



国防特色教材·兵器科学与技术



火炮控制系统及原理

HUOPAO KONGZHI XITONG JI YUANLI

张彦斌 主 编 张 宁 副主编

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

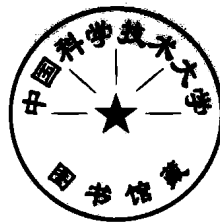
北京航空航天大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

特色教材·兵器科学与技术

火炮控制系统及原理

张彦斌 主 编
张 宁 副主编



北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社 哈尔滨工程大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了火炮控制系统的组成和工作原理。火炮控制系统是自动控制系统的具体应用,本书的编写注重自动控制理论与火炮控制系统工程实践的结合,重点介绍了具有代表性火炮控制系统的组成、构造和工作原理,同时对数字控制系统在火炮控制系统中的应用进行了介绍。

本书可作为高等院校兵器科学与技术学科相关专业的教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

火炮控制系统及原理/张彦斌主编. —北京:北京理工大学出版社,2009. 12

国防特色教材. 兵器科学与技术

ISBN 978-7-5640-2898-5

I. 火… II. 张… III. ①火炮-控制系统-高等学校-教材②火炮-理论-高等学校-教材 IV. TJ3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 197029 号

火炮控制系统及原理

张彦斌 主编

责任编辑 王玲玲

*

北京理工大学出版社出版发行

北京市海淀区中关村南大街5号(100081) 发行部电话:010-68944990 传真:010-68944450

<http://www.bitpress.com.cn>

北京圣瑞伦印刷厂印刷 全国各地新华书店经销

*

开本:787毫米×960毫米 1/16 印张:13.75 字数:294千字

2009年12月第1版 2009年12月第1次印刷 印数:1~3000册

ISBN 978-7-5640-2898-5 定价:45.00元

前 言

本书是根据国防科技工业教材规划,按照兵器科学与技术专业人才培养课程标准的编写要求编写的。本书主要介绍火炮控制系统的主要相关技术,特别是结合我国火炮装备的实际,论述了火炮控制系统的结构特点、工作原理和基本应用。本教材的编写既考虑到当代火炮控制系统的高新技术比重,以适应国防现代化建设的需要,又兼顾我国目前武器装备的技术现状及对培养国防科技工业专门人才的特殊要求。

本书的编写注重自动控制理论与工程实际的结合,重点对火炮控制系统的应用技术加以介绍。火炮控制系统的原理与器件范围很广,本书着重介绍了典型火炮控制系统的工作原理和常用器件原理。根据火炮控制系统的基本构成,全书共分为7章对火炮控制系统的基本要素进行了介绍。第1章自动控制系统基本原理,介绍了自动控制系统基本原理、研究方法和控制系统基本构成;第2章火炮控制系统的测量装置,介绍了自整角机、受信仪的构造和基本原理;第3章信号转换与处理电路,介绍了目前具有代表性的火炮信号转换与处理电路;第4章功率放大装置,介绍了交磁电机放大机、液压放大器等;第5章执行电机与测速电机,介绍了伺服电机与液压马达等;第6章火炮控制系统的附属装置,介绍了与火炮控制系统工作紧密相关的机构,以体现火炮控制系统的完整性;第7章火炮控制系统工作概况,概括地介绍了具有代表性的模拟式和数字式火炮控制系统的完整工作情况,目的是使读者在了解火炮控制系统基本组成的基础上,对火炮控制系统有一个总体的概念。考虑到工程实际的需要,最后在附录中对火炮控制系统主要的试验与验收方法进行了介绍。

在本书编写时充分考虑学科知识结构,兼顾综合知识需求与知识认知规律,力求使教材内容知识系统、结构合理、概念准确、通俗易懂,既可满足院校相关专业教学的需要,又可供有关技术人员和管理人员学习参考。

本书第1章由张彦斌编写,第2章由郭德卿、房立清编写,第3章由赵玉龙编写,第4章由马春庭、郭德卿、张宁编写,第5章由马春庭、张宁编写,第6章由张宁编写,第7章由张彦斌、蒋有才编写,附录部分由薛德庆、张彦斌编写。张彦斌担任主编并负责全书的统稿工作,张宁任副主编。

