

肆

斛兵博士文丛

Hubing Doctor Thesis Collection



# 建筑结构振动控制理论与计算方法研究

Research on Theory and Algorithms for Vibration Control of Buildings

汪 权/著 王建国/导师



合肥工业大学出版社  
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

# 建筑结构振动控制理论 与计算方法研究

汪 权 著 王建国 导师

合肥工业大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

建筑结构振动控制理论与计算方法研究/汪权著. —合肥:合肥工业大学出版社,2016.6

ISBN 978-7-5650-2843-4

I. ①建… II. ①汪… III. ①建筑结构—结构振动控制—理论研究  
②建筑结构—结构振动控制—计算方法—研究 IV. ①TU311.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 142902 号

## 建筑结构振动控制理论与计算方法研究

汪 权 著 王建国 导师

责任编辑 权 怡 刘 露

---

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2016年6月第1版
地 址	合肥市屯溪路193号	印 次	2016年10月第1次印刷
邮 编	230009	开 本	710毫米×1010毫米 1/16
电 话	编校中心:0551-62903210 市场营销部:0551-62903198	印 张	16.75
网 址	www.hfutpress.com.cn	字 数	257千字
E-mail	hfutpress@163.com	印 刷	合肥现代印务有限公司
		发 行	全国新华书店

---

ISBN 978-7-5650-2843-4

定价:38.00元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

# 摘 要

土木工程结构中的房屋建筑作为重要的社会基础设施,是现代社会的组成部分。传统意义上,这些结构是设计成用来抵抗静荷载的。然而,土木工程结构同样承受着各种各样的动荷载,包括风、浪、地震和车辆荷载。这些动荷载会引起严重且持续的振动,对结构和结构构件以及居住者均有害,这些结构需要保护的内容可能涉及使用的可靠性、居住者的舒适度以及结构的耐久性。

提高房屋建筑结构的抗震性能和高层建筑结构的抗风性能是减轻动力作用危害、加强区域安全的基本措施之一,是土木工程领域所面临的重大课题。

建筑结构振动控制是多学科交叉的新技术领域,结构振动控制可以有效地减轻结构在风和地震等动力作用下的反应和损伤、有效地提高结构的抗振能力和抗灾性能,结构振动控制经过几十年的发展,已被理论和实践证明是抗震减灾积极有效的对策。

在深入了解建筑结构的动力反应特性的基础上,研究合理且可行的控制措施保护建筑结构免遭地震和风荷载破坏,将是一个具有极大工程应用价值且时间紧迫的研究课题。

随着社会的进步和科学技术的发展,人们对居所的振动环境有着越来越高的要求,振动被动控制的局限性就暴露出来了,难以满足人们的要求。主动控制技术由于具有效果好、适应性强等潜在的优越性,自然成为一条重要的新途径。

然而主动控制系统一般需要很大的能量驱动和多个作动器,这在实际工程中难以实现。

结构半主动控制基本原理与主动控制相同,但是半主动控制巧妙地利用了结构振动的往复相对变形或相对速度,从而只需要少量的能量调节便

有可能实现主动最优控制力。

采用诸如模糊控制、神经网络控制和遗传算法等智能算法为标志的结构智能控制是目前结构振动控制领域研究的前沿课题。结构智能振动控制不需要精确的结构模型,运用智能算法来确定输入、输出反馈与控制增益的关系,采用磁流变液智能材料制作的智能阻尼器同样仅需少量的能量调节便可以很好地实现主动最优控制力。

本书以建筑结构模型为研究对象,运用现代控制理论以及智能控制理论分别对建筑结构振动控制进行了理论分析和计算方法的研究。首先,研究在地震激励下采用主动控制方法进行地震响应控制,对主动控制方法中的一些关键性问题进行研究;其次,在主动控制研究的基础上,重点研究了建筑结构的半主动控制方法;最后,探讨了模糊控制及遗传算法在建筑结构振动控制中的应用。

在结构地震响应主动控制系统设计中,采用线性二次型(LQR)经典最优控制、线性二次型 Gauss(LQG)最优控制、结构极点配置控制、结构模态控制和滑移模态控制五种控制算法分别对线性结构模型进行了理论分析和数值仿真计算,为结构振动半主动控制提供基础。

