



云南高校学术文库
Yunnan Gaoxiao Xueshu Wenku



时滞悬挂系统最优 减振控制

雷 靖 著



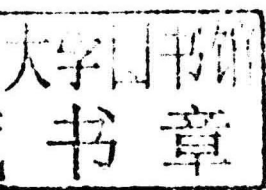
云南大学出版社
Yunnan University Press



云南高校学术文库
Yunnan Gaoxiao Xueshu Wenku

时滞悬挂系统最优 减振控制

雷 靖 著



云南大学出版社
Yunnan University Press

图书在版编目 (CIP) 数据

时滞悬挂系统最优减振控制 / 雷靖著. —昆明:
云南大学出版社, 2013
(云南高校学术文库)
ISBN 978-7-5482-1549-3

I. ①时… II. ①雷… III. ①车悬挂装置—减振
IV. ①U463.33

中国版本图书馆CIP数据核字 (2013) 第111400号

责任编辑: 柴 伟

责任校对: 范 娇

装帧设计: 刘 雨



时滞悬挂系统最优 减振控制

雷 靖 著

出版发行: 云南大学出版社

印 装: 昆明卓林包装印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 16

字 数: 272千

版 次: 2013年11月第1版

印 次: 2013年11月第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-5482-1549-3

定 价: 42.00元

社 址: 昆明市翠湖北路2号云南大学英华园内

邮 编: 650091

电 话: (0871) 65031070 65033244

E-mail: market@ynup.com

序 言

本书研究了时滞悬挂系统的最优减振控制问题。首先,概述了控制学及悬挂系统的基本相关理论,国内外关于时滞系统、非线性系统以及减振控制的研究方法、现状及成果。其次,介绍了有关状态空间法、系统可控可观测性、李雅普诺夫稳定性、最优控制、悬挂控制技术等的相关概念和理论;研究了线性时滞系统、非线性时滞系统的最优减振控制设计问题,给出了最优减振控制律及其存在唯一性条件和次优控制律,讨论了其物理可实现问题;并将得到的理论拓展至汽车悬挂模型进行研究。最后,通过一系列的仿真实验证明所提出的理论和方法的有效性、简便性和可行性。主要研究内容概括如下:

第一,提出模型转换的方法,将时滞系统转换为形式上无时滞的系统,简化了求解最优控制的问题。然后通过求解矩阵方程,得到带有控制记忆项的最优控制律,补偿了时滞对系统产生的影响。

第二,分别运用前馈—反馈和内模原理进行减振控制问题的研究。对于已知动态特性,但未知初始条件的外部持续扰动,通过设计前馈补偿器,消除或减弱扰动对系统的影响;利用扰动观测器确保前馈控制的物理可实现性;高增益扰动观测器可以保证其物理可实现性,同时消减外系统建模误差及其非线性因素。对于已知频率、未知振幅和初相的正弦扰动,或其他不可测量的恒值扰动,运用内模原理设计内模动态补偿控制器,使系统达到无静差的、完全的减振。

第三,对于非线性系统,采用了线性化的方法设计最优减振控制律。对非线性系统在期望平衡点进行线性化,然后对该系统设计前馈—反馈最优控制律,利用闭环系统原点邻域内的 Lyapunov 函数估计其吸引域,证明闭环系统的稳定性。

第四,将模型转换与逐次逼近的方法拓展到设计非线性时滞系统最优减振控制律中,得到的最优控制律由精确反馈项、前馈控制项、时滞记忆项和伴随向量

序列极限形式的补偿项组成。其中,反馈和前馈增益矩阵是通过求解 Riccati 和 Sylvester 矩阵方程得到的,伴随向量补偿项是通过逐次逼近的迭代求解过程而获得的。同时给出了次优控制律,它是通过截取伴随向量序列的有限次迭代值而得到的。

第五,将所设计的最优减振控制律用于海洋平台减振控制的仿真研究。通过仿真实验验证模型转换设计方法的简捷性,显示前馈—反馈控制律和内模控制律各自的特点以及证实控制作用的有效性。

第六,运用前馈控制的原理,对于已知动态特性,但未知初始条件的外部持续扰动,通过前馈—反馈控制器中所设计的前馈补偿项,消除或减弱扰动对系统的影响。通过设计状态降维观测器确保前馈控制的物理可实现性以及解决系统状态不完全可测的问题。

