

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 23220121153044

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

具有参数不确定性线性系统的IMC-PID控
制器设计

IMC-PID Controller Design for Linear Systems with
Parametric Uncertainties

章 垚

指导教师姓名: 黄 春 庆 教 授

专 业 名 称: 控制理论与控制工程

论文提交日期: 2 0 1 5 年 月

论文答辩时间: 2 0 1 5 年 月

学位授予日期: 2 0 1 5 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2015 年 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

本人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)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

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。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

控制系统控制品质的好坏直接决定了生产品质和效益，而工业过程控制中百分之九十以上的控制器仍是PID控制器。于是，PID控制器参数整定一直以来是工程应用和理论研究的核心问题之一。众多PID整定法中，IMC-PID控制器参数整定方法脱颖而出，越来越广受工业控制过程的青睐。原因在于，基于IMC的PID控制器对模型要求较低，甚至在高阶低阶、不稳定或非线性等情况下，它都能获得有效的控制品质。而且IMC-PID仅有一个整定参数，该参数调整与系统动态品质和鲁棒性的关系比较明确，从而无需繁杂的整定就可以使系统同时具有较好的稳定性和鲁棒性。

由于需要确切的先验知识或工艺参数的有效估计，传统的确定性优化方法无法处理具有参数不确定性的线性控制系统的PID控制器设计和最优性能问题。于是，本文采用创新的内模控制原理来设计相应的PID控制器，成功处理了线性时滞系统的参数不确定性。期间，我们重点探讨了内模PID控制的两个基本问题：参数整定和性能指标优化。

本文主要研究基于内模原理的PID (IMC-PID) 控制及其在具有参数不确定性的FOPDT过程中的应用，其核心设计理念是借鉴在IMC-PID整定中常用的麦克劳林展开式和一阶泰勒近似，巧妙采用类似的近似法获得IMC-PID控制器整定规则，通过整定唯一的滤波器参数，寻找使系统同时满足良好稳定性和鲁棒性能的滤波器时间常数，将这种整定方法分别应用于仅考虑单参数不确定性(时延)和多参数不确定性(时延和时间常数)的一阶加纯滞后系统，继而分别从概率和拟合的角度寻求和最小化IAE和ISE性能指标。详细的设计步骤中，本文还给出了IMC-PID控制器的滤波器参数的选取原则及基于此的性能指标优化定理。最后，通过数值实例与传统的最佳性能的PID整定方法进行分析比较，效果令人满意，证明了本文提出的IMC-PID控制器参数整定和性能优化方法具有较为显著的可行性和优越性。

关键词：线性系统； PID整定； 内模控制； 参数不确定性； 最优性能

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

As is known to all, the control quality of control systems is the key to production quality and efficiency, whereas above ninety percentage of the controllers available in industrial process control are of PID type to date. Consequently, the PID controller parameter tuning has always been one of the core issues in both engineering applications and theoretical researches. Among numerous PID tuning techniques, the IMC-PID controller parameter tuning method outstands and it enjoys mountains of popularity in industrial control fields. Because the IMC-based PID controller digs access to various models, in which it performs efficiently well, even in cases where whatever-order or unstable or nonlinear phenomena occur. Besides, it has only one tuning parameter, the relationship between which and system dynamics as well as robustness is quite clear, so that a good tradeoff of stability and robustness is guaranteed.

Due to the requirements for the exact prior knowledge or effective parameter estimation, traditional deterministic methods can not deal with PID controller design and optimal performance problems based on linear systems with parametric uncertainties. Thus, in this paper, we creatively adopt the internal model control theory to design the corresponding PID controller for linear systems with pure delay, which can successfully handle with model uncertainties. Among this, we focus on the IMC-PID controller design for linear systems with model uncertainties, probing into two basic problems of the internal model PID control, i.e., parameter setting and performance optimization.

