

高等学校教材

# 自动控制原理

程 鹏 主编

高等教育出版社

策划编辑	金春英
责任编辑	许海平
封面设计	于文燕
责任绘图	尹文军
版式设计	胡志萍
责任校对	殷 然
责任印制	

## 内容提要

本书列入北京市 2002 年高等教育精品教材计划。

书中全面系统地介绍了自动控制理论的基本内容和分析、研究方法,包括系统数学模型的建立,分析系统的时域法、根轨迹法和频率域方法;线性系统的校正设计;采样系统理论;非线性系统理论,包括相平面法和描述函数法;现代控制理论基础,包括状态方程、可控性与可观测性、极点配置和状态观测器、系统稳定性等问题。附录中有拉氏变换、矩阵相似对角化和约当标准形、MATLAB 应用的基础知识。每章均有适当的习题,书末给出了部分习题解答。

本书可作为高等学校电子信息科学类、仪器仪表类、电气信息类、自动控制类一些专业的教材,也可作为成人教育和继续教育的教材,还可以作为科技人员参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/程鹏主编. —北京:高等教育出版社,

2003.7

ISBN 7-04-011866-1

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 043836 号

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-82028899		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷			
开 本	787×960 1/16	版 次	年 月第 1 版
印 张	31.75	印 次	年 月第 次印刷
字 数	590 000	定 价	39.20 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

此为试读,需要完整PDF请访问: [www.ertongbook.com](http://www.ertongbook.com)

# 前 言

目前,自动控制技术已广泛地应用于工、农业生产,交通运输和国防建设。指导自动控制系统分析和设计的控制理论也有了很大的发展,它的概念、方法和体系已经渗透到许多学科领域。在20世纪40和50年代中发展起来的经典控制理论至今仍被成功地应用于单变量定常系统的分析和设计。在20世纪50年代末、20世纪60年代初发展起来的状态空间方法具有更广泛的适用性,它可以用于多变量、定常或时变系统,所讨论的问题更复杂。为了适应高等工业院、校本科生教学的需要,根据相应的教学大纲和学时安排,选取了经典控制理论和状态空间方法基础部分作为内容,编写本教材。本书可供电子信息科学类、仪器仪表类、电气信息类、自动控制类一些专业选用。

本教材在经典控制理论和状态空间方法这两部分内容的处理上,遵循“传统模式”,即将经典理论与现代控制理论分开编写,主要是考虑到传统模式已经证明行之有效,并且可以继续采用。另外,这两方面内容的数学基础不同,处理问题的思路不同,混编在一起有教学上的不便。为了弥补传统编写模式的不足,建议在讲现代控制理论时能有意识地多联系经典控制理论。

本书安排了九章内容。一至六章介绍经典线性理论,包括时域法、根轨迹法和频率域方法。第一章介绍自动控制的一般概念,首先从人工控制的过程引出自动控制系统应有的职能和部件,从而引出反馈系统的概念与组成特点,而不是通过大量实例的罗列而引出。然后举三个例子介绍开环控制、闭环控制、复合控制等概念。重点是反馈系统的原理、组成部件的阐述。动态过程和对系统的性能要求只介绍初步概念。

第二章介绍自动控制系统的数学模型,包括微分方程、传递函数和脉冲响应函数。强调了用线性常系数微分方程描述的系统特点:叠加原理、时不变性、物理实现性;讲梅森公式时,直接使用动态结构图,不引入信号流程图,从而使梅森公式与方框图融成一体。

第三章介绍时域分析法,包括一、二阶系统的分析与计算,系统稳定性分析(劳思判据、赫尔维茨判据)稳态误差分析、计算和一般规律。讲解稳态误差时,强调了拉氏变换终值定理的使用条件和系统稳定性要求的关系,在讲消去稳态误差的条件时,强调了内模原理与稳定性要求,使得数学的严谨性与物理概念一致。

第四章介绍根轨迹法,包括根轨迹方程与根轨迹的绘制法则,应用主导极

点、偶极子等概念近似分析系统的性能,广义根轨迹等内容。在根轨迹绘制法则中,将分离角的求法总结为简单、便于使用的法则。分析系统的性能强调用主导极点、偶极子等概念,不罗列繁琐的近似估算公式。

第五章介绍频率域方法,包括频率特性及其图示方法、物理意义,奈奎斯特判据和对数判据。为了加强系统频带的概念介绍了连续信号的频谱。开、闭环频率特性与系统性能的关系,以定性分析的物理概念为主。

