书具有如下优点:

- ❶ 除第一章外, 该书章节的编排次序基本上与郭硕鸿书相同. 但加入了很多现代物理元素, 对许多物理概念的阐述或者很透彻, 或者展示了作者的独特见解.
- ❷ 第一章是数学准备, 简洁地梳理了电动力学学习中使用的数学知识, 特别是矢量分析和张量代数.
- ❸ 习题很新颖且按难度做了区分.
- ❹ 多数章节中包含着课外阅读材料, 可以极大地拓展学生的视野. 例如,
 - 人工结构负折射现象
 - 石墨烯二维材料的奇特光吸收特性
 - 基于 Doppler 效应验证时间膨胀效应
 - 相位匹配下光与自由电子波函数的相互作用



现代电动力学

王振林 编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

正版授权

作业与考试的计划：

- ① 课程正式开始后，每周会布置若干习题 (习题数目 ≤ 6)，其中有些题目对初学者而言有一定的挑战性.
- ② 作业将作为平时成绩的一部分评分. 建议助教在制定作业成绩评分标准时既要考虑作业是否是独立完成、也要考虑作业的答案是否正确与合理.
- ③ 平时成绩也包括对课堂提问的参与.
- ④ 考试分期中考试 (闭卷) 和期末考试 (开卷) 两次，期末考试或许会包含电动力学教学组的统一试题.
- ⑤ 平时成绩、期中成绩与期末考试卷面成绩在总评成绩中的比重暂定为 20%、20% 和 60%.

提示：

考题的难易程度与作业持平、但不会考平时作业中布置过的习题原题.

教学特点：

自我评价：

- ① 清晰性、准确性和启发性或许可以保证.
- ② 通俗性欠佳,做不到深入浅出.
- ③ 语言能力一般,不会讲故事、不风趣.
- ④ 普通话水平低下,许多汉字的发音不准确. 声音不够洪亮 (请大家尽量集中注意力听讲).

本课程全程使用电子版课件进行教学. 教学课件的学生版会在课堂教学完成后上传到学校教学网上供大家参考.

课件下载网址：

<http://www.bb.ustc.edu.cn>

为什么要学习电动力学？

电动力学就是**加强版**的电磁学。

同初等电磁学一样，经典电动力学仍是关于宏观物理世界中的一种基本相互作用、即**电磁相互作用**的学问。

2: 既然大家已学过了初等电磁学，为何还要再费时费力地学习经典电动力学？

我的看法如下：

- 初等电磁学与经典电动力学的划分纯粹是人为的，二者的差异仅仅在于侧重点不同。
- 经典电动力学提供了一个洞悉经典物理学理论体系严重缺陷的窗口，使我们了解学习由狭义相对论与量子力学所支撑的现代物理学理论的必要性。
- 体会并初步掌握理论物理学家分析问题、解决问题的思路和方法。

电磁学课程的基本内容:

在电磁学中,我们从学习 **Coulomb** 定律出发,依次学习或了解了

- ① 静止电荷分布在空间激发静电场的规律:**静电高斯定律、环路定理**. 在电荷分布具有很强对称性的前提下能够使用场强叠加原理和高斯定律求解静电场的分布.
- ② 稳恒电流在空间激发静磁场的规律:**Ampere 环路定理、静磁 Gauss 定律**. 在电流分布具有足够对称性的前提下能够用 **Biot-Savart** 定律或 **Ampere** 环路定理求解静磁场的分布.
- ③ **Faraday** 电磁感应定律和**Maxwell** 位移电流假设, 时变的电、磁场相互激发产生电磁波的机制, 电磁波的传播速度等于光速的结论.
- ④ **Maxwell** 方程组的积分形式和**Lorentz** 力公式.
- ⑤ 介质在电磁场中极化、磁化现象.

电磁学课程的不足:

电磁学作为本科低年级的入门课程,主要是沿着历史发展的脉络,通过介绍实验规律和使用矢量代数、微积分等初等数学工具展开的.

