

模型跟踪控制系统设计

王大中 吴淑晶 著



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

模型跟踪控制系统设计

王大中 吴淑晶 著



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

图书在版编目(CIP)数据

模型跟踪控制系统设计/王大中,吴淑晶著. —上海:华东理工大学出版社,2016.6

ISBN 978-7-5628-4703-8

I. ①模… II. ①王… ②吴… III. ①模型跟踪—控制系统设计 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 132642 号

策划编辑 / 周永斌

责任编辑 / 徐知今

装帧设计 / 赵 军

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地 址: 上海市梅陇路 130 号,200237

电 话: 021-64250306

网 址: www.ecustpress.cn

邮 箱: zongbianban@ecustpress.cn

印 刷 / 江苏凤凰数码印务有限公司

开 本 / 710 mm×1000 mm 1/16

印 张 / 8.5

字 数 / 155 千字

版 次 / 2016 年 6 月第 1 版

印 次 / 2016 年 6 月第 1 次

定 价 / 38.00 元

版权所有 侵权必究

前言

PREFACE

模型跟踪控制是控制理论研究的一个重要领域,它在理论和实践上与许多控制问题有较强的通融性,依据模型设定的不同模型跟踪控制可以转换成调节器、伺服系统、观测器、极点配置等设计问题。现代控制理论是基于状态空间模型的反馈控制,由于状态包含了系统最丰富的信息,为使闭环系统达到期望的性能,要尽可能采用状态反馈控制。对于诸如不确定时滞等系统,一方面并不是所有状态都能够测量到,另一方面,可能有些状态可以通过一定的方法测量,却要付出高额的代价,一个取代状态反馈的可行方案就是模型跟踪控制。模型跟踪控制方法应用于系统状态预测控制的设计,能够解决系统设计的保守性、保持系统的稳定性、降低系统的不确定性、增强系统的控制精度等关键技术问题,突显其研究的理论价值和实际意义。

本书综合作者多年来模型跟踪控制理论研究的成果,借鉴本领域大量国内外文献资料,系统阐述了近年来作者在该领域的最新研究成果。全书共有 8 章:第 1 章是绪论,主要考察控制系统设计的基本要求,阐述本书理论研究的基本问题;第 2 章进行中立型时滞系统模型跟踪控制设计;第 3 章研究时滞模型跟踪控制系统的状态预测控制设计问题;第 4 章针对广义离散时间线性时滞系统模型跟踪控制设计研究,第 5 章对 T-S 广义模型跟踪控制系统模糊控制设计开展探讨;第 6 章针对时滞网络拥塞模型跟踪状态预测控制系统进行设计;第 7 章对时滞 LPV 铣削系统模型跟踪颤振控制设计问题开展探讨;第 8 章将模型跟踪控制理论应用于机械手控制设计。

本书得到国内外同仁的大力支持。感谢我的导师日本山形大学大久保重范教授、秋山孝夫副教授,上海交通大学朱向阳教授和唐厚君教授,哈尔滨工业大学吴爱国教授,日本山形大学李鹿辉教授等给予的大力帮助。感谢上海工程技术大学学术专著出版基金资助,使本书得以出版。

本书内容翔实,具有学术参考价值。可作为控制科学与工程及其相关专业的研究生的教材或参考书使用,也可供自动控制以及相关领域的广大工程技术人员和科技工作者自学和参考。因时间仓促,错误之处请同行给予批评指正。

著 者

2016 年 6 月



目 录

CONTENTS

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 模型跟踪控制研究现状	1
1.3 线性时滞系统	4
1.3.1 时滞要素	4
1.3.2 时滞的近似问题	5
1.3.3 时滞系统	6
1.4 时滞系统的稳定性	7
1.4.1 时滞相关与时滞无关	7
1.4.2 李雅普诺夫稳定性理论	8
1.5 基于状态空间法的时滞补偿	9
1.5.1 史密斯预估控制	9
1.5.2 输入时滞系统	10
1.5.3 输出时滞系统	11
参考文献	12
2 中立型时滞系统模型跟踪控制系统设计	16
2.1 引言	16
2.2 中立型时滞系统的基本问题	17
2.2.1 特征方程	17
2.2.2 一般时滞中立型系统	17
2.2.3 时变时滞中立型系统	19
2.3 中立型时滞系统模型跟踪控制器设计	20
2.3.1 问题描述	20
2.3.2 中立型时滞系统模型跟踪控制器设计	20
2.3.3 系统内部有界性证明	27
2.4 仿真研究	30
2.5 小结	32

