

马建伟 李银伢 著

# 满意PID控制设计 理论与方法



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

# 满意 PID 控制设计理论与方法

马建伟 李银伢 著

本书由河南科技大学学术著作出版基金资助出版

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书全面系统地阐述了满意 PID 控制的基本理论和设计方法,并介绍了目前国际上 PID 控制研究的最新进展。全书共 10 章,分为两大部分,第一部分从控制系统的时域分析角度重点阐述了多指标满意 PID 控制设计的理论与方法;第二部分从多项式频域分析角度重点介绍了多指标的相容性分析和满意 PID 控制器设计的参数空间图解方法。

本书可作为高等院校自动控制、工业自动化、电气自动化、仪表与测试、机械、动力、冶金等专业的参考用书,也可供控制系统设计工程师等相关工程技术人员阅读和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

满意 PID 控制设计理论与方法/马建伟,李银伢 著. 北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-019625-5

I. 满… II. ①马…②李… III. PID 控制-设计-研究 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 125579 号

责任编辑:姚庆爽 潘继敏 / 责任校对:曾 茹  
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.sciencecp.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007 年 8 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007 年 8 月第一次印刷 印张:14

印数:1—2 500 字数:265 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

## 前 言

现代控制理论与智能控制理论的快速发展,取得了一系列令人瞩目的成果,但在工程应用上并没有取得期望的进展。由于工业生产的特点是大批量和标准化,不同的系统在设计 and 运行时,其控制器的结构应该是相似的,只需改变控制器参数而不需要改变控制器的结构,PID 控制器显然满足工业化大生产的需求。PID 控制器的工程可实现性和在控制工程界的广泛应用,为控制理论和工程应用之间提供了一个最佳结合点。但是,有关研究结果表明,PID 控制在实际应用中也并未取得预期的效果,其中一个重要的原因就是 PID 控制器的参数整定不佳。在工业控制应用中,工程师在整定 PID 控制器参数时往往因循使用传统的 Ziegler 和 Nichols 方法,或者基于某些统计图表来确定 PID 控制器参数,一般难以达到期望的控制效果。对于具有多个性能指标要求的控制系统设计来说,更是一件费时费力的事情。最近十年,PID 控制重新受到控制理论界学者的广泛关注。国际著名学术刊物 *Control Engineering Practice* 和 *IEEE Control Systems Magazine* 分别于 2001 年和 2006 年出版了 PID 控制特辑。2000 年,IFAC 数字控制工作组在西班牙 Terrassa 举行了专题为“Past, Present and Future of PID Control”的 PID 控制学术会议。国际著名控制理论学者 Åström 教授指出,PID 控制器在未来的控制工程中仍将继续扮演重要的角色,同时将成为各种复杂控制器的基本单元。国内学者吴宏鑫院士从理论上论证了 PID 控制器广泛应用的理论依据并且指出,PID 控制器具有独特的优越性,它将成为复杂系统智能控制中最基本、最基础的一个子控制单元。

对实际的工程控制项目来说,PID 控制系统往往是复杂工程控制系统的一个最基本的子控制单元。对整个控制系统设计来说,人们所期望的指标是多方面的,所有指标都必须同时得到满足。因而对于子控制单元 PID 控制系统来说,人们期望的控制策略应是同时满足多个性能指标的尽可能大的解集,这样可以为后续整个控制系统乃至整个工程项目留有更大的设计余地。满意控制理论正是我们在兵器控制系统项目的研究过程中依据设计任务的需求而发展起来的一种实用型的控制理论,它的特点是,目标函数应是能同时满足的期望性能指标集、控制策略应是相容区域尽可能大的满意解集以及控制策略的求取应尽可能自动化。满意控制理论至少在两个方面突破了传统控制的思维模式:一是将目标函数由传统的取某种泛函的极值改为同时满足工程需要的多个性能指标构成的期望指标集;二是将传统的点迹控制拓展到动态空间区域(目的域)的控制。满意控制与 PID 控制的结

合,为解决实际 PID 控制系统设计、性能评估和参数整定开拓了一条实用化的新路。

本书是在作者多年来对 PID 控制和满意控制深入研究的基础之上撰写而成的,同时吸纳了国内外许多具有代表性的最新研究成果。撰写本书的主要目的是希望能为实际工程中多种期望指标约束的 PID 控制系统设计、性能分析和控制器参数整定提供一种可行的思路和方法。本书力求体现目前国内外 PID 控制研究的最新进展,注重理论联系实际,可以作为控制系统设计工程师、高校控制专业师生的阅读和参考用书。