因此,

- ① 所学的求解静电场、静磁场的方法一方面对于电荷、电流分布的对称性有很强的依赖性,另一方面却没有指出这种对称性的物理实质.
- ② 虽然学习了电荷守恒定律,但不了解电荷守恒定律的原因. 不了解电磁场是一种规范场、电磁相互作用是一种规范相互作用.
- ③ 对时变电磁场的基本属性和传播规律介绍的很浅,没有涉及电磁波的波动方程及其推迟解.
- ④ 没有涉及 Maxwell 方程组和 Lorentz 力公式的参考系问题,刻意回避了时间和空间不可分割的时空基本属性.
- ⑤ 没有以电磁场为依托介绍相对论性经典场论的现代描写方法、从而不了解对称性在现代物理学前沿研究中至关重要的指导作用.

电动力学的特色：

电动力学针对上述电磁学课程设置的漏洞打了补丁。

一是强化了如下数学工具的使用：

- ① 矢量分析
- ② 数理方程
- ③ 线性代数

从而强化了电磁现象基本规律的描写逻辑和解决问题的能力。

二是通过规范势的引入揭示了电磁场的规范场本性和电磁相互作用传播速度的有限性。建立起了电荷守恒定律与电磁相互作用具有的规范变换不变性之间的联系。

三是直面 **Maxwell** 方程组的参考系问题，系统地论证了 **Einstein** 创立“狭义相对论”的必要性、介绍了相对论的时空观。

- 学习电动力学难免要动用若干较高级的数学工具。

- 我的前 13 次电动力学教学活动都是采取归纳法组织的, 若干流行的经典电动力学教材, 例如 Jackson, Griffiths, Zangwill 与郭书大抵也都如此.
- 归纳法遵循电磁学发展的历史脉络:

- ① 静电、静磁现象的实验规律
- ② 法拉第电磁感应定律、Maxwell 方程组、时变电磁场及其规范场属性
- ③ 电磁波的传播与辐射电磁场
- ④ 电动力学基本定律的参考系问题, 狭义相对论

其优点是反映了物理学是一门实验科学的本质, 理论中每一新概念的出现都伴有实验事实的支撑. 从真实的物理学史角度看, 电磁相互作用理论的重大进展都是通过归纳法取得的.

- 归纳法的缺点在于它与初等电磁学的讲法基本一致, 容易引起审美疲劳.

演绎法

- 实际上也存在着采取组织经典电动力学教学的讲法，代表作例如有 L.D. Landau, F. Scheck 与 K. Lechner 的著作 (详见前面推荐的参考书清单).
- 演绎法的基本思路是：
 - ① 假设电磁相互作用遵从若干对称性，如时间均匀性、空间均匀性和各向同性、时间反演、电荷共轭以及空间反演变换下的不变性、特别是洛伦兹变换下的不变性和规范对称性. 当然，这些对称性都得到了实验的检验与支持.
 - ② 从这些对称性出发构造体系的作用量，通过最小作用量原理确定体系的动力学方程：Maxwell 方程组与洛伦兹力公式.
 - ③ 通过分析作用量的对称性，确定电磁相互作用体系具有的各种守恒定律，并由此确定体系的能量、动量和角动量.
 - ④ 把静电、静磁现象当作时变电磁场的特殊情形处理.

本学期我决定接受班上多数同学的建议，尝试采取演绎法组织课堂教学、为大家学习经典电动力学营造一个新环境. 让我们用陆游的著名诗句共勉吧：

纸上得来终觉浅，绝知此事要躬行.

