



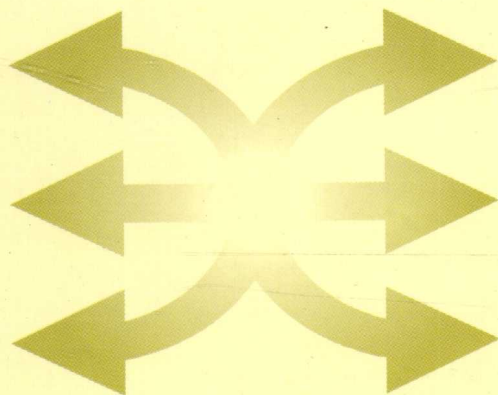
随书附光盘一张

普通高等院校“十一五”规划教材

自适应控制 与应用

ZISHIYING KONGZHI YU YINGYONG

陈复扬 姜斌 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

院校“十一五”规划教材

自适应控制与应用

陈复扬 姜斌 主编

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

自适应控制与应用/陈复扬,姜斌主编. —北京:国防工业出版社,2009.6

普通高等院校“十一五”规划教材

ISBN 978-7-118-06299-1

I. 自... II. ①陈...②姜... III. 自适应控制 - 高等学校 - 教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 057079 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 23 字数 529 千字

2009 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 40.00 元(含光盘)

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

自适应控制是在控制方式的发展过程中产生的,为了解决实际问题,控制方式从古典控制方式中的开环控制发展到闭环控制,一直到现代控制方式中的最优控制发展到容错控制、鲁棒控制、自适应控制、智能控制。

自适应控制技术经过多年发展,形成了一股强大的研究阵营,现今控制界的学术文献 60% 都与自适应有关。目前,自适应控制技术的发展基本呈现出三大研究方向:①加大了自适应控制技术的控制方式的基础性研究;②将自适应控制技术与其他科学技术进行融合以改善控制效果;③将自适应控制技术投入实际运用,并且运用到各行各业中,不局限于以往的自然科学领域,扩大自适应控制应用的范围,使自适应控制从实践—理论—实践的循环往复的发展中前进。

随着自适应控制基础性研究成果的日渐成熟以及自适应技术与相关技术融合的活跃,自适应控制应用性研究非常热门。自适应控制技术的应用领域不断扩大,从开始的航空、航海、电力拖动等领域逐渐向其他工业部门扩展,并逐渐被市场所认可,随着自适应控制技术的广泛应用,自适应控制技术渐渐向非自然科学领域渗透,人文科学、管理科学以及艺术领域都有涉及,近年来成果卓著。

高等学校为了适应目前市场需求,正着力培养复合型人才,尤其南京航空航天大学是一所以工科为基础的多科型综合性大学,具有跨学科领域特性的通识教育课程对本科教学计划中的课程设置更具重要参考意义。以自然科学类课程自适应控制为基础,在跨学科领域推广自适应控制技术,以自适应控制与应用为龙头通识教育课程,加以自适应控制、自适应与管理控制等课程,逐步形成跨学科课程知识体系,尤其将自适应控制与应用建设成通识教育课程面向全校本科生开课。使工科学生开拓视野在各个领域中充分运用自适应控制知识解决实际问题,同时也可使其他学科领域的学生充分运用自适应控制知识解决各自研究领域中的疑难问题。本书就是在这个背景下编写的。

本书为南京航空航天大学 2005 年校教改项目“自适应控制与应用通识教育课程体系建设”主要研究内容,该项目获南京航空航天大学 2007 年教学成果三等奖。

编者为 2008 年“自动控制系列课程”国家级教学团队成员,2003 年首批国家精品课程《自动控制原理》主要建设者。

本书由陈复扬主编,各章编写作者有姜斌(第一、二章)、盛守照(第三、四章)、王

晶(第十章)、陈复扬(其余各章及内容简介、前言、附录等)。应当指出,本书在酝酿到编写以及成稿,是一个不断完善、不断提高的过程。在此感谢《自动控制原理》主编胡寿松教授对编者的多年培养,感谢《控制工程基础》主编孟宪蕃副教授多年来对编者的支持,特别感谢屈蔷、刘剑慰对该书的大力支持。

