

非定常系统的 预见控制研究

徐玉洁◎著

Study of Preview Control on
Non-autonomous Systems



中国经济出版社
CHINA ECONOMIC PUBLISHING HOUSE

本书出版受北京联合大学2015年自然科学类新起点项目(编号: Zk10201503)部分资助

非定常系统的 预见控制研究

徐玉洁◎著

Study of Preview Control on
Non-autonomous Systems



中国经济出版社
CHINA ECONOMIC PUBLISHING HOUSE

北京

图书在版编目(CIP)数据

非定常系统的预见控制研究 / 徐玉洁著.

北京:中国经济出版社,2016.2

ISBN 978-7-5136-4074-9

I. ①非… II. ①徐… III. ①时变系统—离散系统—预测控制—研究 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 281507 号

责任编辑 赵静宜

责任审读 贺 静

责任印制 巢新强

封面设计 久品轩

出版发行 中国经济出版社

印 刷 者 北京艾普海德印刷有限公司

经 销 者 各地新华书店

开 本 710mm × 1000mm 1/16

印 张 9.5

字 数 142 千字

版 次 2016 年 2 月第 1 版

印 次 2016 年 2 月第 1 次

定 价 42.00 元

广告经营许可证 京西工商广字第 8179 号

中国经济出版社 网址 www.economyph.com 社址 北京市西城区百万庄北街 3 号 邮编 100037

本版图书如存在印装质量问题,请与本社发行中心联系调换(联系电话:010-68330607)

版权所有 盗版必究(举报电话:010-68355416 010-68319282)

国家版权局反盗版举报中心(举报电话:12390) 服务热线:010-88386794

前 言

实际工程应用中,某些系统,如机床、机器人等的路径控制系统,车体主动悬架装置系统等,未来一段时间的目标信号或干扰信号是已知的。如何充分利用这些已知的未来信息对系统实施控制,是预见控制理论的主要研究内容。预见控制理论在无人机、机器人机械手、机床路径控制、车辆主动悬架设计等领域已经有了实质性的应用。从上世纪 60 年代提出概念,经历最初的缓慢发展,直到现在,预见控制理论已经取得了很大的进展。迄今为止,对于预见控制的研究,国内外主要集中于研究定常离散系统

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases}$$

的预见控制器设计问题。近几年,定常连续系统的预见控制也有一定的研究。而现代工业生产的日益大规模化、复杂化导致工程应用中普遍存在非定常现象(系统的参数部分或者全部不是常数)。如航空航天领域中,飞行器的质量随着时间减少,从而使得其飞行参数也随之改变;另一个常见的例子是机械手,在运动时其各关节绕相应轴的转动惯量是随时间而变化的。但目前针对时变系统的预见控制研究比较少。这主要是由于非定常系统的某些参数或者所有参数是随时间变化或者含有不确定项,导致处理系统时所用到的差分算子不再是线性算子,从而使适用于定常系统的多数研究结论不能简单地直接推广到非定常系统中。因此研究非定常系统的预见控制问题具有重要的理论意义和实际意义。

本书将预见控制理论和其他控制理论相结合,设计了几类非定常系统的预见控制器设计过程。本书共分为 6 章。第 1 章是绪论,对非定常系统(主要是时变系统)和预见控制的研究现状做了简单的概述。第 2 章对本书涉及到的预见控制的一些基本问题做了详细的介绍,主要针对预见控制的理论研究基础和预见控制技术在控制系统中的实施过程。第 3-6 章研究了一些非定常系统的预见控制问题,主要内容如下:首先克服了差分算子在时变离散系统中不再是线性算子的困难,分别推导了带有状态时滞和输入时滞的两类时变

