

# 前 言

作为一种新的结构防灾方法，土木工程结构控制技术能够有效地增强结构安全性和功能性，是结构抗振减振和防灾减灾积极有效的方法和技术。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，结构振动控制理论和应用大体可以分为被动控制、主动控制、半主动控制和混合控制。被动控制一般不需要外加能源，设计相对简单，工程中易于实现，但是控制效果有限且控制方式不灵活，难以保证结构在强震和强风等荷载作用下的性能要求。与之相比，主动控制具有控制效果好、精度高、能够有效处理外部干扰等诸多优点，且是半主动和混合控制方法的基础。半主动控制和混合控制方法在仅需较小能源需求的前提下，可以达到与主动控制接近一致的控制效果，因此具有更广阔的市场前景。

在实际结构振动控制工程中，由于计算误差、外部激励的不确定性等因素影响，结构的计算模型不可避免地存在不确定性。传统 LQR 等结构主动控制算法对这种不确定性反应较为敏感，不能保证控制系统具有一定的稳定鲁棒性和性能鲁棒性。因此，研究对结构参数和外部激励具有较好鲁棒性、调节简单的主动控制算法及对应的半主动和混合控制策略是土木工程结构体系振动控制研究的一个重要方面。

滑模变结构控制和  $H_\infty$  控制方法是近 20 多年来发展起来的适合土木工程结构振动控制问题的主动鲁棒控制算法。本书系统地介绍一系列适合土木工程结构振动控制工程的弱抖振滑模控制和鲁棒  $H_\infty$  控制算法及其应用，是作者多年来在该领域取得的科研成果的总结。作者自 2005 年起，一直从事结构振动控制和健康监测领域的科研工作。在西北工业大学攻读博士学位期间，在恩师邓子辰教授的引领下，对结构振动控制的主动控制算法产生了浓厚的兴趣；在西安建筑科技大学土木工程博士后流动站工作期间，受到了合作导师王社良教授的悉心指导，对于结构鲁棒控制算法的应用进行了较为深入的研究；受国家留学基金管理委员会资助，在美国俄亥俄州立大学哥伦布分校以访问学者身份从事合作研究期间，在合作导师美国土木工程学会杰出会员、国际顶级期刊 *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 主编、俄亥俄州立大学 Hojjat Adeli 教授的悉心指导下，取得了一定的研究成果，对该领域的国际研究动态有了更为全面的了解。在此向三位导师致以最崇高的敬意和最衷心的感谢。

全书共 10 章：第 1 章是绪论；第 2 章是结构弱抖振模糊滑模控制；第 3 章是

混合控震系统的弱抖振模糊滑模控制；第 4 章是结构基于 RBF 神经网络的变结构控制；第 5 章是 ATMD-结构基于补偿器的滑模控制；第 6 章是结构基于 Kalman 滤波器的离散变结构控制；第 7 章是建筑结构的鲁棒  $H_\infty$  最优控制；第 8 章是建筑结构基于 LMI 的鲁棒非脆弱  $H_\infty$  控制；第 9 章是 ATMD-偏心结构基于 LMI 的鲁棒  $H_\infty$  控制；第 10 章是建筑结构基于 LMI 的离散鲁棒  $H_2/H_\infty$  控制。

虽然本书主要是以土木工程结构为对象和背景展开的,但是其中大部分理论、方法及应用也适用于其他学科领域的结构振动控制问题。

本书主要内容的研究工作得到了国家自然科学基金项目(51678480)、陕西省工业攻关项目(2013K07-07)、陕西省教育厅专项科研计划项目(2013JK0612)、西部地区人才培养特别项目(201208615016)、西安工业大学校长基金重点项目(XAGDXJJ0919)及“后备拔尖人才”项目的资助,在此表示衷心感谢。

在本书的写作过程中,参考了国内外同行发表的研究成果,在此向这些学者表示诚挚的谢意。

由于作者学识有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2017 年 7 月

# 目 录

## 前言

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                  | 1  |
| 1.1 滑模控制                  | 2  |
| 1.2 鲁棒 $H_{\infty}$ 控制    | 5  |
| 1.3 本书的主要内容               | 7  |
| 参考文献                      | 8  |
| 第 2 章 结构弱抖振模糊滑模控制         | 15 |
| 2.1 引言                    | 15 |
| 2.2 结构基于模糊自适应调节趋近律的滑模控制   | 15 |
| 2.2.1 控制系统的运动方程           | 16 |
| 2.2.2 基于全状态反馈的模糊滑模控制      | 16 |
| 2.2.3 基于有限状态反馈的模糊滑模控制     | 19 |
| 2.2.4 仿真研究                | 20 |
| 2.3 建筑结构离散滑模控制的模糊趋近律方法    | 25 |
| 2.3.1 基于模糊趋近律的控制器设计       | 25 |
| 2.3.2 仿真研究                | 27 |
| 2.4 本章小结                  | 31 |
| 参考文献                      | 31 |
| 第 3 章 混合控震系统的弱抖振模糊滑模控制    | 33 |
| 3.1 引言                    | 33 |
| 3.2 单输入非线性控制系统的滑模控制       | 33 |
| 3.3 基础隔震结构滑模控制的模糊趋近律方法    | 35 |
| 3.3.1 控制系统的运动方程           | 35 |
| 3.3.2 切换面的确定              | 38 |
| 3.3.3 控制律的设计              | 39 |
| 3.3.4 仿真研究                | 39 |
| 3.4 带限位装置的基础滑移隔震结构的模糊滑模控制 | 42 |
| 3.4.1 控制系统的运动方程           | 43 |
| 3.4.2 切换面的确定              | 44 |

