

可下载教学资料

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



高等学校教材
电子信息

现代控制理论

张莲 胡晓倩 王士彬 余成波 编著

清华大学出版社



0231/73

2008

高等学校教材
电子信息

现代控制理论

张莲 胡晓倩 王士彬 余成波 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是一本适应 21 世纪教学需要的、阐述现代控制理论基础知识的教材。本书包含了现代控制理论中的主要理论和方法,全书共分 7 章,着重讲述了状态空间描述的建立、系统定量分析(状态方程的解)、系统的定性分析(能控性、能观性、李雅普诺夫稳定性)、系统的综合(状态反馈与状态观测器设计)以及最优控制的 3 种基本方法(变分法、最小值原理、动态规划法);并在保证理论知识体系结构完整的前提下,介绍 MATLAB 在现代控制理论中的应用。全书结构清晰,便于读者从整体上掌握现代控制理论的基本内容。

本书由浅入深,论证与实例配合紧密,富有启发性。全书注意各章节之间内容的衔接及与经典控制理论中有关内容的联系,可读性强,便于课堂教学与自学。主要算法给出了应用 MATLAB 求解的方法,使读者通过本书的学习,既能打下扎实的理论基础,又能掌握应用 MATLAB 对控制系统进行分析与设计的技能。每章末附有一定数量的习题,主要用以检验、理解基本概念以及熟练分析和设计方法。

本书既可作为高等院校自动化、电气工程等专业本科和非自动化专业研究生教材,也可供从事自动化方面工作的科技人员学习参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

现代控制理论/张莲,胡晓倩,王士彬,余成波编著. —北京:清华大学出版社,2008.1

(高等学校教材·电子信息)

ISBN 978-7-302-16073-1

I. 现… II. ①张… ②胡… ③王… ④余… III. 现代控制理论—高等学校—教材
IV. O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 139118 号

责任编辑:魏江江 李 晔

责任校对:白 蕾

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印 刷 者:北京市昌平环球印刷厂

装 订 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:24.75 字 数:598 千字

版 次:2008 年 1 月第 1 版 印 次:2008 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:35.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:024998-01

改改革开放以来,特别是党的十五大以来,我国教育事业取得了举世瞩目的辉煌成就,高等教育实现了历史性的跨越,已由精英教育阶段进入国际公认的大众化教育阶段。在质量不断提高的基础上,高等教育规模取得如此快速的发展,创造了世界教育发展史上的奇迹。当前,教育工作既面临着千载难逢的良好机遇,同时也面临着前所未有的严峻挑战。社会不断增长的高等教育需求同教育供给特别是优质教育供给不足的矛盾,是现阶段教育发展面临的基本矛盾。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2001年8月,教育部下发了《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》,提出了十二条加强本科教学工作提高教学质量的措施和意见。2003年6月和2004年2月,教育部分别下发了《关于启动高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作的通知》和《教育部实施精品课程建设提高高校教学质量和人才培养质量》文件,指出“高等学校教学质量和教学改革工程”是教育部正在制定的《2003—2007年教育振兴行动计划》的重要组成部分,精品课程建设是“质量工程”的重要内容之一。教育部计划用五年时间(2003—2007年)建设1500门国家级精品课程,利用现代化的教育信息技术手段将精品课程的相关内容上网并免费开放,以实现优质教学资源共享,提高高等学校教学质量和人才培养质量。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上;精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合新世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻

性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。首批推出的特色精品教材包括:

(1) 高等学校教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 高等学校教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 高等学校教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 高等学校教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 高等学校教材·信息管理与信息系统。

(6) 高等学校教材·财经管理与计算机应用。

清华大学出版社经过二十年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会
E-mail:dingl@tup.tsinghua.edu.cn

“现代控制理论”是在自动控制、电气工程、信息工程以及计算机技术学科发展基础上建立起来的一门理论与实践相结合的课程。随着科技的发展,现代控制理论的概念、方法和体系已经渗透到许多学科领域。学科的交叉发展要求高级工程技术人员必须更多地了解和掌握其他相近学科、专业的知识。因此,对于自动化以及相关专业的本科生,以及一些非控制类专业的硕士生,学习现代控制理论的基础知识并掌握利用 MATLAB 分析、设计控制系统的方法是时代的要求。