参考文献	32
3 时滞模型跟踪控制系统状态预测控制系统设计	35
3.1 引言	35
3.2 状态预测控制基本原理	36
3.2.1 预测控制的基本原理	36
3.2.2 预测控制系统的性能分析	37
3.3 时滞模型跟踪控制系统状态预测控制器设计	39
3.3.1 问题描述	39
3.3.2 状态预测控制系统	39
3.3.3 状态预测系统控制器的设计	40
3.3.4 系统内部有界性证明	42
3.4 仿真研究	45
3.5 小结	47
参考文献	47
4 广义离散时间线性时滞系统模型跟踪控制系统设计	51
4.1 引言	51
4.2 线性离散时间系统	53
4.2.1 安定性	53
4.2.2 能控制性与能观测性	54
4.2.3 标准型	55
4.2.4 极与零点	56
4.3 非时滞系统离散时间化	58
4.4 时滞系统离散时间化	59
4.5 广义离散时间控制系统的模型跟踪控制设计	61
4.5.1 问题描述	62
4.5.2 广义离散时间控制系统模型跟踪控制器设计	62
4.5.3 系统内部有界性证明	64
4.6 仿真研究	69
4.7 小结	70
参考文献	70
5 T-S 广义模型跟踪控制系统模糊控制系统设计	74
5.1 引言	74
5.2 T-S 模糊控制李雅普诺夫稳定性理论	76



5.2.1	T-S 模糊控制系统模型	76
5.2.2	T-S 模糊控制李雅普诺夫稳定性理论	76
5.3	T-S 广义模型跟踪控制系统模糊控制设计	77
5.3.1	问题描述	77
5.3.2	T-S 广义模型跟踪控制系统模糊控制器设计	79
5.3.3	系统内部有界性证明	81
5.4	仿真研究	82
5.5	小结	85
	参考文献	85
6	时滞网络拥塞模型跟踪状态预测控制系统设计	89
6.1	引言	89
6.2	网络拥塞控制	90
6.2.1	网络拥塞	90
6.2.2	网络拥塞控制	91
6.3	时滞模型跟踪状态预测控制系统设计	92
6.3.1	问题描述	92
6.3.2	状态预测时滞控制系统	92
6.3.3	时滞模型跟踪状态预测控制器设计	93
6.3.4	系统内部有界性证明	95
6.3.5	仿真研究	96
6.4	时滞网络拥塞模型跟踪状态预测控制	97
6.4.1	问题描述	97
6.4.2	仿真研究	98
6.5	小结	99
	参考文献	100
7	时滞 LPV 铣削系统模型跟踪颤振抑制控制系统设计	103
7.1	引言	103
7.2	一般时滞模型跟踪控制系统	104
7.2.1	一般控制系统设计	104
7.2.2	系统内部有界性证明	106
7.3	时滞 LPV 铣削过程的颤振抑制控制设计	108
7.3.1	时滞 LPV 铣削系统	108
7.3.2	时滞 LPV 系统状态空间	109
7.4	时滞 LPV 系统仿真与实验研究	109

7.4.1	仿真研究	109
7.4.2	实验研究	110
7.5	小结	111
	参考文献	112
8	机械手模型跟踪控制系统的控制系统设计	115
8.1	引言	115
8.2	机械手运动方程	116
8.2.1	系统坐标	116
8.2.2	动能和势能	117
8.2.3	运动方程	118
8.3	机械手系统的模型跟踪控制设计	119
8.3.1	运动方程式的建立	119
8.3.2	机械手的模型跟踪控制系统控制器设计	120
8.3.3	系统内部有界性证明	121
8.4	仿真研究	123
8.5	小结	124
	参考文献	124



1 绪 论

1.1 引 言

模型跟踪控制系统(Model Following Control System, MFCS)是控制理论研究的重要领域之一,根据不同的模型设定,MFCS 可以变换成调节器、伺服系统、观测器、极点配置等设计问题。模型跟踪控制不仅在理论上与诸多控制问题有较强的通融性,在工程实际中诸如化学工程、航空航天、汽车工程、机器人控制等方面也得到了广泛的应用。诸如时滞等影响因素广泛存在于控制系统中,导致系统的控制不理想,甚至不稳定。因此,分析这些影响因素对系统动力学行为的影响,以及如何利用或消除这种影响具有理论和实际上的重要意义。

