



“十一五”国家重点图书·航天科学与工程系列丛书

MULTIVARIABLE ROBUST CONTROL SYSTEMS

多变量鲁棒控制系统

● 赵长安 贺风华 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



“十一五”国家重点图书·航天科学与工程系列丛书

MULTIVARIABLE ROBUST CONTROL SYSTEMS

多变量鲁棒控制系统

● 赵长安 贺风华 编著

常州大学图书馆
藏书章

东南大学出版社
SEAN EAST ASIAN PUBLISHING CO., LTD.

内 容 简 介

本书主要介绍多变量鲁棒控制系统时域和频域设计理论及相关的设计方法。全书由三部分组成。第一部分为不确定性控制系统的基本知识,不灵敏控制系统设计和定性及定量鲁棒控制系统设计;第二部分介绍频域方法之一——定量反馈理论(QFT);第三部分介绍最优鲁棒控制器设计。本书通过14章的论述,使读者对多变量鲁棒控制系统的分析与设计有较全面和深入的了解。

本书适用于研究生、高年级本科生及从事自动控制工作的科技人员。

Abstract

In this book, design theory and related design methodology in time and frequency domain for multiple variables control system is introduced. The book composes of three parts. The first part gives the preliminaries of uncertain control system, design of insensitive control system and quantitative or qualitative design of robust control system. The Quantitative Feedback Theory (QFT), that is one of frequency domain design methods, is given in the second part. The third part describes optimal robust controller design.

The goal of this book is to give the main principles and ubiquitous tools on robust control theory that emphasizes analysis and design for multiple robust control system. Its pedagogical objectives are to introduce a coherent and unified framework for studying robust control theory.

The book will be of value to senior undergraduate students, graduated students planning to do research in the area and engineers engaged in automatic control techniques.

图书在版编目(CIP)数据

多变量鲁棒控制系统/赵长安,贺风华编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2011.4

(航天科学与工程系列丛书)

ISBN 978-7-5603-2912-3

I. 多… II. 赵… III. 多变量控制:鲁棒控制 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 082196 号

责任编辑 杜 燕

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 肇东粮食印刷厂

开 本 787mm×960mm 1/16 印张 17.75 字数 380 千字

版 次 2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-2912-3

定 价 48.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

在过去的几十年中,鲁棒控制一直是控制领域研究的热点之一,由于实际系统工作状况变化、外部干扰和存在建模误差,使得不确定性在系统中广泛存在。所谓控制系统“鲁棒性”,是指控制系统在不确定性条件下保持稳定性和某些性能的特性,如何分析设计具有不确定性的系统,是鲁棒控制理论研究的课题。

1990 年作者出版了第一部《鲁棒控制系统》(宇航出版社)一书。由于该书内容新颖、丰富,特点突出,曾作为哈尔滨工业大学及有关高校的研究生教材。在此基础上,借鉴作者近十几年来的研究成果及教学经验,并综合大量国内外文献资料及应用成果,编著这本《多变量鲁棒控制系统》一书。

本书主要介绍鲁棒控制系统的多变量时域设计及相关的设计方法。全书共分 14 章。第 1 章为不确定性对象及其控制系统设计概述。第 2 章简介反馈控制理论。第 3 章介绍反馈灵敏度。第 4 章介绍低灵敏度控制系统设计。第 5 章介绍不确定性系统模型。第 6 章介绍系统定性鲁棒性分析与设计。第 7 章介绍系统镇定和特征值区域配置。第 8 章介绍有界不确定性系统的定量鲁棒性。第 9 章介绍鲁棒多变量 PI 控制器。第 10 章介绍 QFT 理论。第 11 章介绍 MISO LTI 对象控制器 QFT 综合。第 12 章介绍 MIMO LTI 对象控制器 QFT 综合。第 13 章介绍非线性对象控制器 QFT 综合。第 14 章介绍最优控制的鲁棒控制器设计。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,殷切希望广大读者批评指正。