由于水平有限,对于书中存在的错误和不妥之处。恳请广大读者不吝指正。

编者 Email: chenfuyang@nuaa.edu.cn

网址: <http://chfy.nuaa.edu.cn/1-zshykh/zshykh.htm>

编者

2009年2月

目 录

第一章 自动控制基础	1
1.1 自动控制概述	1
1.2 经典控制理论发展历程	3
1.2.1 稳定性理论的早期发展	4
1.2.2 负反馈放大器及频域理论的建立	5
1.2.3 根轨迹法的建立	6
1.2.4 脉冲控制理论的建立与发展	6
1.3 自动控制系统的组成与控制方式	7
1.3.1 自动控制系统的组成	7
1.3.2 自动控制系统的的基本控制方式	10
1.3.3 不同输入信号作用下的控制方式	12
1.4 自动控制系统的建模	12
1.4.1 控制系统的数学模型	13
1.4.2 控制系统数学模型的建立	17
1.5 自动控制系统的性能	24
1.5.1 对控制系统的性能要求	24
1.5.2 控制系统的性能指标	27
1.6 现代控制理论的发展	28
第二章 自适应控制概述	31
2.1 自适应控制的产生	31
2.2 自适应控制的定义	33
2.3 自适应控制的基本原理和类型	34
2.3.1 自适应控制的基本原理	34
2.3.2 按自适应控制系统的结构形式分类	34
2.3.3 按干扰影响分类	38
2.4 自适应控制的理论问题	38
2.5 自适应控制的应用概况	39
2.6 自适应控制的国内外最新研究进展	42
第三章 用局部参数最优化理论设计模型参考自适应系统	47
3.1 引言	47
3.2 模型参考自适应控制系统的数学描述	47

3.2.1	用状态方程描述模型参考自适应系统	48
3.2.2	用输入输出方程描述模型参考自适应系统	49
3.2.3	模型参考自适应系统的误差方程	50
3.3	模型参考自适应控制系统设计的假设条件	52
3.4	具有可调增益的模型参考自适应系统的设计(MIT 方案)	53
3.4.1	MIT 方案问题提出	54
3.4.2	MIT 方案自适应控制律推导	54
3.4.3	MIT 方案存在的问题	56
3.4.4	MIT 方案数字算例	56
3.4.5	MIT 方案应用实例	58
3.5	单输入单输出自适应系统的设计	67
3.6	局部参数最优化方法设计模型参考自适应系统注意事项	70
第四章	用李雅普诺夫稳定性理论设计模型参考自适应系统	71
4.1	李雅普诺夫稳定性的概念及基本定理	71
4.1.1	平衡状态	71
4.1.2	李雅普诺夫意义下稳定性定义	73
4.1.3	李雅普诺夫意义下稳定性定理	73
4.1.4	李雅普诺夫第二法的应用	74
4.2	用可调系统的状态变量构成自适应规律的设计方法	76
4.2.1	自适应控制律推导	76
4.2.2	数字算例	78
4.3	用被控对象的输入输出构成自适应规律的设计方法	79
4.3.1	具有可调增益的自适应控制系统的设计	79
4.3.2	单输入单输出自适应控制系统的设计	84
4.3.3	数字算例	85
4.4	基于李雅普诺夫稳定性理论设计自适应控制律应用实例	88
4.4.1	汽车减振系统自适应控制律设计	88
4.4.2	倒立摆自适应控制律设计	90
4.4.3	飞行控制系统的自适应控制律设计	92
4.4.4	导弹制导控制系统的自适应控制律设计	95
4.4.5	弹性结构振动抑制的自适应控制律设计	99
4.4.6	飞机起落架系统自适应控制律设计	103
4.4.7	图像导引头角跟踪系统自适应控制律设计	106
第五章	用超稳定性理论设计模型参考自适应系统	111
5.1	超稳定性理论的概念及基本定理	111
5.1.1	绝对稳定性问题	111
5.1.2	超稳定性问题	112