|              |                                |           |
|--------------|--------------------------------|-----------|
| 3.4.3        | 控制律的设计                         | 46        |
| 3.4.4        | 仿真研究                           | 47        |
| 3.5          | 本章小结                           | 53        |
|              | 参考文献                           | 53        |
| <b>第 4 章</b> | <b>结构基于 RBF 神经网络的变结构控制</b>     | <b>55</b> |
| 4.1          | 引言                             | 55        |
| 4.2          | 控制系统的运动方程                      | 56        |
| 4.3          | 固定增益变结构控制器的设计                  | 57        |
| 4.4          | 基于 RBF 神经网络的增益调节               | 57        |
| 4.5          | 算例                             | 59        |
| 4.6          | 本章小结                           | 63        |
|              | 参考文献                           | 63        |
| <b>第 5 章</b> | <b>ATMD-结构基于补偿器的滑模控制</b>       | <b>65</b> |
| 5.1          | 引言                             | 65        |
| 5.2          | 运动方程                           | 65        |
| 5.3          | 带有补偿器的滑模控制                     | 67        |
| 5.3.1        | 补偿器的设计                         | 67        |
| 5.3.2        | 准滑模控制器设计                       | 69        |
| 5.3.3        | 模糊滑模控制器设计                      | 69        |
| 5.3.4        | 饱和控制律的设计                       | 71        |
| 5.4          | 数值分析                           | 71        |
| 5.4.1        | 准滑模控制律                         | 72        |
| 5.4.2        | 模糊滑模控制律                        | 75        |
| 5.5          | 本章小结                           | 79        |
|              | 参考文献                           | 79        |
| <b>第 6 章</b> | <b>结构基于 Kalman 滤波器的离散变结构控制</b> | <b>81</b> |
| 6.1          | 引言                             | 81        |
| 6.2          | 结构的力学方程及离散化                    | 82        |
| 6.2.1        | 结构的力学方程                        | 82        |
| 6.2.2        | 力学方程的离散化                       | 82        |
| 6.3          | 基于 Kalman 滤波器的离散滑模控制           | 83        |
| 6.3.1        | Kalman 滤波的原理                   | 83        |
| 6.3.2        | Kalman 滤波的特点                   | 83        |
| 6.3.3        | Kalman 滤波器的设计                  | 83        |

---

|   |            |
|---|------------|
| 6.3.4 离散滑模控制器设计 .....   | 84         |
| 6.4 实例仿真与分析 .....   | 85         |
| 6.4.1 实例一 .....   | 85         |
| 6.4.2 实例二 .....   | 89         |
| 6.5 本章小结 .....  | 95         |
| 参考文献 .....  | 95         |
| <b>第 7 章 建筑结构的鲁棒 <math>H_\infty</math> 最优控制</b> .....           | <b>97</b>  |
| 7.1 引言 .....  | 97         |
| 7.2 结构的运动方程 .....   | 98         |
| 7.3 线性二次型最优控制器设计 .....  | 98         |
| 7.4 鲁棒 $H_\infty$ 最优控制器设计 .....                                 | 99         |
| 7.5 数值分析 .....  | 102        |
| 7.5.1 鲁棒 $H_\infty$ 最优控制与 LQR 控制方法比较 .....                      | 102        |
| 7.5.2 鲁棒 $H_\infty$ 最优控制与传统 $H_\infty$ 控制方法比较 .....             | 108        |
| 7.6 本章小结 .....  | 113        |
| 参考文献 .....  | 113        |
| <b>第 8 章 建筑结构基于 LMI 的鲁棒非脆弱 <math>H_\infty</math> 控制</b> .....   | <b>115</b> |
| 8.1 引言 .....  | 115        |
| 8.2 结构的运动方程 .....   | 115        |
| 8.3 $H_\infty$ 控制器设计 .....                                      | 116        |
| 8.4 鲁棒非脆弱 $H_\infty$ 控制器设计 .....                                | 116        |
| 8.5 数值分析 .....  | 120        |
| 8.6 本章小结 .....  | 125        |
| 参考文献 .....  | 126        |
| <b>第 9 章 ATMD-偏心结构基于 LMI 的鲁棒 <math>H_\infty</math> 控制</b> ..... | <b>127</b> |
| 9.1 ATMD-偏心结构的运动方程 .....  | 127        |
| 9.2 鲁棒 $H_\infty$ 控制器设计 .....                                   | 129        |
| 9.3 鲁棒非脆弱 $H_\infty$ 控制器设计 .....                                | 130        |
| 9.4 数值分析 .....  | 131        |
| 9.4.1 鲁棒 $H_\infty$ 控制器 .....                                   | 131        |
| 9.4.2 鲁棒非脆弱 $H_\infty$ 控制器 .....                                | 137        |
| 9.5 本章小结 .....  | 143        |
| 参考文献 .....  | 143        |

---

|   |     |
|---|-----|
| 第 10 章 建筑结构基于 LMI 的离散鲁棒 $H_2/H_\infty$ 控制 ..... | 145 |
| 10.1 结构参数不确定性的模拟 .....                          | 146 |
| 10.2 基于 LMI 的鲁棒 $H_2/H_\infty$ 控制器设计 .....      | 148 |
| 10.3 数值分析 .....                                 | 152 |
| 10.3.1 算例 1 .....                               | 152 |
| 10.3.2 算例 2 .....                               | 157 |
| 10.4 本章小结 .....                                 | 162 |
| 参考文献 .....                                      | 163 |

