



装备科技译著出版基金

[美] Nader Jalili 著

赵丹 刘少刚 冯立锋 译

# 基于压电材料的振动控制

## ——从宏观系统到微纳米系统

# Piezoelectric-Based Vibration Control

From Macro to Micro/Nano Scale Systems



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



Springer



装备科技译著出版基金

# 基于压电材料的振动控制

## ——从宏观系统到微纳米系统

**Piezoelectric-Based Vibration Control**  
From Macro to Micro/Nano Scale Systems

[美] Nader Jalili 著  
赵丹 刘少刚 冯立锋 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2015-274号

图书在版编目(CIP)数据

基于压电材料的振动控制:从宏观系统到微纳米系统 / (美) 内德·贾里里(Nader Jalili)著;赵丹, 刘少刚, 冯立锋译. —北京:国防工业出版社, 2017.3

书名原文: Piezoelectric - Based Vibration Control; From Macro to Micro/Nano Scale Systems

ISBN 978 - 7 - 118 - 11026 - 5

I. ①基… II. ①内… ②赵… ③刘… ④冯… III. ①压电材料 - 振动控制 IV. ①TM22②TB535

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第023060号

Translation from English language edition:

*Piezoelectric-Based Vibration Control*

by Nader Jalili

Copyright © 2010 Springer Science + Business Media, LLC

All Rights Reserved

本书简体中文版由 Springer Science + Business Media 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 26 1/4 字数 514 千字

2017年3月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价138.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

本书从机械振动学的基础知识入手,完整地 toward 读者介绍了其中包含的物理学原理,同时也着重介绍了压电材料/结构的最新研究进展。本书分为三大部分,每部分包含一些章节。第I部分可单独作为一本介绍机械振动的书,这部分介绍了后续研究所需的基础知识,以及离散系统和连续系统的振动。第II部分介绍了压电系统的基本原理,重点介绍了系统的本构模型和基于压电作动器/传感器的吸振技术与振动控制技术。在前两部分的基础上,第III部分介绍了微纳米压电作动器/传感器领域的一些先进研究方向,包括其在分子制造、精密机电系统、分子识别和功能纳米材料等方面的应用。

因为本书的知识体系比较完整,故可作为大学高年级本科生和研究生的教材,也可作为从事机械、电子、土木工程和航空航天工程等学科研究的科研人员的参考书目。虽然部分读者在振动学和动力学方面已经具有一定的基础,这也更加有助于理解本书的研究内容,但为了广大读者的方便,本书对大部分基本概念以及书中用到的数学工具做一个简要的回顾。本书浅显易懂,因此适合从事振动控制和压电系统研究的工程技术人员、对振动和控制学感兴趣的本科生和研究生,以及从事高级压电振动控制系统研究的科研人员学习使用。

书中的材料是十多年深入学习和研究的成果,在此漫长的过程中,很多人为了这本书的出版做出了贡献,在这里我要感谢他们的帮助和支持。首先,我要真诚地感谢我的硕士导师 Ebrahim Esmailzadeh 教授,他传授了我振动的基本知识,没有这些基础也就没有我现在的学术成就。我同样要感谢 Nejat Olgac 教授(博士研究生阶段的主导师),他不但传授给我系统动力学和控制学方面的专业知识,而且还非常耐心、无私地教给我许多人生哲理和生活经验,这些成为了我工作和生活中的宝贵财富。我还要感谢许多我以前指导过的研究生,如果没有他们的努力和奉献,这本书是无法成稿的。

下面我介绍参与本书撰写的主要人员及各自负责编写的内容:

Dr. Saeid Bashash (MS 2005, PhD 2008), 他主要负责研究迟滞补偿并参与了压电系统的建模和控制及其在微机电系统和纳米机电系统方面的应用(第7~10章中有所阐述);

Dr. Mohsen Dadfarnia (MS 2003), 他在压电振动控制系统方面做的具体工作,

在第9章中有所阐述；

Dr. Amin Salehi-Khojin (PhD 2008), 他主要负责研究压电式纳米机械悬臂梁系统的建模和新一代压电作动器和传感器的纳米特性, 这些内容在第8章、第9章和第12章中有所阐述；

