

内模控制及其应用

◆ 赵志诚 文新宇 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

内模控制及其应用

赵志诚 文新宇 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

内模控制是工业工程控制领域中实用性很强的鲁棒控制方法之一。本书系统地介绍了内模控制的基本概念、理论、设计方法和最新研究成果, 主要内容包括: 内模控制的国内外发展现状、时滞过程内模 PID 控制器鲁棒设计方法、智能自适应内模控制器设计方法、基于神经网络和模糊系统理论的非线性过程内模控制设计方法, 以及内模控制在工业领域中的应用。

本书可供从事自动化和自动控制工作的科研人员、工程技术人员以及高等院校有关专业的教师、高年级学生和研究生参考。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

内模控制及其应用 / 赵志诚, 文新宇著. —北京: 电子工业出版社, 2012.9

ISBN 978-7-121-17876-4

I. ①内… II. ①赵…②文… III. ①内模控制—研究 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 186835 号

责任编辑: 赵 娜

印 刷:

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 11.5 字数: 260 千字

印 次: 2012 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 39.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

总 序

2012 年，太原科技大学将迎来 60 周年华诞。值此六秩荣庆之际，我校的专家学者推出了这套学术丛书，以此献礼，共襄盛举。

六十年前，伴随着新中国的成立，伟业初创，百废待兴，以民族工业为先锋的社会主义现代化建设蓬勃兴起，太原科技大学应运而生。六十年来，几代科大人始终心系民族振兴大业，胸怀制造强国梦想，潜心教书育人，勇担科技难题，积极服务社会，为国家装备制造行业发展壮大和社会主义现代化建设做出了积极贡献。四万余名优秀学子从这里奔赴国民经济建设的各个战场，涌现出一大批杰出的科学家、优秀的工程师和知名的企业家。作为新中国独立建设的两所“重型机械”院校之一，今天的太原科技大学已发展成为一所以工业为主，“重大技术装备”领域主流学科特色鲜明，多学科协调发展的教学研究型大学，成为国家重型机械工业高层次人才培养和高水平科技研发的重要基地之一。

太原科技大学一直拥有浓郁的科研和学术氛围，众位同仁在教学科研岗位上辛勤耕耘，硕果累累。这套丛书的编撰出版，定能让广大读者、校友和在校求学深造的莘莘学子共享我校科技百花园散发的诱人芬芳。

愿太原科技大学在新的征途上继往开来、再创辉煌。

谨以为序。

太原科技大学校长 郭勇义

2012 年 6 月

前 言

随着工业生产规模的不断扩大、复杂程度的不断增强，以及人们对系统控制要求的不断提高，常规 PID 控制难以获得满意的控制效果，尤其是当工业过程存在不确定性、非线性、大时滞、多变量强耦合等复杂特性时，现代控制理论及其应用的局限性也日益明显。

为了更好地解决复杂工业过程控制问题，上世纪 70 年代后期，出现了先进控制策略(Advanced process control, APC)，其中，内模控制 (Internal Model Control, IMC) 是 Garcia 和 Morari 受模型控制算法和动态矩阵控制算法的启发，于 1982 年提出的一种较为成功的预测控制算法。作为一种实用性很强的控制方法，内模控制因其设计原理简单，可同时考虑多种指标，应用范围广，参数整定直观明了，鲁棒性可在线调整，控制性能优越等优点引起了控制界的广泛关注，并成为了工业工程控制领域中重要的鲁棒控制方法之一。

本书是作者在深入了解内模控制发展概况的基础上，结合近十年的主要研究成果，归纳了复杂过程内模控制的设计方法，并通过工程应用展示了内模控制良好的应用前景。全书内容共 6 章，主要包括以下内容：

