



全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材



钟汉如 等 编著  
Zhong Hanru

# 现代机械装备控制工程

Modern Control Engineering  
of Machinery and Equipment

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

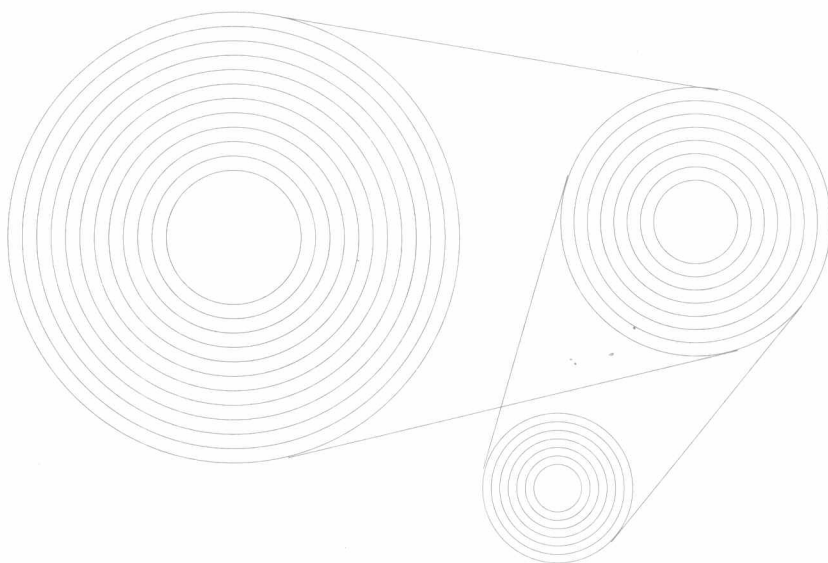
清华大学出版社

全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

# 现代机械装备控制工程

Modern Control Engineering  
of Machinery and Equipment

钟汉如 等 编著  
Zhong Hanru



清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书阐述了自动控制理论的基本内容,涵盖了经典控制理论与现代控制理论的基础部分。全书分8章,主要内容包括:自动控制系统绪论;经典控制理论;电机原理及控制;可控性、可观测性与极点配置设计;最优控制;自适应控制的概念与基本方法;应用举例——反辐射导弹导引头随动系统设计;应用举例——电动注射机锁模伺服电机控制。本书理论结合实际,把机械装备与控制系统相结合,体现了控制理论与机械装备结合的特色。本书还专为读者提供了习题和答案,供读者学习时使用。

本书可作为工程硕士研究生教材,也可作为机械类,电气工程类学科本科生、硕士生的教科书,亦可供从事控制工程研究的科技人员及科研工作者参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

## 图书在版编目(CIP)数据

现代机械装备控制工程/钟汉如等编著. —北京:清华大学出版社,2009.7

(全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材)

ISBN 978-7-302-20034-5

I. 现… II. 钟… III. 机械设备—自动控制工程学—研究生—教材 IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第064231号

责任编辑:庄红权

责任校对:赵丽敏

责任印制:何 芊

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

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 刷 者:北京四季青印刷厂

装 订 者:三河市漂源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230

印 张:23.75

字 数:517千字

版 次:2009年7月第1版

印 次:2009年7月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:44.00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:020485-01

# 前言



随着控制技术的巨大进步,机械装备与控制理论的结合,使控制理论得到不断的完善,国内大学中已经普遍开设了“现代机械装备控制工程”这门课程。本书的特点是将控制理论与机械装备应用相结合,对生产过程装备提出了一些新的控制方法,包括工艺过程分析。书中列举了大量的应用实例,如:注射机控制系统,反辐射导弹导引头随动系统设计,电热箱温度控制、蒸汽机涡轮增压发动机调速系统和多台电动机协调运转调速控制等。本书力求内容新颖、理论结合实际,系统地把机械装备与控制系统相结合,体现了控制理论与机械装备相结合的特色。