Dr. S. Nima Mahmoodi (PhD 2007), 他主要负责微悬臂梁传感器的非线性建模(第11章)；

Ms. Mana Afshari (MS 2007), 她的工作是研究压电式微悬臂梁传感器在生物检测方面的应用(第11章)；

Dr. Reza Saeidpourazar (PhD 2009), 他的工作是研究微悬臂梁操纵系统和成像系统的建模和控制(第11章)；

Dr. Mahmoud Reza Hosseini (PhD 2008), 他负责纳米材料传感器的建模和制备方面的工作(第12章)。

最后特别感谢施普林格出版社的 Steven Elliot 先生和 Andrew Leigh 先生, 有了他们的鼓励我才开始了本书的撰写工作, 并感谢他们在整个过程中给予的帮助。

Nader Jalili

波士顿, 马萨诸塞州

Nader Jalili: 美国东北大学机械与工业工程系教授(波士顿, 马萨诸塞州)。他于 2009 年加入东北大学, 在此之前他是克莱姆森大学机械工程系的副教授, 并且是克莱姆森大学智能结构和纳米机电系统实验室的创始成员之一。他的主要研究方向包括: 压电作动器/传感器; 分布参数系统的动力学建模和振动控制; 微纳米机电作动器/传感器的动力学建模和控制以及在纳米尺度下微机电系统的控制与操纵。他是美国机械工程师协会 (ASME) *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 的副主编, 也是 ASME 智能材料振动控制技术委员会的创始主席, 同时还是许多 ASME 委员会的成员, 包括振动与噪声技术委员会 (TCVS)。他过去曾担任过 *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 学报的技术编辑, ASME 振动与噪声控制专家组的主席和副主席, 他是 270 多篇技术文稿的作者或共同作者, 其中包括 85 篇期刊文章。他获得过许多国内和国际上的奖项, 包括: 2003 年美国国家自然科学基金的杰出青年基金奖; 2002 年美国能源部的 Ralph E. Powe 青年教师提升奖; 2009 年克莱姆森大学工程科学学院 (CoES) 的 McQueen Quattlebaum 教师成就奖; 2008 年因杰出的教学工作获得克莱姆森大学 CoES 的 Murray Stokley 奖 (工程学院的最高奖项); 2007 年克莱姆森大学的年度杰出青年科学家奖; 2015 年美国东北大学卓越教学奖。Nader Jalili 教授分别于 1992 年和 1995 年在沙力夫理工大学 (德黑兰, 伊朗) 获得学士学位和硕士学位, 并于 1998 年在康涅狄格大学 (斯托斯, 康涅狄格州, 美国) 获得机械工程博士学位。



## 第I部分 机械振动综述

第1章 引言 .....	2
1.1 智能结构简介 .....	2
1.2 振动控制的概念 .....	4
1.2.1 隔振与吸振 .....	5
1.2.2 吸振与振动控制 .....	5
1.2.3 振动控制系统的分类 .....	6
1.3 动力学系统的数学模型 .....	7
1.3.1 线性和非线性模型 .....	7
1.3.2 集中参数与分布参数模型 .....	8
总结 .....	9
第2章 集中参数系统的振动介绍 .....	10
2.1 线性离散系统的振动特征 .....	10
2.2 单自由度系统的振动 .....	11
2.2.1 时域响应特性 .....	11
2.2.2 频率响应函数 .....	13
2.3 多自由度系统的振动 .....	14
2.3.1 特征值问题和模态矩阵表示法 .....	14
2.3.2 经典阻尼系统 .....	16
2.3.3 非比例阻尼 .....	17
2.4 离散系统振动分析实例 .....	19
总结 .....	22
习题 .....	22
第3章 变分力学简介 .....	27
3.1 变分法概述 .....	27