作 者
2010 年 7 月

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 被控对象与性能指标	(1)
1.1.1 对象的复杂性	(1)
1.1.2 控制系统设计用的数学模型	(2)
1.1.3 模型不确定性	(3)
1.1.4 控制系统鲁棒性	(4)
1.1.5 性能指标	(5)
1.2 反馈控制系统设计概述	(8)
第 2 章 反馈控制理论简介	(14)
2.1 控制系统模型	(14)
2.1.1 时域描述	(14)
2.1.2 频域描述	(16)
2.1.3 算子描述	(16)
2.2 反馈系统稳定性	(17)
2.3 闭环特性的限制	(19)
2.4 LQ 控制器	(22)
2.5 控制系统设计问题	(23)
2.6 模型不确定性的特性描述	(28)
2.7 鲁棒性分析与设计的主要问题	(29)
第 3 章 反馈系统灵敏度	(31)
3.1 灵敏度的基本概念	(31)
3.1.1 时域灵敏度函数	(33)
3.1.2 频域灵敏度函数	(36)
3.2 线性系统的输出和轨迹灵敏度	(36)
3.3 反馈系统灵敏度分析	(39)
3.4 控制系统灵敏度综合	(41)



3.5 小结	(44)
第4章 低灵敏度控制系统设计	(46)
4.1 降低系统轨迹灵敏度设计法	(46)
4.1.1 增广系统法	(46)
4.1.2 线性最优调节器	(47)
4.1.3 Byrne 法	(48)
4.1.4 SCSOR 法	(50)
4.1.5 降低灵敏度次最优控制器设计	(53)
4.2 二自由度结构法	(61)
4.2.1 系统设计模型	(61)
4.2.2 标称等价	(62)
4.2.3 标称响应等价系统设计	(63)
4.2.4 标称性能指标等价系统设计	(64)
4.2.5 二自由度 Fleming 设计法	(65)
4.3 降低性能指标灵敏度设计法	(68)
4.3.1 降低性能指标灵敏度最优输出反馈控制	(68)
4.3.2 平均性能指标	(71)
4.3.3 降低性能指标灵敏度控制器设计方法	(73)
4.4 特征值灵敏度最小系统设计	(75)
第5章 不确定性系统模型	(80)
5.1 不确定性系统的建模	(81)
5.2 原始系统的样本	(82)
5.3 未知有界的不确定性系统	(82)
5.3.1 模型结构	(83)
5.3.2 不确定性边界	(83)
5.3.3 原始系统模型	(85)
5.3.4 时间域模型	(87)
5.3.5 非线性原始系统	(90)
5.3.6 圆锥扇形区域	(91)
5.3.7 未知有界不确定性系统建模	(92)



第 6 章 定性鲁棒性分析与设计	(93)
6.1 稳定储备	(93)
6.2 稳定度	(97)
6.3 奇异摄动系统的鲁棒性	(98)
6.4 高增益反馈	(102)
6.5 鲁棒性的代数描述	(107)
第 7 章 同时镇定和特征值区域配置	(110)
7.1 同时镇定	(110)
7.1.1 用状态反馈实现同时镇定	(112)
7.1.2 用动态控制器实现同时镇定	(113)
7.2 特征值区域配置	(114)
7.2.1 特征值区域配置概念	(114)
7.2.2 特征值 Γ 域至 P_r 域的映射	(116)
7.2.3 $\mathcal{P}$ 空间至 $\mathcal{K}$ 空间的映射	(119)
7.2.4 $\mathcal{K}$ 空间设计法	(122)
7.3 同时极点区域配置(对参数大范围变化的镇定)	(125)
7.4 设计实例——飞行器鲁棒控制器设计	(133)
7.4.1 飞行器数学模型	(133)
7.4.2 对飞行条件的鲁棒性	(134)
7.4.3 传感器失效的鲁棒性	(135)
第 8 章 有界不确定系统的定量鲁棒性	(139)
8.1 闭环原始系统描述	(139)
8.2 频域稳定判据	(144)
8.2.1 范数有界不确定性	(145)
8.2.2 元素幅值限制不确定性	(147)
8.2.3 不稳定摄动	(148)
8.2.4 非线性摄动	(149)
8.3 I/O 稳定性的时域判据	(150)
8.4 I/O 性能分析	(152)
8.5 多变量鲁棒控制器设计	(156)
8.6 状态空间模型的鲁棒性分析	(157)