系统不确定性按其结构可以分为结构化不确定性和非结构化不确定性,对不确定时滞系统控制问题的研究,是控制理论研究在深度和广度上的拓展,其复杂性体现在系统及其外部环境含有许多未知和不确定因素,具有较大的随机干扰性。与此相关联,现代控制理论是基于状态空间模型的反馈控制,由于状态包含了系统最丰富的信息,为使闭环系统达到期望的性能,要尽可能采用状态反馈控制。对于不确定时滞系统,一方面并不是所有状态都能够测量得到,另一方面,可能有些状态可以通过一定的方法测量,却要付出高额的代价,这时一个取代状态反馈的可行方案就是模型跟踪控制。不确定时滞或非线性等因素致使控制问题变得比较复杂,因此在设计时引入了一些结构限制,这样也导致了设计的保守性,所以有待寻找更好的设计方案。模型跟踪控制在考虑实际系统与数学模型之间的偏差时,重点是如何保证系统的稳定性,李雅普诺夫稳定性理论被认为是解决这一问题的有效方法,但在含有非线性时滞模型跟踪控制的理论与实践,李雅普诺夫稳定性理论显得复杂,这是本书所关注的焦点之一。鉴于本书所提出的模型跟踪控制理论方法,应用于不确定时滞系统设计,能解决系统设计的保守性、保持系统的稳定性、降低系统不确定性,以及增强系统控制精度等关键技术问题,具有其重要的理论和实际意义。

1.2 模型跟踪控制研究现状

模型跟踪控制研究领域,文献[1]引入了微分因子和外扰多项式,使控制系

统的设计得以简化,实现了系统模型跟踪控制。文献[2]在文献[1]的基础上,立足于不变零点安定性,将模型跟踪控制理论引入至广义非线性系统控制中。在已有研究中,证明控制系统内部状态稳定性时,对被控制对象进行坐标变换^[3],而在设计控制法则时不施加坐标变换,这时控制系统物理结构得以保存,同时将被控对象设定成线性部分和非线性部分,提出了一种广义非线性系统模型跟踪控制的新方法^[4],给出了非线性代数约束方程中包含控制输入时闭环系统具有唯一解的条件,证明了当非线性项满足范数条件以及相关的传递函数满足正实条件时,闭环系统的所有变量都是有界的。文献[5]则在线性时滞系统的状态预测方面做了有益探索,有效消除时滞对系统的负面影响。在时滞系统的状态预测方面,引入了模型跟踪控制方法^[6],有效运用到网络拥塞控制中,实现了网络拥塞模型跟踪控制。文献[7]讨论广义线性系统的模型跟踪控制问题,提出了一种新的设计方法,证明了这种设计方法的状态变量都是有界的,并给出一个实际电路的仿真结果来证实这种设计方法的有效性。文献[8]提出了一种不确定时滞系统控制器的设计方法,开发了非线性切换控制器技术,实现了不确定系统的模型跟踪控制。凡此,对模型跟踪控制系统的研究,为该理论的发展注入了新鲜血液,为模型跟踪控制理论向纵深发展奠定了基础,由于时滞、非线性等因素的影响,也为模型跟踪控制理论的研究带来挑战。

时滞系统控制问题得到了许多学者的关注,经典的 Smith 预估器^[9]是针对单输入、单输出系统设计的,多年来针对 Smith 预估器,科学家们提出了许多改善方案^[10],但都局限于解决 Smith 预估器的某一方面的缺陷,还不够完美。Garcia 与 Morari 等人从 Brosilow 推断 Smith 预估器受到启发,发展了内模控制(IMC)^[11],但 IMC 应用到实际系统上,实验研究的响应曲线不如理论仿真,但相同条件下均比 PID 控制得好^[12]。自从李雅普诺夫泛函引入时滞系统的分析设计以来^[13],李雅普诺夫方法已成为处理时滞系统的有力武器。通过构造恰当的李雅普诺夫函数求解时滞系统的无记忆反馈控制律,找到了时变及不确定时滞系统鲁棒二次镇定的判据。文献[14]利用李雅普诺夫第二方法推导出单状态之后系统的稳定性条件,但其中的推理还不够完善。文献[15]针对线性不确定时变时滞系统稳定问题,采用线性无记忆状态反馈控制器,结果表明,无时滞线性不确定系统的二次稳定条件,也是这些时滞系统稳定的充分条件。因此,允许线性不确定时滞系统稳定性的不确定条件,能够延伸至无时滞的二次稳定性,而稳定条件是没有被现有的时变时滞而退化,这引起了控制理论界的高度重视。