本书编写中注意了以下几个方面:①系统阐述基础知识,不过多地作专门理论性的探讨和论证,并结合应用实例阐述理论内容,力求围绕工程内容 and 应用背景,由浅入深,重点指导如何正确运用基本理论解决实际问题;②有针对性地介绍常用控制理论和控制方法,便于读者进一步巩固所学知识、并结合实际加以应用;③选择性地描述控制系统的应用示范,包括机电、轻工等学科领域的控制系统内容,着重说明控制系统的结构组成、控制方法、控制策略及实现方法,目的是引导读者能正确运用控制理论去解决工程中遇到的实际问题。

在本书编写过程中,作者用 MATLAB 软件开发了一个自动控制原理辅助设计(CS-CAD)和辅助教学(CAICS)的课件,作为本书习题配套软件,以便于培养学生工程实践能力与控制系统设计,掌握“经典控制理论”和“现代控制理论”基本知识。读者可以通过互联网登录 <http://www.tup.tsinghua.edu.cn> 下载,或发 E-mail 至 [zhuang\\_hq@163.com](mailto:zhuang_hq@163.com) 索取。

本书由钟汉如和杨艳娟等共同编写。其中,第 1、3、6、8 章及附录由钟汉如编写,第 5、7 章由杨艳娟编写,第 4 章由许锐、蔡军编写,第 2 章由蔡军、岑海洪、钟亮、许锐、杜青林编写,本书附录 MATLAB 的配套软件由钟慕良、徐建闽、钟汉如、周学华、叶海斌编写,最后全书由钟汉如统编。

本书编写过程中,还得到全国工程硕士专业学位教育指导委员会和华南理工大学研究生院的支持。吴楚珊、毛志宽、张昉昀等几位研究生也参与了本书的资料整理工作,在此一

并表示感谢。

本书可作为机械类、机械电子学科有关专业“自动控制理论”及“机械装备控制工程”课程的教材,也可作为本科生或研究生“现代机械装备控制工程”课程的教材。对不同层次、不同课程、不同专业和不同学时,可选择相应的内容进行教学。

由于编者水平有限,书中难免存在不当之处,敬请读者批评指正!

编者

2009年6月

# 目 录

## 第 1 章 自动控制系统绪论

/1

|       |                              |    |
|-------|------------------------------|----|
| 1.1   | 自动控制系统的发展历史 .....            | 1  |
| 1.2   | 自动控制系统概述 .....               | 7  |
| 1.2.1 | 名词术语 .....                   | 7  |
| 1.2.2 | 自动控制系统简介 .....               | 9  |
| 1.2.3 | 控制系统的结构和设计原则 .....           | 12 |
| 1.3   | 自动控制系统举例 .....               | 18 |
| 1.3.1 | 电热箱温度控制系统 .....              | 18 |
| 1.3.2 | 角位移闭环随动控制系统 .....            | 20 |
| 1.3.3 | 蒸汽机涡轮原动机——发电机组的液压式调速系统 ..... | 21 |
| 习题    | .....                        | 28 |

## 第 2 章 经典控制理论

/30

|       |                   |    |
|-------|-------------------|----|
| 2.1   | 自动控制系统的数学模型 ..... | 30 |
| 2.1.1 | 物理系统的微分方程 .....   | 30 |
| 2.1.2 | 传递函数的定义和性质 .....  | 34 |
| 2.1.3 | 线性系统的传递函数 .....   | 35 |
| 2.1.4 | 传递函数的零点和极点 .....  | 36 |
| 2.1.5 | 典型环节的传递函数 .....   | 37 |
| 2.1.6 | 方框图模型 .....       | 38 |
| 2.1.7 | 绘制方框图的步骤及特点 ..... | 39 |
| 2.1.8 | 方框图的简化 .....      | 40 |
| 2.1.9 | 线性微分方程的解 .....    | 45 |
| 2.2   | 控制系统的时域分析 .....   | 47 |