第 1 章主要介绍了内模控制原理和常规设计方法以及内模控制的国内外研究应用现状。

第 2 章介绍了时滞过程内模 PID 控制器鲁棒设计方法。针对工业控制系统中普遍存在的时滞过程，结合最大灵敏度性能指标，给出了控制器可调参数 λ 鲁棒整定的解析表达式，避免了控制器参数整定的盲目性，确保了系统的鲁棒性。

第 3 章介绍了智能自适应内模控制器设计方法。针对常规内模 PID 控制器参数整定需在系统动态性能与鲁棒性之间折中的不足，分别将模糊系统理论、神经网络理论与内模控制相结合，给出了基于智能自适应整定的内模控制器设计方法，改善了系统的控制性能。

第 4 章介绍了神经网络内模控制的设计方法，针对该方法设计中常见的问题如局部最小、神经网络逆系统的构造以及神经网络结构优化等方面给出了几种改进方法，一定程度上减少了神经网络内模控制在结构上的保守性，并拓宽了内模控制的应用范围。

第 5 章将模糊系统建模方法引入到内模控制结构中，介绍了基于自适应遗传算法和改进型微粒群算法的 T-S 模型辨识方法，以及使用 T-S 模型建立非线性过程的

正-逆模型,进而设计模糊内模控制器的方法。在某种程度上克服了非线性内模控制方法中难以建立精确模型及其逆模型的困难。

第6章介绍了内模控制方法的应用。针对高性能位置伺服系统的要求与现有控制方法的不足,将内模控制分别成功地应用于光电跟踪伺服系统和火炮电液位置伺服系统,提高了系统的跟踪精度。另外,基于DSP处理器实现了交流调速系统的单神经元内模控制,增强了系统的自适应性。

本书的写作是在山西省青年科学基金项目《智能自适应内模控制方法研究,20021018》、山西省自然科学基金项目《非线性系统鲁棒内模控制方法研究,2007011049》以及多项企业横向委托项目研究、开发的基础上,进一步总结完善而成的。借此机会,作者衷心感谢山西省科技厅基础处对本书研究工作的支持。全书由赵志诚教授组织、统稿和定稿,其中,第2、3、6章由赵志诚撰写,第1、4、5章由文新宇撰写。

本书的完成得到了太原科技大学的大力支持。太原科技大学自动化教研室的许多老师和同事多年来对作者的指导和帮助,使作者受益匪浅。硕士研究生桑海、王强、王元元、李果、李长华、李明杰、孟芳芳等同学为本书的校对工作做出了贡献。在此对他们表示衷心的感谢!在本书内容的研究和撰写过程中,笔者参考了许多研究文献和相关资料,在此,向书中引用到其学术论著及研究成果的中外学者同行致谢。

由于作者的能力和水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,敬请相关研究领域的专家、学者及广大读者批评指正。

赵志诚 文新宇

2012年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 内模控制原理和常规设计方法	3
1.2.1 内模控制性质	4
1.2.2 内模控制的设计	5
1.3 内模控制的发展现状	7
1.3.1 滤波器优化设计	8
1.3.2 典型被控过程的应用	8
1.3.3 内模控制结构拓展及改进	9
1.3.4 先进控制算法在内模控制中的应用	10
本章参考文献	13
第 2 章 时滞过程内模 PID 鲁棒设计方法	18
2.1 内模 PID 控制器设计	18
2.1.1 一阶过程的内模 PID 控制器设计	19
2.1.2 二阶过程的内模 PID 控制器设计	20
2.1.3 时滞过程内模 PID 控制器设计	20
2.2 基于最大灵敏度的内模 PID 整定方法	21
2.2.1 最大灵敏度	22
2.2.2 时滞过程内模 PID 的鲁棒整定	23
2.2.3 仿真结果与分析	24
2.3 积分时滞过程内模 PID 控制器鲁棒设计	27
2.3.1 积分时滞系统内模控制	28
2.3.2 积分时滞过程内模 PID 控制器设计	28
2.3.3 仿真结果与分析	30
2.4 不稳定时滞过程内模 PID 控制器鲁棒设计	34
2.4.1 不稳定时滞过程内模 PID 控制器设计	34
2.4.2 控制系统结构的简化	35