为适应我国高等教育人才培养的要求,改革本课程体系和更新教学内容已成为一项十分迫切的重要任务。针对现代控制理论基础具有理论性强、内容抽象的特点,本书着重基本概念和理论的阐述,精选内容,注重应用,并尽量做到深入浅出、理论联系实际、结构清晰,从整体上介绍现代控制理论的基本内容,以适应控制理论教学改革需要和 21 世纪对人才培养的要求。

本书强调状态空间控制理论与工程实践问题紧密结合,注重对读者分析问题和解决实际问题能力的培养,具有如下特色:

(1) 结构清晰,便于读者从整体上掌握现代控制理论的基本方法。本书贯穿了动态系统在状态空间数学模型基础上的定量分析→定性分析→极点配置→最优反馈控制这一结构主线;

(2) 注重物理概念,避免繁琐数学推导,论证与实例配合紧密,易于理解,突出现代控制理论的工程应用背景,便于读者运用理论知识解决实际问题;

(3) 在阐述现代控制理论的基本方法时注意与经典控制理论基本方法的联系与比较;

(4) 在保证理论知识体系结构完整的前提下,介绍 MATLAB 在线性系统理论和最优控制中的应用;

(5) 每章均附有较丰富的例题、习题、上机实验题,便于读者自学,并有利于读者的计算机应用能力和研究能力的提高。

全书共分 7 章,阐述现代控制理论的最基本内容,包括控制理论的发展,状态空间的基本概念,状态空间描述的建立和标准型,系统的运动分析,能控性与能观性的概念与判据,系统的结构分解与实现,应用李雅普诺夫法分析系统的稳定性,极点配置、状态反馈和状态观测器,以及最优控制理论等。在每章后面分别介绍了

MATLAB在现代控制理论中的一些应用,以及如何利用计算机辅助设计方法解决自动控制领域的一些系统分析和设计问题。每章的习题主要用以检验、理解基本概念和熟练分析和设计方法。

全书由余成波统稿。参加编写的有张莲(第1章~第3章)、胡晓倩(第4章~第6章)、王士彬(第7章)。胡柏栋、李泉、秦华锋、谢东坡、龚智、许超明等同志参加了本书部分章节的编写工作。

本书在编写过程中,参阅了很多专著及文献,同时许多兄弟院校的同行为本书的编写提出了宝贵意见和提供了帮助,在此,一并表示衷心感谢。

本书可作为高等院校自动化、电气工程等专业本科和非自动化专业研究生教材,也可供从事自动化方面工作的科技人员学习参考。

由于水平有限,书中难免有错误和不当之处,敬请广大的国内同行与读者给予批评与指正。

编 者

2007年6月

第 1 章 绪论	1
1.1 控制理论的发展	1
1.2 现代控制理论中的两个重要概念	2
1.2.1 系统的能控性	2
1.2.2 系统的能观性	3
1.3 现代控制理论的主要内容	3
1.4 本书研究的主要内容	5
第 2 章 状态空间描述	7
2.1 状态空间分析法	7
2.1.1 动力学系统	7
2.1.2 例子	8
2.1.3 状态变量和状态向量	10
2.1.4 状态空间与状态空间描述	11
2.1.5 线性定常系统状态空间描述的一般形式	12
2.2 状态结构图	18
2.2.1 状态结构图绘制的基本方法	18
2.2.2 一阶系统的状态结构图	18
2.2.3 三阶单输入-单输出系统的状态结构图	19
2.2.4 二输入-二输出二阶系统的状态结构图	19
2.3 状态空间描述的建立	20
2.3.1 由系统结构图建立状态空间描述	20
2.3.2 由系统机理建立状态空间描述	23
2.4 状态空间描述的标准形式	26
2.4.1 传递函数中无零点时的实现	27
2.4.2 传递函数有零点时的实现	35
2.5 由状态空间描述求传递函数阵	43
2.5.1 传递函数(阵)	43

