



普通高等教育“十五”国家级规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目

清华大学机械工程基础系列教材

# 控制工程基础 (第二版)

Introduction to Control  
Engineering  
Second Edition

- 董景新 赵长德 熊沈蜀 郭美凤 编著
- Dong Jingxin Zhao Changde Xiong Shenshu Guo Meifeng

清华大学出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材  
北京市高等教育精品教材立项项目

TP273  
D564

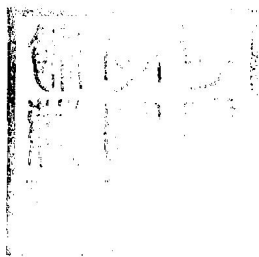
清华大学机械工程基础系列教材

控制工程基础 (第二版)

Introduction to Control  
Engineering  
Second Edition

董景新 赵长德 熊沈蜀 郭美凤 编著

Dong Jingxin Zhao Changde Xiong Shenshu Guo Meifeng



A1077530

17556205

清华大学出版社  
北京

## 内 容 提 要

本教材是在董景新、赵长德编著的《控制工程基础》第一版的基础上,引入近年来相关内容的发展重新编写的,主要面向机械类、仪器类及其他非控制专业本科生,被列入普通高等教育“十五”国家级规划教材和北京市高等教育精品教材立项项目。主要内容包括:控制系统的动态数学模型、时域瞬态响应分析、控制系统的频率特性、控制系统的稳定性分析、控制系统的误差分析和计算、控制系统的综合与校正、根轨迹法、控制系统的非线性问题、计算机控制系统、MATLAB 软件工具在控制系统分析和综合中的应用。该教材突出机械运动作为主要控制对象,并对其数学模型和分析综合重点作了介绍;着重基本概念的建立和解决机电控制问题的基本方法的阐明,并简化或略去与机电工程距离较远、较艰深的严格数学推导内容;引入和编写了较多的例题、习题,便于自学。本教材融入了有关的机电一体化新技术和新分析方法,可供相关领域的科技人员参考。同时,为了配合本教材的使用,还制作了《控制工程基础》多媒体光盘讲课版和基础部分光盘习题解答版,以供选用。

### 图书在版编目(CIP)数据

控制工程基础/董景新,赵长德,熊沈蜀,郭美凤编著. —2 版. —北京:清华大学出版社, 2003

(普通高等教育“十五”国家级规划教材. 北京市高等教育精品教材立项项目. 清华大学机械工程基础系列教材)

ISBN 7-302-06387-7

I. 控… II. ①董… ②赵… ③熊… ④郭… III. 机械工程—控制系统—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 015411 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦, 邮编 100084)

[http:// www. tup. com. cn](http://www.tup.com.cn)

责任编辑: 张秋玲

印 刷 者: 清华大学印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×230 印张: 29.75 字数: 612 千字

版 次: 2003 年 8 月第 2 版 2003 年 8 月第 2 次印刷

书 号: ISBN 7-302-06387-7/TH·111

印 数: 4001~8000

定 价: 39.00 元

# 序言



随着科学技术的发展和经济全球化,当今人类已进入知识经济社会和信息社会。我国经济体制将进一步由计划经济向社会主义市场经济接轨,经济的竞争性、变动性大大加强。过去在计划经济下形成的对口专业教育的观念,需要转向适应不断变化的社会需求,也就是说由对口性转向适应性。由于技术进步迅速发展,知识更新的周期缩短,现代教育观念将转变为终身教育。

认清当前教育改革的发展趋势,进一步转变教育思想和教育观念。需要培养“高层次、高素质、多样化、创新型”人才。高层次人才要具有良好的高素质,包括政治思想素质、业务素质和文化素质。通识教育给学生以宽广的知识面,为进一步深造和就业打下坚实的基础。

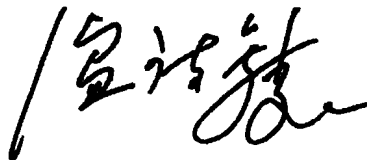
通识教育是当代学科发展趋势的需要,通过多学科的交叉和本硕统筹教育模式,把通与专结合起来。使学生既具有本学科的坚实基础,又通晓相关学科的发展趋势和知识。在综合学科的基础上,培养出多样化创新型的人才。我国当前国情与发达国家不尽相同,我国现状是工业化与知识化并存,所以不能照搬国外的培养模式。大学教育应成为提供高素质人才的基础,为我国的经济发展做出贡献。所以通过课程结构调整、教学内容更新和教学方法的改革,改善人才的知识结构才能创出具有特色的一流人才培养模式。

教材在培养人才中起着举足轻重的作用,是深化课程体系和教学内容的改革和教学方式改革成果的总结。清华大学精密仪器系组织编写的系列教材,主要涉及机械工程学本科本科生课程中的基础课、专业课和实践课。本着“先进性、创新性、实用性”的宗旨,力争

## II 控制工程基础

反映当代机械科学技术的基本内容和发展趋势,尽可能地将最新的生产和科研成果纳入到教材中。在编写中力图符合教学特点和学生的认识规律,全面提升教材质量,创出新的教学体系。

中国科学院院士

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王钟彦' (Wang Zhongyan), written in a cursive style.

2003. 2. 24

# 《机械工程基础》系列教材编委会

顾 问 (按姓氏笔画序)

金国藩(中国工程院院士)

温诗铸(中国科学院院士)

主 任 李庆祥

副主任 丁天怀 贾惠波 申永胜

委 员 刘朝儒 陈 恩 王东生 王伯雄

毛文炜 郁鼎文 郝智秀 季林红

秘 书 冯 涓 陆体军

# 新版前言



本教材是在董景新、赵长德编著的《控制工程基础》第1版的基础上重新编写的。《控制工程基础》第1版自1992年3月正式出版已10年。自第1版教材问世以来,“控制工程基础”课程已在全国各高等院校的机械类、仪器类等非控制专业普遍开设,清华大学等院校并将该课程确定为机械学院平台课,对教材的需求也稳步增加。自出版以来根据需求原教材多次重新印刷,至今已累计11次,总印数达53000册。随着科学技术的飞速进步,原教材一些内容已经陈旧,先进的内容需要补充。

这次新版教材在原书的基础上各章都作了或多或少的补充和修改。其中第10章“计算机控制系统”、第11章“MATLAB软件工具在控制系统分析和综合中的应用”完全重写,第2章“控制系统的动态数学模型”、第4章“控制系统的频率特性”、第7章“控制系统的综合与校正”也有很大改动。

该教材广泛参考了国内外同类教材和其他有关文献,力图形成以下特点:

- (1) 突出机械运动作为主要控制对象,并对其数学模型和分析综合重点研究;
- (2) 对自动调节原理基本内容表达清楚,着重基本概念的建立和解决机电控制问题的基本方法的阐明,并简化或略去与机电工程距离较远、较艰深的严格数学推导内容;
- (3) 引入和编写较多的例题、习题,便于自学;
- (4) 反映机电一体化新技术和新分析方法。

对于属于该书领域的非基本内容,但在本领域文献中时有出现的较为繁难的部分,本教材也作了一定介绍,其有关章节前注以“\*”号。

参加该书编写的除原作者董景新教授和赵长德教授外,还有熊沈蜀副教授(编写第10章)、郭美凤讲师(编写第11章部分),助教博士生韩丰田编写了第11章中的部分程

## VI 控制工程基础

序,张冠斌同学利用毕业设计对第7章的实例进行了部分设计和分析工作。全书由董景新教授统编。

该教材的编写得到了北京市高等教育精品教材建设项目和清华大学精品课程建设项目经费的资助,在此表示衷心感谢。

编 者

2002年12月



# 目录

<b>1</b>	<b>概论</b> .....	<b>1</b>
1.1	控制理论在工程中的应用发展 .....	1
1.2	自动控制系统的基本概念 .....	2
1.3	控制理论在机械制造工业中的应用 .....	8
1.4	课程主要内容及学时安排 .....	12
	例题及习题 .....	14
<b>2</b>	<b>控制系统的动态数学模型</b> .....	<b>17</b>
2.1	基本环节数学模型 .....	17
2.2	数学模型的线性化 .....	21
2.3	拉氏变换及反变换 .....	23
2.4	传递函数以及典型环节的传递函数 .....	35
2.5	系统函数方块图及其简化 .....	42
2.6	系统信号流图及梅逊公式 .....	47
2.7	受控机械对象数学模型 .....	48
2.8	绘制实际物理系统的函数方块图 .....	50
2.9	状态空间方程基本概念 .....	60
	例题及习题 .....	64
<b>3</b>	<b>时域瞬态响应分析</b> .....	<b>76</b>
3.1	时域响应以及典型输入信号 .....	76
3.2	一阶系统的瞬态响应 .....	79
3.3	二阶系统的瞬态响应 .....	81

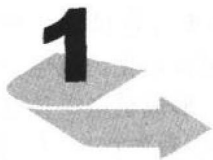
## VII 控制工程基础

3.4	时域分析性能指标	88
3.5	高阶系统的瞬态响应	93
3.6	机电系统时域瞬态响应的实验方法	96
	例题及习题	98
<b>4</b>	<b>控制系统的频率特性</b>	<b>108</b>
4.1	机电系统频率特性的概念及其基本实验方法	108
4.2	极坐标图	116
4.3	对数坐标图	122
4.4	由频率特性曲线求系统传递函数	131
4.5	由单位脉冲响应求系统的频率特性	135
* 4.6	对数幅相图	135
4.7	控制系统的闭环频响	137
	例题及习题	147
<b>5</b>	<b>控制系统的稳定性分析</b>	<b>155</b>
5.1	系统稳定性的基本概念	155
5.2	系统稳定的充要条件	156
5.3	代数稳定性判据	157
5.4	乃奎斯特稳定性判据	164
5.5	应用乃奎斯特判据分析延时系统的稳定性	173
5.6	由伯德图判断系统的稳定性	178
5.7	控制系统的相对稳定性	182
* 5.8	李雅普诺夫稳定性方法	186
	例题及习题	188
<b>6</b>	<b>控制系统的误差分析和计算</b>	<b>197</b>
6.1	稳态误差的基本概念	197
6.2	输入引起的稳态误差	198
6.3	干扰引起的稳态误差	203
6.4	减小系统误差的途径	205
6.5	动态误差系数	207
	例题及习题	209

<b>7</b>	<b>控制系统的综合与校正</b> .....	<b>216</b>
7.1	系统的性能指标 .....	216
7.2	系统的校正概述 .....	220
7.3	串联校正 .....	221
7.4	反馈校正 .....	232
7.5	用频率法对控制系统进行综合与校正 .....	235
7.6	典型机电反馈控制系统综合校正举例 .....	248
7.7	确定 PID 参数的其他方法 .....	261
	例题及习题 .....	266
<b>8</b>	<b>根轨迹法</b> .....	<b>275</b>
8.1	根轨迹与根轨迹方程 .....	275
8.2	绘制根轨迹的基本法则 .....	278
8.3	根轨迹图绘制举例 .....	286
8.4	系统闭环零点、极点的分布与性能指标 .....	291
	例题及习题 .....	299
<b>* 9</b>	<b>控制系统的非线性问题</b> .....	<b>303</b>
9.1	概述 .....	303
9.2	描述函数法 .....	307
9.3	相轨迹法 .....	322
	例题及习题 .....	337
<b>10</b>	<b>计算机控制系统</b> .....	<b>344</b>
10.1	计算机控制系统的组成 .....	344
10.2	线性离散系统的数学模型和分析方法 .....	350
<b>*</b> 10.3	离散状态空间模型 .....	374
10.4	线性离散系统的稳定性分析 .....	377
10.5	计算机控制系统的模拟化设计方法 .....	381
	例题及习题 .....	390
<b>11</b>	<b>MATLAB 软件工具在控制系统分析和综合中的应用</b> .....	<b>397</b>
11.1	MATLAB 基本特点 .....	397
11.2	控制系统在 MATLAB 中的描述 .....	399

## **X** 控制工程基础

11.3 进行部分分式展开.....	400
11.4 线性系统的时间响应分析.....	402
11.5 控制系统的频域响应分析.....	405
11.6 控制系统的根轨迹图.....	408
11.7 系统稳定性分析.....	409
11.8 控制系统仿真例.....	411
11.9 系统框图输入与仿真工具 SIMULINK .....	431
习题.....	437
<b>附录 A 拉普拉斯变换表 .....</b>	<b>439</b>
<b>附录 B 高阶最优模型最佳频比的证明 .....</b>	<b>443</b>
<b>习题参考答案 .....</b>	<b>446</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>462</b>



# 概 论

本章带领读者走进控制工程领域,主要介绍控制理论在工程中的应用发展、自动控制系统的基本概念以及控制理论在机械制造工业中的一些具体应用;同时也介绍了本书的主要内容以及作为教材的讲授学时安排建议。

## 1.1 控制理论在工程中的应用发展

控制理论是在产业革命的背景下,在生产和军事需求的刺激下,自动控制、电子技术、计算机科学等多种学科相互交叉发展的产物。控制论的奠基人美国科学家维纳(Wiener, N.)从1919年开始萌发控制论的思想,1940年他提出了数字电子计算机设计的五点建议。二次大战期间,维纳参加了火炮自动控制的研究工作,他把火炮自动打飞机的动作与人狩猎的行为做了对比,并且提炼出了控制理论中最基本最重要的反馈概念。他提出,准确控制的方法可以把运动的结果所决定的量,作为信息再反馈回控制仪器中,这就是著名的负反馈概念。即使驾驶车辆也是由人参与的负反馈调节着。人们不是盲目地按着预定不变的模式来操纵车上的驾驶盘,而是发现靠左了,就向右边做一个修正,反之亦然。因此他认为,目的性行为可以引作反馈,可以把目的性行为这个生物所特有的概念赋予机器。于是,维纳等在1943年发表了《行为,目的和目的论》。同时火炮自动控制的研制获得成功,这些是控制论萌芽的重要实物标志。1948年,维纳所著《控制论》的出版,标志着这门学科的正式诞生。

20世纪50年代以后,一方面在控制理论的指导下,火炮及导弹控制技术极大地发展,数控、电力、冶金自动化技术突飞猛进;另一方面在自动控制装备的需求和发展的基础上,控制理论也不断向纵深发展。1954年,我国科学家钱学森在美国运用控制论的思想和方法,用英文出版了《工程控制论》,首先把控制论推广到工程技术领域。接着短短的几十年里,在各国科学家和科学技术人员的努力下,又相继出现了生物控制论、经济控制

论和社会控制论等,控制理论已经渗透到各个领域,并伴随着其他科学技术的发展,极大地改变了整个世界。控制理论自身也在创造人类文明中不断向前发展。控制理论的中心思想是通过信息的传递、加工处理并加以反馈来进行控制,控制理论也是信息学科的重要组成部分。

机电工业是我国最重要的支柱产业之一,而传统的机电产品正在向机电一体化(mechatronics)方向发展。机电一体化产品或系统的显著特点是控制自动化。机电控制型产品技术含量高,附加值大,在国内外市场上具有很强的竞争优势,形成机电一体化产品发展的主流。当前国内外机电结合型产品,诸如典型的工业机器人、数控机床、自动导引车等都广泛地应用了控制理论。

根据自动控制理论的内容和发展的不同阶段,控制理论可分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

“经典控制理论”的内容是以传递函数为基础,以频率法和根轨迹法作为分析和综合系统基本方法,主要研究单输入、单输出这类控制系统的分析和设计问题。

“现代控制理论”是在“经典控制理论”的基础上,于20世纪60年代以后发展起来的。它的主要内容是以状态空间法为基础,研究多输入、多输出、时变参数、分布参数、随机参数、非线性等控制系统的分析和设计问题。最优控制、最优滤波、系统辨识、自适应控制等理论都是这一领域重要的分支,特别是近年来由于电子计算机技术和现代应用数学研究的迅速发展,又使现代控制理论在大系统理论和模仿人类智能活动的人工智能控制等诸多领域有了重大发展。

半个世纪以来,控制理论从主要依靠手工计算的经典控制理论发展到依赖电脑的现代控制理论,发展了最优控制、自适应控制、智能控制。智能控制中,学习控制技术从简单的参数学习向较为复杂的结构学习、环境学习和复杂对象学习的方向发展;并发展了神经网络、模糊逻辑、进化算法、专家系统、鲁棒控制与 $H_{\infty}$ 控制等技术。同时,还发展了MATLAB(matrix laboratory, MATLAB)等控制系计算机辅助设计工具(computer aided control system design, CACSD),使控制理论在工程上的应用更加方便。

### 1.2 自动控制系统的基本概念

所谓自动控制,就是在没有人直接参与的情况下,使被控对象的某些物理量准确地按照预期规律变化。例如,数控加工中心能够按预先排定的工艺程序自动地进刀切削,加工出预期的几何形状;焊接机器人可按工艺要求焊接流水线上的各个机械部件;温度控制系统能保持恒温等等。所有这些系统都有一个共同点,即它们都是一个或一些被控制的物理量按照给定量的变化而变化,给定量可以是具体的物理量,例如电压、位移、角度等,也可以是数字量。一般地说,如何使被控制量按照给定量的变化规律而变化,这就是控制系

统所要解决的基本任务。学习自动控制这门科学技术要解决两方面问题:其一是如何分析某个给定控制系统的工作原理、动态特性,分析该系统的稳定性、准确性、快速性等;其二是如何根据生产和国防的需要来进行控制系统的设计,并用机、电、光、液压元部件或设备来实现这一系统。前者主要是分析系统,后者是综合和设计系统,但无论要解决哪方面问题,都必须具有丰富的控制理论知识。

系统的输入就是控制量,它是作用在系统的激励信号,其中使系统具有预定性能的输入信号称为控制输入、指令输入或参考输入,而干扰或破坏系统预定性能的输入信号则称为扰动。系统的输出也称为被控制量,它表征控制对象或过程的状态和性能。

### 1.2.1 自动控制系统工作原理

首先研究恒温系统这个例子。实现恒温控制有两种办法:人工控制和自动控制。图 1-1 所示为人工控制的恒温控制箱。人们可以通过调压器改变电阻丝的电流,以达到控制温度的目的。箱内温度是由温度计测量的,人工调节过程可归结如下:

- (1) 观测由测量元件(温度计)测出的恒温箱的温度(被控制量)。
- (2) 将被测温度与要求的温度值(给定值)进行比较,得出偏差的大小和方向。
- (3) 根据偏差的大小和方向再进行控制。

当恒温箱温度高于所要求的给定温度时,就移动调压器滑动端使电流减小,温度降低。当恒温箱温度低于所要求的给定温度时,则移动调压器滑动端使电流增大,温度升高。

因此,人工控制的过程就是测量、求偏差、再控制以纠正偏差的过程。简单地讲就是检测偏差并用以纠正偏差的过程。

对于这样简单的控制形式,如果能找到一个控制器代替人的职能,那么这样一个人

工调节系统就可以变成自动控制系统了。图 1-2 就是一个自动控制系统。其中,恒温箱的温度是由给定信号电压  $u_1$  控制的。当外界因素引起箱内温度变化时,作为测量元件的热电偶,把温度转换成对应的电压信号  $u_2$ ,并反馈回去与给定信号比较,所得结果即为温度偏差对应的电压信号。经电压放大、功率放大后,用以改变电机的转速和方向,并通过传动装置拖动调压器动触头。当温度偏高时,动触头向着减小电流的方向运动,反之加大电流,直到温度达到给定值为止。即只有在偏差信号为零时,电机才停转。这样就完成了所要求的控制任务。而所有这些装置便组成了一个自动控制系统。

上述人工控制系统和自动控制系统是极相似的。执行机构类似于人手,测量装置相当于人的眼睛,控制器类似于人脑。另外,它们还有一个共同的特点,就是都要检测偏差,

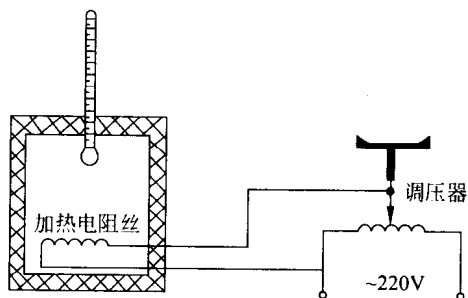


图 1-1 人工控制的恒温箱

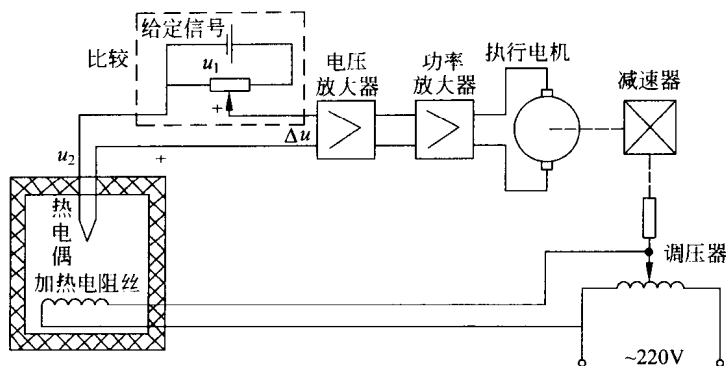


图 1-2 恒温箱的自动控制系统

并用检测到的偏差去纠正偏差,可见没有偏差便没有调节过程。在自动控制系统中,这一偏差是通过反馈建立起来的。反馈就是指输出量通过适当的测量装置将信号全部或部分返回输入端,使之与输入量进行比较。比较的结果称为偏差。如前所述,基于反馈基础上的“检测偏差用以纠正偏差”的原理又称为反馈控制原理。利用反馈控制原理组成的系统称为反馈控制系统。

图 1-3 所示为恒温箱温度自动控制系统职能方块图。 $\otimes$  代表比较元件,箭头代表作用的方向。从图中可以看到反馈控制的基本原理,也可以看到,各职能环节的作用是单向的,每个环节的输出是受输入控制的。总之,实现自动控制的装置可各不相同,但反馈控制的原理却是相同的,可以说,反馈控制是实现自动控制最基本的方法。

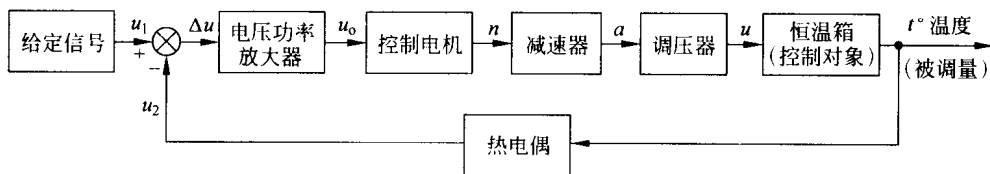


图 1-3 恒温箱温度自动控制系统职能方块图

### 1.2.2 开环控制与闭环控制

按照有无反馈测量装置分类,控制系统分为两种基本形式,即开环控制系统和闭环控制系统,如图 1-4 所示。开环系统(图 1-4(a))是没有输出反馈的一类控制系统。这种系统的输入直接供给控制器,并通过控制器对受控对象产生控制作用。开环系统的主要优点是结构简单、价格便宜、容易维修。它的主要缺点是精度低,容易受环境变化的干扰(例如电源波动、温度变化等)影响。在工业与国防等要求较高的应用领域,绝大多数控制系



统的基本结构方案都是采用反馈原理(图 1-4(b)),其输出的全部或部分被反馈到输入端。输入与反馈信号比较后的差值(即偏差信号)加给控制器,然后再调节受控对象的输出,从而形成闭环控制回路。所以,闭环控制系统又称为反馈控制系统,这种反馈称为负反馈。闭环控制系统比开环控制系统,具有一系列的优点,包括精度高、动态性能好、抗干扰能力强等。它的缺点是结构比较复杂、价格比较贵、维修人员要求文化素质高。

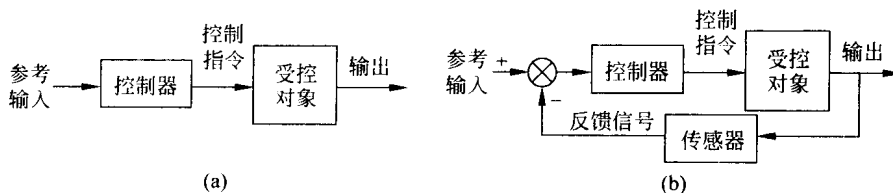


图 1-4 控制系统基本类型  
(a) 开环系统; (b) 闭环系统

图 1-5 所示的电机转速控制系统是开环控制的。当给定电压改变时,电机转速也跟着改变,但这个控制系统经受不住负载力矩变化对转速的影响。

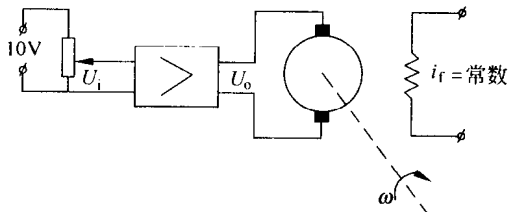


图 1-5 电机转速控制系统

图 1-6 是反馈控制系统,也叫做闭环控制系统。这种系统的特点是系统的输出端和输入端之间存在反馈回路,即输出量对控制作用有直接影响。闭环的作用就是应用反馈来减少偏差。

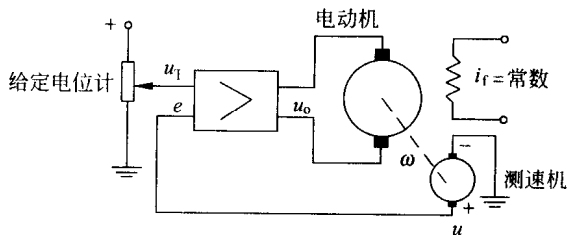


图 1-6 闭环调速系统原理图