第七,将所设计的最优减振控制律用于汽车悬挂系统减振控制的仿真实验中。分别利用 1/4 车悬挂、半车悬挂以及整车悬挂系统的动力学方程,建立了状态空间表示;建立了路面激励的外系统模型。通过对实际模型参数的数值仿真,验证所设计的减振控制律能够使各项性能指标达到最佳状态,确保了设计方法的有效性。

本书的写作得到了我的同事、学生、朋友们的支持,通过无数次的讨论、建议、校正,他们为本书的出版提供了极大的帮助,在此想一一致谢,又实在无法一一列出,唯恐挂一漏万,谨在此对给予了我帮助、支持的朋友们表示真诚的感谢!

特别要致谢云南省教育厅学术著作出版基金资助该书的出版,感谢支持我研究工作的云南民族大学引进人才科研启动基金、云南省软件工程重点实验室开放基金、云南省自然科学基金及国家留学基金。

非常希望本书能尽善尽美,但由于时间仓促及作者水平所限,书中疏漏与错误在所难免,恳请专家、读者给予批评指正。

雷 靖

2012 年于云南

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 研究背景及其意义	(1)
第二节 控制理论的产生与发展	(3)
一、第一阶段控制理论称为经典控制理论	(3)
二、第二阶段控制理论称为现代控制理论	(4)
三、第三阶段控制理论为智能控制理论或复杂控制系统理论	(5)
第三节 控制系统的基本概念	(5)
一、系统的定义	(5)
二、控制系统的分类	(6)
三、控制系统的质量指标	(8)
四、控制系统的设计步骤	(10)
第四节 经典控制理论与现代控制理论	(11)
第五节 减振控制的方法	(13)
一、前馈/反馈控制	(13)
二、内模控制	(15)
三、自适应控制	(15)
四、预测控制	(15)
五、重复控制	(16)
六、迭代学习控制	(16)
第六节 时滞系统控制问题的研究	(17)
一、时滞系统控制的方法	(17)
二、时滞系统最优减振控制的研究	(20)

第七节 非线性系统控制问题的研究	(21)
一、非线性系统控制的方法	(21)
二、非线性最优控制的研究	(22)
三、非线性时滞系统最优减振控制研究现状	(23)
第八节 汽车悬挂系统减振控制的研究	(23)
一、汽车悬挂减振控制	(23)
二、电子控制悬挂系统控制	(24)
三、非线性悬挂系统减振控制	(24)
第九节 本书研究的问题及结构安排	(25)
第二章 状态空间法	(29)
第一节 概 述	(29)
一、状态空间法的提出	(29)
二、相关术语	(30)
第二节 系统的状态空间表达式	(31)
一、状态方程和输出方程的概念	(31)
二、状态空间表达式的建立	(33)
第三节 状态方程的解	(37)
一、连续型线性定常系统齐次方程的解	(37)
二、矩阵指数函数的计算	(39)
三、连续型线性定常系统非齐次方程的解	(41)
四、连续型系统的离散化	(42)
五、线性时变系统状态方程的解	(43)
第三章 线性系统的可控性与可观测性	(48)
第一节 概 述	(48)
第二节 可控性	(49)
一、可控性的定义	(49)
二、线性定常系统可控性判别的第一种方法	(49)
三、线性定常系统可控性判别的第二种方法	(51)

四、线性定常系统的输出可控性	(52)
第三节 可观测性	(53)
一、可观测性的定义	(53)
二、线性定常系统可观测性的判别方法	(54)
第四节 极点配置	(56)
一、可控系统的特征方程	(56)
二、状态反馈	(57)
第五节 状态观测器	(57)
一、实现闭环控制需要状态观测器	(57)
二、状态观测器的设计	(58)
三、带状态观测器的闭环控制系统	(60)
四、降维观测器	(63)
第四章 李雅普诺夫稳定性分析	(65)
第一节 李雅普诺夫稳定性的定义	(65)
一、状态向量的平衡状态及球域	(65)
二、李雅普诺夫稳定性的定义	(66)
三、关于李雅普诺夫稳定性定义的讨论	(67)
第二节 李雅普诺夫直接法	(67)
一、李雅普诺夫直接法的定义	(67)
二、李雅普诺夫直接法的分析	(68)
第三节 线性定常系统的稳定性分析	(70)
一、线性定常系统渐近稳定的充要条件	(70)
二、线性定常系统的李雅普诺夫定理	(71)
三、离散型系统的李雅普诺夫稳定性分析	(72)
第四节 动态系统瞬时响应的快速性	(73)
一、表示动态系统瞬时响应快速性的指标—— η	(73)
二、线性定常系统 η 的计算	(74)
第五节 非线性系统的稳定性分析	(75)

