



 电子信息与电气学科规划教材 · 自动化专业

自动控制原理

胥布工 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

电子信息与电气学科规划教材·自动化专业

自动控制原理

胥布工 主编

胥布工 莫鸿强 谢 巍 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是广东省精品课程“自动控制原理”的主教材,也是为“十二五”教学改革需要而编写的本科生自动化专业核心基础课教材。本书系统地阐述了自动控制理论的基本概念、原理,自动控制系统的经典分析和校正方法。全书分3部分,共计9章:第一部分为反馈控制系统的建模、稳定性与特性,由第1章绪论、第2章控制系统的数学模型和第3章控制系统的稳定性及特性组成;第二部分为线性控制系统的分析与校正,由第4章线性控制系统的时域分析、第5章根轨迹分析法、第6章频率特性分析法和第7章线性控制系统的校正组成;第三部分由第8章线性离散控制系统和第9章非线性控制系统组成。

本书在内容编排上面向宽口径的自动化专业,力求与时俱进地进行教材改革实践与创新:解决教学过程中发现的问题;满足宽口径自动化专业的需要;增加面向控制工程的理论与知识;增强计算机辅助教学的应用。各章安排了丰富的例题和习题。本书配有电子课件、MATLAB 源代码、习题参考答案等教学资源。

本书可作为高等学校电气信息类自动化及相关专业本科生教材,也可供相关行业从事控制工程实践的工程技术人员自学和参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容
版权所有·侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 胥布工主编. —北京: 电子工业出版社, 2011.1

电子信息与电气学科规划教材·自动化专业

ISBN 978-7-121-12109-8

I. ①自… II. ①胥… III. ①自动控制理论—高等学校—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 207907 号

策划编辑: 史鹏举

责任编辑: 史鹏举 文字编辑: 侯丽平

印 刷: 北京市海淀区四季青印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 23.25 字数: 671 千字

印 次: 2011 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 39.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

本书的编写历时近两年,期间正值“国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020)”制定之际,而本书正是为“十二五”规划及今后约8年期间的教学改革需要而编写的本科生自动化专业核心基础课教材。从这一点看,本书的编写工作切合了国家规划今后10年教育改革和发展的主题。

本书系统地阐述了自动控制理论的基本概念、原理,以及自动控制系统的经典分析和校正设计方法。全书分3部分,共计9章:第一部分为反馈控制系统的建模、稳定性与特性,由第1章绪论、第2章控制系统的数学模型和第3章控制系统的稳定性及特性组成;第二部分为线性控制系统的分析与校正,由第4章线性控制系统的时域分析、第5章根轨迹分析法、第6章频率特性分析法和第7章线性控制系统的校正组成;第三部分由第8章线性离散控制系统和第9章非线性控制系统组成。作为教材,本书各知识单元的讲授分3个层次:熟练掌握、掌握和了解。经过分层次教学的实践,推荐的学时数为80学时。

本书在内容编排上面向宽口径的自动化专业,力求与时俱进地进行教材改革实践与创新。主要特色如下。

1. 解决教学过程中发现的问题

在每年的研究生面试中发现,不少学习过“自动控制原理”课程的学生,对许多概念仍存在各种各样认识不清的问题。例如,在回答反馈控制系统的组成这一最基本的问题时,学生的回答常常也会五花八门,这反映出他们对反馈控制系统基本结构特点认识不清。究其原因发现,许多传统教材并非面向宽口径的专业需要,如在讲述反馈控制系统组成时,通常采用“元件”一词。这使得不能代表反馈控制系统结构特点的“供电元件”等常出现在系统的组成中,从而引起一定的混淆。又如,一些传统教材通常仅在绪论中给出开环控制与闭环控制区别的简单定性叙述,而借助数学工具对反馈控制系统的特性本质分析不足,常使学生对反馈特性的优点没有足够深刻的认识,因而难以自觉地运用。类似的问题还有很多,解决此类问题一般可从两方面考虑:一方面学生需要通过实践来加深认识,这需在工作实践中来解决;另一方面就是进行教材改革,以融入新的内容来加以解决。

本书在编写内容上力求解决教学过程中所发现的各种问题。例如,将反馈控制系统的结构特点、稳定性及特性单独组成第3章来讲解,力求使读者对反馈控制的基本原理不但有定性认识,更有定量认识,从而加深对自动控制原理本质的理解,进一步增强学习后续章节的目的性,并将这种定性和定量的认识始终贯穿在学习控制系统分析和校正方法中去。

2. 满足宽口径自动化专业的需要

为满足宽口径自动化专业的需要,本书在内容编排上所做的努力主要包括:

(1) 关于反馈控制系统组成的划分,在保留按构成系统的基本元件划分的前提下,侧重了更一般的按系统内部基本功能环节划分的体系(第1章),并运用于全书。

(2) 在时域性能指标上,除了上升时间、超调量和调节时间等常见指标外,还增加了过程工业中广泛采用的衰减比指标(第4章),并运用于全书。

(3) 关于按扰动补偿的前馈方案,不但介绍前馈与反馈联合设计的补偿方案,更侧重介绍仅依赖控制通道和干扰通道模型的前馈补偿方案(第3、4和7章),并运用于全书。

(4) 除了提供 PID 控制器的时域分析外(第 4 章), 还从校正设计的角度引入 PID 控制器参数整定法(第 7 章)。

(5) 介绍了线性控制系统的相变量状态方程模型, 以及其与输入-输出模型的互相变换(第 2 章), 有限地拓宽了经典控制系统建模的内容, 主要目的是为采用相变量的非线性控制系统相平面分析法(第 9 章)提供相关基础知识。

3. 增加面向控制工程的理论与知识

我国自动化专业的“自动控制原理”课程, 国外对应的课程常称为“自动控制系统”。这一定位的区别反映在国内传统“自动控制原理”教材更注重理论分析方法的讲述, 对面向控制工程的理论与知识介绍不多, 对自动控制理论与自动化事业的关系也很少解释。本书提供面向控制工程的必要理论与知识, 以提高学生运用自动控制理论的能力。这些努力主要包括:

(1) 第 1 章, 除了提供“自动控制理论发展简史”一节, 介绍自动控制理论发展史外, 还提供“控制工程实践”一节, 简介我国自动化事业的发展, 同时尝试提供更多的专业术语解释。

(2) 第 2 章, 除介绍微分方程的增量化外, 还介绍了微分方程的无因次化。实际工业控制系统中, 测量变送器的输出、控制器的输入与输出等信号常为标准信号量程的分数, 而无因次变换是此类变换的基础。

