



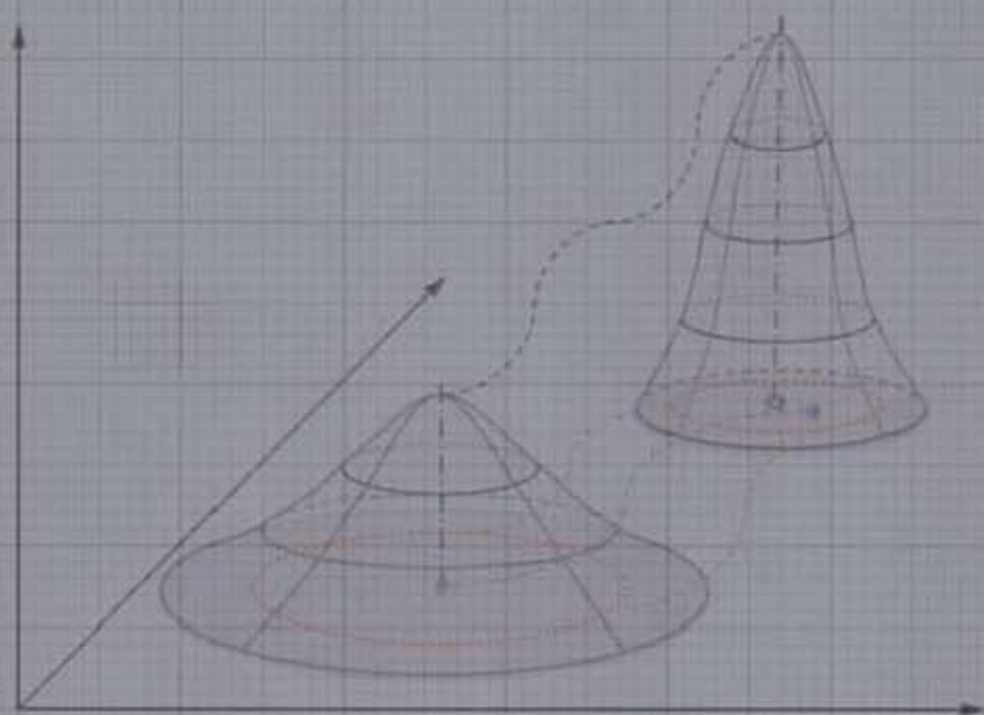
上海市科学技术协会
“晨光计划”资助出版

THEORY AND METHOD OF
STOCHASTIC OPTIMAL
CONTROL OF ENGINEERING
STRUCTURES

工程结构

随机最优控制理论与方法

彭勇波 李 杰 著



上海科学技术出版社

工程结构随机最优 控制理论与方法

彭勇波 李 杰 著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程结构随机最优控制理论与方法 / 彭勇波, 李杰著.
—上海: 上海科学技术出版社, 2017. 1
ISBN 978-7-5478-3361-2

I. ①工… II. ①彭…②李… III. ①工程结构—随机
优化—随机控制 IV. ①TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 272060 号

工程结构随机最优控制理论与方法

彭勇波 李 杰 著

上海世纪出版股份有限公司 出版
上 海 科 学 技 术 出 版 社
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

上海世纪出版股份有限公司发行中心发行
200001 上海福建中路 193 号 www.ewen.co
上海中华商务联合印刷有限公司印刷

开本 787 × 1092 1/16 印张 15.25

字数: 360 千

2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-3361-2/TU · 240

定价: 98.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换



上海市科学技术协会
“晨光计划”资助出版

内容简介 SYNOPSIS



本书较为系统地论述了基于物理随机系统思想的工程结构随机最优控制理论、方法与最新研究成果,主要包括: 结构随机最优控制的理论基础,随机最优控制的概率密度演化理论,物理随机最优控制的概率准则,广义最优控制律,非线性结构随机最优控制,结构风振舒适度随机最优控制,结构半主动随机最优控制,受控结构振动台试验等。