第五章 最优控制	(77)
第一节 概 述	(77)
第二节 最优控制问题的提法和数学模型	(78)
一、最优控制问题的提法	(78)
二、性能指标	(79)
三、约束条件	(80)
四、最优控制问题的一般提法	(81)
五、最优控制问题的求解方法	(81)
第三节 变分法	(81)
一、一次变分与欧拉方程	(82)
二、含有多个未知函数的变分问题	(84)
三、条件极值的变分问题	(85)
第四节 庞特里亚金极大值原理	(87)
第五节 具有二次型性能指标的线性系统的最优控制	(90)
一、二次型性能指标及其含义	(91)
二、线性调节器问题的解	(92)
三、含有交叉项的二次型最优控制	(96)
四、离散系统二次型最优控制	(97)
第六章 车辆悬挂的控制技术	(98)
第一节 悬挂系统概述	(98)
一、悬挂的作用	(98)
二、被动悬挂、主动悬挂、半主动悬挂及其特点	(98)
三、悬挂系统性能的评价指标	(100)
第二节 悬挂的固有特性	(101)
一、悬挂的不变性方程	(101)
二、悬挂特性的不变性	(103)
三、悬挂性能指标间的制约关系	(103)
第三节 车辆悬挂的最优控制	(104)

一、悬挂模型的状态空间表达式·····	(104)
二、主动悬挂系统的可控性与可观测性·····	(107)
三、主动悬挂的最优控制·····	(108)
第七章 控制时滞系统基于观测器的最优减振控制·····	(111)
第一节 问题描述·····	(111)
一、系统描述和系统转换·····	(111)
二、二次型性能指标分析·····	(112)
第二节 最优减振控制律的设计·····	(113)
一、有限时域最优减振控制律的设计·····	(113)
二、无限时域最优减振控制律的设计·····	(115)
第三节 基于观测器的最优减振控制律的设计·····	(116)
一、降维扰动观测器的设计·····	(116)
二、有限时域基于观测器的最优减振控制律的设计·····	(117)
三、无限时域基于观测器的最优减振控制律的设计·····	(118)
第四节 仿真示例·····	(118)
第五节 结 论·····	(122)
第八章 时滞系统基于内模的最优减振控制·····	(123)
第一节 时滞系统的最优调节问题·····	(123)
第二节 最优调节器的设计·····	(125)
第三节 动态调节器的设计·····	(128)
第四节 仿真示例·····	(130)
第五节 结 论·····	(133)
第九章 非线性控制时滞系统基于高增益观测器的扰动衰减控制·····	(134)
第一节 系统描述·····	(134)
第二节 高增益观测器的设计·····	(136)
第三节 基于高增益观测器的最优扰动衰减控制·····	(137)
第四节 仿真示例·····	(138)

第五节 结 论	(141)
第十章 海洋平台减振控制的仿真研究	(142)
第一节 海洋平台简化模型的仿真研究	(142)
第二节 AMD - 海洋平台主动控制系统的仿真研究	(144)
第十一章 具有控制时滞系统的最优减振控制	(147)
第一节 问题描述	(147)
一、系统描述及转换	(147)
二、有限时域和无限时域二次型性能指标分析	(149)
第二节 最优减振控制律的设计	(150)
一、有限时域最优减振控制律的设计	(150)
二、无限时域最优减振控制律的设计	(151)
第三节 最优减振控制律的物理实现	(152)
第四节 1/4 汽车悬挂应用研究	(156)
一、最优减振问题的形成	(156)
二、具有驱动时滞 1/4 汽车悬挂减振控制律的设计	(161)
三、仿真实验	(162)
四、本节结论	(166)
第五节 结 论	(166)
第十二章 具有控制时滞和测量时滞系统的最优减振控制	(168)
第一节 问题描述	(168)
一、系统描述及转换	(168)
二、二次型性能指标分析	(170)
第二节 最优减振控制律的设计	(170)
第三节 最优减振控制律的物理实现	(171)
第四节 整车悬挂应用研究	(172)
一、最优减振问题的形成	(172)
二、具有驱动时滞和传感器时滞整车悬挂减振控制律的设计	(179)