(3) 第 3 章, 采用定性和定量相结合的方法分析了反馈控制系统的特性及其所带来的好处; 同时在对构成复杂反馈控制系统的常见基本结构及其特性进行理论分析的基础上, 提供若干反馈控制系统方案选择的理论依据。

(4) 第 3 章, 介绍了前馈补偿的不变性原理和双通道特性的内容, 为前馈补偿方案的选择和设计提供理论依据。

(5) 第 4 章, 给出了二阶系统阶跃响应曲线拐点的推导, 为第 7 章 PID 控制器参数整定法提供必要的理论知识。

(6) 为增强设计方法的讲述, 第 1 章提供了控制系统设计概述, 第 4 章给出了前馈补偿器的设计方法, 第 7 章校正设计方法中侧重了计算机软件 MATLAB 辅助设计的内容。

(7) 第 9 章, 侧重非线性控制系统分区线性化分析方法的介绍。

(8) 由于增加了面向控制工程的理论与知识内容, 本书仍以经典名称“自动控制原理”作为书名, 而未采用“自动控制理论”名称。

4. 增强计算机辅助教学的应用

近年来, 利用计算机软件 MATLAB 辅助“自动控制原理”的教学已经成为所有新教材的选择, 本书也不例外。本书从第 2 章起, 每章均设有一节讲解 MATLAB 的应用和例题, 各章的习题中也增加了 MATLAB 的应用习题。同时, 在第 7 章中以 MATLAB 辅助分析与设计为主要方法讲解控制系统的校正设计内容。此外, 书中所有图片均实现了计算机制图, 为了增强 MATLAB 的应用内容, 凡涉及系统响应数据的图则先用 MATLAB 仿真获得数据后再绘图, MATLAB 的应用已贯穿全书始终。

本书是广东省精品课程“自动控制原理”的主教材, 主编在编写期间担任了教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会委员, 通过参加和承办教学指导分委员会主办的各种本科生教学活动及教育年会的交流活动, 对面向 21 世纪自动化专业的需求有了更深的认识。在此基础上, 结合 30 多年的教学经验和实践体会, 并考虑与现有教学内容的衔接, 确定了本书的目录和编写提纲。当然, 本书在内容编排上的选择不是唯一的, 但编写实践证明, 那种试图一次性解决所有的教学可能需要的做法, 既不符合教学改革不断前进的现实, 也难以包括日新月异的控制工程实践的需要。在编写过程中, 编

著者深深地感到,即使对经典教学内容,只要结合与时俱进的教学改革,仍然存在有所作为的空间。本书的编写定位于面向“十二五”规划期间约8年跨度的需要,并计划随着教学改革的深入不断改进。尽管在创新特色上做了努力,但仍有许多不尽人意之处,还需采用本书的教师、学生及科技人员来检验。在此,恳请广大读者对书中的错误和不妥之处给予指正(E-mail: aubgxu@scut.edu.cn)。

本书配有电子课件、MATLAB 源代码、习题参考答案等教学资源,需要者可从华信教育资源网<http://www.hxedu.com.cn> **免费注册下载**。

本书第1章至第3章、第4章4.1节至4.6节、第5章5.1节至5.3节、第9章由胥布工执笔完成;第4章4.7节至4.9节、第5章5.4节至5.7节由谢巍执笔,经胥布工执笔校改完成;第6章至第8章由莫鸿强执笔,经胥布工执笔校改完成,其中,6.7节、6.8节、7.2.2节、7.2.4节、7.2.5节、7.3.4节、7.5.2节由胥布工执笔完成。第1章至第3章、第9章习题由胥布工执笔完成;第4章和第5章习题由谢巍执笔完成;第6章至第8章习题由莫鸿强执笔完成。书中所有图片终稿由胥布工指导其研究生曾德和尤晓萍绘制并审校完成。全书由胥布工执笔统稿完成定稿。

本书的编写获得了广东省粤财教2008(342号)项目的资助。华南理工大学教务处、电子工业出版社对本书的编写和出版给予了大力支持。在书稿编写期间,黄道平教授对编写工作提供了持续的支持;张梅、罗家祥、高红霞、高焕丽和袁玲老师作为本书原始稿的第一批读者提出了许多宝贵意见。

谨在此对在本书编写过程中付出辛勤劳动和提供帮助的同仁和研究生们表示真诚的谢意!

胥布工

于广州·华南理工大学

目 录

第 1 章 绪论	(1)	2.3 传递函数	(32)
1.1 引言	(1)	2.3.1 线性系统传递函数的概念 和定义	(33)
1.1.1 自动控制理论发展简史	(1)	2.3.2 传递函数的常用表现形式	(34)
1.1.2 控制工程实践	(3)	2.3.3 典型输入信号及其拉普拉斯 变换	(35)
1.2 自动控制的基本原理	(4)	2.3.4 单位脉冲响应函数	(37)
1.2.1 人工控制与自动控制	(4)	2.3.5 求解系统输出响应的方法	(38)
1.2.2 开环控制与闭环控制	(6)	2.3.6 典型环节及其传递函数	(41)
1.2.3 反馈控制系统的基本要求	(8)	2.4 结构图	(47)
1.3 反馈控制系统的组成	(9)	2.4.1 结构图的组成和基本连接 方式	(47)
1.3.1 按构成系统的基本元件 划分	(9)	2.4.2 结构图的等效变换	(48)
1.3.2 按系统内部基本功能环节 划分	(10)	2.5 信号流图	(50)
1.3.3 若干常用术语	(11)	2.5.1 信号流图及有关术语	(51)
1.4 控制系统的分类	(12)	2.5.2 信号流图的运算	(51)
1.4.1 按参考输入信号特征分类	(12)	2.5.3 信号流图与结构图的对应 关系	(52)
1.4.2 按系统环节间信号传递形式 分类	(12)	2.5.4 梅逊公式及其应用	(53)
1.4.3 按描述系统的动态方程 分类	(13)	2.6 输入-输出模型与内部状态模型的 关系	(55)
1.5 控制系统应用实例三则	(13)	2.6.1 传递函数模型与相变量型状态 流图模型	(55)
1.6 控制系统设计概述	(16)	2.6.2 传递函数模型与状态方程模型 的相互转换	(56)
1.7 本书内容安排	(18)	2.7 利用 MATLAB 的建模和仿真	(57)
1.7.1 组织结构	(18)	2.7.1 输入传递函数和化简 结构图	(57)
1.7.2 学习安排	(19)	2.7.2 求解系统的输出响应	(59)
1.8 小结	(19)	2.8 小结	(61)
习题 1	(20)	习题 2	(62)
第 2 章 控制系统的数学模型	(23)	第 3 章 控制系统的稳定性及特性	(69)
2.1 引言	(23)	3.1 引言	(69)
2.2 系统的微分方程	(23)	3.2 反馈控制系统的结构及其传递 函数	(69)
2.2.1 列写物理系统的微分方程	(23)		
2.2.2 微分方程的增量化与 无因次化	(27)		
2.2.3 非线性微分方程的线性化	(28)		
2.2.4 控制系统的微分方程	(30)		