第9章 鲁棒多变量 PI 控制器	(160)
9.1 鲁棒多变量 PI 控制器	(160)
9.1.1 闭合回路稳定的必要条件	(161)
9.1.2 模型精度	(162)
9.1.3 低增益反馈系统稳定条件	(163)
9.1.4 鲁棒 PI 控制器的构成	(165)
9.2 PI 控制系统鲁棒性	(165)
9.2.1 PI 锅炉控制器	(167)
9.2.2 化工过程 PI 控制器设计	(169)
9.3 多变量 PI 控制器的调整	(173)
9.3.1 用静态模型调整	(174)
9.3.2 确定系统动态模型及分析	(174)
9.3.3 按动态模型调整	(177)
第10章 QFT 理论	(180)
10.1 引言	(180)
10.2 QFT 概述	(181)
10.3 Nichols 图及其在 QFT 中的应用	(187)
10.4 QFT 设计用对象模型及性能指标	(188)
第11章 MISO LTI 对象控制器 QFT 综合	(192)
11.1 单自由度系统	(192)
11.1.1 稳定储备	(193)
11.1.2 灵敏度降低	(194)
11.1.3 边界计算	(195)
11.1.4 控制力问题	(197)
11.1.5 设计实例	(198)
11.2 二自由度系统	(199)
11.3 指标边界计算	(200)
11.3.1 应用对象模板计算	(200)
11.3.2 闭环形式算法	(202)
11.4 设计实例	(203)



第 12 章 MIMO LTI 对象控制器 QFT 综合	(208)
12.1 单自由度反馈系统	(208)
12.1.1 干扰作用在对象输入处	(209)
12.1.2 干扰作用在对象输出处	(216)
12.2 二自由度反馈系统	(220)
第 13 章 非线性对象控制器 QFT 综合	(224)
13.1 概述	(224)
13.1.1 线性时不变等价传递函数	(224)
13.1.2 Schauder 定点定理	(224)
13.1.3 用 Golubev 传递函数表示系统特性	(225)
13.2 非线性 SISO 对象鲁棒控制器设计	(226)
13.2.1 按跟踪指标综合	(226)
13.2.2 按对象输出为零综合	(231)
第 14 章 基于最优控制的鲁棒控制器设计	(236)
14.1 线性系统鲁棒控制器设计	(236)
14.1.1 满足匹配条件的不确定性系统	(236)
14.1.2 不满足匹配条件的不确定性系统	(239)
14.1.3 输入矩阵存在不确定性	(242)
14.2 非线性系统鲁棒控制器设计	(245)
14.2.1 匹配不确定性系统	(245)
14.2.2 不满足匹配条件的不确定性系统	(249)
14.2.3 输入矩阵存在不确定性	(254)
14.2.4 输入矩阵存在不匹配不确定性	(256)
14.3 振动系统鲁棒阻尼控制器设计	(257)
14.3.1 问题描述	(257)
14.3.2 鲁棒阻尼设计	(259)
14.3.3 仿真	(261)
14.4 机械手的鲁棒控制	(264)
14.4.1 机械手动力学模型	(264)
14.4.2 鲁棒控制器设计	(265)
14.4.3 仿真	(266)
参考文献	(271)

第 1 章 概 述

1.1 被控对象与性能指标

随着生产力的飞速发展,被控制的对象越来越复杂,而要求的控制精度越来越高。这就要求控制理论和方法不断发展以适应新的要求。众所周知,对象的复杂性是阻碍控制理论发展的一个重要因素。

1.1.1 对象的复杂性

在自然界特别在工程领域中,被控制的对象都是很复杂的。对象的复杂性主要表现在:

1. 对象(系统)一般都是由大量相互关联的子对象(子系统)组成;
2. 对象的不同部分具有不同的任务和不同的优先级别,这些任务可能同时完成或依次完成;
3. 对象工作的环境一般是变化的;
4. 对象在工作过程中,不断受到内外干扰的影响;
5. 对象具有非线性特性、混沌特性和预先未知的动态行为。

