

# 时滞滤波理论 及其工程应用

董明晓 梅雪松 著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

0211.6/54

2008

# 时滞滤波理论及其工程应用

董明晓 梅雪松 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

时滞滤波是有意识地在系统中引入时滞环节,将脉冲序列与参考命令卷积形成的整形命令作为控制信号,消除柔性系统残留振动的一种控制技术。时滞滤波作为一种前馈型开环控制方法,因它的简单易用性、对模型误差的鲁棒性,以及能与输入信号实时作用而很快成为抑制柔性系统残留振动的一种有效方法。

全书主要内容包括三部分,第一部分全面系统地介绍了时滞滤波的基本思想、基本原理和基本设计方法;第二部分重点叙述提高时滞滤波器的鲁棒性、最优性、实用性的理论和方法;第三部分讨论时滞滤波理论在工程中的应用。

本书可供高等院校、科研机构等从事机械设计理论、机械电子工程、工业自动化和计算机应用等专业的师生和研究人员及相关领域的工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

时滞滤波理论及其工程应用 / 董明晓,梅雪松著. —北京:科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-020243-7

I. 时… I. ①董… ②梅… III. 时滞-滤波理论 IV. O211.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 031579 号

责任编辑:姚庆爽 于宏丽 / 责任校对:张怡君  
责任印制:刘士平 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2008年3月第一版 开本:B5(720×1000)

2008年3月第一次印刷 印张:13

印数:1—2 500 字数:246 000

定价:40.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

## 序

自从时滞滤波提出以来,它就以其在抑制柔性系统残留振动中的突出优点受到了学术界的瞩目,不少学者从不同角度对它进行过研究,取得了一定的成果。但是迄今为止,还没有形成一种系统、完整的理论体系,也没有这方面正式出版的专著,这种情况既影响了时滞滤波理论本身的进一步发展,也使广大从事振动与控制的科技人员无从直接了解和应用这一新理论和新技术。《时滞滤波理论及其工程应用》一书的作者在前人研究的基础上,经过多年的研究和实践,总结提炼出一套比较全面系统的理论和方法,写成这本专著,意在补充上述的不足。

该书的内容是将目前零星、分散的时滞滤波领域中的研究成果经过系统地分析整理,归纳出时滞滤波的基本理论和基本方法,更重要的是通过对时滞滤波理论的进一步研究,探索了提高时滞滤波器的鲁棒性、最优性、实用性的理论和方法,充分发挥时滞特性潜在的优点,开拓更多、更广泛的工程应用场合,最大限度地发挥时滞滤波理论的作用。

目前,国内还未见到时滞滤波这方面的专著出版,该书在一定程度上填补了这方面的空白,作者力求在书中全面反映出时滞滤波领域当前的学术水平和发展方向,并为广大读者从事时滞滤波理论研究和控制系统设计时提供一些有益的思路。期望该书的出版能够为推广时滞滤波技术起到一定的作用,也相信它能使更多的读者受益。

我有幸先睹董明晓和梅雪松两位教授的《时滞滤波理论及其工程应用》这一著作,受益匪浅,在此祝愿两位教授在时滞滤波理论及其应用方面不断取得新的研究成果!

清华大学

褚福磊

2007年12月

## 前 言

20世纪50年代末期,Smith在提出Smith预估器之后又提出了Posicast控制方案,与此同时,Calvert申请了用时滞环节消除系统振动的一项专利,但这两种控制方案鲁棒性较差,未能像Smith预估器一样得到应有的重视。直到80年代末期,麻省理工学院Singer改进了这种控制方案的鲁棒性,并称之为输入整形,这一控制技术才开始得到广泛的研究。90年代Singhose、Magee和Signh等对时滞滤波进行了深入的研究,不断地提高这一控制技术的鲁棒性和实用性,称之为时滞滤波,才使这一控制技术逐渐得到了应用。时滞滤波的基本思想是在系统中引入时滞环节,将脉冲序列与参考命令卷积形成的整形命令作为控制信号,避免激活系统的振动模态,达到抑制柔性系统残留振动的目的。2000年上海交通大学梁春燕博士、谢剑英教授首次将这一概念引入国内,并对时滞滤波进行了系统深入的研究,进一步推动了这一控制技术的发展。作者在前人研究的基础上,经过多年的研究和实践,总结提炼出这套理论和方法,写成这本专著,力求反映时滞滤波领域当前的学术水平和发展方向。