|       |                                  |     |
|-------|----------------------------------|-----|
| 2.2.1 | 典型输入信号和时域性能指标 .....              | 47  |
| 2.2.2 | 控制系统的稳定特性分析 .....                | 51  |
| 2.2.3 | 稳态误差的确定 .....                    | 52  |
| 2.2.4 | 一阶系统的瞬态响应 .....                  | 56  |
| 2.2.5 | 二阶系统的瞬态响应 .....                  | 59  |
| 2.2.6 | 时域分析性能指标 .....                   | 65  |
| 2.3   | 控制系统根轨迹方法 .....                  | 70  |
| 2.3.1 | 根轨迹的基本概念 .....                   | 70  |
| 2.3.2 | 绘制根轨迹的规则 .....                   | 71  |
| 2.3.3 | 应用根轨迹法进行控制系统设计 .....             | 77  |
| 2.4   | 控制系统的频率响应 .....                  | 82  |
| 2.4.1 | 频率响应法的基本概念 .....                 | 82  |
| 2.4.2 | 对数坐标图 .....                      | 87  |
| 2.4.3 | 极坐标图 .....                       | 95  |
| 2.4.4 | 由频率特性曲线求系统传递函数 .....             | 98  |
| 2.4.5 | 奈奎斯特稳定性判据 .....                  | 101 |
| 2.4.6 | 系统的相对稳定性 .....                   | 108 |
| 2.5   | 利用 MATLAB 绘制时域图、频率特性图、根轨迹图 ..... | 109 |
| 2.5.1 | 运用 CSCAD 进行时域分析 .....            | 110 |
| 2.5.2 | 运用 CSCAD 软件绘制根轨迹图 .....          | 110 |
| 2.5.3 | 运用 CSCAD 软件绘制系统的频率特性图 .....      | 114 |
| 习题    | .....                            | 117 |

### 第 3 章 电机原理及控制

/122

|       |                           |     |
|-------|---------------------------|-----|
| 3.1   | 三相异步电动机变频控制技术 .....       | 122 |
| 3.1.1 | 三相异步电动机原理 .....           | 122 |
| 3.1.2 | 三相异步电动机变频控制器结构 .....      | 125 |
| 3.1.3 | 异步电动机变频器原理基础 .....        | 129 |
| 3.1.4 | 正弦波 SPWM 电路 .....         | 135 |
| 3.1.5 | 异步电动机矢量变换控制算法 .....       | 140 |
| 3.2   | 无刷直流电动机 .....             | 152 |
| 3.2.1 | 无刷直流电动机的结构和原理 .....       | 152 |
| 3.2.2 | 三相无刷直流电动机星形连接全桥驱动原理 ..... | 158 |
| 3.2.3 | 三相无刷直流电动机的 DSP 控制 .....   | 161 |

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 3.2.4 | 无刷直流电动机的控制方法 .....      | 162 |
| 3.2.5 | 多相电动机控制举例 .....         | 168 |
| 3.3   | 交流伺服电动机结构、原理及控制算法 ..... | 172 |
| 3.3.1 | 三相永磁同步伺服电动机结构及原理 .....  | 172 |
| 3.3.2 | 交流永磁同步电动机数学模型的建立 .....  | 176 |
| 3.3.3 | 空间矢量脉宽调制 .....          | 181 |
| 3.3.4 | 空间矢量 PWM 波的生成 .....     | 184 |
| 3.3.5 | VSR 空间矢量 PWM 的合成 .....  | 187 |
| 3.4   | 开关磁阻电动机的结构与原理 .....     | 190 |
| 3.4.1 | 开关磁阻电动机的结构与特点 .....     | 190 |
| 3.4.2 | 开关磁阻电动机的功率驱动电路 .....    | 193 |
| 3.4.3 | 开关磁阻电动机的线性模式分析 .....    | 195 |
| 3.4.4 | 开关磁阻电动机的应用 .....        | 203 |
|       | 习题 .....                | 206 |

