

733691

3347

7/6842

ENERGY METHODS IN ELECTROMAGNETISM

电磁学中的能量法

[英] P. Hammond 著

李朗如 詹琼华 译

47

6842

华中工学院出版社

电磁学中的能量法

[英] P. 哈蒙德 著

李朗如 詹琼华 译

华中工学院出版社

ENERGY METHODS IN
ELECTROMAGNETISM

P. Hammond

Clarendon Press, Oxford, 1981

电 磁 学 中 的 能 量 法

〔英〕P. 哈蒙德 著

李朗如 詹琼华 译

责任编辑 李 德

华中工学院出版社出版

(武昌喻家山)

湖北省新华书店发行 各地新华书店经售

湖北省通城县印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 6.5 字数: 140,000

1984年1月 第一版 1984年1月 第一次印刷

印数: 1—5,000

统一书号: 15255—018 定价: 0.80元

内 容 简 介

本书是一本电磁学专著。全书共分七章，主要论述拉格朗日力学的能量分析法在电磁学问题分析与计算中的应用，阐明一种方法简明、准确度较高、又节省计算时间的确定电磁系统参数的新方法——“对偶能量法”，并附有计算实例。同时对现有的各种电磁场数值计算方法作了分析比较。

本书可供电机系的高年级学生、研究生、教师以及从事电工设备和电磁器件设计与分析的工程技术人员参考。

中文版序言

现代社会大量地依靠电气工程，而电磁学这门科学是电气工程的核心。对于研究电气系统及装置的设计和运行的人，必须要懂得这门科学。这门学科的伟大先驱们，如M. 法拉第和J.K. 麦克斯韦，主要依靠物理解，但他们的后继者给这种理论赋予了数学的语言。最近，数字计算已经大大地影响了这门学科。电磁学的一些现代处理方法给这门学科的影响主要是涉及到用数值方法求解某些微分方程。

本书的观点大不相同。书中认为，物理过程是基本的，数学方程是次要的；能量概念是核心思想，把电磁场看作是一个分布能量的系统。这样，力学概念可以用来解释电磁现象，可以把电磁学看作是力学的一个分支。这就大大地简化了这门学科，也简化了计算过程。因此，能量方法可以克服许多数值分析所遇到的困难。

我很高兴我的书将通过这个翻译本与中国读者见面。在朋友林金铭教授的帮助下，在武汉华中工学院对中国卓越的同行人作了三个星期的关于本书内容的讲学，对此，我至今仍有着美好的回忆。

P. 哈蒙德

1984.4.2.

译者前言

能量法用于力学中的分析与计算已有较长的历史了。但它在电磁学领域中的作用仍未得到充分发挥。许多电磁问题是与能量和力的计算有关的，所以从某种意义上说，可以认为电磁学是力学的一个分支。英国南安普敦大学电力工程系主任哈蒙德 (P. Hammond) 教授著的《电磁学中的能量法》一书，把能量法应用于电磁系统的分析与计算，提出一种确定系统电磁参数的对偶能量法。这种方法的优点是：对一个电磁参数范围未知的问题，它能以简洁的方法得到准确度较高的近似解，同时花费不多的计算时间；此外还可以处理某些非线性问题及涡流问题。

全书共分七章。第一章介绍电磁学的一些基本概念及其历史背景；第二章介绍分析力学（又称拉格朗日力学）的基本概念及分析方法；在第二章的基础上，第三章主要讨论能量法在电磁学中的应用；第四章介绍几个有关电磁学中通用的能量定理；第五章主要阐述作者提出的一种计算参数新方法——对偶能量法，并有计算实例；第六章讨论了机电耦合系统的能量转换问题；第七章归纳了电磁问题现有的各种计算方法，并作了分析比较。1982年5月哈蒙德教授应邀来华讲学时，曾将该书主要内容作了详细介绍，引起了参加听讲的我国高等学校、科研及工厂等方面从事电磁学问题的教学、科研及实际技术工作人员的极大兴趣，现在我们把它的翻译出来，以飨读者。本书可供电机、电器专业的高年级学生、研究生，从事电磁学教学的教师以及从事电工设备、电磁装置设

7A175/67

计与分析的工程技术人员参考。

本书根据英国牛津Clarendon出版社1981年版本译出。由李朗如与詹琼华合译，其中序言、第一、四、六、七章由李朗如翻译，第二、三、五章由詹琼华翻译，全书由李朗如整理统一。林金铭教授对译稿进行了认真细致的审修，在翻译过程中，还得到周克定教授的热情帮助和指导，在此一并表示衷心的感谢。