本书从二阶振荡系统振动产生和消失的机理出发,系统地介绍时滞滤波的基本思想、基本原理、基本方法、典型时滞滤波器及其性能分析。重点叙述基于矢量图、幅频特性、零极点对消原理提高时滞滤波鲁棒性的理论和方法;在有效抑制系统残留振动的同时,降低时滞滤波器的时滞、系统振动能量、刚体运动冲击、振动幅值的理论和方法;将时滞滤波器引入闭环控制系统中,提高时滞滤波的动态性能和抗干扰能力的理论和方法。最后讨论时滞滤波理论用于控制工业热处理炉、集中供热系统、桥式起重机、双摆龙门起重机的仿真和试验研究,探讨时滞滤波理论在工程中的应用。

在课题研究和书稿的撰写过程中,西安交通大学吴序堂教授给予作者许多具体的指导和热情的帮助,在此向吴老师致以崇高的敬意和诚挚的感谢!董明晓于2007年在美国佐治亚理工学院机械工程系做访问学者,本书的部分研究工作得到了合作教授Singhose的指导,也参考了Singhose教授的研究成果,在此向Singhose教授表示诚挚的感谢!本书引用了上海交通大学梁春燕博士、钟庆昌博士的部分研究成果,作者在此对梁春燕博士、钟庆昌博士表示衷心的感谢!

清华大学褚福磊教授对本书进行了详细的审阅,提出了许多宝贵的意见和建议,作者借此机会对褚福磊教授表示衷心的感谢!

由于时滞滤波是一种提出不久而尚未被广泛应用的新理论和新方法,仍未建

成一套完整的理论体系,还存在着许多有待研究和解决的问题,加之时滞滤波涉及的知识面宽,属于交叉学科,新的复杂现象不断被人们认识和发现,因此,本书的内容难以全面跟踪这一领域的进展情况,仅基于作者近年来的研究成果,根据作者的认识和体会系统地提炼出这套理论和方法,以便为广大读者在从事时滞滤波理论研究和应用时滞滤波技术时提供一些有益的思路,期望起到抛砖引玉的作用。作者学识有限,难免存在不足之处,殷切期望广大读者给予批评指正。

作者

2007年7月

# 目 录

序

前言

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....          | 1   |
| 1.1 柔性系统及其残留振动 .....           | 1   |
| 1.2 抑制柔性系统残留振动的方法 .....        | 3   |
| 1.3 时滞控制 .....                 | 6   |
| 1.4 时滞滤波 .....                 | 8   |
| 1.5 本书的主要内容.....               | 12  |
| <b>第 2 章 时滞滤波理论</b> .....      | 14  |
| 2.1 时滞滤波的基本思想.....             | 14  |
| 2.2 时滞滤波器的基本原理.....            | 18  |
| 2.3 时滞滤波器的零点分布.....            | 21  |
| 2.4 时滞滤波器的灵敏度曲线.....           | 22  |
| 2.5 时滞滤波器的幅频特性.....            | 24  |
| 2.6 本章小结.....                  | 26  |
| <b>第 3 章 时滞滤波器</b> .....       | 27  |
| 3.1 时滞滤波器的基本设计方法.....          | 27  |
| 3.2 基于矢量图设计时滞滤波器.....          | 36  |
| 3.3 典型时滞滤波器.....               | 45  |
| 3.4 典型时滞滤波器的性能分析.....          | 50  |
| 3.5 本章小结.....                  | 54  |
| <b>第 4 章 时滞滤波器的鲁棒性研究</b> ..... | 55  |
| 4.1 时滞滤波器的鲁棒性.....             | 55  |
| 4.2 基于矢量图设计鲁棒 EI 时滞滤波器 .....   | 64  |
| 4.3 基于幅频特性设计鲁棒 EI 时滞滤波器 .....  | 70  |
| 4.4 零点配置法设计鲁棒 EI 时滞滤波器 .....   | 85  |
| 4.5 本章小结.....                  | 93  |
| <b>第 5 章 时滞滤波器的性能优化</b> .....  | 94  |
| 5.1 减小时滞滤波器的时滞.....            | 94  |
| 5.2 优化系统振动幅值 .....             | 106 |