全书在编写过程中,参考了有关技术专著、院校的教材以及有关单位的技术资料。对此,编者对所参考文献的作者表示衷心的感谢。

因编者水平有限,书中难免有错漏及不妥之处,恳请读者提出宝贵意见,以便再版时修正。

编 者

目 录

第 1 章 自动控制系统基本原理	1
1.1 自动控制基本方式	1
1.1.1 开环控制与开环控制系统	2
1.1.2 闭环控制与闭环控制系统	2
1.1.3 开环系统与闭环系统的比较	3
1.2 闭环控制系统组成及工作原理	4
1.2.1 闭环控制系统的基本组成	4
1.2.2 闭环控制系统工作原理	6
1.3 自动控制系统研究方法	9
1.3.1 自动控制系统的研究方法概述	9
1.3.2 典型控制信号	10
1.3.3 自动控制系统的过渡过程	13
1.3.4 自动控制系统的动特性和静特性	14
1.4 对自动控制系统的基本要求	17
1.5 火炮控制系统的基本组成及原理	19
1.5.1 高炮随动系统基本组成	19
1.5.2 随动系统基本工作原理	20
第 2 章 火炮控制系统的测量装置	22
2.1 自整角机概述	22
2.2 力矩式自整角机	24
2.2.1 力矩式自整角机的工作原理	24
2.2.2 力矩式自整角机的运行特性和性能指标	28
2.3 控制式自整角机	30
2.3.1 控制式自整角机的工作原理	30
2.3.2 控制式自整角机的运行特性和性能指标	39
2.4 数字式测角装置	41
2.4.1 数字/自整角机转换器	41
2.4.2 自整角机/数字转换器	45

2.5	控制式自整角双通道系统工作原理	49
2.5.1	单读数电路工作原理	50
2.5.2	双读数电路工作原理	52
2.6	数字式双通道测角系统工作原理	55
2.6.1	粗精双通道测角系统的构成及测角原理	55
2.6.2	粗精组合纠错	56
2.6.3	SDC 与计算机的接口电路	57
第3章	信号转换与处理电路	60
3.1	信号选择与综合电路	60
3.1.1	电子管开关型	60
3.1.2	机械电子型	62
3.1.3	电子电路控制型	65
3.2	调制与解调电路	67
3.2.1	调制电路	67
3.2.2	解调电路	73
3.3	功率放大电路	77
3.3.1	电子管功率放大电路	77
3.3.2	电子管推挽功率放大电路	79
3.3.3	晶体管功率放大电路	80
3.4	其他电路	81
3.4.1	前馈信号生成器	81
3.4.2	变阶电路	82
3.4.3	校正电路	84
第4章	功率放大装置	88
4.1	交磁电机放大机结构和工作原理	88
4.1.1	交磁电机放大机结构	88
4.1.2	工作原理	89
4.2	交磁电机放大机运行特性	91
4.2.1	功率放大系数	91
4.2.2	空载特性	91
4.2.3	外特性	92
4.2.4	动态特性和传递函数	93

4.3 交磁电机放大机的应用	94
4.3.1 选用的基本原则	94
4.3.2 调整和使用	95
4.3.3 交磁电机放大机在高炮随动系统的应用	96
4.4 可控硅放大电路	97
4.4.1 概述	97
4.4.2 基本结构	97
4.4.3 工作原理	98
4.4.4 伏安特性	99
4.4.5 主要参数	100
4.4.6 可控硅的基本应用电路	101
4.4.7 可控硅在火炮控制系统中的应用	104
4.5 液压传动(拖动)基本原理	106
4.5.1 液压泵和液压马达的定义	107
4.5.2 液压传动的两个基本概念	108
4.5.3 基本关系式	110
4.6 液压放大器	115
4.6.1 液压传动器概述	115
4.6.2 液压放大器	116
第5章 执行电机与测速电机	121
5.1 直流伺服电动机结构与工作原理	121
5.1.1 直流电机的基本结构	122
5.1.2 直流伺服电动机工作原理	124
5.2 电磁转矩与电枢反电势	126
5.2.1 电磁转矩	126
5.2.2 电枢反电势	127
5.2.3 电压平衡方程式与转矩平衡方程式	128
5.3 直流伺服电动机的静态特性	129
5.4 直流伺服电动机在过渡过程中的工作状态	132
5.4.1 发电机工作状态	132
5.4.2 反接制动工作状态	133
5.4.3 能耗制动状态	133
5.5 直流伺服电动机动态特性	134