离散系统的扩大误差系统,把原来的时滞系统转化为不含时滞的一般系统,由此设计了系统带有预见补偿的最优控制器。同时应用矩阵分解法将控制器结构中涉及到的高阶代数 Riccati 方程进行了降阶处理,简化了计算机仿真的计算量。在研究带有状态时滞的时变离散系统控制器的基础上,本书进一步地对一类带有状态时滞的不确定性离散系统,在构造其扩大误差系统的基础上,将保性能控制和预见控制结合,设计了系统基于 LMI 的保性能预见控制。以上研究内容均是在离散非定常系统领域中进行的。接下来,本书通过对时变连续时间系统的状态向量和误差信号取微分,构造了包含目标信号的扩大误差系统,在设计其最优控制器的基础上推导了原时变连续时间系统带有积分器的最优预见控制器,并阐述了其中涉及到的矩阵微分 Riccati 方程的算法。最后,本书将预见控制技术中的一些思想应用到中立型系统中,构造了时变中立型系统基于目标跟踪的控制器。

本书是作者近年来部分研究成果的归纳与集锦,虽然本书对非定常系统展开了预见控制方面的初步研究,但是受非定常系统研究的复杂性、本人水平和能力有限的影响,在如何确定预见控制的步长、如何将鲁棒控制和预见控制结合应用于非正常系统等方面都值得探索。同时,本书不足与错误之处在所难免,恳请专家、学者和同行加以批评指正。

本书多数内容是作者在攻读博士学位期间完成的,因此首先衷心感谢我的导师廖福成教授对我的辛勤培养!廖老师严谨的科研态度使我顺利完成了相关课题的研究和论文的发表。在本书的写作过程中,北京科技大学自动化学院的王迪博士(现为北京邮电大学自动化学院教师)和数理学院的吴江博士在仿真研究和相关理论推导方面给予了帮助,在此表示感谢!本书是在前人工作基础上进行的研究,对在相关领域的学者一并表示感谢!本书的出版得到了北京联合大学自然科学类新起点项目(编号:Zk10201503)的部分资助以及北京联合大学相关部门的支持,在此对资助机构和相关人员表示衷心的感谢!也向为本书出版付出了辛勤劳动的中国经济出版社赵静宜老师表示深切的谢意!

作 者

2015 年 1 月 22 日

前 言

第1章 绪论 / 1

- 1.1 非定常系统的研究现状 / 2
- 1.2 预见控制的研究概述 / 8
 - 1.2.1 预见控制的提出背景 9
 - 1.2.2 预见控制的研究现状 11
 - 1.2.3 预见控制的实验室仿真及应用 14
- 1.3 本书论述的主要问题 / 17

第2章 预见控制的一些基本问题 / 20

- 2.1 离散系统有限时间段内的最优控制 / 20
 - 2.1.1 离散控制系统 20
 - 2.1.2 最优控制理论 21
 - 2.1.3 离散系统的最优控制原理 23
- 2.2 数字最优调节问题 / 26
- 2.3 预见控制理论的基本结果 / 28

第3章 带有时滞的离散时变系统的最优预见控制 / 34

- 3.1 时滞系统的研究意义 / 34
- 3.2 带有状态时滞的时变离散系统的预见控制 / 35

3.2.1	系统的描述及基本假设	35
3.2.2	扩大误差系统的推导	36
3.2.3	扩大误差系统的最优预见控制	40
3.2.4	仿真实例	43
3.3	带有输入时滞的时变离散系统的预见控制 / 52	
3.3.1	问题的描述	53
3.3.2	扩大误差系统的推导	53
3.3.3	最优预见控制器的设计	57
3.3.4	仿真实例	60
3.4	本章结论 / 64	

第4章 一类不确定离散系统的保性能预见控制 / 66

4.1	带有状态时滞的不确定离散系统的转化 / 66
4.2	保性能预见控制器的设计 / 72
4.3	本章结论 / 80

第5章 连续时变系统的预见控制 / 81

5.1	连续时变系统预见控制的研究基础 / 82	
5.2	一般连续时变系统的预见控制器设计 / 84	
5.2.1	问题描述	84
5.2.2	扩大误差系统的推导	85
5.2.3	扩大误差系统的控制器设计	87
5.2.4	矩阵微分 Riccati 方程的迭代算法	90
5.2.5	连续时变系统的最优预见控制器	92
5.2.6	数值仿真	94
5.3	本章结论 / 98	