5.1.3	正实性问题	113
5.1.4	正实性与超稳定性等价定理	121
5.2	用超稳定性理论设计模型参考自适应系统	122
5.2.1	用状态变量设计模型参考自适应系统	123
5.2.2	用输入输出测量值设计模型参考自适应系统	129
5.3	基于超稳定性理论设计自适应控制律应用实例	133
5.3.1	室内温度控制系统自适应控制律设计	133
5.3.2	纵向飞行控制系统自适应控制律设计	134
5.3.3	喂线机控制系统自适应控制律设计	138
5.3.4	直接转矩控制系统自适应控制辨识转速	141
5.3.5	自动导向车系统自适应控制律设计	144
第六章	自校正控制	149
6.1	自校正控制基本概念	149
6.2	系统辨识	151
6.2.1	参数估计方法	151
6.2.2	闭环系统的辨识	165
6.3	单输入单输出最小方差自校正调节器	174
6.3.1	预测模型	174
6.3.2	最小方差控制	176
6.3.3	具有参考输入增量最小方差控制	178
6.4	单输入单输出自校正控制器	179
6.4.1	加权最小方差控制	179
6.4.2	自校正控制系统的闭环稳定性质	183
6.5	极点配置自校正控制技术	184
6.5.1	参数已知时的极点配置调节器	184
6.5.2	加权最小方差自校正控制器的极点配置	187
6.6	战术导弹的自校正控制	188
6.6.1	战术导弹模型建立	189
6.6.2	自动驾驶仪自校正控制方案选择	191
6.6.3	自动驾驶仪自校正控制方案中的参数辨识	192
6.6.4	自动驾驶仪自校正控制方案的数字仿真研究	193
第七章	自适应控制与城市道路交通管理	196
7.1	城市道路交通管理控制系统建模	196
7.1.1	城市道路交通管理	196
7.1.2	道路交叉口通行能力	197
7.2	道路交叉口信号控制系统	198
7.2.1	道路交叉口通行能力计算方法	198

7.2.2	道路交叉口信号控制的类别	199
7.2.3	单个交叉路口定时控制	200
7.2.4	十字交叉路口信号控制系统设计	203
7.3	自适应控制在十字路口交通控制中的应用	212
7.3.1	动态车流量模型	212
7.3.2	基于 MIT 自适应控制改善动态车流量效果	213
7.3.3	城市道路交通管理其他控制方案的应用	216
第八章	自适应控制与人力资源管理	218
8.1	人力资源管理	218
8.1.1	人力资源管理概念	218
8.1.2	21 世纪人力资源管理	219
8.1.3	人力资源开发与可持续发展	220
8.2	自适应控制在车间生产管理控制中的应用	225
8.2.1	车间生产管理控制建模	226
8.2.2	自适应控制在车间生产管理控制中的应用	229
8.3	自适应控制在生产计划与管理中的应用	240
8.3.1	生产计划与管理的经典控制	240
8.3.2	生产计划与管理的自适应控制	242
8.4	自适应控制在最优捕鱼策略中的应用	244
8.4.1	最优捕鱼策略的经典控制	245
8.4.2	最优捕鱼策略的自适应控制	249
8.5	自适应控制在平衡记分卡中的应用	251
8.5.1	平衡记分卡	251
8.5.2	基于自适应控制的平衡记分卡模型	257
第九章	自适应控制与歌唱艺术	262
9.1	音乐歌唱中的控制原理	262
9.1.1	基本音乐知识	262
9.1.2	歌唱艺术中的控制原理	263
9.2	自适应控制在歌唱艺术中的应用	268
9.2.1	歌唱环节的建模	268
9.2.2	歌唱过程中的自适应控制方式描述	271
9.2.3	自适应控制对歌唱艺术的改善	273
第十章	自适应控制与产业结构	277
10.1	产业结构基本概念	277
10.1.1	产业与产业结构	277
10.1.2	影响和决定产业结构的因素	279

