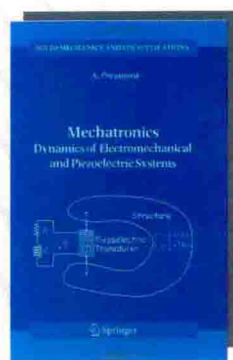


机电耦合系统 和压电系统动力学

Mechatronics Dynamics of Electromechanical
and Piezoelectric Systems

[比]安德·波蒙 著
李琳 范雨 刘学 编译



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

Mechatronics Dynamics of Electromechanical and Piezoelectric Systems

机电耦合系统和压电系统动力学

[比] 安德·波蒙 著
李琳 范雨 刘学 编译

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

哈密顿原理是动力学理论中的一个普遍而基本的定律。本书基于该理论给出对机电耦合系统和压电系统动力学的分析理论与分析方法。主要特点一是由浅入深、由表及里地介绍了机电耦合系统的分析原理;另一个特点是理论经典、内容新颖,包含了相关研究领域的许多前沿热点问题。在内容组织上,本书首先将哈密顿原理应用于电学系统,然后进一步推广至机电耦合系统,在此基础上引入压电材料结构在振动控制中的最新研究进展并对其进行耦合动力学分析,介绍了包括基于压电分支电路的被动阻尼减振技术、负电容的概念、自感知作动器原理等。这样循序渐进的安排使得新进入基于压电材料进行振动控制领域的研究人员,特别是高校的研究生很容易上路。

本书可供航空航天工程、船舶工程、汽车工程、土木工程、机械工程等领域从事振动主被动控制的研究生、工程设计人员及科技工作者学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

机电耦合系统和压电系统动力学 / (比)波蒙著;
李琳,范雨,刘学编译. -- 北京:北京航空航天大学出版社, 2014. 6

书名原文:Mechatronics dynamics of electromechanical
and piezoelectric systems

ISBN 978-7-5124-1550-8

I. ①机… II. ①波… ②李… ③范… ④刘… III.
①机电系统—耦合系统②压电器件—系统动态学 IV.
①TM7②TM384

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 119271 号

版权所有,侵权必究。

Translation from the English language edition: Mechatronics, by A. Preumont
Copyright © 2006, Springer Netherlands

Springer Netherlands is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2014-3286

机电耦合系统和压电系统动力学

[比] 安德·波蒙 著

李琳 范雨 刘学 编译

责任编辑 李宁 蔡喆

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316524

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

开本:710×1 000 1/16 印张:9.75 字数:208 千字

2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5124-1550-8 定价:29.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

请记住,我的朋友,如果你仔细想一下就会发现,其实对某种理念的坚信不疑并不意味着对其有深刻理解。深刻理解或切身体会反而来自对曾经司空见惯、熟视无睹的现象的重新思考。

(引自 德尼·狄德罗 与 让·勒朗·达朗贝尔 的对话)

译者序

近现代工程技术的研究者似乎都面临这样的现实：一方面随着研究工作的深入开展，研究对象越来越复杂，具有越来越多的特性；另一方面，又总是希望能对研究对象的特性达到某种既简洁又不失普适的把握。本书正是机电耦合动力学领域的一部化繁为简、举重若轻的著作，其中不仅阐述了机电耦合系统领域的重要知识，更蕴含着如何梳理这些知识的新思路——正是这一特点激励译者将它分享给该领域的本科生、研究生、工程设计与研究人员。

机电耦合系统及其分析方法是本书的主题。机电耦合特性在众多工业、工程中都有着广泛的应用，如传感器、作动器和换能器等。近年来，基于压电材料、形状记忆合金、磁致伸缩材料等智能材料的状态监测、振动控制、无线传感、能量收集、微机电系统的研究与设计更是成为了新的研究热点。电-磁-机耦合、电-热-机耦合、结构-控制耦合等原理已成为现代结构系统设计不可缺少的理论基础，也是现代结构工程师必备的知识。

