

线性系统可靠控制 分析与设计

XIANXINGXITONGKEKAOKONGZHI
FENXIYUSHEJI

王福忠 姚 波 著

 辽宁科学技术出版社

线性系统可靠控制分析与设计

王福忠 姚 波 著

辽宁科学技术出版社

沈 阳

图书在版编目 (CIP) 数据

线性系统可靠控制分析与设计/王福忠,姚波著.
—沈阳:辽宁科学技术出版社,2012.11
ISBN 978-7-5381-7689-6

I. ①线… II. ①王 ②姚… III. ①线性系统—控制系统—系统分析 ②线性系统—控制系统—系统设计
IV. ①023.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 230587 号

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路 29 号 邮编: 110003)

印刷者: 沈阳新华印刷厂

经销者: 各地新华书店

幅面尺寸: 184mm×260mm

印 张: 14.5

字 数: 300 千字

出版时间: 2012 年 11 月第 1 版

印刷时间: 2012 年 11 月第 1 次印刷

责任编辑: 马旭东 高 鹏

封面设计: 杜 江

版式设计: 于 浪

责任校对: 王玉宝

书 号: ISBN 978-7-5381-7689-6

定 价: 40.00 元

联系电话: 024—23284062

邮购热线: 024—23284502

E-mail: lnkj1107@126.com

http://www.lnkj.com.cn

本社法律顾问: 陈光律师

咨询电话: 13940289230

前言

现代控制工程系统正朝着大规模、复杂化的方向发展,特别是航空航天、大型化工、核能利用和高速铁路等控制系统,这些系统一旦发生故障可能造成人员和财产的巨损失。容错控制技术的出现、兴起与迅速发展,是实际应用需求与多学科理论发展两方面交替作用的结果。随着现代自动化技术水平的不断提高,各类工程系统的复杂性大大增强,系统的可靠性与安全性已成为保障经济效益和社会效益的关键因素,已得到了广泛的重视。容错控制可划分为主动容错和被动容错两类容错控制技术。主动容错是基于故障检测和故障诊断技术,在故障发生后,系统检测和诊断到故障的信息,根据期望的特性,确定新的控制策略,确保系统具有满意的性能。被动容错与鲁棒控制技术具有相似的控制思想,它是采取固定的控制器来确保闭环系统对特定的故障不敏感,保持系统的稳定和满足一定的性能指标。可靠控制设计主要考虑系统的执行器和传感器故障,故障类型分为“中断”故障和增益故障,“中断”故障也称为离散故障,增益故障也称为连续故障。2000年,杨光红教授首先利用连续故障模型,对动态系统的可靠控制问题进行了较深入的研究。我们的研究基本上是在他研究成果的基础上进行的。

本书在第1章绪论中介绍了控制理论和控制技术的发展历史,叙述了容错控制发展的主要过程,详细叙述了线性系统可靠设计的基本思想和方法。第2章给出了线性系统状态空间的一些理论内容。第3章根据本书需要,将线性矩阵不等式的理论内容进行了较系统的总结,同时对本书需要的一些定理和后续章节需要的一些结论进行了论证。第4章给出了考虑传感器和执行器故障的可靠控制器设计方法,给出了同时考虑执行器或传感器故障的可靠设计方法。第5章针对区域极点配置理论,考虑了执行器和传感器故障,给出了状态反馈和动态输出反馈可靠控制器的设计方法,所设计的可靠控制器使得无论系统是否出现故障闭环系统的极点都保持在指定的区域内。第6章利用线性矩阵不等式给出了 H_∞ 可靠控制器的设计思想,并将任意故障的设计思想应用到设计过程中,使系统的可靠性得到了增强。第7章给出了保性能可靠控制设计方法。第8章利用广义系统理论,结合可靠设计理论研究了广义系统可靠控制器的设计问题,给出了动态输出反馈可靠控制器的设计方法。第9章的内容是我们近几年的一些研究成果。在近十年可靠控制设计方法的研究过程中,我们感觉到对动态系统进行可靠控制器的设计的确可以实现可靠运行,但是同时可靠控制器对闭环系统也会产生一些不良的影响,比如响应速度减慢、性能下降和控制能量增加等。硬件冗余技术是解决上述问题的较好方法。硬件冗余技术是利用增加系统“关键”部件的数量实现系统可靠性。这样部件的关键程度的确定就成为硬件冗余可靠设计的主要问题了。在第9章给出了硬件冗余度的概念,提出了区域极点配置硬件冗余度的初步算法。在这一章所给出的结论还属于初步研究阶段,不完善也不完整,还需要我们进一步去研究。