线性不确定时滞系统研究方面,文献[16]针对 H_∞ 控制,基于李雅普诺夫-克拉索夫斯基方法,运用线性矩阵不等式(LMI)提出了稳定性条件。时滞系统



的时滞相关稳定性分析与设计方面,文献[17—18]分别对基于 LMI 的不确定时滞系统的鲁棒控制、线性多时滞系统的稳定性分析、时滞 LPV 系统的稳定性等方面进行了论述。MATLAB LMI 工具箱的问世,为解决矩阵变量运算提供了便利条件,并取得了控制器的增益矩阵,鉴于 LMI 的优良性质以及数学规划及解法的突破,LMI 在不确定时滞系统的研究方面成为研究热点,稳定问题转化为求解 LMI 的问题,文献[19]针对时滞鲁棒 H_∞ 和不确定马尔可夫跳动奇异时滞系统的问题进行了深入研究,文献[20]则找到了不确定时滞系统的观测控制器的设计方法。

系统存在不确定性时,一种经常处理的经典方法是,在系统建模过程中把一些不确定因素,如非线性、参数变化以及未知的外部激励等处理为未知输入或干扰。这种处理方式又称为未知输入观测器设计。未知输入观测器有两种流行的处理方式,一种是未知输入解耦或干扰解耦,目的是使所设计的观测器对任意的未知输入都能渐近估计系统的状态或状态的函数^[21],另一种处理方法就是设计能同时估计状态和未知输入的观测器。对于干扰解耦观测器的设计已做了大量的工作。文献[22]采用矩阵的广义逆导出了渐近未知输入观测器的存在条件。文献[23]和[24]对具有未知输入的离散线性系统考虑状态观测器。其中,文献[23]中的观测器是全维的,且给出观测器存在的代数条件和构造性的设计过程,文献[24]则提出了能估计系统部分状态的时滞观测器的设计方法。在该设计过程中时滞也可以作为一个设计参数,从而增大了状态估计的可行性。在参数化研究及观测器设计方面,文献[25]提出的广义矩阵方程的显式参数化解,文献[26]考虑了干扰解耦观测器的设计,同时考虑状态的标量函数的降阶观测器设计方法,并且给出了这类观测器存在的充分必要条件。文献[27]基于正交变换下的压缩标准型在矩阵束的框架下考虑干扰解耦观测器设计问题。对于未知输入估计所得到的结果相对较少。文献[28]采用广义系统理论及简单的代数变换给出输入估计观测器的设计方法。文献[29]采用基于正交变换的矩阵束分解方法给出了未知输入估计的设计方案。文献[28]和[29]设计的输入观测器的共同特征就是含有系统输出的导数,因而对干扰是敏感的。

实际系统对稳定性和精确性的要求越来越高,文献[30]研究了一类不确定非线性时滞系统的鲁棒可靠性随机控制问题,针对影响系统不稳定性的随机指数、状态时滞、参数不确定性和未知非线性扰动等问题进行了分析。文献[31]对不确定时变时滞系统的鲁棒 H_∞ 控制问题进行阐述,设计了鲁棒跟踪控制器,文献[32]实现了一类不确定大时滞系统分散鲁棒跟踪控制,可以保证时滞系统的输出信号与参考模型输出信号的跟踪误差趋近为零。关于这方面表述的文

献非常多,但很少有研究者考虑降低系统的保守性与精确性的兼顾设计问题。

纵观模型不确定性系统的鲁棒观测器的设计方法,文献[33]针对闭环系统的抗干扰能力提出一些定量的指标,如为表征暂态性能对初始条件的敏感性,给出了观测器的增益矩阵 2-范数条件数指标,为表示对系统矩阵摄动的敏感性,给出了观测器的矩阵特征向量矩阵 2-范数条件数指标等。文献[34]考虑系统带有随机不确定性时的鲁棒观测器设计,并建立了基于 LMI 的多目标设计方法。从文献[33]和文献[34]提出的指标可以看出,两篇文献提出的方法只适合系统矩阵受到微小摄动的情形,使用范围相当有限。文献[35]试图对具有范数有界不确定的系统设计鲁棒观测器。其观测器形式是在名义系统的全维状态观测器加一个修正项,而这个修正项通过输出误差和估计状态在线调节。该文指出,只要修正项中的正定矩阵满足一个代数 Riccati 方程,则所设计的观测器就能渐近地估计出系统状态。应该说该设计思路给鲁棒观测器设计注入了新鲜的血液。