This thesis mainly studies the IMC-PID control and its application in FOPDT systems with parameter uncertainties, the key principle of which is, referring to the Maclaurin expansion series and first-order Taylor approximation, similar approximation is adopted to achieve the corresponding control law, viz. the PID tuning rule where only one tuning parameter is needed, and so as to search for a proper filter time constant which contributes to obtaining satisfactory stability and robustness at the same time, and lastly to optimize the performance indices from the view of probability or least-square curve fitting. When applying this method to single-parameter randomness and bi-parametric uncertainties in time-delay systems respectively, it provides with good control quality. Meanwhile, the selection standardization of tuning parameter and performance index optimization theorem are also given. Finally, the proposed IMC-PID tuning method is applied to illustrative numeric examples, which show explicit superiority and availability beyond traditional PID tuning methods on the basis of optimal performance indices.

Key Words: linear systems; PID tuning; internal model control; parametric uncertainties; optimal performance

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

摘要	I
第一章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 国内外研究现状综述	2
1.3 本文主要工作及论文结构	5
第二章 预备知识与问题描述	7
2.1 一阶线性时滞系统	7
2.1.1 一阶加时延过程	7
2.1.2 参数不确定性	8
2.2 PID控制	9
2.3 内模控制	12
2.4 确定性FOPDT过程的IMC-PID调优	15
2.5 本章小结	17
第三章 时延不确定性FOPDT过程的内模PID控制器设计	19
3.1 时延不确定性	19
3.2 时延不确定性FOPDT系统的IMC-PID控制器参数整定	19
3.3 数值仿真实例	23
3.3.1 实例1	24

3.3.2 实例2.....	25
3.4 本章小结	26
第四章 双参数不确定性FOPDT系统的内模PID控制器设计.....	27
4.1 双参数不确定性一阶加时延过程的内模控制	27
4.2 仿真实例	30
4.2.1 实例1.....	31
4.2.2 实例2.....	40
4.3 本章小结	43
第五章 总结与展望	45
5.1 全文总结	45
5.2 工作展望	46
参考文献	49
攻读硕士期间发表的学术论文	55
致谢	56

Contents

Abstract	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research Significance	1
1.2 Review	2
1.3 Core Contribution of the Dissertation and Its Structure	5
Chapter 2 Preliminaries and Problem Formulation	7
2.1 First-order Linear Time-delayed Systems	7
2.1 FOPDT Processes	7
2.1 Parametric Uncertainties	8
2.2 PID Controller Design	9
2.3 IMC Control Theory	12
2.4 IMC-PID Tuning for Deterministic FOPDT Systems	15
2.5 Chapter Summary	17
Chapter 3 IMC-PID Control for FOPDT Systems with Single Parametric Uncertainty	19
3.1 Uncertainties in Time delay	19
3.2 IMC-PID Control for FOPDT Systems with Delay Uncertainty	19
3.3 Illustrative Numeric Examples	23
3.3.1 Example 1	24
3.3.2 Example 2	25
3.4 Chapter Summary	26
Chapter 4 PID controller design for FOPDT systems with bi-parameter uncertainties	27
4.1 IMC-PID Control for FOPDT Processes with Stochastic Delay and Lag	27
4.2 Illustrative Numeric Examples	30

4.2.1	Example 1	31
4.2.2	Example 2	40
4.3	Chapter Summary	43
Chapter 5 Conclusion and Prospect		45
5.1	Conclusions	45
5.2	Prospects	46
Bibliography		49
Publications		55
Acknowledgements		56

第一章 绪论

1.1 研究意义

现代工业控制要求达到越来越高的设计目标，并在越来越复杂和不确定的环境下进行控制，以PID为代表的传统控制手段已难于适应。在这种生产实际的要求下，随着计算机技术特别是微处理器的发展，一系列新型控制方法应运而生，这些控制方法包括：自适应控制、预测控制、鲁棒控制、神经网络控制等。从应用数学、控制理论、工程实践等不同的角度和起点出发，现代工业控制得到了长足发展，研究成果也层出不穷。作为鲁棒控制之一的内模控制具有兼顾鲁棒稳定性和控制性能的优点，其控制性能要明显优于传统的PID控制。