---

|            |                           |            |
|------------|---------------------------|------------|
| 5.3        | 降低系统振动能量 .....            | 116        |
| 5.4        | 降低系统的冲击响应 .....           | 122        |
| 5.5        | 本章小结 .....                | 133        |
| <b>第6章</b> | <b>闭环时滞滤波系统</b> .....     | <b>134</b> |
| 6.1        | 闭环时滞滤波系统 .....            | 134        |
| 6.2        | 外置型闭环时滞滤波系统 .....         | 137        |
| 6.3        | 内置型闭环时滞滤波系统 .....         | 143        |
| 6.4        | 本章小结 .....                | 150        |
| <b>第7章</b> | <b>时滞滤波理论的工程应用</b> .....  | <b>151</b> |
| 7.1        | 热处理炉的外置型闭环时滞滤波器控制 .....   | 151        |
| 7.2        | 集中供热系统的外置型闭环时滞滤波器控制 ..... | 159        |
| 7.3        | 桥式起重机模拟试验台的时滞滤波器控制 .....  | 168        |
| 7.4        | 双摆龙门起重机的时滞滤波器控制 .....     | 178        |
| 7.5        | 时滞滤波理论的应用前景 .....         | 183        |
| 7.6        | 本章小结 .....                | 184        |
|            | <b>参考文献</b> .....         | <b>185</b> |

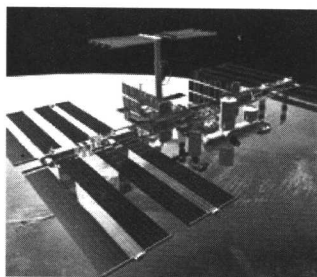


# 第 1 章 绪 论

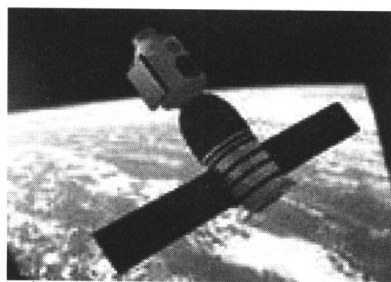
航天器、柔性机器人、起重机等具有挠性机械结构的系统,可以归结为具有刚性模态的柔性系统。在阶跃信号作用下,系统表现出长时间的残留振动,为了消除这一残留振动,人们从材料、机械结构设计和控制器设计等角度进行了大量的研究,寻找快速、有效地抑制柔性系统残留振动的理论和方法。目前,抑制柔性机构残留振动的理论和方法很多,本书从时滞滤波的角度出发,有意识、合理地利用时滞来改善柔性系统的动力学特性,达到抑制柔性系统残留振动的目的。

## 1.1 柔性系统及其残留振动

随着航天事业的发展,世界上科技发达国家发射了数量众多的各种航天器,图 1.1 所示的就是国际空间站和“神舟”一号宇宙飞船。这些航天器在空间环境中越来越多地用到各种轻型柔性外伸结构,如太阳能帆板、热辐射器、天线、柔性机械臂等。这些柔性外伸结构可以看作是一种多自由度开链或闭链机构,具有大跨度、轻质量、小阻尼的特点。因此整个系统的动力学特性非常复杂,是一个时变、非线性的分布参数系统<sup>[1~5]</sup>。在这种航天器的飞行和控制过程中,作用在航天器上的控制力不仅调整了航天器本身的位置和姿态,而且也激励了挠性结构件的各阶振动模



(a) 国际空间站



(b) “神舟”一号宇宙飞船

图 1.1 航天器

态。此外,外层真空环境中发生的流星雨、太阳风、温度差以及与其他航天器的对接碰撞等,都可能成为引起这些柔性外伸结构剧烈振动的激励源。这类挠性结构件的振动模态具有低频率、小阻尼的特点,一旦受到激励将产生大幅度的长时间的自由

振动。这种振动轻则影响航天器自身及所载精密仪器的正常工作,重则将导致整个航天器的失稳。为了避免大幅度的振动,航天器的柔性外伸结构的展开过程竟长达6~8小时,这种时间上的等待大大地降低航天器的工作效率<sup>[6]</sup>。如果能通过合理的控制手段有效地抑制展开过程中所诱发的振动,则可大幅度地提高航天器展开的速度,同时提高系统的稳定性和可靠性。因此,航天器柔性外伸结构的振动控制问题历来是航天器设计中的一个关键技术问题<sup>[7~10]</sup>。

机器人已广泛应用于航天领域和工业领域,美国 Mechatronics 公司制作的世界第一台 Wiimote 指令接收机器人 WiiBot 如图 1.2 所示。随着机器人在航天领域的广泛应用,对机器人的性能提出了更高的要求,工作环境和任务的复杂化要求空间机器人具有更高的灵活性、可靠性和更强的适应性。为此,以柔性结构件为主要结构的柔性机器人应运而生,空间机器人正朝着高速、轻型、低能耗的柔性机器人方向发展。由于柔性机器人具有质量轻、惯性小和能耗低等显著优点,符合我国现阶段“降低能耗,节约能源,建立和谐社会”的战略要求,柔性机器人不仅在航天领域得到广泛的应用,而且在柔性制造、自动化装配、焊接加工等工业领域将有着更广阔的应用前景<sup>[11~14]</sup>。

