



普通高等教育“十二五”创新型规划教材

过程控制技术

GUOCHENG KONGZHI JICHU

主 编 侯慧姝

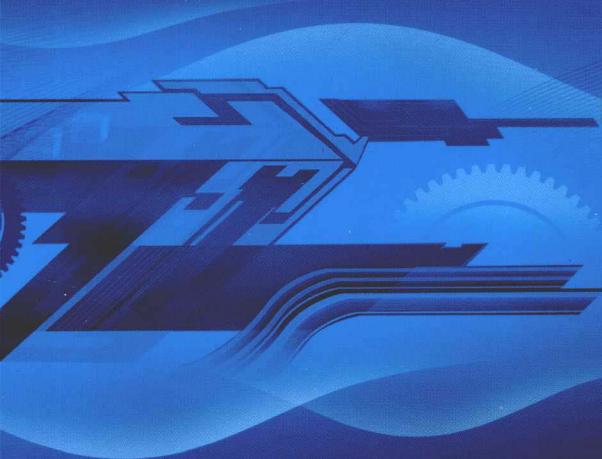
 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



投稿邮箱: xueshu@bitpress.com.cn

咨询电话: (010) 68911947 68911085

免费电子课件下载地址: www.bitpress.com.cn



策划编辑: 李炳泉 张海丽

执行编辑: 靳 媛

封面设计: **OOICA** 原创任玮

ISBN 978-7-5640-7175-2



9 787564 071752 >

定价: 56.00元

普通高等教育“十二五”创新型规划教材

过程控制技术

主 编 侯慧姝
副主编 邬大雷 郑艳楠
参 编 于梦琦 邢泽斌

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书将“自动控制原理”与“过程控制工程”课程的内容有机融合,使读者可以循序渐进地掌握过程控制的理论知识并能系统地掌握自动化控制工程应用的技能。通过对本书的学习,使学生能够掌握分析过程控制系统的方法并应用到工程实践中,真正做到由浅入深、融会贯通、学以致用。

本书共8章,每章附有练习题,以加强读者对每个章节知识和技能的掌握程度。全书可分为3部分,第1部分为过程控制系统的基础知识(第1、2章),主要学习过程控制系统的组成、分类、术语等基本概念,使学生了解过程控制系统,掌握分析过程控制系统的基本概念和基本要求;第2部分为过程控制系统的分析(第3、4章),学习被控对象的数学模型和过程控制系统的分析方法,使学生学会使用数学模型分析简单过程控制系统;第3部分为过程控制系统应用(第5~8章),内容有串级控制系统、前馈控制系统、比值控制系统、安全仪表系统等典型复杂控制系统典型单元的控制方案。

本书强调实用性、应用性,重点突出与实际应用紧密结合,不仅可作为普通高校生产过程自动化技术及自动化相关专业的理论教材,由于各章后附有项目训练任务,也可作为这些专业学生的实训教材使用,亦可供炼油、石油化工、冶金、电力、煤炭、轻工等领域从事工业自动控制工作的技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

过程控制技术/侯慧妹主编. —北京:北京理工大学出版社, 2012. 12
ISBN 978 - 7 - 5640 - 7175 - 2

I. ①过… II. ①侯… III. ①过程控制-高等学校-教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 312013 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 19.75

字 数 / 370 千字

版 次 / 2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷

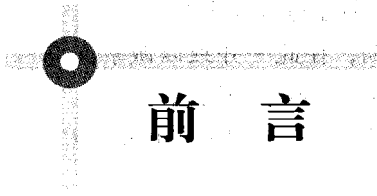
定 价 / 56.00 元

责任编辑 / 陈莉华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,本社负责调换



前言

过程控制技术是现代工业控制中尤为重要的一个分支,随着物质生活水平的提高以及市场竞争的日益激烈,人们对产品制造的工艺过程要求也越来越高。高产、低耗以及安全生产、保护环境等也成了工业生产过程研究的主体。过程控制技术对于提高产品质量以及节能环保等均起着十分重要的作用,过程控制技术已成为工程技术和管理人员必备的科学技术知识。

本书将过程控制理论和过程控制系统应用相结合,讲授过程控制的基本概念、控制系统的数学模型、系统组成原理及分析、简单控制系统、串级及其他复杂控制系统的原理和工程应用、安全仪表系统的概念和应用等内容,使读者可以循序渐进地掌握过程控制技术的知识并能系统地掌握自动化工程应用的技能。本书是编者根据多年从事生产过程自动化及相关专业的实践工作经验及相关教学经验编写的,编者着重注重了公式、原理论证的科学性,内容的系统性和可教性,在内容安排上真正做到了理论联系实际、由浅入深。

全书分为3部分,第1部分:过程控制系统的基础知识,包括过程控制系统的组成、分类、术语等基本概念,使学生了解过程控制系统,掌握分析过程控制系统的基本概念和基本要求;第2部分:过程控制系统的分析,包括被控对象的数学模型和过程控制系统的分析,使学生学会使用数学模型分析简单过程控制系统;第3部分:过程控制系统应用,包括串级控制系统、前馈及比值控制系统等典型复杂控制系统和典型单元的控制方案,还介绍了当今在过程控制领域占据越来越重要地位的安全仪表系统。通过对本书的学习,使学生掌握分析过程控制系统的方法并应用到工程实践中,真正做到由浅入深、融会贯通、学以致用。

本书共分为8章,其中第1、4章、实训项目一、二由郑艳楠老师编写;第2、3章、实训项目三、四由邬大雷老师编写;第5~8章、实训项目七、八由侯慧姝老师编写;绪论、实训项目五由于梦琦老师编写;实训项目六和附录部分由邢泽斌老师编写。侯慧姝任主编,邬大雷、郑艳楠任副主编,侯慧姝负责全书的组织和统稿工作。

本书由孙家瑞教授任主审,对本书全部书稿进行了认真细致的审阅,提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢!

内蒙古天润化肥股份有限公司吕文坡高工在本书编写过程中给予了很多工程技术上的指导，还得到了王景学老师的支持和帮助，在此一并致以诚挚的谢意！并向所有关心、支持、帮助本书出版工作的同志表示最诚挚的谢意！

由于编者的学术水平、专业知识和实践经验有限，本书的错误和缺点在所难免，敬请有关专家和读者批评指正。

编 者



目 录

绪论	1
第1章 过程控制系统的基本概念	3
1.1 过程控制系统的组成及其分类	3
1.2 过程控制系统的过渡过程和品质指标	10
本章小结	16
习题与思考题	17
第2章 控制系统的数学模型	19
2.1 控制系统的数学模型	19
2.2 过程控制系统的传递函数	24
2.3 被控对象数学模型的实验测取	37
本章小结	43
习题与思考题	45
第3章 过程控制系统的动态性能	46
3.1 过程控制系统的动态响应	46
3.2 常规控制规律对系统过渡过程的影响	52
本章小结	62
习题与思考题	63
第4章 单回路控制系统	65
4.1 被控变量与操纵变量的选择	65
4.2 控制阀的选择	72
4.3 测量元件特性对控制品质的影响	84
4.4 控制器控制规律的选择及正反作用的确定	88
4.5 简单控制系统的方案实施	92
4.6 简单控制系统的投运和控制器参数整定	95
4.7 过程控制系统故障的产生及排除方法	102

本章小结	103
习题与思考题	104
第5章 串级控制系统	106
5.1 串级控制系统的基本原理和结构	106
5.2 串级控制系统的设计	114
5.3 串级控制系统的实施	117
本章小结	125
习题与思考题	125
第6章 其他复杂控制系统	127
6.1 前馈控制系统	127
6.2 比值控制系统	133
6.3 分程控制系统	142
6.4 选择性控制系统	148
6.5 均匀控制系统	154
本章小结	158
习题与思考题	159
第7章 信号报警和安全仪表系统 (SIS)	161
7.1 信号报警系统	161
7.2 安全仪表系统 (SIS)	166
本章小结	189
习题与思考题	190
第8章 典型单元及装置的控制方案	191
8.1 流体输送设备的控制	191
8.2 锅炉设备的控制	201
8.3 传热设备的控制	217
8.4 精馏塔的控制	227
本章小结	235
习题与思考题	236
项目一 一阶单容上水箱对象特性测试实验	237
项目二 上水箱液位 PID 整定实验	243
项目三 串接双容中水箱液位 PID 整定实验	250

项目四 锅炉夹套水温 PID 整定实验 (动态)	255
项目五 锅炉夹套和锅炉内胆温度串级控制系统	262
项目六 主副回路涡轮流量计流量比值控制系统实验	267
项目七 流量 - 液位前馈反馈控制实验	272
项目八 锅炉内胆水温 PID 整定实验 (动态)	275
附录 1 拉普拉斯变换	281
附录 1.1 拉氏变换的定义	281
附录 1.2 常用的拉氏变换法则 (不作证明)	283
附录 1.3 拉普拉斯反变换	287
附录 1.4 用拉氏变换求解系统的暂态过程	292
附录 2 《过程控制技术》部分中英文词汇对照表	295
附录 3 常用管道仪表流程图设计符号	301
参考文献	305

绪 论

生产过程自动控制是指在化工、炼油、造纸、冶金、电力、食品等生产过程中的自动化控制的简称。在生产过程的机器设备上，配置一些过程控制仪表，使操作人员由直接管理和操作设备的方式方法改变为操作人员间接操作设备，并使生产过程在不同程度上自动地进行。这种用过程控制设备来管理生产过程的方法称为生产过程自动控制，又称为过程控制。

生产过程自动化的内容比较广泛，包括自动检测、自动控制、自动保护和程序控制等多方面。

(1) 自动检测

在化工生产过程中，需要随时掌握和了解各处的生产情况和工艺参数，以便加以调整，使生产过程稳定运行，保证生产合格产品。这就需要自动检测，并将测量结果用仪表或屏幕显示及制表打印出来。在自动控制和自动保护系统中，测量是一个基础。在生产过程自动化中，被测变量或者被控变量通常指温度、流量、压力、物位和成分等物理量。

(2) 自动控制

自动控制是在测量的基础上，进一步用自动化装置代替操作人员的直接操作，自动克服扰动对被控变量的影响，进而稳定工艺生产过程。自动控制是过程控制的核心。

(3) 自动保护

在生产过程中，因为某些工艺变量超过一定限量时，会严重影响生产，甚至发生事故，因此需要设计自动保护系统。最简单的就是自动声光报警。

(4) 程序控制

程序控制系统是指连续量控制中的反馈控制系统。它与控制系统的区别在于设定值，自动控制系统一般属于定值控制系统。在程序控制系统中，设定值是按预先设定的程序进行变化的。

过程控制技术是以过程控制原理为基本理论，以过程检测仪表和过程控制仪表为先导课程，并与工艺生产过程密切结合，研究并解决自动控制中的工程应用问题。它一般包括生产过程中控制方案的设计，自动控制装置的选型，控制方案

的实施,以及控制系统的操作、运行管理等诸多问题。

本书作为普通高校生产过程自动化技术专业学生的一门专业课教材,包括两大部分。

第一部分为过程控制原理。阐述过程控制系统的基本构成与基本要求、过程控制系统的数学模型、过程控制系统的分析。这部分内容本着“必需、够用”的原则作了较大的调整。数学模型只介绍微分方程式和传递函数,系统分析只介绍时域分析,不涉及现代控制理论。

第二部分为过程控制工程。这是本书的重点,书中比较详细地介绍简单控制系统的分析与设计,对复杂控制系统、安全仪表系统和典型单元的基本控制方案做了比较全面的介绍。过程控制原理部分的内容比较抽象,涉及高等数学知识,做一般的掌握;过程控制工程部分的内容是核心,做重点掌握。

“过程控制技术”是生产过程自动化技术专业学生的一门理论性和实践性较强的专业课程。通过这门课程的学习,可以使具备控制系统基本组成及其特性分析的知识,掌握简单控制系统的分析、设计、运行、整定与维护技术,具有生产过程控制技术的能力。

第 1 章

过程控制系统的基本概念

1.1 过程控制系统的组成及其分类

随着人们物质生活水平的提高以及市场竞争的日益激烈，产品的质量和功能也向更高的档次发展，制造产品的工艺过程变得越来越复杂，为满足优质、高产、低消耗，以及安全生产、保护环境等要求，作为工业自动化重要分支的过程控制的任务也愈来愈繁重。

在自动控制技术中，过程控制技术是历史较为久远的一个分支，在 20 世纪 40 年代就已有应用。过程控制是指石油、化工、电力、冶金、造纸、医药等工业生产中对温度、压力、流量、物位、成分等过程变量的控制，是自动控制技术的重要组成部分。随着生产从简单到复杂，从局部到全局，从低级到智能的发展，过程控制技术也经历了一个不断发展的过程。

20 世纪 40 年代以前，对生产过程的控制基本处于人工操作状态。只有少量检测仪表应用在生产过程中作为监测之用，几乎没有控制仪表，操作人员根据观测到的生产过程参数，用手动操作的方式控制生产过程，控制效果不理想。

20 世纪 40 年代末，基地式仪表和单元组合仪表（气动Ⅰ型和电动Ⅰ型）被应用于生产过程，开始了对生产过程的自动控制。此时的过程控制系统大多是单输入－单输出的单回路定值控制系统。

20 世纪 60 年代以后，单元组合仪表发展到气动Ⅲ型和电动Ⅲ型，控制理论基础是以频域法和根轨迹法为主的经典控制理论。此时的过程控制系统从简单控制系统的应用发展到串级、比值、均匀和选择性等多种复杂控制系统。传统的单输入－单输出控制系统发展到多输入－多输出控制系统。

20 世纪 80 年代，随着微电子技术的迅猛发展，单片机和微机逐渐普及到生产过程中，大大推动了过程控制技术的发展。控制理论方面，出现了最优控制、模糊控制、解耦控制、自适应控制等现代控制理论。虽然模拟仪表仍被广泛使用，以微处理器为核心的智能仪表、可编程逻辑控制器（PLC）、集散控制系统（DCS）及现场总线控制系统（FCS）得到了越来越多的使用，逐渐成为过程控

制系统的主流产品。

1.1.1 过程控制系统的组成

过程控制是自动控制的一个分支,而自动控制是在人工控制的基础上发展起来的。人工控制是指在人直接参与的情况下,利用控制装置使被控制对象和过程按预定规律变化的过程。下面先通过一个示例,如图 1-1 所示,将人工控制与自动控制进行对比分析,从而说明过程控制系统的由来、组成与工作原理。

从维持生产平稳考虑,工艺上希望储罐内的液位 h 能保持在所希望的高度上。则液位 h 是需要控制的工艺变量,称为被控变量; SP 为被控变量的控制目标,称为给定值或设定值。显然,当进水量或出水量波动时,都会使罐内的液位 h 发生变化。现假定通过控制出水量能够维持液位的恒定,则出水量称为操纵变量。而进水量是造成被控变量产生不期望波动的原因,称为扰动或干扰。若由操作工完成这一任务,所要做的工作如下。

① 用眼睛观察液位计实际液位的指示值,并通过神经系统告诉大脑。

② 通过大脑对眼睛观测到的实际液位值 h 与给定值 SP 进行比较,根据差值的大小和方向,并结合操作经验发出控制命令。

③ 根据大脑发出的控制命令,通过手去改变出水阀门开度,来控制液位的高低。

④ 反复执行上述操作,直到液位等于给定值。

上述操作通过眼、脑、手相互配合完成液位的控制过程就是一个典型的人工控制过程,人在控制过程中主要完成了测量、比较和执行,操作工与所控制的液罐设备构成了一个人工控制系统。

显然,在负荷变化较小,液位变化不大的场合,采用人工控制是可以实现对液位控制的。但是人工控制系统有许多缺点,甚至有时不可能实现控制目标。首先,人工控制系统的控制精度不高,或者说控制精度完全取决于操作者的经验;其次,由于有些生产过程和被控变量变化极快,人的反应不能跟上这种变化;再则,有些场合如高温、高压、有毒、放射性等对人体有危害的领域,人无法直接参与控制,特别是对于现代流程工业,典型的生产装置需要控制的回路多达几百个,靠人工控制难以完成上述工作。因此,为了进一步改善控制系统的性能,减少操作人员的劳动强度,提高控制精度和工作效率,必须应用机械、电气、液压等自动化装置来代替人对一些物理量自动地进行控制,这样人工控制系统就发展成为自动控制系统。

自动控制是指在无人直接参与的情况下,通过控制器使被控制对象或过程自动地按照预定的要求运行。以图 1-1 所示的液位控制问题为例,可采用液位测

量变送器 LT 代替人眼, 来检测液位的高低并将其转换为标准的电信号 (如 4 ~ 20 mA DC 信号); 同时, 采用液位控制器 LC 代替人脑, 通过接收液位测量信号, 并与其设定值 SP 进行比较得出偏差值, 控制器根据偏差的正负、大小及变化趋势, 发出标准的控制信号 (如 4 ~ 20 mA DC 信号); 然后, 采用自动执行机构代替人手, 来实施对出水量的控制, 这里的执行机构为控制阀。控制阀根据控制器发出的控制信号, 来增大或者减小出口阀门的开度以调节出水流量, 并最终使液位测量值 h 接近或等于给定值 SP 。这样, 就构成了一个典型的液位自动控制系统, 如图 1-1 (b) 所示。

由上述示例的分析对比可知, 一般过程控制系统是由被控对象和自动控制装置两大部分或由被控对象、测量变送器、控制器、控制阀 4 个基本环节所组成。

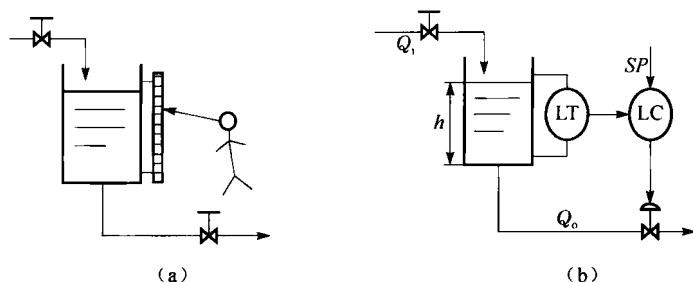


图 1-1 液位控制系统

(a) 液位人工控制系统; (b) 液位自动控制系统

1.1.2 过程控制系统的方块图及其术语

为了清楚地说明过程控制系统的结构及各环节之间的相互关系和信号联系, 常用方块图来表示, 如图 1-2 所示。

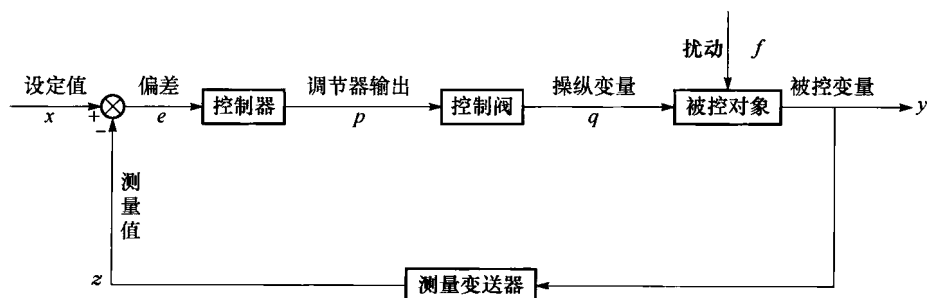


图 1-2 过程控制系统方块图

方块图中每个方块代表控制系统中一个环节, 方块之间用一条带有箭头的直线表示它们之间的联系, 箭头表示信号传递的方向, 进入方块的信号为环节输

人, 离开方块的为环节输出, 线上字母说明传递信号的名称; 另外, 箭头还具有单向性, 即方块的输入只能影响输出, 而输出不能直接影响输入; 还需要强调的是方块图中各线段表示的是信号关系, 而不是真实的物料或能量的关系。例如, 上述储罐液位控制系统中, 操作变量是出水量, 它直接影响液位 h 的高低, 信号的方向是指向被控变量 h 的, 但真实的物料却是离开被控对象的, 千万不可混淆。方块图是过程控制系统中一个重要的概念和常用工具。

现在结合储罐液位控制系统的例子, 说明过程控制系统中常用术语的意义。

(1) 被控对象和被控变量 y

被控对象简称对象或过程, 它是被控制的工艺设备、机器或生产过程。在图 1-1 (b) 中被控对象就是储罐。

被控变量 y 是表征生产设备或过程运行是否正常而需要加以控制的物理量。在图 1-1 (b) 中, 储罐液位就是被控变量。过程控制系统的被控变量通常有温度、压力、流量、液位、成分等。

(2) 操纵变量 q

受控制装置操纵, 并使被控变量保持在设定值的物理量或能量, 被称为操纵变量。在图 1-1 (b) 中, 储罐的出水量就是操纵变量。

(3) 扰动 f

除操纵变量外, 凡是影响被控变量的各种外来因素都称为扰动。在图 1-1 (b) 中, 进入储罐液体流量的波动是一种扰动, 储罐内液体压力的波动也是一种扰动等, 即引起被控变量变化的扰动可以有多个。

(4) 测量变送器和测量值 z

观察被控变量是否受到扰动的影响, 是否维持在预定的设定值范围之内, 就要利用测量元件对被控变量进行测量, 并转换成统一的标准信号输出。实现测量并完成转换任务的元件或仪表就称为测量变送器。在图 1-1 (b) 中, 采用的是液位测量变送器。

