

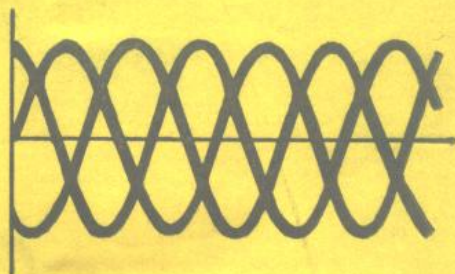
第一卷

离散系统

1

机电动力学

[美] 赫伯特 H. 伍德逊 著
詹姆士 R. 麦尔泽



机械工业出版社

TM301

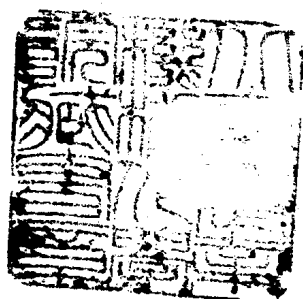
1 见 0442

机 电 动 力 学

第一卷 离散系统

[美] 赫伯特 H. 伍德逊 著
詹姆士 R. 麦尔泽

华中工学院电机教研室 译



机 械 工 业 出 版 社

2581/25

原书系根据美国麻省理工学院电机工程系和机械工程系
《能量处理》菲利浦·史泊恩讲座教授赫伯特 H. 伍德逊和
电机工程系副教授詹姆士 R. 麦尔泽多年讲授“机电学”的
讲稿修改出版的。该书将古典力学与电磁场理论结合在一起，
一起，比较广泛和深入地阐述了机电系统理论。全书共三卷。
本书为第一卷，计分六章，重点叙述集总参数模型，阐明场的
基本概念与主要类型旋转电机的工作原理和重要特性，各
章附有习题，在全书末还附有习题答案。

参加本书翻译工作的有林金铭、周克定、陶醒世、许实
章等多人，由林金铭主译。

本书可作为电机系高年级学生和研究生参考书，也可
供研究设计人员参考。

ELECTROMECHANICAL DYNAMICS

Part I, Discrete Systems

HERBERT H. WOODSON

JAMES R. MELCHER

JOHN WILEY & SONS, INC.,

NEW YORK · LONDON · SYDNEY, 1968.

* * *

机电动力学

第一卷 离散系统

[美] 赫伯特 H. 伍德逊 著
詹姆士 R. 麦尔泽

华中工学院电机教研室 译

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $15 \frac{3}{4}$ · 字数 343 千字

1982年12月北京第一版·1982年12月北京第一次印刷

印数 0,001—4,800 · 定价 1.60 元

*

统一书号：15033·5317

序 言[⊖]

五十年代初期，M. I. T.（麻省理工学院的英文简写，下同——译者）就放弃了“选课组”制度，而对电机系全体学生开始实行一种公共核心课程制度。核心课程制度的目的在当时和今天都是为学生提供在专业成长过程中所需的数学和科学基础，而不考虑他以后会在电机工程领域中选择哪一个行业。为适应这个要求，各门核心课程就不能在名词术语、方法技巧以及习题等方面只满足任一特定职业范围的需要。选科、研究生学习和各种专业活动才是专门知识的来源。

M. I. T. 电机系核心课程设置中，“机电学”是一门主干课。核心课程的设置是有过演变的；不但重点变化过，课题范围也有所加宽。在1954年采取新方针之前，机电学的基本教材是斐茨杰拉德(Fitzgerald)和金斯利(Kingsley)两人合写的《电机学》。随后，改用怀特(White)和伍德逊(Woodson)两人合写的《机电能量转换》，一直到1961年。由1961年起，我们又开始修订，写成了这本教材。这段时间里，通过年年（每年三学季）的教学，我们的讲义改写过好多遍。

我们总想把古典力学同电学和磁学基本原理综合成一门课程。使我们有可能把对电工领域中许多方面是关键性的力

⊖ 翻译时作了必要删节——译注。

学和电磁场理论的知识结合起来教给学生。

我们的取材宗旨是，无论学生将来想进一步研究哪一种形式的机电相互作用，即不论是旋转电机、等离子体动力学、生物系统机电学，或者是磁弹性学，我们都希望能在一定程度上给他以足够的基础。选材时，注意了保持协调和足够的深度，而最重要的是选择一些生动活泼的例题，使对于物理现实与分析模型之间的相互联系满怀兴趣的工科学生得到满足。可供选用的例题倒不少，但是能满足数学上易懂、且物理上可演示两方面要求，因而使学生“看得见摸得着”，以及使学生能把实地观察和符号模型直接联系起来的例子却不多。在电工领域中，建立对于物理现象极关重要的“感觉”而言，应该说机电学是最具优越性的。选择的实例恰当就能帮助人们据以判明对他极难加以观察的若干现象。