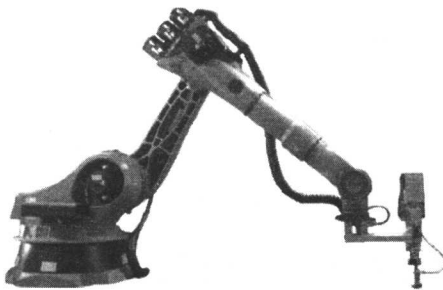


图 1.2 机器人

轻型柔性机器人可以增加有效载荷,在降低能耗和成本等方面有着重要作用,但同时也给结构的动力学分析和控制系统设计带来了许多新的问题。轻型柔性机械臂在执行运动时不可避免地要产生弹性变形,在运动结束时也会产生残留振动。残留振动的存在不仅降低了柔性机器人的定位精度、抓取精度,而且大大降低了控制系统的稳定性、可靠性和工作效率。文献<sup>[15]</sup>指出

某一空间站第一阶段的装配需遥控机器人工作约 47 小时,其中等待消除残留振动的的时间占总时间的 20%~30%。目前,如何迅速有效地抑制柔性机器人残留振动是柔性机器人得以广泛应用所首要解决的一个关键技术问题<sup>[16~20]</sup>。

高速大吨位起重机大量用于制造业、港口运输业和建筑业,如图 1.3 所示。传统的操作方式是操作者首先估计目标的空间位置,然后控制按钮移动载荷,在接近目标位置时,用试错法使载荷就位,控制精度和效率依赖于操作者视觉估计的精度和操作者的技术熟练程度。通过现场观察,尽管一再重复几乎相同的路径,但仍有大量辅助作业时间消耗在等待就位上,这主要是由于起重机的起升钢丝绳属挠性机械结构,工作中频繁的启、制动易于引起载荷摆动,在目标位置存在着长时间的残留摆动,使载荷难以就位<sup>[21~25]</sup>。为了减小载荷摆动,操作者只能放慢运行速度,

甚至在产生了载荷摆动之后,停止操作等待摆动消失,或者是进行反向操作阻尼载荷的摆动。这些方法降低了起重机的工作效率,提高了操作成本。如果能使起重机沿着设计的轨迹快速、安全、有效地运行,又不引起载荷过大的摆动,实现操作自动化,就可以减少辅助作业时间,提高工作效率。因此,研究抑制起重机载荷摆动控制方法,设计合理的控制系统,实现起重机自动化有着重要的实际意义<sup>[26~30]</sup>。



(a) QD200/50t 桥式起重机



(b) 建筑塔机

图 1.3 起重机

柔性系统的残留振动控制在航天器、柔性机器人、起重机等研究领域愈来愈引起人们的重视,如何快速、有效地抑制柔性系统的残留振动,是一个值得深入研究的课题。

## 1.2 抑制柔性系统残留振动的方法

抑制柔性系统残留振动的方法很多,但根据是否需要外界能源分为被动控制方法和主动控制方法。被动控制方法是通过选用各种耗能或储能材料,以及优化设计机械结构,达到降低柔性系统弹性变形、抑制残留振动的目的;主动控制方法是通过设计运动控制器,控制柔性系统的动态响应,达到抑制系统残留振动的目的。

### 1.2.1 被动控制方法

增加结构阻尼是改善柔性系统动态性能的有效措施,黏弹性大阻尼材料已广泛应用于航天、航空等复杂结构件,为抑制柔性系统振动提供了一条有效的途径。通常是将黏弹性材料黏附于柔性机构上,形成阻尼层,随着机械结构产生振动,黏弹性阻尼层产生拉伸与压缩的交变应力与应变,从而消耗机械振动能,达到减振的目的。Lane 等于 1984 年将黏弹性大阻尼材料应用于机器人柔性机械臂,有效抑制柔性机械臂的振动,使机器人执行部件实行迅速、精确定位<sup>[31]</sup>。刘天雄等通过主动

调节黏弹性材料层的剪切变形抑制柔性结构低阶振动模态的振动<sup>[32]</sup>。由于黏弹性大阻尼材料使柔性机械结构系统成为分布阻尼系统,加大了系统动力学特性分析的复杂性,另外,阻尼材料的最佳引入方案、配置位置及结构形式等问题还有待于进一步地研究。随着以上问题的不断解决,阻尼材料将在柔性结构中得到更广泛的应用。