由于我们水平不高，错误之处在所难免，望读者不吝批评指正。

译 者

1983.9.于武汉

目 录

序 言	(1)
主要符号表	(3)
1. 电磁学和力学	(5)
1.1. 导 言	(5)
1.2. 历史背景	(7)
1.3. 电磁基本概念	(17)
2. 力学中的变分原理	(29)
2.1. 虚功原理	(29)
2.2. 拉格朗日乘子	(34)
2.3. 能量守恒	(37)
2.4. 坐标与动量	(42)
2.5. 对偶性和能量	(46)
2.6. 能量和余能	(49)
附录	(53)
3. 电磁学中的变分原理	(56)
3.1. 麦克斯韦的分析	(56)
3.2. 电网络	(61)
3.3. 分布系统	(69)
3.3.1. 静电系统	(69)
3.3.2. 静磁系统	(76)
3.3.3. 具有稳定电流的电阻系统	(78)
3.3.4. 具有电感和电阻的时变系统	(80)
3.3.5. 电磁波	(84)
4. 几个通用的能量定理	(91)
4.1. 格林定理和静电系统的定义	(91)
4.2. 互能和格林函数	(94)
4.3. 静磁系统和格林定理的矢量形式	(98)
4.4. 安素定理	(102)
4.5. 汤姆逊定理	(104)
4.6. 构成汤姆逊定理基础的物理过程	(108)

4.7.	坡印亭定理.....	(117)
4.8.	以势表示的平衡和唯一性条件.....	(125)
4.9.	瑞利原理.....	(126)
5.	回路参数的上界与下界.....	(131)
5.1.	势能和动能.....	(131)
5.2.	静电系统能量的势能和动能公式表示法...	(133)
5.3.	拉格朗日乘子在生成凸泛函或凹 泛函中的作用.....	(135)
5.4.	用回路参数表示的静态系统能量.....	(137)
5.5.	静态系统中电阻参数计算的数值实例.....	(139)
5.5.1.	简单的电阻网络.....	(139)
5.5.2.	梯形导电板的电阻.....	(140)
5.5.3.	有中心孔板的电阻.....	(142)
5.6.	Z泛函的优化.....	(145)
5.7.	电容计算.....	(146)
5.8.	电感计算.....	(148)
5.9.	非线性问题.....	(152)
5.10.	载交流导体的电阻和电感计算.....	(153)
5.10.1.	大而扁导体的电阻和电感.....	(155)
5.10.2.	边界条件规定不合理的问题.....	(158)
5.11.	辐射电阻的计算.....	(161)
5.12.	传输线计算.....	(164)
6.	机电能量转换.....	(166)
6.1.	力和转矩的计算.....	(166)
6.2.	旋转轴在分析电机中的应用.....	(172)
6.3.	参数能量过程.....	(180)
7.	结束语: 电磁场计算方法的比较.....	(188)
7.1.	经验的重要性.....	(188)
7.2.	解析法.....	(189)
7.3.	松弛法.....	(190)
7.4.	有限差分法.....	(192)
7.5.	有限单元法.....	(193)
7.6.	积分法.....	(194)
7.7.	矩量法.....	(195)
7.8.	对偶能量法.....	(199)

序 言

电气设备及系统通常不是从电路参数观点就是从场的空间分布观点来进行论述的。本书将论及场与路之间的关系，此课题似乎较少受人们注意，却使我百思莫解。当我开始思考这个问题时，发现能量可能用来作为统一原则。但在我弄明白我所要寻求的概念就是“处于平衡状态的能量”之前，我曾不得不去研究变分力学。虽然我对这个课题的研究还很不完善，但我希望本书对正在探索这些问题的读者有所帮助。

某些人听到谈论这种探索可能感到奇怪。我就曾听说过这样一种说法：作为一门学科，电磁学已经完全“结束”了，因为麦克斯韦方程定义了所有可能知道的一切。虽然我非常敬重这些方程和发现这些方程的人，但我确信电磁学远未“结束”。麦克斯韦方程就象地图一样，它是请你去国外旅行的一张请柬，看地图和去国外旅行之间可是大不相同的事。即使粗略地读一下麦克斯韦的《电学与磁学》也会发现：与百科全书比较，这本书更象一本探索者的日记。

可能有读者认为“欲知梨子味，须得亲口尝”，而且认为从本书可能获得的进一步理解必须配上一些较完善的设计、计算方法。我赞同这种意见，并且希望本书在这方面也会是有用的。本书所备的相当多的计算例子，应足以使有兴趣的读者能够把能量法应用于解决他自己专业范围内的问题。

我谨向许多人，包括所有因其它事情来看我，而乐于承受要同我长谈关于电磁学的人致以谢意。这里仅列出其中几位的大名：已故教授茂林 (E. B. Moullin)，他在大约