第3,4和5项的客观存在,使对象具有不确定性。对象的复杂性导致被控对象具有复杂的动态行为。从定量角度讲,需要用大量的多输入-多输出、高阶数学模型来描述;从定性角度讲,涉及非线性、干扰、结构和参数不确定性,多设计目标和性能指标。这样,一个复杂对象需要用一组高阶、非线性、时变和具有不确定性的偏微分方程描述。

为了处理复杂的被控对象,通常的方法是将对象进行分解,分解方法有:

1. 面向任务分解(task-oriented)。这种分解是功能分解,它将对象分解为几个子系统,各子系统具有不同的任务和优先级别。
2. 面向目标分解(object-oriented)。这种分解是将对象分为几个实体(子系统),分别加以处理。
3. 面向时间分解(time-decomposition)。这种分解是将对象在时域内分为几个模态,分别加以处理。

在完成复杂对象相应的分解后,建立分解后的子系统和模态模型。这样有利于对象的描述和对控制系统进行分析和设计。



1.1.2 控制系统设计用的数学模型

要分析和设计控制系统,必须先建立被控对象的数学模型。用古典控制理论、最优控制理论分析和设计系统时,要求知道对象的精确数学模型。

以最优控制为例。近半个世纪来,应用最优控制理论进行线性控制系统设计已取得很大的进展。以二次型性能指标为目标函数的最优线性控制器设计已为人们所熟知。为分析和设计这类控制器,已研究出完整而有效的设计算法和计算机设计程序。这种设计方法尽管在理论上具有重要意义和比较完善,但它要求知道对象的精确数学模型。在实际控制工程设计中,由于对象的复杂性和不确定性,人们不可能获得对象的精确数学模型,这就极大地阻碍了最优控制理论的应用。这就是为什么至今为止在控制工程中很少见到最优控制理论的直接应用实例。

为了应用已有的控制理论分析和设计系统,设计用的对象设计模型都是近似的。一般而言,对象的模型有四种,即

1. 实际的物理系统:客观存在的系统。
2. 理想物理模型:将一个实际的物理系统按结构分解成理想的子结构块而得到的模型。
3. 理想数学模型:将自然法则应用到理想物理模型上而得到的模型,通常是用高阶、时变、非线性偏微分方程描述。
4. 简化数学模型:由理想数学模型通过线性化、降阶、集中化、合并处理等方法而得到的数学模型,通常用线性微分方程或传递函数来表示。

在工程控制系统设计中,一般都是应用简化的数学模型。这是因为人们不可能完全精确地了解对象的工作机理、结构和参数,加上不确定性的存在,不可能获得精确的数学模型。为了便于从理论上进行分析与设计,通常均采用对象的简化数学模型。为此,常对数学模型进行处理。

1. 应用降阶理论,将对象的实际高阶模型处理成低阶模型,如工程上采用的舍阶法(truncation)和保留法(residualization)。

2. 应用线性化方法,将实际的非线性对象模型处理成线性模型。常用的线性方法有小偏差线性化、谐波线性化、统计线性化、精确线性化和伪线性化方法等。

3. 常用集中参数对象模型近似代替实际的分布参数对象模型。

4. 常用时不变对象模型代替时变对象模型。

上述对象模型的处理导致了模型的不确定性(model uncertainty)。以线性系统为例,处理后的近似模型通常可用三种类型的数学模型描述。

1. 输入 - 输出描述

用传递函数描述对象,如图 1.1 所示。

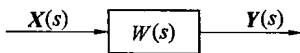


图 1.1 输入 - 输出描述



$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

式中, $X(s)$ 为对象的输入的拉氏变换; $Y(s)$ 为对象的输出的拉氏变换。

2. 状态方程描述

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad x(0) = x_0$$

式中, $x \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 为状态向量; $u \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ 为控制向量; A 为 $n \times n$ 维系统矩阵; B 为 $n \times m$ 维输入矩阵。