本书可供土木工程、机械工程、航空航天工程等领域的工程师、科学技术人员与相关专业的高等院校师生参考。

前言 PREFACE

工程结构的动力灾变控制是土木工程领域最具挑战性的课题之一。自 20 世纪 70 年代提出结构振动控制的概念以来,结构减震或振动控制理论和方法在工程实践中得到了广泛关注和迅速发展,成为有效改善结构性态、提高结构安全性和增强结构功能性的重要手段之一,并形成了以被动控制、主动控制、半主动控制和混合控制模式为代表的新兴结构振动控制技术。然而,由于工程激励和结构系统内秉的随机性,按照传统的确定性控制思路,或仅考虑白噪声激励而设计的控制系统,很难实现对结构反应性态的精细化控制。以结构地震反应控制为例,实践中通常以某一条或某几条实测或人工地震动过程为输入设计控制律或控制装置参数。然而,由于地震在发生时间、空间和大小上均具有明显的随机性,地震作用下结构反应性态的随机性与非线性,使得按某一地震动过程分析、设计的结构控制系统在另一地震动过程作用下可能出现控制效果欠佳,甚或响应放大。因此,随机动力系统的最优控制问题,仍然是结构振动控制亟待突破的关键科学问题!

事实上,早在 1972 年 J. T. P. Yao 提出结构控制概念时,就曾开宗明义地指出:结构控制的目的是增强结构安全性,改善结构的性态。因此,研究与设计结构随机最优控制策略,应是结构控制真正走向工程实践的必由之路。令人遗憾的是,囿于经典随机最优控制的理论框架,对于一般非线性结构系统仅能获得矩特征值解答(获得可靠度需对跨阈过程做出假定),且其中关于随机激励的 Gaussian 白噪声过程假定与工程激励(如地震动、强风等)随机过程相去甚远,使得这类研究的工程应用并没有得到推广。

作为物理随机系统思想的重要组成部分,过去 10 余年来,概率密度演化理论在土木工程、机械工程、船舶与海洋工程、水利工程、航空宇航科学与技术、控制科学与工程、大气科学和生物学等学科领域中得到了实质性应用和推广,成为随机动力学领域最为活跃和极具发展前景的新理论之一。在这一框架下,本书较为系统地发展了工程结构随

机最优控制理论与方法。其中,第1章的绪论部分,论述了工程结构振动控制的研究进展和经典随机最优控制理论的历史与现状,由此引入物理随机最优控制的理念,并介绍了本书的基本内容。第2章为理论基础,简要介绍了经典随机最优控制理论、结构随机振动、结构动力可靠度分析与随机动力作用建模的基本理论等相关知识,为本书阐述的工程结构随机最优控制理论与方法奠定了学术基础。第3—第5章集中阐述了物理随机最优控制的基本理论、概率准则和广义最优控制律,这些是本书所介绍的工程结构随机最优控制理论的关键要素,也是本书的核心内容。第6章阐述了非线性结构的随机最优控制。第7、第8章分别阐述了物理随机最优控制理论在结构风振舒适度黏滞阻尼器控制和结构地震反应磁流变阻尼器控制中的应用。第9章通过受控结构振动台试验分析,系统介绍了工程结构随机最优控制理论与方法的验证性研究。此外,作为相关内容,本书还给出了关于经典最优控制理论三个附录,以便于读者理解。

上述研究工作,先后得到了国家自然科学基金创新研究群体计划项目(50321803、50621062)、国家建设高水平大学公派研究生项目(2007U20106)、国家自然科学基金青年基金项目(51108344)、上海市浦江人才计划项目(11PJ1409300)和土木工程防灾国家重点实验室自主研究课题(SLDRCE08-A-01、SLDRCE14-B-20)等多方支持。在本书完稿付梓之际,作者要对上述支持表示诚挚的感谢。