2.5.2	组合系统的传递函数阵	45
2.6	状态向量的线性变换	48
2.6.1	状态空间表达式的非唯一性	48
2.6.2	系统特征值的不变性和系统的不变性	51
2.6.3	状态空间表达式变换为约当标准型	54
2.7	离散系统的状态空间描述	60
2.7.1	状态空间表达式	60
2.7.2	脉冲传递(函数)矩阵	63
2.8	状态空间的 MATLAB 描述	64
2.8.1	数学模型的建立	64
2.8.2	模型间的转换	66
2.8.3	组合系统的传递函数阵	71
2.8.4	线性变换	72
	本章小结	75
	习题	75
第 3 章	线性系统的运动分析	78
3.1	线性定常系统状态方程的齐次解(自由解)	78
3.1.1	幂级数法	78
3.1.2	拉氏变换法	79
3.2	状态转移矩阵	81
3.2.1	状态转移矩阵的含义	81
3.2.2	状态转移矩阵的基本性质	82
3.2.3	几个特殊的矩阵指数函数	85
3.2.4	状态转移矩阵的计算	88
3.2.5	由状态转移矩阵求系统矩阵	94
3.3	线性定常系统非齐次状态方程的解	96
3.3.1	积分法	96
3.3.2	拉氏变换法	97
3.3.3	特定输入下的状态响应	97
3.4	线性时变系统的运动分析	100
3.4.1	线性时变系统齐次状态方程的解	101
3.4.2	状态转移矩阵 $\phi(t, t_0)$ 的基本性质	101
3.4.3	状态转移矩阵 $\phi(t, t_0)$ 的计算	102
3.4.4	线性时变系统非齐次状态方程的解	105
3.4.5	线性时变系统的输出	106
3.5	线性系统的脉冲响应矩阵	106
3.5.1	线性时变系统的脉冲响应矩阵	106
3.5.2	线性定常系统的脉冲响应矩阵	107

3.5.3	传递矩阵与脉冲响应矩阵的关系	108
3.5.4	利用脉冲响应矩阵计算控制系统的输出	109
3.6	连续系统的离散化	109
3.6.1	问题的提出	109
3.6.2	基本假设	110
3.6.3	线性定常系统的离散化	110
3.6.4	近似离散化	111
3.6.5	线性时变系统的离散化	113
3.7	线性离散系统的运动分析	113
3.7.1	线性定常离散系统方程的解	114
3.7.2	线性时变离散系统状态方程的解	117
3.8	基于 MATLAB 的运动分析	118
3.8.1	基于 MATLAB 的线性定常系统的运动分析	118
3.8.2	基于 MATLAB 的线性离散系统的运动分析	122
	本章小结	126
	习题	126
第 4 章	系统的能控性与能观性	129
4.1	线性定常系统能控性定义及判据	129
4.1.1	能控性基本概念	129
4.1.2	能控性定义	130
4.1.3	能控性判据	132
4.1.4	输出能控性及判据	138
4.2	线性定常系统能观性定义及判据	139
4.2.1	能观性基本概念	139
4.2.2	能观性定义	140
4.2.3	能观性判据	141
4.3	线性时变系统的能控性与能观性	147
4.3.1	线性时变系统的能控性判据	147
4.3.2	线性时变系统的能观性判据	150
4.4	离散定常系统的能控性与能观性	152
4.4.1	离散定常系统能控性定义及判据	152
4.4.2	离散定常系统能观性定义及判据	155
4.4.3	连续系统的能控性、能观性与离散系统的能控性、能观性之间的关系	156
4.5	对偶原理	159
4.5.1	线性系统的对偶关系	159
4.5.2	对偶原理	160
4.6	能控标准型与能观标准型	161
4.6.1	单输入系统的能控标准型	161