5.6	直流伺服电动机使用	137
5.6.1	直流伺服电动机的主要特点	137
5.6.2	主要技术数据	137
5.6.3	使用中应注意的几个问题	138
5.6.4	执行电机在火炮控制系统的应用	138
5.7	测速发电机	140
5.7.1	直流测速发电机输出特性	141
5.7.2	测速发电机在火炮控制系统的应用	141
5.8	液压泵和液压马达	142
5.8.1	液压泵的用途	142
5.8.2	液压泵的构造与工作原理	143
5.8.3	液压马达	146
第6章	火炮控制系统的附属装置	151
6.1	半自动瞄准仪	151
6.1.1	电位计式半自动瞄准仪	151
6.1.2	操纵杆式半自动瞄准仪	153
6.2	零位指示器	155
6.3	直流电源	156
6.3.1	硒整流器	156
6.3.2	硅整流器	157
6.4	火炮射界范围控制装置	158
6.4.1	射角限制器	158
6.4.2	危界停射器	161
6.4.3	大误差停射器	161
6.5	中央配电箱及连传信仪	163
6.6	射击延时电路	164
6.7	初速测量装置	165
第7章	火炮控制系统工作原理	167
7.1	模拟随动系统工作原理	167
7.1.1	自动瞄准时的工作过程(图 7-1)	167
7.1.2	半自动瞄准时的工作过程(图 7-2)	168
7.1.3	人工对针瞄准工作过程	169

7.2 数字随动系统工作原理	170
7.2.1 火炮数字随动系统的测量装置	170
7.2.2 火炮数字随动系统的数据处理装置	171
7.2.3 火炮数字随动系统的功率放大装置和执行机构	174
7.2.4 数字高炮随动系统工作原理	176
附录 A 火炮控制系统的试验与验收方法	178
A.1 火炮控制系统系统部分部件的主要实验(试验)	178
A.2 控制系统性能指标的测定	183
A.3 火炮控制系统的试验	185
附录 B 继电器与接触器	190
B.1 继电器	190
B.2 接触器	196
附录 C 控制电机型号命名方法及产品名称代号	197
参考文献	210

第1章 自动控制系统基本原理

火炮控制系统是自动控制在武器技术领域的具体应用。自动控制在工业、农业、国防和科学技术的现代化中起着重要的作用,并在国民经济和国防建设的各个领域得到了广泛应用。比如发电站的电压、频率的自动控制,机床的自动控制,锅炉设备中蒸汽压力的自动调节,炼钢炉温度的自动控制,飞机的自动驾驶,火炮的自动瞄准以及导弹自动跟踪目标等都是自动控制技术的应用。

自动控制技术的应用,不仅使生产过程实现了自动化,极大地提高了劳动生产效率,而且减轻了人们的劳动强度,这在采矿工业、冶金工业、机械工业和化学工业等部门尤为明显。同时,自动控制又可使工作具有高度的准确性,如自动化生产线、自动加工中心等,大大地提高了产品的质量和数量;在军事应用领域,可以显著提高武器的命中率和战斗力。由于人的生理条件的限制,对于某些要求工作准确度高、动作极迅速的操作,是不能单靠人手来完成的。此外,在某些人们不能直接参与工作的场合就更离不开自动控制技术,如原子能的生产、火箭或导弹的制导等。因此,自动控制成为实现工业现代化、农业现代化、科学技术现代化和国防现代化所必不可少的一门技术。