10.1.3	产业结构演变规律	281
10.1.4	产业结构的升级与优化	283
10.2	产业结构定性分析	285
10.2.1	产业结构的系统分析方法	285
10.2.2	影响产业结构的相关变量	286
10.2.3	产业结构定性分析模型	286
10.3	产业结构量化分析	287
10.3.1	投入产出分析法	287
10.3.2	产业结构方程的建立	288
10.3.3	产业结构量化模型框图的建立	289
10.4	产业结构自适应控制分析	291
10.4.1	产业结构模型变化的一般规律	291
10.4.2	产业结构自适应控制方案的选择	295
10.4.3	产业结构自适应控制方案的参数计算	297
10.4.4	仿真分析的过程及其结果	297
附录 1	自适应控制技术综合应用实例	299
实例一	多参数自适应控制的混沌同步及其在保密通信中的应用	299
实例二	基于 MCS 自适应控制算法的机翼颤振抑制	305
实例三	基于自适应观测器的 MIMO 系统执行器故障调节	310
实例四	利用自适应模糊滑模控制设计倒立摆控制系统	313
实例五	无人直升机动态逆神经网络自适应姿态控制律设计	317
附录 2	历年考题集锦	333
I	工科研究生课程《自适应控制》考试试题(南京航空航天大学)	333
试卷 01	:2007 ~ 2008 学年第 2 学期《自适应控制》考试试题	333
试卷 02	:2007 ~ 2008 学年第 1 学期《自适应控制》考试试题	335
试卷 03	:2006 ~ 2007 学年第 1 学期《自适应控制》考试试题	337
II	自动化专业选修课程《自适应控制与应用》考试试题(南京航空航天大学)	339
试卷 04	:2008 ~ 2009 学年第 1 学期《自适应控制与应用》考试试题	339
试卷 05	:2006 ~ 2007 学年第 2 学期《自适应控制与应用》考试试题	341
试卷 06	:2005 ~ 2006 学年第 2 学期《自适应控制与应用》考试试题	344
试卷 07	:2004 ~ 2005 学年第 2 学期《自适应控制与应用》考试试题	347
III	校公共选修课程《自适应控制与应用》考试试题(南京航空航天大学)	349
试卷 08	:2007 ~ 2008 学年第 2 学期《自适应控制与应用》考试试题	349
历年考题部分参考答案		352
试卷 01	:2007 ~ 2008 学年第 2 学期《自适应控制》试题答案	352
试卷 02	:2007 ~ 2008 学年第 1 学期《自适应控制》试题答案	352

试卷 03:2006 ~ 2007 学年第 1 学期《自适应控制》试题答案	352
试卷 04:2008 ~ 2009 学年第 1 学期《自适应控制与应用》试题答案	352
试卷 05:2006 ~ 2007 学年第 2 学期《自适应控制与应用》试题答案	352
试卷 06:2005 ~ 2006 学年第 2 学期《自适应控制与应用》试题答案	353
试卷 07:2004 ~ 2005 学年第 2 学期《自适应控制与应用》试题答案	353
试卷 08:2007 ~ 2008 学年第 2 学期《自适应控制与应用》试题答案	354
参考文献	355

第一章 自动控制基础

1.1 自动控制概述

整个人类社会的发展历史也可以说是人类利用各种控制手段获取能量进而改造外界环境的历史。从控制论的观点出发，人类社会发​​展至今已经经历了两个时代：人力时代和机械化时代，现在开始步入第三个时代——自动化时代。

历时数万年的手工时代直到 1788 年才宣告结束。这一年英国人瓦特改进的蒸汽机在工业中得到应用，自此人类社会开始了机械化时代。

自动化时代的到来得益于电磁波的发现和电子管、半导体、集成电路、无线电以及电子计算机等的先后问世。这些技术几乎同步解决了信息变换的速度问题。同时不可忽视的是伴随着这些技术的先后问世，控制这门科学也开始正式确立起来，并且经历了长足的发展。客观上也为自动化时代的到来做好了理论准备。事实上，自动化并非是什么高深莫测的概念，在我们的日常生活中有很多东西体现了自动控制原理。小到抽水马桶，大到航天飞机、宇宙飞船都是自动控制应用的具体体现。我们的生活与自动控制息息相关，自动控制在每时每刻都发挥着巨大的作用。

使用完抽水马桶，按下后面的按钮，水箱内的水会将马桶冲洗干净，并且水箱内的水位将会恢复原来水位，此时水箱会停止进水。稍稍分析一下抽水马桶的工作原理我们就会发现，这个简单的生活装置体现了自动控制技术中一个非常重要的原理——负反馈控制。

空调是现代生活中非常常见的家用电器，很难想象在今天的城市生活中少了空调会是怎样一种情景。这个用来调节小气候的装置也是自动控制技术发展的产物。当我们设定好温度之后，空调中的温度传感器会定时测量周围环境的温度并且与设定的温度做比较，并以此为根据判断下一步应该是制冷还是制热。而这也是反馈原理的一个非常典型的案例。

工业生产中的流水线装置很多就是自动控制技术的产物，人只需要完成比较简单和轻松的那部分工作，而大部分的工作则由机器来完成。工业自动化是自动控制技术发展的起源和最初的应用领域。