三、仿真实验·····	(180)
四、本节结论·····	(184)
第五节 结 论·····	(184)
第十三章 具有控制时滞和测量时滞采样系统的最优减振控制·····	(186)
第一节 问题描述·····	(186)
第二节 最优减振控制律的设计·····	(190)
第三节 最优减振控制律的物理实现·····	(192)
第四节 半车悬挂应用研究·····	(194)
一、最优减振问题的形成·····	(194)
二、具有驱动时滞和传感器时滞半车悬挂采样系统减振控制律的设计 ·····	(198)
三、仿真实验·····	(200)
四、本节结论·····	(204)
第五节 结 论·····	(204)
第十四章 非线性时滞系统的最优减振控制·····	(205)
第一节 系统描述·····	(205)
第二节 最优减振控制律的设计·····	(206)
第三节 时滞非线性 1/4 悬挂应用研究·····	(213)
一、系统描述·····	(213)
二、时滞非线性 1/4 汽车悬挂系统减振控制律的设计·····	(216)
三、仿真实验·····	(218)
四、本节结论·····	(222)
第四节 结 论·····	(223)
符号索引·····	(224)
参考文献·····	(225)

第一章 绪 论

在科学技术的发展过程中，自动控制起着重要的作用，它已成为机械制造业和其他工业生产过程中非常重要和不可缺少的组成部分。运用控制理论不但可使工程设计人员获得动态系统的最优性能，还可提高产品质量，降低生产成本，提高劳动生产率，并使人们从繁重的体力劳动和重复的手工劳动中解放出来。因此，广大的工程技术人员有必要掌握一定的自动控制方面的知识，特别是近年来控制理论在汽车工程中的应用已逐渐增多，它将成为研究汽车和改进其使用性能的重要工具和方法。

本章介绍控制理论与其应用的产生和发展、控制系统的基本概念^[1]以及减振控制理论的研究内容、特点、方法^[2,3]等问题。

第一节 研究背景及其意义

振动无处不在，例如汽车、火车、飞机及机械设备的振动，家用电器、钟表的振动，地震以及声、电、磁、光的波动等，都可以归纳为不同形式的振动。振动可分为有用的振动和有害的振动两大类。振动有着广泛的用途，合理地利用振动能造福于人类，例如，拨动琴弦能发出美妙的音乐；在医疗方面，利用超声波能诊断、治疗疾病；在工程建筑中，广泛采用振动沉桩、振动拔桩，以及混凝土灌注时的振动捣固等；在电子和通信工程方面，录音机、电视机、程控电话等诸多电子器件及电子计时装置和通信系统使用的谐振器等都是由于振动才得以有效地工作；在海洋工程方面，海浪波动的能量可以用来发电；在工程地质方面，利用振动进行检测和地质勘探。但是，有些振动却给人们的生活带来困扰伤害，例如，运载工具的振动会使乘客感到不舒适，环境噪声使人烦躁不安，共振及次谐

波共振会造成机械设备、桥梁结构、飞机的破坏,地震使生命财产遭受巨大损失……对于这些有害的振动,科研工作者付出了很大的努力,设法采取有效的措施降低甚至完全消除它的影响。为了最大限度地抑制这些有害的振动,首先需要了解引起振动的原因及其内在规律。

我们所研究的减振控制是针对一类受到外界持续扰动力作用下工作的系统,通过分析外部扰动的动态特征而设计相应的减振控制律,使其抑制或消除扰动对系统的影响,从而保证系统正常、可靠地工作。绝大多数的系统都是在外界持续扰动力作用下工作的,例如海洋结构物^[4,5]、船舶^[6]承受风力或规则海浪力的正弦扰动力,柔性梁结构承受外部激励^[7],建筑物抵御地震、风等环境荷载^[8],纸张生产过程系统纸机受纸的重量和拉力的持续扰动^[9],磁带驱动器在转动时由于振动而产生扰动^[10]等。针对无时滞系统的减振控制,学者们进行了大量的研究工作并且得到了相应的结果^[4-10]。

然而,时滞是普遍存在的,从工程技术、物理学、化学反应、生物医学等中提出的数学模型都带有明显的时滞量。造成时滞的原因有:从系统不同位置利用传感器进行数据的测量、采集和传输需要时间;对于传感器采集的数据进行滤波和处理需要时间;控制律的计算以及计算出的控制力传到执行器需要时间等。由于时滞系统的特征超越方程有无穷多个特征根,所以它的解空间是无穷维的。同时,时滞控制系统又有着复杂的动态响应行为,因而时滞系统在数学理论与工程实际中都存在着特殊的困难。通常意义下所描述的系统往往忽略小时滞对系统性能的影响,而在这种近似的系统下所设计的控制律是较为粗糙的。对于精度要求较高或时滞较大的系统,时滞往往是不能忽略的。随着科技的发展,实际工程对控制系统不断提出新的要求,对系统模型和控制器设计的精度也要求愈来愈高。因而,时滞问题逐渐成为一个普遍关注的问题。

1970年,主动振动控制的概念首次提出以后^[11],控制时滞等一些实际问题也被相继提出^[12,13]。造成控制时滞的原因有:信号的测量和传输,控制律的计算,执行器本身的延迟等。在过去的几十年里,研究者们对时滞系统的稳定性、结构特性、反馈镇定等问题进行了深入的研究^[14-29]。研究发现,虽然时滞能使系统的可靠性变差,稳定性降低,减振效果下降;但有时它也能对系统的性能产生正面作用,例如可以镇定开环不稳定的振荡系统、改善振荡系统的性能^[21,22]。然而,国际上对于时滞系统最优减振控制的研究并不多,虽然近年来非线性系

统^[30]、状态时滞系统^[31-33]的最优减振控制问题得到关注,但更多的研究课题亟待解决。

本书在前期研究基础上,将得到的部分研究结果汇编成册,包括:具有控制时滞、状态时滞及测量时滞的线性连续系统、线性采样系统及非线性时滞系统的最优减振控制设计,将得到的理论结果分别应用于 1/4 车悬挂、半车悬挂、整车悬挂模型进行仿真实验及其所得结果。简言之,时滞系统最优减振控制及其在汽车悬挂系统中的应用研究是一项有特色、有意义的课题,本书不仅具有一定的应用背景,且具有一定的理论价值和实践意义。

第二节 控制理论的产生与发展

自动控制理论是随着生产技术的发展而不断发展壮大起来的,和所有的科学技术一样,也经历了由简单到复杂、由低级到高级的多个阶段。纵观控制理论的发展,可分为三个阶段。

一、第一阶段控制理论称为经典控制理论

从自动控制技术的发展历史可以看到,早在两千年前就有了控制技术的萌芽。两千年前,中国就发明了指南车,这是一种开环自动调节系统。公元 1086—1089 年,中国又发明了水运仪象台,这是一种闭环自动调节系统,它利用水力运转,并能保持一个和天体运动一致的恒定速度,可使天空中运行的恒星保持在视野里。

随着科学技术与工业生产的发展,到了 18 世纪,自动控制技术逐渐运用到现代工业中。其中,最卓越的代表就是由瓦特发明的蒸汽机离心调速器,加速了“第一次产业革命”的步伐。

1868 年,马克斯维尔解决了蒸汽机调速系统中出现的剧烈振荡的不稳定性问题,提出了简单的稳定性代数判据。1895 年,劳斯与赫维茨把这种思想扩展到用高阶微分方程描述的更复杂的系统,各自独立地提出了两个著名的稳定性判据——劳斯判据与赫维茨判据,基本上满足了 20 世纪初期控制工程师的需要。

到了第二次世界大战,包括战前和战后期,对自动控制系统的全程控制或恒

服控制的要求、对控制系统的准确跟踪与补偿能力的要求、对系统的静态准确度的要求越来越高，这就促进了控制理论的迅速发展。1932 年，奈奎斯特提出了在频率域内研究系统的频率响应法，提供了一个具有高质量的动态品质和静态准确度的军用控制系统所需要的分析工具。1948 年，伊万斯提出了在复数域内研究系统的根轨迹法。这两项重大的贡献，使控制理论发展的第一个阶段基本上完成了。建立在奈奎斯特的频率响应法及伊万斯的根轨迹法基础上的理论目前统称为经典控制理论。