3.2.1 开环传递函数	(69)	4.4.6 具有零点的二阶系统分析	(113)
3.2.2 闭环传递函数	(70)	4.4.7 扰动作用下的二阶系统 分析	(117)
3.2.3 偏差传递函数	(70)	4.5 高阶系统的时域分析	(119)
3.3 闭环系统的稳定性	(71)	4.5.1 高阶系统的时域响应	(119)
3.3.1 稳定性的概念和定义	(71)	4.5.2 闭环主导极点	(120)
3.3.2 闭环传递函数的极点与系统 的稳定性	(72)	4.6 稳态误差分析	(122)
3.3.3 劳斯判据及其应用	(74)	4.6.1 控制系统的类型	(123)
3.4 反馈控制系统的特性	(80)	4.6.2 参考输入作用下的稳态 误差	(123)
3.4.1 瞬态响应的改进	(80)	4.6.3 扰动输入作用下的稳态 误差	(126)
3.4.2 稳态误差的减小	(81)	4.6.4 提高稳态精度的方法	(128)
3.4.3 对内部模型的灵敏度	(82)	4.7 基本控制规律的时域分析	(131)
3.4.4 对外部干扰的抑制	(83)	4.7.1 比例(P)控制	(132)
3.5 复杂反馈控制系统的基本结构 及其特性	(85)	4.7.2 比例加微分(PD)控制	(132)
3.5.1 内环反馈校正	(85)	4.7.3 比例加积分(PI)控制	(133)
3.5.2 串级控制	(86)	4.7.4 比例加积分加微分(PID) 控制	(134)
3.5.3 前馈-反馈控制	(88)	4.8 利用 MATLAB 进行控制系统的 时域分析	(135)
3.6 利用 MATLAB 分析系统的稳定性 及特性	(89)	4.8.1 参考输入响应分析	(135)
3.6.1 判定系统的稳定性	(90)	4.8.2 扰动输入响应分析	(136)
3.6.2 求解灵敏度函数	(90)	4.9 小结	(137)
3.7 小结	(92)	习题 4	(138)
习题 3	(92)		
第 4 章 线性控制系统的时域分析	(97)	第 5 章 根轨迹分析法	(143)
4.1 引言	(97)	5.1 引言	(143)
4.2 测试输入信号与时域性能指标	(97)	5.2 根轨迹的基本概念	(143)
4.2.1 常用测试输入信号	(97)	5.2.1 根轨迹图	(143)
4.2.2 时域性能指标	(98)	5.2.2 根轨迹方程	(145)
4.3 一阶系统的时域分析	(99)	5.3 绘制根轨迹的一般方法	(146)
4.3.1 一阶系统的一般形式	(99)	5.3.1 绘制根轨迹的基本法则	(147)
4.3.2 一阶系统的单位阶跃响应	(100)	5.3.2 参数根轨迹的绘制	(156)
4.3.3 一阶系统的单位脉冲响应	(101)	5.4 根轨迹法的扩展应用	(157)
4.4 二阶系统的时域分析	(102)	5.4.1 双回路系统的根轨迹	(157)
4.4.1 二阶系统的一般形式	(102)	5.4.2 延迟系统的根轨迹	(158)
4.4.2 二阶系统的单位阶跃响应	(102)	5.4.3 0 度根轨迹的绘制	(162)
4.4.3 二阶系统单位阶跃响应的 性能指标	(105)	5.5 开环零、极点对系统根轨迹的 影响	(164)
4.4.4 二阶系统的单位脉冲响应	(109)	5.5.1 开环零点对根轨迹的影响	(164)
4.4.5 二阶系统的性能改善	(110)		

5.5.2 开环极点对根轨迹的影响 ...	(165)	6.7 基于开环对数频率特性的系统性能分析	(205)
5.5.3 开环偶极子对根轨迹的影响	(165)	6.7.1 低频段特性与系统稳态误差的关系	(205)
5.6 利用 MATLAB 分析控制系统的根轨迹	(166)	6.7.2 中频段特性与系统瞬态性能的关系	(206)
5.6.1 绘制根轨迹与求取根轨迹增益	(166)	6.7.3 高频段特性与闭环频率特性的关系	(208)
5.6.2 分析控制系统的稳定性	(168)	6.8 闭环频率特性与系统性能指标	(208)
5.7 小结	(169)	6.8.1 闭环频率特性的求取	(208)
习题 5	(169)	6.8.2 闭环频域指标与时域性能指标的关系	(213)
第 6 章 频率特性分析法	(172)	6.9 利用 MATLAB 进行控制系统的频率特性分析	(214)
6.1 引言	(172)	6.9.1 绘制奈奎斯特图和伯德图 ...	(214)
6.2 频率特性的基本概念	(172)	6.9.2 分析控制系统的性能	(215)
6.2.1 频率响应与频率特性的定义	(172)	6.10 小结	(221)
6.2.2 频率特性的物理意义	(174)	习题 6	(221)
6.2.3 反馈控制系统的典型频率特性	(175)	第 7 章 线性控制系统的校正	(226)
6.3 频率特性图示法	(176)	7.1 引言	(226)
6.3.1 幅相频率特性曲线	(177)	7.2 校正的基本概念	(227)
6.3.2 对数频率特性曲线	(177)	7.2.1 校正的动机和期望性能指标	(227)
6.3.3 对数幅相特性曲线	(178)	7.2.2 校正方式	(227)
6.4 系统的开环频率特性	(179)	7.2.3 校正装置的设计方法	(229)
6.4.1 基本因式的频率特性	(179)	7.2.4 常用校正装置的特性	(229)
6.4.2 幅相频率特性曲线的起点、走向和终点	(183)	7.2.5 校正装置的实现	(234)
6.4.3 对数频率特性曲线的渐近线和转折频率	(186)	7.3 频率法设计串联校正	(236)
6.4.4 最小相位系统和非最小相位系统	(189)	7.3.1 超前校正的频率法设计	(236)
6.5 奈奎斯特稳定判据	(191)	7.3.2 滞后校正的频率法设计	(239)
6.5.1 幅角原理	(192)	7.3.3 滞后-超前校正的频率法设计	(241)
6.5.2 幅角原理的应用	(193)	7.3.4 期望开环对数幅频特性设计法	(244)
6.5.3 奈奎斯特稳定判据的应用 ...	(194)	7.4 根轨迹法设计串联校正	(245)
6.5.4 基于对数频率特性的奈奎斯特稳定判据	(198)	7.4.1 超前校正的根轨迹法设计	(245)
6.6 稳定裕度	(200)	7.4.2 滞后校正的根轨迹法设计	(248)
6.6.1 幅稳定裕度和相稳定裕度 ...	(200)	7.4.3 滞后-超前校正的根轨迹法设计	(249)
6.6.2 稳定裕度与时域性能指标的关系	(203)	7.5 PID 校正	(250)