首先，让我们把本书的整个内容顺序浏览一番。采用这本教材的前提是，学生在静电学和静磁学方面已有一定的基础。因此，第1章和附录B基本上只是起到明确我们起点的一种复习作用。

第2章把电感和电容的概念一般化，这对论述机电系统是必要的。这一章中还简述了刚体力学的一些内容，因为如今除了一年级物理学中的质点力学外，很多教学计划中已不再设置力学课了。第2章的某些基本概念在第3章中又复述一遍，以便于明确集总参数系统中机电耦合的某些性质，并获得描述集总参数系统动力学的微分方程。

接着，在第4章中采用第2、3两章的方法、技巧来研究旋转电机：定义了物理模型、写出了微分方程、把电机分了类、求得并讨论了它们的稳态特性。把旋转电机收进本书并单列一章，不仅因为旋转电机具有技术上的重要性，而且

因为旋转电机中有着集总参数机电系统各种现象的丰富实例。

第5章通过实例来专门研究集总参数系统的动力学行为。实质上,所有机电系统在数学上却是非线性的,但是,线性模量模型对于研究平衡状态的稳定性和平衡状态附近动态行为的性质仍然是有效的。本章的后一半发展了机电学范围内的古典势阱(Potential well)运动和损耗优势动力学。研究非线性动力学的这些方面,使我们在对例如通量守恒和状态函数的物理意义进行深刻分析时,有可能把线性模型看得更清楚。

第6章起,从集总参数系统进入连续媒质系统,讨论了处于相对运动的观察者如何定义和测定各场量以及物质运动对电磁场的各种有关影响。在这一方面,我们认为直流旋转电机是最易于理解的。肯定地说,直流旋转电机是运用场变换式的一个优良例证。

我们必须知道激励和运动如何影响电场和磁场。这是任何连续媒质机电学问题的一部分。在似稳系统中,电荷和电流的分布是受磁场扩散和电荷弛豫(Relaxation)控制的,这是第7章的主题。在第7章中,用简单的例子把重要的磁场扩散或电荷弛豫情况孤立出来,以便更好地理解与它们有联系的物理过程。

第6章和第7章阐明在既定的物质运动条件下连续媒质机电系统的电方面。至于机械方面则将在第8章中研究电致作用力(Force of electrical origin)和磁致作用力的力密度时加以叙述。在许多系统分析中,麦克斯韦应力张量都是一个颇为有用的概念,我们也引用了。对张量的各种有用特性的探讨为在后面弹性与流体媒质中采用机械应力张量这个概

念准备一个台阶。

到此，应该加进研究连续媒质机电学的另一要素——机械媒质。因此，第9章中讨论了简单的弹性连续媒质——细杆的纵向运动、圆线与薄膜的横向运动，我们用这些模型来研究简单连续媒质的机械运动（非色散波），这种机械运动是由边界处的机电作用激发的。

第10章中，在连续媒质的基础上，把弦或膜跟电场和磁场耦合起来，并研究各种不同的合成动力学行为。进行论述的统一线索是色散方程（dispersion equation），色散方程联系着复数频率 ω 和复数波数 k 。当没有物质运流现象时，可以存在简单的非色散波、截止（或衰减）波、绝对不稳定性以及扩散波。物质运流对衰减波和振荡以及对波放大的影响是与电子束、等离子体动力学有密切联系的课题。在研究波的传播时，我们引用了一个方便的工具——特性线法。

第11章中，第9章和第10章的概念和方法被推广到三维系统，采用了张量概念来讨论应变位移和应力-应变关系，且给出了简单的三维弹性学的机电实例。

第12章转到另一种机械媒质——流体。首先研究具有无粘滞性、不可压缩流体时的机电相互作用，以不多的篇幅来明确基本现象。这里，介绍了磁流体动力学（MHD）能量转换的一些基本观念，这种能量转换是在导电流体流经横向磁场时发生的。本章还讨论了电场和流体之间的相互作用，并以离子拖曳（Ion drag）现象作为实例。除了这些基本的导电过程以外，又探讨了流体中极化和磁化的机电后果，演证了为什么“浸没”于磁场中的高度导电流体会传播阿勒芬波（Alfvén waves）。