5.4 附录:对一般线性连续系统实施预见控制器的新途径 / 99

第6章 预见控制思想在一类时变中立型系统中的应用 / 109

6.1 一般时变中立型系统的控制器设计 / 109

6.1.1 引言 109

6.1.2 系统的描述 110

6.1.3 扩大误差系统的构造 111

6.1.4 控制器的设计 114

6.1.5 仿真实例 122

6.2 本章结论 / 125

第7章 本书的总结与展望 / 126

参考文献 / 128

第1章 | 绪论

NO.1

在实际工程应用中,由于外界不确定因素的影响,非定常系统普遍存在。由于参数随着时间变化或者含有不确定项,一些适用于定常系统(Constant Systems)的传统的经典控制方法并不适用于非定常系统(Non-autonomous Systems),而且,针对非定常系统的控制方法比较少。也正基于此,非定常系统的控制问题成为控制领域广泛研究的热点之一。

在一些非定常系统中,存在这样一类情况:未来一段时间内的目标信号或者干扰信号是已知的,如机器人控制系统的路径是事先确定的,即相对于当前时刻而言,未来的目标信息是已知的。如果我们在制定控制策略时,能够考虑这些已知的未来信息,并在系统的控制器设计中充分利用这些信息,那么就可以弥补系统因响应速度不够带来的缺陷,从而提高其控制性能。预见控制作为一种前馈补偿控制方法,它的基本思想就是不仅注意系统过去及现在的目标信号,而且充分考察系统已知的未来目标信号或干扰信号,尽量减小系统输出与目标信号之间的总体偏差。1966年,美国学者 Thomas B. Sheridan 首次提出了预见控制(Preview Control)的概念^[1],并通过三个实例(行驶中的汽车、盲人电子障碍探测仪和远程操纵设备)详细验证了应用预见控制,系统能取得比常规方法好的控制效果。从提出概念到现在的50多年时间里,预见控制获得了长足的发展,并逐渐在一些实验室仿真实验中和实际应用中取得成功。尤其是近年来,控制界的一些学者将预见控制和其他控制理论(如鲁棒控制、 H_∞ 控制等)相结合,应用到更多的系统控制器设计中,并由此产生了一些新的控制方法。

预见控制取得的进展多是在定常系统中完成的,涉及非定常系统的成果非常少。为了进一步研究非定常系统的控制方法,并拓宽预见控制技术的应用范围,本书在非定常系统(时变系统和不确定系统,以时变系统为主)中展开了预见控制理论的研究。

1.1 非定常系统的研究现状

随着现代工业生产系统的日益大规模化、复杂化,非定常系统普遍存在于工程应用中^[2,3]。非定常系统通常包含两类:时变系统(Time-varying Systems)和不确定系统(Uncertain Systems)。参数随着时间变化的系统称之为时变系统或变系数系统,火箭是时变系统的一个典型例子,它在飞行中的质量会由于燃料的消耗而减少,从而导致飞行过程中的相关参数也随之改变;另一个常见的例子是机器人机械手^[4],在运动时其各关节绕相应轴的转动惯量是以时间为自变量的一个复杂函数,参数含有不确定项的系统称之为不确定系统,不确定性因素可能来源于系统的时变参数、建模误差、量测噪声和外部扰动等,在量子力学及风险管理等领域最为突出^[5,6]。

非定常系统的显著特点就是系统的部分或者全部参数随着时间改变或者含有不确定项,这些参数使得系统的输出响应不仅与输入信号有关,还与其他信号或参数有关,这一特点增加了分析和研究非定常系统的复杂性。也正基于此,非定常系统的控制方法有别于定常系统的控制方法。所以近年来,非定常系统的控制问题越来越被控制界所关注,成为被广泛讨论的焦点之一。相应地,在非定常系统的研究领域也出现了一些比较好的成果^[5-11]。如近年来我国高铁的快速发展对列车的设计提出了很高的要求,中南大学的曾庆元等对列车桥梁空间涉及的时变系统作了控制方法和稳定性方面的分析研究^[12-15],为相应的桥梁及隧道设计提供了重要的参考依据。这是时变系统在工程应用中的典型实例。杜佳璐等^[16]将不确定非线性系统的一种自适应控制算法应用到船舶操纵系统,设计了船舶运动的航向跟踪控制器,较好地解决了这类实际控制问题。目前,针对在电机、机械臂、飞行姿态等领域出现的不确定系统的控制问题,也有了一定的研究方法^[17-20]。