7.5.1	PID 校正的频率法设计	(250)	8.8	利用 MATLAB 辅助离散控制系统 的分析和校正	(301)
7.5.2	PID 校正的参数整定法 设计	(251)	8.8.1	性能分析	(301)
7.6	反馈校正	(253)	8.8.2	校正设计	(306)
7.6.1	反馈校正的设计思路	(253)	8.9	小结	(313)
7.6.2	反馈校正的设计方法	(254)	习题 8		(314)
7.7	利用 MATLAB 辅助控制系统的 校正设计	(258)	第 9 章	非线性控制系统	(317)
7.7.1	滞后-超前校正设计	(258)	9.1	概述	(317)
7.7.2	PID 参数整定法校正设计	(264)	9.1.1	非线性特性的类型	(317)
7.8	小结	(265)	9.1.2	非线性控制系统的稳定性 及特性	(318)
习题 7		(266)	9.1.3	非线性控制系统的分析 与综合	(319)
第 8 章	线性离散控制系统	(270)	9.2	相平面法	(320)
8.1	概述	(270)	9.2.1	相平面法的基本概念	(320)
8.1.1	离散控制系统的基本概念	(270)	9.2.2	相平面图的绘制	(323)
8.1.2	离散控制系统的分析与校正 设计方法	(272)	9.2.3	线性系统的相平面图分析	(325)
8.2	信号采样与保持	(272)	9.2.4	非线性系统的相平面图 分析	(326)
8.2.1	信号采样	(272)	9.2.5	非线性控制系统的分区 线性化法	(329)
8.2.2	零阶保持器	(275)	9.2.6	利用非线性特性改进控制 系统的动态性能	(334)
8.3	离散系统的数学模型	(276)	9.3	描述函数法	(337)
8.3.1	z 变换	(276)	9.3.1	描述函数与谐波线性化	(337)
8.3.2	z 反变换	(279)	9.3.2	典型非线性特性的描述 函数	(339)
8.3.3	差分方程	(281)	9.3.3	非线性环节的串联与并联	(343)
8.3.4	脉冲传递函数	(282)	9.3.4	非线性控制系统的描述函数 分析方法	(344)
8.4	离散控制系统的稳定性	(287)	9.3.5	综合问题举例	(346)
8.4.1	离散系统稳定的充分必要 条件	(287)	9.4	利用 MATLAB 分析非线性控制 系统	(347)
8.4.2	稳定判据	(288)	9.4.1	绘制非线性控制系统的 相轨迹和相平面图	(347)
8.5	离散控制系统的动态性能分析	(293)	9.4.2	判定稳定性及自持振荡	(352)
8.5.1	s 平面到 z 平面的映射	(293)	9.5	小结	(354)
8.5.2	闭环极点与阶跃响应瞬态 分量的关系	(294)	习题 9		(354)
8.6	离散控制系统的稳态误差分析	(297)	附录 A		(359)
8.6.1	采样时刻的稳态误差	(297)	参考文献		(362)
8.6.2	离散控制系统的无差度	(297)			
8.7	离散控制系统的最少拍校正	(299)			
8.7.1	最少拍系统的基本概念	(299)			
8.7.2	最少拍系统的设计	(300)			

第1章 绪 论

1.1 引言

何谓自动控制？自动控制就是在人不直接参与的情况下，利用自动控制装置使工作机械或生产过程自动地按预定的规律运行，或使被控量（工作机械或过程的某个物理参数）按预定的要求变化。由自动控制装置与被控对象以一定结构组成的、能完成某种控制任务的有机整体称为自动控制系统。

在 21 世纪的今天，自动控制科学与技术的发展无论是在深度还是在广度上都达到了惊人的地步，对人类社会产生着巨大的影响。在工业方面，对于机械制造、石油、化工、造纸、轻纺、冶金、轧钢等生产过程中遇到的各种物理量，包括位置、速度、频率、温度、流量、压力、液位、厚度、张力等，都有相应的自动控制系统。在农业方面，有灌溉自动控制系统、农业机械自动操作系统等。在军事方面，有各种类型的伺服系统、火力控制系统、制导与控制系统等。在航天、航空和航海方面，有导航系统、遥控系统和各种仿真器。除此之外，在交通管理、图书管理、办公室自动化、智能建筑乃至日常家务方面，自动控制技术也都有着实际的应用。今天，自动控制系统的应用领域还在不断扩大，几乎涉及生物、医学、生态、经济、社会等所有领域。总之，除了控制工程师和控制科学工作者以外，对于一般的工程技术人员和科学工作者来说，了解和学习一些自动控制科学与技术的知识也是很有必要的。

1.1.1 自动控制理论发展简史

用自动控制的方法代替人工控制使各种机械装置自动地工作是人类发展史上的一大创举，其思想可追溯到久远的古代。早在公元前 14 世纪至公元前 11 世纪，中国和古巴比伦就出现了称为“刻漏”的自动计时装置，这可能是人类研制和使用自动装置的起始时期。为了满足生产、生活和作战的需要，中国古代的能工巧匠发明了许多原始的自动装置，较著名的还有：指南车（三国时期）、浮子式阀门（公元 1178 年）、计里鼓车（东汉以后）、漏水转浑天仪（公元 2 世纪）、候风地动仪（公元 132 年）、水运仪象台（公元 1088 年）等。公元 1 世纪，古代埃及和希腊人也创造发明了教堂庙门自动开启、铜祭司自动洒圣水、投币式圣水箱等自动装置。

古代的自动装置主要是基于相对直观的“因果关系”而发明的，因而并未产生自动控制理论。这与 18 世纪末开始逐渐发展起来的、基于反馈原理的自动装置有着本质的不同。反馈使“因果关系”进一步发展成为更加复杂的“因果-果因关系”。由于反馈形成的回路使“因果”双向相互作用，已不再是简单的逻辑关系，因此，人们为做到知其所以然地设计基于反馈原理的自动装置，必须对反馈控制理论加以研究，这也是反馈控制理论发展的初始推动力。按发展的前后顺序，人们常将自动控制理论分为经典控制理论和现代控制理论，以区别两者明显不同的特征。下面就对自动控制理论发展各时期的主要标志有侧重地进行简要回顾。