控制理论的奠基人维纳在 1947 年把控制理论引起的自动化同“第二次产业革命”联系起来^[34]。我国著名科学家钱学森将控制理论运用于工程实践，在 1954 年出版了《工程控制论》^[35]，为控制理论的发展与应用做出了卓越的贡献。

从 20 世纪 40 年代到 50 年代末，经典控制理论的发展与应用使整个世界的科学技术水平出现了巨大的飞跃，几乎在工业、农业、交通运输及国防建设的各个领域中都广泛地采用了自动控制技术。

二、第二阶段控制理论称为现代控制理论

随着科学技术的飞速发展，在 20 世纪 50 年代末至 20 世纪 60 年代初出现了核能技术、电子数字计算机以及空间技术等现代技术革命。生产与科学实验的发展对控制系统提出了高速度、高精度的要求，并出现了许多大型复杂的控制问题，例如多输入/多输出系统、高速度高精度系统、非线性系统及参数时变系统等的设计问题。这时，经典控制理论的局限性就明显地暴露出来了，在控制理论的发展上孕育着一场新的变革。

科学技术的大发展不仅需要迅速地发展控制理论，而且也给现代控制理论的发展准备了两个重要的条件——现代数学，如泛函分析、现代代数等，为现代控制理论提供了多种多样的分析工具。而数字计算机的发展更具有决定性的作用，可以说控制理论与控制技术是和数字计算机平行发展起来的。在这种情况下，于 1960 年前后开始形成现代控制理论，它的主要标志是贝尔曼等人提出的状态空间法、庞特里亚金极大值原理、贝尔曼动态规划法、卡尔曼的可控性可观测性理论及最佳滤波理论。这些理论主要通过状态空间方法，在时域范围内研究系统状态的运动规律，并实现最优化设计。现代控制理论克服了经典控制理论的许多局限性，显示了强大的生命力。现代控制理论主要用来解决具有多输入、多输出的

多变量系统问题。系统可以是线性或非线性的、定常或时变的、集中参数或分布参数的，它适于解决大型复杂系统的控制问题，而且不限于单纯的闭环控制，可扩展为适应环、学习环控制。它的分析和综合的目标，是要揭示系统内在的规律，并通过结构辨识与参数估计，针对一定的综合性能指标，实现系统的最佳估计和最佳控制。

值得提及的是，以微分几何为工具的非线性控制系统理论^[36,37]受到了普遍重视，通过利用 Lie 括号以及微分同胚等基本工具研究非线性系统的状态、输入及输出变量之间的依赖关系，系统地建立了非线性系统可控制、可观测的充分或必要条件，特别是全局状态精确线性化和输入/输出精确线性化方法的发展，使得复杂的非线性问题在一定条件下可以转化为线性问题来处理。

三、第三阶段控制理论为智能控制理论或复杂控制系统理论

第三阶段的控制理论是 20 世纪 70 年代以来控制理论的新发展。在这段时期，生产技术的发展速度是惊人的，特别是电子器件与电子计算机的迅速发展，使控制理论受到很大的冲击，如大型交通运输系统、大型电力网、大型通信网、大型空间探测系统等，它们大都包括若干子系统，并与有控制能力的电子计算机相结合，采用多级递阶控制，以实现多指标综合最优化。智能控制系统则是与人工智能相结合的信息与控制系统，例如模糊控制、人工神经网络等。另外，20 世纪 90 年代末以来，不少研究者提出充分利用现在的一切技术，同时从时间域和频域两种方法来设计控制系统，即择优控制。

第三节 控制系统的基本概念

本节介绍控制系统的定义、分类、质量指标、设计步骤等基本问题。

一、系统的定义

在控制理论中所研究的系统，都可定义为由若干元件所组成，用来完成某种给定任务的一种组合。若某系统在输入或干扰的作用下，能将输出量保持在希望的数值上时，则将这种系统称为自动调节系统。应该指出，系统的概念不仅限于