

自动控制理论学习指导

ZIDONGKONGZHI LILUN XUEXI ZHIDAO

王洪斌 魏立新/主编



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

自动控制理论学习指导

主编	王洪斌	魏立新
编者	王洪斌	魏立新
	张秀玲	姚成玉

© 大连理工大学出版社 2004

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论学习指导 / 王洪斌, 魏立新主编. —大连: 大连理工大学出版社, 2004. 11

ISBN 7-5611-2728-6

I. 自… II. ①王… ②魏… III. 自动控制理论—高等学校—教学参考资料 IV. TP03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 061323 号

大连理工大学出版社出版

地址: 大连市凌水河 邮政编码: 116024

电话: 0411-84708842 传真: 0411-84701466 邮购: 0411-84707961

E-mail: dutp@dutp.cn URL: <http://www.dutp.cn>

大连理工印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸: 140mm × 203mm 印张: 10.25 字数: 325 千字

印数: 1 ~ 6 000

2004 年 11 月第 1 版 2004 年 11 月第 1 次印刷

责任编辑: 范业婷

责任校对: 孙伟丽

封面设计: 宋 蕾

定 价: 15.00 元

前 言

随着自动控制技术在国民经济各个领域的广泛应用,自动控制理论已成为高等工科院校控制专业本科生的技术基础课程。与此同时,随着生产过程自动化程度的提高,越来越多的非控制类专业也将该课程列入必修课。为了帮助读者掌握自动控制理论基本解题方法,满足报考硕士研究生的读者复习参考的需要,特编此书,希望对读者有所帮助。

本书根据高等工科院校自动控制理论教学大纲及教学要求,针对经典控制理论内容,精选了针对性很强的典型例题,给出了详细的解题步骤,适当的地方给出提示,目的是使读者牢固掌握并熟练运用基本概念,拓宽解题思路,掌握解题方法和技巧。

本书共8章。第1章介绍了古典控制理论的基本概念和负反馈系统的工作原理;第2章重点介绍了数学模型,系统传递函数的建立和应用,以及系统方框图和梅逊公式的数学模型简化方法;

第3~5章分别在时域、复域和频域对控制系统的稳定性、快速性和准确性进行分析;第6章介绍线性系统的校正方法;第7章讨论了非线性系统的描述函数法及相平面法;第8章讨论线性离散系统的基本分析方法。为了便于读者检查自己的学习水平,在附录中给出了4套不同学校的自动控制理论研究生入学考试试题,并附有参考答案。

本书由王洪斌、魏立新、张秀玲、姚成玉编写。其中姚成玉编写第1、2章,魏立新编写第3、4章;张秀玲编写第5、6章;王洪斌编写第7、8章,魏立新绘制了书中大部分插图。

承蒙河北大学校长王洪瑞教授、大连理工大学韩敏老师在百忙中审阅了本书,并提出了许多宝贵的意见和建议,燕山大学宋维公教授也为本书提出了合理的建议和宝贵的意见。研究生王霞、杨丽、周光学、李二超等为本书的完成提供了帮助。在编写本书的过程中,参考和吸收了兄弟院校教材的部分内容,在此一并表示衷心的感谢!

由于时间及作者水平有限,书中难免出现错误和不妥之处,敬请广大读者给予批评指正。

编者

2004年11月

目 录

第1章 引 论

内容结构图 /1	教学基本要求 /1	重点内容概要 /1
典型例题 /7	同步训练 /12	同步训练参考答案 /13

第2章 线性系统的数学模型

内容结构图 /14	教学基本要求 /15	重点内容概要 /15
典型例题 /26	同步训练 /47	同步训练参考答案 /54

第3章 控制系统的时域分析

内容结构图 /57	教学基本要求 /57	重点内容概要 /58
典型例题 /66	同步训练 /87	同步训练参考答案 /91

第4章 根轨迹分析法

内容结构图 /94	教学基本要求 /94	重点内容概要 /94
典型例题 /98	同步训练 /127	同步训练参考答案 /130

第5章 控制系统的频域分析

内容结构图 /132	教学基本要求 /132	重点内容概要 /133
典型例题 /139	同步训练 /157	同步训练参考答案 /162

第6章 控制系统的校正

内容结构图 /165	教学基本要求 /165	重点内容概要 /165
典型例题 /175	同步训练 /204	同步训练参考答案 /208

第7章 非线性控制系统分析

内容结构图 /210	教学基本要求 /210	重点内容概要 /211
------------	-------------	-------------

典型例题 /218 同步训练 /242 同步训练参考答案 /246

第8章 采样控制系统

内容结构图 /248 教学基本要求 /248 重点内容概要 /249

典型例题 /262 同步训练 /285 同步训练参考答案 /288

附录 硕士研究生入学考试试题选登

哈尔滨工业大学 2004 年试题 /289 参考答案 /291

大连理工大学 2004 年试题 /298 参考答案 /299

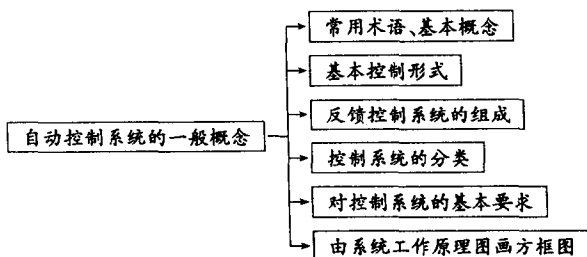
燕山大学 2004 年试题 /305 参考答案 /307

浙江大学 2003 年试题 /313 参考答案 /315

参考文献 /322

第1章 引 论

● 内容结构图 ●



● 教学基本要求 ●

1. 对反馈控制的基本理论和方法有一个全面的、整体的了解。
2. 了解自动控制理论发展简史及反馈控制理论的研究对象和方法。
3. 掌握自动控制系统的概念、术语,了解自动控制系统的组成、分类,及对自动控制系统稳、准、快三方面的基本要求。

● 重点内容概要 ●

1. 自动控制基本术语

自动控制 是指在没有人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置,使被控对象或过程按照预定的规律运行。

系统 为达到某一目的,由相互制约的各个部分按一定规律组成的、具有一定功能的整体,称为系统。它一般由控制装置(控制器)和被控对象组成。

自动控制系统 由控制器和被控对象组成的,能够实现自动控制任务的系统。

被控制量 在控制系统中,按规定的任务需要加以控制的物理量。

控制量 作为被控制量的控制指令而加给系统的输入量,也称为控制输入。

反馈 通过测量变换装置将系统或元件的输出量返回到输入端,与输入信号相比较体现过程。这个返回到输入端的信号称为反馈信号。

负反馈控制原理 检测偏差用以消除偏差。把被控制量反馈到系统的输入端与参考输入进行比较,利用偏差产生控制作用,通过控制器输出控制量,以减小或消除偏差。

2. 控制系统的两种基本形式

控制系统可分为开环控制系统与闭环控制系统。

开环控制系统 如果系统的输出端和输入端之间不存在反馈回路,输出量对系统的控制作用没有影响,这样的系统称为开环控制系统,如图 1-1 所示。

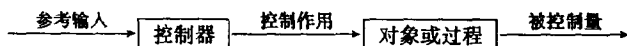


图 1-1 开环控制系统

开环控制系统的控制精度将取决于控制器及被控对象的参数稳定性,开环控制系统没有抗干扰能力。开环控制系统结构简单、容易实现及调整、成本相对较低、工作稳定。

闭环控制系统 图 1-2 是一个闭环控制系统,也叫做反馈控制系统。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。

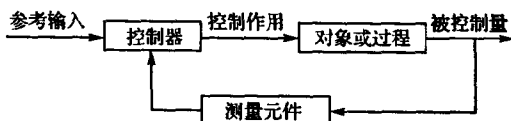


图 1-2 闭环控制系统

闭环控制系统突出的优点是精度高,抗干扰能力强。闭环控制系统是靠偏差进行控制,在工作过程中系统总会存在着偏差,由于元件的惯性(如负载的惯性),很容易引起振荡,使系统不稳定。因此精度和稳定性是闭环系统存在的一对矛盾。

如果要求实现复杂而准确度较高的控制任务,则可将开环控制和闭环控制适当结合起来,组成一个比较经济而性能较好的复合控制系统。

3. 自动控制系统的组成

图 1-3 是自动控制系统的示意图,对其中的术语和定义给以说明。

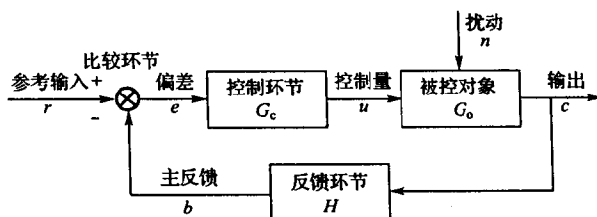


图 1-3 自动控制系统的示意图

参考输入 r ——输入到控制系统的指令信号；

主反馈 b ——与输出成正比或成某种函数关系,量纲与参考输入相同的信号；

偏差 e ——参考输入与主反馈之差,有时也称为误差；

控制环节 G_c ——接受偏差信号,通过转换与运算,产生控制量；

控制量 u ——控制环节的输出,作用于被控对象的信号；

扰动 n ——不希望的、影响输出的信号；

被控对象 G_o ——接受控制量并输出被控制量；

输出 c ——系统被控制量；

反馈环节 H ——将输出转换为主反馈信号的装置；

比较环节——相当于偏差检测器,它的输出量等于两个输入量的代数和。

4. 自动控制系统的类型

自动控制系统有不同的分类方法。根据系统是否满足叠加原理,可分为线性系统和非线性系统;按参考输入信号的性质可分为随动系统和自动调整系统;按内部传输信号的性质可分为连续系统与离散系统;按输入输出量的数目可分为单输入单输出系统与多输入多输出系统;按系统的结构和参数是否确定可分为确定系统与不确定系统,集中参数系统和分布参数系统;按系统组成元件的物理性质可分为电气控制系统、液压控制系统、气动控制系统;按被控制量的名称可分为温度控制系统、转速控制系统、张力控制系统等。

(1) 线性系统与非线性系统

若组成控制系统的元件都具有线性特性,则称这种系统为线性控制系统。这种系统的输入与输出间的关系,一般用微分方程、传递函数来描述,也

可以用状态空间表达式来表示。线性系统的主要特点是具有齐次性和适用叠加性。如果线性系统中的参数不随时间而变化,则称为线性定常系统;反之,则称为线性时变系统。线性系统满足齐次性和叠加性原理。

a. 齐次性 线性系统在输入和输出域内保持比例因子不变。若 $u(t)$ 是系统输入, $y(t)$ 是输出,即 $y(t) = f[u(t)]$,则对于任意实数 k ,线性系统应满足下面关系

$$ky(t) = f[ku(t)]$$

b. 叠加性 线性系统的各个输入产生的输出量互不影响。若 $u_1(t)$, $u_2(t)$ 是系统输入, $y_1(t)$, $y_2(t)$ 是对应的输出,即 $y_1(t) = f[u_1(t)]$, $y_2(t) = f[u_2(t)]$,线性系统应满足下面关系

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) = f[u_1(t)] + f[u_2(t)]$$

在控制系统中,如有一个或一个以上的元件具有非线性特性,则称该系统为非线性控制系统。非线性系统一般不具有齐次性,也不适用叠加原理,而且它的输出响应和稳定性与其初始状态有很大的关系。

严格地说,绝对的线性控制系统(或元件)是不存在的,因为所有的物理系统和元件在不同的程度上都具有非线性特性。为了简化对系统的分析和设计,在一定的条件下,可以对某些非线性特性作线性化处理。这样,非线性系统就近似为线性系统,从而可以用分析线性系统的理论和方法对它进行研究。

工程上有时为了改善控制系统的性能,常常人为地引入某种非线性元件。例如为了实现最短时间控制,采用开关型(Bang-Bang)控制方式;又如在由晶闸管组成的整流装置的直流调速系统中,为了改善系统的动态特性和限制电动机的最大电流,人们有意识地把速度调节器和电流调节器设计成具有饱和和非线性的特性。

(2) 随动系统与自动调整系统

随动系统又称伺服系统,其特点是输入量总在频繁地或缓慢地变化,要求系统的输出量能够以一定的准确度跟随输入量而变化。如火炮自动瞄准敌机的系统,液压仿形刀架随动系统等。

自动调整系统又称恒值调节系统,其特点是输入保持为常量,或整定后相对保持常量,而系统的任务是尽量排除扰动的影响,以一定准确度将输出量保持在希望的数值上。例如稳压电源,恒温系统等。对于这类系统,分析重点在于克服扰动对输出量的影响。

(3) 连续系统与离散系统

连续系统中各个参量的变化都是连续进行的。离散系统是指某一处或数处的信号以脉冲序列或数码的形式传递的系统。采样控制系统或脉冲控制系统是离散系统的一种。

(4) 单输入单输出系统与多输入多输出系统

单输入单输出(SISO)系统亦称单变量系统,其输入量和输出量各为一个,系统结构较为简单。多输入多输出(MIMO)系统亦称多变量系统,其输入量和输出量多于一个,系统结构较为复杂,回路多。一个输入量对数个输出量都有控制作用,反之,一个输出量往往受多个输入量控制,也就是说相互之间有耦合作用。显然,多变量系统的分析与设计远比单变量系统复杂。

(5) 确定系统与不确定系统

若系统的结构和参数是确定的、已知的,系统的输入信号(包括参考输入及扰动)也是确定的,可用解析式或图表确切表示,则这种系统称为确定系统。若系统输入信号基本上是确定的,但夹杂有不严重且其影响可忽略不计的噪声时,则此系统也可视为确定系统。

当系统本身或作用于该系统的输入信号不确定时,称其为不确定系统。例如系统的输入信号混杂有随机噪声,系统使用的元器件的特性有随机干扰等,就构成简单的不确定系统。若随机噪声等能用统计特性表示其特征时,可用概率论对不确定系统加以研究。

(6) 集中参数系统和分布参数系统

能用常微分方程描述的系统称为集中参数系统。这种系统中的参量或者是定常的,或者是时间的函数,系统的各状态(输入量、输出量及中间量)都只是时间的函数。因此,可以用时间作为变量的常微分方程描述其运动规律。

不能用常微分方程,而需用偏微分方程描述的系统称为分布参数系统。在这种系统中,可能是一部分环节能用常微分方程描述,但至少有一个环节需用偏微分方程描述其运动。这个环节的参量不只是时间的函数(也许与时间无关,对时间而言是定常的),而是明显地依赖这一环节的状态。因此,系统的输出将不再单纯是时间变量的函数,而且还是系统内部状态变量的函数,所以需用偏微分方程描述系统。

按系统组成元件的物理性质又可分为电气控制系统,液压控制系统等。

5. 对自动控制系统的基本要求

对自动控制系统的要求用语言叙述就是两句话:要求输出等于给定输入所要求的期望输出值;要求输出尽量不受扰动的影响。衡量一个系统是否完

成上述任务,把要求转化成三大性能指标来评价:稳、准、快。

(1)稳:即稳定性。就是指动态过程的振荡倾向和系统能否恢复平衡状态的能力。稳定是系统工作的首要条件,由于系统存在着惯性,当系统的各个参数匹配不妥时,将会引起系统的振荡而失去工作能力。自动控制理论至少应给出判断系统稳定性的方法,并应指出稳定性与系统的结构(或称控制规律)及参量间的关系。

(2)准:即准确性。是指在调整过程结束后输出量与给定量之间的偏差,或称为静态精度。是衡量系统工作性能的重要指标。自动控制理论应给出计算系统稳态响应的方法,并且指出系统控制规律及参量与稳态响应间的关系。

(3)快:即快速性。是指当系统输出量与给定量之间产生偏差时,消除这种偏差过程的快速程度。快速性反映系统的敏捷性。对于经常处于暂态过程,或对暂态响应有一定要求的自动控制系统,要求动态过程时间要短,振荡要轻。

由于受控对象的具体情况不同,各种系统对稳、准、快的要求各有侧重,例如,随动系统对快速性要求较高,而调速系统则对稳定性提出较严格的要求。

同一系统稳、准、快是相互制约的。快速性好,可能会有强烈振荡;改善稳定性,控制过程又可能过于迟缓,精度也可能变坏。分析和解决这些矛盾,也是本学科讨论的重要内容。对于机械动力学系统的要求,首要的也是稳定性,因为过大的振荡将会使部件过载而损坏,此外还要降低噪声、增加刚度等等,这些都是控制理论研究的主要问题。

6. 自动控制系统需要分析与设计的问题

自动控制理论的任务是研究自动控制系统中变量的运动规律和改变这种运动规律的可能性和途径,为建立高性能的自动控制系统提供必要的理论基础。要解决两个问题:一是如何分析某个给定控制系统的工作原理、稳定性和过渡过程品质;其二是如何根据实际需要来进行控制系统的设计,并用机、电、液、光等设备来实现这一系统。前者主要是分析系统,后者是综合与设计,要以系统的而不是孤立的、动态的而不是静态的观点和方法来分析或处理问题。

钱学森同志在 1979 年为其新版《工程控制论》所作的序中阐述了控制论的重要意义:“作为技术科学的控制论,对工程技术、生物和生命现象的研究和经济科学,以及对社会研究都有深刻的意义,比起相对论和量子力学对社

会的作用有过之而无不及。我们可以毫不含糊地说,从科学理论的角度来看,20世纪上半叶的三大伟绩是相对论、量子力学和控制论,也许可以称它们是三项科学革命,是人类认识客观世界的三大飞跃。”

● 典型例题 ●

【例1】 一个水池水位自动控制系统如图1-4所示。试简述系统工作原理,指出主要变量和各环节的构成,画出系统的方框图。

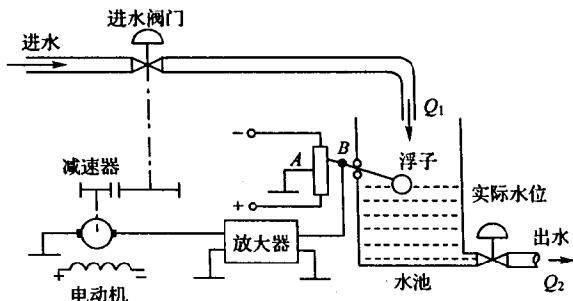


图 1-4 水池水位自动控制系统原理图

解 在这个水位控制系统中,水池的进水量 Q_1 来自由电动机控制开度的进水阀门,在出水量 Q_2 随意变化的情况下,保持水箱水位在希望的高度上不变。

希望水位高度由电位器触头 A 设定,浮子测出实际水位高度。由浮子带动的电位计触头 B 的位置反映实际水位高度。A、B 两点的电位差反映希望水位的偏差。当实际水位低于希望水位时, $U_{AB} > 0$ 。通过放大器驱动电动机转动,开大进水阀门,使进水量 Q_1 增加,从而使水位上升。当实际水位上升到希望位置时, A、B 两个触头在同一位置, $U_{AB} = 0$,电动机停止转动,进水阀门开度不变,这时进水量 Q_1 和出水量 Q_2 达到平衡位置。若实际水位高于希望水位, $U_{AB} < 0$,则电动机使进水阀门关小,使进水量减少,实际水位下降。

这个系统是个典型的恒值调节系统,在该系统中:

参考输入	希望水位的设定值
被控制量	实际水位
扰动量	出水量
被控对象	水池

测量元件	浮子
比较元件	电位器
放大元件	放大器
执行元件	电动机、减速器、进水阀门

系统的方框图如图 1-5 所示。控制系统中各元件的分类和方框图的绘制不是惟一的,只要能正确反映其功能和运动规律即可。

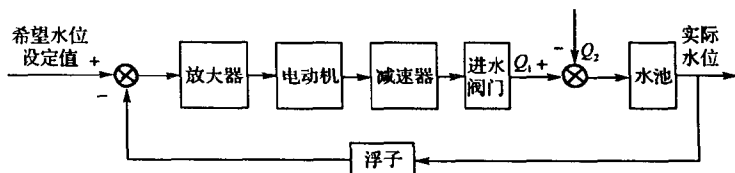


图 1-5 水池水位自动控制系统方框图

【例 2】 图 1-6 所示为发电机电压调节系统,试分析系统的工作原理,画出方框图并指出系统的结构特点。

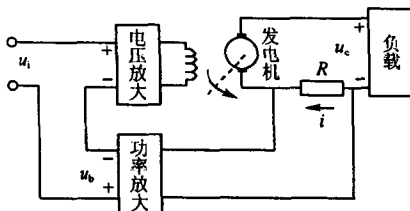


图 1-6 发电机电压调节系统

解 发电机在电枢转速和激磁电压恒定不变时,负载变化将引起输出电压和电枢回路电流的改变。当负载增大时,将引起电枢电压下降和电枢电流增大,因此,电枢回路的电流在电阻 R 上的电压增大, u_b 也增大,由于 u_b 与 u_i 的极性一致,因而发电机的激磁电压上升,使输出电压增大。这种由扰动产生附加控制作用的系统是扰动控制系统(本系统是将负载变化作为扰动输入的。图 1-6 所示的电压调节方式只能克服负载变化对发电机输出电压的影响)。系统方框图如图 1-7 所示。

【例 3】 图 1-8 为数字计算机控制的机床刀具进给系统。要求将工件的加工编制成程序预先存入数字计算机,加工时,步进电机按照计算机给出的信息工作,完成加工任务。试说明该系统的工作原理。

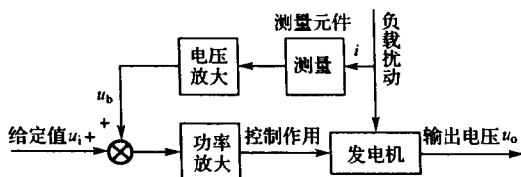


图 1-7 发电机电压调节系统系统方框图

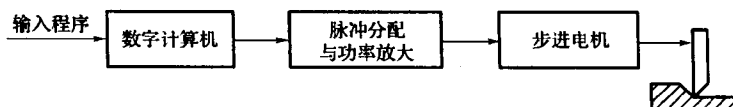


图 1-8 机床刀具进给系统

解 该系统是开环程序控制系统,被控对象为刀具,被控制量为刀具位置,给定量是程序设定的刀具位置。计算机按照编制的程序调节输出脉冲频率,通过脉冲分配与功率放大装置控制步进电机的转动,从而带动刀具按照预定的轨迹进刀,完成加工任务。

【例 4】 图 1-9 是仓库大门自动控制系统原理示意图。试说明系统自动控制大门开闭的工作原理并画出系统方框图。

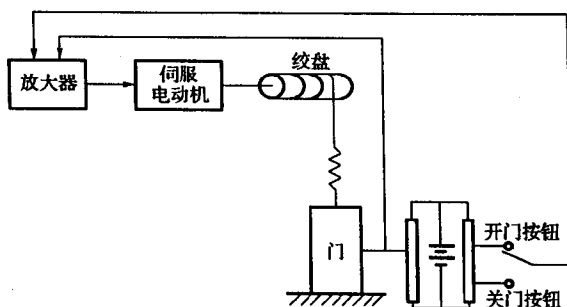


图 1-9 仓库大门自动控制系统

解 当按下开门按钮时,电位器桥式测量电路的偏差电压经过电压放大器放大后,驱动伺服电动机带动纹盘转动,将大门向上提起,与此同时,和大门连在一起的电刷也向上移动。直到桥式测量电路达到平衡,电动机停止转动,大门达到开启位置。反之当按下关门按钮时,电动机带动纹盘使大门关闭,从而实现了远距离自动控制大门开闭。控制系统方框图如图 1-10 所示。

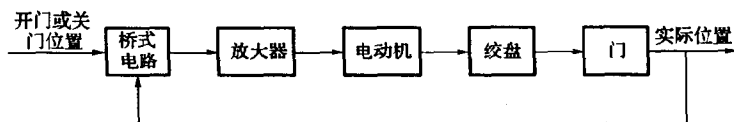


图 1-10 仓库大门自动控制系统方框图

【例 5】 用方框图表示司机沿着给定路线行驶时观察道路正确驾驶的反馈过程。

解 司机根据眼睛观察到的汽车行驶路线及车的前进方向,估计汽车的前进路线。再由实际道路与估计的前进路线的差指挥手来操纵方向盘,以使汽车正确地沿道路前进。其方框图如图 1-11 所示。

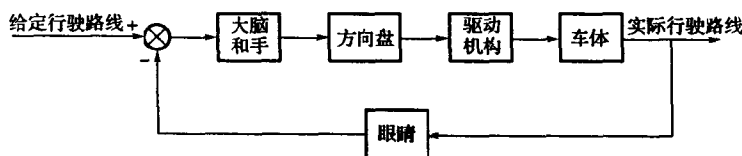


图 1-11 驾驶过程方框图

【例 6】 一个位置自动控制系统如图 1-12 所示,试分析系统的工作原理,画出系统的方框图。

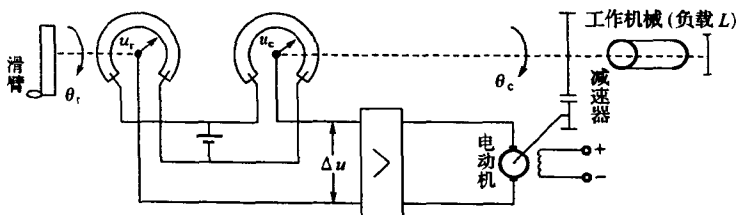


图 1-12 位置自动控制系统原理图

解 该系统的作用是使负载 L (工作机械)的角位移 θ_c 随给定角度 θ_i 的变化而变化,即要求被控制量 θ_c 复现控制量 θ_i 。

指令电位器和反馈电位器组成的桥式电路是测量比较环节。其作用就是测量控制量——输入角度 θ_i 和被控制量——输出角度 θ_c , 变成电压信号 u_i 和 u_c 并相减, 产生偏差电压 $\Delta u = u_i - u_c$ 。由两个电位器构成的桥式电路的原理图如图 1-13 所示。