自动控制技术的研究、应用和推广，对人类的生​​产、生活等方式将产生深远影响。生产过程自动化和办公室自动化可极大地提高社会生产率和工作效率，节约能源和原材料消耗，保证产品质量，改善劳动条件，改进生产工艺和管理体制，加速社会的产业结构的变革和社会信息化的进程。

控制(Control)是指为了改善系统的性能或达到特定目的，通过信息的采集和加工而

施加到系统的作用。控制是主要为了达到某种目的使用的基本手段。信息是控制的基础，把这个发挥控制作用的系统称为控制系统(Control System)。

如图 1.1.1 所示，我们伸手去取一件物品的过程就是一个控制的过程。大脑通过神经系统传递控制信息操控手移向目标物品，眼睛将手和物品的距离等信息传递给大脑，并由大脑将此信息进行处理后决定前进方向，再将此结论用于操作手的动作。整个过程虽然简单迅速，但是不失为一个完整的控制过程。

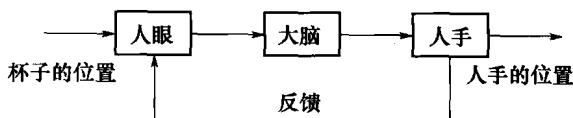


图 1.1.1 人手取杯子过程

一个控制系统无论结构多么复杂都是由以下几部分组成。

(1) 检测比较装置。所起作用相当于人眼在上面例子中的作用，主要是获得反馈，并且计算我们要达到的目的与现在的实际情况之间的差值。

(2) 控制器。所起作用相当于大脑在上面例子中的作用，主要是用来决定应该怎样做。

(3) 执行机构。主要所起作用相当于人手在上面例子中的作用，完成控制器下达的决定。

(4) 控制量。也就是所要达到的目的，相当于手和杯子之间的距离。控制量是自动控制机器所要达到的最终目的。

自动控制(Automatic Control)指在无人直接干预的情况下，利用外加的设备或装置(简称控制装置或控制器)，使机器、设备或生产过程等(统称被控对象)的某一工作状态或参数(称被控量，如温度、压力、PH 值等)自动、准确地按照预期的规律运行。

自动控制系统(Automatic Control System)是指实现上述控制目的，由相互制约的各部分按一定规律组成的具有特定功能的有机整体。

控制器(Controller)用来加工信息产生控制信号，是控制系统的核心。

控制算法(Control Algorithm)是控制信号随误差信号变化的规则，是控制理论研究的中心。

反馈(Feedback)是把输出量(信号/信息)传输出去后，又将其取出送回到输入端，并与输入信号相比较产生偏差信号，再对控制系统的再输出产生影响的过程。前面提到的抽水马桶、空调等就是应用了反馈原理。

反馈控制系统(Feedback Control System)是基于反馈原理建立的自动控制系统。在反馈控制系统中，既存在由输入到输出的信号前向通路，也包含从输出端到输入端的信号反馈通路，两者组成一个闭合的回路。因此，反馈控制系统又称为闭环控制系统。反馈控制是自动控制的主要形式。在工程上常把在运行中使输出量和期望值保持一致的反馈控制系统称为自动调节系统，而把用来精确地跟随或复现某种过程的反馈控制系统称为伺服系统或随动系统。如图 1.1.2 所示。

反馈控制系统包括：

(1) 负反馈(Negative Feedback): 凡反馈信息的作用与控制信息的作用方向相反，对

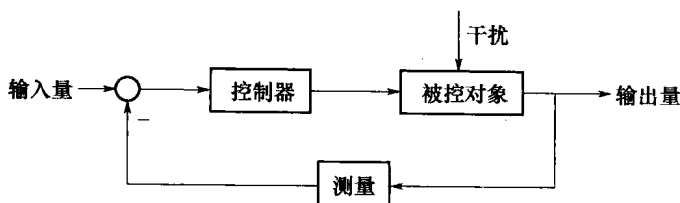


图 1.1.2 闭环控制系统

控制部分的活动起制约或纠正作用的，称为负反馈。负反馈的优点是维持稳态，缺点是滞后、波动。

(2) 正反馈(Positive Feedback): 凡反馈信息的作用与控制信息的作用方向相同，对控制部分的活动起增强作用的，称为正反馈。正反馈的优点是加速生理过程，使机体活动发挥最大效应，缺点是容易造成不稳定。