在主动变刚度(AVS)控制策略的基础上,提出了一种新的结构地震响应控制主动变刚度频率控制算法。利用希尔伯特-黄变换理论分析非线性非平稳地震信号的时频信息,当地震信号的瞬时频率接近结构的固有频率时,主动变刚度装置改变结构的刚度以降低地震激励下的结构响应。本书选取两个建筑结构的 Benchmark 模型作为算例来验证该算法的可行性及有效性。仿真分析表明,该方法简便可行,能有效地控制受控结构位移反应,有着广泛的工程实际应用前景。

基于固有模态分解技术和希尔伯特-黄变换理论提出了一种半主动变刚度调谐质量阻尼器(SAVS-TMD)对高层建筑结构进行风振响应频率控制算法。该算法控制系统的优点在于调谐质量阻尼器(TMD)频率可以实时连续可调,而且对结构的刚度和阻尼的变化具有很好的鲁棒性。本书选取的研究对象为拟在澳大利亚墨尔本建造的 76 层 306m 钢筋混凝土塔式办公楼建筑。SAVS-TMD 控制仿真计算的结果与结构无控情况相比,可以充分地降低结构的风振响应,同时与 TMD 控制相比控制效果更好。此外,

SAVS-TMD控制在结构刚度变化 $\pm 15\%$ 的情况下依然可以降低结构的风振响应,具有很好的鲁棒性。SAVS-TMD控制的效果类似于主动调谐质量阻尼器(ATMD)控制,但是比ATMD控制耗能少。

根据Davenport脉动风速谱,采用自回归模型(Auto-regressive)法和通过FFT算法改进的谐波叠加法(WAWS)分别对高层建筑结构进行脉动风速时程模拟。考虑竖向相关性、平稳的多变量随机过程以及它的互谱密度矩阵模拟生成具有随机性的脉动风速时程曲线和风速谱的功率谱密度。模拟风速的功率谱密度函数与Davenport目标谱的比较表明两种方法具有很高的精度和效率。本书算例以76层306m高钢筋混凝土结构风振Benchmark模型为研究对象,研究了风荷载作用下高层建筑动力响应的控制方法,给出了结构在模拟脉动风荷载作用下的被动TMD控制和主动LQG控制的控制结果。

迭代学习控制是一种比较理想的控制策略,其本身具有某种智能,能够在控制过程中不断地完善自身,以使控制效果越来越好,逐渐成为令人关注的课题。针对高层建筑结构的地震响应,基于线性二次型最优控制与迭代学习控制相结合的思想,研究线性二次型迭代学习混合控制方法,提高迭代学习控制的收敛速度,对高层建筑结构进行有效的控制。另外,结合自校正控制、模糊逻辑和迭代学习控制的基本思想,提出采用自整定模糊控制确定迭代学习律的方法,提高了迭代学习控制的鲁棒性。选取建筑结构振动控制Benchmark第二阶段的地震作用Benchmark模型作为研究对象,进行二次型迭代学习混合控制和模糊迭代地震响应计算,计算结果表明两种控制方法均能够对Benchmark模型的地震响应进行有效的控制,并且控制效果得到了一定的改进。

在结构振动智能控制中模糊控制是被采用的方法之一,基于遗传算法的模糊系统的优化设计,把模糊控制和遗传算法结合起来,利用遗传算法的优点,弥补了一般模糊控制设计中模糊变量的隶属度和控制规则的选取通常靠经验来获取的不足,使得系统的模糊控制设计更灵活方便,能取得更好的控制效果。

**关键词:**建筑结构;高层建筑结构;主动控制;半主动控制;频率控制;地震响应;风振响应;智能控制;迭代学习控制;模糊控制;模糊迭代学习控制;遗传算法;遗传模糊控制

# **Abstract**

Buildings, as a part of the civil structures, are important infrastructure and an integral part of the modern society. Traditionally, these structures were designed to resist static loads. Civil structures are, however, subject to a variety of dynamic loadings, including winds, waves, earthquakes, and traffic. These dynamic loads can cause severe and sustained vibratory motion, which can be detrimental to the structure, its material contents and human occupants. The content of protection required by these structures may range from reliable operation and occupancy comfort to structural survivability.