2.4.3 仿真结果及分析	36
本章参考文献	37
第 3 章 智能自适应内模控制器设计方法	40
3.1 一种具有设定值加权的 IMC-PID 控制方法	40
3.1.1 基于 Pade 近似的 IMC-PID 控制器设计	40
3.1.2 模糊设定值加权 IMC-PID 控制方法	41
3.1.3 仿真分析	43
3.2 交流伺服系统模糊内模 PID 控制器设计	46
3.3 神经网络自适应内模 PID 控制方法	50
3.3.1 神经网络 IMC-PID 控制器	50
3.3.2 仿真结果及分析	54
3.4 三容液位过程的单神经元内模 PID 控制方法	57
本章参考文献	63
第 4 章 神经网络内模控制	65
4.1 神经网络概述	65
4.1.1 人工神经元与神经网络	65
4.1.2 神经网络辨识结构	67
4.2 神经网络内模控制系统的构造	72
4.2.1 可逆性分析	72
4.2.2 非线性系统逆模型	73
4.2.3 神经网络逆模型辨识	74
4.2.4 神经网络内模控制结构	76
4.3 多模型神经网络内模控制	78
4.3.1 多模型神经网络内模控制策略	78
4.3.2 基于模糊分类的多模型神经网络内模控制	79
4.3.3 被控过程模型和控制器的建立	80
4.3.4 仿真分析	83
4.4 基于近似内模的神经网络控制	85
4.4.1 非线性离散系统神经网络近似输入/输出模型	86
4.4.2 基于近似内模的神经网络控制	88
4.5 基于自构建神经网络的内模控制方法	93
4.5.1 自构建神经网络	93

4.5.2	自构建神经网络内模控制结构	94
4.5.3	设计步骤	95
4.5.4	仿真与分析	99
	本章参考文献	101
第 5 章	基于 T-S 模型的模糊内模控制	104
5.1	模糊系统模型的基本概念	104
5.2	非线性系统 T-S 模型结构及辨识方法	106
5.2.1	动态系统的 T-S 模型	106
5.2.2	T-S 模型的辨识过程	107
5.2.3	仿真分析	111
5.3	基于自适应遗传算法的 T-S 模型辨识方法	115
5.3.1	遗传算法基本原理	115
5.3.2	基于遗传算法的 T-S 模型辨识	115
5.3.3	仿真分析	120
5.4	基于改进的微粒群优化算法的 T-S 模型辨识方法	123
5.4.1	微粒群优化算法	123
5.4.2	基于微粒群优化算法的 T-S 模型辨识	125
5.4.3	仿真分析	127
5.5	基于 T-S 模型的非线性内模控制方法	130
5.5.1	非线性系统的可逆性和逆稳定性	131
5.5.2	模糊内部模型的建立	131
5.5.3	模糊内模控制器的设计	132
5.5.4	仿真与分析	134
	本章参考文献	137
第 6 章	内模控制的应用	139
6.1	内模控制在光电跟踪系统中的应用	139
6.1.1	光电跟踪伺服系统的组成及工作原理	140
6.1.2	光电跟踪伺服系统建模	142
6.1.3	光电跟踪伺服系统内模控制器的设计与实现	149
6.1.4	实验结果及分析	150
6.2	内模控制在火炮电液伺服系统中的应用	152
6.2.1	液压伺服系统组成原理及模型	153

6.2.2	内模控制器设计	159
6.2.3	仿真与实验分析	159
6.3	单神经元自适应内模控制在交流调速系统中的应用	162
6.3.1	基于转子磁场定向的交流调速系统模型	162
6.3.2	全数字化交流调速系统平台	164
6.3.3	基于单神经元的内模控制器设计	167
6.3.4	系统软件的设计与实现	169
6.3.5	实验结果及分析	171
	本章参考文献	172