本书的特色有以下三点:①利用线性矩阵不等式给出了可靠控制器的设计方法,特

别是区域极点的可靠控制问题的研究。②给出了任意故障可靠设计方法，这种方法完善了系统的可靠设计，执行器或传感器两类部件任意一类出现故障都可使系统实现可靠。③提出了硬件冗余度概念，同时给出了初步算法。

在这里我首先要感谢的是我的恩师张嗣瀛院士，他严谨的治学作风、渊博的学识及孜孜不倦的研究精神，给我以深刻的影响。张老师深悟控制理论的精髓，把中华民族古老文化融汇到控制理论的研究中来。通过对大量的自然现象的观察和思考，开辟了复杂系统对称性和相似性的结构研究这一崭新的科学领域。张老师不仅是我学术研究上的导师，更是我做人的典范。在学习和研究过程中，给予我帮助的还有杨光红教授、高立群教授、赵军教授和井元伟教授等，在此对各位师兄的指教表示真诚的感谢。同时对我的博士后合作教师张庆灵教授对我的教诲和支持表示感谢。

特别地，在这里我要感谢我的夫人姚波，她在我的学习阶段、研究过程和日常生活中，都给我许多帮助、支持和爱。在本书的编写过程中，她提出了许多好的建议，对本书内容作了大量的修改。在完成这篇前言撰写的时候，正是我们结婚二十五年的纪念日，这本书就是给我们结婚纪念日最好的礼物，我们将不断努力地去完善和充实，在不远的将来将会有更好的成果呈献给大家。

本书主要内容是我和夫人在攻读博士期间所研究的内容，整理和修改都不尽完善，理论水平还有待于进一步提高，所以本书一定还有许多不足和错误，希望读者批评指正。

王福忠

2012年5月1日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 控制发展过程	1
1.2 信息科学的一些术语	2
1.3 容错控制与可靠控制	5
参考文献	9
第 2 章 线性系统状态空间概述	13
2.1 状态空间表达式的一般描述	13
2.1.1 基本概念	13
2.1.2 状态空间表达式一般形式	14
2.2 状态空间表达式建立	16
2.2.1 状态空间描述举例	16
2.2.2 状态空间表达式系统方框图	18
2.2.3 系统状态变量图	18
2.3 传递函数与传递函数矩阵	19
2.3.1 单输入单输出模型	19
2.3.2 多输入多输出模型	21
2.3.3 由传递函数建立状态空间表达式	22
2.3.4 反馈控制	25
2.4 能控性与能观性	26
2.4.1 能控性	27
2.4.2 能观性	28
2.5 线性系统的建模和控制设计举例	29
2.5.1 问题描述	29
2.5.2 参数和变量定义	30
2.5.3 数学模型的建立	31
2.5.4 状态方程的建立	31
2.5.5 系统的特性分析	32
2.5.6 状态反馈	34
参考文献	35
第 3 章 故障描述与矩阵不等式	37
3.1 增益故障描述几种形式	37
3.1.1 离散故障模型	38
3.1.2 连续增益故障模型	40

3.2 连续故障模型处理方法	43
3.2.1 替换法	43
3.2.2 凸组合法	44
3.3 线性矩阵不等式	45
3.3.1 线性矩阵不等式的表达式	45
3.3.2 一些标准线性矩阵不等式问题	50
3.3.3 关于矩阵不等式的一些结论	53
3.3.4 常用不等式	60
3.3.5 矩阵变换一些结论	60
参考文献	62
第4章 稳定性	63
4.1 Lyapunov 意义下的稳定性基本概念	63
4.1.1 动态系统稳定性概念	63
4.1.2 线性系统 Lyapunov 稳定性	66
4.2 镇定控制器的设计	67
4.2.1 状态反馈控制器设计	67
4.2.2 动态输出反馈控制器的设计	68
4.3 可靠镇定控制器设计	71
4.3.1 考虑执行器故障的状态反馈可靠控制器的设计	71
4.3.2 考虑传感器故障动态输出反馈可靠控制器设计	74
4.3.3 考虑执行器故障动态输出反馈可靠控制器设计	78
4.3.4 考虑任意故障动态输出反馈可靠控制器设计	81
4.4 考虑执行器故障的可靠跟踪控制	85
4.4.1 跟踪控制	85
4.4.2 跟踪控制器设计	86
4.4.3 可靠控制器的设计	87
参考文献	90
第5章 区域极点可靠配置	92
5.1 系统的区域稳定	92
5.1.1 线性矩阵不等式区域	93
5.1.2 区域稳定的定义	95
5.2 区域稳定控制器设计	96
5.2.1 连续系统圆形区域稳定动态输出反馈控制器设计	96
5.2.2 离散系统区域稳定状态反馈控制器设计	99
5.3 区域稳定可靠控制器设计	100
5.3.1 抵御传感器故障动态输出反馈区域稳定可靠控制器设计	100
5.3.2 离散系统区域稳定状态反馈可靠控制器设计	103