# 第 1 章 绪 论

结构振动控制理论改变了传统的采用承重结构体系直接抵御灾害作用的思路。采用非承重的结构控制装置或构件来减小主体承重结构的灾害响应,提高工程结构抵御灾害作用的能力,使工程结构在灾害作用下少损失或不损坏并完全满足设计要求成为可能<sup>[1-3]</sup>。自 1972 年 Yao 提出结构控制的概念以来,相关理论和方法在工程实践中得到广泛关注和迅速发展,成为改善结构性态、增强结构安全性和增强结构功能性的重要手段之一<sup>[2]</sup>。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等类型<sup>[3]</sup>。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阻尼、刚度和强度特性,一般不需要外部能量输入<sup>[4,5]</sup>。被动控制设计相对简单、在工程中易于实现,利用被动控制技术来减小结构的动力反应,可以取得一定的控制效果<sup>[6]</sup>。但实践表明,在地震或强风等荷载作用下,被动控制对于复杂条件下结构体系性态的改善存在明显的不足<sup>[2]</sup>。主动控制相对于被动控制具有控制效果好、精度高、能够有效处理外部干扰等诸多优点,而且主动控制是半主动控制和混合控制的基础,存在巨大的工程应用价值<sup>[3]</sup>。传统线性二次型最优控制(linear quadratic regulator, LQR)算法和基于 LQR 算法的半主动控制方法在结构振动控制工程中应用非常广泛<sup>[7,8]</sup>,但由于传统线性主动控制算法(如 LQR 算法、极点配置法、独立模态控制法等)的共同问题是需要系统精确的数学模型,包括精确的模型结构及所含的参数,而在实际的结构控制中,结构的模型参数(如结构的阻尼和刚度)难以用数学模型来精确描述,结构的不确定性会导致系统控制的不稳定和控制性能恶化。由于土木工程结构体系具有结构模型和结构参数不精确等特点,因此研究对结构参数和外部激励具有较好鲁棒性、调节简单的控制算法与控制策略是土木工程结构体系振动控制研究的一个重要方面<sup>[9,10]</sup>。

随着国民经济的发展和城市化进程的加快,出现了大量的复杂结构体系:  
①为了满足建筑功能的复杂性和多样性要求,体型和结构布置复杂的高层建筑不断出现,形成了大量的偏心结构。由于地震动的本质是多维的,对于偏心结构,地震时作用在质量中心的惯性力将对刚度中心产生扭转力矩,迫使结构产生扭转耦联空间振动,忽略地震动的空间变化会低估偏心结构的反应,使结构偏于不安全<sup>[11]</sup>。对于偏心结构,扭转反应是造成建筑物震害的主要因素之一,在满足建筑功能的前提下现行规范主要通过增加结构抗扭刚度来减弱其扭转效应,这必然会

导致构件截面大、节点复杂、成本较高,且难以保证建筑物在罕遇地震下具有足够的安全性<sup>[6,12]</sup>。②大跨空间结构,如大跨度斜拉桥、空间网架结构等,具有低刚度、高柔性、弱阻尼和体型庞大等显著特点,在地震等动力荷载作用下很容易产生振动,并且引起动力失稳事故发生。理论研究表明,忽略地震动的空间变化会严重低估大跨度空间结构的反应<sup>[13]</sup>。现行抗震设计方法主要利用大跨结构自身的“硬抗”能力,即结构完全依靠自身的承载力、刚度和延性等抵抗地震作用,但这种抗震设计技术仍不能保证大跨结构在罕遇地震下具有足够的安全性<sup>[12]</sup>。

考虑复杂条件下土木工程结构体系的鲁棒最优控制是一项极具挑战性的课题。本书试图在充分了解多维地震动下结构体系动态特性的基础上,以抖振的削弱作为滑模控制研究的重点,以计算简单、性能指标易于衡量作为鲁棒  $H_\infty$  控制研究的重点,考虑结构参数变化、地震动的空间特性、结构体型不规则等因素影响,研究复杂条件下线性和非线性结构体系的鲁棒控制算法。本书致力于发展鲁棒、稳健的复杂结构体系最优控制策略,其主要内容可为复杂条件下结构体系性态的精细化控制提供理论基础和技术支持。

近 20 多年来应用和发展起来的、适用于土木工程结构的鲁棒控制算法主要有滑模变结构控制、 $H_2$  和  $H_\infty$  控制、智能控制等。本书主要以鲁棒控制中的滑模控制和  $H_\infty$  控制算法作为研究的重点,因此主要介绍这两种算法的国内外研究进展。

## 1.1 滑模控制

滑模控制本质上是一类特殊的非线性控制,其非线性表现为控制的不连续性。这种控制策略与其他控制的不同之处在于系统的“结构”并不固定,而是可以在动态过程中,根据当前的状态有目的地不断变化,迫使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动。由于滑动模态可以进行设计且与对象参数及扰动无关,这就使得滑模控制具有快速响应、对参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识、物理实现简单等优点,故被广泛应用于运动控制中<sup>[14-23]</sup>。该方法的缺点在于,当状态轨迹到达滑模面后,难以严格地沿着滑模面向平衡点滑动,而是在滑模面两侧来回穿越,从而产生抖振。滑模控制对系统的参数摄动和外部扰动的不变性是以控制量的高频抖振换取的,由于在实际应用中,这种高频抖振在理论上是无限快的,没有任何执行机构能够实现;同时,这样的高频输入很容易激发系统的未建模特性,从而影响系统的控制性能<sup>[24]</sup>。要将滑模控制方法应用到复杂结构体系的振动控制工程中,必须将控制系统过大的抖振减小到一定程度,并且又要保证滑模控制具有较好的鲁棒性。