目前,状态反馈控制和实现状态反馈控制的观测器是完全分开来设计的。虽然这样设计出来的直接状态反馈系统能有某种最优的性能和低敏感性,但是在绝大多数情况下,带有实现这一最优状态反馈控制的观测器的反馈系统却没有同样的低敏感性。现存方法还没有将状态反馈同实现它的模型跟踪控制结合起来设计,由于不确定性的存在,目前还没有任何一个物理系统可以用准确的数学模型来表达。这样基于不精确数学模型得到的控制器会使系统行为不符合要求,甚至与用精确数学模型设计的控制器行为完全不同。模型跟踪控制方法对不确定时滞系统提供了一套有效的控制策略,从实际应用的角度出发,将鲁棒控制方法与模型跟踪反馈控制结合起来,是处理这些不确定性,从而使系统动态性能不受影响的切实可行的措施之一。由于对实际系统的稳定性和可靠性的要求越来越高,模型跟踪控制日益受到研究者的广泛关注。

1.3 线性时滞系统

1.3.1 时滞要素

控制系统中有一处或几处的信号传递有时间延迟,如蒸气和流体在管道中的流动、电信号在长线上的传递等都有时间延迟。含有这类元件的系统都是时滞系统,对于一个具体的控制系统,时滞可能由测量元件或测量过程造成,也可能由控制元件和执行元件造成,或者由它们共同造成。控制系统中时滞是普遍存在的,只有大小不同。如图 1-1 所示的带式输送机,若输送机 1 端改变输入

流量 $f(t)$, 在 2 端的输出量 $y(t)$ 对输入量滞后一段时间 h 后, $y(t)$ 才发生变化。如皮带的运动速度为 v , 时滞时间为 $h = m/v$, 输出量与输入量的关系为

$$y(t) = f(t - h) \quad (1-1)$$

对式(1-1)进行拉普拉斯变换, 传递函数 $W(s)$ 为

$$W(s) = Y(s)/F(s) = e^{-hs} \quad (1-2)$$

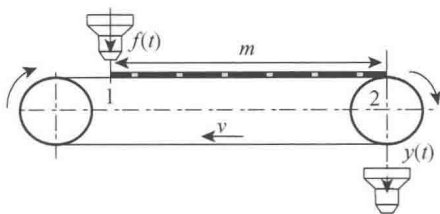


图 1-1 带式输送机时滞环节

e^{-hs} 没有引入新的零点或极点, 不会引起原有系统的幅频特性曲线的改变, 只会导致一个附加的位移(见图 1-2)。

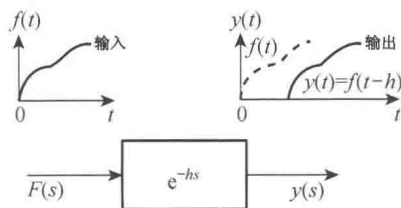


图 1-2 时滞环节结构框图

1.3.2 时滞的近似问题

时滞环节的 e^{-hs} 近似可用帕德(Padé)近似方法, 其利用了函数 e^{-hs} 的幂级数展开式, 并指定一个给定阶次的待定有理函数来近似 e^{-hs} , 并考虑该有理函数的幂级数展开式的系数与 e^{-hs} 的幂级数展开式的系数尽可能多地匹配。

利用麦克劳林(Maclaurin)级数 $f(t) = f(0) + \frac{t}{1!}f'(0) + \frac{t^2}{2!}f''(0) + \dots$, 于是有

$$e^{-hs} = 1 - hs + \frac{(hs)^2}{2!} - \frac{(hs)^3}{3!} + \dots \quad (1-3)$$

以及

$$\frac{n_1 s + n_0}{d_1 s + d_0} = \frac{n_0}{d_0} + \left(\frac{d_0 n_1 - n_0 d_1}{d_0^2} \right) s + \left(\frac{d_1^2 n_0}{d_0^3} - \frac{d_1 n_1}{d_0^2} \right) s^2 + \dots \quad (1-4)$$