在第13章里，流体模型增加了可压缩性条件。这正如传

导式磁流体动力机械所演示的那样，压缩性对机电行为具有显著的影响，可压缩性的存在使流体能传播纵向干扰（声波）。横向磁场和高的电导率则使这些干扰变性而成为磁声波。

最后，第14章，流体模型又增加了粘滞性，以便研究和稳定流之间的机电相互作用情况。哈特门流（Hartmann flow）演示了粘滞性对直流式磁流体动力机械的影响。

作者希望本书不至于只是多了一本电工数学，或者多了一本旋转电机、换能器、延迟线[⊖]、磁流体动力变换装置等技术方面的书，而希望它是一本把数学、物理以及最重要的工程技术等综合成一体的书。

本书所综合的材料可以有几种不同的使用方式。宾夕法尼亚大学的 C. N. 魏根迪（C. N. Weygandt）和 F. D. 克托勒（F. D. Ketterer）两教授用来开出两门课，一门为集总参数机电学，它限于取用第1到第6各章和附录B，以代替电机工程系课程设置中传统的电机学，并为下一学季的另一门选课（包括第7和以后各章）提供必要基础。伊利诺斯大学的 C. D. 亨都力克斯（C. D. Hendricks）和 J. M. 克罗来（J. M. Crowley）两教授采用本书的前面十章（但删去第7章的大部分内容）的体裁，讲授了一个学季。密执安大学的 W. D. 格蒂（W. D. Getty）教授使用另一套讲义讲授一学期的集总参数机电学，因此他仅用本书的前面几章给学生作为复习材料，而把本书后面各章作为一门一个学季课程的教材。

M. I. T. 的课程设置似乎总在变动，但在可以预见的

⊖ 这是一种使信号传输时延迟的电气器件——译注。

将来，本书的第1到第10章的大多数内容仍会是核心课程的组成部分，当然它的编排方式可能发生不断变化。在1967年秋季，我们曾给三、四年级学生开出一门一个学季的课程，讲授第1到第10章，但第4到第6章中有关旋转电机的内容则为选用。我们认为，本书内容既可为研究生的早期研究工作提供基础知识，也可以作为好几门与机电学有关课程的启蒙教材。

在准备本教材的过程中，我们发现课堂表演和电影教学无论从启发性和加深理解两方面都是很有帮助的。我们体会到，如果希望学生对某一特殊现象有所领悟，最好由教师搞点表演试验，而让学生专心看清楚现象，这要比让学生自己去做试验，弄得他老在那儿接错线和烧保险丝好得多。通常，最简单的那些试验是最成功的——这些倒是可以给学生自己摆弄仪器仪表的机会。每个学生应该“拿起一把铜斧，亲手剁碎几根磁力线”，否则他将永远不会真正欣赏这门课程。我们还感到，有些较复杂的演示，要保存起来既困难，也不经济，用电影每学期重放一次效果很好。除了我们自己有一些短片外，已出了三部与本书有关的职业性影片，这三部影片是由美国国家科学基金会批准，由麻省牛顿教育发展中心为电机工程影片全国委员会摄制的，片名是：

同步电机：机电动力学，H. H. 伍德逊著；

复合波 I：传播、衰减与不稳定性，J. R. 麦尔 泽著；

复合波 II：不稳定性、运流与放大，J. R. 麦尔泽 著。

还有另一部已在开拍。此外，由教育发展中心根据流体力学影片全国委员会和大学物理影片拍制计划而生产的其他一些影片也是有用的，前一套影片中，由 A. 塞克利夫 (A.