本书分为两部分。第一部分由马建伟撰写,主要从控制系统的时域角度出发,运用状态空间分析法,研究融合多个性能指标的满意 PID 控制问题。其内容包括基于状态反馈的连续系统和离散系统的多指标满意 PID 控制问题,基于输出反馈的连续系统和离散系统的多指标满意 PID 控制问题,以及具有多指标约束的 PID 反馈的变结构控制问题,并给出了相应控制策略的求解方法。第二部分由李银伢撰写,主要从控制系统的多项式频域角度出发,运用参数图解分析方法,研究多性能指标约束下的线性定常系统、时滞系统和随机系统的满意 PID 控制问题,以及具有随机穿越特征量指标约束的满意 PID 控制问题,给出了上述三类系统在 PID 控制下期望指标集的相容性判别方法,以及期望指标集相容时整个控制策略集的参数空间图解求取方法。

本书得到了河南科技大学学术著作出版基金的资助,另外在编写本书的过程中参考了国内外众多学者的研究成果,作者在此一并表示诚挚的谢意!

由于水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请各位专家、学者和广大读者批评指正。

作 者

2007 年元月

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 满意控制理论及其发展现状	2
1.2 PID 控制理论及其发展现状	7
1.2.1 PID 控制的理论基础	7
1.2.2 PID 控制器的发展历程	8
1.2.3 PID 控制器设计方法概述	10
1.3 研究思路与主要内容	14
1.3.1 研究思路	14
1.3.2 主要内容	15

## 第一部分 满意 PID 控制的状态空间时域理论

第 2 章 连续系统状态反馈满意 PID 控制	17
2.1 引言	17
2.2 增广积分环节的构建	18
2.3 单指标约束控制	19
2.3.1 极点指标	19
2.3.2 方差指标	20
2.3.3 $H_2$ 指标	21
2.3.4 倒摆系统状态反馈 PID 控制	21
2.4 多指标约束控制	23
2.4.1 方差和幅值指标与衰减度指标相容	23
2.4.2 方差和幅值指标与圆形区域极点指标相容	24
2.4.3 衰减度指标与 $H_2/H_\infty$ 指标相容	25
2.4.4 圆形极点指标与 $H_2/H_\infty$ 指标相容	25
2.4.5 火炮稳定伺服系统状态反馈 PID 控制	26
2.5 二阶连续系统 PID 控制器的参数计算	27
2.6 自动装填系统中位置控制器设计	29

2.6.1	引言	29
2.6.2	满意控制器描述	30
2.6.3	切换控制器设计	31
2.6.4	误差控制器设计	31
2.6.5	仿真结果	33
2.6.6	结果验证	34
2.7	本章小结	35
<b>第 3 章</b>	<b>离散系统状态反馈满意 PID 控制</b>	<b>36</b>
3.1	引言	36
3.2	增广积分环节的构建	36
3.3	单指标约束控制	37
3.3.1	极点指标	37
3.3.2	方差指标	38
3.3.3	$H$ 指标	38
3.3.4	瞄准线控制系统 PID 控制器设计	39
3.4	多指标约束控制	41
3.4.1	方差与 $r$ -离散衰减度约束相容	41
3.4.2	$r$ -离散衰减度指标与 $H_2/H$ 指标相容	42
3.5	基于特征模型的 PID 控制器设计	42
3.5.1	问题描述	43
3.5.2	PID 控制器设计策略	44
3.5.3	数值算例	45
3.6	本章小结	46
<b>第 4 章</b>	<b>连续系统输出反馈 PID 控制</b>	<b>48</b>
4.1	引言	48
4.2	增广积分环节的构建	48
4.3	基于迭代算法的单指标约束控制	50
4.3.1	极点指标	50
4.3.2	方差指标	51
4.3.3	$H$ 指标	51
4.4	基于迭代算法的多指标约束控制	52
4.4.1	方差和幅值指标与衰减度指标相容	52
4.4.2	衰减度指标与 $H_2/H$ 指标相容	53
4.5	SISO 系统的 PID 控制器设计	53