新型复合材料的发展为抑制柔性机构振动提供了新的途径。由于复合材料是由两种或多种材料组合而成,而不同材料的弹性模量不同,当承受相同的应力时会产生不等的应变,形成不同材料之间的相对应变,产生附加的能耗而达到减振效果。Choi 等对复合材料构成的机械臂进行了试验研究,试验结果证明了复合材料可以有效地抑制柔性机械臂的弹性变形及其振动<sup>[33]</sup>。Bandopadhyaya 等研究了具有复合材料结构件的柔性机器人的动态响应,利用复合材料的高强度和大阻尼的特性有效地降低机器人的弹性变形及振动<sup>[34]</sup>。随着材料科学研究的深入与制造技术的不断完善,复合材料将在柔性结构中得到越来越广泛的应用。

近年来机敏材料以其独特的物理耦合效应受到了国内外学者的普遍关注。机敏材料具有传感功能、作动功能,非常适合于柔性机构的振动控制。机敏材料一般包括压电材料、电流变体、形状记忆合金、磁致伸缩材料、电致伸缩材料和光导纤维等。其中压电材料以其频响高、质量轻、结构简单及价格便宜等特点而备受青睐。Tzou 以压电陶瓷为传感器与作动器,采用主动控制方法抑制柔性机器人的弹性变形,取得了理想的减振效果<sup>[35]</sup>。Choi 将压电薄膜(PVDF)应用于具有柔性构件的工业机器人的轨迹跟踪控制,并进行了理论分析与试验验证<sup>[36]</sup>。邱志成采用压电智能结构作为敏感器和驱动器,对柔性机器人的振动问题进行了控制<sup>[37]</sup>;戴学丰、孙立宁提出压电陶瓷作动器与振动传感器相结合的振动抑制方案,实现对双连杆柔性机器人的振动控制<sup>[38]</sup>。Mehrddad 采用记忆合金对柔性机器人进行振动控制<sup>[39]</sup>。以机敏材料为传感器与作动器而构成的具有自感觉及控制能力的智能结构必将具有更广阔的应用前景<sup>[40]</sup>。

通过结构设计改变机构的质量、刚度和阻尼,从而改变了系统的振动频率和阻尼比,达到抑制柔性系统振动的目的。Warkentin 采用了变刚度法,通过改变系统刚度储存应变能,达到抑制系统振动的目的<sup>[41]</sup>。Yue 和 Zhang 对于存在运动冗余的柔性机器人,通过规划机器人的初始位形与关节自运动,降低柔性构件的弹性变形与振动,提高末端执行器的定位精度,改善系统的动力学品质<sup>[42,43]</sup>。

被动控制方法不需要外界能源,系统结构简单,在许多场合获得了良好的减振效果,得到了广泛的应用。但这一控制方法往往受工程材料、机械结构等因素的制约,因此,主动控制方法就成为抑制柔性机构振动的一种重要方法。

### 1.2.2 主动控制方法

主动控制方法主要包括开环控制、基于线性系统的闭环控制与基于非线性系

统的闭环控制。

由于开环控制的简单易用性,常被用于抑制柔性系统的振动。Bayo 在研究柔性机械臂轨迹跟踪控制问题时,用 FFT 变换将系统的动力学方程转化到频域内,然后将频域内的控制力矩计算结果反变换到时域内,基于 Bang-Bang 控制与可变增益反馈控制相结合的控制方案对系统进行运动控制<sup>[44]</sup>。Singhose 将时滞滤波技术用于抑制桥式起重机的载荷摆动,并且研究了小车的运动对载荷平面摆动的影响规律,以及提升运动对载荷摆动的作用规律<sup>[45,46]</sup>。

PID 控制器是基于输出反馈的闭环控制,由于其简单实用性,被广泛用于刚性机构的运动控制。进一步通过调整控制器增益构成自校正 PID 控制器,或其他控制方法相结合构成复合控制系统改善 PID 控制器性能。Cannon 采用 PID 反馈控制器对柔性机械臂进行一系列的试验研究,试验结果表明 PID 控制器可以抑制柔性系统的残留振动<sup>[47]</sup>。

将柔性系统的动力学模型简化为线性时不变系统,基于线性控制理论和最优控制理论,采用极点配置法和利用极值原理、最优滤波或动态规划等优化方法设计控制器,实现线性状态反馈控制。Sakawa 采用线性二次型最优控制理论确定状态反馈增益,抑制了柔性机器人的弹性变形与振动<sup>[48]</sup>。Nguyen 设计状态观测器和输出反馈控制器控制柔性机器人,并通过仿真结果证明这一控制方案的有效性<sup>[49]</sup>。线性状态反馈控制是以线性控制理论为基础,随着系统维数的增多,需要大量的检测元件或状态观测器提供系统的状态,加大了控制系统的复杂性和控制器的设计难度。另外,在非线性系统的线性化过程中,忽略非线性影响因素,可能严重影响系统运动精度,人们开始研究非线性系统闭环控制策略。