本书的核心内容(第3—第6章)为第一作者于2005—2009年在第二作者指导下攻读博士学位期间取得的研究成果。在接下来的7年时间里,我们又在结构随机最优控制理论与方法的工程实践和试验验证等方面开展了持续、深入的工作。在研究过程中,我们认识到工程结构的灾变动力学与性态控制是极为复杂的工程科学问题,这一研究领域充满挑战,我们的研究还只是刚刚开始,期待着各位同仁的关注和共同努力。

书中不当之处,敬请读者批评指正。反馈意见请发送至 E-mail: pengyongbo@tongji.edu.cn,我们将不胜感激。

彭勇波 李 杰

2016年9月于同济园

目 录 CONTENTS



第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 工程结构振动控制研究进展	2
1.3 结构随机最优控制	6
1.3.1 经典随机最优控制	6
1.3.2 物理随机最优控制	7
1.4 本书主要内容	8
第 2 章 理论基础	10
2.1 引言	10
2.2 经典随机最优控制理论	10
2.3 结构随机振动理论	16
2.3.1 线性随机振动	16
2.3.2 非线性随机振动	23
2.3.3 广义概率密度演化方程	28
2.3.4 历史注记	30
2.4 结构动力可靠度分析	31
2.4.1 跨阈过程理论	31
2.4.2 等价极值事件准则	33
2.5 随机动力作用建模	35
2.5.1 随机地震动	36
2.5.2 空间脉动风速场	41
第 3 章 随机最优控制的概率密度演化理论	47
3.1 引言	47

3.2	受控结构系统性态演化	48
3.3	物理随机最优控制解	49
3.3.1	闭环控制系统随机最优控制解	49
3.3.2	控制律参数优化	53
3.4	分析实例	54
3.4.1	单层剪切型框架结构控制	54
3.4.2	多层剪切型框架结构控制	61
3.5	与经典随机最优控制的比较研究	67
3.6	讨论与小结	71
第4章	物理随机最优控制的概率准则	72
4.1	引言	72
4.2	随机最优控制律泛函	73
4.3	概率优化准则	73
4.3.1	单目标控制准则	73
4.3.2	多目标控制准则	76
4.3.3	概率准则的比较研究	78
4.4	数值算例	82
4.5	讨论与小结	87
第5章	广义最优控制律	89
5.1	引言	89
5.2	最优控制律的统一表达	90
5.3	概率可控指标	93
5.4	广义最优控制律的解答程序	94
5.4.1	控制准则	94
5.4.2	求解程序	95
5.5	分析实例	96
5.5.1	黏弹性阻尼器控制	96
5.5.2	主动拉索控制	100
5.6	讨论与小结	104
第6章	非线性结构随机最优控制	106
6.1	引言	106
6.2	随机多项式最优控制	106
6.3	非线性振子系统随机最优控制	110

6.3.1	主动拉索控制性能分析	111
6.3.2	控制准则比较	117
6.4	滞回结构系统随机最优控制	120
6.4.1	Clough 双线性滞回系统	122
6.4.2	Bouc-Wen 光滑型滞回系统	129
6.5	讨论与小结	136
第 7 章	结构风振舒适度随机最优控制	138
7.1	引言	138
7.2	非线性黏滞阻尼器-结构系统等效线性化	138
7.2.1	黏滞阻尼器-结构系统的刚性特征	139
7.2.2	黏滞阻尼器-结构系统求解	140
7.3	黏滞阻尼器最优布设准则及方法	146
7.4	工程实例分析	149
7.4.1	模型缩聚与结构动力学分析	149
7.4.2	结构风振舒适度控制	152
7.5	讨论与小结	156
第 8 章	结构半主动随机最优控制	157
8.1	引言	157
8.2	基于磁流变阻尼器的结构随机最优控制策略	158
8.2.1	限界 Hrovat 控制算法	158
8.2.2	磁流变阻尼器控制力参数设计	160
8.3	磁流变阻尼器动力学建模	161
8.3.1	磁流变阻尼器参数模型	161
8.3.2	模型参数识别	164
8.3.3	磁流变阻尼器微观尺度表现	167
8.4	框架结构的磁流变阻尼器随机最优控制	170
8.5	讨论与小结	176
第 9 章	受控结构振动台试验	177
9.1	引言	177
9.2	受控结构试验设计	177
9.2.1	试验模型结构特征	177
9.2.2	试验地震动样本	179
9.2.3	黏滞阻尼器设计参数	179