三十年前首先与我共同积极进行电磁问题的研究，坎伯列尔 (G.K.Cambrell) 博士，他给我介绍了矢量空间代数；伊凡思 (F.J.Evans) 博士，是一位同行，他首先告诉我关于兰佐士 (Lanczos) 的《力学变分原理》；塞维尔教授 (M.J.Sewell)，他把自己关于凹、凸泛函方面的宝贵文章送给了我；珀曼 (J.Penman) 博士，他帮助我准备了在 IEE 会刊上发表的两篇文章；罗德里格兹-爱兹魁多 (G.Rodriguez-Izquierdo)，他深刻评论了上述两篇文章中提出的方法；戴维斯 (J.B.Davies)，华里尔 (D.R.Farrier)，以及塔弗纳 (P.J.Tavner) 几位博士阅读了打字原稿并提出了许多宝贵意见，以及史托尔 (R.L.Stoll) 博士，他是我多年的朋友和同事。还要感谢玛金小姐 (S.D.Makin) 的耐心和精湛打字，以及我的妻子在本书进行写作时忍受了电磁学充斥全家！

P.哈蒙德

1980年复活节

于南安普敦

主要符号表

A	作用量	T	动能, 转矩
A	磁矢势	U	势能
B	磁通密度	V	电势, 电势差
C	电容	W	能量
C	矢量函数	X	电抗
D	电通密度	Y	能量凸泛函
E	电场强度	Z	能量凹泛函
E	电动势		
F	力	a	加速度
G	焓, 格林函数	b	阻尼系数
H	磁场强度	f	力, 基函数
I	电流	g	电导, 源分布
J	电流密度	k	弹簧常数
J	惯性矩	m	质量
L	拉格朗日能量, 电感, 算子	p	广义动量, 正应力
M	互感	q	广义坐标
P	功率	$\dot{q}$	广义速度
P	矢量函数	r	电阻
Q	矢量函数	t	时间
Q	电荷	v	速度
Q^*	磁极强度	w	功函数
R	电阻, 无功功率	x	电抗

γ	传播常数
ϵ_0	自由空间介电常数
ϵ_r	相对介电常数
ϵ	$\epsilon_0 \epsilon_r$
λ, λ	拉格朗日乘子
μ_0	自由空间磁导率
μ_r	相对磁导率
μ	$\mu_0 \mu_r$
ρ	体电荷密度
ρ_m	体磁极密度

σ	面电荷密度
τ	切剪应力
ϕ	电标量势
ϕ_m	磁标量势
χ	标量势
ψ	标量势
ω	角频率
Δ	涡流集肤深度
Φ	磁通量
Ψ	电通量

1. 电磁学和力学

1.1. 导 言

本书的目的在于阐明从能量观点观察电磁现象的方法有许多可取之处。这种方法的优点有三：第一是简化了电磁学问题的概念体系；第二从能量观点出发制定特别简单的计算方法；第三是这些计算方法与测量方法有直接联系。本书将着重于第一和第二个优点，也就是概念与计算方面。由于电磁学问题范围广阔，同时由于作者的经验有限，因此，本书只打算作为一种观点的入门书，而不是作为实用结果的手册。然而，希望读者在应用本书方法于自己感兴趣的领域时，会发现对他很有帮助。

当然，必须直截了当地说，从能量观点考察电磁学原则上没有什么新东西。有关这个问题的书籍都谈了能量定理，例如汤姆逊定理(Thomson's theorem)，这将在第四章中详细讨论。然而，本书不同之处或许在于我们把这些能量定理作为核心，而能量法一般地则是作为非主要论述的课题。用个例子来说明我们想的是什么，假如考虑静电问题，常常认为应算出所研究区域的每一点处的场值。通常，这要求把区域细分为场参数的细小网孔，再借助于数值方法来计算这些场参数，当所有局部值收敛于实际值时，计算工作就算完成。这种方法的核心是点的势函数概念。我们认为这是一种不经济的方法，因为计算提供的数据对设备制造厂或者运行人员都未必有用，很少有什么人想知道势的分布。这种分布

必须用非常精细的探测器测量，而且即使如此，点函数也是测不到的。通常，要知道的仅是以电容表示的能量分布，而且是相当粗糙的分布就够了。本书的能量法有意地限制人们需要的数据，它把整个装置看作一个系统而研究其能量，而不是把注意力集中于点势。从系统处于平衡时的能量有极大值或极小值出发，我们便能获得能量分布的相当简单的近似。这种近似提供了准确值的上界限和下界限，从而建立起工程师对某个特殊实用课题所需要的可靠数据界限。