5.4 具有方差约束的极点配置可靠控制	105
5.4.1 具有方差约束区域极点配置鲁棒控制	105
5.4.2 具有方差约束区域极点配置鲁棒可靠控制	106
参考文献	109
第6章 鲁棒 H_∞ 可靠控制	111
6.1 H_∞ 控制的概念	112
6.1.1 范数概念	112
6.1.2 H_∞ 控制概念	112
6.1.3 H_∞ 控制的一些常用结论	113
6.2 H_∞ 控制器的设计	114
6.2.1 鲁棒状态反馈 H_∞ 控制器设计	114
6.2.2 离散系统状态反馈具有极点约束的 H_∞ 控制器设计	115
6.2.3 动态输出 H_∞ 控制器设计	117
6.3 H_∞ 可靠控制器设计	119
6.3.1 鲁棒状态反馈 H_∞ 单故障可靠控制器设计	119
6.3.2 离散系统具有极点约束的状态反馈 H_∞ 可靠控制器设计	123
6.3.3 抵御传感器故障动态输出 H_∞ 可靠控制器设计	125
6.3.4 抵御执行器故障动态输出 H_∞ 可靠控制器设计	129
6.4 抵御任意故障的 H_∞ 可靠控制	131
6.5 考虑传感器故障的可靠 H_∞ 滤波器设计	134
6.5.1 系统描述	135
6.5.2 滤波器的设计	136
参考文献	142
第7章 保性能可靠控制	145
7.1 保性能系统分析	145
7.1.1 连续系统保性能分析	145
7.1.2 离散系统保性能分析	146
7.2 保性能控制器设计	147
7.2.1 不确定离散系统状态反馈控制器设计	147
7.2.2 不确定连续系统状态反馈控制器设计	148
7.2.3 连续系统动态输出反馈控制器设计	149
7.3 保性能可靠控制器设计	153
7.3.1 不确定离散系统可靠状态反馈控制器设计	153
7.3.2 不确定连续系统状态反馈可靠控制	161
7.3.3 动态输出反馈可靠控制器设计	166
参考文献	172

第8章 广义系统的可靠控制	174
8.1 广义系统的一般概念	175
8.1.1 广义系统的状态空间描述	175
8.1.2 受限等价变换	175
8.1.3 广义系统的运动分析	178
8.1.4 广义系统的脉冲模	179
8.2 广义系统极点配置	182
8.2.1 广义系统区域极点配置	182
8.3 广义系统 H_∞ 控制	187
8.3.1 问题描述	187
8.3.2 状态反馈 H_∞ 次优控制	187
8.3.3 基于 Riccati 方法的 H_∞ 控制	190
8.3.4 基于 LMI 方法的 H_∞ 控制	192
8.3.5 动态输出反馈控制器设计的 LMI 方法	194
8.4 广义系统可靠控制	199
8.4.1 考虑传感器故障	199
8.4.2 考虑执行器故障	202
8.4.3 考虑任意故障	203
参考文献	205
第9章 硬件冗余度的分析	208
9.1 基于圆盘极点配置的执行器冗余度	208
9.1.1 问题描述	209
9.1.2 硬件冗余度的算法	209
9.2 基于保性能控制执行器冗余度的分析	212
9.2.1 系统描述	212
9.2.2 系统的闭环极点冗余度分析	213
9.2.3 关于 D -稳定及保性能控制的几个概念	213
9.2.4 动态输出反馈 D -保性能控制器的存在条件	214
9.2.5 硬件冗余度	214
9.3 基于极点配置的动态输出反馈的部件冗余度分析	219
9.3.1 问题描述	219
9.3.2 冗余度算法	220
参考文献	224

第1章 绪论

1.1 控制发展过程

自动控制是关于受控系统分析、设计和运行的理论和技术。一般地说，自动化主要研究的是人造系统的控制问题。自动控制比自动化的概念要广泛一些，它除了上述研究外，还研究社会、经济、生物、环境等非人造系统的控制问题。控制科学与工程的核心问题是信息，包括信息提取、信息传播、信息处理、信息存储和信息利用等。控制科学与工程同一般的信息学科不同，控制科学与工程是在理论上用抽象的方式来研究一切控制系统的信息传播和信息处理的特点和规律，研究不同的控制规律，达到不同的控制目的。

自动控制理论的产生可以追溯到19世纪中叶。1788年英国机械师瓦特（J. Watt）发明了离心式调速器，并把它与蒸汽机的阀门连接起来，构成了蒸汽机转速的闭环自动调节系统。