令

$$\frac{n_0}{d_0} = 1, \quad \frac{n_1}{d_0} - \frac{n_0 d_1}{d_0^2} = -\tau, \quad \frac{d_1^2 n_0}{d_0^3} - \frac{d_1 n_1}{d_0^2} = \frac{\tau^2}{2}, \dots$$

解得: $n_0 = d_0$, $d_1 = d_0 \tau / 2$, $n_1 = -d_0 \tau / 2$ 。令 $d_0 = 1$, 得

$$e^{-hs} \approx \frac{n_1 s + n_0}{d_1 s + d_0} = \frac{1 - hs/2}{1 + hs/2} \quad (1-5)$$

式(1-5)的级数展开式为

$$e^{-hs} \approx \frac{n_1 s + n_0}{d_1 s + d_0} = \frac{1 - hs/2}{1 + hs/2} = 1 - hs + \frac{(hs)^2}{2} - \frac{(hs)^3}{4} + \dots \quad (1-6)$$

对比式(1-3)和式(1-6), 两个方程式的前三项是相同的, 故对于较小的 h 一阶帕德(Padé)近似是比较准确的。其他的近似方法还有拉盖尔(Laguerre)近似

$$e^{-hs} \approx \left(\frac{1 - hs/2n}{1 + hs/2n} \right)^n \quad (1-7)$$

以及高立希(Kautz)近似

$$e^{-hs} \approx \left(\frac{1 - hs/2n + h^2 s^2 / 8n^2}{1 + hs/2n + h^2 s^2 / 8n^2} \right)^n \quad (1-8)$$

1.3.3 时滞系统

典型的时滞系统包括输入时滞系统、状态时滞系统、中立型时滞系统和离散型时滞系统。

(1) 输入时滞系统

输入时滞系统表述如下:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t-h) \quad (1-9)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (1-10)$$

式(1-9)和式(1-10)的传递函数为:

$$Y(s)/U(s) = G(s)e^{-hs} \quad (1-11)$$

式中, $G(s) = C[sI - A]^{-1}B$ 。



式(1-9)的特征方程式是

$$\det[sI - A]e^{-hs} = 0 \quad (1-12)$$

(2) 状态时滞系统

状态时滞系统表述如下:

$$\dot{x}(t) = A_0 x(t) + A_1 x(t-h) + Bu(t) \quad (1-13)$$

系统的特征方程式是

$$\det[sI - A_0 - A_1 e^{-hs}] = 0 \quad (1-14)$$

(3) 中立型时滞系统

中立型时滞系统表述如下:

$$\dot{x}(t) = A_0 x(t) + A_1 x(t-h_1) + A_2 \dot{x}(t-h_2) + Bu(t) \quad (1-15)$$

(4) 离散型时滞系统

离散型时滞系统由下面的差分方程式表述:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k-h_k) \quad (1-16)$$

1.4 时滞系统的稳定性

轧机速度控制系统、炉温控制系统、皮带传输系统等都存在时滞,时滞给系统的控制带来难度。故此,对时滞问题进行深入研究具有重要的意义,近年来取得了一系列成果^[36-37]。稳定性分析和网络控制^[38-39]方面,特别是时滞^[40-42]稳定性和稳定条件越来越引起科学家的重视。

1.4.1 时滞相关与时滞无关

(1) 时滞线性控制系统

考虑如下时滞线性控制系统:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Dx(t-h) \quad (1-17)$$

$$x(\xi) = \Phi(\xi) \quad \xi \in [-h, 0] \quad (1-18)$$

式中, $x(t) \in R^n$ 是系统状态, $A \in R^{n \times n}$ 和 $D \in R^{n \times n}$ 是定数行列式, h 是时滞。

(2) 时滞无关的稳定性判别条件

式(1-17)中,时滞 h 未知,若与时滞 h 无关,只通过 A 和 D 进行时滞系统

稳定性判别更方便, 这样的解析法称为时滞无关稳定性判别。

【定理 1-1】 若满足下面的 LMI 条件的正定对称行列式 P 和 Q 存在, 则控制系统式(1-17)渐进稳定^[43]:

$$\begin{bmatrix} PA + A^T P + Q & PD \\ D^T P & -Q \end{bmatrix} < 0 \quad (1-19)$$