近30年,随着控制对象的复杂化以及人们对控制理论研究的深入,一些学者致力于研究非定常系统,将研究方向从传统的定常系统的控制器设计转移到非定常系统(主要是时变系统)的动态控制器设计。这些研究方向的转变和研究内容的更新,一方面在很大程度上促进了控制理论的发展,另一方面也加深了控制理论的应用领域,这是现代控制理论的一个伟大转变。非定常系统的提出来源于实际工程应用,其中时变系统主要是由系统参数随时间变化引起的,如直升飞机传动系统的振动衰减问题、卫星姿态控制问题以及电子设备中常用的正弦波信号源控制问题等;不确定系统主要来源于系统结构、参数及模型的不精确性。基于不同的应用背景、研究目的以及采用的控制方法,在研究非定常系统时,通常主要有以下两种分类方法。

(1) 根据系统的线性性质,可将非定常系统分为线性非定常系统^[21-23]和非线性非定常系统^[24,25];

(2) 根据系统自身的物理特性,可将非定常系统分为连续非定常系统和离散非定常系统。

还有其他一些分类方法,如将非定常系统分为一般非定常系统和广义非定常系统^[26-28]等,而时变系统在有些情况下可以根据时变矩阵中时变因素随时间变化的规律,将时变系统分为慢时变系统^[29,30]、周期时变系统^[31-33]及快时变系统^[34]。在研究非定常系统之前,首先要做的预备工作就是根据研究目的和所使用的研究方法将研究对象进行分类。虽然不确定系统和时变系统的参数变化不一样,但是在非定常系统方面,它们的很多研究方法都是一样的。鉴于本书的主要研究对象为时变系统,下面我们就以时变系统为例来对它们的研究现状进行概述。

由于时变系统的动态特性非常复杂,因此控制领域的学者主要从以下几个方面对其进行研究:

(1) 时变系统的辨识方法^[35,36];

(2) 时变系统的稳定性^[37-39];

(3) 时变系统的控制方法。

对时变系统进行辨识主要是为了建立合适的数学模型,所采用的方法

多是在线辨识;对时变系统进行稳定性分析主要是约束其中的时变参数的变化幅度,从而通过已有的、成熟的稳定性判别方法来判断时变系统的参数在什么情况下能够保证时变系统是稳定的;而对时变系统的控制方法进行研究则是根据时变系统的特点,采用比较成熟的(或者经过改进的)控制理论对系统实施控制。由于在线辨识和稳定性分析往往包含在系统的控制方法研究中,所以下面我们着重讨论时变系统控制方法的研究现状。

早期有关时变系统的研究理论主要是在线性时变系统中展开,且采用的方法是线性定常系统常用的研究方法,这种方法在时变系统研究中被称为“冻结系数法”^[40]。这一方法主要应用在工程领域中,它的实质是在系统的工作时间内,分段将时变参数“冻结”为常值,从而可把时变系统看成几个普通的定常系统组合而成。这种方法使得闭环系统的稳定性分析变得相当容易,但对被控对象参数的变化速度有很大限制,要求时变参数是慢时变的。否则,当参数随时间变化很快时,从线性时不变的角度进行建模和控制已远远不能达到时变系统的控制要求;当将所得到的控制策略作用于实际系统时,甚至有可能导致系统崩溃。

作为一种能够在系统运行过程中去不断提取有关信息的控制方法,自适应控制是目前解决时变系统控制问题时最常用的方法,但是自适应控制对被控对象的参数要求比较高。对于输入信号或干扰信号呈现周期性变化的时变系统,学术界通常多采用重复学习控制,可以实现其他控制方法难以达到的高精度跟踪。而当所研究的系统为快时变系统时,通常采用的方法是通过给定的算法提高系统在线辨识的精度,进而得到辨识结果^[41],控制界对快时变系统所采用的辨识方法多为基于最小二乘法原理的限时记忆长度辨识算法和遗忘因子辨识算法^[42,43],但研究较少。下面我们具体介绍一下时变系统研究中比较常用的几类控制方法。