当时人们发现蒸汽机的转速会忽高忽低，即系统会发生震荡（不稳定）。这迫使人们从理论上加以研究。1868年Maxwell用微分方程描述并总结了调速器理论，发表的《论调速器（On Governors）》被认为是人们开始进行控制理论研究的一个标志性文章。1876年俄国机械学家维什涅戈拉茨基进一步总结了调速器理论，归结为只研究描述自动调节系统（图1.1.1）的线性齐次微分方程的通解问题。

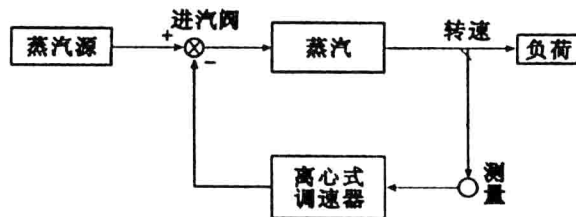


图 1.1.1 被控对象和调节器形成调节系统

1877年英国数学家E. 劳斯（Routh）、1895年德国数学家A. 胡尔维茨（Hurwitz）提出代数稳定判据（Stability Criteria），沿用到现在。1892年俄国数学家李亚普诺夫提出稳定性的严格数学定义并发表了专著。他的稳定性理论至今还是研究分析线性和非线性系统稳定性的重要方法。

随着生产的发展，尤其是计算机的更新换代，推动了控制理论不断地向前发展。在控制理论整个的发展过程中具有里程碑意义的是20世纪60—70年代初提出将古典控制理论中的高阶常微分方程转化为一阶微分方程组的状态空间法，由此将“古典控制理论”的研究过渡到“现代控制理论”的研究。

自动调节的广泛使用是由于第一次工业革命的需要，人们开始采用自动调节器（Regulator）或装置，使一些物理量保持在给定值附近。1868 年法国工程师 J. 法尔科（Farcot）发明反馈调节器，并把它与蒸汽阀连接起来，操作蒸汽船的舵，他称之为伺服机构（Servomechanism）。到了 20 世纪 20—30 年代，美国开始采用 PID 调节器（比例 - 积分 - 微分调节器）。这是一种模拟式调节器，现在还在许多工厂中采用。

反馈控制和频率法进入 20 世纪以后，工业生产中广泛应用各种自动调节装置，促进了对调节系统的分析和综合的研究。通过在解决电子管放大器失真问题上的研究，1927 年美国电气工程师 H. 布莱克（Black）引入的反馈概念，使人们对自动调节系统中的反馈控制的结构有了更深刻的认识。此后在拉普拉斯（Laplace）变换的基础上，传递函数（Transfer Function）的观念被引入到分析自动调节系统或元件上，成为重要工具。1932 年美国电信工程师 N. 奈奎斯特（Nyquist）提出著名的稳定判据（称为奈奎斯特稳定判据），可以根据开环传递函数绘制或测量出的频率响应判定反馈系统的稳定性。1938 年，苏联电气工程师 A. 米哈伊洛夫提出根据闭环（反馈）系统频率特性判定反馈系统稳定性的判据。上述稳定判据加上 1922 年 N. 米诺尔斯基《关于船舶自动操舵的稳定性》和 1934 年美国 H. 黑曾（Hazen）发表的《关于伺服机构理论》的论文标志着经典控制理论的诞生。

1.2 信息科学的一些术语

1. 科学

科学（Science）是指对各种事实和现象进行观察、分类、归纳、演绎、分析、推理、计算和实验，从而发现规律，并对各种定量规律予以验证和公式化的知识体系。科学的任务是揭示事物发展的客观规律，探求真理，作为人们改造世界的指南。按传统观点，科学分为自然科学和社会科学两大类。自然科学又可分为基础科学（Basic Science）和技术科学（Technological Science）两类。基础科学包括数学、物理、化学、天文学、生物学等，技术科学包括电子学、电工学、固体力学、流体力学、机械学等。在科学属性上，信息科学属于技术科学。

2. 技术

技术（Technology）是指人类根据生产实践经验和自然科学原理改变或控制其环境的手段和活动，是人类活动的一个专门领域。技术的任务是利用和改造自然，以其生产的产品为人类服务。其中，工程技术有机械、电气、能源、动力、化工、土木、计算机等；农业技术有种植、畜牧、造林、园艺等；医疗技术有中医、西医、临床等。在技术属性上，本学科属于工程技术。专门从事技术工作的专家称为技术家（Technologist），如工程师、农艺师、医师等。

3. 工程

工程（Engineering）是指应用科学知识使自然科学资源最好地为人类服务的专门技术。但工程不等同于技术，它还受到政治、经济、法律、美学等非技术内容的影响。技

术存在于工程之中。工程有时也指具体的科研或建设项目（如三峡工程、都江堰工程等）。专门从事工程活动的专家称为工程师（Engineer）。工程师（包括其他技术家）和科学家的职责不同。科学家的任务是如何认识，因而他可以选择自己感兴趣的研究课题；工程师的任务是如何实现，所以他必须解决面临的实际问题。工程问题受到多方面因素的制约，工程师必须在多种可能方案中作出选择，谋求最可靠、最经济的解决方法。许多工程问题有深远的社会影响。