---

4.5.1 控制器设计方法 .....	53
4.5.2 应用算例 .....	55
4.6 圆形极点约束 PID 控制多指标优化算法 .....	57
4.6.1 增广系统的构建 .....	57
4.6.2 控制器设计策略 .....	59
4.6.3 数值算例 .....	60
4.7 本章小结 .....	61
<b>第 5 章 离散系统输出反馈 PID 控制 .....</b>	<b>62</b>
5.1 引言 .....	62
5.2 增广积分环节的构建 .....	62
5.3 基于迭代 BMI 算法的单指标约束控制 .....	64
5.3.1 极点指标 .....	64
5.3.2 方差指标 .....	64
5.3.3 $H_\infty$ 指标 .....	65
5.4 基于迭代 BMI 算法的多指标约束控制 .....	67
5.4.1 方差和极点指标相容 .....	67
5.4.2 极点指标与 $H_2/H_\infty$ 指标相容 .....	67
5.5 目标仪采样频率的确定 .....	68
5.5.1 目标航迹的频谱分析 .....	68
5.5.2 预测误差分析 .....	69
5.5.3 漏测点分布规律分析 .....	71
5.5.4 结论 .....	73
5.6 本章小结 .....	73
<b>第 6 章 多指标约束变结构 PID 控制 .....</b>	<b>74</b>
6.1 引言 .....	74
6.2 极点和方差指标约束下的变结构控制 .....	75
6.2.1 问题描述 .....	75
6.2.2 控制器线性部分设计 .....	75
6.2.3 控制器非线性部分设计 .....	78
6.2.4 应用算例 .....	79
6.3 状态反馈变结构 PID 控制器设计 .....	80
6.3.1 增广系统的构建 .....	80
6.3.2 控制器设计策略 .....	81
6.3.3 数值算例 .....	83
6.4 本章小结 .....	85



## 第二部分 满意 PID 控制的多项式频域理论

<b>第 7 章 满意 PID 控制的理论框架及其数学描述</b> .....	86
7.1 引言 .....	86
7.2 PID 控制器的数学模型 .....	86
7.3 PID 控制的基本原理 .....	87
7.4 满意 PID 控制问题的归一化处理 .....	88
7.5 满意 PID 控制的理论框架及其数学描述 .....	90
7.5.1 满意 PID 控制的理论框架 .....	90
7.5.2 满意 PID 控制的数学描述 .....	95
7.6 基于参数空间图解分析法的满意 PID 控制 .....	96
7.6.1 满意 PID 控制的参数空间图解分析法 .....	96
7.6.2 满意解集的求取流程 .....	97
7.7 本章小结 .....	99
<b>第 8 章 期望指标集的界定及其相容性定义</b> .....	100
8.1 引言 .....	100
8.2 期望指标集的界定 .....	101
8.2.1 定常系统期望指标集的界定 .....	101
8.2.2 时滞系统期望指标集的界定 .....	106
8.2.3 随机系统期望指标集的界定 .....	107
8.3 期望指标集的相容性定义 .....	108
8.3.1 定常系统期望指标集的相容性定义 .....	108
8.3.2 时滞系统期望指标集的相容性定义 .....	109
8.3.3 随机系统期望指标集的相容性定义 .....	109
8.4 本章小结 .....	109
<b>第 9 章 期望指标集相容性分析及满意解集求取策略</b> .....	110
9.1 引言 .....	110
9.2 边界穿越定理与 $D$ -分割法思想 .....	110
9.2.1 边界穿越定理 .....	111
9.2.2 $D$ -分割法的基本思想 .....	112
9.2.3 $D$ -稳定性分析 .....	113
9.3 满足单项期望指标的 PID 控制器参数解集求取策略 .....	130
9.3.1 定常系统 PID 控制器参数解集求取策略 .....	130
9.3.2 时滞系统 PID 控制器参数解集求取策略 .....	146

9.3.3 随机系统 PID 控制器参数解集求取策略 .....	153
9.4 期望指标集相容性分析及满意解集求取策略 .....	156
9.4.1 定常系统期望指标集相容性分析及满意解集求取策略 .....	156
9.4.2 时滞系统期望指标集相容性分析及满意解集求取策略 .....	160
9.4.3 随机系统期望指标集相容性分析及满意解集求取策略 .....	164
9.5 满意滤波 PID 控制器设计策略 .....	167
9.6 满意 PID 控制器设计方法与其他方法的比较 .....	174
9.7 本章小结 .....	181
<b>第 10 章 待机控制特征量指标约束下的满意 PID 控制 .....</b>	<b>182</b>
10.1 引言 .....	182
10.2 待机控制的特征量指标及其术语 .....	183
10.3 待机控制的期望指标集及其命题 .....	184
10.4 PID 控制下待机控制期望指标集的相容性定义 .....	184
10.5 PID 控制下待机控制期望指标集的相容性分析 .....	185
10.5.1 矩形目的域约束下的待机控制期望指标集的相容性分析 .....	185
10.5.2 椭圆目的域约束下的待机控制期望指标集的相容性分析 .....	188
10.6 待机控制期望指标集约束下 PID 控制器满意解集的求取策略 .....	191
10.6.1 矩形目的域约束下的 PID 控制器满意解集求取策略 .....	191
10.6.2 椭圆目的域约束下的 PID 控制器满意解集求取策略 .....	192
10.7 数值算例 .....	192
10.7.1 矩形目的域约束下的满意待机 PID 控制问题 .....	192
10.7.2 椭圆目的域约束下的满意待机 PID 控制问题 .....	194
10.8 本章小结 .....	197
<b>参考文献 .....</b>	<b>198</b>