3.1.1	变分法概念 .....	28
3.1.2	变分算子 $\delta$ 特性 .....	30
3.1.3	变分法的基本定理 .....	30
3.1.4	泛函的约束极小化 .....	33
3.2	变分力学概述 .....	35
3.2.1	功能原理和扩展的 Hamilton 原理 .....	35
3.2.2	欧拉方程在动力学分析中的应用 .....	37
3.3	运用解析法进行运动学方程推导的步骤 .....	39
总结	.....	40
习题	.....	40
<b>第 4 章</b>	<b>分布参数系统振动分析的一种统一方法 .....</b>	<b>42</b>
4.1	变形体的平衡状态和运动学模型 .....	43
4.1.1	平衡微分方程 .....	43
4.1.2	应变位移关系 .....	45
4.1.3	应力 - 应变本构关系 .....	48
4.2	变形体的虚功原理 .....	50
4.3	连续系统振动实例 .....	53
4.3.1	杆的纵向振动 .....	53
4.3.2	梁的横向振动 .....	57
4.3.3	板的横向振动 .....	62
4.4	连续系统的特征值问题 .....	65
4.4.1	分离变量法 .....	66
4.4.2	模态正交性 .....	73
4.4.3	特征函数展开法 .....	75
总结	.....	79
习题	.....	79

## 第II部分 基于压电材料的振动控制系统

---

<b>第 5 章</b>	<b>智能材料综述 .....</b>	<b>86</b>
5.1	压电材料 .....	87
5.1.1	压电效应的概念 .....	87
5.1.2	压电材料的基本性能和本构模型 .....	87
5.1.3	压电材料的实际应用 .....	89



5.2	热释电材料	89
5.2.1	热释电材料的本构模型	89
5.2.2	常用的热释电材料	90
5.3	电流变液和磁流变液	90
5.3.1	电流变液	90
5.3.2	磁流变液	91
5.4	形状记忆合金	92
5.4.1	形状记忆合金的物理原理及特性	92
5.4.2	形状记忆合金的商业应用	93
5.5	电致伸缩材料和磁致伸缩材料	94
5.5.1	电致伸缩材料	94
5.5.2	磁致伸缩材料	95
	总结	96
<b>第6章</b>	<b>压电材料的物理原理和本构模型</b>	<b>97</b>
6.1	压电原理	98
6.1.1	极化和压电效应	98
6.1.2	压电材料的晶体结构	99
6.2	压电材料的本构模型	101
6.2.1	预备知识和基本定义	101
6.2.2	本构关系	102
6.2.3	压电材料的非线性特性	106
6.3	压电材料的本构常量	107
6.3.1	一般关系	107
6.3.2	压电常数	109
6.4	压电结构材料的工程应用	113
6.4.1	压电陶瓷在机电系统中的应用	114
6.4.2	压电陶瓷驱动的位移放大策略	114
6.4.3	基于压电陶瓷的高精度微型电机	115
6.5	压电作动器和传感器	116
6.5.1	压电作动器/传感器的结构	116
6.5.2	压电作动器/传感器实例	118
6.6	压电系统的研究进展	119
6.6.1	压电式微操纵器	120
6.6.2	压电式微悬臂梁传感器	120
6.6.3	压电式平移纳米定位器	121

6.6.4 未来的发展方向和前景 .....	122
总结 .....	122
<b>第7章 压电材料的迟滞特性</b> .....	<b>123</b>
7.1 迟滞现象的来源 .....	123
7.1.1 率无关和率相关迟滞 .....	124
7.1.2 局部与非局部记忆特性 .....	124
7.2 压电材料的迟滞非线性 .....	125
7.3 压电材料的迟滞建模方法 .....	126
7.3.1 唯象迟滞模型 .....	126
7.3.2 本构迟滞模型 .....	130
7.4 迟滞补偿技术 .....	138
总结 .....	139
<b>第8章 压电系统建模</b> .....	<b>140</b>
8.1 建模预备工作和假设 .....	141
8.2 叠堆式压电作动器建模 .....	141
8.2.1 无外加负载的叠堆式压电作动器 .....	143
8.2.2 外加负载的叠堆式压电作动器 .....	145
8.2.3 案例研究:叠堆式压电作动器振动分析 .....	147
8.3 薄片式压电作动器建模 .....	152
8.3.1 基于能量法的薄片式作动器建模 .....	153
8.3.2 案例研究:压电驱动有源探针的振动分析 .....	158
8.3.3 基于等效弯矩的薄片式作动器建模 .....	166
8.4 二维压电驱动简介 .....	169
8.4.1 基于能量法的二维压电驱动建模 .....	169
8.4.2 基于等效弯矩的二维压电驱动建模 .....	173
8.5 压电传感器的建模 .....	175
8.5.1 叠堆式压电传感器 .....	175
8.5.2 薄片式压电传感器 .....	177
8.5.3 压电传感器的等效电路模型 .....	178
总结 .....	180
<b>第9章 基于压电作动器和传感器的振动控制</b> .....	<b>181</b>
9.1 振动控制的概念和预备知识 .....	182
9.2 基于压电惯性作动器的主动吸振 .....	182