1769 年，英国机械师瓦特（J.Watt）发明了飞球调速器，用来与蒸汽机的进汽阀连接构成蒸汽机转速的闭环自动调速系统，其原理见本章 1.5 节的讨论。这项发明极大地提高了蒸汽机的效率和性能，被普遍认为是最早用于工业过程的自动反馈控制器，成为第一次工业革命的标志，对控制理论后来的发展也产生了重要影响。这一时期，俄国人波尔祖诺夫（I. Polzunov）于 1765 年发明了浮球调节器，用浮球探测水位，通过连杆装置带动进水阀来调节蒸汽锅炉水位。波尔祖诺夫的发明尽管比瓦特的早几年，但其影响远不及飞球调速器。据资料估计，1868 年仅在英国本土就有 75 000 台采用瓦

特飞球调速器的蒸汽机在运行, 瓦特发明的飞球调速器对当时工业生产产生的巨大影响是可想而知的。

反馈系统引入了复杂的“因果-果因关系”, 其所具有的动力学特性并非在一开始就被人们所掌握。研究控制理论早期发展的学者指出, 英国剑桥大学的数学及天文学家艾里(G. B. Airy)在 1826 年到 1835 年期间系统地研究了天文望远镜的速度控制, 根据倒立摆离心力原理首次发现了反馈系统的不稳定性, 并利用微分方程分析了这种系统。这被认为是反馈控制系统动态特性研究开始的标志。

随着对控制精度要求的不断提高, 人们发现反馈调节系统普遍存在瞬态振荡问题, 对于蒸汽机来说, 就是存在速度忽高忽低的现象, 甚至出现不稳定问题。显然, 仅靠直观的实证性发明已难以解决问题, 对这些现象必须从理论上加以分析以便获得真知灼见, 这就使发展自动控制理论成了当时的当务之急。1868 年, 英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)发表了“论调速器”的论文, 首次全面地论述了反馈调节系统的稳定性问题。文中他推导建立了调速器的微分方程, 并在平衡点附近线性化后, 获得了系统的特征方程。更重要的是指出了系统的稳定性取决于其特征方程的根是否具有负实部; 接着, 他研究了特征方程所有根具有负实部的多项式系数条件, 但只成功解决了二阶及三阶系统的稳定性判定问题。随后的 1877 年和 1895 年, 英国数学家劳斯(E. J. Routh)和德国数学家赫尔维茨(A. Hurwitz)先后提出了基于多项式系数的代数稳定性条件, 给出了高阶线性定常系统的稳定判据, 即劳斯-赫尔维茨判据。几乎在同一时期, 1893 年俄国数学家李雅普诺夫(A. M. Lyapunov)基于非线性运动微分方程研究了一般运动稳定性问题, 在其博士论文“运动稳定性的一般问题”中建立了著名的李雅普诺夫方法, 所提方法也包括了针对线性微分方程的劳斯判据结论, 而且采用的是状态变量法, 为现代控制理论以及非线性控制理论奠定了基础。

20 世纪 20 年代, 随着电子管放大器的出现以及远距离通话的实现, 一方面需要增大放大倍数以满足远距离通话的要求, 另一方面需要研究如何减小因放大倍数增大导致信号严重失真的问题。正是在这方面的研究工作, 美国贝尔(Bell)电话实验室的工程师和科学家布莱克(H. S. Black)、奈奎斯特(H. Nyquist)和伯德(H. W. Bode)等人逐步建立起了反馈控制系统的频率特性分析法。1927 年布莱克(H. S. Black)发明了负反馈放大器, 但为大幅度减小失真而使用过大的回路增益产生了稳定性问题, 而此时的电路动态特性已十分复杂, 通常是用高达 50 阶的微分方程来描述, 劳斯判据在当时已难以使用。1932 年奈奎斯特在介入了这一工作后提出了著名的奈奎斯特稳定判据, 即用频率响应特性曲线来分析稳定性。1940 年伯德引入了半对数坐标系来绘制频率特性曲线, 也称为伯德图, 并根据奈奎斯特理论, 于 1945 年发表了论著“网络分析与反馈放大器设计”, 描述了反馈控制系统的频率特性设计方法。

随着反馈放大器的发展, 反馈控制在其他领域的应用也在不断完善。1922 年俄裔美国工程师米诺斯基(N. Minorsky)在参加美国军舰新墨西哥号自动驾驶仪的调试后, 发表了论文“自动驾驶体的直接稳定性”, 分析了船舶驾驶控制系统的稳定性, 并首次提出了积分和微分控制的思想。1934 年美国麻省理工学院的赫曾教授(H. Hazen)发表了论文“关于伺服机构理论”, 创立了伺服控制理论, 首次提出轨迹跟踪在反馈控制中的重要性。在大量的实验工作和对系统动态特性进行线性化的基础上, 1936 年英国工程师考伦德(A. Callender)等人发明了温度控制系统的 PID 控制器, 通过适当地调整 PID 控制器的参数就可以获得满意的控制系统性能。考伦德等人于 1936 年 2 月申请美国发明专利并于同年 10 月获得批准, 因而被认为是 PID 控制器的发明者。PID 控制器特别适合具有非线性及大延迟特征的复杂工业过程对象, 而 PID 控制器的参数整定也形成了控制理论的一个分支。1942 年美国工程师齐格勒(J. G. Ziegler)和尼科尔斯(N. B. Nichols)发表了题为“自动控制器最优整定”的论文, 提出了至今仍适用的 PID 参数整定准则, 其中, 尼科尔斯在美国麻省理工学院(MIT)辐射实验室还发明了尼科尔斯图。

“二战”期间以及战后的十年, 由于设计飞机自动驾驶仪、大炮定位系统、雷达跟踪系统等军用装备系统的需要, 数学分析工具开始被广泛采用, 使控制系统设计不再是使用“试凑法”的一门手艺, 极大地推动了自动控制理论及应用的发展。1948 年美国电信工程师伊万斯(W. R. Evans)在从事飞

机导航与制导工作中,遇到了许多频率分析法难以解决的动态系统稳定性问题,于是他又回到70年前麦克斯韦和劳斯所研究的特征方程上来,并于1948年和1950年先后发表了题为“控制系统的图解分析法”和“控制系统的根轨迹综合法”两篇论文,创立了根轨迹法的完整理论。

1948年美国数学家维纳(N. Wiener)出版了专著《控制论》,其副标题为“关于动物和机器中控制和通信的科学”。至此,反馈的概念已被维纳推广到包括生物等一切控制系统中,创立了控制论(Cybernetics)。1956年中国科学家钱学森全面总结了经典控制理论后在美国出版了《工程控制论》(*Engineering Cybernetics*)。