(1) 自适应控制(Adaptive Control)

由于设计高性能飞机自动驾驶仪的需要,自适应控制的概念在20世纪50年代初期就被提出来了,但在当时,这一控制方法未能取得大的研究进展。后来随着闭环系统稳定性问题的解决和计算机技术的发展,自适应控制在20世纪80年代后期获得了快速发展^[44]。自适应控制和常规的反馈控

制一样,也是一种基于数学模型的控制方法,其特点是为了处理系统模型需要在线辨识并不断修正和完善预先设定的系统模型^[45-47]。对系统实施自适应控制通常需要结合其他控制方法,以确保系统具有更好的性能。

如参考文献[48]针对时变离散时间系统,用投影修正的最小二乘法辨识时变系统的参数,并用极点配置法设计其控制律。辨识机制的投影修正保证了闭环自适应控制系统的鲁棒稳定性。通过间接极点配置法设计的鲁棒自适应控制算法表明,如果控制系统的平均时变充分小,则能够保证对应的闭环系统是鲁棒渐近稳定的。

而参考文献[49]针对带有干扰信号的线性连续时变系统,通过引入输入滤波器和坐标变换,扩展了原系统的状态空间,构造了一个包含输入滤波器、状态向量、输出向量和干扰信号的扩大系统。在讨论扩大系统零输入稳定的基础上,作者根据 Krasovskii 定理^[50]得到一个结论:系统一定存在一个 Lyapunov 泛函,能够确保其闭环系统是指数渐近稳定的。从这个结论出发,参考文献[49]设计了连续时变系统的鲁棒自适应控制器。与其他研究时变系统自适应控制的文献相比,参考文献[49]研究结论的最大亮点在于只需证明 Lyapunov 泛函的存在性,无须构造其具体表达式,且没有涉及 Riccati 方程或者线性矩阵不等式的求解,这是以往相关研究论文所没有的。

(2) 迭代学习控制(Iterative Learning Control)

人们在研究高速运动的工业机械手控制问题时,提出了这样一个想法:不断重复一个同样轨线的控制尝试,并以此修正控制律,可能会得到非常好的控制效果。基于这种系统重复学习的想法,Arimoto 等在 1984 年正式提出了迭代学习控制^[51,52]的概念,并建立了实用的算法,而且从理论上证明了这种算法的可行性。

迭代学习控制的适用对象是具有重复运动性质的控制系统,它的目标是实现有限时间区间上的完全跟踪任务。迭代学习控制通常采用“在重复中学习”的学习策略,这种策略具有记忆和修正机制。迭代学习控制的思想很简单,就是通过不断地修正控制输入,产生新的控制信号,最终实现对期望轨迹的理想跟踪,使得系统的跟踪性能得以提高^[53-55]。迭代学习的基本控制结构如图 1-1 所示。

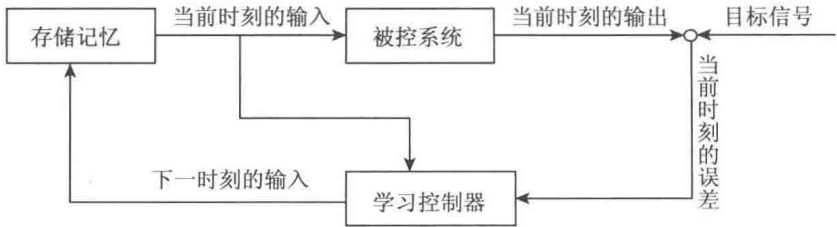


图 1-1 迭代学习的基本控制结构

唐建中等^[56]将当前的学习误差信息和以往的学习误差信息同时引入到时变系统的学习控制中,给出了系统分别基于状态反馈和输出反馈的两类迭代学习控制律,从而保证系统除了具有较快的学习速度和较高的跟踪精度之外,还具有良好的鲁棒性。参考文献[57]对有限时间内的轨迹跟踪时变机器系统,分别通过迭代学习律和微分学习律估计了未知时变参数和未知常数的大小,从而提出了时变机器系统的混合学习策略,这种学习策略无须通过有限时间段内的 Talyor 级数展开来估计参数。