9.2.1	主动共振吸振器	183
9.2.2	延时共振吸振器	188
9.3	基于PZT的主动振动控制	195
9.3.1	基于叠堆式压电作动器的振动控制	196
9.3.2	基于薄片式压电作动器的振动控制	206
9.4	基于压电材料的半主动振动控制系统	227
9.4.1	变刚度振动控制的概念简介	228
9.4.2	变刚度概念的实时实现	229
9.4.3	基于压电材料的变刚度振动控制	232
9.4.4	基于压电材料的变刚度控制实验	237
9.5	基于压电材料的自感知作动器	240
9.5.1	预备知识和背景	240
9.5.2	压电电容的自适应匹配策略	241
9.5.3	自感知作动器在质量检测上的应用	243
	总结	246

### 第Ⅲ部分 基于压电材料的微纳米传感器和作动器

---

<b>第10章</b>	<b>基于压电材料的微纳米定位系统</b>	248
10.1	纳米尺度控制与操纵的分类	248
10.1.1	基于扫描探针显微的控制及操纵	249
10.1.2	基于纳米操纵器的控制和操纵	254
10.2	压电式微纳米定位系统	255
10.2.1	STM系统中所使用的压电作动器	255
10.2.2	STM系统中的压电作动器建模	257
10.3	单轴压电纳米定位系统的控制	262
10.3.1	前馈控制策略	262
10.3.2	反馈控制策略	266
10.4	多轴压电纳米定位系统的控制	269
10.4.1	耦合的并联压电弯曲纳米定位平台的建模与控制	270
10.4.2	三维纳米定位系统的建模与控制	279
	总结	286
<b>第11章</b>	<b>压电式微悬臂梁传感器</b>	287
11.1	简要综述	288

11.1.1	微悬臂梁传感器的基本操作	288
11.1.2	线性与非线性振动	290
11.1.3	NMCS 信号传递的常用方法	290
11.1.4	工程应用和发展动态	292
11.2	微悬臂梁传感器的建模	294
11.2.1	压电式 NMCS 的线性与非线性振动分析	295
11.2.2	NMCS 的弯曲-扭转耦合振动分析	311
11.3	基于 NMCS 进行超微质量检测与材料表征	321
11.3.1	基于 NMCS 的生物物种检测	322
11.3.2	基于 NMCS 的超微质量检测	330
	总结	335
<b>第 12 章 基于纳米材料的压电作动器和传感器</b>		<b>336</b>
12.1	纳米管的压电特性(碳纳米管和氮化硼纳米管)	337
12.1.1	纳米管概览	337
12.1.2	纳米管和纳米管材料的压电特性	338
12.2	基于纳米管的压电式传感器和作动器	340
12.2.1	多功能纳米材料的驱动和传感机理	340
12.2.2	纳米管压电薄膜传感器的制备	342
12.2.3	纳米管传感器的压电特性测量	347
12.3	基于纳米管复合材料的结构减振和振动控制	349
12.3.1	用于减振和振动控制的纳米管复合材料的制备	349
12.3.2	纳米管复合材料的自由振动特性	351
12.3.3	纳米管复合材料的受迫振动特性	356
12.4	压电纳米复合材料的可调力学特性	359
12.4.1	相界面控制简介	359
12.4.2	纳米管复合材料的分子动力学仿真	361
12.4.3	纳米管复合材料的连续弹性体模型	363
12.4.4	纳米管复合材料的数值仿真结果和讨论	363
12.5	由电子织物所组成的功能纳米材料	366
12.5.1	电子织物的概念	366
12.5.2	基于碳纳米管复合材料的无纺布物的制造	367
12.5.3	碳纳米管织物传感器的实验表征	369
	总结	372