为了深刻而简洁地阐述这一主题，作者安德·波蒙教授从经典的力学原理（哈密顿原理）及电学原理（基尔霍夫定律等）出发，深入浅出地介绍了融合机-电-磁耦合特性的广义哈密顿原理，详细推导并给出了基于能量泛函的磁-机-电耦合系统的拉格朗日动力学方程。在此基础上，还特别给出了在实际中应用最广泛的压电系统（包括压电层合板、压电复合梁、压电模态滤波器/传感器/作动器等一系列实际结构）的建模、动力特性分析的一般方法和结论。作为一本应用理论方面的专著，本书还以相当的篇幅论述了压电系统的一个具有重要应用前景的前沿研究分支——被动和主动阻尼技术。这些论述既展示了该领域前沿的研究动态，更突出展示了本书所建立的分析力学框架的“威力”。

本书的初译始于2011年末，李琳负责前言及第1和第2章，刘学负责第3和第4章，范雨负责第5和第6章。李琳负责每一章的斟酌和第1、2、5、6章的复译，范雨负责第3、4章的复译。译稿于2012年夏在译者所在的实验室内作为参考资料进行试读，期间李超老师、王培屹、邓鹏程、刘久周等研究生为本书的翻译提出了宝贵的建议。译者还要特别感谢北航出版社的蔡喆主任和责任编辑李宁对本书的重要贡献。由于译者的水平有限，翻译中难免有生涩难懂甚至错误之处，敬请读者指出并原谅。

李琳

2013年3月，于北京

前 言

我的前一部有关结构振动主动控制的著作 *Vibration Control of Active Structures*, 是为在结构动力学与自动控制领域之间搭建一座跨越鸿沟的桥梁而作。在该书中, 为了强调控制与结构之间的相互作用, 经常采用专门针对特定问题而建立的、具有直观性的模型, 而缺少对于能量传导与转换机理方面准确且深入的论述——这对主动结构来说是非常重要的和基础的。本书的最初写作目的是通过对于该主题的一种更为严谨的论述, 对前一部书进行更新, 纠正偏颇。然而, 随着工作的展开, 该主题所涉及的内容越来越广, 本身已经可以构成一部专著了。

基于哈密顿-拉格朗日方程, 本书试图给出一种用于分析机电耦合系统和压电系统的统一方法。关于能量传导机理以及机电耦合系统的哈密顿原理, 在一些专著中已有论述(如 Crandall 等人编著的 *Dynamics of Mechanical and Electromechanical Systems*, 1968); 然而就作者所知, 目前还没有一本系统论述压电系统动力学的专著。

本书的前三章, 分别给出了机械系统、电路系统和机电系统的动力学分析方法, 并将哈密顿原理以两种等价的表述推广至机电耦合系统。除少数几个示例外, 这一部分的理论均源于已有的文献。后三章论及压电系统: 第 4 章分析了离散的压电换能器以及具有压电换能器的结构, 所采用的方法类似于前述章节, 需要恰当地给出系统能量和余能函数; 第 5 章对连续系统进行了分析, 主要针对压电梁和压电层合板, 重点在于压电层与基体结构的相互作用(压电载荷、模态滤波等); 第 6 章从主动、被动阻尼的视角考察了能量的转换, 以一种统一的方法比较了各种主动、被动振动抑制效果, 还探讨了使能量转换最大化的途径。

本书意在为希望获得机电耦合系统或压电换能器相关知识、并更好地理解机械响应与电学边界条件之间微妙关系的机械工程师(研究人员及研究生)提供相关知识。写作本书的动力是约瑟夫·亨利教授(Prof. Joseph Henry)曾经给贝尔(Alexander Graham Bell)的那句著名的建议——后者在 1875 年就其电话实验中出现的询问亨利教授, 并感叹缺乏电学知识难以解决机械设计过程中的问题时, 亨利简单地答复道“那就去学吧!”。哈密顿-拉格朗日方程的魅力就是: 一旦采用了恰当的能量与余能函数, 所有的电磁力(电场、洛伦兹力……)及多物理场本构方程中的问题都可以迎刃而解了。