4. 系统

系统（System）是指由相互关联、相互制约、相互影响的一些部分组成的具有某种功能的有机整体。如果构成系统的组成部分本身也是系统，则称为原系统的子系统。原系统也可以是更大系统的子系统。对于一个具体的系统，系统以外的部分称为系统环境，系统与系统环境的分界称为系统边界。系统环境对系统的作用称为系统输入，系统对系统环境的作用称为系统输出。系统是控制学科乃至整个现代科学技术一个非常重要的概念。随着科学技术的发展，出现了越来越多的大型、复杂的系统，推动、产生了一门新的工程技术学科——系统工程（Systems Engineering）。正如以上提到的，在学科分类上，系统工程是控制科学与工程一级学科下的二级学科。

5. 信息

信息（Information）是指符号、信号或消息所包含的内容，用来消除对客观事物认识的不确定性。信息普遍存在于自然界、人类社会和人的思维之中。早在1948年，信息论的创始人C. 香农（Shannon）把信息定义为信源的不定度。即对信宿（接受信息的系统）而言，未收到消息前不知道信源（产生信息的系统）发出的是什么信息，只有收到信息后才能消除信源的不定度。这里，消息是信息的载体。1950年，控制论的创始人N. 维纳认为，信息是人们在与客观世界相互作用过程中与客观世界进行交换的内容的名称。这里交换的还是消息或信号。

6. 控制

控制（Control）是指为了改善系统的性能或达到特定的目的，通过信息的采集和加工而施加到系统的作用。可以把所有的系统分为不可控系统和可控系统两类，前者是指无法进行人工控制、干预的系统，后者是指可以进行人工控制、干预的系统。可控系统由控制部分和被控对象组成，如图1.2.1所示组成，两者往往形成双向的信息流联系。控制部分一般由传感器（Sensor）、控制器（Controller）和执行器（Actuator）组成。传感器用来采集信息，并把它变换为合适的形式，传送到控制器。控制器用来加工信息、产生控制信号，这是控制系统的核心。执行器则将控制器产生的控制信号进行放大和变换，以此产生控制作用，最终施加到被控对象上。通常把进入可控系统的信息加工成控制信息的规则，称为控制算法（Algorithm）。设计和实现控制算法是控制理论中最重要的研究课题。在可控系统中实现控制算法的部件称为控制器，设计和研究各种控制器则是控制工程最重要的任务。

7. 反馈

反馈（Feedback）是指将系统的实际输出和期望输出进行比较，形成误差，从而为

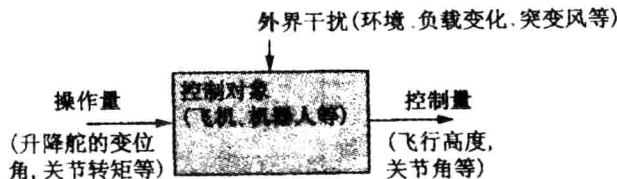


图 1.2.1 控制对象的输入与输出

确定下一步的控制行为提供依据。实际上，反馈是一切自然系统、生物系统、社会系统的普遍属性，反馈的过程是信息传递的过程。反馈控制是一种最基本的控制方式。如果反馈信息（系统实际输出）是使系统输出的误差逐渐减少，则称为负反馈；反之，称为正反馈。反馈控制又称为闭环控制，与此完全不同的控制方式是开环控制，或称程序控制，它按事先规定的顺序或逻辑控制系统。这两种控制方式在实际中都有广泛的应用。

8. 调节

调节 (Regulation) 是指通过系统的反馈自动校正系统的误差，使诸如温度、速度、压力或位置等参量保持恒定或在给定范围之内。调节须以反馈为基础，而控制则包括以反馈为基础的闭环控制和无反馈的开环控制。早期，经典控制理论称为自动调节原理。

9. 管理

管理 (Management) 是指为了充分利用各种资源达到一定的目标而对社会或其组成部分施加的一种控制。管理是一专门的学问，但借助计算机、计算机网络、数据库以及控制中的原理和方法实现管理自动化、办公自动化是自动化学科近年来研究、开发的领域之一。

10. 决策

决策 (Decision Making) 是指为最优地达到目标，对若干准备行动的方案进行选择。如何科学地进行决策是各项工作顺利开展的重要保证。这也是本学科近年来研究和新发展的新领域之一。