进入 20 世纪 90 年代后,美国学者 Yang 等率先将滑模变结构控制方法引入土木工程结构的振动控制问题中,分别研究了桥梁的滑模变结构控制<sup>[25]</sup>、一般建筑结构(框架结构、剪力墙结构等)的滑模变结构控制<sup>[26-29]</sup>、基础隔震结构的滑模变结构控制<sup>[30,31]</sup>及含有补偿器的建筑结构的滑模变结构控制等<sup>[32]</sup>。文献[25]~[33]主要针对连续时间系统模型,利用文献[34]提出的李雅普诺夫(Lyapunov)直接方法设计了非连续控制器,并引入边界层来减小系统过大的抖振。数值分析和试验结果表明,他们提出的变结构控制方法显著地减小了结构在地震作用下的地震峰值响应,对结构模型参数的不确定性具有较好的鲁棒性,但他们并未对控制律参数对系统抖振的影响作进一步的研究,而且由于结构参数不确定性的影响,为了确保滑动模态的存在,必须选取一个较大的边界层,这势必会增大系统的抖振。Moon 等<sup>[35]</sup>针对连续时间系统模型,利用 Yang 等<sup>[25]</sup>的方法对斜拉桥进行了数值仿真分析,取得了较好的控制效果。Luo 等<sup>[36]</sup>和 Adhikari 等<sup>[37]</sup>针对连续时间系统模型,利用等效控制的方法设计了控制器,并在控制律中引入饱和函数来降低控制系统的抖振,取得了较好的控制效果,但这种方法对系统的鲁棒性降低较多。

模糊控制以 20 世纪 60 年代 Zadeh<sup>[38]</sup>的模糊数学为基本理论基础,从 70 年代起进入实际工程应用阶段<sup>[39-46]</sup>。在近十多年中,模糊控制作为一种有别于传统控制理论的控制方法,充分发挥其不需要对象数学模型、并能充分运用专家的信息及具有鲁棒性的优点,在土木工程领域表现出其优势<sup>[47-53]</sup>。Alli 等<sup>[54]</sup>针对连续时间系统模型,基于等效控制和模糊控制的相关理论设计了相应的变结构控制律,数值分析结果表明他们提出的方法在不降低系统鲁棒性的前提下,显著地减小了结构的地震峰值响应,且达到了削弱控制系统抖振的目的。

国内对于土木工程结构的滑模变结构的研究稍晚一些。2000 年左右,同济大学的赵斌等<sup>[55-59]</sup>和上海交通大学的蔡国平等<sup>[60,61]</sup>率先将滑模变结构控制方法引入土木工程的振动控制问题中。他们首先针对连续时间系统模型,基于高为炳<sup>[10]</sup>提出的指数趋近律方法设计了控制律,经过数值仿真计算发现其控制效果好于 Yang 等<sup>[30]</sup>所采用的方法,但并未很好地解决变结构控制系统过大的抖振问题。指数趋近律中符号函数的增益参数  $\varepsilon$  的作用非常大,  $\varepsilon$  值减小,可减小系统的抖振,但  $\varepsilon$  值太小,将影响系统到达切换面的趋近速度。当系统参数变化比较大或系统存在比较大的不确定性时,为了确保滑动模态的存在,必须选取较大的  $\varepsilon$  值,这样必然会使系统的抖振增加,从而影响系统的性能。孙清等<sup>[62]</sup>针对连续时间系统模型,采用高为炳<sup>[10]</sup>提出的幂次趋近律设计了变结构控制律,取得了较好的控制效果,但并未很好地解决系统过大的抖振问题。盛严等<sup>[63,64]</sup>也针对连续时间系统模型,采用一种改进指数趋近律方法设计变结构控制律,数值分析表明其控制效果较好,

且较好地控制了系统过大的抖振。

在实际工程中,计算机实时控制均为离散时间系统,离散时间系统滑模变结构的研究与设计成为滑模变结构控制理论与应用的一个重要组成部分<sup>[65]</sup>。在 20 世纪 80 年代后期,离散滑模变结构控制迅速发展起来,并在工程领域得到了一系列的应用<sup>[10,66,67]</sup>。同济大学的赵斌等<sup>[68]</sup>和上海交通大学的蔡国平等<sup>[69]</sup>针对离散时间系统模型,基于离散指数趋近律方法设计了变结构控制律,数值仿真分析表明,他们提出的变结构控制方法显著地减小了结构在地震作用下的地震峰值响应,但由于指数趋近律离散形式有它自身的缺点,即切换带为带状,当系统在切换带中运行时,最后不能趋近于原点,而是趋近于原点附近的一个抖振。这种抖振将可能激励系统中存在的未建模高频成分,并可能增加控制器的负担,所以这种方法并未很好地解决系统过大的抖振问题。