致谢

首先, 我要感谢我现在和过去的研究生以及合作者, 感谢他们的热情和好奇, 他

们提出的许多问题对本书具有指导意义。特别要感谢的是 Amit Kalyani、Bruno de Marneffe, 还有 Avraam 和 Arnaud Deraemaeker, 他们帮助我准备手稿、绘制了大部分插图; Series 编辑和 Gladwell 教授以及我的朋友 Geradin, 他们对修改这本书提出了有用的建议。我还要感谢 ESA/ESTEC, EU, FNRS 和 SSTC 的 IUAP 项目对于比利时自由大学主动结构实验室提供的慷慨资助。这本书的一部分写于法国贡比涅科技大学(罗伯瓦尔实验室), 当时我正在那里做客座教授。

符号约定

在写一本书的时候, 总会出现一些符号的问题, 特别是当人们想阐述多个学科主题时, 这些问题就更为突出, 因为它要涉及多个长期没有关联但各自有一套完善的符号系统的领域。本书也不例外, 因为机电一体化系统这个主题涉及分析力学、结构力学、电路、电磁学、压电和自动控制等多个领域。

本书的符号遵循以下规则: (1) 我们尽量使用《IEEE 压电标准》(IEEE Standard on Piezoelectricity)。(2) 当出现一些歧义时, 我们会明确标出标量、向量和矩阵之间的区别; 在文中也会解释它们的意义。在一些地方, 向量会标注为 $\{\}$ (如 $\{T\}$ 代表应力向量, 而 T_{ij} 代表应力张量)。(3) 偏微分会用 $\partial/\partial x_i$ 或者用下标 i , 标注的选择尽量与经典教材一致。同样, 本书将采用重复下标表示求和的约定(爱因斯坦求和约定), 尽管有时在上下文并未提到这一点。

Andr'e Preumont 安德·波蒙

Brussels, 12, 2005 布鲁塞尔 2005 年 12 月

本译著符号说明

符 号	意 义	首次出现
p	质点动量	(1. 1)
	分布载荷	(1. 32)
f	外力	(1. 1)
	某个函数或方程	(1. 13)
t	时间	(1. 1)
T^*	动余能	(1. 7)
T	应力	(1. 78)
	动能	(1. 3)
	换能器常数	(3. 28)
T_{em}	机-电传递系数	(3. 111)
V	势能	(1. 25)
	电势差	(3. 97)
v	速度	(1. 5)
	横向位移	(1. 29)
v'	v 关于空间坐标的一阶导数	(1. 33)
v''	v 关于空间坐标的二阶导数	(1. 30)
Q	广义力	(1. 21)
	品质因子	(4. 119)
	电量	第 5 章
q	广义坐标	(1. 13)
	电量	(2. 1)
a	系数	(1. 16)
A	面积	(1. 31)
x	坐标方向	(1. 2)

	离散系统的位移向量	(1. 47)
\ddot{x}	x 关于时间的二阶导数	(1. 22)
\dot{x}	x 关于时间的一阶导数	(1. 22)
δq	关于 q 的虚位移	(1. 17)
R	质点合力	(1. 20)
	电阻	2. 2. 3 节
C'	与时间无关的常数项	(1. 23)
w	某个方向的位移	1. 10. 5 节
W	功	(1. 24)
W_e	电能	(2. 2)
W_e^*	电余能	(2. 6)
W_m	磁能	(2. 12)
W_m^*	磁余能	(2. 15)
V. I.	变分算子	(1. 26)
L	拉格朗日函数	(1. 28)
	电感系数	(2. 11)
l	长度	1. 6 节
E	弹性模量	(1. 30)
	电场强度	(3. 24)
e	电势差	(2. 3)
i	索引(下标)	(1. 20)
	电流	(2. 1)
I	转动惯量	(1. 30)
S	应变	(1. 30)
s	拉普拉斯算子	(3. 96)
ρ	密度	(1. 31)