11. 反馈控制和扰动补偿

由反馈控制的基本结构 (图 1.2.2) 可以看出，控制器由误差引起了动作，因此在反馈控制系统的调节过程中误差的发生不可避免。而误差的产生是用来力图消灭误差。有时这会导致在调节过程中出现较大的误差甚至引起振荡。另一种消除被控制对象由于外界扰动引起误差的方法，称为扰动补偿 (Disturbance Compensation)。第二章中讨论的中国古代的指南车就是依据这个原理。扰动补偿的原理在于扰动进入被控对象的同时也进入对象前部的控制器 (图 1.2.3)。两个通道对的作用是相反的 (相互抵消的)，结果可使得对象的输出即被调量——方向维持近似不变。当然，如果补偿得好，也可以使被调量不变。扰动补偿形成了另一个回路，称为前馈回路 (Feedforward Loop)，或前馈通道。显然，要形成前馈通道，扰动作用必须是可测量的，同时还要设计扰动的补偿

环节。

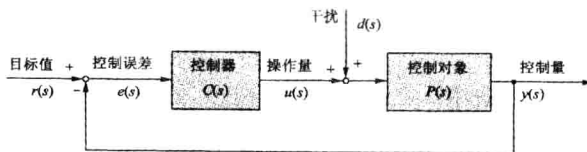


图 1.2.2 反馈控制系统

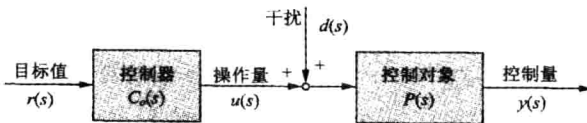


图 1.2.3 前馈控制系统

1.3 容错控制与可靠控制

容错的基本思想是由冯·诺伊曼在 1962 年提出。容错控制是当控制系统中的某些部件出现故障时，尽可能地利用“功能冗余”，通过控制手段使故障系统继续保持规定的性能或不丧失基本的性能，如稳定性等。主动容错是利用故障检测子系统，实现故障诊断与检测，根据监测结果采用相应的系统重组使系统实现容错的目的。被动容错控制，也称可靠控制，可靠控制是将系统可能发生的故障考虑在系统控制器的设计过程中。采用固定的这样设计的可靠控制器，确保闭环系统对特定故障的不敏感，保持稳定和其他规定的性能。

容错控制的最早的文献可以追溯到 1971 年，以 Niederlinski 提出完整性控制（Integralcontrol）的新概念为标志。Siljak 于 1980 年发表的关于可靠镇定的文章是最早开始专门研究容错控制的文章之一。然而，直到 1993 年，国际上才出现了由 IFAC 技术过程的故障诊断与安全性专业委员会主席 Patton 教授撰写的容错控制的综述文章，目前已有一些有关容错控制的专著问世。值得指出的是，我国在容错控制理论上的研究基本上与国外同步。

动态系统的故障检测与诊断（Fault Detection and Diagnosis, FDD）是容错控制的重要支撑技术之一。FDD 技术的发展已大大超前于容错控制的发展，其理论与应用成果也远远多于容错控制方面的成果。目前国际上每年发表的有关 FDD 方面的论文与报告在数千篇以上。基于解析冗余的故障诊断技术被公认为起源于 Beard 在 1971 年发表的博士论文。1976 年，Willsky 在 Automatica 上发表了第一篇 FDD 方面的综述文章。Himmelblau 于 1978 年出版了国际上第一本 FDD 方面的学术著作。

我国开始 FDD 技术的研究要比国外晚 10 年左右。清华大学的方崇智教授等从 1983 年起开始了 FDD 技术的研究工作。1985 年叶银忠等在《信息与控制》上发表了国内第一篇 FDD 技术的综述文章。1994 年周东华等在清华大学出版社出版了国内第一本 FDD 技术的学术专著。国际自动控制界对容错控制的发展给予了高度重视。1986 年 9 月在

美国 Santa Clara 大学举行的自动控制高峰会议上,把多变量鲁棒、自适应和容错控制列为控制科学面临的富有挑战性的研究课题。在国际上,领导着容错控制学科发展的是 1993 年成立的 IFAC 技术过程的故障诊断与安全性技术委员会。从 1991 年起 IFAC 每三年定期召开 FDD 与 FTC 方面的国际专题学术会议。在近几届的 IFAC 世界大会上, FDD 与 FTC 方面的论文在不断增加。据统计, 1999 年 7 月在北京召开的第 14 届 IFAC 世界大会上,这方面的学术论文已达 60 篇,成为了最热门的几个研究方向之一。容错控制发展至今只有 30 年左右的历史,因此这是一门新兴的交叉学科。尽管发展比较晚,时间比较短,但仍然取得了一些重要的应用成果。