1.1 自动控制基本方式

所谓自动控制是指在没有人直接参与的情况下,利用控制器(又称自动控制装置)使一装置的工作过程或工作机械(称为被控对象)的某一物理量或工作状态自动地、准确地按照预期的规律运行或变化。例如火炮根据雷达指挥仪传来的信息,能够自动地改变方位角和俯仰角,随时跟踪目标进行瞄准。程序控制机床能够按预先设定的工艺程序自动地进刀切削,加工出预期的几何形状。电弧炼钢炉的电极能自动地跟随钢水的液面做上下移动,以便与液面保持一定距离。所有这些自动控制系统的例子,尽管它们的结构和功能各不同,但可以发现它们有共同的规律,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规律变化,这就是一个控制系统所要解决的最基本的问题。如果将被控对象的某些物理量或工作状态称为被控量,而将要求这些物理量所应保持的预定规律称作给定值或参考输入,则自动控制的任务又可概括为:使被控对象的被控量等于给定值。

自动控制的实现要通过自动控制系统来完成,自动控制系统是指能够对被控对象的工作状态进行自动控制的系统。它一般由控制器和被控对象组成。被控对象是指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程;控制装置则是指对被控对象起控制作用的设备总体。

根据自动控制系统有无反馈作用,可以分为两类自动控制方式,即开环控制和闭环控制。

1.1.1 开环控制与开环控制系统

所谓开环控制是指控制器与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制方式。相应的控制系统称为开环控制系统,即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的控制系统。图 1-1 为一个开环速度控制系统。它根据控制信号的大小和方向来控制负载转速的大小和方向。原理很简单,控制信号通过放大器放大,输出电流给伺服阀,伺服阀就提供一定流量给液压马达带动负载以一定的转速运动。这个系统对被控制量(负载转速)不进行任何检测,由于没有反馈,因此也无须跟控制信号进行比较,以产生偏差信号来对系统进行再控制,它仅是根据控制信号来对负载进行控制的。因此,开环控制系统的精度主要取决于系统的校准精度,取决于在工作过程中保持校准值以及组成系统的元件特性和参数值的稳定程度。

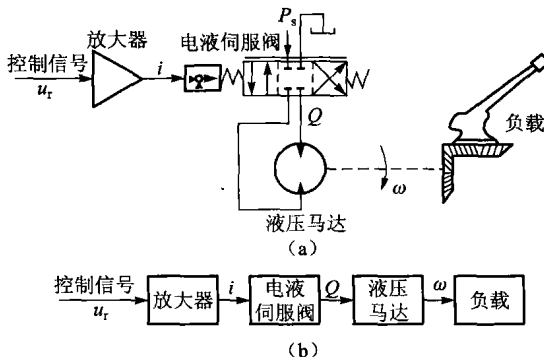


图 1-1 开环速度控制系统

(a) 系统原理图;(b) 系统方块图

如果系统不存在内部扰动和外部扰动,且元件参数比较稳定,开环系统是比较简单并且可以保证足够精度的。但当系统存在扰动时,如果被控制的输出量偏离给定量,开环系统就没有纠正能力了。图 1-1 所示的系统当负载力矩增加时,由于阀的流量随负载压力的增加而减小,以及液压系统内漏损增加等原因,就会造成液压马达转速的降低。因为没有反馈比较,就无法自动校正输出量至给定值,因此使开环系统精度降低。为了对其进行补偿就必须借助人工改变输入量。

1.1.2 闭环控制与闭环控制系统

所谓闭环控制(又称反馈控制)是指通过反馈装置将被控制量的值测量出来,反馈到输入

端,与给定值(期望值)进行比较,按偏差产生控制作用,以减少或消除偏差的控制方式。相应的控制系统称为闭环控制系统或反馈控制系统。即系统的输出端与输入端之间存在反馈回路,输出量对控制作用有直接影响的系统。或者说“闭环”的含意,就是应用反馈作用来减小系统的误差。如果对图 1-1 开环控制系统引入反馈回路,即用测速发电机直接检测被控制量(负载转速),然后反馈到输入端就构成了闭环控制系统,如图 1-2 所示。