第 1 章

绪 论

1.1 引 言

随着科学技术的不断发展,石油化工、冶金、电力、机械和航空航天等领域的工业生产规模不断扩大、复杂程度不断增强,人们对系统的控制要求也越来越高。工业生产过程中普遍采用的经典 PID 控制方法,虽然能解决实际生产中所遇到的约 90%的控制问题,但当工业过程存在着不确定性、非线性、大时滞、多变量强耦合等复杂特性时,简单的 PID 控制很难取得令人满意的控制效果,而且控制器参数的整定往往依赖于工程经验,要获得比较满意的整定结果是一件十分棘手的事。

为适应空间探索需要而发展起来的现代控制理论,能从外部现象深入到系统内在的规律性,在空间技术和军事工程上获得了成功的应用,但随着对复杂和不确定性系统控制要求的不断提高,现代控制理论的局限性日益明显,主要表现在以下两个方面:

(1) 现代控制理论的基石是精确的数学模型,而实际工业过程的多样性和复杂性使得很难建立精确数学模型。即使能够建立数学模型,往往也因其结构过于复杂,难以实现经济有效的控制。

(2) 系统在实际运行时由于各种原因会导致系统参数发生变化,而且外界扰动的影响也会给系统带来很大的不确定性,这使得按理想模型设计的最优控制失去最优性,甚至使控制品质严重下降。在实际应用中,人们往往更关心控制系统在不确定性影响下是否仍能保持良好的控制性能,即鲁棒性,而不是只追求所谓的理想最优。

20 世纪 70 年代后期,为了更好地解决复杂工业过程控制问题,陆续出现了自适应控制、预测控制、内模控制、鲁棒控制等先进控制策略。其中,内模控制(Internal Model Control, IMC)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,由于其设计简单、控制性能好和在系统分析方面的优越性,因而自提出之日起,便受到控制界的普遍关注。

内模控制产生的背景主要有两个方面:一是为了对当时的两种预测控制算法模

型算法控制 (MAC) 和动态矩阵控制 (DMC) 进行系统分析, 其次是作为 Smith 预估器的一种扩展, 使其设计更为简便, 系统鲁棒性及抗干扰性大为改善。因此, 从 20 世纪 50 年代后期起, 许多研究者已开始采用类似内模控制的概念来设计控制器, 如 Smith 的时滞预估补偿系统, Francis、Woham 等人的基于内部模型的调节器设计方法。在基于对过程动态模型求逆来设计调节器时, 虽然能获得理想的调节性能, 但这种逆模型受过程内在特性的限制一般不易实现。在随后的一段时间内, 内模控制原理更多地停留在理论研究阶段而难以成为一种工程设计方法。1974 年, 德国学者 Frank 首先在工业过程控制中提出了如图 1-1 所示的内模控制结构; 1979 年, Brosilow 在其推断控制的基础上, 进一步论证了内模结构是推断控制和 Smith 预估控制器的核心, 并给出了内模控制器的设计方法。