3. 微分算子描述

$$P(D)z(t) = Q(D)u(t)$$

式中, $z \in \mathbb{R}^{l \times 1}$ 为分状态向量; $u \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ 为控制向量; D 为微分算子。

1.1.3 模型不确定性

系统行为的不确定性是由于干扰或对象动态摄动而引起的。干扰是外界信号,它既不可由对象输入信号控制,也不与对象内部变量有关。模型不确定性是描述模型和实际系统的不一致性。

产生模型不确定性的原因有:

1. 由系统知识的不完整而引起的。例如,模型方程的结构是由基本的物理和工程定律所决定的,而其参数值只能在容差范围内。又如,如果在设计控制器时被控对象还在建造,则需对静态和动态行为作某些估计,因而不能精确描述。如果对象参数是由实验估计,则不确定性依赖于实验过程中的干扰大小。

2. 由于对模型进行处理而引起的不确定性。尽管原始系统完全已知,但为了简化或避免完整模型的复杂性带来的困难,而对模型进行处理。例如,在执行机构、传感器和测量元件中的弹性动力学经常被忽略。

3. 由不适合的模型结构而引起的不确定性。如用确定的线性模型来描述系统,则参数变化和非线性将被忽略。从控制上讲,传感器和执行机构失效,将改变或限制对象的输入-输出特性,参数的漂移或由工作点的变动而引起参数变化,均引起这种类型的不确定性。

由上可知,不确定性是指知道一个实际系统的输入,不能准确地预计其输出。

对不确定性进行描述,在控制领域中常用的有四种模型,即

1. 随机模型:不确定性用某种分布来描述。
2. 统计模型:建立在抽样实验基础上,能够得到不确定因素的估计值和统计特性(如期望值和方差)。
3. 模糊模型:用隶属函数来定量描述不确定性。
4. 未知有界模型:只知道不确定性的边界。

在上述四种模型中,未知有界模型所含的不确定性的信息量最小。针对不确定性的四种描



述,分别出现了四种控制理论和方法。

针对随机模型,出现了随机控制理论(stochastic control);针对统计模型,出现了自适应控制理论(adaptive control);针对模糊模型,出现了模糊控制理论(fuzzy control);针对未知有界模型,出现了鲁棒控制理论。

本书将讨论未知有界不确定性对象模型。这种模型通常用一有界集合 P 来表示。若对象模型用传递函数描述,则有:

1. 参数不确定性模型:模型的结构不变化,而仅参数变化。例如

$$P = \left\{ P(s) = \frac{ka}{s(s+a)}; k \in [1, 10], a \in [1, 5] \right\}$$

式中, $P(s)$ 的结构不变,参数 k 和 a 在 $[1, 10]$ 和 $[1, 5]$ 范围内变化。

2. 结构不确定性模型:模型的结构变化,而参数不变化。例如

$$P = \{P(s) = P_0(s)(1 + \Delta_m(s)): |\Delta_m(j\omega)| < R_m(\omega), \Delta_m(s) \text{ 稳定} \}$$

式中, $P_0(s)$ 为对象的标称传递函数; $\Delta_m(s)$ 为不确定项; $R_m(\omega)$ 为不确定项的界函数。

3. 混合型不确定性模型:模型的结构和参数都变化。例如

$$P = \left\{ \begin{array}{l} P(s) = \frac{ka}{s(s+a)}(1 + \Delta_m(s)) \\ k \in [1, 10], a \in [1, 5], |\Delta_m(j\omega)| < R_m(\omega), \Delta_m \text{ 稳定} \end{array} \right\}$$

1.1.4 控制系统鲁棒性

在进行控制系统设计时,人们往往希望用一个简化的模型来代替实际模型。然而,实际被控对象的特性不会因为人们对它的描述不同而发生变化,也不会因为对其简化而有所变化。因此,如果用一个简化的模型代替实际的被控对象模型,并根据简化模型设计一个符合性能指标的控制器,这时,人们最关心的是,当将设计好的控制器接入实际系统后,实际系统能否保持稳定?它的实际品质偏离要求的品质是多少?现在的问题是,应研究出一种理论方法,在设计中采用简化模型,并考虑系统的不确定性设计一个控制器,使整个实际的闭环系统仍然保持稳定,并使系统的品质在人们可以接受的要求范围内,这就是具有不确定性系统的鲁棒控制器的设计问题,其结果是所设计系统具有鲁棒性。