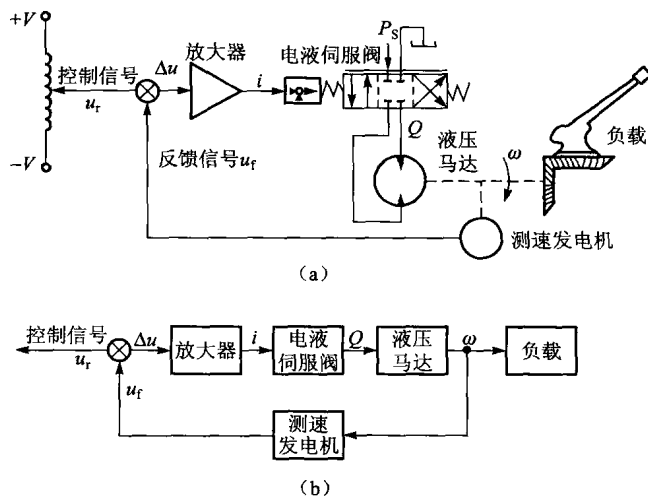


图 1-2 闭环速度控制系统

(a) 系统原理图;(b) 系统方块图

闭环控制系统突出的优点是精度高,不管什么干扰只要被控制量的实际值偏离给定值,闭环控制就会产生控制作用来减少这一偏差。

但是,闭环系统也有它的缺点。由于闭环系统是以偏差消除误差的,即系统要工作就必须有偏差存在,因此这类系统的精度会受到系统特点的制约,也就是说这类系统有其自身的矛盾。当然,通过适当措施可以使误差减到极小。同时,由于组成系统的元件的惯性、传动链的间隙等因素的存在,如果配合不当,将会引起反馈控制系统的振荡,从而使系统不能稳定工作。所以,精度和稳定性之间的矛盾始终是闭环系统存在的主要矛盾。

1.1.3 开环系统与闭环系统的比较

闭环系统的优点是采用了反馈,因此对外扰动和系统内参数的变化引起的偏差能够自动地纠正。这样就可以采用精度不太高而成本比较低的元件组成一个精确的控制系统。而开环系统却相反,因为没有反馈,故没有纠正偏差的能力,外扰动和系统内参数的变化将引起系统的精度降低。

从稳定性的角度看,开环系统比较容易建造,结构也比较简单,因为开环系统不存在稳定性问题。而闭环系统不然,稳定性始终是一个重要问题。因为参数如果选得不适当,将会造成系统振荡,甚至使系统完全失去控制。

应当指出,如果系统的输入量能预先知道,并且不存在外部扰动时,最好采用开环控制。如果存在无法预计的扰动,或系统中元件参数不稳定时,采用闭环控制的优点就显得特别突出。当对整个系统的性能要求比较高时,为了解决闭环控制时精度和稳定性之间存在的矛盾,往往将开环和闭环结合在一起应用,即采用复合控制系统是比较适宜的。

通常,自动控制理论主要研究闭环控制系统,即着重研究实现反馈控制的理论和方法。

1.2 闭环控制系统组成及工作原理

1.2.1 闭环控制系统的基本组成

根据控制对象和使用元件不同,自动控制系统具有各种不同的形式,但对于一个闭环控制系统来说,不管其结构多么复杂,其用途多种多样,它都是由一些具有不同职能的基本元件所组成。图 1-3 所示为一个典型的反馈控制系统,它表示了这些元件在系统中的位置及其相互间的联系。作为一个典型反馈控制系统,应该包括检测偏差所必需的反馈元件、控制元件、比较元件以及用以纠正偏差所必需的放大变换元件和执行元件等。

