

高等学校教学用书

# 电学原理

上册

伊·耶·塔姆著

人民教育出版社

本书原系根据苏联技术理论书籍出版社 (Гостехиздат) 出版的伊·耶·塔姆 (И. Е. Тамм) 著“电学原理” (Основы теории электричества) 1949年版译出。中译本分订为上下两册, 于1953年起出过几版, 译者是钱尚武、赵祖森两同志。在修订本出书前, 复经赵祖森同志根据1957年版作全面的修订。原书曾经苏联高教部审定为综合大学教学参考书, 可供我国高等学校参考。

## 电 学 原 理

上 册

伊·耶·塔姆著

钱尚武 赵祖森译

人民教育出版社出版 高等学 校教材编辑部  
北京宣武门内承恩寺7号  
(北京市书刊出版业营业许可证出字第2号)

上海大东集成联合印刷厂印刷  
新华书店上海发行所发行  
各地新华书店经售

统一书号 13010·495 开本 850×1168 1/32 印张 10 8/16  
字数 272,000 印数 5,001—35,000 定价 (4) 半 1.00

1958年7月新1版

1960年5月第2版(修订本) 1960年6月上海第3次印刷

## 第一版序

本书是为通曉微积分及矢量代数的人編写的；必須用到的矢量分析基础，在本书附录中加以叙述。

本书的基本目的是闡明电学理論基本原理的物理意义和内容；和这一目的相比較，叙述的形式邏輯的完整，严密和普遍只占有次要的地位。

我不企求叙述的完备，我甚至省略掉某些比較重要的問題，如果它們和叙述的总的安排不相符合的話（例如，热电現象、电解等）。另一方面，某些問題（例如，电介質和磁質的理論）我又叙述得比一般教本要詳尽些。我沒有闡述理論在技术上的应用，可是我尽可能让讀者們有所准备，以便于直接轉过来研究实用电子理論。

由于俄文的科学术语还没有拟定，我不得不引用两个新的名詞：“外来”电动势（eingeprägte Kraft 外加电动势，作用电动势）和“磁質”。此外，我还舍弃了“自由”电荷和“束縛”电荷这两个名詞的流行的然而却是陈腐和不合理的用法。最后，我将高斯（对称）单位系統簡称为絕對系統（不加形容詞），以別于靜电系統和电磁系統。

书中絕大部分习题是正文的有机部分；許多問題的解答是了解下一步叙述所必需的。

伊·耶·塔姆

1929

## 第三版序

在准备第三版时,我将本书彻底地加以改写,但还保留它的总的计划和叙述的方法;换句话说,我不想写一本新书。

其实只有第一章和第三章很少改变。

为了叙述的严密和完整,第二章和第五章几乎完全改写过。

在第七章中补加了超前势,规范不变性,磁偶极子的辐射,光在金属中的传播,光压,电磁场的动量和动量矩,电磁张力张量这些问题的讨论。

最后,在第三版中增写了新的一章——第八章,这章讨论缓慢运动媒质中的电磁现象。这儿的理论只有在不考虑  $v^2/c^2$  及其高次项时才是正确的,可是它有許多重要的应用,同时讲述它不需要直接利用相对论(我们不假定读者通晓相对论)。如果将本书的最后两节除外,那么只有运动媒质的电极化强度、磁化强度和场强的关系这一点,不得不直接从相对论引用过来;可是在计算变换方面,在 § 117 中不得不只限于将问题提出,并大概地指点一下在相对论中问题是如何解决的。

伊·耶·塔姆

1944

## 第五版序

本书第五版沒有重大的改变，只将发现的錯字加以更正。此外还删去前两版中的 § 115 和 § 116，因为在这两节里，各向异性的媒質和运动着的媒質中張力張量的問題，以及有关的問題，都解釋得不正确，这一点是承 И. И. 藍道院士向我指出的。要决定有質动力和張力張量，需要从媒質移动时能量的改变出发，本书的 § 32 和 § 83 中就是这样做的，然而在 § 115 和 § 116 中却沒有这样做。