利用离散指数趋近律设计离散时间系统的滑模变结构控制律,具有诸多优越性,但受到离散指数趋近律的参数和离散时间系统的采样周期的影响,系统会出现很大的抖振。针对应用离散指数趋近律存在的问题,大连理工大学的金峤等<sup>[70]</sup>利用 BP 神经网络来在线调整离散指数趋近律中的符号函数增益系数,以达到削弱控制系统抖振的目的,但 BP 神经网络具有学习时间过长和容易陷入局部极值等缺陷<sup>[71-75]</sup>。李志军等<sup>[76]</sup>基于李文林<sup>[77]</sup>提出的组合趋近律方法设计了变结构控制律,取得了较好的控制效果,且达到了削弱控制系统抖振的目的。

建筑结构振动控制的方案大体可以分为三类,即被动控制、主动控制、半主动和混合控制。半主动和混合控制由于兼有被动控制和主动控制的优点,因而被认为是一种非常有前途的方法,已经越来越多地引起人们的关注<sup>[3]</sup>。橡胶垫支座基础隔震<sup>[78,79]</sup>和滑移隔震<sup>[80-88]</sup>是目前研究较多的两种结构被动控制方法,由于大部分隔震系统在地震作用下都表现出很强的非线性性能,因而混合控震系统也是一样。许多学者针对这种情况,研究了各种处理非线性结构问题的控制算法,如滑移模态控制、模糊控制等<sup>[3]</sup>。同济大学的赵斌等<sup>[89,90]</sup>针对橡胶垫支座基础隔震结构,引入基于指数趋近律的变结构控制器形成混合控震结构,建立了连续时间系统混合控震结构模型,数值分析结果表明,他们所提的方法具有较好的控震效果,能够有效地减小隔震层中橡胶垫支座的水平位移,但并未很好地解决控制系统过大的抖振问题。

目前土木工程结构的滑模控制方法,主要是针对一维地震动作用下的对称结构体系,且主要以线性结构体系和简单非线性结构体系(基础隔震结构模型,上部结构按线性结构体系处理)为研究对象,要将滑模控制方法应用于实际的结构体系振动控制工程中,尚需解决如下问题:①考虑地震动的空间变化和结构体型的复杂性特点;②研究到达滑模面快且抖振较小的滑模控制算法;③考虑输入时滞、

部分传感器和作动器失效等因素影响。

## 1.2 鲁棒 $H_\infty$ 控制

从理论的系统完整性和工程应用的成功事例来看,  $H_\infty$  方法在鲁棒控制中占有主流地位<sup>[91-93]</sup>。虽然鲁棒  $H_\infty$  控制理论已日臻完善, 但其在结构振动控制工程中的应用相对较少, 主要原因是系统综合的复杂性, 以及无穷范数形式与常用工程评价指标间的差异性<sup>[91]</sup>。

鲁棒控制理论结合系统模型参数不确定性和外部扰动不确定性的考虑, 研究系统的鲁棒性能分析和综合问题, 弥补了现代控制理论需要对象精确数学模型的缺陷, 使系统的分析和综合方法更加有效、实用。Doyle 等<sup>[94]</sup>在 1989 年发表的著名文章是  $H_\infty$  控制发展中的一个里程碑, 他们将  $H_\infty$  问题的求解归结为解两个 Raccati 方程, 从而建立了二次型最优控制与  $H_\infty$  控制的本质联系。众多学者的研究表明, 很多关于控制系统的鲁棒性分析和综合问题, 均可以归纳为标准的  $H_\infty$  优化设计问题, 如鲁棒镇定问题、跟踪问题、灵敏度极小化问题和模型匹配问题等, Zhou 等<sup>[95]</sup>、Glover 等<sup>[96]</sup>的研究成果标志该方法已基本成熟。尽管 Raccati 方程处理方法可以给出控制器的结构形式, 便于进行一些理论分析, 但是需要设计者事先确定一些待定参数, 这些参数的选择不仅影响到结论的好坏, 而且会影响到问题的可解性。但在现有的 Raccati 方程处理方法中, 还缺乏寻找这些参数最佳值的方法, 参数的这种人为确定方法给分析和综合结果带来了很大的保守性。另一方面, 求解 Raccati 方程的方法多为迭代法, 这些方法的收敛性并不能得到保证。

1994 年, Boyd 等<sup>[97]</sup>有关线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)的专著, Iwasaki 等<sup>[98]</sup>的成果以及 Gahinet 等<sup>[99]</sup>与美国 The Math Works 公司合作推出的 Matlab LMI Toolbox 使  $H_\infty$  控制理论真正成为一个实用的系统分析与设计方法。人们在享受 LMI 带来的方便实用中很快又发现这种将  $H_\infty$  控制方法转换为求解一组 LMI 的方法不仅能克服求解两个联立的 Raccati 方程时第二个 Raccati 方程的求解过程不易收敛的困难, 还能充分地利用矩阵理论的现有成果解一类特殊的无穷维系统, 即时滞系统的控制问题。时滞现象大量存在于各种工程中, 时滞常常是导致系统不稳定或性能恶化的一个重要原因, 而基于 LMI 的  $H_\infty$  控制方法能够与预测控制相结合获得更高的控制性能, 具有广泛的应用前景。

$H_\infty$  控制算法是近 20 多年来应用和发展起来的适用于土木工程结构的一种主动鲁棒控制算法<sup>[3]</sup>。20 世纪 90 年代初期, Suhardjo 等<sup>[100]</sup>、Jabbari 等<sup>[101]</sup>率先将  $H_\infty$  控制方法引入土木工程的振动控制问题中, 但相应的控制器参数不易确定, 且相

应的 Raccati 方程不易求解。Li 等<sup>[102]</sup>和 Wu 等<sup>[103]</sup>针对连续时间系统,利用 Iwasaki 等<sup>[98]</sup>提出的方法,建立了结构基于全状态和有限状态反馈的  $H_\infty$  控制方法,并通过试验验证了该理论算法的可行性。Anthony 等<sup>[104]</sup>基于界实定理,即 Doyle 等<sup>[94]</sup>提出的方法,针对连续时间系统,研究了结构全状态和有限状态反馈的  $H_\infty$  控制方法。Wang 等<sup>[105,106]</sup>考虑结构参数和外部激励等诸多不确定性因素,针对连续时间系统,提出了一种新的鲁棒  $H_\infty$  控制方法,数值仿真结果表明了算法的有效性,但在建模过程中系数矩阵不确定性是以逆质量矩阵包含的形式出现的,从而导致不确定性描述的不自然、不直接,并使控制器设计方法较为烦琐,且待定参数不易确定。Wu 等<sup>[107]</sup>基于界实定理的改进形式<sup>[108]</sup>,针对连续时间系统,提出基于 LMI 的鲁棒  $H_\infty$  控制方法,并通过试验进行了验证。Stavroulakis 等<sup>[109]</sup>基于 Zhou<sup>[110]</sup>介绍的方法,针对连续时间系统,提出一种基于 LMI 的鲁棒  $H_\infty$  控制方法,仿真结果表明该方法具有较好的控制效果。

国内关于  $H_\infty$  控制算法的研究稍晚一些,1998 年,谢石林等<sup>[111]</sup>研究了振动系统频域不确定和参数不确定两种情形的  $H_\infty$  控制器设计问题,其控制器待定参数不易选择,且相应的 Raccati 方程不易求解。张浩等<sup>[112]</sup>基于频域定型理论设计相应的  $H_\infty$  控制算法,将其用于主动调谐质量阻尼器(active tuned mass damper, ATMD)结构,但是该方法也具有上述不足。刘晖等<sup>[113]</sup>利用 Doyle 等<sup>[114]</sup>提出的方法,设计与连续时间系统相应的  $H_\infty$  鲁棒控制器,将其用于结构风振控制中,仿真结果表明该方法具有较好的控制效果。沙成满<sup>[115]</sup>将  $H_\infty$  控制算法应用于土-结构相互作用的 结构控制,取得了较好的控制效果。颜桂云等<sup>[116]</sup>基于 Doyle 等提出的方法设计了相应的全状态反馈和有限状态反馈  $H_\infty$  控制算法,并用于磁流变阻尼器中,取得了较好的控制效果,但鉴于控制算法的不足,其控制效果有待作进一步的优化。徐洋等<sup>[117]</sup>基于 Doyle 等<sup>[94]</sup>提出的方法设计了相应的  $H_\infty$  控制算法,并用于 ATMD 结构,利用试验验证了方法的有效性。Du 等<sup>[118]</sup>基于界实定理,提出了一种基于 LMI 的鲁棒  $H_\infty$  控制方法,该方法避开质量矩阵直接考察质量、刚度和阻尼矩阵的不确定性,但推导主要结果时引入的许多复杂变换导致较大的保守性。李文章等<sup>[119]</sup>针对含有非线性环节与外部激励干扰的结构系统,针对连续时间系统,提出了一种新型的基于 LMI 的非脆弱鲁棒  $H_\infty$  振动主动控制算法,引入不确定控制器输入矩阵以解决控制器的脆弱性问题,并通过调节参考输出权值矩阵以避免控制器增益饱和,但相应待定参数不易确定,仿真结果表明该方法在保证控制效果的前提下具有较强的鲁棒性。

为了使鲁棒  $H_\infty$  方法能尽快应用于实际结构振动控制工程中,许多学者以一维地震作用下的对称结构体系为研究对象,进行了相应的理论研究工作。Calise 等<sup>[120]</sup>提出的方法需求解两个 Raccati 方程,求解不易收敛。Du 等<sup>[121]</sup>考虑控制输

入的时间延迟和控制器饱和性能的影响,基于 LMI 方法,设计了一种鲁棒  $H_\infty$  控制方法,数值仿真结果表明了其方法的有效性。李志军等<sup>[122]</sup>引入二次型性能指标,并利用 LMI 简化计算,设计了一种计算简单、便于工程应用的鲁棒  $H_\infty$  控制器,仿真结果表明了其控制方法的有效性。Lin 等<sup>[123]</sup>针对一含有主动拉索控制装置的单层不规则结构体系,设计了相应的  $H_2/H_\infty$  控制方法,但该方法未考虑结构参数的不确定性影响。

目前结构体系的鲁棒  $H_\infty$  方法理论研究尚不完善,亟待解决的主要问题有:①大部分算法待定控制器参数较多,计算过程烦琐,不便于工程实际应用;②对于地震动的空间变化和结构体系的复杂性特点考虑不足;③鲁棒  $H_\infty$  控制算法中对于输入时滞、部分控制器和传感器失效等因素考虑不足;④基于鲁棒  $H_\infty$  控制算法的半主动和混合控制方法研究较少。

### 1.3 本书的主要内容

随着现代科学技术的发展,结构振动控制不仅正在形成对学科交叉的新型分支学科,还将形成振动控制装备的新兴产业,显示出智能结构系统的美好前景。为了发展鲁棒、稳健的复杂结构体系最优控制策略,保障土木工程结构体系在复杂条件下具有足够的安全性。本书以已有工作为基础,以弱抖振滑模控制和鲁棒  $H_\infty$  控制作为主要的鲁棒控制方法,详细介绍复杂条件下土木工程结构体系的鲁棒控制方法,并对这些鲁棒控制方法在主动、半主动和混合控制系统中的应用作一些相应的研究,主要内容如下。