<b>附录 A 数学基础</b> .....	373
A.1 预备知识和定义 .....	373
A.2 指标记法与求和约定 .....	375
A.2.1 指标记法约定 .....	376
A.2.2 克罗内克函数 .....	376
A.3 平衡态与稳定性 .....	377
A.3.1 平衡点或平衡态 .....	377
A.3.2 稳定性的概念 .....	378
A.4 基本稳定定理的简要概述 .....	379
A.4.1 李雅普诺夫局部和全局稳定性定理 .....	380
A.4.2 局部和全局不变集定理 .....	382
<b>附录 B 部分定理的证明</b> .....	384
B.1 定理 9.1 的证明 .....	384
B.2 定理 9.2 的证明 .....	387
B.3 定理 9.3 的证明 .....	388
B.4 定理 10.1 的证明 .....	389
B.5 定理 10.2 的证明 .....	390
<b>参考文献</b> .....	392

## 第 I 部分 机械振动综述

本书的第 I 部分给出机械振动的综述。首先介绍智能结构和振动控制系统,其次介绍离散和连续系统的振动。本部分的章节安排如下:第 1 章简要介绍全书所涵盖的内容,包括智能结构的定义、振动控制的概念和类型以及离散系统和连续系统的不同建模方法与控制策略;第 2 章介绍集中参数系统的振动,包括模态矩阵表示法和运动微分方程的解耦策略;第 3 章介绍本书所需的数学知识,包括变分法和变分力学;第 4 章介绍分布参数系统的振动以及一些连续系统振动实例(如杆的纵向振动、梁和板的横向振动)。第 4 章用浅显易懂的方式介绍一种基于能量的建模方法,基于此方法可描述出系统的行为特性。本部分的内容是后续第 II 部分和第 III 部分中压电作动器、传感器及振动控制系统建模与控制的基础。

---

# 第 1 章

## 引 言

---

---

目录	1.1 智能结构简介	2
	1.2 振动控制的概念	4
	1.2.1 隔振与吸振	5
	1.2.2 吸振与振动控制	5
	1.2.3 振动控制系统的分类	6
	1.3 动力学系统的数学模型	7
	1.3.1 线性和非线性模型	7
	1.3.2 集中参数与分布参数模型	8
	总结	9

---

本章简单综述全书所涵盖的内容。首先给出智能结构的定义,并列出智能结构基本单元所需的一些智能材料;其次介绍振动控制的基本概念及其分类,并对离散和连续系统的不同建模方法和控制策略进行概述。

### 1.1 智能结构简介<sup>①</sup>

文献中对智能结构<sup>②</sup>存在许多定义,各门理工类学科中对其定义都有不同。

---

<sup>①</sup> 在文献中对于“智能结构”而言,“结构”和“系统”是可以互换的。然而,必须注意“结构”通常是指特定的元素或机械部件;“系统”是更加一般的形式,可包括在实际或虚拟边界定义下的部件的集合。需要注意的是,所有的结构都是系统。

<sup>②</sup> 英语中现在一般用“smart structures”来表示“智能结构”。

但一个被广泛接受的定义为:智能结构是一种同时具备生命特征与人工智能(图 1.1)的结构。生命特征是指结构具备感知与驱动的功能,这种特征几乎存在于每一种生物中。这些生命特征可以是结构固有的(如材料属性),也可以是合成嵌入到结构中的。人工智能特性指的是智能结构具有独特的能力,这种能力具体表现为智能结构可以通过计算机、微处理器、逻辑控制算法来适应环境的变化(自适应能力)和外部激励,从而能满足所设定的目标。智能结构如图 1.1 所示。

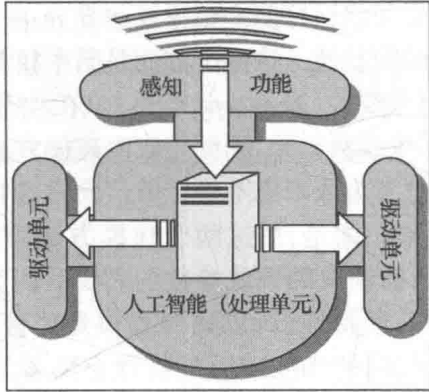


图 1.1 智能结构简图

智能结构由一种或多种智能材料(功能材料)组成。这些智能材料以至少耦合 2 个物理场这种独特的工作方式来提供所需的功能。具体的物理场包括力场、电场、磁场、热力场、化学场、光场。通过耦合,智能材料具有改变形状、响应外部激励和改变自身的物理、几何与流变属性的能力。本书列出了一些典型的智能材料,包含它们诞生的年份和所耦合的物理场(Tzou, et al. 2004):