测量值 z 是测量变送器输出的统一标准信号, 供显示和控制器等其他仪表使用。

(5) 设定值 x 和偏差 e

设定值 x 是一个与被控变量期望值相对应的信号值。

偏差 e 在过程控制系统中, 规定偏差是设定值与测量值之差。

(6) 控制器输出 p

亦称控制信号。设定值与测量值进行比较得出偏差, 作为控制器的输入信号, 控制器根据偏差的大小和方向, 按一定的控制规律发出相应的输出信号 p 去驱动控制器。

(7) 控制阀

控制阀执行控制器的控制信号，通过阀门开度变化将控制信号的变化转换成操纵变量的变化。在图 1-1 (b) 中，控制阀根据控制信号对储罐的出水量进行控制。

1.1.3 过程控制系统的分类

过程控制系统有多种分类方法，每一种分类方法都是反映了控制系统某一方面的特点。基本的分类方法主要有以下几种。

1. 按过程控制系统的结构特点分类

(1) 前馈控制系统

前馈控制系统又称开环控制系统，即系统的输出量未被引回以对系统的控制部分产生影响，不形成信号传递的闭合环路。如图 1-3 所示。

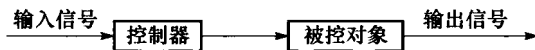


图 1-3 开环控制系统

例 1-1 开环调速系统。原理示意图如图 1-4 所示。

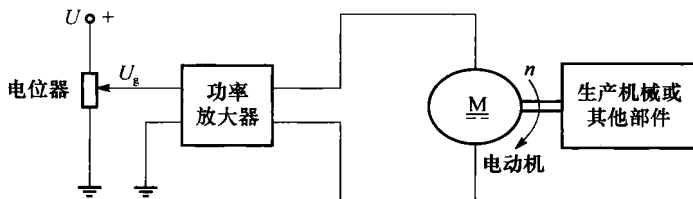


图 1-4 开环调速系统原理图

工作原理：当出现扰动如负载转矩增加（减少），电动机转速便随之降低（增高）而偏离给定值。若要保持给定转速不变，操作人员必须经过判断，相应地调整电位器滑臂的位置来提高（降低）给定电压，使电动机转速恢复到原给定值。

该系统的结构框图如图 1-5 所示。

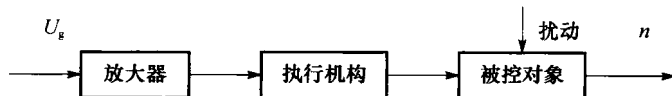


图 1-5 开环调速系统方框图

图 1-5 中，给定输入量—— U_g ；被控对象——直流电动机；被控变量——

电动机的转速 n ，系统的输出量；扰动——功率放大器的电源电压波动、放大系数漂移、负载的变化等。

可见，系统的输出量，即电动机的转速并没有参与系统的控制。

开环控制系统的特点是信号由给定值至被控变量单向传递，作用路径不是闭合的。由于开环控制系统不具备自动修正被控量偏差的能力，故系统的精度低，即抗干扰能力差。但是开环控制结构简单、调整方便、成本低，在国民经济各部门均有采用。如自动售货机、自动洗衣机、产品自动生产线、数控机床及交通指挥红绿灯转换等均为开环控制系统。

(2) 反馈控制系统

反馈控制系统又称闭环控制系统，即把系统输出信号通过反馈环节又引回到系统输入端作用于控制部分，形成闭合回路，这样的系统就是闭环控制系统，它是过程控制系统中一种最基本的控制结构形式。反馈分为正反馈和负反馈，当反馈信号与设定值相减，即取负值与设定值相加，这属于负反馈；当反馈信号取正值与设定值相加，这属于正反馈。过程控制系统一般采用负反馈。

例 1-2 闭环调速系统。

在例 1-1 开环调速系统基础之上，增加测速发电机反馈环节及放大环节，构成闭环调速系统。原理示意图如图 1-6 所示，该系统的结构框图如图 1-7 所示。

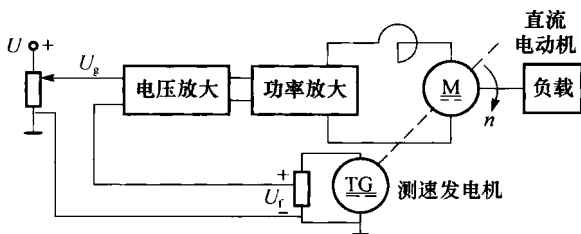


图 1-6 测速发电机闭环调速原理图

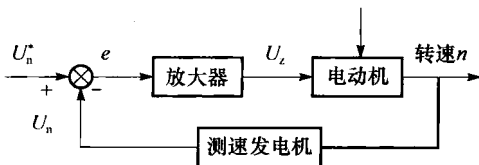


图 1-7 测速发电机闭环调速系统方框图

工作原理：当系统受到扰动影响时，例如负载增大，则电动机的转速 n 降低，测速发电机的端电压 U_n 减小。在给定电压 U_n^* 不变时，偏差电压 e 则会增加，经放大器放大后，电动机的电枢电压 U_c 上升，使得电动机转速 n 增加。如