## 第 4 章 可控性、可观测性与极点配置设计

/207

|       |                                |     |
|-------|--------------------------------|-----|
| 4.1   | 状态空间模型 .....                   | 207 |
| 4.2   | 状态空间表达式 .....                  | 210 |
| 4.2.1 | 状态方程的解 .....                   | 211 |
| 4.2.2 | 状态转移矩阵的性质 .....                | 212 |
| 4.2.3 | $\Phi(t)$ 或 $e^{At}$ 的计算 ..... | 213 |
| 4.2.4 | 线性定常系统非齐次方程的解 .....            | 214 |
| 4.3   | 系统的可控性和可观测性 .....              | 216 |
| 4.3.1 | 线性时变系统的可控性 .....               | 216 |
| 4.3.2 | 线性定常系统的可控性 .....               | 219 |
| 4.3.3 | 线性时变系统的可观测性 .....              | 224 |
| 4.3.4 | 线性定常系统的可观测性 .....              | 226 |
| 4.3.5 | 可控性和可观测性的对偶关系 .....            | 228 |
| 4.4   | 可控标准型和可观测标准型 .....             | 229 |
| 4.4.1 | 系统的可控标准型 .....                 | 229 |
| 4.4.2 | 系统的可观测标准型 .....                | 232 |
| 4.5   | 线性系统的结构分解 .....                | 234 |
| 4.5.1 | 按可控性的系统结构分解 .....              | 234 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 4.5.2 按可观测性的系统结构分解 .....        | 235 |
| 4.5.3 按可控性和可观测性的系统结构的标准分解 ..... | 237 |
| 4.6 观测器设计 .....                 | 238 |
| 4.6.1 全维观测器 .....               | 238 |
| 4.6.2 降维观测器 .....               | 240 |
| 习题 .....                        | 242 |

## 第5章 最优控制 /245

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 5.1 最优控制问题 .....            | 245 |
| 5.2 变分求解最优控制问题 .....        | 247 |
| 5.2.1 变分法求最优问题 .....        | 247 |
| 5.2.2 变分法求最优控制 .....        | 251 |
| 5.3 极小值原理及最小时间控制 .....      | 258 |
| 5.3.1 连续系统的极小值原理 .....      | 258 |
| 5.3.2 离散系统的极小值原理 .....      | 260 |
| 5.3.3 线性定常系统时间最优控制 .....    | 262 |
| 5.4 二次型性能指标的最优控制问题 .....    | 264 |
| 5.4.1 状态调节器 .....           | 265 |
| 5.4.2 输出调节器 .....           | 268 |
| 5.5 多台电机协调运转的最优控制 .....     | 270 |
| 5.5.1 误差变量法的基本原理 .....      | 270 |
| 5.5.2 系统的数学模型及闭环系统结构图 ..... | 271 |
| 5.5.3 系统的仿真实验及结果分析 .....    | 276 |
| 习题 .....                    | 279 |

## 第6章 自适应控制的概念与基本方法 /282

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 6.1 自适应控制概述 .....      | 282 |
| 6.1.1 自适应控制问题的提出 ..... | 282 |
| 6.1.2 自适应控制的定义 .....   | 284 |
| 6.1.3 自适应控制的基本形式 ..... | 286 |
| 6.2 模型匹配自适应控制 .....    | 288 |
| 6.2.1 参数最优化设计法 .....   | 288 |
| 6.2.2 李亚普诺夫函数法 .....   | 290 |

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 6.3   | 最小方差调节和预测 .....   | 292 |
| 6.3.1 | 最小方差调节律 .....     | 292 |
| 6.3.2 | 最优预测 .....        | 293 |
| 6.3.3 | 闭环特性 .....        | 294 |
| 6.4   | 自适应控制过程 .....     | 295 |
| 6.5   | 最小方差自校正调节 .....   | 298 |
| 6.5.1 | 广义最小方差控制 .....    | 299 |
| 6.5.2 | 最小方差自校正控制算法 ..... | 302 |
| 6.6   | 造纸机的自适应控制系统 ..... | 303 |
| 6.6.1 | 生产过程 .....        | 303 |
| 6.6.2 | 自调准调节器 .....      | 304 |
| 6.6.3 | 算法程序 .....        | 305 |
|       | 习题 .....          | 306 |