反馈控制系统由控制器、受控对象和反馈通路组成。在反馈控制系统中，不管出于什么原因(外部扰动或系统内部变化)，只要被控制量偏离规定值，就会产生相应的控制作用去消除偏差。因此，它具有抑制干扰的能力，对元件特性变化不敏感，并能改善系统的响应特性。

自动控制还研究社会、经济、生物、环境等非人造系统的控制问题。如生物控制、经济控制、社会控制以及人口控制等。

自动控制技术广泛用于工业、农业、军事、科学研究、交通运输、商业、医疗、服务和家庭等方面。采用自动控制技术不仅可以把人从繁重的体力劳动、部分脑力劳动以及恶劣、危险的工作环境中解放出来，而且能扩展人的器官功能，极大地提高劳动生产率，增强人类认识世界和改造世界的能力。因此，自动控制是工业、农业、国防和科学技术现代化的重要条件和显著标志。

管理控制是工厂或事业单位有关人、财、物、生产、办公等业务活动的自动控制，是以信息处理为核心的综合性技术，涉及电子计算机、通信系统与控制等学科。一般采用由多台具有高速处理大量信息能力的计算机和各种终端组成的局部网络。在管理信息系统的基础上发展起来的决策支持系统(DSS)，还可以为高层管理人员的决策提供不同的备选方案。管理(Management)是指为了充分利用各种资源来达到一定的目的，而对社会或其组成部分施加的一种控制。决策(Decision)是指为了获得最优方案，对若干准备方案进行选择。在实际生活与生产中对同一个问题所面临的几种自然情况或状态，又有几种可选方案，就构成一个决策，而决策者为对付这些情况所取的对策方案就组成决策方案或策略。在一个智能化的自动控制系统中，控制算法和控制策略的选择就是一个决策问题。

1.2 经典控制理论发展历程

自动控制理论(Automatic Control Theory)是研究自动控制共同规律的科学。它的发展初期，是以反馈理论为基础的自动调节原理，又称经典控制理论，主要用于工业控制。第二次世界大战期间，为了设计和制造飞机及飞船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷

达跟踪系统以及其他基于反馈原理的军用装备，进一步促进并完善了自动控制理论的发展。

1.2.1 稳定性理论的早期发展

牛顿可能是第一个关注动态系统稳定性的人。1687 年，牛顿在《数学原理》中对围绕引力中心做圆周运动的质点进行了研究。他假设引力与质点到中心距离的 q 次方成正比。牛顿发现，假设 $q > -3$ ，则在小的扰动后，质点仍将保留在原来的圆周轨道附近运动。而当 $q \leq -3$ 时，质点将会偏离初始的轨道，或者按螺旋状的轨道离开中心趋向无穷远，或者将落在引力中心上。

在牛顿引力理论建立之后，天文学家曾不断努力试图证明太阳系的稳定性。特别地，拉格朗日和拉普拉斯在这一问题上做了相当的努力。1773 年，24 岁的拉普拉斯“证明了行星到太阳的距离在一些微小的周期变化之内是不变的”。并因此成为法国科学院副院士。虽然他们的论证今天看来并不严格，但他们的工作对后来李雅普诺夫的稳定性理论有很大的影响。

直到 19 世纪中期，稳定性理论仍集中在对保守系统研究上。主要是天文学的问题。在出现控制系统的镇定问题后，科学家们开始考虑非保守系统的稳定性问题。麦克斯韦(Maxwell)是第一位利用特征方程的系数来判断系统稳定性的人。

麦克斯韦是第一个对反馈控制系统的稳定性进行系统分析并发表论文的人。在他 1868 年的论文“论调节器”中，导出了调节器的微分方程，并在平衡点附近进行线性化处理，指出稳定性取决于特征方程的根是否具有负的实部。麦克斯韦在论文中对三阶微分方程描述的 Thomson's governor, Jenkin's governor 以及具有五阶微分方程的 Maxwell's governor 进行了研究，并给出了系统的稳定性条件。麦克斯韦的工作开创了控制理论研究的先河。