到20世纪50年代初,以频率特性法和根轨迹法为核心的经典控制理论经历了创立、形成和发展的过程。经典控制理论是复数域方法,也称为频域方法。这种方法以传递函数作为系统数学模型,利用图解法进行分析与设计,比求解微分方程更简便,“二战”后曾持续占主导地位,这客观上也是计算机未出现之前的必然结果。

20世纪50年代初,人造卫星和空间技术的发展需要设计高复杂度、高精度的控制系统,这些现实要求成为了自动控制理论发展的新的推动力。以常微分方程作为系统模型,1956年前苏联数学家庞特里亚金(L. S. Pontryagin)提出了极大值原理,为最优控制奠定了坚实的基础。同年,美国数学家贝尔曼(R. Bellman)提出了动态规划理论。1960年美国数学家卡尔曼(R. E. Kalman)在前苏联莫斯科召开的首届国际自动控制联大会上发表了论文“控制系统的一般问题”,提出了状态空间方法,建立了多变量最优控制和最优滤波理论。20世纪50年代至60年代是现代控制理论创立、形成和发展的时期,这一时期的突出特点是时域方法得到了迅猛发展。

20世纪70年代至今,随着大规模集成电路数字计算机时代的到来,价廉而功能强大的微型计算机实现了以往不可想象的计算量,以前被认为是难以解决的复杂问题,今天在个人数字计算机面前也往往变得十分简单。随着微型化的发展,微处理器已嵌入到各种数字控制器中,进而推动了控制器应用高级控制算法的能力。数字计算机的这些发展以及面向21世纪的更高精度的控制系统需求推动了自动控制理论及应用向解决更加复杂实际问题的方向发展。出现了若干控制理论的分支,例如,面向系统建模的系统辨识;面向不确定性系统的自适应控制、鲁棒控制;面向复杂对象的大系统分解与协调控制、智能控制、非线性控制的微分几何法,等等。总之,随着人类生产和生活需求的不断提升,自动控制理论必将伴随人类的科技进步而不断发展、日新月异。

1.1.2 控制工程实践

自动控制系统通过改善装置或系统的性能来达到提高生产率和保证产品质量稳定的目的,而自动化利用控制装置操纵工作机械自动运行等方式来提高劳动生产率和产品质量。自动化的核心是控制与系统,因此,控制工程实践是实现自动化的主要手段。自动化最早在汽车工业中应用并得到普及,故其初始概念是指在工业生产(加工、制造等)过程中采用自动控制代替人工控制。1947年美国福特汽车公司正式使用自动化一词,其含义是指加工采用连续的方式,生产过程流水式地自动进行。自动化的广泛普及极大地拓展了人类生产活动的领域和空间,在提高劳动生产率和产品质量的同时,也将人们从繁重的体力劳动和大量重复性手工操作中解放出来。半个多世纪以来,随着人们对产品质量需求的不断提升,促使现代工业必须致力于更精密的加工和面对更高的产品质量要求,这反过来对自动控制系统也提出了越来越高的要求,从而推动了自动化事业的不断发展。

1949年中华人民共和国成立以来,我国自动化科学技术停滞不前的状况逐步得到根本改变。早在1956年第一个五年计划完成后,汽车行业就建成了汽车汽缸体加工自动线以及若干种自动、半自动机床。1964年第二汽车制造厂就制造了各种提高生产率的自动机床8千多台,组成的自动线达57条。从20世纪70年代开始,我国通过陆陆续续地引进国外成套自动化生产线,并组织了一系列的自主研

发和创新,随着 20 世纪 80 年代数字计算机控制开始在我国企业的大量普及,我国工业生产逐渐从局部自动化,即单个过程或单个机器自动化,发展成为了今天的全方位、全流程的综合自动化。目前,在我国汽车、钢铁、化工、造纸、电力等工业领域,全流程的综合自动化已逐步普及。

我国从事控制工程实践的全国性学术组织主要是 1961 年在天津宣告成立的中国自动化学会,第一届理事长为著名控制科学家钱学森院士。学会的组织成员包括了全国自动化科学技术领域的中国科学院院士、中国工程院院士、科学家、专家、教授、工程技术人员、管理人员,以及在学术、工程技术领域中有一定造诣的科技工作者、企业家和管理科学家。目前,中国自动化学会有 29 个省级学会,24 个专业委员会,7 个工作委员会,会员数量近 3 万人。这些机构基本覆盖了我国自动化科学技术领域的各个层面,会员所联系的控制工程实践人员更是数以十万计。中国自动化学会在筹建期间就成为 1957 年成立的国际自动控制联合会(International Federation of Automatic Control, IFAC)的创始国组织之一,是推动我国自动化事业最权威的国家一级学术性社会团体。

1.2 自动控制的基本原理

1.2.1 人工控制与自动控制

前面已给出了自动控制的定义。自动是相对于人工而言的,因此可以将人工控制系统与自动控制系统相对照来理解自动控制的基本原理。图 1-1 是一个人工控制的水池液位恒定供水系统。操作人员的任务是:一方面要维持水经过出水管道源源不断地供给用户,另一方面要保持一定的水压头确保供水质量。这一任务决定了控制目标就是要保持水池的液位在指定的位置尽可能恒定不变,即在保持不间断供水的同时也确保供水的质量(水压头恒定)。人工控制的操作过程如下:

- (1) 操作人员将期望的液位值(即水位高度)记在大脑中;
- (2) 操作人员用眼睛看来读取水池内的实际液位值;
- (3) 操作人员将液位期望值与实际值进行比较得出偏差值;
- (4) 操作人员根据偏差的大小和性质(正负性),决定如何通过用手打开或关闭阀门的方式来调节经过阀门的水量大小,以达到维持液位恒定的控制目标。

上述液位控制过程不断重复,每一步均由操作人员完成,故为人工控制。

若采用自动控制装置代替上述人的操作,就实现了人不直接参与情况下的自动控制了。图 1-2 是一个简单的液位自动控制系统,对照人工控制系统,其工作原理如下:

- (1) 用连杆的长度代替人的大脑记下期望的液位值;
- (2) 浮子作为传感器代替人的眼睛测量实际液位值;
- (3) 浮子和连杆组合代替人的大脑计算出液位期望值与实际值之间的偏差值;