Improving the buildings' anti-seismic performance and tall building wind-resistance performance is one of the basic measures to reduce dynamic functions damage and strengthen regional security, which is currently an important subject in the civil engineering.

Structural vibration control is a new technique domain that relates to many subjects. Structural vibration control can effectively improve the reaction and reduce the harm to the structure available under the dynamical functions such as wind and earthquake etc.

It strengthens the anti-vibration and anti-disaster ability of the structure. After decades of development, building structure vibration control has been proven by theory and practice to be an effective means to withstand earthquakes and wind damage.

Therefore, it will be a worthwhile and great project to study the reasonable and practicable control measures to protect the building

structure against earthquake damage and protect tall building structures against wind vibrations on the basis of understanding the building dynamic response characteristics.

With the social progress and scientific development, inhabitants call for a better occupancy vibration environment. Passive vibration control exposes its limitation and can't satisfy the need. Active control becomes a new important way because of its effectiveness and adaptability. However, active vibration control system needs a great sum of power and many actuators, which is hard to be realized in the practice. The basic principles of semi-active vibration control are the same with those of active vibration control, but semi-active control makes use of the reciprocating relative deformation or relative velocity in structure recycle movements, which needs only a small amount of power to achieve the optimal active control force.

Symbolized by fuzzy control, neural network control and genetic algorithm, the structure intelligent control has become a leading field in the study of structure vibration control. Structure intelligent vibration control is free from accurate model of system and uses intelligent algorithms to determine the relationship between input or output feedback and control gains. Run by little power, the intelligent damper made of intelligent magnetorheological fluid materials can achieve optimal active control force.

Focused on the object of building structure, this paper employs modern control theory and intelligent control theory to conduct the theoretical analysis and algorithms for building structure vibration control. Firstly, the paper uses active control methods to reduce the seismic response and explore its key problems against earthquake. Secondly, based on the active control, the research concentrates on semi-active control methods of building structure. Thirdly, the paper discusses the application of fuzzy control and genetic algorithm in building structural vibration control.

In the design of structure seismic response active control system, the



paper employs five control algorithms, such as classical linear quadratic optimal control, linear quadratic Gaussian optimal control, pole assignment control, independent modal space control and sliding mode control, to carry out theoretical analysis and numerical simulation of the linear structure model and provide the basis of semi-active control design.

Based on active variable stiffness method, a new active variable stiffness frequency control algorithm for seismic response control is presented in the paper. The time-frequency information of nonlinear and nonstationary earthquake signal processing is identified based on Hilbert-Huang transform algorithm. Using active variable stiffness device, the stiffness of structures is changed to reduce the response to seismic excitation when the instantaneous frequency is close to the frequency of structures.

In order to verify the feasibility and effectiveness of the algorithm, two building structure Benchmark models are presented. The effectiveness of the algorithm are thus proved through simulation analysis, and the displacement of the structure is reduced effectively. So it has a promising future in the engineering practice.

Based on empirical model decomposition and Hilbert-Huang transform theory, the paper develops a new semi-active variable stiffness tuned mass damper(SAVS-TMD) frequency control algorithm for tall building wind induced vibration control. The new SAVS-TMD system has the distinct advantage as it continuously retunes its frequency due to real time control and is robust to changes in building stiffness and damping. The benchmark building under the discussion is a 76-story 306 meters concrete office tower in Melbourne, Australia. It is shown that the SAVS-TMD can reduce the structure response substantially, when compared with the uncontrolled case, and it can reduce the structure response further when compared with the case of TMD. Additionally, it is shown that SAVS-TMD reduces response even when the building stiffness changes by  $\pm 15\%$  and it remains

robust. It is demonstrated that SAVS-TMD can reduce the response as well as active tuned mass damper (ATMD) at the expense of much less power consumption.

By employing the auto-regressive method and weighted amplitude wave superposition improved by using FFT method respectively, the stochastic fluctuating wind field and cross-spectral density function have been simulated by using the Davenport wind speed power spectrums and considering spatial correlation, stationary multivariate stochastic process. The accuracy and the efficiency of the technique have been demonstrated by comparing simulating the wind speed spectrums with the Davenport target spectrums. A 76-story 306 meters RC structure of the second generation Benchmark vibration control for building is under the research. The numerical results of the dynamic response of the structure under TMD control and LQG control methods are given.