进入 20 世纪 90 年代,各种非线性控制方法在柔性系统振动控制中得到广泛的应用,其中包括自适应控制、变结构控制、模糊和神经网络控制及学习控制等。

自适应控制是一种非线性控制技术,其自学习能力使它能在系统运行过程中对模型参数进行辨识和校正,将自适应控制理论应用于时变的非线性柔性系统中,可以有效地抑制柔性系统的振动。Dogan 采用自适应内模控制抑制柔性机械臂的振动<sup>[50]</sup>。自适应控制考虑了柔性系统时变的非线性特性以及负载的不确定性,使柔性系统在整个运动过程中保持稳定,但需在线辨识系统参数,这要求较高的计算机运行速度。

变结构控制是实现线性和非线性系统鲁棒控制的方法,变结构控制器的设计不需要系统精确的数学模型,模型参数的边界就足以构造一个控制器。滑模变结构控制是最广泛应用的一种变结构控制技术,滑模变结构系统中的滑动模态对系统参数摄动及外部干扰具有不变性,使它具有理想的鲁棒性。Ge 将滑模变结构控制用于分布参数柔性杆件的振动控制,能有效抑制柔性杆件的振动<sup>[51]</sup>。由于滑模带内的高频切换引起控制器输出的高频振荡,可能激起系统的未建模动态而产生抖

振现象, Ertugral 将滑模变结构控制与神经网络控制相结合控制机器人手臂, 使机器人对系统参数摄动和外部干扰具有强的鲁棒性, 而且消除系统的抖振现象<sup>[52]</sup>。

模糊控制器是一种语言控制器, 它的控制过程类似于人的手动控制决策过程。它的主要特点是无须建立振动系统的精确数学模型, 基于模糊规则经推理运算后进行控制, 因此, 由经验和理论分析总结出的控制规则是模糊控制的关键技术。Green 设计模糊逻辑自适应扩展 Kalman 滤波器控制柔性机器人, 与经典 PID 控制相比, 更有效地抑制柔性机器人的振动, 具有更高的轨迹跟踪精度<sup>[53]</sup>。

神经网络的自组织、自学习功能使其对非线性系统具有很强的逼近或映射能力, Tian 基于循环神经网络对柔性机器人进行位置和力控制, 仿真结果表明, 当系统存在着参数不确定性和未建模动态时, 机器人仍能具有高的运动精度<sup>[54]</sup>。Gomes 基于神经网络对摩擦进行补偿, 达到抑制柔性机械臂振动的目的<sup>[55]</sup>。Wai 设计模糊神经网络控制器, 对最优控制律中的非线性摩擦进行学习和补偿, 仿真和试验结果证明了这一控制技术的有效性<sup>[56]</sup>。

对柔性系统的材料选用和结构设计可以增加系统阻尼, 提高系统刚度, 也可能增加系统的质量和成本, 甚至在结构和质量受到限制的情况下难以实现。闭环控制系统大多需要建立复杂的数学模型, 并且采用复杂的控制算法来实施控制, 而控制精度又依赖于数学模型的精确程度和测量数据的准确程度, 有的复杂系统的数学模型难以建立, 有的物理量难于准确测量。因此, 探索其他的理论和方法来抑制柔性系统残留振动具有重要的理论意义和实用价值, 时滞控制技术作为一种简单而有效的开环控制技术, 是对上述方法的有益补充。

## 1.3 时滞控制

### 1.3.1 时滞控制系统

时滞是指信号传输的延迟, 是自然界中广泛存在的一种物理现象。时滞对象是指含有固有时滞特性的被控对象, 化工、炼油、冶金、集中供热系统等一些复杂的工业过程都广泛存在着时滞现象, 是典型的时滞对象。时滞对象的特点是它的输出变量相对于输入变量存在着时间上的滞后。时滞的存在使被控量不能及时地反映系统所承受的扰动, 从而产生明显的超调, 使控制系统的稳定性变差, 调节时间延长。对象固有的时滞给系统分析和控制器的设计带来了很大的困难, 时滞对象被认为是最难以控制的对象。如何抑制对象固有时滞造成的系统性能下降, 是许多研究者正在研究的一个课题。然而, 任何事物都有其两面性, 时滞也不例外, 如何挖掘时滞特性潜在的优点, 有意识地、合理地利用时滞来改善系统的动态性能是一个值得深