可靠控制是近 30 年来发展起来的一门学科,随着故障模型和处理技巧的不断发展,可靠控制方兴未艾。本节就可靠控制的基本特征,研究的必要性,与鲁棒控制的联系与区别加以论述。中国有句古训:“是不当时固争,防祸与未然”,或曰:“君子之道,防患于未然”。可靠控制的基本思想是设计控制器,将系统部件可能发生的故障考虑在设计过程中,无论系统是否发生故障都能使闭环系统保持稳定,并仍具有较理想的性能指标。可靠控制的概念是由 Siljak 于 1980 年最先提出的,随后一些学者又对其进行了深入研究,一些可靠控制的方法相继提出。为了进一步说明可靠控制特征,可以想象用飞机作为一个例子。飞机通常有几个发动机,即使其中一个停止工作,其他的发动机还可以使飞机飞行。这里很重要的一点是在这个控制系统中存在较大的冗余。前面的例子使用两个执行器,每一个执行器本身都可以使系统稳定。如果不寻求较高的性能的话,没有必要同时使用两个执行器。也就是,这里存在着冗余。冗余是可靠控制的最基本的特征。

可靠镇定实际上是关于控制器的容错问题。针对单个被控对象,有人证明了当采用两个补偿器时,存在可靠镇定解的充要条件是被控对象是强可镇定的 (Strongly Stabilizable),也就是说,此对象可以被稳定的控制器所镇定。然而,当被控对象不满足强可镇定条件时,补偿器就会出现不稳定的极点,受到过程噪声的影响,闭环系统就会出现不稳定。两个补偿器的方法的另外一个缺点是,即使可靠镇定问题是可解的,怎样设计这两个补偿器也是一个非常困难的问题。为此也有学者给出了设计两个动态补偿器的参数化方法,以得到可靠镇定问题的解,同时,还给出了把一个稳定的控制器分解成两个并联的动态补偿器,进而实现可靠镇定问题的有效方法,但是,前提仍然是被控对象必须是强可镇定的。1993 年 Sebe. N 给出了一个新颖的可靠镇定问题的求解方法,即使对不是强可镇定的多变量系统依然有效,其设计思路是采用多个并列的动态补偿器(可大于两个)。与传统方法不同的是,这里每个补偿器需要其他补偿器的输出信号,因此就需要辅助的传感器来观测其他执行器的运行状况。至此,可靠镇定问题已基本上趋于成熟。

完整性问题也称作完整性控制 (Integral Control),它一直是被动容错控制中的热点研究问题。此问题之所以有很高的应用价值,是因为控制系统中传感器是最容易发生故障的部件。此问题研究的一般都是多输出多输入 (MIMO) 线性定常系统。1989 年,葛建华研究了关于执行器断路故障的完整性问题,提出了求解静态反馈增益阵的一种简单

的伪逆方法。然而,该方法并不能保证故障状态下的闭环系统是稳定的。基于线性特征系数理论及参数空间设计方法,1993年,叶银忠给出了关于执行器断路故障的完整性问题的求解方法。该方法的一个特点是可以在实现完整性的同时,在执行器的各种故障下,都可以将系统的闭环极点配置在预定的区域内。此方法在满足容错控制的条件下还可以兼顾闭环系统的动态特性。该方法的一个缺陷是,当系统的维数大于3时,解析解就不再存在,只能采用CAD技术来求数值解,并可能无解。由此可见,完整性问题还远未彻底解决。缺乏有效地求解容错控制律的构造性方法,尤其是对高维多变量系统。

联立镇定有两个主要作用。其一,当被控对象发生故障时,可以使其仍然保持稳定,具有容错控制的功能;其二,对非线性对象,经常采用线性控制方法在某一工作点上对其进行控制。当工作点变动时,对应的线性模型也会发生变化。此时,具有联立镇定能力的控制器就仍然可以镇定被控对象。此问题十几年来已引起了许多学者的关注。1982年Saeks R. 发表在IEEE Automatica Control上的文章是最早开始研究联立镇定问题的文章之一。1991年,Kabamba P T取得了重要进展,基于广义的采样数据保持函数,给出了联立镇定问题有解的充分条件,及其控制律的构造方法,以及在满足联立镇定的基础上同时实现线性二次型最优控制的充分条件,同时给出了控制律的构造方法。

可靠控制虽然在设计思路与不确定性系统的鲁棒设计相似,但两者有本质的差别。这些差别表现如下方面。第一,产生的原因不同:不确定性是由于系统在建模过程中对实际问题理想化而产生的,即舍去一些复杂的或不重要的因素。系统的鲁棒控制的设计就是使系统对这些忽略的因素具有抵御能力或具有不敏感性。系统的故障是系统中指定部件的故障,这种部件一般指传感器和执行器。可靠控制器的设计是考虑系统部件故障对系统的影响,所设计的可靠控制保证系统对可能出现的故障具有不敏感性。第二,在设计过程中方法也是不同的。系统的不确定性和系统部件故障虽然都是系统的不确定因素,但由于发生的位置不同,因此在处理技术上也有很大的区别。第三,不确定因素是连续的、相关的、长久的、有界的变化过程,系统部件的故障是分离的、无关的、暂时的、随机的变化过程。