(3) Lyapunov 泛函法

Lyapunov 泛函法作为分析系统稳定性的重要方法,经常用在系统的控制器设计之中。该方法的主要思路是直接引入状态反馈^[58],通过求解一组由 Lyapunov 泛函确定的 Riccati 方程^[59,60]得到系统的次优控制律^[25,61],避免了反复迭代的烦琐计算,还能保证得到的控制系统是完全闭环的,同时还能推导出系统性能指标函数的次优值表达式。通过这种方法设计出来的控制器特别适合实时控制,并且具有较好的抗干扰能力。但该方法对矩阵方程组的可解性没有保证,所以其实用性受到限制。20 世纪 60 年代发展起来的 Lyapunov 第二方法在研究不确定系统的鲁棒镇定性中起到了非常重要的作用。时至今日,不确定系统的鲁棒控制问题依然依赖于 Lyapunov 第二方法^[62]。

参考文献[63]研究了具有初始条件的线性连续时变系统

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t), x(t_0) = x_0$$

的稳定性问题。在时变矩阵 $A(t)$ 的范数有界的情况下,通过设计一个最优化问题,获得了系统的二次型 Lyapunov 函数 V 。作者将系统的运行时间区间划分为若干个长度相等的时间段,由此得到了一系列区间端点处的

Lyapunov 函数 $V_i (i = 0, 1, 2, \dots)$, 并推导出系统 $\dot{x}(t) = A(t)x(t)$ 一致渐近稳定的充分条件为 $V_{i+1} < V_i$ 。与其他方法相比, 文[63]的方法比较简单, 但是只适用于数值计算, 其中对系统所采用的离散化处理方法(将连续系统直接取离散点处的值做离散处理)过于简单, 且存在缺陷。由于缺乏严格的理论推导, 因此作者的这种处理方法只能作为一种数值计算方法。

参考文献[64]基于 Lyapunov 稳定性理论推导了零输入下连续时变系统的稳定性定理, 但作者对系统的状态转移阵作了诸多限制, 同时忽略了求解时变系统状态转移阵的解析表达式本身就是一个难题, 因此参考文献[64]结论的适用范围非常有限。而参考文献[65]通过分析其构造的 Lyapunov 函数得到了一般时变系统渐近稳定的充分条件, 虽然结论适用于非线性时变系统, 但是对状态方程中未知函数的约束条件过于苛刻。

参考文献[66]考虑了线性离散时变系统

$$x(k+1) = A(\lambda(k))x(k) + B(\lambda(k))u(k)$$

的控制问题, 其中, $\lambda(k)$ 是与时间有关的未知的有界参数, 作者通过设计一个与 $\lambda(k)$ 相关的 Lyapunov 函数, 得到了上述系统基于 LMI 的状态反馈控制器, 保证了系统的鲁棒稳定性。由于 Lyapunov 稳定性理论是非常有效的稳定性分析工具, 因此在设计时变系统的控制器方面, 尤其是设计状态反馈控制器方面经常用到这种方法。

时变系统的控制器设计很难通过某一种方法来得到。在很多情况下, 研究者需要将不同的控制方法结合起来研究时变系统的控制问题。如郭毓等^[67-69]针对一类有限时间区间上的一阶线性时变系统, 将自适应控制方法与迭代学习相结合, 提出了自适应迭代学习控制算法。作者还基于 Lyapunov 方法推导了适用于快时变系统的迭代学习控制律, 使跟踪误差、参数估计误差和控制信号有界, 并且证明了当迭代次数趋于无穷时, 系统的跟踪误差在有限时间段内一致收敛到零。

除了以上常见的三种方法之外, 相关学者还对时变系统的控制问题提出了其他一些方法。如参考文献[70]采用平衡截断法^[71]将连续时变系统进行降阶处理, 通过映射关系将其转化为离散时变系统, 在设计离散时变系

统控制器的基础上,推导了连续时变系统的控制器。作者还计算了处理后的模型和原有模型之间的误差。当我们对系统的控制精度要求不高时,这种处理方法是非常有效的。

参考文献[72]和参考文献[73]分别研究了带有输入时滞的线性离散时变系统和连续时变系统的控制问题,将状态反馈问题转化为标准的 LQR (Linear Quadratic Regulator, 线性二次型调节器)问题,通过重组观测,提出了时变系统基于 Krein 空间理论的控制器设计方法,采用这种方法得到的控制器不但包含了状态反馈项,还包含了时滞部分的输入积分项。