鲁棒性包括稳定鲁棒性和品质鲁棒性。一个控制系统是否具有鲁棒性,是它能否真正实际应用的关键。因此,现代控制系统的设计已将鲁棒性作为一种最重要的设计指标。

为了解决控制系统的鲁棒性问题,近年来主要出现了两个主攻方向:一个是主动式(active)适应技术,即通常称的自适应控制系统设计技术。它应用辨识方法不断了解系统的不确定性,并在此基础上调整控制器的结构与参数,从而使系统满足性能指标要求。另一种是被动式(passive)适应技术,即一般称的鲁棒控制设计技术。对具有不确定性的系统设计一个控制器,使系统在不确定性范围内工作时,满足系统的设计性能指标要求。



采用自适应控制要应用辨识理论并解决复杂的数学问题,实现比较复杂,且自适应系统本身仍存在鲁棒性问题(如辨识的不精确)。而采用鲁棒控制可使控制器设计简单,易于实现,可以充分利用古典和最优控制的理论成果,不需要对系统进行辨识。

控制系统的鲁棒性是指系统在不确定性的扰动下,具有保持某种性能不变的能力。如果对象的不确定性可用一个集合 P 描述,考察控制系统的某些性能指标,如稳定性、品质指标等,设计一个控制器,如果该控制器对对象集合中的每个对象都能满足给定的性能指标,则称该控制器对此性能指标(特性)是鲁棒的。因此,在谈到鲁棒性时,必须要求有一个控制器,有一个对象集合和某些系统性能。对控制系统来说,两个重要的鲁棒概念是:稳定鲁棒性和品质鲁棒性。

稳定鲁棒性:一个控制器如果对集合 P 中的每一个对象都能保证系统稳定,则是鲁棒稳定的。

品质鲁棒性:一个控制器如果对集合 P 中的每一个对象都能保证系统稳定和一种特定品质,则认为是品质鲁棒的。

鲁棒控制理论的目标是要建立不确定性系统的分析和设计方法,使系统具有强的鲁棒性。应用反馈来设计鲁棒控制系统是建立在被控对象不完整描述的基础上,这区别于线性多变量控制系统设计,它要求对象的数学模型预先精确已知。

1.1.5 性能指标

由于系统存在不确定性,从工程应用的观点出发,要求设计一个控制器,使系统能够具有良好的性能。这些性能包括稳定性、抑制干扰、渐近调节、快速性、鲁棒性、完整性和可靠性。因此,不确定性控制系统的性能指标(定性)如下。

1. 稳定性(stability):闭环系统是稳定的。
2. 调节性(regulation):系统具有渐近跟踪性能,能够抑制干扰,保证要求的稳态精度。
3. 快速性(high speed):系统能够快速稳定和跟踪。
4. 低交互性(low interaction):系统各通道之间的相互影响小。
5. 鲁棒性(robustness):当系统具有不确定性时,系统保持所要求特性的能力。
6. 完整性(integrity):当系统中传感器/执行机构部分失效时,系统仍能稳定良好地工作。
7. 可靠性(reliability):系统能够长时间正常工作。

在古典控制理论中,所涉及的对象是精确已知的,即没有考虑对象中的不确定性。因而所要求的性能指标不包括鲁棒性、完整性和可靠性。而在鲁棒控制系统中,则必须要求满足上述的所有性能指标。

在性能指标中,稳定性是控制系统得以正常工作的先决条件,因为一个不稳定的控制系统是无从谈及其他性能指标的。调节性是对系统的精度要求,它一般有两种提法:频域和时域描述。在频域中,要求系统的灵敏度函数(或其矩阵)在某个频带内很小,这样能有效地抑制外部