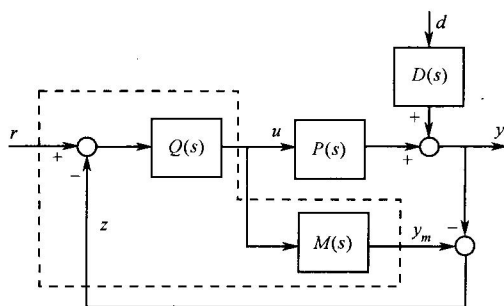


图 1-1 内模控制原理结构

1982 年, Garcia 和 Morari^[1]完整地提出并发展了如图 1-1 所示的控制结构, 并将该控制策略定名为内模控制。图中虚线框内部分可用模拟硬件或计算机软件来实现, 由于该结构中除了有控制器 $Q(s)$ 外, 还包含了过程模型 $M(s)$, 内模控制因此得名。此后, Morari 等人广泛深入地研究了内模控制的性质、设计方法, 并将 IMC 推广到多输入多输出 (MIMO) 系统^[2]和非线性过程, 为内模控制奠定了坚实的理论基础。这样, 基于过程动态模型的求逆来设计控制器的思想得到工程化。自面世以来, 内模控制不仅在工业过程控制中获得了成功的应用, 还表现出在控制系统稳定性和鲁棒性理论分析方面的优势。许多研究者深入讨论了内模控制与其他控制算法, 如动态矩阵控制^[3]、模型算法控制^[4]、线性二次最优控制 (LQOC) 等之间的内在关系。尤其是多变量内模控制可以直接调整闭环系统的动态性能, 并对模型误差具有良好的鲁棒性, 因此, IMC 也是多变量过程系统分析与设计的一种重要方法。

实践证明, 内模控制具有结构简单、参数整定直观明了和在线调整容易等优点, 对于鲁棒及抗扰性的改善和时滞系统的控制效果尤为显著, 并且在实际生产中也已取得了非常广泛的应用, 如液位控制^[5]、柔性机器人^[6]、化工过程^[7]和机构振动主动控制^[8]等。较典型的内模控制设计方法有两步法^[1]、零极点对消法^[2]和预测控制

法^[9]等,内模控制的简化设计及改进的方案也层出不穷。但和任何一种控制方法一样,内模控制的发展也在不断完善中。而近年来针对复杂过程的设计问题已经成为研究热点,用常规的内模控制方法很难满足要求,出现了内模控制与其他控制方法交叉、集成的控制策略,如自适应内模控制^[10, 11]、基于神经网络内模控制^[12, 13]、基于模糊系统理论内模控制^[14~16]和基于支持向量机^[17~20]的内模控制等,从而使内模控制成为工业过程系统实现鲁棒控制的重要方法之一。

本章将从几个方面来介绍内模控制的设计方法和应用,着重讨论最新发展状况,分析其特点,并指出现有方法的局限性和改进思路。

1.2 内模控制原理和常规设计方法

典型的内模控制结构如图 1-1 所示,其中, $P(s)$ 为被控过程, $M(s)$ 为被控过程的数学模型,即内部模型, $Q(s)$ 为内模控制器, r 、 y 和 d 分别为控制系统的输入、输出和干扰信号。控制目标是保持 y 逼近参考值(设定值) r 。 $D(s)$ 表示扰动对输出的影响。为求取图中输入 r 与过程输出 y 之间的传递函数,可以先将图 1-1 等价变换为图 1-2 所示的经典反馈控制形式,图中虚线框住部分为反馈控制器 $C(s)$,由图 1-2 可得:

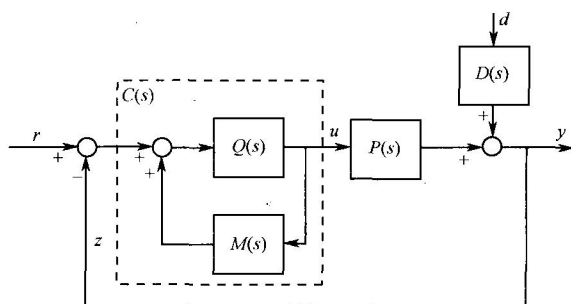


图 1-2 等效反馈控制系统结构

$$C(s) = \frac{Q(s)}{1 - Q(s)M(s)} \quad (1-1)$$

图 1-2 中的输入/输出关系可以表示为:

$$\frac{y}{r} = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} \quad (1-2)$$

$$\frac{y}{d} = \frac{D(s)}{1 + C(s)P(s)} \quad (1-3)$$

将式 (1-1) 代入式 (1-2) 和式 (1-3) 中, 整理后得:

$$\frac{y}{r} = \frac{Q(s)P(s)}{1 + Q(s)[P(s) - M(s)]} \quad (1-4)$$

$$\frac{y}{d} = \frac{[1 - Q(s)M(s)]D(s)}{1 + Q(s)[P(s) - M(s)]} \quad (1-5)$$

这样, 图 1-2 所示系统的闭环响应为:

$$y = \frac{Q(s)P(s)r}{1 + Q(s)[P(s) - M(s)]} + \frac{[1 - Q(s)M(s)]D(s)}{1 + Q(s)[P(s) - M(s)]}d \quad (1-6)$$