9.3	试验布设与试验工况	182
9.3.1	试验布设方案	182
9.3.2	试验工况与校核	184
9.4	受控结构试验分析	188
9.4.1	样本与系综特征	188
9.4.2	概率密度调控	192
9.5	受控结构可靠度分析	193
9.6	讨论与小结	194
附录 A 协态向量与激励向量之间的映射关系		195
附录 B 基于随机等价线性化的 LQG 控制		197
附录 C Riccati 矩阵差分方程与离散动态规划法		200
索引		205
参考文献		211

CONTENTS



Chapter 1	Introduction	1
1.1	Preliminary remarks	1
1.2	Advances of structural control	2
1.3	Stochastic optimal control of structures	6
1.3.1	Conventional schemes	6
1.3.2	Physically motivated scheme	7
1.4	Contents of the book	8
Chapter 2	Theoretical essentials	10
2.1	Preliminary remarks	10
2.2	Conventional stochastic optimal control theory	10
2.3	Random vibration theory of structures	16
2.3.1	Linear random vibration	16
2.3.2	Nonlinear random vibration	23
2.3.3	Generalized probability density evolution equations	28
2.3.4	Historical remarks	30
2.4	Dynamic reliability of structures	31
2.4.1	Level-crossing theory	31
2.4.2	Principal of equivalent extreme-value events	33
2.5	Modeling of random dynamic actions	35
2.5.1	Random seismic ground motions	36
2.5.2	Fluctuating wind-velocity fields	41
Chapter 3	PDEM based stochastic optimal control	47
3.1	Preliminary remarks	47

3.2	Performance evolution of controlled systems	48
3.3	Solution of physically motivated stochastic optimal control	49
3.3.1	Closed-loop control systems	49
3.3.2	Parameter optimization of control policy	53
3.4	Numerical examples	54
3.4.1	Controlled single-floor structure	54
3.4.2	Controlled multiple-floor structure	61
3.5	Comparative studies against LQG	67
3.6	Discussions and summaries	71
Chapter 4 Probabilistic criteria of physically motivated stochastic optimal control		72
4.1	Preliminary remarks	72
4.2	Functional matrix of stochastic optimal control	73
4.3	Probabilistic criteria	73
4.3.1	Single-objective criteria	73
4.3.2	Multiple-objective criteria	76
4.3.3	Comparative studies	78
4.4	Numerical example	82
4.5	Discussions and summaries	87
Chapter 5 Generalized optimal control policy		89
5.1	Preliminary remarks	89
5.2	Uniform of optimal control policies	90
5.3	Probabilistic controllability index	93
5.4	Solution procedure	94
5.4.1	Control criterion	94
5.4.2	Solving steps	95
5.5	Numerical examples	96
5.5.1	Viscoelastically damped system	96
5.5.2	Active tendon system	100
5.6	Discussions and summaries	104
Chapter 6 Stochastic optimal control of nonlinear structures		106
6.1	Preliminary remarks	106
6.2	Stochastic optimal polynomial control	106
6.3	Stochastic optimal control of nonlinear oscillators	110