# 第 1 章 绪 论

比例积分微分(proportional integral derivative, PID)控制是迄今为止最通用、最基本的控制方法。大多数反馈回路用该方法或其较小的变形来控制。PID 调节器及其改进型是在工业控制中最常见的控制器<sup>[1]</sup>。尽管自 20 世纪初 PID 控制诞生以来,随着计算机技术和信息技术的飞速发展,控制理论与控制技术取得了令人瞩目的成就,一些先进控制策略不断推出,但 PID 控制器以其结构简单、对模型误差具有鲁棒性以及易于操作等特点,在大多数控制过程中能够获得令人满意的控制性能,且仍被广泛应用于冶金、化工、电力、轻工和机械等工业控制中<sup>[2]</sup>。吴宏鑫院士提出的“特征建模”理论<sup>[3,4]</sup>,第一次从理论上有力地论证了 PID 控制器广泛应用的理论依据,并且指出 PID 控制器具有独特的优越性,它将是复杂系统智能控制最基本、最基础的一个子控制单元<sup>[5]</sup>。

国外学者和机构对 PID 控制的应用状况及其性能进行了统计和评估。文献 [6] 的统计报告表明,在造纸工业过程控制中,有 98% 的控制环节采用的是比例积分(proportional integral, PI)控制器。Åström 和 Hägglund 于 1995 年再次出版的《PID 控制器:理论、设计及整定(第二版)》<sup>[7]</sup>一书中的统计表明,有超过 95% 的 PID 类型的控制器应用于过程控制领域中。Desborough 和 Miller 在 2002 年的一次统计报告中指出,目前在美国有超过 11 600 个具有 PID 控制器结构的调节器广泛应用于冶金、化工和造纸等 18 个工业控制领域中,有超过 97% 的反馈回路采用了 PID 控制算法<sup>[8]</sup>,甚至在一些复杂的控制律中,其基本控制层采用的仍然是 PID 控制算法<sup>[9]</sup>。然而不幸的是,只有将近 1/3 的 PID 控制器在实际应用过程中取得了令人满意的控制效果,有 2/3 的 PID 控制系统的控制性能达不到用户所期望的要求<sup>[8]</sup>。如此广泛应用的 PID 控制器给控制理论研究和控制理论实际应用带来了前所未有的机遇和挑战。

PID 控制最核心的问题就是如何整定 PID 控制器参数,使 PID 控制系统达到所期望的控制性能<sup>[10]</sup>。几十年来,众多国内外学者对 PID 控制器参数整定进行了深入研究,提出了各种不同的方法以确定合适的控制器参数。然而,传统的 PID 控制器设计方法至少在以下两方面有待进一步深入研究:一方面,经典的 PID 控制器整定方法往往带有“半经验”的色彩,首先根据经验公式或基于某些统计图表计算出控制器的初始参数,然后用试验加试凑的方法调试 PID 控制器参数以获得期望的控制性能。这类方法耗时长,且难以满足对系统的高性能、多指标要求。另一方面,对于多性能指标约束的 PID 控制器设计问题,国内外学者在设计 PID 控

制系统时,通常是在假定多个性能指标相容的条件下进行的,对 PID 控制系统期望指标集的相容性问题探讨的极少。归纳起来,PID 控制系统设计至少有以下三个方面的问题亟待解决:其一,实际的控制系统设计通常要满足多个性能指标,而各个性能指标之间又往往存在竞争关系。关于满足多个性能指标的 PID 控制器的存在性问题,国内外学者对这方面的研究极少,而 PID 控制器的存在性又是进行后续整个控制系统设计与实现的前提和基础。其二,PID 控制系统设计通常是某一工程设计项目的子项目,人们所期望的控制策略不是一个或有限个解,而是满足多个性能指标的尽可能大的满意解集<sup>[11]</sup>。这样可以为后续工程设计提供更大的自由度,如进一步考虑机构、能量、工艺条件以及安全性等方面的指标要求。其三,PID 控制器参数满意解集的求取最好能够由计算机自动完成,并提供可视化的人机交互界面,便于调试人员操作和直接面向要求表达其主观愿望,结合人与计算机各自的优势。