4.6.2	单输出系统的能观测标准型	164
4.7	系统的结构分解	166
4.7.1	基本概念	166
4.7.2	按能控性分解	167
4.7.3	按能观性分解	169
4.7.4	标准分解	172
4.8	传递函数阵的实现	176
4.8.1	实现的基本概念	176
4.8.2	多输入-多输出系统的能控性与能观性实现	176
4.8.3	最小实现	178
4.9	传递函数与能控性和能观性之间的关系	181
4.9.1	单输入-单输出系统能控性、能观性与传递函数之间的关系	181
4.9.2	多输入-多输出系统的能控性、能观性与传递函数阵之间的关系	184
4.10	利用 MATLAB 分析能控性与能观性	185
4.10.1	常用函数	185
4.10.2	控制实例	186
	本章小结	193
	习题	193
第 5 章	控制系统的稳定性	197
5.1	外部稳定性与内部稳定性	197
5.1.1	外部稳定性	198
5.1.2	内部稳定性	198
5.2	Lyapunov 定义下的稳定性	199
5.2.1	系统的平衡状态	200
5.2.2	状态向量范数	201
5.2.3	Lyapunov 意义下的稳定性定义	201
5.2.4	外部稳定性与内部稳定性之间的关系	206
5.3	Lyapunov 判稳第一法	206
5.3.1	线性定常系统的稳定性分析	207
5.3.2	线性时变系统的稳定性分析	208
5.3.3	非线性系统的稳定性分析	209
5.4	Lyapunov 判稳第二法	210
5.4.1	Lyapunov 第二法的基本思想	211
5.4.2	标量函数 $V(x)$ 的符号性质 (Sign)	212
5.4.3	二次型标量函数的符号性质	212
5.4.4	Lyapunov 第二法的稳定性判据	213
5.5	Lyapunov 法在线性系统中的应用	218
5.5.1	Lyapunov 矩阵方程	218

5.5.2	Lyapunov 矩阵方程在线性定常系统稳定性判别中的应用	219
5.5.3	基于 Lyapunov 第二法的线性时变系统的稳定性分析	221
5.5.4	线性定常离散系统的稳定性	222
5.5.5	用 Lyapunov 函数估算系统响应的快速性	223
5.6	Lyapunov 第二法在非线性系统中的应用	225
5.6.1	克拉索夫斯基法	226
5.6.2	阿塞尔曼法	228
5.7	基于 Lyapunov 第二法的参数最优问题	230
5.7.1	线性二次型最优控制问题	230
5.7.2	参数最优问题的 Lyapunov 第二法的解法	231
5.8	基于 Lyapunov 第二法的模型参考控制系统	233
5.8.1	模型参考控制系统	233
5.8.2	控制器的设计	234
5.9	基于 MATLAB 的稳定性分析	236
5.9.1	稳定性分析的常用函数	236
5.9.2	基于 MATLAB 的稳定性分析实例	237
	本章小结	240
	习题	240
第 6 章	系统的综合	242
6.1	基本概念	242
6.1.1	引言	242
6.1.2	性能指标的类型	243
6.1.3	线性反馈系统的基本结构	243
6.2	极点配置与状态反馈	245
6.2.1	期望极点对系统动态性能的影响	245
6.2.2	状态反馈与极点配置	246
6.2.3	单变量系统极点配置定理	247
6.2.4	状态反馈下闭环系统的镇定问题	254
6.3	输出反馈	256
6.3.1	输出反馈至矩阵 B 后端	256
6.3.2	输出反馈至矩阵 B 前端	258
6.3.3	状态反馈与输出反馈的比较	259
6.4	状态重构与状态观测器	259
6.4.1	开环状态观测器	260
6.4.2	闭环全维状态观测器	260
6.4.3	配置状态观测器反馈增益矩阵 G 的方法	263
6.4.4	降维状态观测器	266
6.5	带状态观测器的状态反馈系统	271

6.5.1	系统的结构与数学模型	271
6.5.2	闭环系统的基本特性	272
6.5.3	具有降阶观测器的观测-状态反馈控制系统	275
6.6	解耦控制系统	277
6.6.1	系统解耦基本原理	278
6.6.2	用前馈补偿器实现解耦	279
6.6.3	用串联补偿器实现解耦控制	279
6.6.4	用输入变换和状态反馈实现解耦控制	281
6.6.5	解耦系统的综合控制	285
6.7	稳态精度与渐近跟踪	290
6.7.1	稳态精度与跟踪问题	290
6.7.2	内模原理	291
6.7.3	无静差跟踪控制系统的设计	293
6.7.4	倒立摆的无静差(I型)位置跟踪系统设计	294
6.8	基于MATLAB的系统综合	300
6.8.1	常用函数指令	300
6.8.2	应用举例	300
	本章小结	310
	习题	311
第7章	最优控制	314
7.1	基本概念	314
7.2	变分法在最优控制中的应用	316
7.2.1	泛函与变分法的基本概念	316
7.2.2	泛函极值	318
7.2.3	横截条件	319
7.2.4	条件极值	323
7.3	极小值原理	329
7.3.1	连续系统的极小值原理	329
7.3.2	离散系统的极小值原理	334
7.4	动态规划	337
7.4.1	最优性原理	340
7.4.2	离散系统的动态规划	340
7.4.3	连续系统的动态规划	342
7.4.4	变分法、极小值原理与动态规划	344
7.5	线性二次型最优控制	347
7.5.1	线性二次型问题	347
7.5.2	状态调节器	349
7.5.3	输出调节器	352