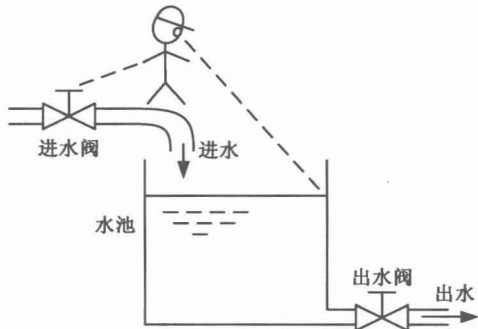


图 1-1 液位人工控制系统

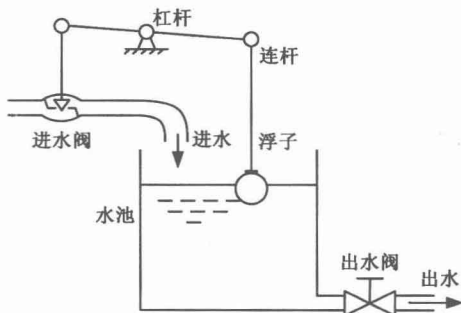


图 1-2 液位自动控制系统

(4) 杠杆机构的一端代替人的大脑对偏差的大小和性质进行判断,并据此决定由其另一端带动的进水阀如何动作(打开或关闭阀门)去调节水量的大小。

可见,自动控制与人工控制的工作原理是十分相似的,也可以说,自动控制模仿了人工控制。为了模仿操作者,自动控制装置必须要有与人的器官对应的、能完成相应功能的元件。在上述简单的液位自动控制系统中,这些元件有:① 能根据液位期望值来调节连杆长度的环节(称为给定元件)代替人的大脑记下液位期望值;② 浮子作为传感器(称为测量元件)代替人的眼睛测取实际液位值;③ 浮子和连杆组合代替人的大脑计算出液位偏差值(称为比较元件);④ 杠杆机构代替人的大脑对偏差的大小和性质做出判断(作为决策机构做出如何校正的决定,称为校正元件),从而带动进水阀(称为执行元件)代替人手打开或关闭阀门调节经过阀门的水量大小。由此可见,组成自动控制装置的元件一般应包括:给定元件,测量元件,比较元件,校正元件和执行元件,而上述液位自动控制系统就是由这些元件和被控对象(水池)组成的有机整体。

进一步分析可以发现,图 1-2 所示的简单液位自动控制系统还不能完全代替人工控制。假设水池液位处于期望值并且进水量与出水量相等,此时进水与出水平衡,水池液位保持不变。当用户用水量突然增加时,出水量增加到一个新值,导致水池液位下降。为了保持水位在原来的期望值,有经验的操作人员会开大阀门使进水量大于出水量以便水位升回到期望值;当水位回到期望值时,操作人员再关小阀门使进水量与新的出水量相等,从而维持水位在期望值不变。显然,此时新的进水量等于新的增大了的出水量,因而新的阀门开度比原来大了。对于同样的情况,图 1-2 所示的简单液位自动控制系统的工作过程是:当用户用水量突然增加时,出水量增加到一个新值,此时水池液位下降导致浮子下降,浮子、连杆与杠杆机构测出液位期望值与实际值之间的偏差值,然后由杠杆机构带动进水阀打开阀门增大进水量。由于新的出水量增加了,为了使进水量与出水量相等,浮子必须维持在比液位期望值更低的位置,只有通过使实际液位值低于期望值才能使杠杆机构带动进水阀维持阀门在新的开度,以便增加进水量达到进水与出水的新平衡。由此可见,图 1-2 所示的简单液位自动控制系统尽管能够代替人实现自动控制,但却无法代替人实现尽可能缩小液位误差的控制。

从前面的分析可知,图 1-2 所示的简单液位自动控制系统已经具有了与人的器官对应的、能完成人工控制相应功能的元件,那为什么还不能完全代替人工控制呢?从上面用户用水量突然增加时人的操作过程可知,简单液位自动控制系统中的给定元件、测量元件、比较元件和执行元件都较好地替代了操作人员的工作,然而维持新的进水量需要液位低于期望值,这就是无法消除液位误差的原因。换句话说,作为校正元件的杠杆机构无法替代操作人员的不断重复操作。这揭示了简单液位自动控制系统还不能完全替代人的大脑决策过程,需要从作为决策机构的校正元件入手来进一步改进系统。图 1-3 给出了可以消除液位误差的自动控制系统。其工作原理如下:

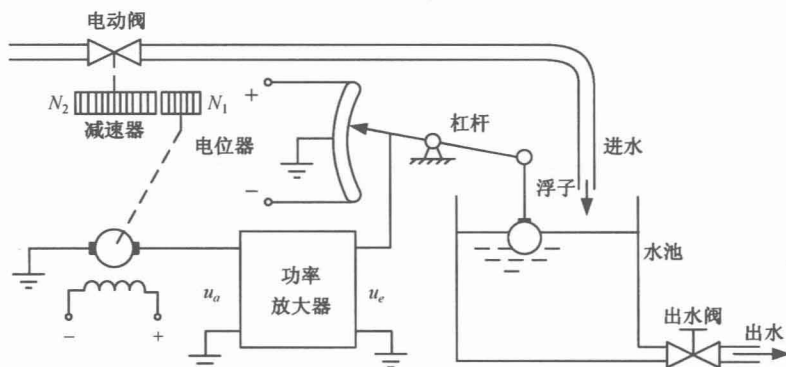


图 1-3 可消除误差的液位自动控制系统

(1) 用电位器和杠杆机构代替人的大脑记下液位期望值的电位器给定值(此时为电位器中点);
 (2) 浮子作为传感器代替人的眼睛测量实际液位;
 (3) 电位器和杠杆机构代替人的大脑计算出电位器上对应于期望值的给定值与对应于实际值的测量值之间的偏差值(此时为电压值);

(4) 功率放大器与电动机组成的校正环节代替人的大脑对偏差的大小和性质进行判断,并据此决定电动机如何转动带动阀门(打开或关闭阀门)去调节水量的大小;

(5) 只要电位器和杠杆机构比较所得的偏差不为零,则功率放大器与电动机组成的校正环节连续不断地产生控制作用,即进一步打开或关闭阀门,甚至使阀门达到全开或全闭状态,使液位上升或下降,直到液位恢复到期望值为止。

上述过程的第(5)步较好地模仿了人在反复操作时大脑的决策过程,因此提高了液位控制的质量(控制精度)。

1.2.2 开环控制与闭环控制

自动控制系统一般可分为两类基本控制方式:开环控制和闭环控制,对应的系统分别称为开环控制系统和闭环控制系统。

1. 开环控制系统

图 1-4(a) 是一个他激直流电动机转速开环控制系统的原理图,其任务是控制电动机以恒定的转速带动负载工作。工作原理如下:

- (1) 通过调节电位器的滑块给定输入电压 u_r , 即给定对应的期望电动机转速;
- (2) 输入电压 u_r 经过功率放大器得电枢电压 u_a 控制电动机的转速 n ;
- (3) 电动机带动负载工作。