内模控制(Internal Model Control, 简称IMC)是从20世纪50年代的Smith 预估控制器演变而来，最初由Garcia 和Morari 于1982年提出，发展至今，已经形成了较为完备的理论体系。内模控制虽作为一种先进控制理论，但对数学理论的要求不是特别高，应用时计算量小，易于为广大工程人员所接受。内模控制是一种基于过程数学模型进行控制器设计的新型控制策略，响应速度快，即使在模型失配的不利情况下仍具有较大优势，鲁棒性强，对过程中的干扰抑制能力具有结构上的优势，更容易保证控制系统的稳定性。在现今最现代化的过程装置中，基于经典控制理论的PID 控制回路仍占总回路数的80%以上。但在实际工业应用中，若采用单纯的PID 控制，系统的总体性能难以得到较好保障，卡边生产、最大产量、整体效益最大、最小能耗等一系列期望的控制目标也难以达到。因此，充分发挥内模控制的设计控制性能好和在系统分析方面的优势，与经典PID 控制相结合，不仅保持了传统PID 控制的特点，而且兼具内模控制结构简单、整定方便的优点，并有利于通过模块配置，采用现代控制硬件(如DCS)来实现，从而可以有效提高常规控制系统的设计水平，对提高经济效益和安全性具有十分重要的工程意义。

基于内模控制的PID 通常称为IMC-PID 控制，该控制策略仅有一个整定参数，参数调整与系统动态品质和鲁棒性的关系比较清晰明确。而内模控制本身具有偏差积分作用，无需在设计过程中引入积分环节，因而设计结构相对简单。由于其简便性和可靠性，IMC-PID 控制在工业过程中应用越来越广泛。然而，在实际控制过程中，总会存在无可避免的系统不确定性，其中，最具代表

性的就是参数不确定性。针对这些参数不确定性，绝大多数工程应用都是将系统转化为参数已经固定的确定性数学模型来解决相关物理问题的。事实上，这些影响系统行为性能的不确定性并未被考虑到确定性模型中，如此设计的控制器在实际工业过程中极有可能达不到所需的性能要求甚至无法正常工作。所以，为了涵盖数学模型中的不确定性，使系统实现良好的稳定性能和鲁棒性，提出一种新的方法来解决不确定性参数线性系统的控制器设计问题，使内模控制能更有效地应用于实际的工业生产过程中，具有重要的现实意义。

1.2 国内外研究现状综述

比例-积分-微分(Proportional Integral Derivative, 简称PID)控制，又称PID调节，是最早发展起来的控制策略之一，其基本原理就是根据系统的误差，利用比例、积分、微分计算出控制量进行控制。由于算法简单、鲁棒性好和可靠性高，加之其允许手工调优的简便以及可成功处理许多非线性和部分未知过程的能力，PID已被视为一个标准的工具，被广泛应用于工业过程控制[1]，覆盖了机械、化学和食品工业、矿业、汽车和航空航天工业等众多领域，适用于温度、压力、流量、液位等几乎所有现场。不同的现场，仅仅是PID参数设置不同，只要参数设置得当均可以达到很好的效果和较高的控制要求。在现代工业过程中约有95%的控制采用的是PID控制策略。各种现代控制技术的出现极大推动了PID控制技术的发展。一方面，各种新的控制思想不断被应用于PID控制器的设计之中或者是使用新的控制思想设计出具有PID结构的新型控制器，PID控制技术被注入了新的活力。另一方面，某些新控制技术的发展要求更精确的PID控制，从而刺激了PID控制器设计与参数整定技术的发展。

控制系统质量的好坏直接决定了生产品质和效益，所以我们通常需要一个明确规定的统一的性能指标来衡量控制器控制效果的优劣。但是在实际中，通过改变控制器参数可以使某些指标得到改善的同时，极有可能会使其他的指标恶化。所以一个系统的整定性能指标，它必须能综合反映系统控制质量，而同时又要便于分析和计算。控制系统的性能包括控制性能和鲁棒性，其中控制性能(包括结构稳定性, structural stability)反映的是所设计的控制器特征与期望特性的匹配度等，常见的指标有瞬态性能指标和稳态指标，具体有上升时间、超调、误差积分等。另一个则是鲁棒性能，代表系统对于干扰不敏感的能力，最常用的一个指标就是补灵敏度。在选定一个性能指标后，必须面对的就是控制器参数整定的问题。因为调整控制器参数使系统某种性能最优，就是为了达到所

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts 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.