从图 1-2 可知其反馈信号为:

$$z = [P(s) - M(s)]u + D(s)d \quad (1-7)$$

如果模型精确, 即 $P(s)=M(s)$, 且没有外界扰动, 即 $d=0$, 则模型的输出 y_m 与过程的输出 y 相等, 此时反馈信号为零。这样, 在模型精确和无未知扰动输入的条件下, 内模控制系统具有开环结构。这就清楚地表明, 对开环稳定的过程而言, 反馈的目的是克服过程的不确定性。也就是说, 如果过程和过程输入都完全清楚, 只需要前馈 (开环) 控制, 而不需要反馈 (闭环) 控制。事实上, 在工业过程控制中, 克服扰动是控制系统的主要任务, 而模型不确定性也是难免的。此时, 在图 1-1 所示的 IMC 结构中, 反馈信号 z 就反映了过程模型的不确定性和扰动的影响, 从而构成了闭环控制结构。

1.2.1 内模控制性质

1. 对偶稳定性

为了考察 IMC 内部稳定性, 应先计算出所有可能的系统输入与系统输出之间的传递函数。对图 1-1, 在模型精确时, 由式 (1-4) 和式 (1-5) 可知, 闭环系统的输出 y 只与 IMC 系统前向通道传递函数 $Q(s)M(s)$ 有关。因此, 当模型匹配时, IMC 系统的闭环稳定性只取决于前向通道各环节自身的开环稳定性。

定理 1.1: 假设模型是精确的, 即 $P(s)=M(s)$, 则 IMC 系统内部稳定的充要条件是: 过程 $P(s)$ 与控制器 $Q(s)$ 都是稳定的。

定理 1.1 的稳定性条件比经典控制理论常用的劳斯判据、根轨迹判据和频率特性等分析方法要简单得多。即便在控制器有约束 (限幅) 的情况下, 该稳定条件仍然成立。根据该定理, 若过程 $P(s)$ 是开环不稳定的, 则在使用 IMC 之前, 应先采用简单的反馈控制律使之镇定。对于简单的积分过程, 可以直接采用内模控制。与内模控制相比, 传统的反馈控制结构在如何选取控制器类型和控制器参数以保证闭环系统的稳定性等问题上不够清晰。

2. 理想控制器特性

当过程 $P(s)$ 稳定, 且模型精确, 即 $P(s)=M(s)$ 时, 若设计控制器使之满足

$$Q(s)=M^{-1}(s) \quad (1-8)$$

同时, 模型的逆 $M^{-1}(s)$ 存在且可实现, 由式 (1-6) 可得:

$$y = \begin{cases} r & \text{设定值扰动下} \\ 0 & \text{外界干扰扰动下} \end{cases} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 表明: 在所有时间内和任何干扰 d 作用下, 系统输出都等于输入设定值, 即 $y=r$ 。这意味着系统对于任何干扰都能加以克服, 因而能实现对参考输入的无偏差跟踪。应当指出的是: 理想控制器特性是在 $M^{-1}(s)$ 存在且控制器 $Q(s)$ 可以实现的条件下得到的。然而, 由于过程中常见的时滞和惯性环节, $M^{-1}(s)$ 中将出现纯超前和纯微分环节, 因此, 理想控制器很难实现。此外, 对于具有反向特性, 即包含不稳定零点的过程, $M^{-1}(s)$ 中甚至含有不稳定极点。总之, 当被控对象为一非最小相位过程时, 不能直接采用上述理想控制器的设计方法, 而应将过程模型进行分解, 再利用分解出的含有稳定零点和稳定极点的部分设计控制器。