7.5.4 输出跟踪问题	353
7.6 实用最优控制系统	354
7.6.1 电机拖动控制	354
7.6.2 人造地球卫星姿态控制	357
7.6.3 二级倒立摆控制	359
7.7 运用 MATLAB 求解最优控制问题举例	362
本章小结	365
习题	365
附录 A 常用符号表	368
附录 B 向量空间与矩阵理论的基本知识	369
附录 C MATLAB 软件中常用控制指令说明	374
参考文献	377

绪 论

1.1 控制理论的发展

控制理论始于技术,是从解决生产实践问题开始的。人类利用控制技术的历史可以追溯到几千年前,但是把控制技术在工程中的一些规律加以总结提高,进而以此去指导和推进工程,形成控制理论,并作为一门独立的学科存在和发展,则是从 20 世纪中叶开始的。美国数学家维纳(N. Wiener)于 1948 年出版的《控制论——关于在动物和机器中控制和通信的科学》,标志着控制论作为科学的一个重要分支正式诞生,具有重要的影响。我国著名科学家钱学森在 1954 年出版的《工程控制论》又进一步推动了控制论与工程技术的密切结合。随着科学技术的发展,控制理论显得越来越重要。它不仅在现代工程技术领域中获得了广泛的应用,而且在经济学、生物学和医学领域中也受到了极大的重视。根据发展的不同阶段,控制理论可分为经典控制理论和现代控制理论两大部分。

经典控制理论以传递函数为基础,研究单输入-单输出的自动控制系统的分析和设计问题,主要研究方法有时域分析法、频率特性法、根轨迹法。通常采用反馈控制,构成所谓的闭环控制系统。经典控制理论的研究对象、数学方法和计算手段与当时的社会需要和技术水平密切相关,它不仅推动了当时自动化技术的发展和普及,而且在今天许多工程和技术领域中仍有广泛应用。

但是经典控制理论存在着局限性,主要体现在以下几个方面:

(1) 只适用于单输入-单输出线性定常系统。对于时变系统、复杂非线性系统和多输入-多输出系统则无能为力;

(2) 其设计方法基本上是基于图线试探(根轨迹、频率法设计)的工程近似方法,只能根据幅值裕度、相位裕度、超调量、调整时间等性能指标来确定校正装置,很大程度上依赖于设计者的经验。对于同一个系统,同一个要求,可以设计出若干性能和质量不同的系统,而无法确定某种意义下的最优性能;

(3) 无法考虑系统的初始条件,只能分析零初始条件的系统,且不利于使用计算机分析和控制;

(4) 只能揭示系统输入-输出间的外部特性,难以完全揭示系统内部的动态特性。

从 20 世纪 50 年代末开始,科学技术的突飞猛进,特别是核能技术、空间技术和各种高速飞行器的发展,使被控对象要求高速度、高精度,从而出现了更加复杂的多输入-多输出系

统、非线性系统和时变系统。而且对系统的控制性能要求也更高,很多情况下要求系统的某些性能是最优的,对环境的变化要有一定的适应能力等。这些新的控制要求用经典控制理论是无法满足的。

科学技术的发展不仅需要迅速地发展控制理论,同时也给控制理论的发展准备了两个重要的条件——现代数学和数字计算机。现代数学,例如泛函分析、线性代数等,为现代控制理论提供了多种多样的分析工具;与此同时,计算机在技术上有了重大突破,高速、高精度的数字计算机相继出现,为现代控制理论的发展提供了强有力的工具,使控制理论的研究和应用成为可能。在这种背景下,建立在状态概念基础上的现代控制理论应运而生了。庞特里亚金(Понтрягин)极小值原理、贝尔曼(Bellman)动态规划理论以及卡尔曼(Kalman)滤波理论具有重要意义,被视为现代控制理论的阶段的三大标志。