Iterative learning control is a more satisfactory control strategy because of its own intelligence, which is able to improve itself constantly in controlling process.

So it is gradually becoming an issue of concern.

Based on the idea to combine the linear quadratic optimal control and iterative learning control, the paper proposes a new hybrid control strategy which is named linear quadratic iterative learning control to reduce the earthquake response of tall building.

The strategy can improve the convergence rate of iterative learning control and improve the effect of control.

Secondly, with the research into the fundamental ideas of self-tuning control, fuzzy logic, and iterative learning control, this paper provides a new type of fuzzy iterative learning control strategy to reduce the seismic response of tall building. It improves the robustness of the iterative learning control. The model of a seismically excited building in the second generation Benchmark vibration control for buildings is studied by using

the new hybrid control strategy and fuzzy iterative learning control to calculate the seismic response of the building. The result shows that two new control strategies are able to control the model of Benchmark against earthquake effectively and the control effect is improved to some extent.

Fuzzy control is one of methods in structural intelligent control. Optimization of fuzzy controller, which is based on genetic algorithm, takes advantage of powerful optimization capability of GA and avoids the weakness of ordinary FLC designing which controls rules and membership functions of FLC are chosen by expert experiences. It will facilitate the system fuzzy control and achieve a better effect.

**Keywords:** Building structure; Tall building structure; Active control; Semi-active control; Frequency control; Seismic response; Wind induced vibration response; Intelligent control; Iterative learning control (ILC); Fuzzy control; Fuzzy iterative learning control; Genetic algorithm; Genetic fuzzy control

## 目 录

第 1 章 绪 论 .....	(001)
1.1 选题背景与研究意义 .....	(001)
1.2 建筑结构主动控制技术国内外研究进展 .....	(004)
1.2.1 主动控制技术的发展与现状 .....	(005)
1.2.2 振动主动控制算法 .....	(006)
1.2.3 主动控制传感器与控制装置 .....	(010)
1.3 建筑结构半主动控制技术国内外研究进展 .....	(012)
1.3.1 半主动控制技术的发展与现状 .....	(012)
1.3.2 振动半主动控制算法 .....	(013)
1.3.3 半主动控制传感器与控制装置 .....	(016)
1.4 建筑结构智能控制技术国内外研究进展 .....	(017)
1.4.1 智能控制理论发展与研究进展 .....	(017)
1.4.2 智能控制算法在结构振动控制中的应用 .....	(023)
1.5 主要研究内容及创新点 .....	(025)
1.5.1 主要研究内容 .....	(025)
1.5.2 主要创新点 .....	(027)
第 2 章 建筑结构主动控制理论分析与计算方法 .....	(029)
2.1 引 言 .....	(029)
2.2 结构线性二次型主动最优控制 .....	(031)
2.2.1 线性二次型(LQR)经典最优控制 .....	(031)
2.2.2 线性二次型 Gauss(LQG)最优控制 .....	(035)
2.3 结构极点配置主动控制 .....	(037)
2.3.1 基于状态反馈的系统极点配置 .....	(037)
2.3.2 基于输出反馈的系统极点配置 .....	(039)

2.4	结构模态主动控制 .....	(040)
2.4.1	基于状态方程的模态控制 .....	(041)
2.4.2	基于运动方程的模态控制 .....	(043)
2.5	结构滑移模态主动控制 .....	(044)
2.5.1	基于极点配置方法的滑模控制 .....	(046)
2.5.2	基于二次型最优方法的滑模控制 .....	(046)
2.6	算例仿真及其分析 .....	(050)
2.7	本章小结 .....	(059)
<b>第3章</b>	<b>建筑结构地震响应主动变刚度频率控制 .....</b>	<b>(060)</b>
3.1	引言 .....	(060)
3.2	结构主动变刚度控制(AVS) .....	(061)
3.3	Hilbert - Huang 变换分析原理 .....	(063)
3.3.1	经验模态分解(Empirical Mode Decomposition——EMD) .....	(063)
3.3.2	Hilbert 谱分析(Hilbert Spectrum Analysis——HSA) .....	(064)
3.3.3	地震信号 EMD/HHT 分析 .....	(065)
3.4	基于 EMD/HHT 的结构地震响应主动变刚度频率控制 .....	(067)
3.5	算例仿真及其分析 .....	(069)
3.6	本章小结 .....	(074)
<b>第4章</b>	<b>建筑结构风振响应半主动变刚度调谐质量阻尼器(SAVS - TMD) 控制 .....</b>	<b>(075)</b>
4.1	引言 .....	(075)
4.2	半主动变刚度调谐质量阻尼器控制(SAVS - TMD) .....	(076)
4.2.1	半主动变刚度调谐质量阻尼器分析模型 .....	(076)
4.2.2	SAVS - TMD 系统位移响应 EMD/HHT 分析 .....	(078)
4.3	基于 EMD/HHT 的结构风振响应半主动变刚度控制算法 .....	(080)
4.4	算例仿真及其分析 .....	(082)
4.5	本章小结 .....	(090)