满意控制<sup>[12]</sup>思想及期望指标的相容性理论<sup>[13]</sup>是在工程实践的强烈需求下产生并不断发展起来的,它为解决控制系统设计中控制器的存在性问题和多指标约束问题提供了一种可行的思路和方法。本书结合作者的最新研究成果,给出一种基于满意控制思想的多性能指标约束下的满意 PID 控制器设计方法,旨在能为实际工程中 PID 控制系统性能分析和参数整定提供一种可行的思路和方法。

满意控制经过十多年的发展,在理论和工程中已经取得了许多成果。本章首先简要叙述满意控制理论及其发展现状,提出采用 PID 控制器是满意控制在工程上获得大量应用的途径之一,阐述了 PID 控制的发展历程和目前主要的研究成果,给出利用满意控制的理论和思想来设计 PID 控制器的研究思路和本书的主要研究内容。

## 1.1 满意控制理论及其发展现状

实际的工程控制系统设计所期望的控制策略不是使某一性能指标最优,而是使多个约束的性能指标同时得以满足,这是满意控制的核心思想之所在。满意控制所期望的解不再是简单地考虑单个性能指标约束下的唯一解,而是考虑融合多个约束性能指标下的多目标、多自由度约束的整个可行解集,以便为整个控制系统乃至整个控制决策过程提供尽可能大的自由度。

“满意控制”并不是一个全新的概念,它属于优化控制的范畴,之所以称为满意控制,是因为在控制中,更强调“满意”。1972年,日本学者 Mesarovic 和 Takahara 提出了“关于满意控制的定性理论”<sup>[14]</sup>,讨论了协同原则、满意控制和协同操作的选择问题。其性能函数和容忍函数映射为一个实数的值域集合,在某一个不确定的范围内,如果一个控制的属性函数小于或等于所给定的容忍函数,则认为该控制

是满意的。1978年诺贝尔奖获得者 Simon 从经济组织决策的角度提出了“令人满意准则”概念<sup>[15]</sup>，他认为，如果一个问题用“满意解”代替“最优解”，就会使复杂系统中的问题大大简化。

郭治教授及其学术梯队从协方差配置理论出发，采用不同于传统控制的随机现代控制理论的方法，研究和发展的融合多性能指标约束下随机系统的综合设计问题。它在两方面突破了现代控制理论的传统思维方式：一是追求切合实际工程上所需要的满足多项性能指标的、尽可能大的满意策略解集；二是将输出量的理想值由点迹扩展为动态区域，引入了随机穿越特征量这一新的性能指标系列，为现代控制理论的工程化开拓了一个崭新的领域。其主要内容是：对多指标相容的满意控制赋予了严谨的定义；归纳了它的期望指标集；建立了它的主要命题体系，即指标集的相容性分析、控制策略的求取技术；为具有目的域的随机控制系统创造了待机指标集；将待机指标纳入期望性能指标集，创建了满意待机控制，并将满意控制的理论与方法推广到估计、建模与模型简化中，建立了统一的系统的满意控制理论<sup>[11~13, 16~36]</sup>。其特点体现在以下四个方面：

(1) 被控量的理想值由传统的广义动点拓展为空间的目的域。由于目的域的出现，控制性能指标集中出现了新的成员——待机指标集。

(2) 目标函数由传统意义下的“某些泛函取极值”改为由多个实用的、包括待机指标的、以多项区域形式描述的期望指标集同时被满足，因而更适合控制工程实际需求。

(3) 不追求控制策略的唯一最优性而力求指标相容时，以解析法或收敛的迭代法得到尽可能大的控制策略集，为工程论证与设计提供更多的选择余地。

(4) 将满意控制、估计、建模与简化统一于一个理论框架中。

目前满意控制中的期望指标集包括：以极点分布区域表示的系统快速性指标；以动态误差系数表示的系统准确度指标；以稳态协方差（或稳态方差）表示的系统精确度指标，随机穿越频率和随机滞留时间特性指标；以  $H_{\infty}$  指标表示的系统输出对输入扰动量的抑制水平。在实际应用中，对那些能够反映系统性能的其他指标均可纳入满意控制的期望指标集中。满意控制的期望指标集是一个开放性的集合。一个实际控制系统的期望指标集，通常由上述类型的部分或全部指标组成。对于一个具体的系统控制而言，设计人员可从中选用若干能表征设计要求的那些指标作为实际控制的期望指标<sup>[13, 37~39]</sup>。

