

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 23220101153195

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于模型跟踪控制的新型抗饱和设计
及其鲁棒分析

A New Anti-windup Design Based on Model Following
Control and Robust Analysis

王 伟 杰

指导教师姓名: 黄春庆 教授

专 业 名 称: 检测技术与自动化装置

论文提交日期: 2013 年 5 月

论文答辩时间: 2013 年 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2013 年 5 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

众所周知,在实际控制系统中,执行器饱和是一种常见的非线性,属于硬约束。设计控制系统时,若不考虑执行器饱和,系统性能可能恶化,甚至系统可能会变得不稳定。因此,对执行器饱和问题进行探讨和研究,具有重要的理论和现实意义。

一般来说,控制系统的抗饱和设计有两种策略:“一步法”和“补偿器设计法”。本文将采用“补偿器设计法”来进行抗饱和设计。由于实际系统存在模型不确定性,致使抗饱和控制系统的鲁棒性和控制品质不能得到保证,而模型跟踪控制(MFC)结构简单,对于控制对象不确定性及外部扰动有较强的鲁棒性能。因此,本文基于该 MFC 结构进行抗饱和改进,提出了一种新型的 PID-MFC 抗饱和和补偿方法,提高了控制系统的抗饱和性能及抗饱和鲁棒性。然后,本文将使用积分二次约束(IQC)理论来分析基于 PID-MFC 结构的抗饱和方法的鲁棒性,得到该抗饱和方法鲁棒稳定的充分条件。

最后,本文通过与当前的几种抗饱和方法进行仿真对比。经过对比分析,得出了本文的抗饱和结构具有良好的抗饱和能力及较强的鲁棒稳定性。

关键字: 抗饱和; 模型跟踪控制; 鲁棒性; 积分二次约束

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

In practical control systems, it is well known that actuator saturation is a common nonlinearity and hard constraint. When the actuator saturates, the performance of the closed-loop systems designed without considering actuator saturation may deteriorate and even instability. Thus, the research on the control system subject to actuator saturation has an important theoretical and practical significance.

Generally speaking, there are two design strategies which could adopt to avoid saturation problems in systems with actuator limits: one-step approach and anti-windup compensation. The proposed scheme will be designed through anti-windup compensation method. The existences of model uncertainty always cause adverse effects to the robustness stability and the performance of control systems. And the model following control (MFC) structure is noted for its simplicity and relatively high robustness to stable perturbations. Thus, based on MFC scheme, a new type of PID-MFC anti-windup compensation mechanism has been proposed to improve the performance of control systems in this paper. Then, we will use the theory of integral quadratic constraints (IQC) to analyze the robustness of the proposed anti-windup scheme. And we derive a sufficient condition for determining robust stability.

Finally, the effectiveness of the proposed scheme is demonstrated on some simulation examples. And compared with other current known methods, the proposed structure has good anti-windup capacity and strong robustness stability.

Keywords: Anti-windup; Model following control; Robustness; Integral quadratic constraints

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘 要.....	I
Abstract	II
第一章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景	1
1.2 饱和环节简介	2
1.3 抗饱和的发展概况	4
1.4 本论文的研究内容	7
第二章 模型跟踪控制结构.....	9
2.1 引言	9
2.2 模型跟踪控制简介	9
2.3 模型跟踪控制结构	10
2.3.1 模型跟踪控制.....	10
2.3.2 类内模控制结构.....	12
2.3.3 基于快速模型的跟踪控制.....	13
2.4 模型跟踪控制的一些特性	14
2.4.1 结构允许的摄动.....	14
2.4.2 MFC结构的稳定性	15
2.4.3 结构的控制性能.....	16
2.4.4 扰动灵敏度.....	18
2.5 本章小结	19
第三章 PID控制器设计	20
3.1 引言	20
3.2 PID控制原理.....	20
3.3 PID参数整定概述.....	22
3.3.1 PID参数整定技术发展历程	22
3.3.2 PID参数自整定方法分类	23
3.4 PID控制器参数整定的典型方法.....	26
3.4.1 Ziegler-Nichols整定方法.....	26
3.4.2 临界比例度法.....	27
3.4.3 ITSE最优方法	27
3.4.4 试凑法.....	28
3.5 本章小结	29
第四章 基于PID-MFC的抗饱和设计及其鲁棒分析	30
4.1 引言	30
4.2 一些预备知识	30
4.2.1 系统不确定性描述.....	30
4.2.2 抗饱和设计策略.....	33
4.2.3 典型的抗饱和补偿器方法.....	34
4.3 基于PID-MFC的抗饱和设计.....	37
4.4 鲁棒稳定性分析	39