干扰,保证系统的跟踪精度。在时域中,要求在某种已知指令信号或扰动信号的激励下,系统具有小的静态误差和最小动态误差的跟踪能力。鲁棒性的要求是考虑到在实际工程中被控对象总是存在不确定性,或对象的参数和结构随工作状态而变化,因此除了要求系统中某些工作状态下能够稳定工作外,还要求其在参数变化时或在不确定性的扰动下,还能保持很高的稳定性和要求的某些性能。完整性的要求是考虑到复杂的控制系统(多输入-多输出系统),其部分测量元件或执行机构在工作过程中可能失效,从而影响系统的稳定性和性能,这时要求所设计系统在出现上述失效时,仍能保证系统的良好稳定工作状态。

研究图 1.2 所示的反馈系统。传递函数 $P(s)$ 是属于不确定性的一个集合 $\{P\}$ 。 $G(s)$, $F(s)$, $H(s)$ 为控制器、预滤波器和传感器的传递函数。闭环回路性能指标一般是用时域指标和频域指标来表征。时域指标是与给定输入时特定的输出响应相联系,而频域指标是与时域指标相类似的频域描述。

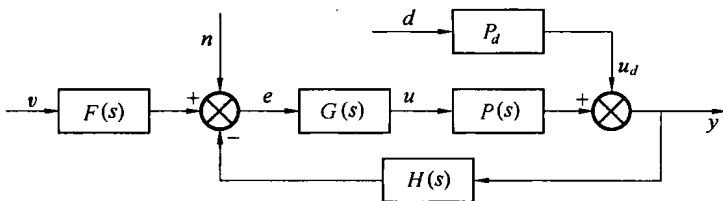


图 1.2 反馈控制系统结构图

图中,给定对象 P 的输入为控制器输出 u , d 为干扰, y 为输出; v 为外加指令。

时域指标

闭环回路性能指标一般是用对象的输入和输出信号来描述。这些信号应是有界的,系统应在给定区域内且具有期望的输出。例如:

1. 对给定的初始条件或干扰,系统的输出应接近于零。性能指标的形式可能为:系统的输出将限制在规定的时域函数内。
2. 系统的输出应跟踪一个给定的期望输入(伺服系统)。由于系统存在不确定性,期望输出应限制在上下两个时域函数之间。

频域指标

闭环系统的频域指标是用系统的某个输入到某个输出传递函数模型的不等式描述,它们是:

1. 对对象干扰的抑制(灵敏度):对任意一个对象 $P \in \{P\}$,由对象输出处干扰至输出的传递函数受到的限制为

$$\left| \frac{y}{u_d} \right| = \left| \frac{1}{1 + L(j\omega)} \right| < \delta_s(\omega)$$

式中, $L = PGH$, 为系统的开环传递函数。



2. 对对象输入干扰的抑制:对任意一个对象 $P \in \{P\}$, 由对象输入处干扰至输出的传递函数受到的限制为

$$\left| \frac{y}{u} \right| = \left| \frac{P}{1 + L(j\omega)} \right| < \delta_p(\omega)$$

3. 模型匹配:对任意一个对象 $P \in \{P\}$, 由 v 至 y 的传递函数与给定的最优传递函数 $F_m(j\omega)$ 之间的距离受到的限制为

$$\left| \frac{y}{v} - F_m \right| = \left| \frac{PGF(j\omega)}{1 + L(j\omega)} - F_m(j\omega) \right| < \delta_m(\omega)$$

4. 跟踪:对任意一个对象 $P \in \{P\}$, 由 v 至 y 的传递函数的幅值受到的限制为

$$\alpha(\omega) \leq \left| \frac{PGF(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| \leq \beta(\omega)$$

5. 噪声抑制:对任意一个对象 $P \in \{P\}$, 由传感器的输出到对象输出受到的限制为

$$\left| \frac{y}{n} \right| \leq \left| \frac{PG(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| < \delta_n(\omega)$$

6. 控制作用:对任意一个对象 $P \in \{P\}$, 由传感器的输出到对象输入受到的限制为

$$\left| \frac{u}{n} \right| \leq \left| \frac{G(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| < \delta_c(\omega)$$