## 第 7 章 应用举例——反辐射导弹导引头随动系统设计 /308

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 7.1   | 绪论 .....               | 308 |
| 7.1.1 | 反辐射导弹导引头随动系统工作原理 ..... | 308 |
| 7.1.2 | 性能指标 .....             | 310 |
| 7.2   | 方案论证 .....             | 310 |
| 7.2.1 | 液压伺服随动系统 .....         | 311 |
| 7.2.2 | 电动平台随动系统 .....         | 313 |
| 7.3   | 控制系统及元件的设计 .....       | 317 |
| 7.3.1 | 对随动系统角速度及角加速度的要求 ..... | 318 |
| 7.3.2 | 负载力矩 .....             | 319 |
| 7.3.3 | 伺服电机选择 .....           | 320 |
| 7.3.4 | 陀螺仪的选择 .....           | 324 |
| 7.4   | 控制系统设计及仿真 .....        | 325 |
| 7.4.1 | 系统参数设计 .....           | 325 |
| 7.4.2 | 仿真 .....               | 330 |

## 第 8 章 应用举例——电动注射机锁模伺服电机控制 /336

|       |                  |     |
|-------|------------------|-----|
| 8.1   | 电动注射机 .....      | 336 |
| 8.1.1 | 电动注射机的机械结构 ..... | 336 |

|        |                                                                           |     |
|--------|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.1.2  | 电动注射机的控制系统 .....                                                          | 340 |
| 8.2    | 全电动注射机开合模控制 .....                                                         | 341 |
| 8.2.1  | 电动注射机合模装置 .....                                                           | 341 |
| 8.2.2  | 伺服电动机控制器设计 .....                                                          | 348 |
| 附录 A   | 控制系统 MATLAB 计算机辅助设计 (CSCAD) Ver 3.0 和辅助教学课件<br>(CAICS) Ver 2.0 使用说明 ..... | 355 |
| A.1    | CSCAD Ver 3.0 简介 .....                                                    | 356 |
| A.2    | CAICS Ver 2.0 简介 .....                                                    | 357 |
| 习题参考答案 | .....                                                                     | 359 |
| 参考文献   | .....                                                                     | 368 |

# 第1章

## 自动控制系统绪论

### 1.1 自动控制系统的发展历史

自动控制系统是研究现代机械装备自动化的控制方法,即研究装备与控制系统共同规律的技术科学。它的发展初期是以反馈理论为基础的自动调节原理,随着科学的进步现已发展为一门独立的学科——控制论。根据自动控制技术发展的不同阶段,自动控制原理相应分为经典控制理论和现代控制理论两大部分。

经典控制理论是指 20 世纪 50 年代末所形成的理论体系,它研究单输入单输出线性定常系统的分析和设计问题,其理论基础是描述系统输入输出关系的传递函数。多年来,经典控制理论在工程实践中得到了成功的应用。

现代控制理论是 20 世纪 60 年代初期,为适应宇航技术发展的需要而出现的新理论。现代控制理论主要是研究具有高性能、高精度的多输入多输出、变参数系统的分析和设计问题,如最优控制、自适应控制等。描述系统的方法是基于状态空间法。目前现代控制理论正向大系统理论和人工智能理论等方面深入发展。

#### 1. 经典控制理论的发展简史

##### 1) 自动控制技术的早期发展

以反馈控制为其主要研究内容的自动控制理论的历史,若从目前公认的第一篇理论论文(J. C. Maxwell 在 1868 年发表的“论调节器”)算起,至今不过一百多年。然而控制思想与技术的存在至少已有数千年的历史了。“控制”这一概念本身即反映了人们征服自然与外在的渴望,控制理论与技术也自然而然地在人们认识自然与改造自然的历史中发展起来。具有反馈控制原理的控制装置在古代就有了。这方面最有代表性的例子当属古代的计时器“水钟”(在中国叫“刻漏”,也叫“漏壶”)。注入的水是由圆锥形的浮子调节的,而这种调节方式即已含有负反馈的思想(尽管当时并不明确)。