归纳法、演绎法点评：

- 归纳法与演绎法在英语中分别对应于 *induction* 与 *deduction*, 但近年来在物理文献中大家更习惯分别用复合词汇 *bottom-up* 与 *top-down* 指代它们.
- 物理学院的教师大多喜欢使用归纳法组织电动力学课堂教学. 这是有原因的:
 - ① 物理学本质上是实验科学, 物理学史上绝大多数重大进步都是通过归纳法获得的.
 - ② 就历史发展的真实脉络而言, 电动力学的理论体系是几代物理学家提炼实验、不断试错, 逐渐归纳完成的.
 - ③ 归纳法是普通人进行科研活动的不二方法.
 - ④ 演绎法的门槛很高, 它要求使用者开了上帝视角. 具体到电动力学理论, 演绎法要求事先了解电磁相互作用所具有的全部对称性. 否则, 演绎法就会处于画虎不成反类犬的尴尬境地.

- 物理学史上演绎法取得的重大进展寥寥无几, 但 20 世纪几个史诗级的物理学理论是演绎法取得的:

① 广义相对论:

等效原理 \oplus 广义协变原理 \rightsquigarrow 引力的相对论性理论

② 弱电统一理论:

洛伦兹不变性 $\oplus SU(2) \times U(1)_Y$ 局域规范对称性 \rightsquigarrow WS 模型

③ 色动力学:

洛伦兹不变性 $\oplus SU(3)$ 局域规范对称性 \rightsquigarrow 色动力学

按照事后诸葛亮的观点:

洛伦兹不变性 $\oplus U(1)$ 局域规范对称性 \rightsquigarrow 电动力学

这也就是我们本学期能使用演绎法组织电动力学教学的物质基础.

但是, 演绎法更多的是失败的案例. 70-80 年代, 携量子色动力学所取得的巨大成功, 物理学家们企图构建统一描写强、弱电的大统一理论 (*GUT*). 这个设想的出发点是:

洛伦兹不变性 $\oplus SU(5)$ 局域规范对称性

这是因为

$$SU(5) \supset SU(3) \times SU(2) \times U(1)$$

不幸的是, 这个方案最终被证明是一次失败的尝试. *GUT* 预言质子是不稳定粒子, 其寿命大约为 10^{28} 年¹. 后来又把出发点修改为:

洛伦兹不变性 $\oplus SU(5)$ 局域规范对称性 \oplus 超对称性

构造了所谓的超对称大统一理论. 但仍看不到成功的希望.

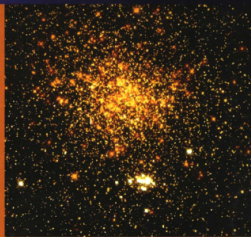
¹实验上质子寿命的下限为 10^{33} 年, 故通常认为质子是稳定的基本粒子.

原书第2版

引力与时空

〔美〕H.C.瓦尼安 〔意〕R.鲁菲尼◎著

向守平 冯珑珑◎译



科学出版社

www.sciencep.com

序

Einstein 早在 1916 年就发现了他的引力理论。按理说,这一理论应当是在 20 年之后才会被发现,那时物理学家对于相对论场论和规范不变性才有了清楚的理解。Einstein 对引力本质深刻和早熟的洞察力更多靠的是直觉而不是逻辑。他建立狭义相对论的基础具有令人赞叹的精确性和清晰的可操作性;与之相比,他建立广义相对论的基础却是模糊难解的。正如 Synge 和 Fock 强调过的,就连这一理论的名称也表明一个误解;并没有比狭义相对论更广义的相对论。但是,无论他走过的路多么晦暗,Einstein 的直觉引导他创建了一个美得令人目眩的理论。用 Arthur Koestler 形象化的比喻来说,如果我们把 Copernicus、Kepler 和 Newton 看作是梦游者,他们知道想去哪里,而且在并不完全了解如何去做的情况下设法到达那里,那么 Einstein 就是他们所有人中最伟大的梦游者。

教学互动方面的建议:

- ① 教学过程中将会不断出现一些思考题. 有些是我事先准备的, 有些则是即兴提出来的. 欢迎学有余力的同学就思考题所提出的问题撰写学习心得或者学术小论文. **学习心得和小论文不是必须的作业, 是否参与全凭自愿.**
- ② 同学们若愿意与我分享你们对电动力学学习过程中的心得体会, 我欢迎. 我反应较慢, 有的问题可能需要反复思考才能说出符合我真实想法的观点. 所以, 请大家主要以电子版书面来信的方式与我讨论. **来信请把你的见解写成 word, latex 或 markdown 格式的源文件作为附件.** 恕我不接受单纯的 pdf 文件或者无法编辑的扫描图片.
- ③ 我们的总评成绩不调分. 但是, 提交学习心得或者学术论文的同学将按照见解的深浅获得适当的奖励分直接加到总评成绩中. 获奖名单会事先公示以保持公正.

电动力学的奠基人：

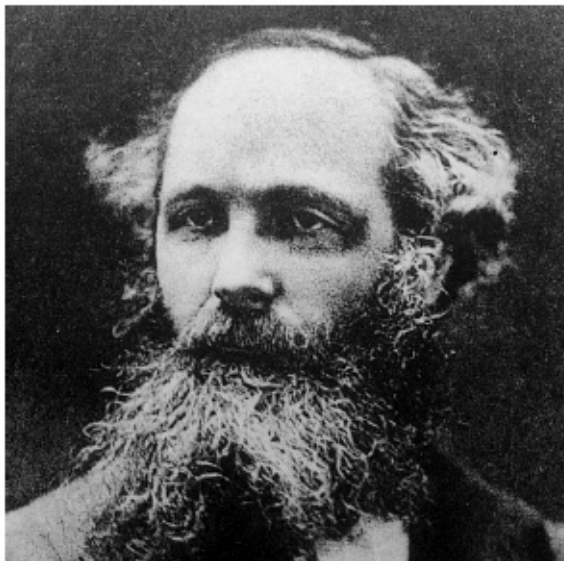
J. C. Maxwell(1831-1879) 被誉为是牛顿之后世界上最伟大的数学物理学家.

他依据库仑、高斯、欧姆、安培、毕奥、萨伐尔、法拉第等前人的一系列发现和实验成果,建立了第一个完整的电磁理论体系,不仅科学地预言了电磁波的存在,而且揭示了光、电、磁现象本质上的统一性,完成了物理学的一次大综合. 这一自然科学的理论成果,奠定了现代的电力工业、电子工业和无线电工业的基础.

描写电磁现象基本规律的 Maxwell 方程组入选改变了人类文明史的 17 个最伟大的方程².

²I. Stewart, In Pursuit of the Unknown, Basic Books, 2012.

James Clerk Maxwell, 1831-1879



电动力学的理论基础是 Maxwell 方程组与洛伦兹力公式，它们适合于任意的惯性参考系.

- 积分形式的 Maxwell 方程组几乎是对实验现象的归纳：

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = Q/\epsilon_0, \quad \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0, \quad \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0,$$
$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I$$

- 洛伦兹力公式

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = q\mathbf{E} + q\mathbf{u} \times \mathbf{B}$$

脱胎于静电库仑定律与静磁安培力公式. 这里采取了国际单位制.

以上两组方程联合构成了研究经典电动力学问题的出发点.

借助于高等数学中的奥高散度定理与斯托克斯公式，

$$\oint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s} = \int_V d^3x \nabla \cdot \mathbf{A}, \quad \oint_C \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \nabla \times \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s}$$

我们可以把 Maxwell 方程组改写为如下微分形式：

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= \rho/\epsilon_0, & \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0, & \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0, \\ \nabla \times \mathbf{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= \mu_0 \mathbf{j} \end{aligned}$$

让我们从如下问题开始经典电动力学的学习之旅：

- ① 怎么看出电动力学基本方程组适合于任意的惯性参考系？
- ② 基本方程组中蕴藏着哪些对称性？