4.4.1 IQC的鲁棒稳定性描述	39
4.4.2 抗饱和方法的等价结构.....	39
4.4.3 基于等价结构的鲁棒性分析.....	42
4.5 本章小结	43
第五章 抗饱和仿真.....	44
5.1 引言	44
5.2 瞬态性能的对比	44
5.3 鲁棒性对比	46
5.3.1 无摄动对象对比.....	46
5.3.2 有摄动系统的鲁棒性对比.....	48
5.4 本章小结	53
第六章 总结与展望.....	54
参考文献.....	56
作者在攻读硕士学位期间发表的论文.....	63
致谢.....	65

Contents

Abstract in Chinese.....	I
Abstract in English.....	II
Chapter I Introduction.....	1
1.1 The background of research.....	1
1.2 Introduction of saturation.....	2
1.3 The development of anti-windup.....	4
1.4 Research contents of the paper.....	7
Chapter II Model following control scheme.....	9
2.1 Introduction.....	9
2.2 Introduction of model following control.....	9
2.3 Model following control.....	10
2.3.1 Model following control.....	10
2.3.2 Analogous internal model control.....	12
2.3.3 MFC based on fast model.....	13
2.4 Essential properties of the MFC structure.....	14
2.4.1 Admissible perturbations.....	14
2.4.2 Stability of MFC scheme.....	15
2.4.3 Control performance.....	17
2.4.4 Sensitivity to disturbances.....	18
2.5 Conclusion of the section.....	19
Chapter III The design of PID controller.....	20
3.1 Introduction.....	20
3.2 The principle of PID control.....	20
3.3 Tuning method of PID control.....	22
3.3.1 The development of PID tuning method.....	22
3.3.2 Classification of PID tuning method.....	23
3.4 Typical Tuning method of PID controller.....	26
3.4.1 Ziegler-Nichols tuning method.....	26
3.4.2 Critical proportioning method.....	27
3.4.3 ITSE optimal tuning method.....	27
3.4.4 Trial and error method.....	28
3.5 Conclusion of the section.....	29
Chapter IV Anti-windup design based on PID-MFC and robust	

analysis	30
4.1 Introduction	30
4.2 Some prior knowledge	30
4.2.1 Uncertainty description.....	30
4.2.2 The design strategy of anti-windup.....	33
4.2.3 Some typical anti-windup compensation methods.....	34
4.3 Anti-windup design based on PID-MFC	37
4.4 Analysis of robust stability for anti-windup scheme	39
4.4.1 IQC for robust stability	39
4.4.2 Equivalent scheme of anti-windup method.....	41
4.4.3 Analysis of robust stability for equivalent scheme	42
4.5 Conclusion of the section	43
Chapter V Simulation of anti-windup scheme	44
5.1 Introduction	44
5.2 Transient performance comparison	44
5.3 Comparison of the robust satibility	46
5.3.1 Comparison of the unperturbed system	46
5.3.2 Robust comparison of the perturbed system.....	48
5.4 Conclusion of the section	53
Chapter VI Conclusion and prospect	54
Reference	56
Articles Published During Master Study Period	63
Acknowledgements	64

第一章 绪论

1.1 课题研究背景

在现实世界中，大多数控制系统都存在着约束问题，受其固有的物理约束或稳定约束所限制。这些约束限制存在于各种常用的工业过程设备中，如比例阀，功率放大器，以及电动机等。常见的限制有电动机的电压及输出转矩限制，液压器的流量或速度的限制，飞机控制的偏转限制等^[1]。