第六章介绍控制系统的校正设计,包括串联校正、反馈校正(超前校正、滞后校正、滞后-超前校正、PID调节器)、复合校正。串联校正主要讲定性分析的物理概念,串联校正的理论设计方法另节处理。反馈校正的讲法中汲取了最初反馈放大器的结果,也充分吸收了20世纪80年代多变量频率域的结果,使得与后续结果一致。复合控制一节中包含了多种形式的初偿方案。

第七章介绍非线性系统理论,包括相平面法和描述函数法。

第八章介绍采样系统理论,包括采样定理、 $z$ 变换、脉冲传递函数、系统分析等内容,稳定性判据主要介绍朱利判据,性能分析主要讲闭环极点位置与瞬态分量的对应关系,数字校正中讲最小拍控制。

第九章介绍了现代控制理论基础,包括状态方程、可控性与可观测性、极点配置和状态观测器、系统稳定性等问题。集中讲述单变量线性时不变系统,对所有定理都给出了符合学生基础的严格证明,使论述严谨,加强了逻辑思维与抽象思维的训练。

书末有三个附录,分别为拉普拉斯变换、矩阵相似对角化和约当标准形、MATLAB语言与自动控制系统设计。附录部分应根据不同专业学生的需要,在课程教学合适的时间安排一定学时讲解。为了教学的方便,每章均有适当的习题,书末附有主要练习题的简单答案。

本书在取材和阐述方式上,注意了工程性,将实验教学环节和计算机辅助设计融合一体,贯穿全书。在内容上贯彻了删繁就简的原则,避免过分地引申和扩充。在叙述问题时,力求概念明确、层次分明和遵循教学顺序。在例题和习题的编排上考虑了不同专业的背景,以供不同专业的教学选用。由于前六章与第七章、第八章、第九章的内容有相对独立性,删除一些章节后可供其他非控制类专业或成人教育和继续教育选用。

本教材由程鹏主编,参加编写的有:祁慧珍(第一、五章)、于凤仙(第二、四章、附录I)、赵平(第三章)、王艳东(第四章、附录III)、邱红专(第八章)、程鹏(第六、七、九章、附录II),全书习题由邱红专提供了答案。由于本书是在北京航空航天大学内部使用教材的基础上修订的,十余年来曾经多次修改,除了前述同仁外,沈程智、汪声远和王纪文等都曾经参加过本书的筹划和提供过初稿,李昌隆为本书提供了图稿。

本教材在编写过程中参考了许多院校专家们编写的教科书和习题集,在此表示感谢。

北京航空航天大学

程 鹏

2002 年 12 月

# 目 录

第一章 自动控制的一般概念 .....	1
§ 1-1 自动控制的任務 .....	1
§ 1-2 自动控制的基本方式 .....	2
§ 1-3 对控制系统的性能要求 .....	11
习题 .....	13
第二章 自动控制系统的数学模型 .....	15
§ 2-1 控制系统微分方程的建立 .....	16
§ 2-2 非线性微分方程的线性化 .....	21
§ 2-3 传递函数 .....	24
§ 2-4 动态结构图 .....	34
§ 2-5 系统的脉冲响应函数 .....	52
§ 2-6 典型反馈系统的几种传递函数 .....	54
习题 .....	57
第三章 时域分析法 .....	63
§ 3-1 时域分析基础 .....	63
§ 3-2 一、二阶系统分析与计算 .....	68
§ 3-3 系统稳定性分析 .....	86
§ 3-4 稳态误差分析及计算 .....	98
习题 .....	111
第四章 根轨迹法 .....	117
§ 4-1 根轨迹与根轨迹方程 .....	117
§ 4-2 绘制根轨迹的基本法则 .....	124
§ 4-3 广义根轨迹 .....	145
§ 4-4 系统闭环零、极点分布与阶跃响应的关系 .....	153
§ 4-5 系统阶跃响应的根轨迹分析 .....	160
习题 .....	165
第五章 频率域方法 .....	169
§ 5-1 频率特性 .....	169

§ 5-2 典型环节的频率特性 .....	174
§ 5-3 系统的开环频率特性 .....	190
§ 5-4 频率稳定判据 .....	200
§ 5-5 系统闭环频率特性与阶跃响应的关系 .....	212
§ 5-6 开环频率特性与系统阶跃响应的关系 .....	222
习题 .....	226
<b>第六章 控制系统的校正 .....</b>	<b>234</b>
§ 6-1 系统校正设计基础 .....	234
§ 6-2 串联校正 .....	238
§ 6-3 串联校正的理论设计方法 .....	244
§ 6-4 反馈校正 .....	252
§ 6-5 复合校正 .....	257
习题 .....	263
<b>第七章 非线性系统分析 .....</b>	<b>269</b>
§ 7-1 非线性问题概述 .....	269
§ 7-2 常见非线性因素对系统运动特性的影响 .....	274
§ 7-3 相平面法基础 .....	282
§ 7-4 非线性系统的相轨迹分析 .....	294
§ 7-5 描述函数 .....	306
§ 7-6 用描述函数法分析非线性系统 .....	314
习题 .....	328
<b>第八章 采样系统理论 .....</b>	<b>332</b>
§ 8-1 采样过程与采样定理 .....	334
§ 8-2 信号的恢复与零阶保持器 .....	337
§ 8-3 $z$ 变换与 $z$ 反变换 .....	339
§ 8-4 脉冲传递函数 .....	349
§ 8-5 采样系统的性能分析 .....	355
§ 8-6 采样系统的数字校正 .....	362
习题 .....	365
<b>第九章 状态空间分析方法 .....</b>	<b>369</b>
§ 9-1 状态空间方法基础 .....	369
§ 9-2 线性系统的可控性和可观测性 .....	388
§ 9-3 状态反馈与状态观测器 .....	416
§ 9-4 有界输入、有界输出稳定性 .....	427

---

§ 9-5 李雅普诺夫第二方法 .....	429
习题 .....	432
附录 I 拉普拉斯变换 .....	437
附录 II 矩阵相似对角化和约当标准形 .....	452
附录 III MATLAB 语言与自动控制系统设计 .....	457
部分习题解答 .....	484
参考文献 .....	495

# 第一章 自动控制的一般概念

自动控制在现代工业、农业、国防和科学技术方面起着十分重要的作用,应用自动控制能使空间技术、现代武器和自动驾驶等方面得以飞速的发展,使机器设备和管理机构高速高效地运行;生产过程的自动化能提高产品的质量,增加产品的数量,改善劳动条件。学习并掌握好自动控制技术,对于加快我国现代化的建设有着十分重要的意义。

## § 1-1 自动控制的任務

自动控制作为一种重要的技术手段,能解决哪类性质的工程问题?能承担什么样的技术任务呢?

任何技术设备、机器和生产过程都必须按照预定的要求运行。例如,要想使发电机正常供电,就必须保持其输出电压恒定,尽量不受负荷变化和原动机转速波动的影响;要想使数控机床加工出高精度的零件,就必须保证其刀架的位置准确地跟随指令进给;要想使热处理炉提供合格的产品,就必须严格的控制炉温等等。其中发电机、机床、烘炉就是工作的机器设备;电压、刀架位置、炉温是表征这些机器设备工作状态的物理参量,而额定电压、进给的指令、规定的炉温,就是对物理参量在运行过程中的要求。

通常,在自动控制技术中,把这些工作的机器设备称为被控对象,把表征这些机器设备工作状态的物理参量称为被控量,而对这些物理参量的要求值称为给定值或希望值(或参考输入)。则控制的任务可概括为:使被控对象的被控量等于给定值。

自动控制的任务,是在没有人直接参与下,利用控制装置操纵被控对象,使被控量等于给定值。

如果给定值以时间函数  $r(t)$  表示,被控量以  $c(t)$  表示,则应使被控对象满足

$$c(t) \approx r(t) \quad (1-1)$$

上式是自动控制任务的数学表达式。

自动控制系统,是指能够完成自动控制任务的设备,一般由控制装置和被控对象组成。

控制装置如何操纵被控对象,以完成自动控制的任务呢?它与被控对象之

间的联系有何特点呢？这一问题将在下节介绍。

## § 1-2 自动控制的基本方式

自动控制是在没有人直接参与下,利用控制装置来操纵被控对象的,即用控制装置来代替人的一部分工作。下面先分析一下人在完成某项工作任务中所经历的主要过程和所需要具备的基本职能,以便找出控制装置必须具备的职能部件。

人在接受某项工作任务时,为了有效地进行工作,总是要经常了解实际的工作情况,观察实际的结果,同时还要不断地了解影响正常工作的各种干扰因素,然后将观察的结果与预期的目标进行比较、分析,根据比较的结果作出新的决策,下达到执行部门,执行的结果如何,需要再了解,再比较,再分析,循环往复地进行,直到实际工作的结果与预期的目标一致,此时任务才算完成。这一工作过程可用方框图图 1-1 表示。图中各职能机构和工作对象均以方框表示,箭头方向指示了各部分的联系。

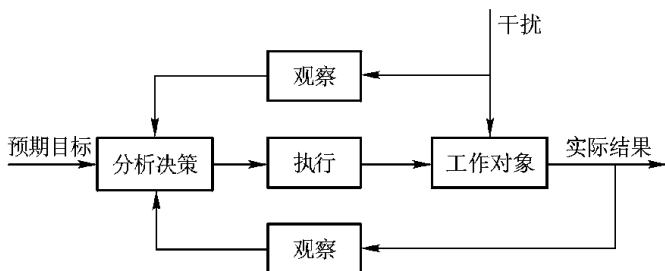


图 1-1 人工智能图

如果用技术装置代替图 1-1 中的各部分,并用工程语言来描述它们之间的职能作用,则可以将工作对象称为被控对象,工作的实际结果称为被控量,预期的目标就是给定值或参考输入。观察的任务可由各种测量元件或各种传感器来代替,比较分析的任务可由计算机或控制器来完成,执行部门可由各类执行机构来代替。由此得出的自动控制的原理方框图如图 1-2 所示。

在图 1-2 的方框中,除被控对象外其余部分统称为控制装置,为了完成自动控制的任务,控制装置必须具备以下三个方面的职能部件:测量、比较、执行。

测量元件:用以测量被控量或干扰量。

比较元件:将被控量与给定值进行比较。

执行元件:根据比较后的偏差量,产生执行作用,去操纵被控对象。

参与控制的信号来自三条通道,即给定值、干扰量、被控量。这是控制的主

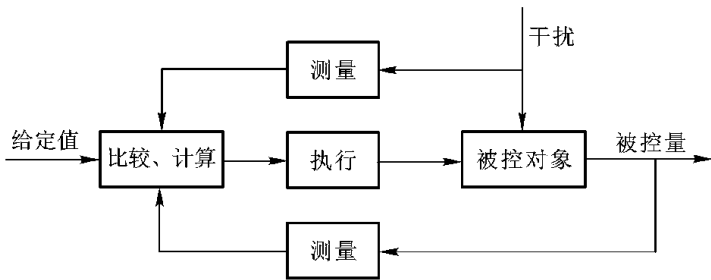


图 1-2 自动控制方框图

要依据。下面根据不同的信号源来分析自动控制的几种基本控制方式。

### 一、按给定值操纵的开环控制

开环控制是控制装置与被控对象之间只有单方向的联系,信号由给定值至被控量是单向传递的,故这种控制方式称为开环控制。

按给定值操纵的开环控制的特点是,测量的是给定值,需要控制的是被控量,控制装置与被控对象之间的联系如图 1-3 所示。

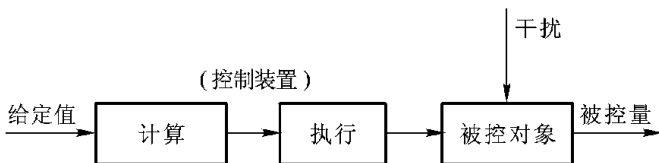


图 1-3 按给定值操纵的系统原理方框图

这种控制较简单,但控制精度难以保证,因为无论系统是受到外部干扰或工作过程中特性参数发生变化,都会直接波及被控量,使被控量不等于给定值,系统自身没有纠偏能力。当然,如果系统的结构参数稳定,而外部干扰较弱时,这种控制方式还是可以采用的,如自动化流水线、自动洗衣机等都属开环控制。

例如,图 1-4 所示的炉温控制系统亦属于这类控制。

控制的任务是保持炉温恒定。

被控对象:炉子。

被控量:炉温  $T$ 。

工作原理:受时间继电器控制的开关  $S$  按预先规定的时间接通或断开电源  $E$ ,对炉温进行控制,从而使炉子的温度保持在希望的炉温范围内。由于炉门开启的次数,环境温度的变化,都会使炉子的被控量偏离给定值,这些使被控量偏离给定值的因素都是干扰或扰动,系统受到干扰的影响后,受时间继电器控制的

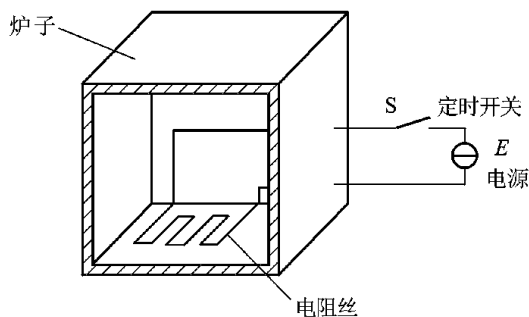


图 1-4 炉温控制系统的原理图

开关 S 不会因此而延长或缩短接通的时间。所以这种按给定值操纵的开环控制系统，其控制精度是不高的。

炉温控制系统的原理方框图如图 1-5 所示。



图 1-5 炉温控制系统的原理方框图

## 二、按干扰补偿的开环控制

控制装置与被控对象之间的结构联系如图 1-6 所示。

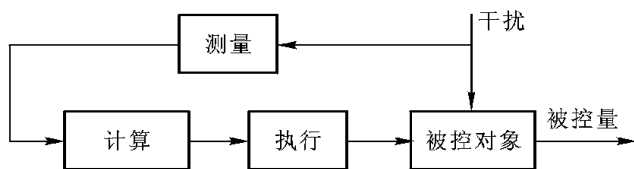


图 1-6 按干扰补偿的系统原理方框图

这种控制方式的特点是：控制的是被控量，测量的是破坏系统正常运行的干扰量，但系统是利用干扰产生控制作用，以补偿干扰对被控量的影响，故称按干扰进行补偿。而干扰量经测量、计算、执行至被控对象，信号也是单向传递的，所以这种控制方式称为按干扰补偿的开环控制。因为测量的是干扰，所以只能对可测干扰进行补偿，而对于不可测干扰以及系统内部参数的变化对被控量造成的影响，系统自身无法控制。因此，控制精度仍然受到原理上的限制。

例如，图 1-7 所示的水位控制系统。

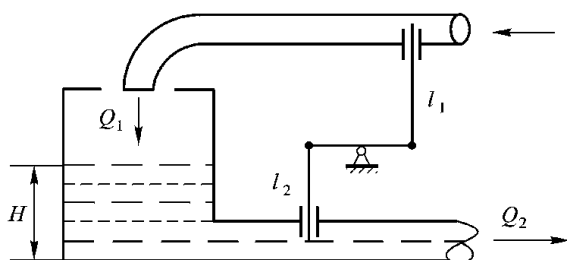


图 1-7 水位高度控制系统的原理图

控制的任务是保持水箱水位高度  $H$  不变。

被控对象 水箱。

被控量 水位高度  $H$ 。

工作原理 :当用水流量  $Q_2$  增大或减小或者用水阀门  $l_2$  开大或关小时 ,都会使水箱的水位高度变化。所以用水流量  $Q_2$  或阀门  $l_2$  是干扰量。

当用水流量  $Q_2$  加大 ,即阀门  $l_2$  开大 ,此干扰量通过杠杆测量后 ,去操纵进水阀门  $l_1$  开大 ,使用水流量  $Q_2$  与进水流量  $Q_1$  平衡 ,从而使水箱水位高度保持不变。

若其他干扰对水位高度产生影响时 ,如进水管的水压变化 ,使水位高度变化时 ,系统对这一干扰无补偿能力。

水位控制系统的方框图如图 1-8 所示。

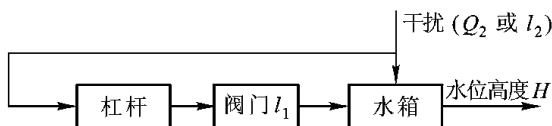


图 1-8 水位高度控制系统的原理方框图

### 三、按偏差调节的闭环控制

控制装置与被控对象之间的联系如图 1-9 所示。

这种控制方式的特点是 :需要控制的是被控量 ,而测量的是被控量对给定值的偏差。系统是根据偏差进行控制的 ,只要被控量偏离给定值 ,系统就会自行纠偏 ,故称这种控制方式为按偏差调节的。

由于被控量要反过来与给定值进行比较 ,所以控制信号必须沿前向通道和反馈通道往复循环地闭路传送 ,形成闭合回路 ,故称闭环控制或反馈控制。

反馈回来的信号与给定值相减 ,即根据偏差进行控制 ,称为负反馈 ,反之称

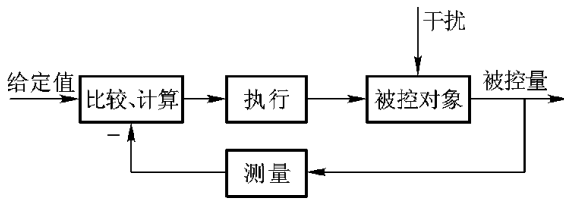


图 1-9 按偏差调节的系统原理方框图

为正反馈。

为了完成自动控制的任务,按偏差调节的闭环控制,一定是按负反馈原理组成的,所以负反馈闭合回路是按偏差调节的自动控制系统在结构联系和信号传递上的重要标志。

这种控制方式的控制精度较高,因为无论是干扰的作用,还是系统结构参数的变化,只要被控量偏离给定值,系统就会自行纠偏。但是闭环控制系统如果参数匹配得不好,会造成被控量有较大的摆动,甚至系统无法正常工作。

闭环控制是自动控制系统中最基本的控制方式,目前在工程中获得了广泛的应用。

下面分析几个闭环控制系统的示例,以便加深对闭环控制方式的认识。

### 例 1-1 烘烤炉温度控制系统。

烘烤炉温度控制系统的原理图如图 1-10 所示。

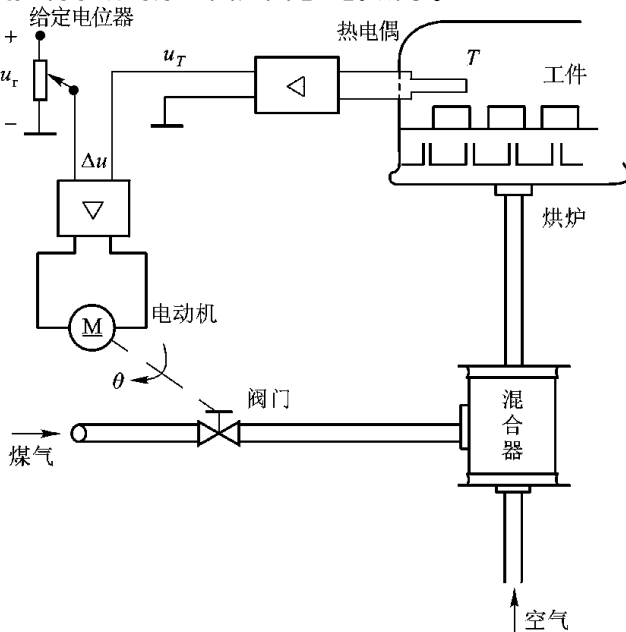


图 1-10 烘烤炉温度控制系统的原理图

被控对象 烘烤炉。

被控量 炉温  $T$ 。

干扰 工件的多少 环境温度 煤气压力等。

测量元件 热电偶用来测量炉子的实际温度 并转变为电压  $u_T$ 。

给定元件 给定电位器 其输出电压  $u_r$  相当于要求的炉温。

比较元件 通过比较电路完成给定电压  $u_r$  与反馈电压  $u_T$  的减法运算 偏差电压  $\Delta u = u_r - u_T$  相当于炉温的偏差量。

执行元件 电动机及传动装置。

工作原理 假定实际炉温恰好等于给定炉温 这时  $\Delta u = u_r - u_T = 0$  故电动机连同调节阀静止不动 煤气流量一定 烘烤炉处于规定的恒温状态。

如果增加工件 烘烤炉的负荷加大 而煤气流量一时没变 则炉温就要下降 经热电偶测量后给出电压  $u_T$  减小 使  $\Delta u = u_r - u_T > 0$   $\Delta u$  经放大后的电压加到电动机的电枢两端 电动机将朝着开大煤气阀门的方向转动 增加煤气供给量 从而使炉温回升 直到重新等于给定值(即  $u_T = u_r$ )为止。

如果负荷减小或煤气压力突然加大 则炉温升高。  $u_T$  随之加大 使  $\Delta u = u_r - u_T < 0$  此时电动机朝关小阀门的方向转动 减小煤气供给量 炉温下降 直到等于给定值为止。

由此看出系统是通过热电偶测量被控量 并反馈到系统的输入端 从而形成了闭合回路 此反馈信号通过比较线路与给定值进行减法运算 获得偏差信号 系统再根据偏差信号的大小和方向进行调节。所以 烘烤炉温度控制系统是一个按偏差调节的闭环系统。

系统中 除烘烤炉和供气设备外 其余部件组成了温度控制装置。

炉温控制系统的原理方框图如图 1-11 所示。

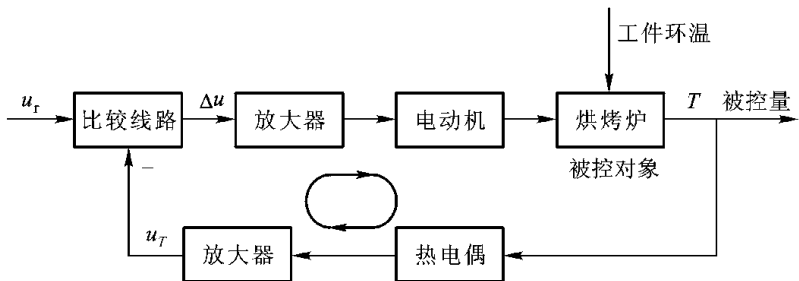


图 1-11 烘烤炉温度控制系统原理方框图

例 1-2 函数记录仪。

函数记录仪是一种通用的自动记录设备 它带走纸机构 能自动地描绘出电

压随时间变化的曲线。其原理图如图 1-12 所示。

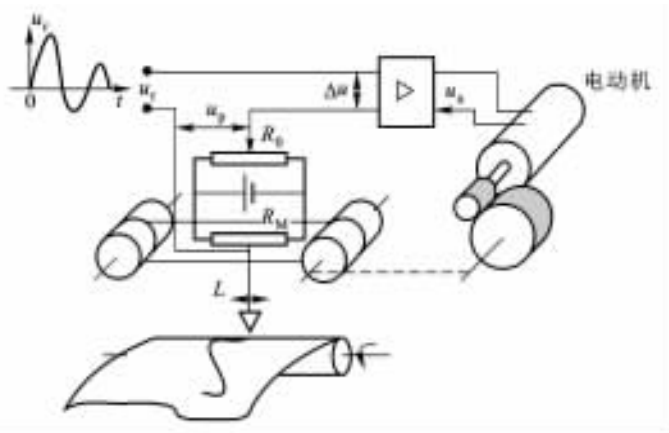


图 1-12 函数记录仪原理图

系统的任务 :控制记录笔的位移 ,以便在记录纸上描绘出待记录的电压曲线。

被控对象 :记录笔。

被控量 :笔的位移量  $L$ 。

测量元件 :是两个电位器组成的桥式线路。记录笔就固定在电位器  $R_M$  的电刷上 ,因此 ,测量电路的输出电压  $u_p$  与记录笔的位移  $L$  成比例关系 ,即  $u_p = K_0 L$ 。

比较元件 :由比较线路完成。

执行元件 :由电动机、齿轮系、绳轮组成。

工作原理 :当系统未接输入电压  $u_r$  时 ,系统处于平衡状态。接入外加电压后 ,记录笔仍处于原来位置上 ,则在放大器的输入端产生一偏差电压  $\Delta u = u_r - u_p \neq 0$  ,此电压经放大后驱动电动机 ,并通过齿轮系及绳轮带动记录笔移动 ,记录笔移动的方向是企图使偏差电压  $\Delta u$  减小 ,当  $\Delta u = u_r - u_p = 0$  时 ,电动机停止转动 ,记录笔就停在相应的位置上 ,此时  $u_p = u_r$  ,即记录笔的位移与输入电压  $u_r$  相对应。如果输入电压  $u_r$  随时间连续变化 ,记录笔就会连续的朝相应的方向移动 ,当走纸机构以恒速带动记录纸转动时 ,记录笔就会自动地在走纸上描绘出一条随时间变化的电压曲线。

函数记录仪的原理方框图如图 1-13 所示。

函数记录仪系统也属于负反馈闭环控制系统 ,被控量  $L$  经测量后反馈到输入端 ,并与输入信号相减 ,形成偏差信号 ,系统根据偏差信号的大小与方向不断