### 1. 快速性指标

线性系统的快速性决定于系统矩阵的极点分布位置，因而把闭环系统极点配置在一定的区域内能够保证被控系统满足期望的快速性（暂态）性能要求。故在满意控制中反应速度（暂态）指标，通常用某种极点分布区域，如圆形、去顶扇形等凸

形区域指标来表征。现代控制理论中的极点配置是其最基本的设计方法,其方法一般是把极点配置在某些点位置。

## 2. 精度指标

对于线性随机系统,其误差的随机部分通常用系统的稳态输出方差(或协方差)指标,即所谓的精确度来描述,而其误差的均值部分通常以动态误差系数,即所谓的准确度来体现。稳态(协)方差包括稳态状态(协)方差和稳态输出(协)方差两种。当描述系统的状态具有物理意义,且状态就是被控量时,精确度指标可用稳态状态(协)方差指标来刻画,而当描述系统的状态不再具有物理意义,系统的被控量又是输出量时,常采用稳态输出(协)方差来表征系统的稳态性能。最小方差控制和LQG控制是在随机控制发展中出现的方法。

## 3. 鲁棒性指标

现代控制理论的研究是建立在实际系统的精确数学模型上的。由于对实际系统的动态特性认识不全面,或出于研究方便对系统做了简化,或由于系统的元件老化,因而所建立的模型往往不能准确描述真实系统。在古典控制领域我们用稳定裕度表示系统对参数变化的鲁棒性。在状态空间表述的系统中,模型和真实系统之间的差异通常可用某类能量有界的外干扰信号和(或)系统矩阵中带有范数有界的结构参数扰动来刻画。因而系统的性能鲁棒性包括:① $H_{\infty}$ 鲁棒性(或称扰动鲁棒性),即控制系统对能量有界外干扰信号的抗干扰鲁棒性,它可以用从外干扰信号到被控输出的传递函数的 $H_{\infty}$ 范数界(即 $H_{\infty}$ 指标)来刻画。②结构鲁棒性,即系统对自身结构参数摄动的鲁棒性,如对指定极点分布区域的鲁棒性,对稳态方差约束的鲁棒性。

$H_{\infty}$ 控制的研究起源于灵敏度最小化<sup>[40]</sup>。为设计能够满足要求的 $H_{\infty}$ 控制,必须设计加权灵敏度矩阵和补灵敏度矩阵,但这两个矩阵的选择更多在于经验。

## 4. 随机穿越特征量指标

随机穿越特征量指标包括穿越频率、域内/域外平均滞留度及域内/域外平均滞留时间等。系统的被控量的期望值被定义成一个固定或可变的、静止或运动的多维闭或半闭区域,控制系统的任务就是将系统被控量尽快地引导到这个未来的多维区域中,并在其中滞留足够长的时间。根据该指标,正在发展出一种新的控制理论——待机控制<sup>[34,41]</sup>。

极点指标、协方差指标、 $H_{\infty}$ 指标表征设计者要求控制系统具有快速、准确和鲁棒性,如果一个控制系统能够达到这三个条件,应该是一个完美的系统。但从控制理论的角度看,这三个要求是矛盾的。如果快速,则系统比较灵敏,自然鲁棒性

差;如果准确,那么很难快速。控制器的设计是一个折中的过程,很大程度上依赖控制工程师的经验和反复多次的仿真和试验。

作为一种系统的、全新的随机控制系统理论,“满意控制”直接以多项区域形式表示的期望性能指标为目标函数,使被控系统同时满足所有期望性能指标。从上面的分析可看出,在火力控制工程设计中,大量的实际问题的性能指标通常并不要求唯一的最优值,而是一个允许的指标范围。如果这样一个允许范围的交集非空,则说明这些性能指标是相容的。为保证满意控制的工程实用性,被选入的指标集合应充分体现用户对系统性能的要求,且物理意义明确,易于为工程技术人员掌握。为保证满意控制的策略存在,被选中的期望指标集中每一个指标相对于其最优值必须放宽为实用所允许的尺度。这样,相对于每一个指标都有一个解集,这些解集的交集不空的条件,即是期望指标集相容的条件。