M	质量矩阵	(1.47)
	弯矩	(5.30)
<i>m</i>	质量	(1.5)
K	刚度矩阵	(1.48)
<i>k</i>	刚度	1.7.3 节
	机电耦合系数	(4.5)
<i>D</i>	耗散函数	(1.51)
	电位移	(4.1)
<i>d</i>	压电材料的机电耦合系数	(4.2)
C	粘滞阻尼矩阵	(1.54)
	电容	(2.4)
<i>c</i>	线弹性材料的本构系数	(1.81)
Ω	转速	1.7.4 节
ω	频率	1.7 节
ω_i	模态频率	(5.22)
ω_0	固有频率	1.7.4 节
ω_n	固有频率	1.7.5 节
<i>U</i>	应变能函数	(1.79)
<i>u</i>	某个方向的运动位移	1.7.5 节
G	陀螺力矩矩阵	(1.55)
	频响函数	(5.37)
<i>g</i>	重力加速度	1.6 节
	动态增益	(5.39)
	拉格朗日乘子	(1.60)
	磁通量	(2.10)

	电磁波波长	3.2 节
Ψ	假设模态函数	(1.73)
\mathbf{B}	磁场强度	(3.24)
g	反馈增益	(3.88)
b	换能器坐标变换矩阵	(4.23)
	宽度	(5.13)
Z_e	电阻抗	(3.111)
Z_m	机械阻抗	(3.112)
ϵ^T	常应力下的介电常数	(4.1)
δ	伸长量	(4.27)
	克罗内克算子	(5.22)
H	电焓密度	(4.78)
	模态动态放大因子	(5.40)
h	几何尺寸	(5.55)
ζ	阻尼比	(4.118)
ϕ	模态函数	(5.19)
Φ	振型矩阵	(6.32)
μ_i	模态质量	(5.22)
z_i	模态自由度	(5.19)
\mathbf{N}	力矩	(5.52)
y	直角坐标系坐标	1.3 节
	电压输出	(6.1)
Ψ	闭环传递函数	6.10.2 节

目 录

第 1 章 机械系统的拉格朗日动力学	1
1.1 引 言	1
1.2 运动状态函数	1
1.3 广义坐标,动力学约束	3
1.4 虚功原理	6
1.5 达朗贝尔原理	7
1.6 哈密顿原理	8
1.7 拉格朗日方程	11
1.7.1 线性、非陀螺、离散系统的振动	13
1.7.2 耗散函数	13
1.7.3 例 1:具有滑动质量的单摆	14
1.7.4 例 2:旋转摆	15
1.7.5 例 3:旋转的弹簧质量系统	16
1.7.6 例 4:陀螺效应	17
1.8 有约束的拉格朗日方程	19
1.9 守恒定律	20
1.9.1 雅可比积分	20
1.9.2 隐性坐标	21
1.9.3 实例:球摆	22
1.10 连续系统	22
1.10.1 瑞利-里兹法	23
1.10.2 一般连续系统	24
1.10.3 格林应变张量	24
1.10.4 预应力产生的几何应变能	25
1.10.5 具有轴向载荷的梁的横向振动	26
1.10.6 实例:受压筒支梁	27
1.11 参考文献	27
第 2 章 电路的拉格朗日动力学	28
2.1 引 言	28
2.2 电路元件的本构方程	28
2.2.1 电 容	28
2.2.2 电 感	29
2.2.3 电压源与电流源	31
2.3 基尔霍夫定律	31