Shercliff) 著的《磁流体动力学》值得特别注意。

本书装订成三卷^①，编了连续页码，各卷可以单独使用，也可以任意组合使用。第一卷（包括第1到第6共六章）的重点是集总参数模型，其中详细阐明场的概念，作为后面学习的基础。第二卷（包括第7到第10等章）逐步展开关于运动媒质和场之间的相互作用，并提出简单的力学-机械模型，用以阐明连续媒质机电系统的动力学问题。第三卷（包括第11到第14各章）则叙述三维弹性力学和流体动力学，并侧重于涉及到相应机械模型的机电动力学现象

赫伯特 H. 伍德逊

詹姆士 R. 麦尔泽

1968年1月 于麻省剑桥

① 本书三卷有相同的“序言”，仅最后一段稍异，此处已将第二卷、第三卷中不同部分（即其内容重点）一并译此，后面两卷将不再译刊“序言”——译注。

目 录[⊖]

第一卷 离散系统

第1章 导言	1
1.0 概述	1
1.0.1 应用范围	2
1.0.2 本书目的	5
1.1 电磁理论	6
1.1.1 微分方程	7
1.1.2 积分方程	11
1.1.3 电磁力	14
1.2 小结	15
第2章 集总参数机电元件	17
2.0 概述	17
2.1 电路理论	18
2.1.1 广义电感	19
2.1.2 广义电容	33
2.1.3 小结	41
2.2 力学	42
2.2.1 机械元件	43
2.2.2 机械运动方程	59
2.3 小结	65
第3章 集总参数机电学	72
3.0 概述	72

⊖ 仅译出第一卷部分——译注。

3.1 机电耦合	72
3.1.1 能量分析	76
3.1.2 电致机械力	80
3.1.3 能量转换	95
3.2 运动方程	101
3.3 小结	107
第4章 旋转电机	124
4.0 概述	124
4.1 均匀气隙电机	125
4.1.1 微分方程	128
4.1.2 转换平均功率的条件	132
4.1.3 两相电机	134
4.1.4 气隙磁场	137
4.1.5 小结	141
4.1.6 电机型式分类	143
4.1.7 多相电机	172
4.1.8 电机极数	176
4.2 凸极电机	180
4.2.1 微分方程	181
4.2.2 转换平均功率的条件	185
4.2.3 对不同类型电机中凸极的讨论	187
4.2.4 多相凸极同步电机	188
4.3 小结	198
第5章 集总参数机电动力学	215
5.0 概述	215
5.1 线性系统	216
5.1.1 线性微分方程	216
5.1.2 平衡、线性化和稳定性	219
5.1.3 物理近似	251

5.2 非线性系统	259
5.2.1 保守系统	260
5.2.2 损耗优势的系统	278
5.3 小结	285
第6章 场与运动媒质	305
6.0 概述	305
6.1 场变换	309
6.1.1 磁场系统变换式	316
6.1.2 电场系统变换式	321
6.2 边界条件	324
6.2.1 磁场系统边界条件 ¹	328
6.2.2 电场系统边界条件	336
6.3 运动物质性能关系式	344
6.3.1 磁场系统性能关系式	345
6.3.2 电场系统性能关系式	351
6.4 直流旋转电机	354
6.4.1 换向器式电机	355
6.4.2 单极电机	378
6.5 小结	383
附录 A 常用符号汇总	399
附录 B 电磁理论复习	406
B.1 基本定律和定义	406
B.1.1 库伦定律、电场和力	406
B.1.2 电荷守恒	410
B.1.3 安培定律、磁场和力	412
B.1.4 法拉第感应定律和电位差	416
B.2 麦克斯韦方程	419
B.2.1 电磁波	420
B.2.2 似稳电磁场方程	427

B.3 宏观模型和性能关系式	435
B.3.1 磁化	435
B.3.2 极化	437
B.3.3 电传导	440
B.4 积分定律	442
B.4.1 磁场系统	443
B.4.2 电场系统	448
B.5 读物推荐	449
附录C 第一和第二卷中数学恒等式和常用定理汇总	451
附录 H-1 第一卷习题答案 [⊖]	453

⊖ 本答案根据原作者之一、现 M. I. T. 电机系教授麦尔泽 先生惠赠的习题资料摘译——译注。

第1章 导 言

1.0 概 述

人首先是生存于机械环境中的一个机械实体。人的日常生活习惯主要受到诸如能多快地进行运输和取得食品这一类问题的支配；而浏览一页读物所花的时间、或者讲话或打字的速度这一类机械性的动作情况构成了他与环境之间的交往关系。其次，人的生活水准高低则是对增进人的体力在改善运输和在为先进社会所需的各种工业生产过程方面所起作用的反映。