同一时期在俄国，1872 年 И.А.维什聂格拉斯基(1831—1895)也对蒸汽机的稳定性问题进行了研究。1876 年 И.А.维什聂格拉斯基在法国科学院院报上发表论文“论调整器的一般原理”。И.А.维什聂格拉斯基同样利用线性化方法简化问题，用线性微分方程描述由调整对象和调整器组成的系统。这使问题大大简化。1878 年 И.А.维什聂格拉斯基还对非线性继电器型调整器进行了研究。И.А.维什聂格拉斯基在苏联被视为自动调整理论的奠基人。

麦克斯韦在他的论文中还催促数学家们尽快地解决多项式的系数与多项式的根之间的关系问题。由于五次以上的多项式没有直接的求根公式，这给判断高阶系统的稳定性带来了困难。

约在 1875 年，麦克斯韦担任了剑桥 Adams Prize 的评奖委员。这项两年一次的奖授予在该委员会所选科学主题方面竞争的最佳论文。1877 年的 Adams Prize 的主题是“运动的稳定性”。劳斯(E.J.Routh)在这项竞赛中以其根据多项式的系数决定多项式在右半平面的根的数目的论文夺得桂冠(Treatise on the Stability of Motion)。劳斯的这一成果现在被称为劳斯判据。劳斯工作的意义在于将当时各种有关稳定性的孤立的结论和非系统的结果统一起来，开始建立有关动态稳定性的系统理论。

劳斯之后大约 20 年，1895 年，瑞士数学家赫尔维茨(A. Hurwitz)在不了解劳斯工作

的情况下，独立给出了根据多项式的系数决定多项式的根是否都具有负实部的另一种方法(On the conditions under which an equation has only roots with negative real parts.)。赫尔维茨的条件同劳斯的条件在本质上是一致的。因此这一稳定性判据现在也被称为劳斯—赫尔维茨(Routh-Hurwitz)稳定性判据。

1892 年，俄罗斯伟大的数学力学家李雅普诺夫(A.M.Lyapunov)(1857—1918)发表了其具有深远历史意义的博士论文“运动稳定性的一般问题”(The General Problem of the Stability of Motion,1892)。在这一论文中，他提出了为当今学术界广为应用且影响巨大的李雅普诺夫方法，也即李雅普诺夫第二方法或李雅普诺夫直接方法。这一方法不仅可用于线性系统而且可用于非线性时变系统的分析与设计。已成为当今自动控制理论课程讲授的主要内容之一。

1.2.2 负反馈放大器及频域理论的建立

在控制系统稳定性的代数理论建立之后，1928 年—1945 年以美国 AT&T 公司贝尔实验室(Bell Labs)的科学家们为核心，又建立了控制系统分析与设计的频域方法。

1928 年 8 月 2 日，Harold Black(1898—1983)，在前往曼哈顿西街的上班途中，在哈得逊河的渡船上灵光一闪，发明了在当今控制理论中占核心地位的负反馈放大器。由于手头没有合适的纸张，他将其发明记在了一份纽约时报上，这份早报已成为一件珍贵的文物，珍藏在 AT&T 的档案馆中。

反馈放大器的振荡问题给其实用化带来了难以克服的麻烦。为此乃奎斯特(Harry Nyquist)(1889—1976)和其他一些 AT&T 的通信工程师介入了这一工作。乃奎斯特 1917 年在耶鲁大学获物理学博士学位，有着极高的理论造诣。1932 年乃奎斯特发表了包含著名的“乃奎斯特判据”(Nyquist criterion)的论文，并在 1934 年加入了贝尔实验室。Black 关于负反馈放大器的论文发表在 1934 年，参考了乃奎斯特的论文和他的稳定性判据。

这一时期，贝尔实验室的另一位理论专家，波特(Hendrik Bode)(1905—1982)也和一些数学家开始对负反馈放大器的设计问题进行研究。波特是一位应用数学家，1926 年在俄亥俄州立大学获硕士；1935 年在哥伦比亚大学获物理学博士学位。1940 年，波特引入了半对数坐标系，使频率特性的绘制工作更加适用于工程设计。

1942 年，H.Harris 引入了传递函数的概念。用方框图、环节、输入和输出等信息传输的概念来描述系统的性能和关系。这样就把原来由研究反馈放大器稳定性而建立起来的频率法，更加抽象化了，因而也更有普遍意义，可以把对具体物理系统，如力学、电学等的描述，统一用传递函数、频率响应等抽象的概念来研究。1925 年英国电器工程师亥维赛把拉普拉斯变换应用到求解电网络的问题上，提出了运算微积。不久拉普拉斯变换就被应用到分析自动调节系统问题上，并取得了显著成效。传递函数就是在拉普拉斯变换的基础上引入的。