伊·耶·塔姆

1954

## 重要符号表

矢量用正黑体(粗体)字表示(例如  $\mathbf{R}$ )；用白体(细体)字印的同一字母(例如  $R$ )表示该矢量的数值。

任何重积分都用一个符号  $\int$  来表示，而用不同的积分元的符号区分开来：体积元(三重积分)—— $dV$ ，面积元(两重积分)—— $dS$ ，线元(一重积分)—— $ds$ 。

符号  $\oint$  表示沿闭合面或沿闭合回路积分。

关于  $\text{grad}$ ,  $\text{div}$ , 等符号中指标  $a$  和  $q$  的意思, 见附录。

在正文中引用附录中矢量分析的公式时, 这些公式标以星号, 例如 (17\*)。如果在一个号数下有几个公式, 在引用这些公式中的某一个时, 它的号数用右下角的附加指标来表示, 例如 (43<sub>3</sub>\*)。

$A$ —功。

$\mathbf{A}$ —矢势。

$\mathbf{B}$ —磁感应强度。

$c$ —电动常数, 等于真空中的光速。

$C$ —(1) 电容, (2) 矢量的环流。

$\mathbf{D}$ —电感应。

$e$ —电荷。

$\mathbf{E}$ —电场强度。

$\mathcal{E}$ —电压。

$\mathcal{E}_{\text{外来}}$ —外来电动势。

- $f$ —力密度。
- $F$ —(有质动)力。
- $g$ —电磁动量密度。
- $H$ —磁场强度。
- $i$ —(1)沿  $x$  轴的单位矢量, (2)面电流密度。
- $I$ —(单位体积的)磁化强度。
- $I_0$ —恒定磁化强度。
- $j$ —(1)沿  $y$  轴的单位矢量, (2)(体)电流密度。
- $J$ —电流强度。
- $k$ —(1)玻耳兹曼常数, (2)波数。
- $k$ —沿  $z$  轴的单位矢量。
- $K$ —动量矩。
- $L$ —曲线, 特别是闭合回路。
- $L_u$ —自感系数。
- $L_{ik}$ —互感系数 ( $i \neq k$ )。
- $m$ —磁荷(假想的)。
- $M$ —磁矩。
- $n$ —法线方向的单位矢量。
- $N$ —(1)矢量通量, 特别是电矢量的通量, (2)单位体积中的分子数。
- $N$ —(1)法线方向的单位矢量, (2)力偶矩。
- $\omega$ —进动角速度。
- $p$ —偶极子的电矩。
- $P$ —外来电动势的功。
- $P$ —(1)(单位体积的)电极化强度, (2)赫芝矢量。
- $Q$ —单位时间中电流所放出的热量。
- $R$ —电阻。