满意控制采用不同于传统控制的随机现代控制理论的方法,研究和发展了融合多性能指标下的随机系统综合设计的问题。为保证满意策略可解,最初的主要研究方法是:将期望的  $H_2$  指标、区域极点、方差等多种指标约束融入某个修正代数 Lyapunov 方程或修正 Riccati 方程,从这种修正代数方程的正定解矩阵(通常称之为可配置矩阵)出发,利用矩阵分解和矩阵广义逆理论,导出满足所有期望性能指标的控制策略<sup>[37, 42~44]</sup>。然而随着期望指标的增加,寻找这样的修正 Lyapunov 方程或代数 Riccati 方程越来越困难,而且此类方程的约束大大限制了满意控制解集的广度。现在是利用线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)方法,将多个期望指标约束用多个线性矩阵不等式来描述,通过变量代换和矩阵运算,将相容指标的取值范围用 LMI 组约束的某个线性规划问题的解来刻画,从而将多指标的满意控制问题转化为 LMI 组约束的某个线性规划问题,利用已流行的 Matlab/LMI 计算软件求解此规划问题<sup>[13, 27, 30~33, 38, 45, 46]</sup>,为满意控制设计提供了一种新方法。

满意控制及其期望指标的相容性理论的研究内容包括:为满意控制中现有期望指标集在指定控制或估计结构形式下建立相容性理论,包括相容判据推导、相容区域分析以及在指标集相容时给出相应求解满意控制策略集的设计方法;为工程控制系统多种性能指标取值范围的设定,以及系统性能的合理优化提供理论依据或数值参考,为满意控制在工程控制中的应用奠定理论基础。目前,在线性系统的控制领域取得了较为丰富的研究成果,且已经用于指导某型号火控系统的滤波与控制设计。利用满意控制中的随机穿越特征量控制理论,首次以解析方法分析了我国某型主战坦克炮对其射击门的穿越频率与滞留度,其理论值与实际值的最大相对误差通过了国家靶场实测检验<sup>[47]</sup>。该理论虽然是属于随机控制的范畴,但由于线性稳定时不变系统的特征与输入信号的性质无关,完全可以将其理论拓展至常规的过程控制领域中。

有关理论研究连续获得了国家自然科学基金支持。1996年1月,它获得了“基于协方差特性的模型简化与控制”项目资助(国家自然科学基金:批准号69574014),其成果概括并命名为“满意建模、简化、估计与控制理论”。它以多项能充分表征系统实用性能的暂态、稳态、鲁棒、随机穿越等性能指标的期望界为目标函数,通过建立适当的、带修正量的代数 Riccati 方程来统一刻画目标函数;以矩阵广义逆和矩阵分解理论为工具,用统一的解析方法或数字方法,研究多项性能指标约束的模型简化与控制问题,对估计与控制问题求解满意控制与估计策略集,对建模与简化问题求解满意简化模型。它在两方面突破了现代控制理论的传统思维方式:其一,放弃最优的唯一解,追求工程上所需要的满足多项性能指标的、尽可能大的满意策略解集;其二,将输出量的理想值由点迹扩展为动态区域,引入了随机穿越特征量这一新的性能指标系列。本成果为现代控制理论的工程化开拓了一个新领域。满意控制理论的发展大体上经历了以下两个阶段:

第一阶段,在拓展协方差控制理论的基础上,利用矩阵分解及矩阵的广义逆理论取得的研究成果为满意控制理论的建立奠定了基础。这种方法是将多种约束融入单个方程,如文献[23]、[37]、[48]~[52]所述,在利用探索法求得一个可配置矩阵后(这一点在闭环控制系统阶次较低时也是容易做到的),可以得到一个相应的带适当自由度的控制策略集的解析表达式。根据其方法,对下述不同的领域进行了研究:多目标函数下随机控制理论的研究<sup>[37]</sup>,区域极点及方差约束下的航天器拦截控制<sup>[12]</sup>,区域极点约束下线性离散系统的鲁棒控制<sup>[43]</sup>,误差方差约束滤波器设计<sup>[48]</sup>,含方差指标约束的系统模型简化设计<sup>[50]</sup>,基于采样系统的协方差配置控制与估计<sup>[51]</sup>。关于 PI 控制器在输出方差及圆形极点配置约束下的设计也用该方法进行了研究<sup>[52]</sup>。