他激直流电动机在恒定负载情况下,电动机转速 n 与电枢电压 u_a 成正比,因功率放大器为线性放大,这就使电动机转速 n 与给定输入电压 u_r 形成了一一对应的函数关系。

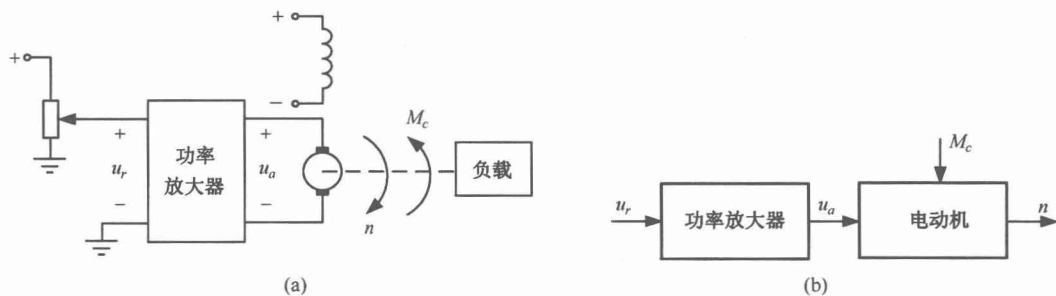


图 1-4 直流电动机转速开环控制系统

图 1-4(b) 是用来描述转速开环控制系统的方块图,其中方块代表系统中的功能元件(或功能环节),带有箭头的有向线段表示各元件之间以及输入、输出信号的传递方向。系统的输入信号就是给定的输入电压 u_r , 功率放大器与电动机之间传递的信号就是电枢电压 u_a , 系统的输出信号就是电动机转速 n 。在工作中因外部因素产生阻力转矩扰动 M_c 时,电动机的转速也随之会发生变化导致控制质量下降(即不能按期望的转速工作)。因此,转矩扰动 M_c 将影响系统输出量 n 的恒定,它作用在电动机上被称为外部扰动(干扰)信号。

由方块图可见,系统的输入与输出之间只有前向的信号传递,而没有反向的信号回传。因此,转矩扰动 M_c 使系统输出 n 变化的情况不能在输入端有所反应,系统也就不能有针对性地调整电位器

滑块去抵消转矩扰动 M_c 的影响使系统的输出 n 恢复到期望值。这类输入与输出之间只有前向信号传递的控制系统称为开环控制系统。开环控制系统的控制精度主要取决于系统本身参数的稳定程度，没有抵抗外部干扰的能力，因此，在实际工作环境中，难以达到很高的控制质量。

开环控制系统的优点是结构简单，成本较低，缺点是抗干扰能力差。对于参数稳定或几乎不变的系统，在外部干扰较弱或控制精度要求不高的场合，开环控制系统仍被大量使用。

2. 闭环控制系统

开环控制系统的控制精度和抑制干扰能力较差的主要原因就是系统没有从输出到输入的反向信息传递，这种反向信息传递称为反馈。具有反馈的系统因信息在系统内的传递形成了闭合回路，故称为闭环系统。

图 1-5 (a) 是一个增加了反馈的直流电动机转速闭环控制系统原理图。为了测量作为系统输出信号的电动机转速 n ，增加了一个测速发电机，测速发电机同时将所测得的速度量纲换算为反馈电压 u_f 并反馈到输入端；为了比较反馈电压 u_f 与输入电压 u_r 求出偏差电压信号 $u_e = u_r - u_f$ ，增加了一个电压放大器(放大倍数可根据需要确定，比如，可以是 1:1)形成独立的比较放大环节。工作原理如下：

- (1) 通过调节电位器的滑块给定输入电压 u_r ，即给定对应的期望电动机转速；
- (2) 给定输入电压 u_r 与测量电压 u_f 在电压放大器输入端产生偏差电压 u_e ，经过电压放大器放大为 u_1 ；
- (3) 放大的偏差电压信号 u_1 经功率放大器得电枢电压 u_a 控制电动机的转速 n ；
- (4) 当出现转矩扰动 M_c 时，测速发电机将电动机转速的变化量转换为反馈电压 u_f 的变化量，然后回送到系统输入端与给定输入电压 u_r 进行比较产生转矩扰动 M_c 引起的偏差电压 u_e ，从而形成闭环控制；
- (5) 电动机以尽可能接近期望值的转速带动负载工作。

图 1-5 (b) 是描述转速闭环控制系统的方块图，在系统的输入与输出之间，信号从输入到输出方向传递的通路称为前向通道，而从输出到输入方向传递的通路称为反馈通道。由于反馈通道的存在，闭环控制系统能够根据期望值对应的给定值与实际值对应的反馈测量值之间偏差的大小和性质产生相应的控制作用，从而进一步减小转速误差，因此，闭环控制系统具有较强的抗干扰能力。例如，当转矩扰动 M_c 使系统输出量 n 偏离期望值时，这种偏离情况立即被反馈到输入端经比较得到偏差 u_e ，再经过放大后产生相应的电枢电压 u_a 调整电动机转速 n ，从而减小转矩扰动 M_c 的影响使系统的输出量 n 维持在期望转速附近。

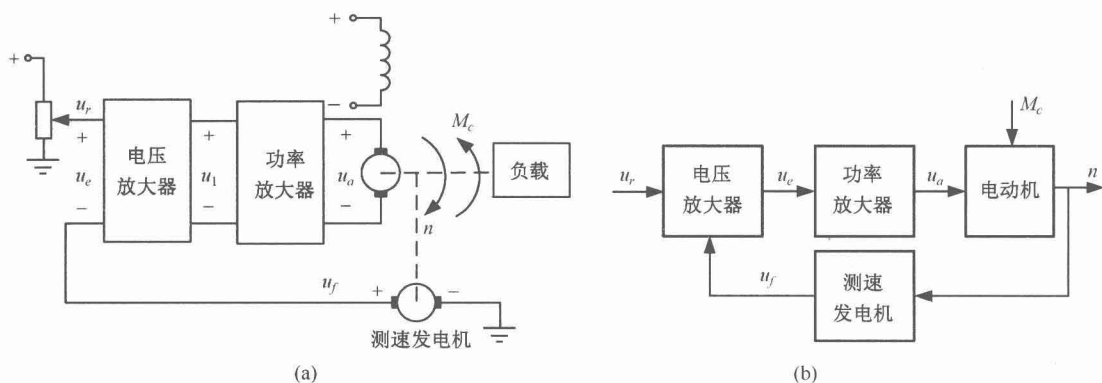


图 1-5 直流电动机转速闭环控制系统