6.3.1	Performance of active tendon control	111
6.3.2	Comparative studies of control criteria	117
6.4	Stochastic optimal control of hysteretic structures	120
6.4.1	Clough hysteretic system	122
6.4.2	Bouc-Wen hysteretic system	129
6.5	Discussions and summaries	136
Chapter 7	Stochastic optimal control of wind-induced habitability of structures	138
7.1	Preliminary remarks	138
7.2	Equivalent linearization of viscously damped structural systems	138
7.2.1	Stiff behaviors of viscously damped structural systems	139
7.2.2	Solution of viscously damped structural systems	140
7.3	Optimal deployment of viscous dampers	146
7.4	Case studies	149
7.4.1	Model reduction and its dynamics	149
7.4.2	Control of wind-induced habitability	152
7.5	Discussions and summaries	156
Chapter 8	Stochastic optimal semi-active control of structures	157
8.1	Preliminary remarks	157
8.2	Stochastic optimal control of structures with MR dampers	158
8.2.1	Bounded Hrovat algorithm	158
8.2.2	Parameters design of MR dampers	160
8.3	Dynamic modeling of MR dampers	161
8.3.1	Parameterized models	161
8.3.2	Parameter identification of model	164
8.3.3	Microscale mechanism of MR dampers	167
8.4	Numerical studies	170
8.5	Discussions and summaries	176
Chapter 9	Shaking table test of controlled structures	177
9.1	Preliminary remarks	177
9.2	Experimental design of controlled structure	177
9.2.1	Dynamics of tested model	177
9.2.2	Samples of seismic ground motions	179
9.2.3	Design parameters of viscous dampers	179

9.3	Experimental layout and cases	182
9.3.1	Experimental layout	182
9.3.2	Experimental cases and validation	184
9.4	Experimental analysis	188
9.4.1	Samples and ensembles	188
9.4.2	Regulation of probability density functions	192
9.5	Reliability assessment	193
9.6	Discussions and summaries	194
Appendix A Mapping from excitation vector to co-state vector		195
Appendix B Statistical linearization based LQG control		197
Appendix C Riccati matrix difference equation and discrete dynamic programming		200
Index		205
References		211

第 1 章

绪 论

1.1 引言

作用于工程结构的动力荷载在时间、空间和大小上往往具有明显的随机性,而结构的材料力学性能一般亦具有随机性,因此,工程结构在外部作用下的反应性态必然表现出不同程度的随机性,传统的确定性结构设计和分析方法,已不能满足结构工程发展的要求(李杰, 2006)。20 世纪 50 年代以来,以考虑结构系统激励随机性的经典随机振动理论(朱位秋, 1992)和考虑结构物理力学参数随机性的随机结构分析理论(李杰, 1996)为两大基石的随机力学系统研究,为在结构工程中发展新一代设计理论奠定了基础。

另一方面,为提高结构性能,早在一百多年前,人们就将基础隔震原理运用到了结构减震设计中。到 20 世纪 70 年代初,结构振动控制概念被正式提出(Yao, 1972),结构减震或振动控制理论和技术在工程实践中逐步得到广泛关注和迅速发展(Soong, 1990; Soong & Dargush, 1997; Chu et al, 2005),成为有效改善结构性态、提高结构安全性和增强结构功能的重要手段之一(Housner et al, 1997; 欧进萍, 2003)。然而,实践表明,由于环境激励和结构以及控制装置中客观存在的不确定性,按照传统的确定性思路设计,或仅考虑量测噪声影响设计的结构控制系统很难实现对结构反应性态的精细化控制(Roussis et al, 2003)。因此,合理量化结构动力系统中的随机性,在概率意义上设计结构控制策略,是结构性态控制的必然发展趋势。