$\mathbf{R}$ —矢徑。

$\mathbf{r}$ —离某一軸綫最短距离的矢量。

$ds$ —长度元。

$S$ —面。

$\mathbf{S}$ —坡印廷矢量。

$t$ —時間。

$\mathbf{t}$ —切綫方向的单位矢量。

$T$ —(1) 絕對温度, (2) 动能, (3) 振动周期。

$\mathbf{T}$ —張力, 張力張量。

$\mathbf{u}$ —速度。

$U$ —电流磁場的矢函数。

$\mathbf{v}$ —速度。

$V$ —体积。

$w$ —能量密度。

$W$ —能量。

$\alpha$ —(1) 方位角, (2) 单位体积的极化率。

$\alpha, \beta, \gamma$ —矢量的方向角。

$\beta$ —分子的极化率。

$\varepsilon$ —介电常数。

$\vartheta$ —极角。

$\kappa$ —(1) 磁化率, (2) 电荷的綫密度。

$\lambda$ —(1) 电导率, (2) 波长。

$\mu$ —磁导率。

$\rho$ —(体) 电密度。

$\rho_m$ —(体) 磁荷密度(假想的)。

$\sigma$ —面电荷密度。



$\sigma_m$ —面磁荷密度(假想的)。

$\tau$ —密度(单位体积的质量)。

$\varphi$ —电势。

$\Phi$ —磁通量。

$\psi$ —磁标势。

$\Psi$ —(1)磁感应通量,(2)自由能。

$\omega$ —循环频率。

$\Omega$ —立体角。

$\nabla$ —哈密顿算符“набла”。

$\Delta$ —拉普拉斯算符。

---

# 上册目录

第一版序	vi
第三版序	vii
第五版序	viii
重要符号表	ix
緒論	1
第一章 真空中靜止电荷的电場	9
§ 1. 庫倫定律	9
§ 2. 电場	13
§ 3. 高斯定理	15
§ 4. 带电面的电場	18
§ 5. 电場中的导体	24
§ 6. 电場的源头。面散度	27
§ 7. 电力的功。功和路程形状的无关性。矢量 $\mathbf{E}$ 的切向分量的連續性	31
§ 8. 靜电場的势	35
§ 9. 电容、电容器	41
§ 10. 靜电势的梯度。力綫	45
§ 11. 泊松方程式和拉普拉斯方程式	49
§ 12. 体电荷的势和面电荷的势	53
§ 13. 靜电学的典型問題	60
§ 14. 偶电层	63
§ 15. 电荷的相互作用能	68
§ 16. 电場的能量	73
§ 17. 有质动力	78
§ 18. 从能量表示式决定有质动力	81
§ 19. 电体系的不稳定性。約束	85
第二章 电介質	90
§ 20. 电介質。中性分子的电矩和电势。电介質的电极化	90
§ 21. 自由电荷和束縛电荷。有电介質存在时电場的势。电极化和电場的关系	94
§ 22. 电感应矢量。任意媒质中場的微分方程式。感应綫	98

§ 23. 均匀电介质中的电场.....	103
§ 24. 电介质存在时场的直接计算(在最简单的情况下).....	106
§ 25. 物理量的微观值和宏观值.....	111
§ 26. 求微观场的平均来推导电介质中场的方程式.....	113
§ 27. 两类电介质。似弹性偶极子.....	117
§ 28. 作用在偶极子上的场和平均场的区别.....	119
§ 29. 分子具有恒定电矩的电介质的极化。介电常数和温度的关系.....	123
§ 30. 电介质内的电场能.....	130
§ 31. 和电介质电极化相关联的能量转换。电场的自由能.....	133
§ 32. 电介质内的有质动力.....	140
§ 33. 体积力的归结为张力.....	147
§ 34. 电场的张力张量.....	153
<b>第三章 恒定电流</b> .....	161
§ 35. 金属中的电流。欧姆定律和焦耳定律。电压.....	161
§ 36. 电流密度。欧姆方程式和焦耳方程式的微分形式.....	165
§ 37. 电流稳定的条件。连续性方程式。电流管.....	168
§ 38. 外来电动势。似稳电流。克希霍夫第二定律.....	172
§ 39. 电路中的能量转换。接触电动势.....	177
§ 40. 金属电子论的基本观念。托尔曼实验.....	183
§ 41. 导电性的电子论。经典理论的困难。索莫菲理论.....	187
<b>第四章 恒定电流的有质动相互作用和它们的磁场(当磁化媒质不存在时)</b> .....	195
§ 42. 电流的磁场.....	195
§ 43. 电流元的相互作用。电动常数.....	199
§ 44. 从线电流到截面有限电流的过渡.....	203
§ 45. 罗楞兹力.....	206
§ 46. 磁场的矢势.....	211
§ 47. 磁场的微分方程式。磁场强度的环流.....	215
§ 48. 势场和无散场。电势微分方程式和磁场微分方程式的对比.....	217
§ 49. 电流磁场中的边界条件。面电流。面旋度。无限长螺线管的场.....	219
§ 50. 闭合电流在磁场中所受的有质动力。电流在外磁场中的势函数.....	224
§ 51. 电流的有质动相互作用。互感系数.....	229
§ 52. 自感系数。电流组的总势能.....	234
§ 53. 磁力线.....	237
§ 54. 涡旋(磁)场的拓扑学。假想壁障.....	242
§ 55. 磁壳。它们和电流的等效性.....	246
§ 56. 电流的磁矩。元电流和磁偶极子.....	251
§ 57. 元电流的势和元电流所受的力的直接决定.....	255

§ 58. 有关磁的本性的各种观念的进化。电子的自旋 .....	263
§ 59. 绝对(高斯)单位系统和其他的单位系统。电动常数 .....	267
附录 矢量分析 .....	1
§ 1. 矢量代数 .....	1
§ 2. 矢场和标场。梯度 .....	3
§ 3. 通过表面的矢量的通量 .....	8
§ 4. 高斯定理。散度 .....	11
§ 5. 矢量的环流。矢量的旋度。斯托克斯定理 .....	18
§ 6. 矢量沿某一方向的微商 .....	25
§ 7. 哈密顿算符。二阶微商。乘积之微商 .....	26
§ 8. 积分关系。格林定理 .....	33
矢量分析中最重要公式 .....	37
习题解答 .....	40

## 緒 論

按照近代的观点，一切物体的原子都是由带电粒子(比較輕的、帶負电的电子，和比較重的、帶正电的原子核)所組成的。我們之所以覺得电性中和的物体是不帶电的，只是因为包含在物体中的諸电子的負电荷等于包含在物体中的諸原子核的正电荷，因而异号电荷的影响彼此抵消(至少，在距离比中性物体中各个带电粒子間的距离要大得多的地方)。电荷的重新分配，其中也包括电流，是由带电粒子的移动所引起的，这些带电粒子大部分是电子而不是原子核，因为在化学元素的原子中总包含有若干个“外”电子，这些电子和重的中心原子核的联系較弱，因而比較容易和原子核脱离。

电子的負电荷等于  $4.80 \times 10^{-10}$  绝对靜电系电量单位(或  $1.60 \times 10^{-19}$  庫倫)，电子的电荷是不可再分的电的原子，常称为元电荷，原子核的正电荷在数值上等于元电荷的整数倍。各种原子核的电荷从氦的一个元电荷到鈾的 92 个元电荷不等<sup>①</sup>。氦核是最輕的原子核，它称为質子；質子的质量( $1.67 \times 10^{-24}$  克)約为电子质量( $9.11 \times 10^{-28}$  克)的 2000 倍。无论是原子核，或者是电子的几何大小，比起原子和分子中这些粒子間的平均距离来，要小得很多，因而在考察极大多数的物理現象和化学現象时，可以将原子核和电子都看成是質点，而以一定的电荷和一定的质量来表征它們的性質。至于原子核怎样由比較簡單的粒子(質子和中子)所构成的这一問題，只有在原子核物理学領域(我們不去討論它)中的物理現象这一比較狹窄的範圍內才有意义。也只有在这一現象的領域中，所謂原子核力才有意义，是它們決定原子核內諸粒

<sup>①</sup> 現在用人為的方法得到許多新的重元素，它們在周期表中的位置在鈾的后面。

子(質子和中子)的相互作用的。

从上述的觀念出发,近代物理学的任务是,去决定所有在自然界中遇到的物質的电的构造(包含在物質中的电粒子的数目、排列和运动特性),并从电荷相互作用的基本定律和电荷运动的規律(它們在微观世界中具有量子特性)推出物理現象和化学現象的定律。必須將重力和原子核力起主要作用的那些現象作为唯一的例外,因为只有这些力不能归結为电荷的相互作用。

解决上述問題的第一步,應該是去闡明电荷相互作用的定律,也就是电磁場的定律。极大多数在实际上所用的观察方法和量度方法,要用它們来发现单个电粒的存在,是太粗糙了。利用这些仪器所能观察到的最小的电荷,也要包含到数十亿个带电粒子,这些粒子彼此相隔的距离是微乎其微的。当我们这样来总合地或宏观地<sup>①</sup>研究規模可以直接观察的电現象时,我們可以完全不考虑到电的粒子构造,并用連續分布的电荷这一概念,而不致在討論結果中引起多大的差誤;換句話說,我們可以認為电荷連續地、不間断地填滿物体的带电区域(所謂“体电荷”)。用这种方法来簡化我們的問題时,我們只是仿效力学的范例。因为有質体力学的研究,在考虑到物質的原子构造时,会遇到很大的数学困难,所以彈性論、流体动力学和空气动力学都运用連續分布的物質这一理想的概念。在一定的而且十分广闊的範圍內,这样的替換是完全合法的,在研究連續媒質时所得的結果,也是适用于构造不連續的真實物体的。

遵循电动力学发展的历史进程,我們首先叙述电磁現象的宏观理論,这个理論是以电荷的連續分布这一觀念作为基础的,在积累了一定数量的知識后,我們就以相似的方式来討論以电的粒子构造作为基础的微观理論(所謂“电子論”)的基本观念,并将表明,总合現象的近似宏观定律,可以从基本現象更精密的微观定律中推导出来。然而同时必須

① 希臘文“μακροε”的意思是大的或“堆积的”。

注意到，微觀理論的任何完善的和嚴密的敘述不可避免地應該根據現代形式的量子理論，因為我們不能假定讀者已徹底通曉量子力學，我們所敘述的問題，不得不基本上只在經典（量子前的）物理的範圍內可以充分精密地研究的那些微觀理論問題為限。

在第七章中我們又只研究場的宏觀理論，而在所得結果的基礎上，去表述這一理論的諸基本原理的完整方程組（這些基本原理的主要部分包含在所謂麥克斯韋方程式中）。這些基本原理或“假設”在電動力學中所起的作用，和牛頓的“公理”在經典力學中所起的作用相同。特別是，宏觀電動力學這些基本假設的正確性（象牛頓公理的正確性一樣）最令人折服的證明不是根據歸納方法（這種方法只能用來尋求基本規律，然而不能靠它去嚴密地證明這些規律的正確性），而是根據從理論推出的，並包括宏觀電磁場所有規律的全部結論，和實驗的一致。在第七章中我們研究某些這樣的結論，特別是和電磁波有關的結論。

最後，在第八章中我們研究運動媒質中的電磁現象，而只限于媒質速度比光速為小的情況。

\* \*  
\*

在俄國和蘇聯學者有着特殊貢獻的物理學各部門中，電學是其中之一。因而在開始電學理論的教程之前，即使是簡略地敘述一下俄國學者在這一方面最重要的功績也是完全合適的。

在這簡述中，我們決不企求敘述的完備，而只想闡明某些主要的发展階段。我們只限于本書主要內容所牽涉到的那些問題，即宏觀電動力學的問題。而電子論的問題，以及電學一般學說的各個特殊部門在本書中只是局部的牽涉到，因而研究它們的歷史發展就會使我們離主題太遠。

在十八世紀之前關於電的全部知識，幾乎不外乎是：因摩擦而帶電的諸物體相互排斥或相互吸引。在十八世紀中，發明了萊頓瓶，為天電

的研究奠定了基礎，發現了電的生理影響（伽伐尼）。

天電的發現，或者，說得更精確些，雷雨的雲是帶電的和閃電是電的火花這些事實的實驗證實是在1752年。

在次一年彼得堡的院士——物理學家黎赫曼已着手不接地避雷針的實驗。1758年的夏天M. B. 羅蒙諾索夫(1711—1765)做了“雷的機器”的實驗。幾個月以後，M. B. 羅蒙諾索夫在科學院的公開會議上宣讀了“論由電力而產生的空氣現象”，他用上升和下降的空氣流中“水汽小粒子的摩擦”來解釋天電。