2.4 电路系统哈密顿原理	32
2.4.1 哈密顿原理,电荷格式	33
2.4.2 哈密顿原理,磁通量格式	34
2.4.3 讨论	35
2.5 电路系统拉格朗日方程	36
2.5.1 拉格朗日方程,电荷格式	36
2.5.2 拉格朗日方程,磁通量格式	36
2.5.3 例 1	37
2.5.4 例 2	38
2.6 参考文献	40
第 3 章 机电耦合系统	41
3.1 引言	41
3.2 换能器的本构方程	41
3.2.1 可动极板电容	41
3.2.2 可移动芯棒电感	43
3.2.3 动圈式换能器	45
3.3 哈密顿原理	47
3.3.1 位移-电量格式	47
3.3.2 位移-磁通量格式	48
3.4 拉格朗日函数	48
3.4.1 位移-电量格式	48
3.4.2 位移-磁通量格式	49
3.4.3 耗散函数	49
3.5 举例	50
3.5.1 电磁活塞	50
3.5.2 电磁扩音器	51
3.5.3 电容式麦克风	52
3.5.4 惯性质量作动器	54
3.5.5 电动力隔振器	56
3.5.6 天钩阻尼器	57
3.5.7 地震监测仪	58
3.5.8 单轴式磁悬浮系统	59
3.6 广义机电耦合换能器	61
3.6.1 本构方程	61
3.6.2 自感应	61
3.7 参考文献	62
第 4 章 压电系统	64
4.1 引言	64
4.2 压电换能器	65

4.3 离散换能器的本构关系	66
4.4 具有单个压电换能器的机械结构	70
4.4.1 电压源	71
4.4.2 电流源	72
4.4.3 压电换能器的导纳	72
4.4.4 有预应力的换能器	73
4.4.5 提高机电耦合系数的主动方法	74
4.5 多换能器组合系统	75
4.6 一般压电结构	76
4.7 压电材料	77
4.7.1 本构关系	77
4.7.2 余能密度函数	80
4.8 哈密顿原理	80
4.9 罗斯压电变压器	83
4.9.1 驱动段	84
4.9.2 能量收集段	84
4.9.3 动力特性	85
4.10 参考文献	87
第5章 压电层合板	88
5.1 梁式压电作动器	88
5.1.1 哈密顿原理	88
5.1.2 压电驱动力	90
5.2 片状压电传感器	91
5.2.1 电流放大器和电荷放大器	91
5.2.2 传感器输出	92
5.2.3 电荷放大器的动力学行为	93
5.3 空间模态滤波器	93
5.3.1 模态作动器	93
5.3.2 模态传感器	94
5.4 具有同位作动器-传感器的梁结构	95
5.4.1 频响函数	96
5.4.2 零-极点图	97
5.4.3 模态截断	98
5.5 压电层合板	99
5.5.1 二维本构方程	100
5.5.2 基尔霍夫定律	100
5.5.3 多层弹性复合板的刚度矩阵	101
5.5.4 具有单个压电层的复合板	102
5.5.5 等效压电载荷	103

5.5.6 传感器输出	103
5.5.7 讨论	104
5.6 参考文献	106
第6章 基于压电换能器的主动和被动阻尼技术	108
6.1 引言	108
6.2 主动式结构,开环频响函数	109
6.3 基于集成功率反馈的主动阻尼技术	112
6.3.1 电压控制	112
6.3.2 模态坐标系	113
6.3.3 电流控制	114
6.4 压电换能器的导纳	116
6.5 基于阻性分支电路的被动阻尼技术	117
6.5.1 采用负电容增强阻尼效果	119
6.5.2 广义机电耦合系数	120
6.6 感性分支电路	120
6.7 分布式控制系统	125
6.8 一般压电结构	126
6.9 自感知作动器	126
6.9.1 力传感	127
6.9.2 位移传感	127
6.9.3 传递函数	128
6.10 其他主动阻尼技术	130
6.10.1 超前控制	131
6.10.2 正位置反馈控制	131
6.11 讨论	133
6.12 参考文献	133
术语对照及索引	136

第 1 章 机械系统的拉格朗日动力学

1.1 引言

本书将基于哈密顿原理,以一种统一的方式考察机电耦合系统的建模。本章将首先回顾机械系统的拉格朗日动力学;下一章将讨论电路系统的拉格朗日动力学;后续章节将对一系列包括压电结构在内的、更宽泛的机电耦合系统展开讨论。