(3) 时滞相关的稳定性判别条件

【定理 1-2】 若控制系统式(1-17)中, 行列式 $A + D$ 的固有值在复数左半平面。取 $\bar{h} > 0$, 若满足 LMI 的正定对称行列式 X 且 $0 < \beta < 1$ 存在, τ 满足于 $0 \leq h \leq \bar{h}$, 控制系统渐进稳定^[44]:

$$\begin{bmatrix} X(A+D)^T + (A+D)X + \bar{h}DD^T & \bar{h}XA^T & \bar{h}XD^T \\ \bar{h}AX & -\bar{h}\beta I & 0 \\ \bar{h}DX & 0 & -\bar{h}(1-\beta)I \end{bmatrix} < 0 \quad (1-20)$$

1.4.2 李雅普诺夫稳定性理论

考虑控制系统:

$$\dot{x}(t) = A_0 x(t) + A_1 x(t-h) \quad (1-21)$$

任意连续初期函数 Φ 对应的 $(x(0), x(\beta)) = (\Phi(0), \Phi)$, $-\tau \leq \beta \leq 0$ 唯一解。

【定理 1-3】 对于 $\omega_i(r)$, 当 $r > 0$ 时, 取连续非减函数: $\omega_i(0) = 0$, $\omega_i(r) > 0$, $\omega_i(r) \rightarrow \infty$, $r \rightarrow \infty$ 。如果满足下面关系的连续函数 $V(t, \Phi)$ 存在, 式(1-21)所在系统原点渐进稳定。

$$\omega_1(|\Phi(0)|) \leq V(t, \Phi) \leq \omega_2(\|\Phi\|) \quad (1-22)$$

$$V(t, \Phi) \leq -\omega_3(|\Phi(0)|) \quad (1-23)$$

式中, 函数 $V(t, \Phi)$ 即李雅普诺夫函数, 具有代表性的是克拉索夫斯基形式:

$$V(t, x_t) = x^T(t)P_0 x(t) + \int_{-L}^0 x^T(t+\beta)P_1 x(t+\beta)d\beta \quad (1-24)$$

式中, $P_0 > 0$, $P_1 \geq 0$ 。



1.5 基于状态空间法的时滞补偿

1.5.1 史密斯预估控制

史密斯(Smith)提出了一种以模型为基础的预估补偿控制方法^[9],其核心思想是预先估计出过程在基本扰动作用下的动态响应,然后由预估器进行补偿,试图使被延迟的被控量超前反馈到控制器,使控制器提前动作,从而降低超调量,并加速调节过程。其预估控制原理如图 1-3 所示。

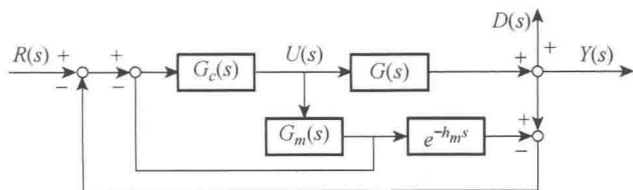


图 1-3 史密斯预估控制系统

不采用史密斯预估控制,控制器输出 $U(s)$ 到系统输出 $Y(s)$ 之间的传递函数为:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s) = G_p(s)e^{-hs} \quad (1-25)$$

采用史密斯预估控制,假设模型精确,即 $G_m(s)e^{-h_m s} = G_p(s)e^{-hs}$,则系统的闭环传递函数为:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p} e^{-hs} \quad (1-26)$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_p e^{-hs} (1 + G_c G_p - G_c G_p e^{-hs})}{1 + G_c G_p} \quad (1-27)$$

系统闭环特征方程已不再包含纯时滞环节 e^{-hs} ,表明采用史密斯预估控制可以消除时滞对控制系统的影响。闭环传递函数分子上的时滞项 e^{-hs} ,表示被控量的响应比设定值要滞后 h 时间,控制器的输出需要经过 h 时间后才起作用。影响史密斯预估控制策略的主要因素是过程模型的建立和精确度。史密斯预估控制是基于过程模型已知的情况建立的,实现史密斯预估补偿必须已知动态模型,且模型与实际过程有足够精确。对时滞较小的过程,采用史密斯预估控制效果也较好。对于大多数过程控制,过程模型只能近似地代表实际过程,用 G 和 h 表示实际过程,用 G_m 和 h_m 表示过程模型,则闭环特征方程为: