21 世纪高职高专机电类规划教材

自 动 控 制 系 统

——工作原理、性能分析与系统调试

主　编　孔凡才
副主编　王　楠　颜小辛
参　编　蒋明琴
主　审　杨正堂

机 械 工 业 出 版 社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

本书内容分 3 篇:

第 1 篇主要从物理过程上,概括地讲述常用检测元件、常用电动机、电力电子电路和调节器等基本部件的工作原理 (10～36 学时)。

第 2 篇内容包括拉氏变换、系统数学模型、系统性能分析和系统校正。本书主要从传递函数与系统框图出发,以定性分析为主,阐述各环节(及各参数) 对系统性能的影响与改进性能的途径 (10～24 学时)。

第 3 篇为典型自动控制系统的工作原理、性能分析和系统调试。(24～36 学时)。

本书的特点是: 内容新,理论联系实际,突出物理过程的分析,注重方法论的阐述,注意基础知识的复习与应用,分析细致,通俗易懂。并可根据不同专业要求,有 6 种方案可供选择 (学时为 44～96)。

本书每章均有小结、思考题与习题,并有较多的实例分析和读图练习(其中多为生产实际问题)。

本书可供高等专科学校、高等职业技术学院、职工大学的电气工程类专业、应用电子类专业、机电一体化专业和计算机应用类专业选用,也可供工程技术人员参考,并可作为技术培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制系统: 工作原理、性能分析与系统调试/孔凡才主编 .—北京: 机械工业出版社, 2003.4

21 世纪高职高专机电类规划教材

ISBN 7-111-11529-5

Ⅰ.自 ... Ⅱ.孔 ... Ⅲ.自动控制系统- 高等学校: 技术学校- 教材 Ⅳ.TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 005236 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 贡克勤 版式设计: 张世琴 责任校对: 张 媛

封面设计: 张 静 责任印制: 路 琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm× 1092mm 1/16·17 印张·415 千字

0 001—8 000 册

定价: 25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前　言

本书是在高专规划教材《自动控制原理与系统》和自学考试指定教材《自动控制系统及应用》的基础上，根据高职教育侧重技术应用和面向生产现场工作的特点，并考虑到现代教育侧重能力培养（自学能力、分析能力、实践能力和创新能力的培养）的要求和高新技术普遍应用的现状，为高等职业技术学院学生编写的教材。

本书内容分 3 篇，第 1 篇为典型自动控制系统的基本部件，它主要从物理过程上概括地讲述常用检测元件、常用电动机、电力电子电路和调节器等基本部件的工作原理。列入这些内容的目的，一是为了对基础知识进行复习和必要的补充，二是为了弥补有些专业未开设这些基础课程而带来的学习困难，三是为现场技术人员提供一本比较完整的、实用的技术参考书。本书第 2 篇为自动控制原理，它包括拉氏变换、系统数学模型、系统性能分析和系统校正，它们是对系统进行分析和改进的理论基础。本书主要从传递函数和系统框图出发，采取以定性为主的分析方法，分析各环节和它们的参数对系统性能的影响以及改善系统性能的途径；本篇的特点是精简数学推导，突出物理含义与实际应用。本书的第 3 篇为典型自动控制系统的工作原理、性能分析和系统调试。它包括水位控制系统、温度控制系统，晶闸管直流调速系统(含不可逆与可逆，模拟式与数字式)，双极晶体管 PWM 控制的直流调速系统，IGBT SPWM 控制的交流变频调速系统（含 VVVF、矢量控制和通用变频器），位置随动系统（含直流伺服、交流伺服、步进驱动和微机—集成模块控制系统）等，这些基本上概括了当前常用的各种元件，各种典型电路和典型控制系统。对其中较难懂的高新技术部分，则尽可能采用图、表的方式加以简要介绍，以使读者对高新技术有一个基本的认识。由于本篇内容涉及的面广、量多，因此学习时请注意，其中一部分为基本内容（多画出系统框图或有数学分析的），另一部分为扩大知识面的简介，再有一部分为课后的参考读物（如实例分析和读图练习等），此外还有意识地将部分实例与推导列为“阅读材料”，以提高学生的自学能力。

由于高等职业技术教育要大力加强实践环节，需要对理论课程进行整合。此外，还要适应市场的需求，不断调整专业结构和教学计划（而且各校的教学计划差异也较大），根据这种情况，本书为此将有关基础课程的内容和专业内容整合在一起，既前后呼应，又相对独立；为各校、各专业的选用，提供一个具有多种方案可供选择的平台。表 0-1 为可供选择的方案和建议教学时数（44～96 学时）。表中列了 6 个方案，供参考。其中Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ方案为自动控制原理已学过或不要学的专业；Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ方案为相关基础课程已学过的专业；而Ⅴ、Ⅵ方案则为相关基础课程未学，自控原理也未学的专业。对有的专业，也可以分成 2～3 门小课程来开。

在编写时，考虑到高等职业技术教育的特点，力求做到理论联系实际，突出物理过程的分析，注重方法论的阐述，注意基础知识的复习与应用，以期学生对自动控制系统的组成、工作原理、性能分析和系统调试有一个完整的认识。此外，书中每章末均有小结（它概括了每章的基本内容与要求，是要求读者记住的）、思考题、习题和读图练习。这些题目多为实际生产中遇到的问题，期望读者能提高自学能力、分析能力、学会把理论知识应用于生产实际，并能有所创新地去改进系统的性能。

本书可供高等专科学校、高等职业技术学院、职工大学的电气工程类专业、应用电子类专业、机电一体化专业及计算机应用类专业选用。也可供有关工程技术人员参考，并可作技术培训教材。

表 0-1　可供选择的方案和建议学时数（44～96)

篇次		1					2				3						
章次		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	总学时
章名		概述	检测	电机	变流	调节器	拉氏	模型	性能	校正	水、温	直流	PWM	交流	随动	调试	
章学时		4	8	10	10	4	4	8	8	4	4	8	4	8	8	4	
篇学时		36					24				36						96
方案	Ⅰ	12					0				32						44
	Ⅱ	10					10				36						56
	Ⅲ	10					24				24						58
	Ⅳ	30					0				30						60
	Ⅴ	24					24				24						72
	Ⅵ	36					24				36						96

本书由上海理工大学孔凡才任主编，王楠、颜小辛任副主编，蒋明琴参编，杨正堂主审。其中王楠编写第 4 章、第 5 章、第 13 章和第 11 章的 11.5 节。颜小辛编写第 2 章、第 14 章，蒋明琴编写第 10 章，其余均由孔凡才编写。限于编者的水平，书中难免存在错与不妥之处，殷切期望任课教师和广大读者不吝指正。欢迎采用本书做教材的老师来信进行交流，来信请寄< 200031> 复兴中路 1195 号上海理工大学孔凡才收，或来电（021）63014327。需要教学参考资料的老师，可去信（200031）复兴中路 1195 号，上海高机书店，请他们邮寄。

编　者

目　　录

前言

第 1 篇　自动控制系统概述和典型自动控制系统的基本部件

第 1 章　自动控制系统概述 …… 1
1.1　引言 …… 1
1.2　开环控制和闭环控制 …… 2
1.3　自动控制系统的组成 …… 4
1.4　自动控制系统的分类 …… 5
1.5　自动控制系统的性能指标 …… 6
1.6　研究自动控制系统的方法 …… 8
小结 …… 9
思考题 …… 9
习题 …… 9
第 2 章　常用检测元件 …… 11
2.1　检测的基本知识 …… 11
2.2　温度检测元件 …… 12
2.3　线位移检测元件 …… 14
2.4　角位移检测元件 …… 18
2.5　转速检测元件 …… 20
小结 …… 21
思考题 …… 22
习题 …… 22
第 3 章　常用电动机的工作原理 …… 23
3.1　直流电动机的基本结构、工作原理和工作特性 …… 23
3.2　直流伺服电动机的基本结构、工作原理与工作特性 …… 27
3.3　三相异步电动机的基本结构、工作原理与工作特性 …… 29
3.4　交流伺服电动机的基本结构、工作原理和工作特性 …… 36
3.5　微型同步电动机的基本结构和工作原理 …… 38
3.6　步进电动机的基本结构和工作原理 …… 41
小结 …… 44
思考题 …… 47
第 4 章　电力电子供电电路 …… 49
4.1　电力电子供电电路概述 …… 49
4.2　晶闸管及其触发、保护电路 …… 49
4.3　晶闸管直流调压电路 …… 56
4.4　晶闸管交流调压电路 …… 62
4.5　双极晶体管（BJT）——脉宽调制（PWM）型直流调压电路 …… 65
4.6　绝缘栅双极型晶体管（IGBT）——正弦脉宽调制（SPWM）型交流变频电路 …… 71
小结 …… 77
思考题 …… 79
习题 …… 80
读图练习 …… 80
第 5 章　常用的调节器线路 …… 84
5.1　比例（P）调节器 …… 84
5.2　积分（I）调节器 …… 85
5.3　比例积分（PI）调节器 …… 86
5.4　惯性（T）调节器 …… 87
5.5　比例积分微分（PID）调节器 …… 88
小结 …… 89
思考题 …… 90
习题 …… 90

第 2 篇　自动控制原理

第 6 章　拉普拉斯变换 …… 91
6.1　拉氏变换的概念 …… 91
6.2　拉氏变换的主要运算定理 …… 92
6.3　拉氏反变换及应用举例 …… 93

需要全本请访问 www.ertongbook.com

小结 …… 96
习题 …… 97
第 7 章　自动控制系统的数学模型(传递函数与系统框图) …… 98
7.1　传递函数的概念 …… 98
7.2　系统框图 (结构图) …… 99
7.3　典型环节的传递函数 …… 100
7.4　框图的变换和简化 …… 106
7.5　自动控制系统闭环传递函数的求取 …… 108
7.6　自动控制系统常用部件的传递函数 …… 110
小结 …… 118
思考题 …… 120
习题 …… 120
第 8 章　自动控制系统的性能分析 …… 122
8.1　自动控制系统稳定性分析 …… 122
8.2　自动控制系统的稳态性能分析 …… 129
8.3　自动控制系统的动态性能分析 …… 137
小结 …… 141
思考题 …… 142
习题 …… 143
第 9 章　改善自动控制系统性能的途径 (系统校正) …… 145
9.1　串联校正 …… 145
9.2　反馈校正 …… 152
9.3　顺馈补偿 …… 156
小结 …… 158
思考题 …… 159
习题 …… 159

第 3 篇　典型自动控制系统的工作原理、性能分析和系统调试

第 10 章　水位控制系统与温度控制系统 …… 161
10.1　水位控制系统 …… 161
10.2　温度控制系统 …… 164
小结 …… 164
思考题 …… 165
读图练习 …… 165
第 11 章　晶闸管直流调速系统 …… 167
11.1　具有转速负反馈的晶闸管直流调速系统 …… 167
11.2　具有电压负反馈和电流正反馈的晶闸管直流调速系统及实例分析 … 169
11.3　转速、电流双闭环晶闸管直流调速系统 …… 174
11.4　转速、电流双闭环晶闸管逻辑无环流直流可逆调速系统 …… 181
11.5　转速、电流双闭环数字式直流调速系统 …… 184
小结 …… 188
思考题 …… 190
习题 …… 190
读图练习 …… 191
第 12 章　双极晶体管 (BJT) 脉宽调制 (PWM) 控制的直流调速系统 …… 194
12.1　BJT—PWM 控制的直流调速系统的组成 …… 194
12.2　BJT—PWM 控制的直流调速系统的工作原理 …… 195
12.3　BJT—PWM 控制系统的特点 …… 199
小结 …… 199
思考题 …… 200
习题 …… 200
读图练习 …… 200
第 13 章　绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 正弦脉宽调制 (SPWM) 控制的交流调速系统 …… 202
13.1　交流调速的基本方案与变压变频的基本控制方式 …… 202
13.2　模拟式 IGBT—SPWM—VVVF 交流调速系统 …… 204
13.3　微机控制的 IGBT—SPWM—VVVF 交流调速系统简介 …… 205
13.4　矢量控制的交流变频调速系统简介 …… 206
13.5　通用变频器 …… 209
小结 …… 211
思考题 …… 212
习题 …… 212
读图练习 …… 212

第 14 章　位置随动系统 …… 214
14.1　位置随动系统概述 …… 214
14.2　交流位置随动系统 …… 215
14.3　直流位置随动系统 …… 220
14.4　开环步进位置随动系统 …… 227
14.5　位置随动系统的性能要求 …… 231
小结 …… 231
思考题 …… 232
读图练习 …… 232
第 15 章　自动控制系统的分析、调试与故障的排除 …… 235
15.1　自动控制系统的分析步骤 …… 235
15.2　自动控制系统的调试方法 …… 238
15.3　自动控制系统的维护、使用和故障的排除 …… 241
小结 …… 245
思考题 …… 245
习题 …… 245
附录 …… 247
附录 A　常用文字符号 …… 247
附录 B　自动控制技术术语中、英名词对照 (以汉语拼音序排列) …… 250
附录 C　实验、实训项目与实验设备 …… 258
参考文献 …… 261

第 1 篇　自动控制系统概述和典型自动控制系统的基本部件

第 1 章　自动控制系统概述

1.1　引　　言

在工业、农业、交通运输和国防各个方面，凡要求较高的场合，都离不开自动控制。所谓自动控制，就是在没有人直接参与的情况下，利用控制装置，对生产过程、工艺参数、技术指标、目标要求等进行自动的调节与控制，使之按照预定的方案达到要求的指标。自动控制系统性能的优劣，将直接影响到产品的产量、质量、成本、劳动条件和预期目标的完成。因此，自动控制越来越受到人们的重视，使控制理论和自动控制技术获得了飞速的发展。

自动控制的应用，虽然可以追溯到 18 世纪 (1788 年) 瓦特 (Watt) 利用小球离心调速器，使蒸汽机转速保持恒定的开创性的突破，以及 19 世纪 (1868 年) 麦克斯威尔 (Maxwell) 对轮船摆动 (稳定性) 的研究；但在初期，自动控制应用的进展是不快的。自动控制的真正发展是在 20 世纪。例如 1920 年海维赛得 (Heaviside) 在无线电方面的研究 (首先引入了拉普拉斯变换、傅里叶变换和表征声强比的单位分贝) 和 1932 年奈魁斯特 (Nyquist) 对控制系统稳定性的研究 (奈氏稳定判据) 等。此后，是第二次世界大战的促进，由于对更快和更精确武器系统的需要，并借助于数学方面的成果，自动控制理论获得迅速的发展。1948 年维纳 (Weiner) 出版了划时代著作《控制论》，对控制理论作了系统的阐述，随后伊文斯 (Evans) 在 1950 年创立了根轨迹法，1954 年钱学森创立工程控制论，1962 年柴达 (Zadeh) 提出状态变量法等等。20 世纪 60 年代以后，以现代控制理论为核心，在多输入—多输出、变参量、非线性、高精度、高效能等控制系统的研究，在最优控制、最佳滤波、系统辨识、自适应控制、模糊控制和智能控制等理论方面，都获得了重大的发展；特别是近年来由于计算机技术和现代应用数学研究的迅速发展，使大系统理论和人工智能控制等方面都取得了很大的进展。

同样，在机电控制技术方面，早在 20 世纪 30 年代，就出现了电子管调节器和模拟计算机，出现了液压仿型机床；到 20 世纪 40 年代，出现了电机放大机—发电机—电动机控制系统；到 20 世纪 50 年代，出现了晶体管、集成电路，步进电动机和三维数控机床；到 20 世纪 60 年代，出现了晶闸管、大规模集成电路、新型伺服电机，以及电液伺服阀的普及和计算机技术的发展；到 20 世纪 70 年代及以后，随着微电子技术和计算机技术的迅猛发展，相继出现了大型多功能数控机床、数控加工中心、机械手、机器人等机电一体化的高新设备，以及计算机辅助设计 (CAD)、计算机辅助制造 (CAM)、计算机集成制造系统 (CIMS) 和柔性制造系统 (FMS) 等高新技术。如今随着时间的推移，将会出现更多的高新产品和高新技术。

面对浩如烟海的各种自动控制技术，本门课程只能说是一个入门，为读者在机、电自动控制技术方面打下一个初步的、但却是非常重要的基础，使读者对自动控制系统的组成、工

作原理、数学模型、性能分析、系统校正和系统调试等方面有一个相对完整的认识。

1.2 开环控制和闭环控制

若通过某种装置将能反映输出量的信号引回来去影响控制信号，这种作用称为“反馈”作用。我们通常按照控制系统是否设有反馈环节来进行分类；设有反馈环节的，称为闭环控制系统；不设反馈环节的，则称为开环控制系统（这里所说的“环”，是指由反馈环节构成的回路）。下面将概括地介绍这两种控制系统的控制特点。

1.2.1 开环控制系统

若系统的输出量不被引回来对系统的控制部分产生影响，这样的系统称为开环控制系统。

例如一般洗衣机[1]就是一个开环控制系统。其浸湿、洗涤、漂清和脱水过程都是依据设定的时间程序依次进行的，而无需对输出量（如衣服清洁程度、脱水程度等）进行测量。

又如普通机床的自动加工过程，也是开环控制。它是根据预先设定的加工指令（背吃刀量、行程距离等）进行加工的，而不去检测其实际加工的程度。

再如如图 1-1 所示的由步进电动机驱动的数控加工机床，也是一个未设反馈环节的开环控制系统。

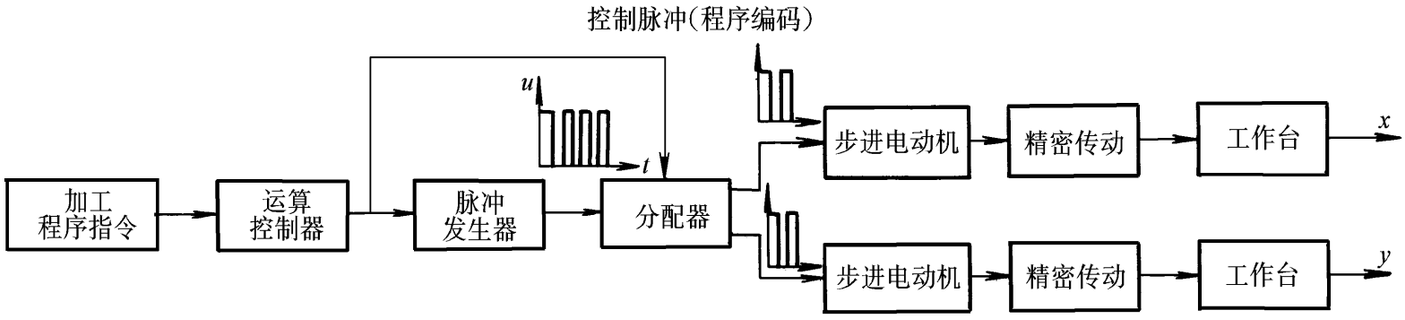


图 1-1 数控加工机床示意图

它由预先设定的加工程序指令，通过运算控制器（可为微机或单片机）去控制脉冲的产生和分配，发出相应的脉冲，由它（通常还要经过功率放大）驱动步进电动机，通过精密传动机构，再带动工作台（或刀具）进行加工。如果能保证不丢失脉冲，并能有效地抑制干扰的影响，再采用精密传动机构（如滚珠丝杠），这样，整个系统虽然为开环系统，但仍能达到相当高的加工精度。

图 1-2 为数控加工机床开环控制系统的组成框图。系统的输入量为加工程序指令，输出量为机床的位移，系统的控制对象为工作台，执行元件为步进电动机和传动机构。由图可见，系统无反馈环节，输出量并不返回来影响控制部分，因此是开环控制。

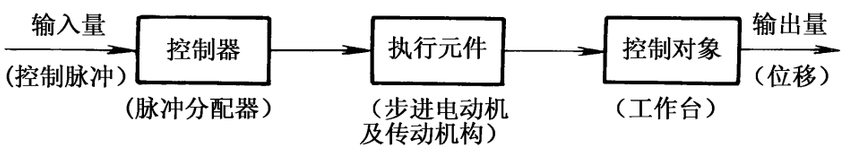


图 1-2 数控加工机床开环控制框图

---

[1] 这里指一般的洗衣机，(不具有判断、智能控制功能)。

由于开环系统无反馈环节，一般结构简单，系统稳定性好，成本也低，这是开环系统的优点。因此，在输出量和输入量之间的关系固定，且内部参数变化或外部负载等扰动因素不大，或这些扰动因素可以预计并能进行补偿，则应尽量采用开环控制系统。

开环控制的缺点是，当控制过程受到各种扰动因素影响时，将会直接影响输出量，而系统不能自动进行补偿。特别是当无法预计的扰动因素，使输出量产生的偏差超过允许的限度时，开环控制系统便无法满足技术要求，这时就应考虑采用闭环控制系统。

1.2.2 闭环控制系统

若系统输出量通过反馈环节返回来作用于控制部分，形成闭合环路，这样的系统称为闭环控制系统，又称为反馈控制系统。图 1-3 为电炉箱恒温自动控制系统。

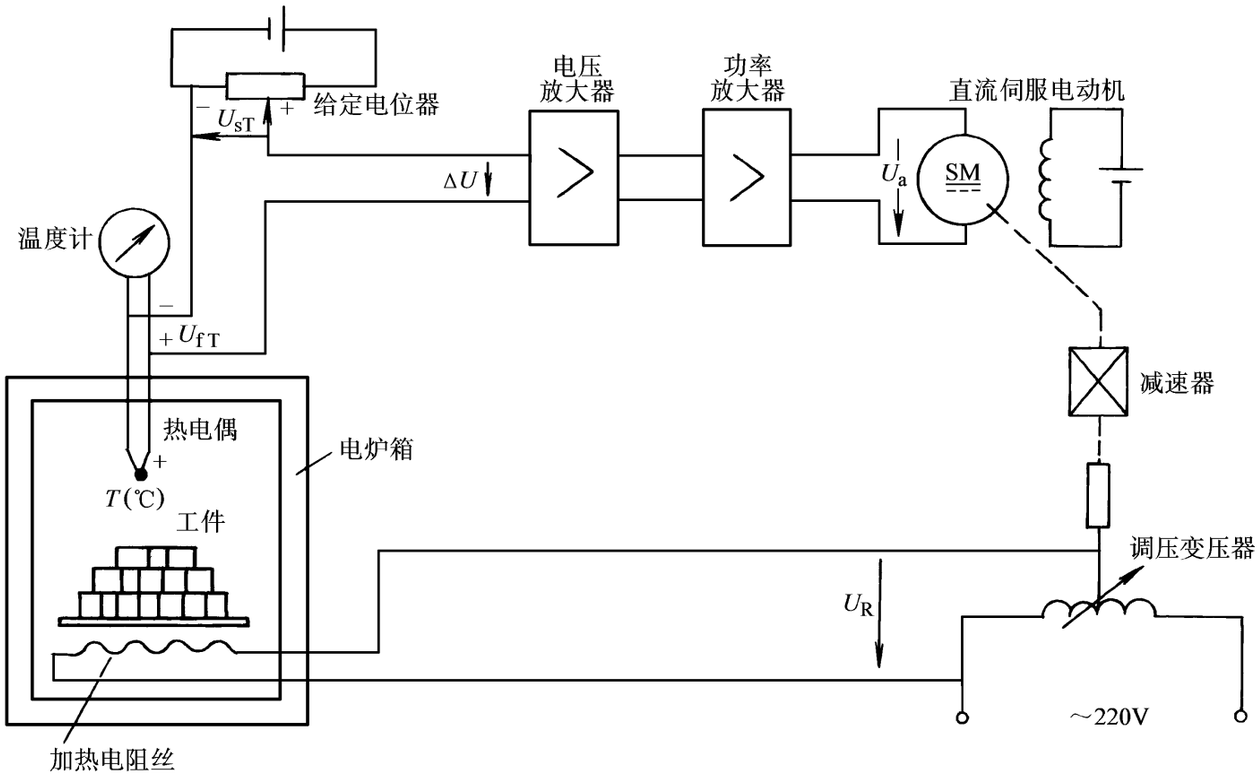


图 1-3 电炉箱恒温自动控制系统

一只由电阻丝通电加热的电炉箱，由于炉壁散热和增、减工件，将使炉温产生变化，而这种变化通常是无法预先确定的。因此，若工艺要求保持炉温恒定，则开环控制将无法自动补偿，必须采用闭环控制，最常用的方法便是采用温度负反馈。由图 1-3 可见，如今采用热电偶来检测温度，并将炉温转换成电压信号 U_{fT}（毫伏级），然后反馈至输入端与给定电压 U_{sT} 进行比较，由于是采用负反馈控制，因此两者极性相反，两者的差值 ΔU 称为偏差电压（$\Delta U = U_{sT} - U_{fT}$）。此偏差电压作为控制电压经电压放大和功率放大后，去驱动直流伺服电动机（控制电动机电枢电压），电动机经减速器带动调压变压器的滑动触头，来调节炉温。电炉箱自动控制系统的组成框图如图 1-4 所示。

当炉温偏低时，$U_{fT} < U_{sT}$，$\Delta U = (U_{sT} - U_{fT}) > 0$，此时偏差电压极性为正，电动机“正”转，使调压器滑点右移，从而使电炉供电电压增加，电流加大，炉温上升，直至炉温升至给定值，$U_{fT} = U_{sT}$，$\Delta U = 0$ 时为止，炉温保持恒定。自动调节过程见图 1-5。

由于新技术的迅速发展，如今有些开环系统已能达到很高的精度。如高精度的步进电动机的驱动系统、采用电动机自适应模型软件进行控制的交流调速系统等。

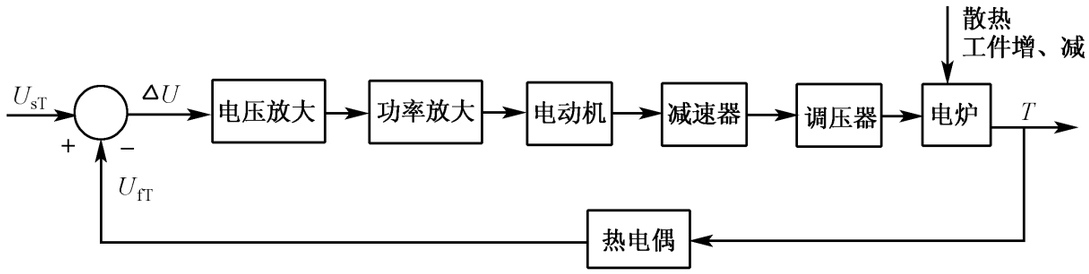


图 1-4　电炉箱自动控制系统的组成框图

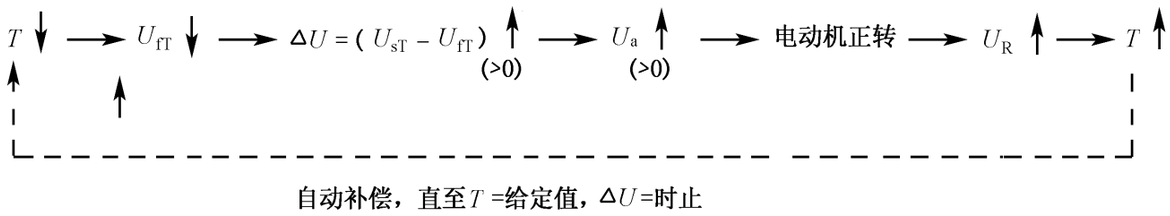


图 1-5　炉温自动调节过程

反之，当炉温偏高时，则 ΔU 为负，经放大后使电动机“反”转，滑点左移，供电电压减小，直至炉温降至给定值。

炉温处于给定值时，ΔU = 0，电动机停转。

由以上分析可见，反馈控制可以自动进行补偿，这是闭环控制的一个突出的优点。当然，闭环控制要增加检测、反馈比较，调节器等部件，会使系统复杂、成本提高。而且闭环控制会带来副作用，使系统的稳定性变差，甚至造成不稳定。这是采用闭环控制时必须重视并加以解决的问题。

1.3　自动控制系统的组成

现以如图 1-3 和图 1-4 所示的恒温控制系统来说明自动控制系统的组成和有关术语。

为了表明自动控制系统的组成以及信号的传递情况，通常把系统各个环节用框图表示，并用箭头标明各作用量的传递情况，图 1-6 便是图 1-3 所示系统的组成框图。框图可以把系统的组成简单明了地表达出来，而不必画出具体线路。

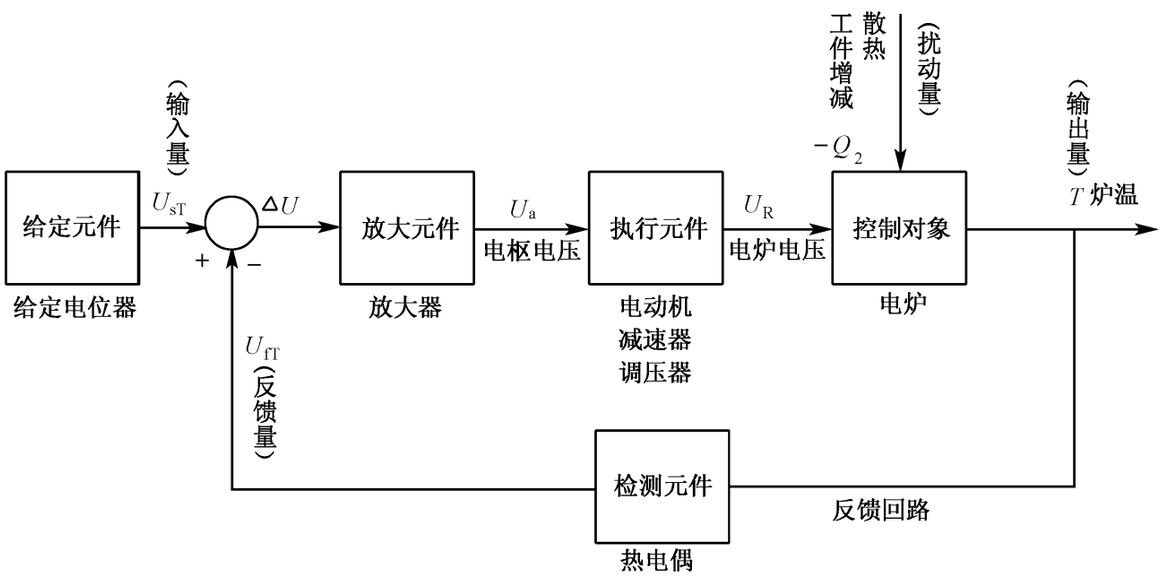


图 1-6　自动控制系统的组成框图

需要全本请访问 www.ertongbook.com

由图 1-6 可以看出，一般自动控制系统包括:

1) 给定元件——由它调节给定信号（U_{sT}），以调节输出量的大小。此处为给定电位器。

2) 检测元件——由它检测输出量（如炉温 T）的大小，并反馈到输入端。此处为热电偶。

3) 比较环节——在此处反馈信号与给定信号进行迭加，信号的极性以“+”或“-”表示。若为负反馈，两信号极性相反。若为正反馈，则极性相同。

4) 放大元件——由于偏差信号一般很小，所以要经过电压放大及功率放大，以驱动执行元件。此处为晶体管放大器或集成运算放大器。

5) 执行元件——是驱动被控制对象的环节。此处为伺服电动机、减速器和调压器。

6) 控制对象——亦称被调对象。在此恒温系统中即为电炉。

7) 反馈环节——由它将输出量引出，再回送到控制部分。一般的闭环系统中，反馈环节包括检测、分压、滤波等单元，反馈信号与输入信号极性相同则为正反馈。相反则为负反馈。

由图 1-6 可见，系统的各种作用量和被控制量有:

1) 输入量——又称控制量或调节量，它通常由给定信号电压构成，或通过检测元件将非电输入量转换成信号电压。如图 1-6 中的给定电压 U_{sT}。

2) 输出量——又称被控制量或被调量，它是被控制对象的输出，是自动控制的目标。如图 1-6 中的炉温 T。

3) 反馈量——通过检测元件将输出量转变成与给定信号性质相同、数量级相同、数值相近的信号电压（称为“定标信号”）。如图 1-6 中的反馈信号 U_{fT}。

4) 扰动量——又称干扰或“噪声”，它通常指引起输出量发生变化的各种因素。来自系统外部的称为外扰动。例如电动机负载转矩的变化，电网电压的波动，环境温度的变化等。图 1-6 中的炉壁散热、工件增减均可看成是来自系统外部的扰动量。来自系统内部的扰动称为内扰动，如系统元件参数的变化，运放器的零点飘移等。

5) 中间变量——它是系统各环节之间的作用量。它是前一环节的输出量，也是后一环节的输入量。如图 1-6 中的 ΔU、U_a、U_R 等就是中间变量。

由图 1-6 可以看到，框图可以直观地将系统的组成、各环节间的相互关系以及各种作用量的传递情况，简单明了地概括出来。

1.4 自动控制系统的分类

自动控制系统可以从不同的角度来进行分类。

1.4.1 按输入量变化的规律分类

1. 恒值控制系统　恒值控制系统的特点是：系统的输入量是恒量，并且要求系统的输出量相应地保持恒定。

恒值控制系统是最常见的一类自动控制系统，如自动调速系统，恒温控制系统，恒张力控制系统等。此外许多恒压（液压）、稳压（电压）、稳流（电流）、恒频（电频率）的自动控制系统，也都是恒值控制系统。

2. 随动系统（又称伺服系统）　随动系统的特点是：输入量是变化着的（有时是随机的），并且要求系统的输出量，能跟随输入量的变化而作出相应的变化。

这种控制系统的另一个特点是，可以用功率很小的输入信号操纵功率很大的工作机械（只要选用大功率的功放装置和电动机即可）；此外还可以进行远距离控制。

随动系统在工业和国防上有着极为广泛的应用，例如船闸牵曳系统，刀架跟随系统，火炮控制系统，雷达导引系统和机器人控制系统等等。

3. 过程控制系统　生产过程通常是指把原料放在一定的外界条件下，经过物理或化学变化而制成产品的过程。例如化工、石油、造纸中的原料生产；冶炼、发电中的热力过程等。在这些过程中，往往要求自动提供一定的外界条件，例如温度、压力、流量、液位、粘度、浓度等参量在一定的时间内保持恒值或按一定的程序变化。对其中的每一个局部，它们可能是一种随动控制系统，也可能是按程序指令变化的恒值控制系统。

1.4.2　按系统传输信号对时间的关系分类

1. 连续控制系统　连续控制系统的特点是，控制作用的信号是连续量或模拟量。如上节所述的恒温系统便是连续控制系统，因为作用于系统的信号都是模拟量。

2. 离散控制系统　离散系统又称采样数据系统，它的特点是，系统中有的信号是断续量(或数字量或采样数据量)。通常，采用数字计算机控制的系统都是离散系统。

1.4.3　按系统的输出量和输入量间的关系分类

1. 线性控制系统　线性控制系统的特点是，系统由线性元件构成。它的各个环节或系统都可以用线性微分方程来描述，它可以应用叠加原理和应用拉氏 (Laplace) 变换。

2. 非线性控制系统　非线性控制系统的特点是，其中一些环节具有非线性性质 (例如出现饱和、死区、摩擦等等)。它们往往要采用非线性的微分方程来描述。此外，叠加原理对非线性系统是不适用的。

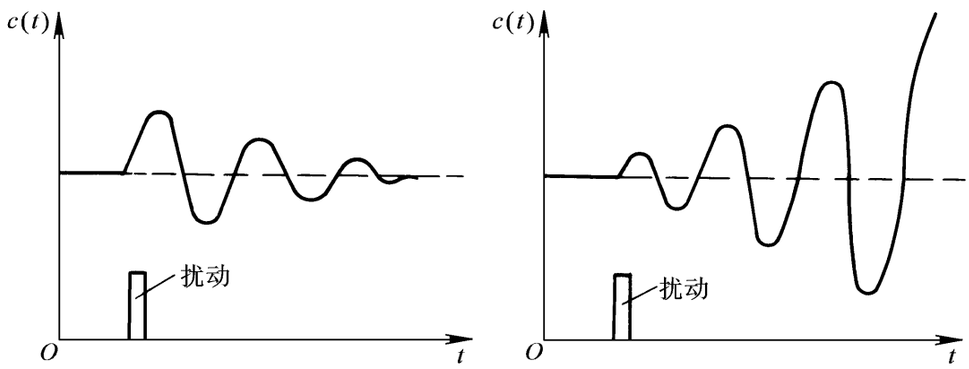
当然，除了以上的分类方法外，还可以根据其他的条件去进行分类。本书根据教学大纲的要求，只讨论连续控制的线性系统。

1.5　自动控制系统的性能指标

自动控制系统的性能通常是指系统的稳定性、稳态性能和动态性能。现分别介绍如下:

1.5.1　系统的稳定性

当扰动或给定值发生变化时，输出量将会偏离原来的稳定值，这时，由于反馈环节的作用，通过系统内部的自动调节，系统可能回到 (或接近) 原来的稳定值或跟随给定值稳定下来，如图 1-7a 所示。但也可能由于内部的相互作用，使系统出现发散而处于不稳定状态，如图 1-7b 所示。显然，不稳定的系统是无法进行工作的。因此，对任何自动控制系统，首要的条件便是系统能稳定正常运行。对系统的稳定性将在第 8 章中进行分析。

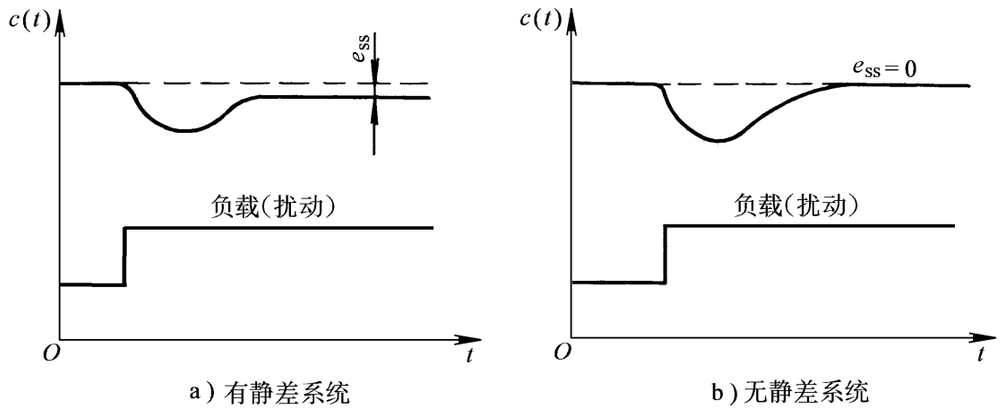


a) 稳定系统　　b) 不稳定系统

图 1-7　稳定系统和不稳定系统

1.5.2 系统的稳态性能指标

当系统从一个稳态过渡到新的稳态，或系统受扰动作用又重新平衡后，系统会出现偏差，这种偏差称为稳态误差。系统稳态误差的大小反映了系统的稳态精度（或静态精度），它表明了系统的准确程度。稳态误差 e_{ss} 越小，则系统的稳态精度越高。若 $e_{ss}=0$，则系统称为无静差系统。如图 1-8b 所示。反之，若 $e_{ss}\neq 0$，则称为有静差系统。如图 1-8a 所示。



a）有静差系统　　b）无静差系统

图 1-8　自动控制系统的稳态性能

1.5.3 系统的动态性能指标

由于系统的对象和元件通常都具有一定的惯性（如机械惯性、电磁惯性、热惯性等），并且也由于能源功率的限制，系统中各种量值（如速度、位移、电流、温度等）的变化不可能是突变的。因此，系统从一个稳态过渡到新的稳态都需要经历一段时间，亦即需要经历一个过渡过程。表征这个过渡过程性能的指标叫做动态指标。现在以系统对突加给定信号的动态响应来介绍动态指标。

图 1-9 为系统对突加给定信号的动态响应曲线。

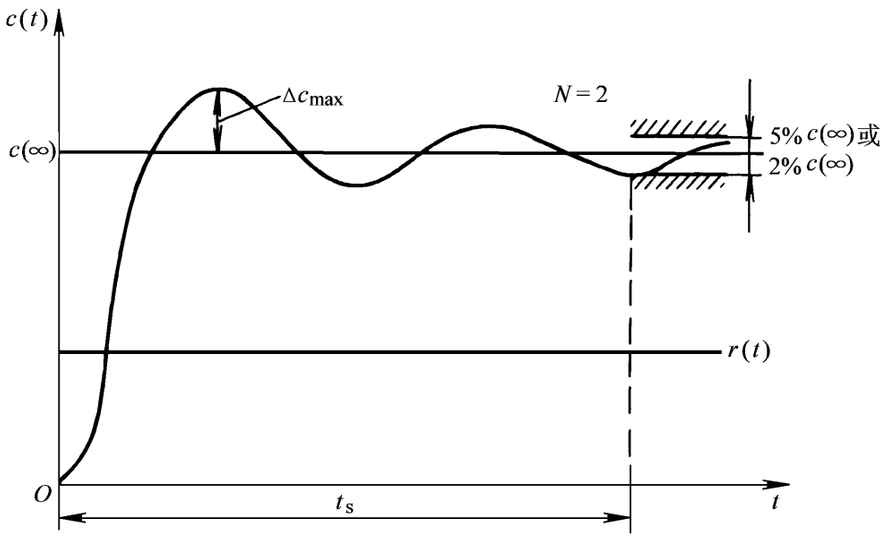


图 1-9　系统对突加给定信号的动态响应曲线

动态指标通常用最大超调量（σ）、调整时间（t_s）和振荡次数（N）来衡量。现分别介绍如下：

1. 最大超调量（σ）　最大超调量是输出量 c(t) 与稳态值 c(∞) 的最大偏差 Δc_{max} 与稳态值 c(∞) 之比。即

$$\sigma=\frac{\Delta c_{max}}{c(\infty)}\times 100\%$$

最大超调量反映了系统的动态精度，超调量越小，则说明系统过渡过程进行得越平稳。

不同的控制系统，对最大超调量的要求也不同，例如，对一般调速系统，σ可允许 10%～35%；轧钢机的初轧机要求 σ小于 10%；对连轧机则要求 σ小于 2%～5%；而在张力控制的造纸机中则不允许有超调量。

2. 调整时间（t_s） 调整时间（t_s）是从给定量作用于系统开始，到输出量进入并保持在允许误差带［离稳态值±5%（或±2%）区域］内，所需的一段时间（见图 1-9）。它反映了系统的快速性。调整时间 t_s 越小，系统快速性越好。例如连轧机 t_s 为 0.2～0.5s；造纸机为 0.3s。

3. 振荡次数（N） 振荡次数是指在调整时间内，输出量在稳态值上下摆动的次数。如图 1-9 所示，振荡次数为两次。振荡次数 N 越少，也表明系统稳定性能好。例如普通机床一般可允许振荡 2～3 次；龙门刨床与轧钢机允许振荡一次；而造纸机传动则不允许有振荡。

在上述指标中，最大超调量和振荡次数反映了系统的稳定性能。调整时间反映了系统的快速性。稳态误差反映了系统的准确度。一般说来，我们总是希望最大超调量小一点，振荡次数少一点，调整时间短一些，稳态误差小一点。总之，希望系统能达到稳、快、准。

以上对自动控制系统的性能指标只作了扼要的介绍，详细的分析请见第 8 章。事实上，以后的分析将表明，这些指标要求，在同一个系统中往往是相互矛盾的，这就需要根据具体对象所提出的要求，对其中的某些指标有所侧重，同时又要注意统筹兼顾。分析和解决这些矛盾，正是本学科讨论的重要内容。

此外，在考虑系统的技术指标要求时，还要充分注意到系统的可靠性和整个装置的经济性。

1.6 研究自动控制系统的方法

对自动控制系统进行分析研究，首先是对系统进行定性分析。所谓定性分析，主要是搞清各个单元及各个元件在系统中的地位和作用，以及它们之间的相互联系，并在此基础上搞清系统的工作原理。然后，在定性分析的基础上，可以建立系统的数学模型；再应用自动控制理论对系统的稳定性、稳态性能和动态性能进行定量分析。在系统分析的基础上就可以找到改善系统性能，提高系统技术指标的有效途径；这也就是系统的校正和设计。

自动控制理论又分为经典控制理论和现代控制理论。

经典控制理论是建立在传递函数之上的，它对单输入—单输出系统是十分有效的。在经典控制理论中，又有时域分析法、频率响应法和根轨迹法等几种分析方法。

现代控制理论是建立在状态变量概念基础之上的，它适用于复杂的多输入—多输出控制系统及变参数非线性系统，实现自适应控制、最佳控制等。

由于考虑到工程技术教育主要侧重于生产现场的技术应用，因此本书将以定性分析为主，着重叙述典型自动控制系统（包括组成系统的各个基本部件）的工作原理和自动调节的物理过程，并从时域分析方法（主要是传递函数）出发，去分析、研究自动控制系统的性能和改善它们的途径。

我们虽然从理论上对系统进行分析和研究，但实际系统往往比较复杂，有许多无法确定的因素，因而通过实验或根据现场实践进行研究，也是一条基本的途径。事实上，在进行设计时，也要依靠一些经验公式和经验数据；这也说明理论的分析必须和实践紧密结合起来，才

能找到切实可行的有效的解决问题的途径。

小　　结

1. 开环控制系统结构简单、稳定性好，但不能自动补偿扰动对输出量的影响。当系统扰动量可以预先进行补偿或影响不大时，采用开环控制是有利的。当扰动量无法预计或控制系统要求较高时，则应采用闭环控制。

2. 闭环控制系统具有反馈环节，它能依靠负反馈环节进行自动调节，以补偿扰动对系统产生的影响。闭环控制极大地提高了系统的精度。但闭环系统使系统稳定性变差，需要重视并加以解决。

3. 对自动控制系统的性能指标的要求，主要是一稳、二准、三快。最大超调量（σ）和振荡次数（N）反映了系统的稳定性，稳态误差（e_{ss}）反映了系统的准确性，调整时间（t_s）反映了系统的快速性。

其中 σ、t_s、N 为系统的动态指标，e_{ss}为系统的稳态指标。

4. 恒值控制系统的特点是: 输入量是恒量，并且要求系统的输出量也相应地保持恒定。随动控制系统的特点是: 输入量是变化着的，并且要求系统的输出量能跟随输入量的变化而作出相应的变化。

5. 自动控制系统通常由给定元件、检测元件、比较环节、放大元件、执行元件、控制对象和反馈环节等部件组成。系统的作用量和被控制量有: 输入量、反馈量、扰动量、输出量和各中间变量。

6. 框图可直观地表达系统各环节(或各部件)在系统中的地位以及它们之间的因果关系，可以展现各种作用量和中间变量的作用点和传递情况以及它们对输出量的影响。

思　考　题

1-1　填充: 开环控制的特征是 _____，它的优点是 _____，缺点是 _____，应用场合是 _____；闭环控制的特征是 _____，它的优点是 _____，缺点是 _____，应用场合是 _____。

1-2　衡量一个自动控制系统的性能指标通常有哪些? 它们是怎样定义的?

1-3　组成自动控制系统的主要环节有哪些? 它们各有什么特点，起什么作用?

1-4　恒值控制系统、随动系统和过程控制系统的主要区别是什么? 判断下列系统属于哪一类系统? 电饭煲、空调机、燃气热水器、仿形加工机床，母子钟系统、自动跟踪雷达，家用交流稳压器、数控加工中心、啤酒生产自动线。

习　　题

1-5　图 1-10 为太阳能自动跟踪装置位角移 $\theta_0(t)$ 的阶跃响应曲线。曲线Ⅰ为系统未加校正装置时的阶跃响应，曲线Ⅱ和Ⅲ为增加了不同的校正装置后的阶跃响应。试大致估算Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三种情况时的动态性能指标 σ、t_s、N，并分析比较Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三种情况技术性能的优劣。

1-6　图 1-11 为一晶体管稳压电源电路图，试说明哪个量是给定量、被控量、反馈量和扰动量? 画出此系统的组成框图，并写出其自动调节过程。

1-7　图 1-12 为仓库大门自动控制系统。试画出系统组成框图，并说明自动控制大门开启和关闭的工作原理。如果大门不能全开或全关，则怎样进行调整?

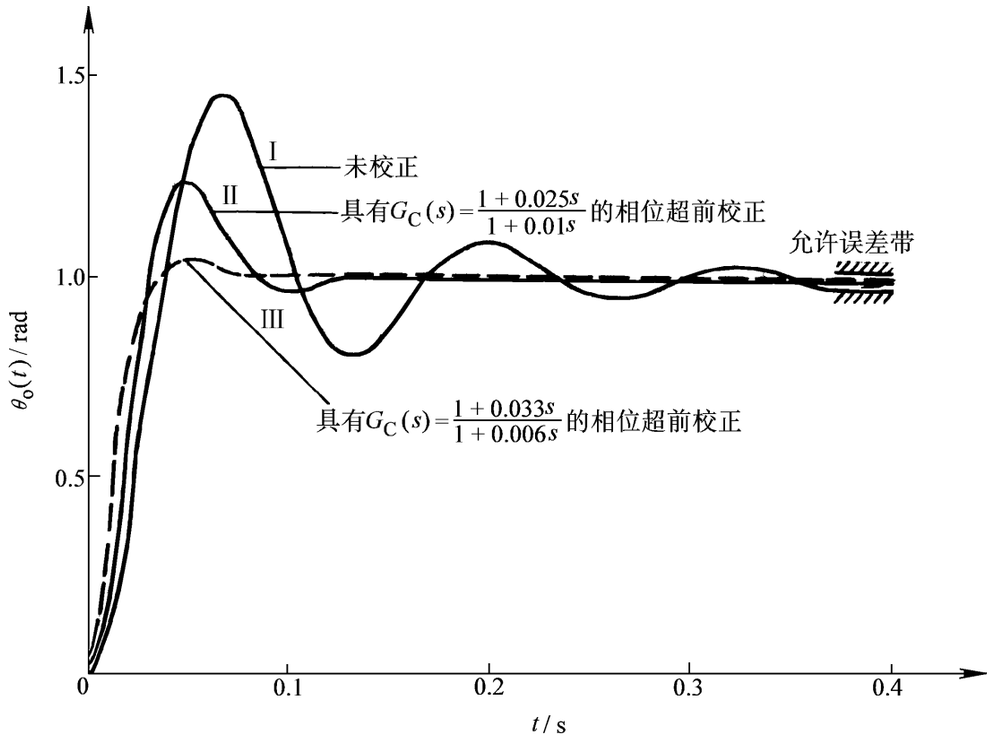


图 1-10　太阳能自动跟踪装置角位移阶跃响应曲线

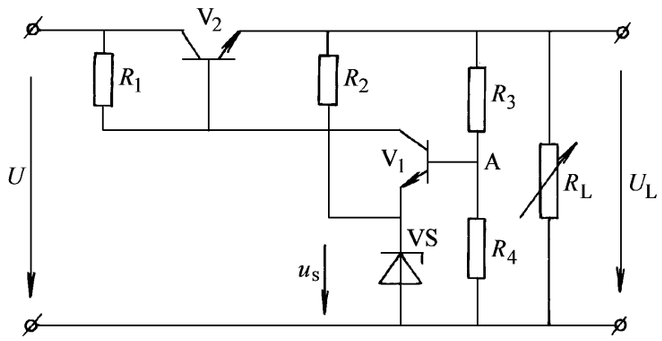


图 1-11　晶体管稳压电源电路

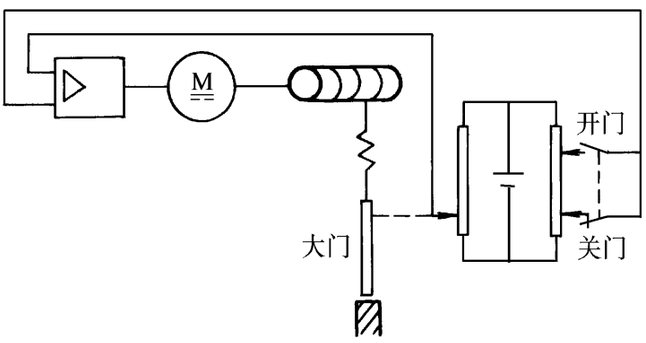


图 1-12　仓库大门控制系统

需要全本请访问 www.ertongbook.com