拉格朗日动力学用对标量(能量、功)的分析代替传统动力学对矢量(力、动量、扭矩、角动量)的分析。在拉格朗日动力学分析中,广义坐标代替了物理坐标,使得建立的公式与坐标系的选取无关;对系统的整体分析取代了对各个隔离体的独立分析,具有不再需要考察(由约束产生的)系统各部件间界面力的优势;而且广义坐标的选取不是唯一的。

静力学方程从矢量形式(牛顿定律)到变分形式的转变始于虚功原理。达朗贝尔原理又使人们得以将虚功原理推广到动力学领域,进而得到了离散系统的哈密顿原理和拉格朗日方程。

哈密顿原理是牛顿定律的另一种表达形式,可以说它是一个非导出的物理基本定律。然而我们相信对于初学者,哈密顿原理的形式很难一下就被理解,而将其以质点系动力平衡方程的变换形式导出,更容易被理解和接受。实际上,哈密顿原理是比牛顿定律更具普遍意义的原理,因为它可以被推广到(用偏微分方程描述的)连续系统,以及如后文所述,它还可以被推广到机电耦合系统。哈密顿原理也是动力学领域众多数值方法(包括有限元法)的基础理论。

1.2 运动状态函数

考虑一个具有动量 p 的质点沿 x 方向运动。根据牛顿定律,作用在质点上的力等于其动量的变化率:

$$f = \frac{dp}{dt} \quad (1.1)$$

外力对质点做功的增量为

$$f dx = \frac{dp}{dt} dx = \frac{dp}{dt} v dt = v dp \quad (1.2)$$

式中, $v = \frac{dx}{dt}$ 为质点的运动速度。动能函数 $T(p)$ 定义为质点的动量从 0 增到 p 的

过程中力 f 所作的功:

$$T(p) = \int_0^p v dp \quad (1.3)$$

根据这一定义, T 是瞬时动量 p 的函数, T 对 p 的导数为瞬时速度:

$$\frac{dT}{dp} = v \quad (1.4)$$

到目前为止, 我们还没有对 p 与 v 的显式关系作任何假设。牛顿力学的本构方程给出:

$$p = mv \quad (1.5)$$

将其代入方程式(1.3), 得到

$$T(p) = \frac{p^2}{2m} \quad (1.6)$$

实际上还有一个与之互补的描述运动状态的函数, 将其定义为动余能函数(见图 1-1):

$$T^*(v) = \int_0^v p dv \quad (1.7)$$

与式(1.3)类似, 上式与速度-动量的关系无关。从图 1-1 可以看出 $T(p)$ 和 $T^*(v)$ 具有如下关系:

$$T^*(v) = pv - T(p) \quad (1.8)$$

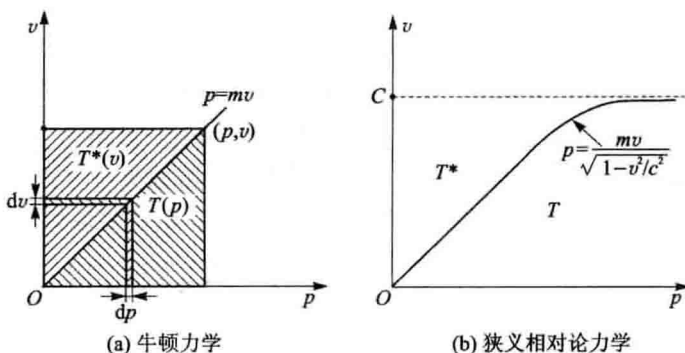


图 1-1 速度-动量关系

利用式(1.4), 动余能的全微分可写为

$$dT^* = p dv + v dp - \frac{dT}{dp} dp = p dv \quad (1.9)$$

由此得到

$$p = \frac{dT^*}{dv} \quad (1.10)$$

因此, 动余能是一个瞬时速度的函数, 其对速度 v 的导数为瞬时动量。式(1.8)定义了一个勒让德变换。该变换可以使我们在本构关系中改变独立变量[将