现代控制理论是以矩阵理论等作为数学工具,采用状态空间法,在时域内对系统进行分析与设计的控制理论;它研究系统各状态的运动规律,并按照所要求的各种指标最优为目的来改变系统的运动规律。与经典控制理论相比,现代控制理论具有许多突出的优点:

- (1) 研究对象可以是多输入-多输出、线性的或非线性的、定常或时变系统、集中参数或分布参数系统;
- (2) 现代控制理论采用的分析方法是时域的,时域分析法对于控制过程来说是直接的;
- (3) 现代控制理论设计系统的方法是基于确定一个控制规律或最优控制策略的,采用这种控制方法可以使得某个性能指标为极小;
- (4) 在现代控制理论的综合步骤中能够考虑任意初始条件;
- (5) 现代控制理论能提供一系列的解析方法,设计者只需要从事分析研究,所有的数值计算都可借助于计算机完成。

20世纪60年代以后,现代控制理论还在继续发展,并形成了几个分支学科:线性系统理论、最优控制理论、自适应控制、动态系统辨识、大系统理论等。

现代控制理论是在经典控制理论的基础上发展起来的,虽然二者在数学工具、理论基础和研究方法上有着本质的区别,但对动态系统进行分析研究时,两种理论可以互相补充、相辅相成。当今,频率法在吸收新的理论后,已发展成为现代频率法,并已成为现代控制理论的一个重要组成部分。

1.2 现代控制理论中的两个重要概念

能控性(controllability)和能观性(observability)可以深刻揭示系统的内部结构关系,是卡尔曼于20世纪60年代初首先提出的,是现代控制理论的两个最重要的概念。它是系统定性分析的主要内容,也是系统综合时的结构条件和理论基础。

1.2.1 系统的能控性

假设如图1.1所示的系统,有一组输入函数(控制函数) $u(t)$ 作用在动态系统上,其相应状态变量是 $x(t)$,通过量测系统可得到这些状态的某些组合为 $y(t)$ 。其方程可以表示为

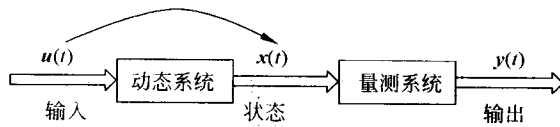


图 1.1 系统能控性说明

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (1.1)$$

若存在输入 $u(t)$, 能在有限时间 $[t_0, t_f]$ 内, 使系统由任意初始状态 $x(t_0)$ 变为所希望的指定状态 $x(t_f)$, 则称此状态是能控的。若系统所有状态都是能控的, 则称系统是完全能控的, 简称系统能控, 即可以完全通过输入去控制系统的每一个状态。

1.2.2 系统的能观性

假设如图 1.2 所示的系统, 有一组输入函数(控制函数) $u(t)$ 作用在动态系统上, 其相应状态变量是 $x(t)$, 通过量测系统可得到这些状态的某些组合为 $y(t)$ 。其方程可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (1.2)$$

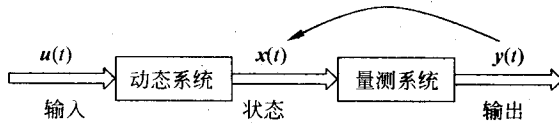


图 1.2 系统能观性说明

如果对于任意给定的输入 $u(t)$, 使得根据有限时间 $[t_0, t_f]$ 内测得的系统的输出 $y(t)$ 能唯一地确定系统在初始时刻的状态 $x(t_0)$, 则称状态 $x(t_0)$ 是能观测的。若系统的每一状态都是能观测的, 则称系统是状态完全能观测的, 简称系统能观。即能够通过输出量在有限时间内的测量, 去识别系统的状态。

1.3 现代控制理论的主要内容

现代控制理论是对系统的状态进行分析和综合及建模的理论, 其内容是极其广泛和丰富的, 但其基本内容可以概括为以下几个方面。

1. 线性系统理论

线性系统理论是现代控制理论中理论最完善、技术较成熟、应用最广泛的部分。它揭示了系统的内在规律, 是从能控性、能观性两个基本概念出发, 研究系统的极点配置、状态观测器设计和抗干扰的一般理论。