入研究的课题,这就是时滞控制技术的主要研究内容<sup>[57]</sup>。

时滞系统是指内部含有时滞环节的系统。时滞有时是对象所固有的,如时滞对象中的时滞;有时是在控制过程中无意识地引入系统中,如采样控制系统中采样保持器的引入便是无意识引入系统中的时滞。根据控制器和被控对象是否含有时滞环节,将时滞系统分为3类:①时滞控制器控制时滞对象;②非时滞控制器控制时滞对象;③时滞控制器控制非时滞对象。非时滞控制器控制非时滞对象不属于时滞系统的范畴。时滞系统的分类如图 1.4 所示。

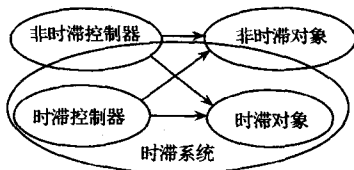


图 1.4 时滞系统

第 1 类和第 3 类时滞系统都是在时滞控制器控制下的系统,称为时滞控制系统。根据时滞控制系统中是否有反馈信号将时滞控制系统分为开环时滞控制系统和闭环时滞控制系统。开环时滞控制系统通常是由被控对象和时滞控制器组成,其一般结构如图 1.5(a) 所示;闭环时滞控制系统通常是由被控对象、时滞控制器、传感器组成,其结构如图 1.5(b) 所示;时滞控制系统的第 3 种形式是在闭环系统的内部和外部都有时滞控制器,其一般结构如图 1.5(c) 所示。

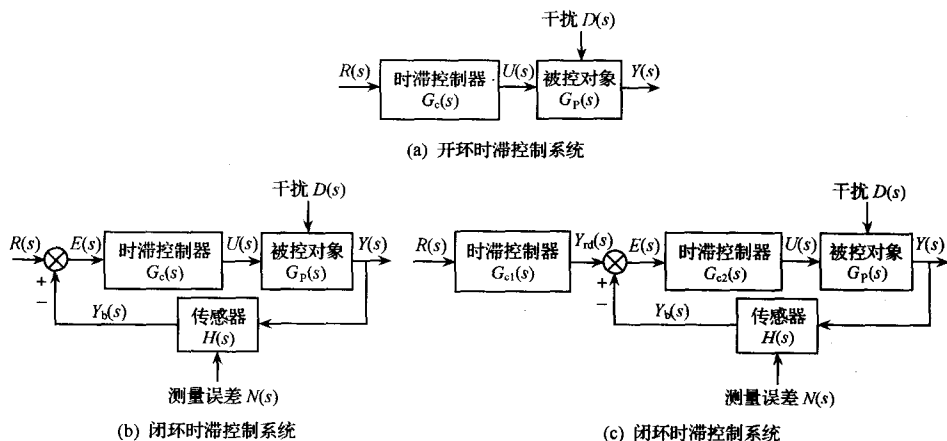


图 1.5 时滞控制系统

### 1.3.2 时滞控制的研究内容

时滞控制主要研究如下 3 方面的内容:①20 世纪 50 年代末期,Smith 提出 Posicast 控制方案,它是用比例-时滞环节对消被控对象的极点,从而消除系统的残留振动<sup>[58,59]</sup>。与此同时,Calvert 申请了用时滞环节抑制系统振动的一项专利<sup>[60]</sup>。这类控制方案的侧重点在于利用时滞环节设计合理的滤波器,避免激活对

象的振动模态,本书将这一控制方案称为时滞滤波器(time delay filter, TDF)<sup>[57]</sup>,也称为输入整形器。它是属于前馈控制的范畴,是一种开环控制方法,这也是本书的主要研究内容。②将时滞引入控制器中构成重复补偿器,利用时滞环节的记忆功能实现重复学习,使系统能无静差地跟踪一定周期的目标信号,本书称之为时滞学习控制器(time delay learning controller, TDLC)。它是属于内模控制的范畴,是一种学习控制方法<sup>[61]</sup>。③麻省理工学院 Youcef 提出基于时滞的模型参考控制方案。这一方案主要是利用时滞环节来观测和估计系统的不确定性因素及外界干扰,本书称之为时滞观测器(time delay observer, TDO)<sup>[62~65]</sup>。它是属于观测器的范畴<sup>[57]</sup>。