中国有着灿烂的古代文明。中国古代的科学家们对水钟十分重视,并进行了长期的研

究。据《周礼》记载,约在公元前 500 年,中国的军队中即已用漏壶作为计时的装置。约在公元 120 年,著名的科学家张衡又提出了用补偿壶解决漏壶随水头降低计时不准确问题的巧妙方法。在他的“漏水转浑天仪”中,不仅有浮子、漏箭,还有虹吸管和至少一个补偿壶。最有名的中国水钟“铜壶滴漏”由铜匠杜子盛和洗运行建造于公元 1316 年,并一直连续使用到 1900 年。

北宋时期,苏颂等于 1086—1090 年在开封建成“水运仪象台”。仪象台上的浑仪附有窥管,能够相当准确地跟踪天体的运行,“使它自动地保持在窥管的视场中”。这种仪象台的动力装置中就利用了“从定水位漏壶中流出的水,并由擒纵器(天关、天锁)加以控制”。苏颂把时钟机械和观测用浑天仪结合起来,这比西方的罗伯特·胡克早 6 个世纪。

公元 235(三国时期)的马均及公元 477 年(北宋时期)的祖冲之等还曾制造过具有开环控制特点的指南车,并发明了齿轮及叉动齿轮机。指南车,又称司南车,是中国古代科技发展史上相当重要的一项发明。在古代,人们利用这种特殊的机械装置指示方向。指南车利用差速齿轮原理,它与指南针利用地磁效应不同,它是利用齿轮传动系统,根据车轮的转动,由车上的木人指示方向,不论车子转向何方,木人的手始终指向南方,正所谓“车虽回运而手常指南”。相传早在 5000 多年前,黄帝时代就已经发明了指南车,当时黄帝曾凭着它在大雾弥漫的战场上指示方向,战胜了蚩尤。之后制作指南车的记录,散见于各朝各代的古籍之中。历史上指南车曾屡次被重造却屡次失传。据资料记载,南朝的祖冲之在追修古法过程中也曾成功地重造了指南车,但之后便又失传了,《南齐书·祖冲之传》也说:“冲之改造(指南车之)铜机,圆转不穷而司方如一。”

1765 年俄国的波尔祖诺夫发明了蒸汽机锅炉的水位自动调节器(这在俄国被认为是世界上的第一个自动调节器)。1788 年,詹姆斯·瓦特对蒸汽机进行了彻底的改造,在瓦特的改良工作中,他给蒸汽机添加了一个“节流”控制器,由离心“调节器”操纵调节蒸汽流,以确保引擎工作时速度大致均匀,这是当时反馈调节器最成功的应用。瓦特是一位实干家,他没有对调节器进行理论分析,后来 J. C. Maxwell 从微分方程角度讨论了调节器系统可能产生的不稳定现象,从而开始了对反馈控制动力学问题的理论研究。

## 2) 自动控制稳定性理论的建立

人们很早就开始关注稳定性的问题。牛顿可能是第一个关注动态系统稳定性的人。1687 年,牛顿在他的《数学原理》中对围绕引力中心作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以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工作。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”。拉普拉斯对于概率论也有很大的贡献,这从他的《概率的分析理论》中随处可见,他把自己在概率论上的发现以及前人的所有发

现统归一处。今天我们每一位学人耳熟能详的那些名词,诸如随机变量、数字特征、特征函数、拉普拉斯变换和拉普拉斯中心极限定律等都可以说是拉普拉斯引入或者经他改进的。尤其是拉普拉斯变换,导致了后来海维塞德发现运算微积在电工理论中的应用。不能不说后来的傅里叶变换(又称傅氏变换)、梅森变换、 $Z$ 变换和小波变换也受它的影响。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亚普诺夫的稳定理论有很大的影响。

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。

J. C. Maxwell 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”(Maxwell J C. On Governors, Proc. Royal Society of London, vol. 16:270-283, 1868)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。