四十余年来,经典随机最优控制理论已从仅考虑量测噪声的信息控制理论逐步扩展为同时考虑激励随机性和/或结构物理参数随机性的结构控制理论,形成了线性二次 Gaussian (Linear Quadratic Gaussian, LQG)控制、协方差控制等结构随机控制理论和方法(Yong & Zhou, 1999)。然而,以状态方程描述和 Itô 微积分为基础的经典随机最优控制理论,通常将量测噪声和随机激励在数学上形式化为白噪声或过滤白噪声,并以 Gaussian 白噪声过程为基础建立性能泛函准则,这就很难合理地考虑诸如地震、强风等非平稳随机激励作用(Yang, 1975)。另一方面,由于经典随机振动理论只能得到线性系统或极特殊的少自由度非线性系统的概率密度解答,使得对于一般非线性系统的精细化控制,在经典随机振动理论框架下仍然是难以企及的目标。与此同时,考虑结构或控制系统参数随机性的随机最优控制问题,则主要着重于系统随机稳定性的分析与考察,且尚未很好地解决。

为解决经典随机力学面临的困境,近年来,基于概率守恒定律发展起来的概率密度演化理论,建立了系统物理演化与概率密度演化的内在联系,将确定性系统与随机系统纳入了统一的框架之中。在此基础上导出的广义概率密度演化方程(Li & Chen, 2006a; 2008; 2009),打开了解决一般多自由度系统随机反应与可靠度分析的大门(李杰 & 陈建兵, 2003; 2004; 2006),也为线性或非线性随机系统的精细化控制提供了新的可能。在此基础上,本书主旨在于发展基于概率密度演化理论的结构随机最优控制理论与方法。在本质上,这是概率密度演化理论向受控随机系统分析的自然延伸。为与经典随机最优控制理论相区别,本书将从概率密度演化的角度对结构性态进行精细化控制的理论称之为物理随机最优控制理论。

1.2 工程结构振动控制研究进展

现代控制理论与方法源于 20 世纪中叶的 Wiener 滤波理论(Wiener, 1949)和 Wiener 控制论(Wiener, 1948)的形成,并在其后的二十年间迅速发展、形成了相对完备的理论体系。自 20 世纪 70 年代初,确定性结构控制理论与结构随机最优控制理论作为几乎独立的两个分支逐步发展起来。

结构控制是通过在结构上安装特定的装置或构件迁移、消耗、吸收或补给能量,以减小或调节主体结构反应。典型的结构控制系统(图 1.2.1),包括传感器(结构荷载和结构状态监测)、控制器(反馈调节结构状态)、作动器(实施控制力)。根据控制系统实施过程中是否需要提供外加能源及所需能源功率大小,结构控制一般可以分为被动控制、主动控制、半主动控制与混合控制(Housner et al, 1997)。

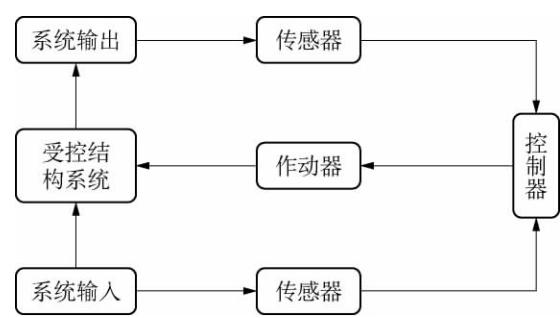


图 1.2.1 典型结构控制系统形式

被动控制是指在结构上附加隔震或耗能减震装置以增加结构的阻尼、刚度和强度。控制装置附加给结构的控制力依赖于结构在外荷载作用下的响应,一般不需要外加能源。1881 年,河合浩藏在日本建筑学会杂志上首次发表了有关圆木隔震方案的论文,最早提出了基础隔震的概念,开结构减震控制之先河(唐家祥 & 刘再华, 1993)。20 世纪 70 年代初, Kelly 及其合作者提出并用试验证明了在结构中增加金属屈服耗能元件进行耗能减震的效果(Kelly et al, 1972; Skinner et al, 1975)。他们的工作对结构抗震延性设计的发展起到了重要的作用,形成了结构耗能减震的一个重要方向(欧进萍, 2003)。其后,大量的耗能元件