20世纪80年代可靠控制产生到现在,一直备受人们的青睐,提出了许多可靠控制的方法。特别是线性系统的可靠控制问题,更为人们所关注,相继提出许多设计方法。这类可靠控制系统就是所知的具有完整性的控制系统,能够抵御执行器或传感器故障。1998年Fujita M利用现有的信息控制结构研究了提供冗余控制原理单一的意外事故可靠设计。1991年,Leland P M提出一个利用多传感器的可靠设计。1998年,Zhao Q研究了对于拥有执行器冗余可靠状态反馈控制系统,它具有修改冗余执行器通道的预补偿器补救办法。

如上可靠控制器设计的方法全都是基于一个基本假设:即将控制部件故障模型看成是中断的,也就是,当一个故障发生时,信号(在传感器时)或者控制行为(在执行器时)简单地变成零。这种简单的故障描述虽然可使控制器设计过程得到简化,但是却不能对实际故障进行准确的刻画。

2001年,杨光红首次将连续故障模型用在线性系统的可靠控制器的设计上。在连

续故障模型基础上,给出了解决线性系统可靠控制设计 Riccati 不等式方法,使所设计的可靠控制器保证闭环系统稳定和 H_2 性能。连续故障模型提出后引起人们的广泛关注。利用连续故障模型,2003 年王福忠给出了一类线性不确定系统的保性能可靠控制器 Riccati 不等式的设计方法;2001 年, Liu J. 利用连续故障模型的凸集表示,给出了考虑最小误差方差的可滤波器的设计;2002 年,杨光红给出线性离散系统的保性能可靠控制器的设计方法;2004 年,王福忠提出了区域极点配置的可靠控制问题,并设计可靠控制器使得系统在发生故障时仍将极点配置在指定的区域内。2004 年,姚波给出了一类线性不确定系统的参考信号的可靠跟踪问题。

上述所提出的设计思想都是分别针对执行器或者传感器出现故障的可靠设计。然而这种设计思想并不能实现系统的真正可靠。从仿真中可以看出,对于只考虑执行器故障所设计的可靠控制器,如果执行器无故障,而传感器出现故障,系统也可能失去原有的性能甚至失去稳定性。同样,考虑传感器故障的可靠系统同样会出现上述情况。但是如果同时考虑执行器和传感器故障所给出的设计方案具有较大的保守性。为了解决上述问题,2006 年,王福忠提出了双故障可靠设计思想。双故障可靠控制设计的基本思想是给出一种设计方案,使得系统能够抵御执行器或传感器任意之一出现故障。

综上所述,可靠控制理论的发展过程实质上是对故障模型的不断改进的过程。根据故障模型,可靠控制的发展可分为两个阶段。

第一阶段:“离散故障阶段”,以文献 [50] 和 [69] 为代表;第二阶段:“连续故障阶段”,以文献 [33] 为标志。

可靠设计是将系统部件可能出现的故障考虑在设计过程中,这样设计的系统不论部件是否出现故障都能保持系统原有设计性能。对系统实施可靠设计后,闭环系统对部件故障具有一定的抵御能力,但是,同时也会对闭环系统产生许多不良的影响,主要表现在:①闭环系统可靠反馈控制器的能量消耗较大;②闭环系统设计过程的保守性增大;③系统的性能指标有所下降等。为了克服可靠设计给系统带来的这些不良后果,人们转而研究利用增加系统可能出现故障部件的数量来提高系统的可靠性,这就是硬件冗余的可靠设计。硬件冗余是指增加系统关键部件数量,利用相同的部件采集系统同一通道的信号或采用多通道执行机构实现系统可靠控制任务。各通道部件冗余的数量取决于部件对系统某性能影响程度,所以各部件对系统影响程度的排序问题就非常重要了。

在硬件冗余的可靠设计过程中,为了确定系统各部件对系统影响程度的大小,2011 年,王福忠提出了可靠设计硬件冗余度的概念,并针对闭环系统的圆形区域的极点配置这一性能,利用动态输出反馈控制器,确定闭环系统传感器各信号通道增益误差的容忍区间,提出了各信号通道对闭环系统区域极点配置的影响因子概念,给出了传感器信号衰减和激增容忍区间及影响因子的算法。根据传感器各通道影响因子,设计者可以得到传感器各通道信号对系统影响程度的排序,这样可以给硬件冗余设计确定各通道传感器硬件冗余数量提供重要的参考数据。

参考文献

- [1] MAXWELL J C. On governors [M]. Proc. Roy. Soc. London, 1868.