- 热电体(公元前 315 年,耦合热力场和力场);
- 电流变液(1784 年,耦合电场和力场);
- 超磁致伸缩材料(1840 年,耦合磁场和力场);
- 压电材料(1880 年,耦合力场和电场);
- 形状记忆合金(1932 年,耦合热力场和力场);
- 磁流变液(1947 年,耦合磁场和力场);
- 电活性聚合物和聚电解质凝胶(1949 年,耦合电场和力场);
- 电致伸缩材料(1954 年,耦合电场和力场);
- 光致伸缩材料(1974 年,耦合光场和力场)。

第 5 章将会对上述智能材料进行更加详细的描述,主要包括智能材料的工作原理、物理特性、本构方程及其一些潜在的应用。通过对上述智能材料的研究可知,在应用于机电和振动控制系统中时,压电材料的性能要高于其他智能材料。因此,本书在第 6 章专门对压电材料及其压电效应进行讨论,包括压电传感器与作动器的实际应用。为保证本书的重点集中于压电系统,除了在第 5 章对智能结构进



行简要介绍外,本书不再对其他智能结构和系统进行详述。对智能结构感兴趣的读者可自行查阅参考文献(Gandhi, Thompson 1992; Banks, et al. 1996; Culshaw 1996; Clark, et al. 1998; Srinivasan, McFarland 2001; Smith 2005; Leo 2007)。

## 1.2 振动控制的概念<sup>①</sup>

在研究机械振动时,必须掌握好两个很重要的部分:一是建模中存在的不确定因素;二是力求系统建模的完整性。这两个方面是紧密相关的,在建模过程中如何做好两者之间的平衡是很重要的(Benaroya 1998)。在动态建模时,可能遇到两种情况:在理想条件下,若系统参数已知,则使用正向建模方法,如图 1.2(a)所示;当存在未建模动态、复杂系统行为或参数不确定的情况时,则使用逆向建模方法,如图 1.2(b)所示。但必须指出的是,用这两个建模方法得到的模型,其完整度的高低取决于建模过程中所能获取的系统参数的多少。因为考虑到了所有可能的情况、外部激励及物理与几何特性,所以逆向建模是更普遍的方法。例如,当对发动机气门进行建模时,气门的刚度或阻尼特性会随着发动机的运转和环境条件而变化。因此,这些参数是不确定的。虽然逆向建模更加普遍并适用于许多实际情况,然而,处理系统的不确定性和未建模动态并不是一项简单的工作。振动控制作为补偿策略用于克服这些不确定性和建模的不足,这即是编写有关振动控制系统这本书的主要动机。结合压电材料的良好特性,压电振动控制系统可用于许多工程实际中,相关内容将在本书第 II 部分(第 8 章和第 9 章)进行广泛讨论。

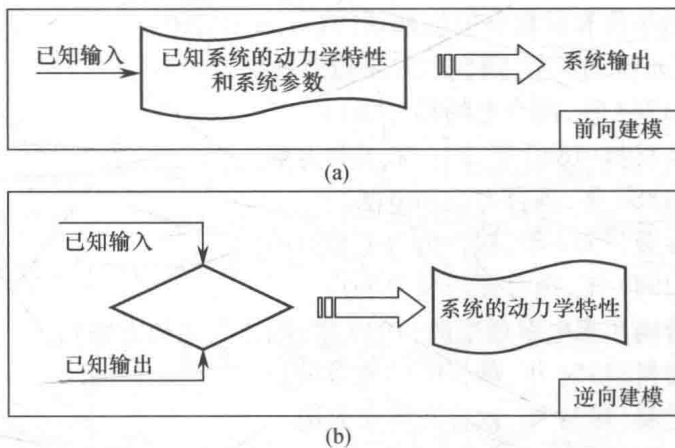


图 1.2 正向建模法(a)和逆向建模法(b)

<sup>①</sup> 本节的大部分内容直接来自文献(Jalili, Esmailzadeh 2005)的主旨章节。