经过几十年的不断发展和完善,与时变系统相关的理论方法正在不断地涌现、成熟和普及,进一步丰富了自适应控制、鲁棒控制、迭代学习等控制方法的内容。

1.2 预见控制的研究概述

预见控制的概念最初是由美国学者 Thomas B. Sheridan 在 19 世纪 60 年代提出的,他将预见控制的研究成果应用于三个实例(行驶中的汽车、盲人电子障碍探测仪、远程终端控制)^[1],取得了良好的控制效果,验证了预见控制技术较其他控制方法具备更好的目标跟踪性能,但受限于当时控制理论的发展,并没有引起控制界的重视。虽然美国学者提出了预见控制的概念,但与预见控制相关的理论研究却是首先在日本学者之间开展的, Masayoshi Tomizuka(富塚诚义,现为美国加州大学伯克利分校教授)从 1973 年起开始研究预见控制。1984 年,日本北海道大学的土谷武士教授开始在预见控制理论方向指导博士生,他与他的第一位博士生江上正一起,在 1992 年出版了预见控制理论的第一部专著,也是迄今为止唯一的一部关于预见控制理论的专著《デジタル予見制御》。此书后来由廖福成教授在 1994 年译为中文^[74],并由北京科学技术出版社出版,在书中,廖福成首次把“予見制御”的中文译名定为“预见控制”,自此预见控制的概念及研究理论才被引入中国。土谷武士的研究小组在北海道大学开展预见控制研究的同时,日本京都大学的片山彻教授在 1985 年和 1987 年分别发表了两篇论文,讨论了线性离散

时间系统和线性连续时间系统的预见控制问题。至此,与预见控制相关的研究才在学术界广泛开展起来。

1.2.1 预见控制的提出背景

在自动控制领域中,存在一大类伺服问题^[75,76],这类系统需要输出信号紧紧地跟踪输入信号而变化,这种情况在实际生产中非常普遍^[77,78]。为了提高这种控制系统的性能,例如要尽快地跟踪目标信号的变化,从直观上就需要对被控对象施加一个大而强烈的作用力,以使其快速动作。这就不仅要求输入很大的控制能量,而且还需要有很高性能的驱动装置(调节器)。但在实际的工业生产中,出于经济效益方面的考虑,上述的想法不可能无限制地实施下去,这就要求工程师们尽量用较少的控制能量、较经济的驱动装置,来产生较好的控制效果。

汽车驾驶就是这样一个例子^[79-81]:行驶在路面的汽车就相当于一个伺服系统(汽车驾驶员需要根据前方道路的变化来调整汽车的行驶方向,并始终保持汽车在跑道以内)。若汽车的引擎能量和刹车性能都是无限大,则即使汽车在驶入U形弯道前不减速也不会冲出跑道,然而各种汽车的性能总有一个界限,所以在驶上弯道前总要适当减速以保证曲线运动的顺利进行。从另一个角度来说,司机必须观察前方的驾驶汽车,根据不同的道路状况决定汽车的行驶速度。这些驾驶汽车的经验(实际上是对汽车的控制)就是在充分利用汽车资源的基础上,对汽车施加适当的控制来达到快速、安全行驶的目的。我们可以看出汽车驾驶经验在不知不觉中利用了未来路面的信息,通过预先调整汽车的速度来降低对汽车性能的过高要求。

通常情况下,伺服系统不利用未来信息,仅使用当前信息进行反馈控制来跟踪目标,并克服干扰的影响。但在许多伺服系统中,一些未来的目标信号或者干扰信号是预先知道的,如机电领域中一些包含线性直流无刷电机、机器人机械手、机床等设备的装置有不少都事先给出了未来的目标信号或者干扰信号。我们自然就想到能否将这些已知的未来信息加以利用来改善系统的控制性能或提高系统的跟踪精度。

预见控制最初的想法就是不仅注意控制系统过去及现在的目标值,而