这里谈论的静电问题有广泛得多的用途。它同样很适用于静磁学以及与电磁感应和电磁辐射有关的问题，也同样很适用于网络问题，其中知道能量分布往往比知道所有电流和电压更为重要。从测量的观点来看，很明显能量级别(energy level)是关键因素。

我们希望上述这些关于计算和测量方面的见解会鼓励读者去研究能量方法，无需说明，能量法不可能代替其它计算方法。能量法无非是多一种方法供选择并可在某些适当情况下减少计算的复杂性。这意味着能量法可以用于几何形状复杂的问题以及场计算显得特别难的含有非线性参数的问题。这还意味着不太复杂的问题可以不用上大型计算机而上台式计算机以相应地减少时间和费用。对设计处于早期阶段尤为适用，待到设计完成时，再接着进行较详细与精确计算。

本导言不可能为电磁学中采用能量法可以简化课题的概念提出有说服力的论点，但以后各章情况会变得明朗化。对于主要作为一个教师的作者来说，研究方法在概念上简单明了最为重要。在普及应用中，理论往往不同于实际，但在科学及工程中理论与实际是密切结合的，使用没有理论后盾的设计公式既难令人满意也有危险。最多这在某一设备的设计

已经定型的地方是可行的，但是如要作一点变动，那就得回到基本原理。这样，这些原理应当尽可能的简单，因为这不仅使个别设计人员有可能去想出改进措施，而且也提供了一种能够交换思想的简单语言。

根据这个理由，本书的大部分内容涉及了向读者提供如何理解作为计算方法基础的电磁学物理原理。原理数目不多，理解也并不太难。掌握这些原理使我们能够比较各种不同过程和迅速获得对特殊设备的定性理解。这种理解具有大大节约精力的效果，因而可让人们有精力把新的发展问题放在心上。这会给人们带来精神稳定，特别是当人们要和迅速发展的学科打交道的时候，精神稳定是一宗宝贵财富。

不同读者的需要与兴趣是各不相同的。习惯上，一本书应当是从头读到尾，就是读侦探小说，人们也应该抵制想到最后一章去找结果的诱惑。但象这样一本书，却无须以任何特定方式进行阅读。学习通常是一个循环过程，为了弄懂一个事物，需要从不同角度看它许多遍。对于主要在应用方面感兴趣的读者，最好先直接翻四到六章，然后读第二和第三章；对学科结构感兴趣的读者，最好按本书顺序阅读。本书论述的深浅程度适合于大学本科学位课程最后一年的学生或供研究生学习使用，但也打算供实际工程师特别是与电磁装置的设计与分析有关系的工程师使用。

1.2. 历史背景

前已提到，本书不需要按严格顺序阅读，特别是本节，第一次阅读时无疑可以跳过去不看。本节只会使那些象作者一样的、被概念发展过程强烈吸引的读者感到兴趣。电荷及

场的概念是怎么来的？电磁学与物理科学的其它分支或者与一般科学的关系如何？要回答这些问题必须透彻了解各种概念的应用。我们继承了一套概念工具，假如我们去查询首先发明这种工具的人，在选择适当的工具方面是可能得到帮助的。由于作为学科基础的概念为数并不多，因此电磁学的语言使用的词汇也相当少，但这当然不意味着造出这种语言是件简单的事。的确，情况正好相反，我们所继承的这些东西是许多世纪来天才人物的劳动成果。虽然研究历史有点不怎么流行了，但是这会帮助我们获得洞察能力并且推陈出新。自然，造房子用的脚手架应该撤掉以显出整个建筑物的全貌，但是按此类推却会出差错，在物理概念的发展中，脚手架与建筑物则是同一回事。要得到概念上的透彻理解，最好是通过看看该学科的伟大先驱者们是以什么方式选择这些概念的。

虽然巴比伦人和埃及人在工艺和力学的实际应用方面取得了进步，但是他们没有系统地提出一般原理。对周围客观现象的连贯叙述是希腊人的天才，现在的科学观点大部分可以溯源于希腊人的思想。

希腊科学中的第一个伟大名字是米利都（Miletus）的泰勒斯（Thales，公元前约600年）^①。静电吸引的发现归功于他。“电”这个字便是希腊字“琥珀”衍生而来，这是在早年试验中采用过的材料。有趣的是近代才发展起来的学科竟在历史一开始就扎下了根。比泰勒斯静电效应观察更为重要的是他对科学思想的贡献。他提出“许多物理现象必定与单一的不变实体有关”的假定。根据这种大胆的猜想，他拟订一条从那时起就由科学承担起来的、也就是探索该不变实体

^① 希腊哲学家，几何学家，公元前640—548年——译注。