E. J. Routh 在一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(Routh E J. A Treatise on the Stability of Motion, London, U. K.: Macmillan, 1877)。Routh 的这一成果现在被称为劳斯判据。Routh 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。

Routh 之后大约二十年,1895年,瑞士数学家 A. Hurwitz 在不了解 Routh 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。Hurwitz 的条件同 Routh 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 Routh-Hurwitz 稳定性判据。

1892年,俄罗斯伟大的数学力学家李亚普诺夫(A. M. Lyapunov, 1857-05-25—1918-11-03)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亚普诺夫方法,也即李亚普诺夫第二方法或李亚普诺夫直接方法。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。

在控制系统稳定性的代数理论建立之后,1928—1945年以美国 AT&T 公司 Bell 实验室(Bell Labs)的科学家们为核心,用负反馈放大器及频域理论建立了控制系统分析与设计的频域方法。1928年8月的一天,Harold Black(1898—1983)在前往曼哈顿西街的上班途中,在纽约市中心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。Black 首先提出了基于误差补偿的前馈放大器,在此基础上最终提出了负反馈放大器并对其进行数学分析。同年 Black 就其发明向专利局提出了长达 52 页 126 项的专利申请,9年后,当 Black 和他在 AT&T 的同事们开发出实用的负反馈放大器和负反馈理论之后,Black 才得到这项专利。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 Harry Nyquist(1889—1976)和其他一些 AT&T 的通信工程师介入了这一工作。1932 年 Nyquist 发表了包含著名的“奈奎斯特判据”(Nyquist criterion)的论文,并在 1934 年加入了 Bell Labs。Black 关于负反馈放大器的论文发表于 1934 年,参考了 Nyquist 的论文和他的稳定性判据。这一时期,Bell 实验室的另一位理论专家,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。Bode 是一位应用数学家,他于 1940 年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。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——伯德图(Bode plots)方法,已基本建立了。在同一时期,前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。

米哈依洛夫的方法现被称为“米哈依洛夫稳定判据”,虽然他有关稳定性频域判据的论文正式发表较晚,但有些学者也将“奈奎斯特判据”称为“奈奎斯特-米哈依洛夫判据”。客观地讲,在频域稳定性判别研究中,奈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奈奎斯特的开环稳定判据。

### 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 W. R. Evans(埃文斯)在他的两篇论文(“*Graphical Analysis of Control System*, AIEE Trans. Part II, 67(1948), pp. 547-551”和“*Control System Synthesis by Root Locus Method*, AIEE Trans. Part II, 69(1950), pp. 66-69”)中即已基本建立起根轨迹法的完整理论。人们记他的名字 W. R. Evans 还没有对认识根轨迹法那样深刻,让我们使用根轨迹法来铭记这位伟人吧。

Evans 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 Maxwell 和 Routh 曾做过的特征方程的研究工作。但 Evans 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。Evans 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 Evans 方。

### 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发展起来。在这方面首先作出重

要贡献的是奈奎斯特(Nyquist)和香农(Shannon)。奈氏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。香农由此被称为信息论的创始人。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20世纪30、40年代中已逐步发展起来。随着拉氏变换在微分方程中的应用,在差分方程中也开始加以应用。利用连续系统拉氏变换同离散系统拉氏变换的对应关系,奥尔登伯格(R. C. Oldenbourg)和萨托里厄斯(H. Sartorius)于1944年,崔普金(Tsykin)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。由于离散拉氏变换式是超越函数,因此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,这样既可以使用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,奈氏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Bode图的应用大受限制,频率法在离散系统研究中也受到限制。在变换理论的研究方面,霍耳维兹(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。20世纪50年代末,脉冲系统的 $Z$ 变换法已经成熟,好几本教科书同时出版。

## 2. 现代控制理论的发展简史

第二次世界大战以后,有两件事影响了控制理论的发展。首先是发达国家对火箭和宇航器的导航、跟踪和着陆控制问题的研究,其次是数字计算机的问世。前者提出了多变量系统、非线性系统的最优控制问题,后者给出了直接求解时域模型——微分(差分)方程的有力工具。在20世纪50年代末到60年代初,现代控制理论就应运而生。