3. 零稳态偏差特性

(1) 类型 1 系统

如图 1-2 所示, 若闭环系统稳定, 即使模型与过程失配, 即 $P(s) \neq M(s)$, 只要控制器的稳态增益和模型稳态增益的乘积为 1, 即 $Q(0)M(0)=1$, 此系统就属于类型 1, 且对于阶跃输入和常值干扰均不存在稳态偏差。由图 1-2 可知

$$E = r - y = \frac{[1 - Q(s)M(s)]}{1 + Q(s)[P(s) - M(s)]} [r - d] \quad (1-10)$$

显然, 若 $Q(0)=M^{-1}(0)$, 则对于阶跃输入和扰动, 由终值定理可知, 稳态偏差 $e(\infty)$ 为零。

(2) 类型 2 系统

若图 1-2 所示的闭环系统稳定, 即使模型与过程失配, 即 $P(s) \neq M(s)$, 只要选择 $Q(s)$ 使其满足 $Q(0)=M^{-1}(0)$, 且 $\frac{d}{ds}[M(s)Q(s)]|_{s=0}=0$, 则系统属于类型 2。该系统对于所有斜坡输入和干扰均不存在稳态偏差。这一性质也可由终值定理得到。IMC 系统的这一零稳态偏差特性表明: IMC 本身具有偏差积分作用, 无须在内模控制器设计时引入积分环节。

1.2.2 内模控制的设计

对于 IMC 系统, 只要令 $Q(s)=M^{-1}(s)$, 即可获得理想的设定值跟踪和完全的干扰抑制效果。在理想情况下, 这种完全确定的控制器甚至不需要进一步整定控制器

参数。此时，内模控制器设计与确定前馈控制器相似。然而，理想控制器性质常难以获得，其原因在于：

(1) 过程含有时滞特性，则 $Q(s)=M^{-1}(s)$ 中含有纯超前项，这在物理上难以实现，不符合因果律。

(2) 若过程模型含有右半平面 (RHP) 零点，则控制器 $Q(s)$ 中就有 RHP 极点，控制器本身不稳定，因而闭环系统也不稳定。

(3) 过程模型 $M(s)$ 严格有理，则理想控制器 $Q(s)=M^{-1}(s)$ 非有理，即

$$\lim_{s \rightarrow 0} |Q(s)| \rightarrow \infty \quad (1-11)$$

也就是说，如果 $M(s)$ 的分母多项式的阶次比分子多项式的阶次高 N 阶，则控制器中将出现 N 阶微分器，尽管它在数学上是成立的，但 N 阶微分器对于过程测量信号中的噪声极为敏感，因而不切实际。

(4) 采用理想控制器构成的系统，对于模型误差极为敏感，若 $P(s) \neq M(s)$ ，则无法确保闭环系统的鲁棒稳定性。

为解决上述 4 个问题，在设计内模控制器时应分为两步进行。首先设计一个稳定的理想控制器，而不考虑系统的鲁棒性和约束；其次引入滤波器，通过调整滤波器的结构和参数来获得期望的动态品质和鲁棒性。内模控制器的设计分为两步。