第二阶段,先将系统选定的各项期望指标用最好或尽可能好的方式表示,得到期望指标相容的条件,然后利用线性矩阵不等式 LMI 方法,得出相容期望指标的部分取值范围,最后将相容指标约束下的控制策略求解问题转化成一个 LMI 组的可行解问题,而这个 LMI 组确实有可行解,从而提供了一种满意控制设计的有效方法。这在指导工程系统性能指标的设定和系统性能的优化方面有直接作用<sup>[13,27,38]</sup>,如状态反馈中圆形极点与状态方差约束的相容性<sup>[27]</sup>,反馈控制系统多性能约束指标的相容性<sup>[32]</sup>,基于 LMI 的满意控制理论及其工程上的应用研究<sup>[53]</sup>,线性周期系统的满意控制与估计<sup>[54]</sup>,激光导向伺服系统中满意 PID 调节器的 LMI 设计<sup>[55]</sup>等。

2002年1月,该理论获得“满意控制中期望指标集的相容性理论”项目资助(国家自然科学基金:批准号60174028),就线性随机系统的期望指标集,利用 LMI 方法分析了在指定控制或估计结构下的相容性,研究了三类期望指标:区域极点、输出方差界及  $H_\infty$  指标的相容性。对于可配置的区域极点指标,分析了与之相容的  $H_\infty$  指标的取值范围,并对相容的区域极点指标和  $H_\infty$  指标分析了与它们相容



的输出方差上界指标的取值范围,给出了计算这些范围的 LMI 描述。这种思想和方法可以为工程控制系统多种性能指标取值范围的设定,以及系统性能的合理优化提供依据。对复杂背景下目标图像跟踪问题,在分析区域极点指标与滤波误差方差指标的相容性基础上,提出了一种基于 LMI 描述的满意滤波设计方法,仿真算例验证了该算法比传统 Kalman 滤波大为优越;提出了对一大类实际控制非常有用的待机控制思想,以牺牲部分控制时机来达到提高控制精度的目的。文中给出了跟踪窗位于矩形目标区域的滞留时间的定义、计算公式,以及跟踪窗不在矩形目标区域内而等待下次进入目标区域内等待时间(待机时间)的定义、计算公式,并将系统的快速反应指标与待机指标——滞留时间指标和待机时间指标作为控制策略设计的目标函数进行综合考虑,这样设计可以达到一个尽可能令人满意的结果。这种控制设计思想可以推广到一大类实际控制中,从而有望形成一个新的控制研究方向。在带期望性能指标的满意控制思想的推广应用上对周期系统的相关问题做了研究,研究了具有参数不确定性的线性周期系统的滤波设计问题,设计目标是对所有不确定性滤波系统渐近稳定且对有界外扰满足给定的  $H_\infty$  抑制水平。

直接输出反馈是控制领域的一个 NP-hard 问题,至今还没有有效方法来完美解决控制策略的求解问题,相应的多种满意指标的相容范围更是不可能完整给出。近来,随着双线性矩阵不等式(bilinear matrix inequality, BMI)约束优化问题的研究进展,结合迭代优化技术,可以给出相容指标的较好的部分范围,本书第一部分相关章节给出了这方面的研究进展和研究结果。由于多指标满意控制大都能用 BMI 刻画,数值仿真表明对 BMI 优化技术的研究有望更好地刻画相容指标的取值范围,以及相应满意控制或估计策略的求解。

## 1.2 PID 控制理论及其发展现状

### 1.2.1 PID 控制的理论基础

通常用一阶和二阶环节系统来说明 PID 控制的理论基础<sup>[56]</sup>。系统的动态方程是

$$\frac{dx(t)}{dt} + ax(t) = bu(t) \quad (1.2.1)$$

式中,  $a, b$  是系统的参数,控制要求使系统的输出  $x(t)$ , 当  $t \rightarrow \infty$  时,跟踪预先给定的值  $z$ , 设  $z$  是常数。为解决这个问题,最优控制的方法是:令  $y(t) = x(t) - z, v(t) = u(t) - (az)/b$ , 动态方程和最优指标  $J$  为

$$\frac{dy(t)}{dt} + ay(t) = bv(t), \quad J(v(\cdot), y) = \int_0^{+\infty} [y^2(t) + v^2(t)] dt \quad (1.2.2)$$

如果根据参数的名义值(近似值)  $a_0, b_0$  来决定控制作用,当  $t \rightarrow \infty$  时,控制作