状态空间法属于时域方法,其核心是最优化技术。它以状态空间描述作为数学模型,利用计算机作为系统建模分析、设计乃至控制的手段,适用于多变量、非线性、时变系统。它不但在航空、航天、制导与军事武器控制中有成功的应用,而且在工业生产过程控制中也逐步得到应用。

为现代控制理论的状态空间法的建立作出开拓性贡献的有1954年贝尔曼(R. Bellman)的动态规划理论,1956年庞特里亚金(Pantriagin)的极大值原理和1960年卡尔曼(R. E. Kalman)的多变量系统最优控制与最优滤波理论。

所谓最优控制,就是使某种性能指标(如误差平方的积分)达到极小的控制律。所谓最优滤波,则是指在随机信号干扰条件下由测量到的输出变量作出的系统内部状态的一种估计,它使某种估计误差的有关指标极小。这里,状态空间描述(实质上是一阶微分或差分方程组)成了重要的系统数学模型,状态空间法因而得名。

起初,最优控制在较为复杂的工业生产过程中应用,曾遇到过一些困难。首先是难以得到被控对象的精确的状态空间数学模型,其次是难以构造适当的最优性能指标,第三是所得

最优控制器过于复杂。

为了研究新出现的控制课题,解决工程实际问题特别是数学模型问题,在后来的 40 年又提出了一些新的控制方法和理论,例如:

- 用于难以用精确数学模型描述、具有模糊性的系统的“模糊控制方法”。
- 以提高模型精度为目标的“系统辨识和参数估计方法”。
- 使用传递函数矩阵作为数学模型,将单变量系统频域技术推广到线性定常多变量系统的“现代频域法”。
- 在系统数学模型实时辨识基础上在线确定最优控制律,即“自校正与自适应控制技术”。
- 在数学模型存在不确定性情况下保证控制系统稳定性及其他性能的“鲁棒控制(robust control)技术”与“ $H_\infty$  设计方法”。
- 在多变量预测模型基础上采用滚动优化和反馈校正的“预测控制”。
- 处理结构特别复杂、状态变量特别多的被控对象最优控制问题的“大系统理论”。
- 不是依最优性能指标来确定最优控制规律,而是模仿人的智能来确定最满意控制规律的“智能控制理论”。

### 3. 现代控制理论与经典控制理论的衔接

经典控制理论的数学基础是拉普拉斯变换求解微分方程,应用传递函数对控制系统方框图在输入函数下求解输出响应解,其方法有时域法、频率域法和根轨迹法。经典控制理论应用领域除了工程领域外,早已扩大到生物医学、社会经济和生态环境等众多领域。1948 年维纳在《控制论》这本书中研究了一般系统中控制和信息过程共同规律的科学。本书所介绍的控制理论,当属工程控制论的一个分支,因为它只研究控制系统建模、分析与综合的一般理论。控制论包括工程控制论、生物控制论和经济控制论等分支。工程控制论是控制论中最早形成的应用分支,主要研究自动控制系统中信息变换和传送的一般理论及其在工程设计中的应用。

现代控制理论是在 20 世纪 60 年代出现,主要是指 20 世纪 60 年代建立的以最优化理论为核心的状态空间法。在 21 世纪的今天,我们所说的现代控制理论,自然不能局限于状态空间法,还应当包括这 40 年出现的新理论。

现代控制理论的出现依赖于工程技术、计算机技术的发展,是一大类复杂控制系统(例如与航天装置、机器人有关的“具有柔性结构系统”,与计算机集成制造、通信网络、交通调度有关的“离散事件动态系统”)提出的新课题。新的挑战必将促进新控制技术和新控制理论的出现。

对于 20 世纪 50 年代出现的模拟计算机及其模拟运算调节器,在后来的数字计算机相结合出现的叫混合计算机,给工程应用起到模拟运算快等特点。