从这些想法可以引出两点主要论断。第一，人本身的官能在一定时期内和有限规模上起作用。因此，早在公元前500年，希腊人观察和记载了电和磁对有重物体的机械作用力，而在十九世纪，电学和磁学基于人本身的观察作为古典科学得到了充分发展。库伦用电扭秤进行测量的结果发表了他的平方反比定律；象磁针这样的有重物体的磁作用力曾是奥斯特和安培进行实验的依据。这些机电实验组成了近代电学和磁学理论的起源。法拉第和麦克斯韦把静电学和静磁学两门学科统一为一门动力学理论，这门理论所预言的现象大多超出了人的直接观察能力。迄今，我们认识到电磁场理论不仅包含那些最先启示电场和磁场存在的一些机电效应，并且包含涉及无线电波和x射线的许多辐射效应。不过，当人控制了这些现象，检测到它们的存在，而把它们很好地加以利用时，最经常地还是借助于某种型式的机电相互作用来达

到目的——从启闭一只开关的简单动作直到遥控一台带有电传打字机的计算机。

由此引出的第二点主要论断是，人用来满足进行运输和工业生产过程需要的原动力主要是由电能转换成的机械能。电形式的能量实质上没有什么用途，虽说最大和发展最快的经济部门是电力工业企业，而且它的收入来源就是出售电能。这雄辩地证明了电能易于转换成种种形式的能，因而它有助于在机械环境中生存的人。一条 60 赫的供电线路能够同时供给轧机、电视台、数字计算机、地铁电机车和许多其它使人们生活得更为丰富、舒适的系统和设备的能量需要，这真是不平凡。因为人需要机械来帮助，因此上述例子中大多数少不了机电能量的转换作用。

只要工程师与为人类需要服务的电科学发生了联系，就必定要涉及机电现象。

1.0.1 应用范围

由于换能器起着如此多的日常有益作用，所以，它是机电动力学应用中最为人们熟悉的例子。这种器件对于操作诸如自动洗涤机、电动打字机和电力断路器等是必不可少的，它把电信号转换成用来操作开关的功能。这可能是一只普通开关，也可能是一只能断开载流达 30000 安培、而 2 毫秒后将承受 400000 伏的线路的开关。电话受话器和高保真度扬声器是熟知的换能器；还有与此相近但较少为人所知的水下通信用高能声纳天线、能使整条宇宙飞船随着录制的火箭噪声而摇摆的高精度振动台等。

机电换能器在工业生产过程自动控制和运输系统中起着重要作用，在这些地方，最终目的是要控制一个机械变量，例如钢板的厚度或一列火车的速度。当然，换能器也可以做

成把机械运动转换成电的信号，电唱机的唱头心座就是一个例子；象电话送话器、微音器(麦克风)、加速度计、测速计和动力式压力计等器件也是上述例子。

并非所有的换能器都做成只提供机械的输入或输出的。机械(或机电)滤波器是一个信号处理装置的例子，这种装置利用机械回路^①在频率相当低时其 Q 值极高的优点。滤波器、延迟线以及能在甚至 30 兆赫以上工作的逻辑器件等都是近年来对压电和压磁材料中存在的机电效应提出的研究对象。

原始能源通常表现为机械能的形式：受热气体在其膨胀时所具有的动能和水在高处所具有的势能。机电学在从这些原始能源获得大量电能方面起着关键作用。这种作用由称为旋转电机的一种大型磁场式装置来完成。目前，单台发电机能够发出1000兆瓦的功率（按零售价格每度2美分计算，从这台机组每小时可收入20000美元），并且随着电力系统的增大将需要容量更大的发电机（这也带来一些前所未有的问题）。这种需求可由这样一个事实来说明，即1960年美国全国高峰负荷是138000兆瓦，1980年预期将达到493000兆瓦，20年中增长250%以上。

这些电力的大部分被用于驱动种类十分繁多，做着大量有益工作的电动机，从带动只需要几分之一瓦功率的电钟指针直到带动需要20兆瓦的轧钢机。

由于人们需要大量的能，因此，寻找更有效的生产电能的方法（以节约自然资源）和采用价格低廉的设备（以节约资本）就成为共同关心的事。看来，使用膨胀热气体作为运

① 机电滤波器见第三卷，11.5.2节，机械回路 (Mechanical Circuit) 见2.2.1节——译注。