## 1.4 时滞滤波

时滞滤波是有意识地在系统中引入时滞环节,将脉冲序列与参考命令卷积形成的整形命令作为控制信号,滤掉参考命令中引起系统振动的频率成分,以消除柔性系统的残留振动。

### 1.4.1 时滞滤波的研究现状

#### 1. 时滞滤波器的鲁棒性研究

时滞滤波起源于小阻尼伺服系统的振动控制问题的研究。1957年 Smith 建议采用 Posicast 控制方法,将一定幅值的阶跃输入信号按照时间段分成两个小幅值的阶跃信号,然后控制重物运动。将重物悬挂点移动到一半的距离时,重物会产生半个周期的摆动,达到最大的摆动幅值,这时迅速移动悬挂点到目标位置,重物将保持在悬挂点的正下方,而不产生摆动<sup>[58,59]</sup>。并且,他指出这一控制技术还可以用于电子、机械,甚至是气动控制系统中。虽然 Posicast 控制得到了一定的研究,但由于鲁棒性较差,没有得到广泛的应用。直到 80 年代末期, Singer 通过增加时滞滤波器的阶数,克服了由于系统固有频率或阻尼系数变化引起的系统性能下降的问题,解决了 Posicast 控制方案的鲁棒性问题<sup>[66]</sup>。Seering 和 Singer 一起提出了极不灵敏时滞滤波器,进一步提高了时滞滤波器的鲁棒性<sup>[67~69]</sup>。Singhose 通过在系统极点或极点附近配置时滞滤波器的多重零点设计多峰时滞滤波器,进一步提高了时滞滤波器的鲁棒性,能很好地适应系统参数的不确定性<sup>[70~76]</sup>。特别是极不灵敏多峰时滞滤波器对系统模型误差有更大的鲁棒性。

#### 2. 时滞滤波器的最优性研究

Pao 在最近的研究工作中,针对柔性系统的振动频率和阻尼存在着不确定性



的问题,提出了混合时滞滤波器的设计方法,得到近似最优时滞滤波器。在设计时滞滤波器的过程中,考虑了系统参数变化的可能性,在系统参数变化范围内目标函数最小设计最优时滞滤波器<sup>[77~80]</sup>。Withit 基于时滞滤波器对 2 杆件柔性机器人进行控制,在尽可能短的时间内实现柔性机器人点到点的位置控制,与 Bang-Bang 控制策略相比,具有更小的残留振动幅值<sup>[81]</sup>。

### 3. 负脉冲时滞滤波器

由于系统响应速度受到时滞滤波器最大时滞的限制,所以有必要减小时滞滤波器的最大时滞。通常情况下,时滞滤波器包含正脉冲,如果放宽对正脉冲的约束条件,设计含有负脉冲的时滞滤波器,可以减小时滞滤波器的时滞。Rappole 提出了一种包含负脉冲的时滞滤波器<sup>[82,83]</sup>,在有效抑制系统残留振动的同时,提高了系统的响应速度。对于在运动过程中受到激励作用的柔性系统,Singhose 设计具有负脉冲的时滞滤波器,其脉冲幅值等于最大的激励值<sup>[84]</sup>,达到提高柔性系统响应速度的目的。Pao 提出具有负脉冲单位幅值时滞滤波器抑制机械手的振动,与正脉冲时滞滤波器相比较,明显地提高了系统的响应速度<sup>[85,86]</sup>。但是负脉冲时滞滤波器在一段小的时间周期内易产生溢出,而且,小的时滞易激发系统的高频模态,这些问题可以通过在高频模态处再增加约束条件或引入低通滤波器等方法来解决。

### 4. 多模态柔性系统的时滞滤波器设计

对于多模态柔性系统,Singhose 等提出级联法和联立方程组法设计时滞滤波器<sup>[69,73,74]</sup>。级联法是针对柔性系统的每个振动模态设计时滞滤波器,然后将所有模态的时滞滤波器进行级联,组合成一个完整的时滞滤波器,抑制系统的残留振动。联立方程组法是根据系统振动约束条件,建立一系列的约束方程,求解方程组得到时滞滤波器的参数。级联法的设计计算简单,而联立方程组法则比较直接,但设计计算过程较复杂。

国内梁春燕博士、钟庆昌博士对时滞滤波理论进行了系统、深入的研究<sup>[87~93]</sup>,分别讨论了提高时滞滤波器的鲁棒性、最优性的理论和方法,进一步促进了时滞滤波技术的发展。

#### 1.4.2 时滞滤波的发展趋势

时滞滤波的简单易用性、对模型误差的鲁棒性,以及能与输入信号实时作用,使它在抑制柔性系统振动领域中得到快速发展,特别是在 20 世纪 90 年代后期,对它的研究相当活跃。目前对时滞滤波的研究将主要集中在如下几个方面: