

控制工程基础

张尚才 主编

14.2

32

浙江大學出版社

TECHN.

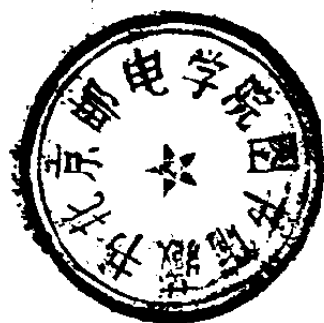
Lib.

0634827

控制工程基础

张尚才 主编

1727/24



21113000635248



浙江大学出版社

(浙)新登字 10号

内容提要

本书主要介绍单输入、单输出线性定常控制系统的基本概念、基本原理以及基本的分析方法和综合方法。全书内容包括控制系统的一般概念、物理系统的数学模型、时间响应分析、根轨迹分析、频率响应分析以及控制系统的校正等。每章附有习题。另外,在附录中还编入了拉氏变换。

本书为机械工程类专业本科学生学习“控制工程基础”课程而编写,它也可供非控制类的其他专业师生和有关工程技术人员参考。

控 制 工 程 基 础

张尚才 主编

责任编辑 徐宝澍

*

浙江大学出版社出版

哈杭电伺服技术研究所激光照排

浙江省煤田地质勘探局制图印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

*

开本 850×1168 1/32 印张 11.75 字数 291 千

1991年8月第1版 1992年12月第2次印刷

印数 5001—8000

ISBN7-308-00796-0/TH·025 定价:5.25

前 言

本书是为高等院校机械工程类专业本科学生学习“控制工程基础”课程而编写的教材。它也可供其他非控制类专业学生学习控制理论使用。

“控制工程基础”课程是一门技术基础课。因此本教材主要阐述经典控制理论的有关基本概念、基本原理以及基本分析方法和综合方法，为后续课程运用控制理论提供基础知识。

本书共分九章，第一、第二、第三章是全书的基础，第四、第五、第六章介绍控制系统快速性、稳定性和精确性的时间响应分析。这六章覆盖了系统分析所涉及的基本问题。第七章和第八章分别介绍分析系统的根轨迹法和频率响应法。第七章内容比较简要，而且相对独立，可根据学时情况取舍。第八章篇幅较大，并且和第九章内容相关。第九章讨论系统的综合问题，主要介绍应用频率响应法对系统的校正。考虑到有些学校在数学课程中没有讲授积分变换，故将拉氏变换的有关内容作为附录。本书每章附有两种类型的习题。其中巩固型习题主要起巩固课程基本内容的作用，提高型习题则相对有较大的难度。授课教师可根据因材施教的原则进行选择。本书全部内容讲授约需 60 学时，但教材体系能适应多种学时的教学需要。

本书是在浙江大学 1988 年为机械制造工艺与设备专业和机械设计与制造专业编写的《控制工程基础》讲义基础上编写的。该讲义在 1984 年讲义的基础上曾作过两次修改。

本教材由浙江大学张尚才主编。参加编写工作的还有曹永上(上海工程技术大学)、吴祖育(上海交通大学)、汪克智(浙江工学

院)、刘艳斌(福州大学)、周锦国(洛阳工学院)、郑佑濂(广东工学院)和张禾英(浙江大学)等。浙江大学机械系对本书的出版给予了大力的支持,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中疏漏错误在所难免,竭诚欢迎批评指正。

编者

1990年10月于杭州

目 录

第一章 概论	1
第一节 自动控制发展的简况	1
第二节 自动控制系统的工作原理	3
一、速度控制系统	3
二、水位控制系统	6
三、随动系统	7
第三节 自动控制的基本方式	10
一、开环控制	10
二、闭环控制	11
第四节 对控制系统的基本要求	12
习 题	14
第二章 物理系统的微分方程	16
第一节 建立物理系统微分方程的一般方法和步骤	16
一、建立物理系统微分方程的一般步骤	16
二、机械系统微分方程的建立	18
三、电气系统微分方程的建立	19
四、流体系统微分方程的建立	21
五、利用回路相似法建立非电系统的微分方程	22
第二节 线性系统及其齐次性和叠加性	24
一、线性系统	24
二、线性系统的齐次性	25
三、线性系统的叠加性	26
第三节 增量方程及非线性方程的线性化	27

一、增量方程	27
二、非线性微分方程的线性化	29
习 题	32
第三章 传递函数	37
第一节 传递函数的基本概念	37
第二节 典型环节及其运动规律	41
一、典型环节的分类	41
二、典型环节的运动规律	44
第三节 动态方块图及系统的传递函数	53
一、方块图符号	54
二、闭环控制系统的典型方块图	55
三、系统方块图的绘制	60
四、利用方块图的简化求取系统的传递函数	65
五、利用梅逊公式由方块图直接求取 系统的传递函数	75
习 题	78
第四章 时间响应	83
第一节 时间响应的概念	83
一、时间响应	83
二、典型输入信号及典型时间响应	85
三、在任意输入函数作用下系统的响应	87
第二节 时间响应的性能指标	88
第三节 一阶系统的时间响应	90
一、单位阶跃响应	90
二、单位斜坡响应	92
三、单位脉冲响应	93
第四节 二阶系统的时间响应	94
一、单位阶跃响应	97

二、单位斜坡响应	108
三、单位脉冲响应	111
第五节 高阶系统的时间响应	119
一、三阶系统的单位阶跃响应	120
二、高阶系统的主导极点	121
三、高阶系统的时间响应分析	123
习 题	127
第五章 控制系统的稳定性及其时域判据	130
第一节 稳定性的概念及系统稳定的条件	130
一、稳定性的概念	130
二、系统稳定的条件	131
第二节 系统稳定性的时域判据	134
一、罗斯稳定判据	134
二、霍尔维茨稳定判据	142
第三节 结构性不稳定系统	146
习 题	147
第六章 控制系统的稳态误差	149
第一节 偏差、误差和稳态误差	149
一、偏差、误差	149
二、稳态误差	150
第二节 参考输入作用下系统的稳态误差	151
一、利用终值定理求稳态误差	151
二、利用动态误差系数求稳态误差	157
第三节 在干扰作用下系统的稳态误差	161
第四节 提高系统稳态精度的措施	164
习 题	166
第七章 控制系统的根轨迹分析	169
第一节 根轨迹与根轨迹方程	169

一、根轨迹	169
二、根轨迹方程	171
第二节 根轨迹的基本性质	174
第三节 根轨迹的绘制	184
一、绘制根轨迹的一般步骤	184
二、根轨迹绘制举例	185
第四节 控制系统的根轨迹分析	191
习 题	198
第八章 频率响应分析	200
第一节 频率响应的基本概念	200
第二节 幅相频率特性图(奈魁斯特图)	207
一、典型环节的奈魁斯特图	208
二、系统的开环奈魁斯特图	216
第三节 对数频率特性图(波德图)	220
一、对数幅频特性和对数相频特性	220
二、典型环节的波德图	224
三、系统的开环波德图	236
四、最小相位传递函数	241
五、传递函数的试验确定	243
第四节 稳定性的频域判据	247
一、米哈依洛夫稳定判据	247
二、奈魁斯特稳定判据	251
三、稳定性的对数频率特性判据	263
四、滞后系统的稳定性分析	265
第五节 控制系统的相对稳定性	269
一、相位裕量	269
二、幅值裕量	270
第六节 系统的闭环频率特性	273

一、等幅值轨迹(等 M 圆)	273
二、等相位轨迹(等 N 圆)	275
三、由开环奈魁斯特图求系统的闭环频率特性	277
第七节 频率响应与时间响应性能指标的关系	279
一、频域性能指标及其与时域性能指标的关系	279
二、开环对数频率特性与时域性能指标的关系	285
习 题	290
第九章 控制系统的校正	295
第一节 引言	295
第二节 串联校正	297
一、基本控制规律	297
二、相位超前校正	309
三、相位滞后校正	315
四、相位滞后-超前校正	321
第三节 反馈校正	324
习 题	328
附录 拉普拉斯变换	330
主要参考书目	361

第一章 概 论

第一节 自动控制发展的简况

在科学技术发展进程中，自动控制起着重要的作用。据说，在公元前的大约 300 年期间，希腊就运用反馈控制原理设计了浮子调节器，并应用于水钟和油灯中。早在 1000 多年以前，我国也先后发明了铜壶滴漏计时器、指南车以及多种天文仪器。这些控制装置的发明，促进了当时社会经济的发展。

首次应用于工业工程的自动控制器是瓦特(James Watt)于 1769 年发明的、用来控制蒸汽机转速的飞球控制器。苏联认为第一个具有历史性的控制系统是珀尔朱诺夫(I. Polzunov)于 1765 年发明的水位浮子调节器。

1868 年以前，自动控制系统还处于直觉制作阶段。当时，为了提高控制系统的精度，却导致系统产生剧烈的振荡甚至不稳定。这就不得不开展自动控制理论的研究。1868 年马克斯威尔(J. C. Maxwell)利用飞球控制器的微分方程模型建立了与控制理论有关的数学理论，它可由微分方程的解中是否包含增长指数函数项来判断系统的稳定性。

1877 年，罗斯(E. J. Routh)提出了一种不用求特征方程式的根的方法来判断系统的稳定性。1895 年，霍尔维茨(A. Hurwitz)也独自提出了这种方法。

第二次世界大战前后，控制理论与实践在美国、西欧和苏联、东欧以不同的方式发展。在美国主要是由波德(H. W. Bode)和奈魁斯特(H. Nyquist)等人在贝尔电话实验室

(Bell Telephone Laboratories)用频率法研究电话系统和电子反馈放大器，并于1932年提出了奈魁斯特稳定判据和稳定裕量的概念。在苏联，控制理论这一领域则由数学家和应用力学家支配，并采用时域法进行研究。

第二次世界大战期间，由于需要设计和建造飞机自动驾驶仪，火炮定位系统，雷达天线系统以及其他军用系统，自动控制理论和实践出现了飞跃的发展。

1940年以前，在大多数场合下，控制系统的设计还是采用试凑法。在40年代期间，数学分析方法有了大发展。1945年波德提出了分析综合线性系统的图解法。1948年数学家维纳(N. Wiener)发表了著名的“控制论”，形成了完整的经典控制理论。从此，控制工程以它自身的权利成为一门工程学科。

1950年伊万斯(W. R. Evans)提出了根轨迹法，进一步充实了经典控制理论。1954年我国科学家钱学森发表了“工程控制论”这一名著，对推动控制理论的应用起了很大的作用。

随着苏联人造地球卫星的发射和空间年代的到来，控制工程的发展，得到了另一种新的动力。为火箭和空间探测器设计出复杂的和高精度的控制系统，成为一项必须的任务。为了减轻人造卫星的重量以及对它们的非常精确的控制，导致了最优控制理论的产生。1956年苏联庞特廖金(L. S. Pontryagin)提出了极大值原理，1957年美国贝尔曼(R. I. Bellman)提出了动态规划理论，1960年美国的卡曼(R. E. Kalman)提出了卡曼滤波理论。他们的工作形成了现代控制理论的基础。

从上面简单介绍的自动控制发展的历程可知，自动控制技术的应用，促进了社会经济的发展，而客观的社会需要又给自动控制理论的发展赋以动力。

第二节 自动控制系统的工作原理

一、速度控制系统

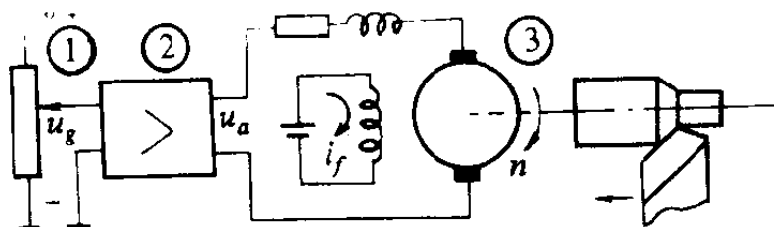


图 1-1 直流电动机转速控制系统

图 1-1 表示用以实现车床主轴变速的直流电动机转速控制系统。系统中③是电枢控制式的直流电动机，它具有恒定的励磁电流 i_f 。电动机的转速 n 和电枢电压 u_a 成正比。电枢电压 u_a 可以由改变给定电位计①的滑臂位置而得到的给定电压 u_g 并通过放大器②放大而获得。因此，电动机转速 n 和给定电压 u_g 有一一对应的关系，将电位计滑臂调到适当位置，就可得到所需要的转速。这一系统的控制关系可用图 1-2 的方框图表示。

当电动机的负载转矩变化很小，系统元件特性比较稳定时，图 1-1 的控制系统可以满足预期的要求。否则电动机的实际转速与期望值相比将有较大的误差。

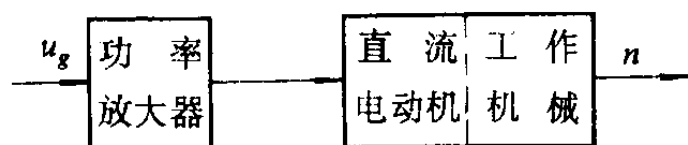


图 1-2 直流电动机转速控制系统的方框图

为了克服或减小负载转矩变化对转速的影响，可以采用干扰补偿的办法。图 1-3 所示的速度控制系统就是带干扰补偿的直

流电动机速度控制系统。工作时若负载转矩增加，则电动机转速下降，电枢电流 i_a 增大。由于引入了与电枢电流有关的正反馈补偿，故电枢电压 u_a 升高，从而使电动机转速升高，补偿了负载转矩的变化对转速的影响。

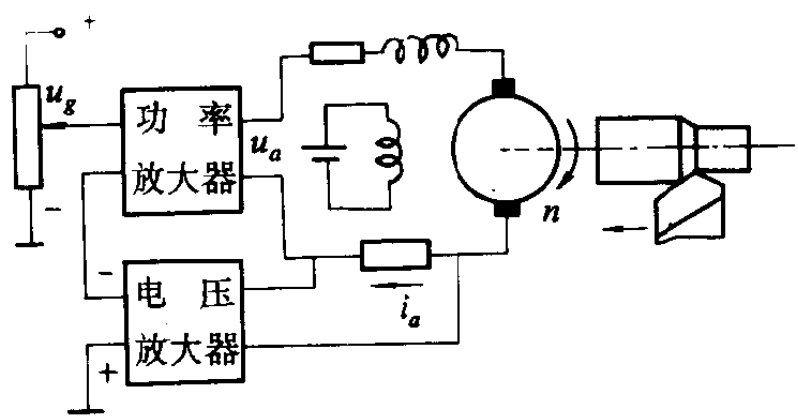


图 1-3 带干扰补偿的直流电动机速度控制系统

这种具有干扰补偿的速度控制系统可用图 1-4 的方框图表示。

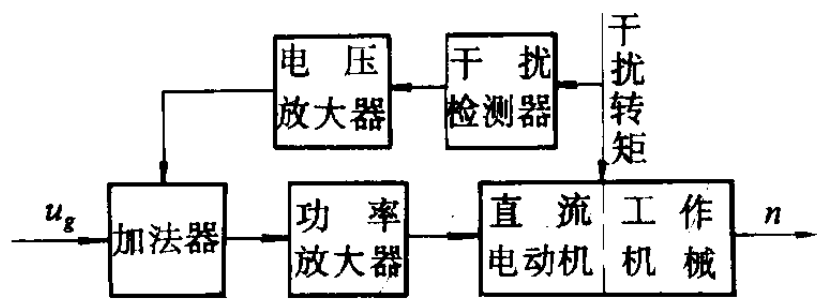


图 1-4 图 1-3 的方框图

采用干扰补偿的系统一般不能解决由于元件特性不稳定所产生的输出误差。另外，一个补偿装置一般只能补偿一种干扰的影响，而且也只有在干扰能够检测的情况下才能采用。

图 1-5 所示的带偏差控制作用的速度控制系统可以减小或消除由各种因素所引起的转速变化。

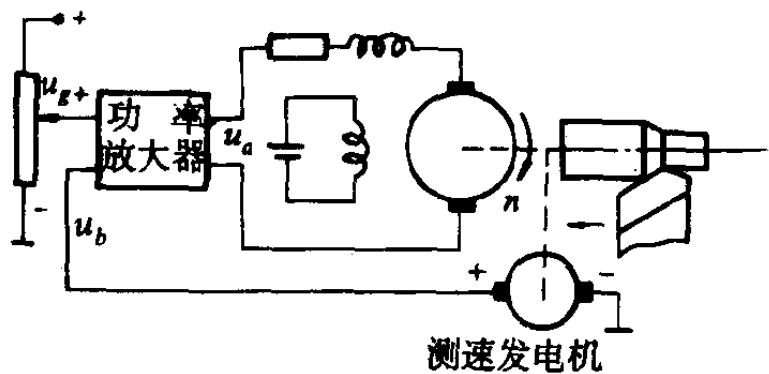


图 1-5 带偏差控制作用的速度控制系统

这个系统中，电动机的转速是由电压 u_g 和 u_b 共同控制的。测速发电机用来测量实际转速，并将与实际转速对应的电压 u_b 回送到加法器(比较器)与给定电压 u_g 进行比较。当负载转矩变化或由于其他原因使电动机转速高于(或低于)要求转速时，电压 u_b 便升高(或降低)。比较器输出的偏差电压 $\Delta u = u_g - u_b$ 相应减小(或加大)，因而经放大器放大后的电压 u_a 也相应降低(或升高)，从而使电动机的转速下降(或升高)而回复到要求值。

图 1-6 是这一控制系统的方框图。

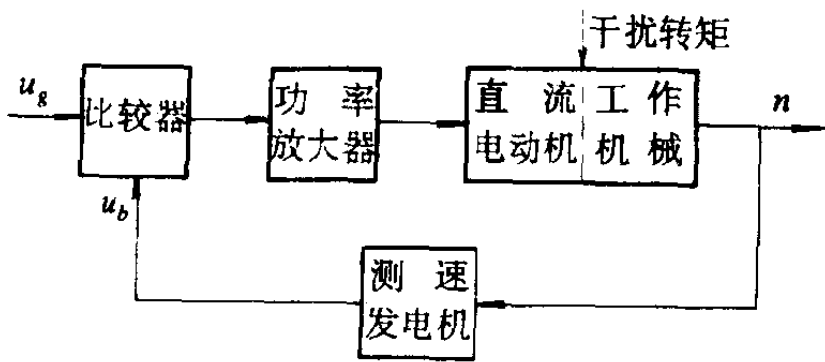


图 1-6 图 1-5 的方框图

二、水位控制系统

图 1-7 表示一水位控制系统，它用来在用水流量变化情况下，维持水位不变。当用水流量 Q_2 变化时，水位也随之变化。水位变化由浮子测量。反映实际水位对给定水位偏差的电位计输出电压，经放大器放大后驱动执行电机。电机的运动经减速器降速后把进水阀门开大或关小，使进水流量 Q_1 增大或减小以补偿用水流量的变化，并使水位恢复到原来的给定值。

表示这一系统控制与调节关系的方框图如图 1-8 所示。

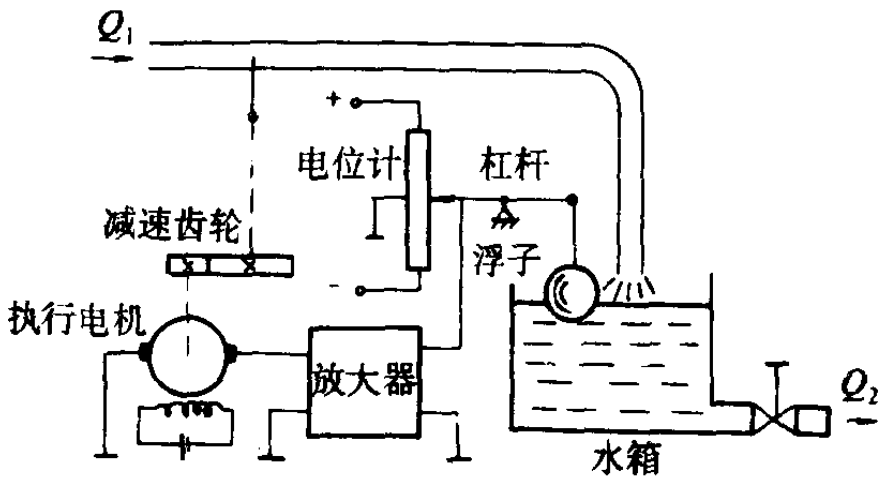


图 1-7 水位控制系统

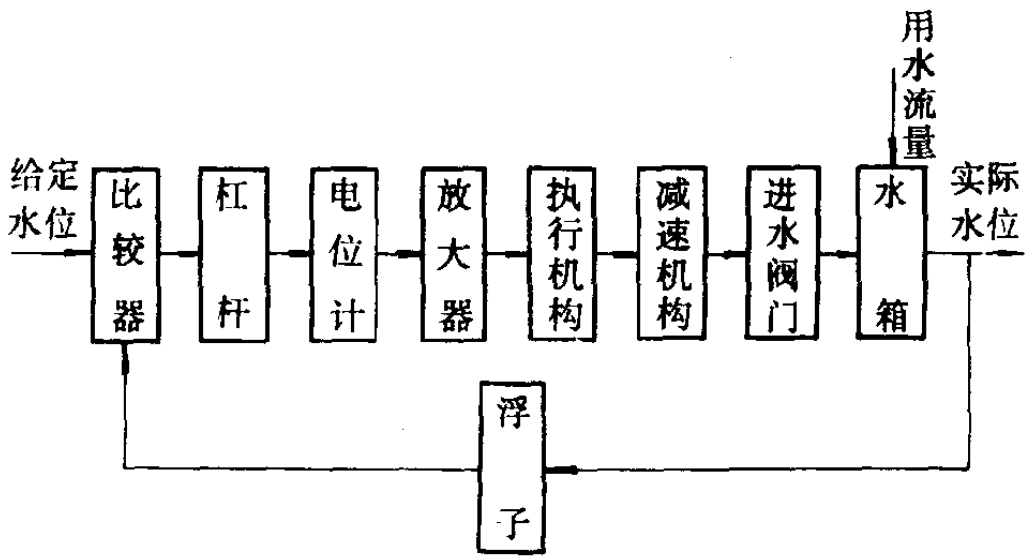


图 1-8 图 1-7 的方框图

三、随动系统

图 1-9 是随动系统工作原理图。指令电位计①给出指令转角 θ_g ，并输出相应的电压 u_g 。测量电位计②用来测量工作机械的实际转角 θ ，并输出相应的电压 u 。当工作机械的转角 θ 小于指令转角 θ_g ，则电压 u 小于电压 u_g ，于是出现偏差电压 u_e 。电动机便带动工作机械转动，直到 θ 与 θ_g 相等时为止。因此，只要转动指令电位计，工作机械便会跟随着转动。

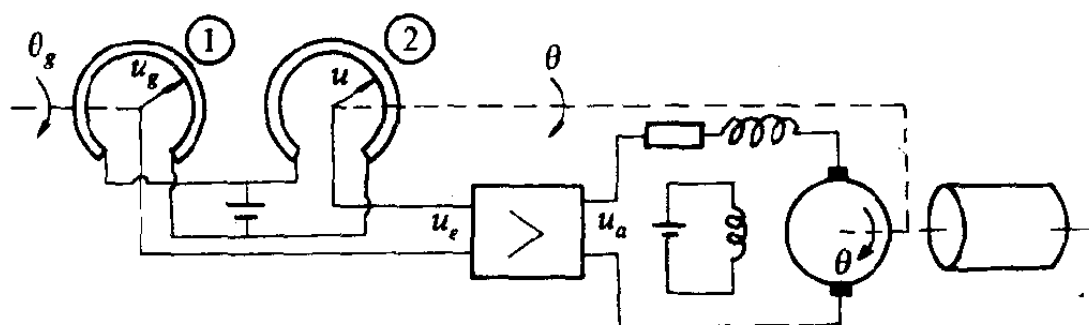


图 1-9 随动系统

在随动系统中，控制指令可根据需要随时给出或者是事先不知道的任意时间函数，而当指令信号变化时，工作机械便精确地复现着指令信号的变化规律。这个随动系统的方框图如图 1-10 所示。

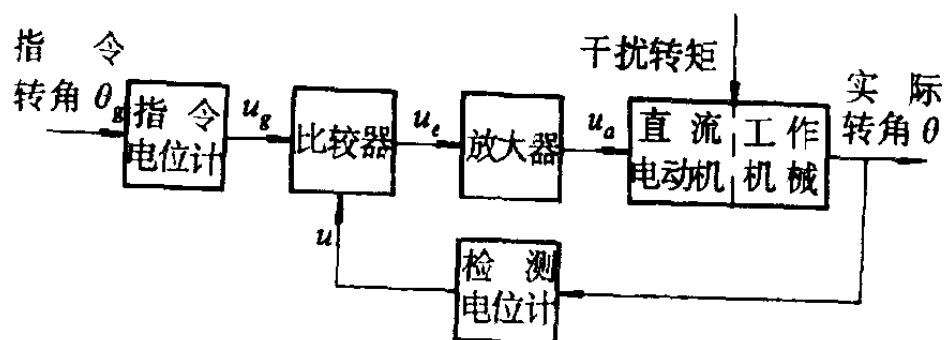


图 1-10 图 1-9 的方框图