第 5 章 高层建筑结构随机风场数值模拟及其风振响应控制 .....	(092)
5.1 引 言 .....	(092)
5.2 自回归模型法(Auto Regressive-AR)模拟随机风场 .....	(093)
5.3 谐波叠加法(Weighted Amplitude Wave Superposition——WAWS) 模拟随机风场 .....	(096)
5.4 数值模拟随机风场作用下高层建筑结构风振控制 .....	(098)
5.4.1 LQG 最优控制算法 .....	(098)
5.4.2 TMD 控制算法 .....	(099)
5.5 算例仿真及其分析 .....	(100)
5.6 本章小结 .....	(112)
第 6 章 建筑结构地震响应线性二次型最优迭代学习控制 .....	(113)
6.1 引 言 .....	(113)
6.2 迭代学习控制基本原理 .....	(115)
6.3 迭代学习控制律 .....	(121)
6.4 结构线性二次型最优迭代学习控制设计 .....	(124)
6.5 算例仿真及其分析 .....	(129)
6.6 本章小结 .....	(133)
第 7 章 建筑结构地震响应模糊迭代学习控制 .....	(135)
7.1 引 言 .....	(135)
7.2 自校正控制 .....	(136)
7.2.1 最小方差自校正控制 .....	(137)
7.2.2 极点配置自校正控制 .....	(139)
7.3 自整定模糊控制 .....	(143)
7.3.1 模糊控制基本概念 .....	(143)
7.3.2 自校正模糊控制 .....	(149)
7.4 自整定模糊迭代学习控制 .....	(151)
7.5 算例仿真及其分析 .....	(156)
7.6 本章小结 .....	(162)

第 8 章 建筑结构地震响应 MR 阻尼器模糊控制 .....	(163)
8.1 引 言 .....	(163)
8.2 磁流变(MR)阻尼器控制 .....	(165)
8.2.1 磁流变机理、磁流变阻尼器及其力学特征 .....	(167)
8.2.2 MR 阻尼器半主动控制算法 .....	(172)
8.3 结构地震响应 MR 阻尼器模糊控制 .....	(179)
8.3.1 地震响应单 MR 阻尼器模糊控制 .....	(180)
8.3.2 地震响应多 MR 阻尼器模糊控制 .....	(186)
8.4 算例仿真及其分析 .....	(188)
8.5 本章小结 .....	(194)
第 9 章 基于遗传算法优化的建筑结构地震响应 MR 阻尼器模糊控制 .....	(196)
9.1 引 言 .....	(196)
9.2 遗传算法基本概念、原理 .....	(197)
9.3 基于遗传算法优化的模糊逻辑控制 .....	(203)
9.3.1 基于遗传算法优化的模糊控制 .....	(203)
9.3.2 基于遗传算法的模糊控制器优化设计方法 .....	(204)
9.4 基于遗传算法的 MR 阻尼器模糊控制 .....	(208)
9.4.1 基于遗传算法的单 MR 阻尼器模糊控制 .....	(209)
9.4.2 基于遗传算法的多 MR 阻尼器模糊控制 .....	(212)
9.5 算例仿真及其分析 .....	(214)
9.6 本章小结 .....	(220)
第 10 章 结论与展望 .....	(222)
10.1 结 论 .....	(223)
10.2 展 望 .....	(225)
参考文献 .....	(227)

# 第1章 绪论

## 1.1 选题背景与研究意义

土木工程结构在强烈地震作用下会倒塌,大地震爆发时,释放出来的地震能量,会造成地表工程的大量破坏,严重危及人民生命和财产安全。近年来,地震已造成成千上万人的死亡和大量的财产损失,多次破坏性地震都集中在城市。表1-1列出一些特大地震所造成的人口死亡和财产损失状况。其中2008年5月12日发生在我国四川的汶川地震造成87652人遇难,374643人受伤。在财产损失方面,房屋的损失很大,民房和城市居民住房的损失占总损失的27.4%。图1-1给出了近年来一些主要强地震对土木工程建筑的破坏。

国内外相关统计资料表明,在所有自然灾害中,风灾造成的损失最大。1926年,一次飓风袭击使得美国一座10多层的Meyer-Kiser大楼的维护结构受到严重破坏,钢框架结构发生塑性变形,大楼在整个风暴中剧烈摇晃<sup>[1]</sup>。1971年9月完工的美国波士顿约翰·汉考克大楼(John Hancock Building),高60层241m,1972年夏天至1973年1月,由于大风的作用,建筑物侧向的风振和扭转振动导致加速度太大,使得上部楼层的居住者感到很不舒适,另外约有16块窗户玻璃破碎,49块严重损坏,100多块开裂,不得不调换了所有的10348块玻璃,价值700万美元以上,远远超过原有玻璃的价值,同时采取了其他措施,增加了造价。该建筑耽搁了三年半才交付使用,1977年,两个300吨的调谐质量阻尼器被安装在第58层,用来增加建筑物的阻尼比和减轻加速度响应,造价也从预算的7500万美元上升到15800



万美元。纽约一幢 55 层的塔楼建筑,由于东北大风作用,导致建筑物摆动,使人不能在顶部几层的写字台上书写,建筑物的风致运动使人体产生不舒适感。历史上还有一个有名的例子是华盛顿塔科马最早的塔科马纽约湾海峡上的悬索桥(Tacoma Narrows Bridge),它没能承受住风振引起的扭转振动以至于在 1940 年 11 月 7 日倒塌。

这些自然灾害引起的直接和间接损失让我们认识到社会在面临自然灾害攻击时的脆弱性。土木工程建筑结构的保护对象为结构及结构构件和居住者,结构工程师应为此设计更加安全的结构抵抗自然灾害。

传统的结构抗震设计和抗风设计方法存在缺陷,1972 年美籍华人姚治平首次提出土木工程的振动控制概念<sup>[2]</sup>,开创了结构振动控制研究新的里程。30 多年来,经过广大科学家和工程师的不断努力,结构振动控制的研究在理论、试验到应用等方面都取得了可喜的发展<sup>[3-5]</sup>。根据被控系统是否有外部能源输入,结构振动控制可分为被动控制、主动控制、半主动控制和混合控制四种<sup>[5]</sup>。

结构振动控制的基本思想是在工程结构特定部位,设置某种控制装置、某种机构、某种子结构或施加外力,改变或调整结构的动力特性或动力作用,以减小工程结构振动反应。这是一门最近几十年发展起来的新兴学科,是综合控制论、计算机、结构振动理论与新材料科学等学科前沿的工程设计的新技术。其目的就是采取一定的控制措施,减轻和抑制结构在地震、强风及其他动力荷载作用下的动力反应,增强结构的动力稳定性,提高结构抵抗外界振动的能力,以满足结构的安全性、适用性、舒适性的要求。

被动控制由于不需要外界能源,装置结构较简单,易于实现,经济性与可靠性好,在许多场合下减振效果令人满意,已在各工程领域中得到广泛的应用。随着社会的进步和科学技术的发展,人们对居所的振动环境有着越来越高的要求,于是振动被动控制的局限性就暴露出来了,导致其难以满足人们的要求。主动控制技术由于具有效果好、适应性强等潜在的优越性,所以自然成为一个重要的新方法。然而主动控制系统一般需要很大的能量驱动和多个作动器,这在实际工程中难以实现。结构半主动控制基本原理与主动控制相同,但是半主动控制巧妙地利用了结构振动的往复相对变形或相对速度,从而只需少量的能量调节便有可能实现主动最优控制。采用诸