在那個時代，電的現象通常歸之於特殊的、沒有重量的電“流體”的作用（一種流體或兩種流體——單流體說和兩流體說）。和當時大多數物理學家不同，M. B. 羅蒙諾索夫不用沒有重量的流體去解釋電現象，而認為電和光一樣，是由以太的運動所引起的（他的論文“用數學方法研究出來的電學”就是討論這一問題的）。

在十八世紀電的理論的發展中彼得堡的重·愛賓諾斯院士(1724—1809)起着顯著的作用，特別是，他第一個解釋了靜電感應并用實驗證明了解釋的正確性，用這種實驗的方法感應起電第一次得到實現。

伏打電池的發現是電學發展中極重要的一步。伏特關於這一發現的第一次報導是在1800年，而在1802—1803年中，彼得堡醫學——外科學研究院的教授B. B. 彼特羅夫(1761—1834)做了一系列以謹慎和深思熟慮著稱的實驗，這些實驗用了“極為巨大的電池組”。在這些實驗的過程中，特別重要的是他首先發現了和記述了後來被稱為電弧的現象。很長一段時間，人們錯誤地將這一發現歸功於戴維，而他僅只在1810—1812年間才發現和描述了電弧的現象。在得到電弧之後，B. B. 彼得羅夫詳細地研究了它的性質，並指出可以用电弧來照明和熔化和焊接金屬。到現在，電弧的這些實際應用起着很重要的作用。

1815年B. B. 彼特羅夫被選為科學院院士。他在科學院中的繼承者是約內瓦城（現今的塔安城）人Θ. X. 楞次(1804—1865)，他是那個



时代最杰出的物理学家之一。1831年法拉第发现了电流的电磁感应现象,而在1832—1833年中,Θ X. 楞次就做了一系列非凡的实验,在这些实验中,他不仅阐明了感应电流的强度和衔铁绕组的线圈数(电流就是在这—绕组中感应而生的),和衔铁的截面等等的关系,并同时发现了一个定律,它确立起导体在磁场中运动时感应而生的电流的方向,和导体作这一运动时所发生的有质动力的方向之间的关系(见§79)。这个楞次定律,由于它的普遍和简单,直到今日还保有它的全部意义。

只有想象当时科学的情况才能够了解,在电磁感应现象发现后的次年,这一定律的发现是多么大的成就。要知道在1834年,物理学家李奇还曾认为和楞次定律恰好相反的定律是正确的;而在1839年,楞次不得不用实验来证明感应电流的性质和“伏打及伽伐尼”电流的性质是相同的,因而驳斥了物理学家戴·拉利夫等人相反的论断。

在楞次其他的工作中,必须特别指出他的非常精密而全面的关于电流放热的研究。楞次的这些研究肯定了三年之前焦耳所发现的定律的正确性;它们的意义十分重大,因而这一定律(见§35)常常称为焦耳-楞次定律。

楞次的某些工作是和卓越的发明家——电工技师B. C. 雅可必(1801—1874)——一起做的,雅可必是在1839年开始进科学院工作的。B. C. 雅可必建造了世界上第一架磁电机,这一磁电机在1838年得到实际的应用:它推动载有14个人的小船沿尼瓦河逆流而上。在1838同一年,B. C. 雅可必发明了电镀,这是整个电化学之祖。

十九世纪后半叶电学的发展和新的电的理论——电磁场论——的产生,以及为它的胜利而进行的斗争非常紧密地联系在一起,这种理论是以近距作用的原理为基础的。

一群杰出的莫斯科物理学家——A. Γ. 史托列多夫, H. A. 烏莫夫, П. H. 列別捷夫——不仅一开始就坚决地站在新理论的立场上(这一理论完全符合他们在物理上的世界观),并且在为新学说争取胜利的