步骤 1: 过程模型 $M(s)$ 的分解

$M(s)$ 可分为两项: $M_+(s)$ 和 $M_-(s)$ ，即

$$M(s) = M_+(s)M_-(s)$$

其中， $M_+(s)$ 为模型中包含纯滞后和不稳定零点的部分， $M_-(s)$ 为模型中的最小相位部分。

步骤 2: IMC 控制器设计

在设计 IMC 控制器时，需在最小相位 $M_-(s)$ 的逆上增加滤波器，以确保系统的稳定性和鲁棒性。定义 IMC 控制器为

$$Q(s) = f(s)/M_-(s) \quad (1-12)$$

式中， $f(s)$ 为低通滤波器，选择 $f(s)$ 的目的之一是使 $Q(s)$ 变为有理，通常选用以下形式

$$f(s) = \frac{1}{(1 + \lambda s)^r} \quad (1-13)$$

式中， r 应选择足够大以保证 $Q(s)$ 的可实现性， λ 为滤波器时间常数，是内模控制器仅有的设计参数。

$M(s)$ 与 $P(s)$ 一般是不匹配的。根据鲁棒性定理，内模控制系统闭环鲁棒稳定的条件为：

$$|M_+(s)f(s)| \leq \frac{1}{l_m}, \quad \forall \omega$$

式中, l_m 是模型不确定性的上界, 即有, $e_m(s) \leq l_m$, 或 $\left| \frac{P(s) - M(s)}{P(s)} \right| \leq l_m$, 为了简单起见, 取 $|M_+(s)| = 1$ 。当过程与模型之间的不匹配度 $e_m(s)$ 增大时, 滤波器 $f(s)$ 的模 $|f(s)|$ 必须取小。由于现实中, l_m 的高频段会达到甚至超过 1, 因此 λ 的取值范围受到对象与模型不匹配程度的限制。当过程与模型不匹配时, $f(s)$ 的结构不能自动确保闭环响应的形状, 对 IMC 设计方法, 即取 $M_+(0)f(0)=1$ 和 $f(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^r}$, 并采用如下

的不等式

$$|e| \leq \frac{|1 - M_+(s)f(s)|}{1 - |M_+(s)f(s)e_m(s)|} |r - d| \quad (1-14)$$

可以判定式 (1-14) 以及下面的理想误差函数在正常频率范围内是非常接近的

$$|e| = |1 - M_+(s)f(s)| |r - d| = |\tilde{s}| |r - d| \quad (1-15)$$

在低频 $\omega \leq \frac{1}{\lambda}$ 时, $\tilde{G}_{p+}f \approx 1$, 则 $e = 0$ 。在 $\omega \geq \frac{1}{\lambda}$ 时, $|f|$ 非常小, $|\tilde{G}_{p+}fe_m| \approx 0$,

式 (1-14) 和式 (1-15) 非常接近。在 $\omega = \frac{1}{\lambda}$ 时, 情况不定。因此选择足够大的 λ ,

对于高频或低频输入 (如阶跃), 闭环响应与名义系统 $\tilde{G}_{p+}f$ 的响应相似。

总之, IMC 设计步骤的优点是控制器参数以唯一和直接的方式与模型参数相关。在 IMC 控制器中, 只有一个可调整的参数 λ , 并决定了系统的响应速度。此外, λ 近似地与闭环带宽成正比。这样, 可以获得滤波器参数 λ 的一个初始估计, 并可根据需要在线调整。

1.3 内模控制的发展现状

常规内模控制器的设计比较简单, 当模型完全可逆时, 只需取控制器为模型的逆, 再选择合适的滤波器即可; 当模型不完全可逆时, 可以将模型分解为可逆部分和不可逆部分, 其中可逆部分的逆取为控制器, 再选择合适的滤波器也可以保证控制系统对镇定或跟踪控制都具有最小输出方差。在工业控制领域, 常规内模控制器设计方法可以解决大部分的控制问题, 但对于具有非线性、大时滞、参数时变、不确定性等复杂特性的过程, 常规内模控制的应用就受到了很大的限制, 难以获得满意的控制效果。另一方面, 内模控制的控制效果与被控过程和其模型的匹配程度直接相关, 当数学模型估计不准或过程参数变化时, 较大的模型失配使得系统的动态特性和控制品质变坏, 甚至造成系统失稳。

众多学者在内模控制器设计方面进行了研究总结, 且取得了丰富成果^[22~24]。此