(1) 复杂条件下结构的智能滑模变结构控制方法。基于模糊、神经网络等一些智能算法的优点,将智能算法与滑模变结构控制算法相结合,以期在保证较好控制效果和鲁棒性的前提下,削弱控制系统的抖振。

(2) 带有补偿器的结构弱抖振滑模控制方法。土木工程结构,如高层建筑或大跨桥梁,包含大量的自由度,要在每一个自由度上安装传感器来测全状态向量,显然是不现实的。采用状态观测器又会由于大量的在线计算而导致控制时间的延迟(较大的时间延迟可能会导致系统的失稳)。所以往往只在结构较为重要的部位安装传感器,进行有限状态输出反馈控制,不过有时有限状态输出反馈控制律会由于结构的大量自由度而不易设计。通常的滑模控制在均衡控制力和控制效果时,要么改变切换面,要么指定最大控制力(也就是饱和控制),这两种方法有时均不能进行很好的均衡。而采用带有补偿器的高层建筑结构的弱抖振滑模控制方法可以较好地解决上述问题,该方法具有以下优点:一是可以方便地均衡控制力与控制效果;二是更易于设计有限状态的反馈控制律;三是可以在保证控制效果的前

提下,使控制系统具有很小的抖振,从而保证其具有稳定的性能。

(3) 复杂条件下结构基于 Kalman 滤波器的有限状态反馈滑模控制方法。考虑在实际的大型建筑结构中安装过多的传感器进行主动控制是不切实际的,基于 Kalman 滤波器的特点设计相应的滤波器对结构的部分状态进行估计,研究基于 Kalman 滤波器的滑模变结构控制方法,对复杂条件下建筑结构的振动控制问题进行研究。并考虑地震动的空间特性、结构体型的复杂性特点等因素,对所提方法在规则结构和 ATMD-偏心结构体系的应用方面进行相应的研究。

(4) 复杂条件下结构的鲁棒  $H_\infty$  最优控制。针对传统线性二次型最优控制等主动控制方法存在鲁棒性较差的不足,考虑结构参数的不确定性、地震动的空间特性、结构体型的复杂性等因素影响,研究控制算法简单、便于工程应用的鲁棒  $H_\infty$  最优控制方法。将工程中常用的二次型最优指标结合于鲁棒  $H_\infty$  控制系统的分析中,使控制器的性能指标容易衡量;通过引入线性矩阵不等式减小求解的复杂度。通过与 LQR 方法和传统  $H_\infty$  控制方法进行对比,显示所提方法的优越性,同时,对于所提方法在 ATMD-偏心结构中的应用做了相应的研究。

(5) 复杂条件下结构的离散鲁棒  $H_2/H_\infty$  控制。基于  $H_2$  控制和  $H_\infty$  的优点,考虑到实际工程中计算机实时控制均为离散系统,设计便于工程应用的基于复杂条件的结构离散鲁棒  $H_2/H_\infty$  控制方法。

## 参 考 文 献

- [1] SOONG T T, CONSTANTINOU M C. Passive and Active Structure Vibration Control in Civil Engineering[M]. New York: Springer-Verlag, 1994.
- [2] HOUSNER C W, BERGMAN L A, CAUGHEY T K, et al. Structural control: Past, present, and future[J]. Journal of engineering mechanics, 1997, 123 (9): 897-971.
- [3] 欧进萍. 结构振动控制: 主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [4] LIN C C, WANG J F, LIEN C H, et al. Optimum design and experimental study of multiple tuned mass dampers with limited stroke[J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2010, 39(14): 1631-1651.
- [5] CHOU C C, CHEN S Y. Subassembly tests and finite element analyses of sandwiched buckling-restrained braces[J]. Engineering structures, 2010, 32(8): 2108-2121.
- [6] 程光煜, 叶列平, 朱兴刚. 偏心结构消能减震技术的分析研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(2): 78-83.
- [7] 全伟, 李宏男. 大跨斜拉桥多维多点地震激励减震控制方法分析[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(4): 540-546.
- [8] 瞿伟廉, 吴斌, 李爱群. 工程结构的振动控制理论及其应用[R]//国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 建筑、环境与土木工程学科发展战略研究报告(土木工程卷). 北京: 科学出版社, 2006.
- [9] 孟光, 孟庆国, 詹世革, 等. 关于加强针对国家重大装备的动力学与控制研究的建议[J]. 力