在控制系统中，实际对象大都需要通过执行器来驱动。众所周知，执行器等许多控制装置或元件的输入-输出关系呈现出特有的饱和特性关系，将可能导致实际对象的输入不同于控制器的输出，这种现象称为输入限制。此外，在控制模式切换的情况下，不同控制器的输出信号之间存在差值，将导致系统对象的输入有一个大的跳跃和较差的跟踪性能，产生这种现象的模式切换，被称为扰动转换。当以上两种现象存在时，如果控制器被设计为在一个线性范围内工作，闭环回路的性能将比预期的效果有明显的恶化，在输出超调量较大时，甚至会导致系统的不稳定，这种性能上的恶化被称为饱和^[2]。

控制系统中存在的饱和约束可能是最广泛和最危险的非线性^[3]。如果相关的控制器设计没有考虑饱和约束的影响，则可能产生无法预料的影响和不良的后果。事实上，饱和问题已经引起了各种飞机坠毁^[4]和核电站的爆炸^[5]等。因此，深入了解饱和问题是进行抗饱和设计的关键。实践中出现问题，促使科学家从理论上进行探索研究，饱和问题已当之无愧地得到许多研究人员的重视。饱和问题最初来源于使用PI/PID控制器的控制系统^[6]。当控制信号输出达到极限时，包含积分器的控制器仍继续对跟踪误差进行积分，从而产生更大的控制信号，这反过来又使系统“锁定”在饱和状态。这种情况的发生，会使系统的闭环性能降低，稳定时间更长，有时甚至导致系统不稳定，这种现象被称为积分饱和^[7]。而尝试去限制控制输出变量以致于执行机构的限制不会影响预期的参考输入，往往会导致低劣的和保守的设计，使控制系统不能充分发挥其性能^[8]。因此，饱和非线性特性的存在及其对系统的影响，使得抗饱和技术的研究具有重要的理论和实践意

义。同时，相对于分析设计抗饱和方法，解决验证控制系统中抗饱和方法的稳定性和不确定性是比较棘手的难题。因此，对于抗饱和方法的鲁棒稳定性分析也具有重要的意义。

1.2 饱和环节简介

在实际系统中，许多控制装置或元件的输入-输出关系呈现出特有的非线性关系。这些非线性特性都不能采用线性化的方法来处理问题，也不符合叠加原理。因此，称这类非线性特性为本质非线性^[9]。其中，饱和特性是控制系统中较为常见和重要的一种非线性。

饱和特性可以由放大器失去放大能力的饱和现象来说明，其特点是当输入信号超过一定范围后，输出信号不再随输入信号变化，而是保持某一常值，如图 1.1 所示。它的数学表达式为：

$$f(e) = \begin{cases} +M, & e > +e_0 \\ ke, & -e_0 \leq e \leq +e_0 \\ -M, & e < -e_0 \end{cases} \quad (1.1)$$

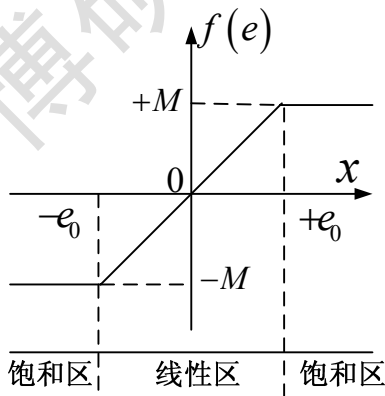


图 1.1 饱和特性

Fig. 1.1 Saturation characterization

当放大器工作在线性工作区时，输入-输出关系呈现比例关系 k ；当输入信号幅度超过 $+e_0$ 时，放大器的输出则保持正的常数值 M ，即处于饱和工作区，不再具有放大功能；当输入信号的幅度小于 $-e_0$ 时，放大器的输出保持负的常数值 $-M$ ，也不是比例关系。

在放大器的线性工作区内，叠加原理是适用的。但是当进入饱和工作区，就

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库