对性能指标 1 ~ 4, 下面关系成立(为简单起见, 令 $H = 1$)

$$\begin{aligned} \lim_{|G(j\omega)| \rightarrow \infty} \left| \frac{1}{1 + L(j\omega)} \right| &= 0 \\ \lim_{|G(j\omega)| \rightarrow \infty} \left| \frac{P(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| &= 0 \\ \lim_{|G(j\omega)| \rightarrow \infty} \left| \frac{LF(j\omega)}{1 + L(j\omega)} - F_m \right|_{F=F_m} &= 0 \\ \lim_{|G(j\omega)| \rightarrow \infty} \frac{\max_{P(j\omega)} \frac{LF(j\omega)}{1 + L(j\omega)}}{\min_{P(j\omega)} \frac{LF(j\omega)}{1 + L(j\omega)}} &= 1 \end{aligned}$$

当控制器的幅值增加时, 对象输出对干扰的响应减小, 对象输出对跟踪指令的灵敏度减小。我们称这种指标是“紧的”(tighter)。紧的性能指标要求大的 $|G(j\omega)|$ 。这意味着大的开环增益 $|L(j\omega)|$ 和高的剪切频率。紧的性能指标意味着高的带宽。

现在来看性能指标 5 和 6。大的 $|G(j\omega)|$ 意味着增加了对象的输入和对传感器噪声的放大。性能指标 5 中使用的传递函数为 $L/(1 + L)$, 它一般是一个低通滤波器, 用于处理传感器噪声, 其带宽为 $\omega_b (L(j\omega_b) \approx -3\text{dB})$ 。大的 $|G(j\omega)|$ 意味着增加了由噪声至对象输出之间的低通滤波器传递函数的带宽 ω_b , 因而增加了对象输入和输出对噪声的响应。同样可对性能指标 6 进行解释。因此, 设计问题就是如何处理好性能指标 1 ~ 4 与 5, 6 之间的折中。



1.2 反馈控制系统设计概述

控制系统是生产制造中的一个核心部分,它能使被控过程按预期的要求运行,其性能的好坏将直接影响产品的性能。在工程技术领域,大部分控制系统是基于反馈原理,其框图如图1.3所示。

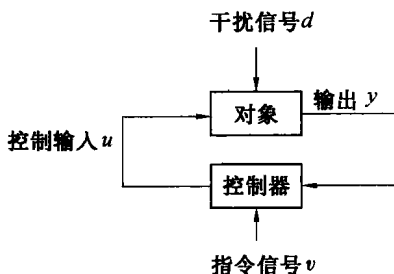


图 1.3 反馈控制系统框图

系统中的对象是具有动态和含不可预知特性的技术实体,其输出 y 由控制器的输出 u 控制,而 u 依赖于对象的输出 y ,这就构成了闭环的反馈系统。显然,系统对象的输出 y 与指令信号 v ,干扰信号 d 和对象本身的特性有关。

这里将从控制工程师的观点来研究反馈控制系统,要求设计一反馈控制器,在对象具有不确定性时,保证系统的稳定性、调节性、快速性、低耦合性、鲁棒性和完整性。

图 1.3 所示的反馈控制系统的结构如图 1.2 所示。系统可用方程

$$\begin{aligned} y &= Pu + P_d d \\ u &= G(Fv - Hy + n) \end{aligned}$$

描述。若系统为线性时不变(Linear Time Invariant, LTI)系统,应用 Laplace 变换,系统可描述为

$$\begin{aligned} y &= [I + L]^{-1} [PGFv + PGn + P_d d] \\ u &= [I + GHP]^{-1} [GFv + Gn - GHP_d d] = \\ &P^{-1} [I + L]^{-1} P [GFv + Gn - GHP_d d] \end{aligned} \quad (1.1)$$

式中, $L = PGH$ 。这里 $u = u(v, y)$, 为反馈结构。

为了说明反馈的优点,先研究一下开环系统,其框图如图 1.4 所示。

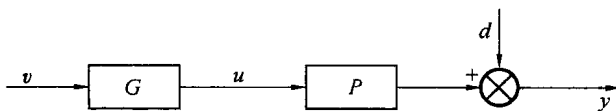


图 1.4 开环系统框图