- 学进展, 2007, 37(1): 135-141.
- [10] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [11] 霍林生, 李宏男. 调液阻尼器对偏心结构扭转耦联振动控制的研究[J]. 工程力学, 2010, 27(1): 84-90.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2010.
- [13] 白凤龙, 李宏男. 地震动多点激励下大跨空间网架结构的反应分析[J]. 工程力学, 2010, 27(7): 67-73.
- [14] UTKIN V I. Sliding Modes and Their Application in Variable Structure System[M]. Moscow: MIR Publishers, 1974.
- [15] UTKIN V I, GULDNER J, SHI J. Sliding Mode Control in Electromechanical Systems[M]. Philadelphia: Taylor & Francis, 1999.
- [16] HUNG J Y, GAO W B, HUNG J C. Variable structure control: A survey[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 1993, 40(1): 2-22.
- [17] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [18] GAO W B, WANG Y F, HOMAIFA A. Discrete-time variable structure control systems[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 1995, 42(2): 117-122.
- [19] 胡跃明. 非线性控制系统理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [20] 胡跃明. 变结构控制理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [21] 姚琼荟, 黄继起, 吴汉松. 变结构控制系统[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1997.
- [22] 王丰尧. 滑模变结构控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [23] 田宏奇. 滑模控制理论及其应用[M]. 武汉: 武汉出版社, 1995.
- [24] 姚琼荟, 宋立忠, 鄢圣茂. 离散变结构控制理论研究现状与展望[J]. 海军工程大学学报, 2004, 16(6): 23-36.
- [25] YANG J N. Hybrid control of seismic-excited bridge structures[J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 1995, 24(11): 1437-1451.
- [26] SCHMITENDORF W E, JABBARI F, YANG J N. Robust control techniques for buildings under earthquake excitation[J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 1994, 23(5): 539-552.
- [27] YANG J N, WU J C, AGRAWAL A K. Sliding mode control for seismically excited linear structures[J]. Journal of engineering mechanics, 1995, 121(12): 1386-1390.
- [28] WU J C, AGRAWAL A K, YANG J N. Application of sliding mode control to benchmark problem[J]. Proceedings of the ASCE structures congress XV, 1997, 2: 1275-1279.
- [29] WU J C, AGRAWAL A K, YANG J N. Applications of sliding mode control to benchmark problems[J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 1998, 27(11): 1247-1265.
- [30] YANG J N, WU J C, AGRAWAL A K. Sliding mode control for nonlinear and hysteretic structures[J]. Journal of engineering mechanics, 1995, 121(12): 1330-1339.
- [31] YANG J N, WU J C, REINHORN A M, et al. Control of sliding-isolated buildings using sliding-mode control[J]. Journal of structural engineering, 1996, 122(2): 179-186.
- [32] YANG J N, WU J C, AGRAWAL A K, et al. Sliding mode control with compensator for wind and seismic response control[J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 1997, 26(11):

- 1137-1156.
- [33] YANG J N, WU J C, REINHORN A M, et al. Experimental verifications of  $H_{\infty}$  and sliding-mode control for seismically excited buildings[J]. Journal of structural engineering, 1996, 122(1): 69-75.
- [34] LEFSCHETZ S W. Stability of Nonlinear Control System[M]. New York: Academic Press, 1965.
- [35] MOON S J, BERGMAN L A, VOULGARIS P G. Sliding mode control of cable-stayed bridge subjected to seismic excitation[J]. Journal of structural engineering, 2003, 122(2): 179-186.
- [36] LUO N, RODELLAR J, SENC M D L, et al. Output feedback sliding mode control of base isolated structures[J]. Journal of the franklin institute, 2000, 337(5): 555-577.
- [37] ADHIKARI R, YAMAGUCHI H. Sliding mode control of buildings with ATMD[J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2015, 26(4): 409-422.
- [38] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and control, 1965, 8(3): 338-353.
- [39] HAHN W. Stability of Motions[M]. New York: Spring-Verlag, 1967.
- [40] KING P J, MAMDANI E H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant[J]. Proceedings of the institution of electrical engineers, 1974, 121(121): 1585-1588.
- [41] WANG L X. A Course in Fuzzy Systems and Control[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1997.
- [42] HAM C, QU Z, JOHNSON R. Robust fuzzy control for robot manipulators[J]. IEE proceedings-control theory and applications, 2000, 147(2): 212-216.
- [43] TAN S H, YU Y. Adaptive fuzzy modeling of nonlinear dynamical systems[J]. Automatica, 1996, 32(4): 637-643.
- [44] 肖鸿雁, 叶涛, 彭永进. 基于模糊自适应调整趋近律的变结构控制[J]. 电气传动自动化, 2001, 23(4): 33-35.
- [45] 刘启明. 模糊滑模变结构控制设计[J]. 复旦学报(自然科学版), 2004, 43(5): 952-955.
- [46] 赵红超, 顾文锦. 滑模控制的模糊趋近律设计[J]. 战术导弹技术, 2004, (2): 50-53.
- [47] BROWN C B, YAO J T P. Fuzzy sets and structural engineering[J]. Journal of structure division, 1983, 109(5): 1211-1225.
- [48] TANI A, KAWAMURA H, RYU S. Intelligent fuzzy optimal control of building structures[J]. Engineering structures, 1998, 20(3): 184-192.
- [49] PARK K S, KOH H M, OK S Y. Active control of earthquake excited structures using fuzzy supervisory technique[J]. Advances in engineering software, 2002, 33(11-12): 761-768.
- [50] PARK K S, KOH H M, SEO C W. Independent modal space fuzzy control of earthquake-excited structures[J]. Engineering structures, 2004, 26(2): 279-289.
- [51] AL-DAWOD M, SAMALI B, KWOK K, et al. Fuzzy controller for seismically excited nonlinear buildings[J]. Journal of engineering mechanics, 2004, 130(4): 407-415.
- [52] AHLAWAT A S, RAMASWAMY A. Multiobjective optimal fuzzy logic controller driven active and hybrid control systems for seismically excited nonlinear buildings[J]. Journal of engineering mechanics, 2004, 130(4): 416-423.
- [53] CHOI K M, CHO S W, KIM D O, et al. Active control for seismic response reduction using