至 1945 年，控制系统设计的频域方法，“波特图”(Bode plots)方法，已基本建立了，在这同一时期，苏联科学家也在控制系统稳定性的频域分析方面取得了进展。1938 年和 1939 年，全苏电工研究所的米哈依洛夫以柯西幅角原理为基础，发表论文给出了闭环控制系统稳定性的频域判别法。米哈依洛夫还提出了把自动调整系统环节按动态特性加以典型化来进行结构分析的问题。

米哈依洛夫有关稳定性频域判据的论文虽然正式发表较晚。但他的研究成果在 1936 年由苏联列宁共产主义青年团中央召开的青年学者科学家工作成果竞赛会上荣膺奖金。米哈依洛夫的方法现被称为“米哈依洛夫稳定判据”。有些学者又将“乃奎斯特判据”称为“乃奎斯特—米哈依洛夫判据”。客观地讲，在频域稳定性判别研究中，乃奎斯特不仅在时间上领先，其工作也更完备。现在我们所使用的也主要是乃奎斯特的开环稳定判据。

1.2.3 根轨迹法的建立

在经典控制理论中，根轨迹法占有十分重要的地位。它同时域法、频域法可称是三分天下。美国电信工程师埃文斯(W.R.Evans)在这里包打天下，他的两篇论文“Graphical Analysis of Control System, AIEE Trans.”和“Control System Synthesis by Root Locus Method”即已基本上建立起根轨迹法的完整理论。

埃文斯所从事的是飞机导航和控制，其中涉及许多动态系统的稳定问题，因此其已经又回到 70 多年前麦克斯韦和劳斯曾做过的特征方程的研究工作。但埃文斯用系统参数变化时特征方程的根变化轨迹来研究，开创了新的思维和研究方法。埃文斯方法一提出即受到人们的广泛重视，1954 年，钱学森即在他的名著《工程控制论》中专用两节介绍这一方法，并将其称为埃文斯方法。

1.2.4 脉冲控制理论的建立与发展

随着计算机技术的诞生和发展，脉冲控制理论也迅速地发展起来。在这方面首先作出重要贡献的是乃奎斯特和香农(Shannon)。乃奎斯特首先证明把正弦信号从它的采样值复现出来，每周期至少必须进行两次采样。香农于 1949 年完全解决了这个问题，香农由此被成为信息论的创始人。

线性脉冲控制理论以线性差分方程为基础，线性差分方程理论在二十世纪三四十年代中已逐步发展起来。随着拉普拉斯变换在微分方程中的应用，在差分方程中也开始加以应用。利用连续系统拉普拉斯变换同离散系统拉普拉斯变换的对应关系，奥尔登伯格(R.C.Oldenbourg)和萨托里厄斯(H.Sartorius)于 1944 年，崔普金(Tsytkin)于 1948 年分别提出了脉冲系统的稳定判据，即线性差分方程的所有特征根应位于单位圆内。由于离散拉普拉斯变换式是超越函数，又提出了用保角变换将 Z 平面的单位圆内部转换到新的平面的左半面的方法，这样即可以使用劳斯—赫尔维茨(Routh-Hurwitz)判据，又可将连续系统分析的频域方法引入离散系统分析。

求得离散型频率特性后，乃奎斯特稳定判据和其他一切研究线性系统的频率法都可应用，但由于波特图的应用大受限制，频率法在离散系统研究中也受到限制库津(1961)曾试图用波特图来表示离散型频率特性，但过于繁复而无法应用。

在变换理论的研究方面，霍尔维兹(W.Hurewicz)于 1947 年迈出了第一步，他首先引进了一个变换用于对离散序列的处理。在此基础上，崔普金于 1949 年，拉格兹尼和扎德(J.R.Ragazzini 和 L.A. Zadeh)于 1952 年分别提出了和定义了 Z 变换方法，大大简化了运算步骤，并在此基础上发展起脉冲控制系统理论。

由于 Z 变换只能反应脉冲系统在采样点的运动规律，崔普金、巴克(R.H.Barker)