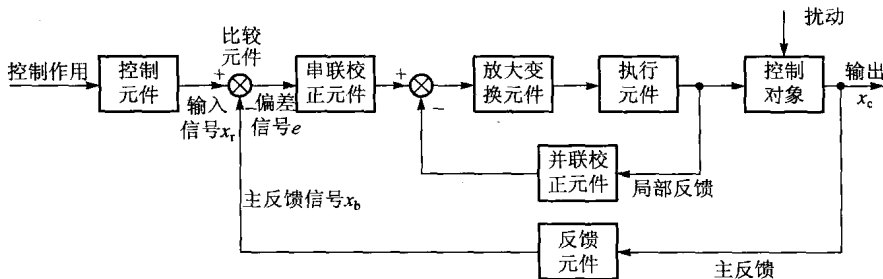


图 1-3 典型反馈控制系统方块图

控制元件:主要用于产生控制信号。引起控制信号变化的原因则称为控制作用。

反馈元件(测量元件):它产生与被控制量有一定函数关系的反馈信号,这种反馈信号可以是被控制量本身,也可以是它的函数或导数。即用来测量被控量并将其转换成与控制量同一物理量且反馈到输入端的元件,也称敏感元件。测量元件常常把非电量(位移、温度、压力等)转换成相应电量。测量元件的精度直接影响系统的精度。

比较元件:它是用来比较控制信号和反馈信号并产生反映两者差值的偏差信号的元件。

通常测量与比较由同一装置完成,统称为误差检测器。

放大变换元件:是指把偏差信号放大并进行能量形式(电气、机械、液压)的转换使之达到足够的幅值和功率的元件。

执行元件:它是根据控制信号的运动规律直接对控制对象进行操作的元件。常作为执行元件的有液压马达和他激直流电机等。

控制对象:简称对象。就是控制系统所要操作的对象,即负载。它的输出量即为系统的被控制量。

以上是构成反馈控制系统的最基本的不可缺少的部分。此外,还有:

校正元件:或称校正装置。它是为了改善系统的控制性能而加到系统里的。串联方式接在系统前向通路内的校正装置称为串联校正装置。接成反馈形式的校正装置称为并联校正装置(或称为局部反馈)。

能量元件:是指系统中放大元件、执行元件等所需的电源。

常用的各种元件如表 1-1 所列。

表 1-1 常用的各种元件

功能	元 件 名 称
测量元件	电位计、自整角机、旋转变压器、热电偶、各类传感器
比较元件	电位计、自整角机、旋转变压器
放大元件	晶体管放大器、电子管放大器、可控硅放大器、磁放大器、交磁电机放大机
变换元件	相敏检波器、极性调制器
执行元件	直流伺服电机、交流伺服电机、液压马达
校正元件	测速电桥、测速电机、无源网络、有源网络
能源元件	直流电源、交流电源

系统中的名词术语:

输入信号(又称输入量、控制量或给定量):它是控制输出量变化规律的信号。而输入量则又泛指输入到控制系统中的信号,如扰动信号,也包括给定信号。

输出信号(又称输出量、被控制量或被调整量):它的变化规律是要加以控制的,应保持与输入信号之间有一定的函数关系。

反馈信号(或称反馈):从系统(或元件)输出端取出信号,经过变换后加到系统(或元件)输入端,即为反馈信号。当它与输入信号符号相同,即反馈结果有利于加强输入信号的作用时叫正反馈。反之,当它与输入信号符号相反,抵消输入信号的作用时叫负反馈。直接取自系统最终输出端的反馈叫主反馈。主反馈一定是负反馈,否则偏差越来越大,直至使系统失去控制。除主反馈外,有的系统还有局部反馈,这主要是用来对系统进行校正、补偿或线性化而加入的。

偏差信号(或称偏差):它是控制信号与主反馈信号之差。有时也称为作用误差。

误差信号(或称误差):它是指系统输出量的实际值与希望值之差。在很多情况下,希望值就是系统的输入量。

需要注意,误差和偏差不是同一概念。只有在全反馈系统中,误差才等于偏差。

扰动信号(又称扰动或干扰):除控制信号以外,对系统输出量产生影响的因素都叫扰动。如果扰动产生在系统内部,称为内扰;产生在系统外部,则称为外扰。外扰动也是系统的一种输入量。

1.2.2 闭环控制系统工作原理

分析一个自动控制系统时,首先明确如下的问题,就能比较容易地了解它的全貌。

- ① 受控对象是什么?被控量是什么?作用在对象上的干扰有哪些?
- ② 操纵哪个机构可以改变被控量?
- ③ 有哪些测量元件?测量的是被控量还是干扰量?
- ④ 给定值或参考输入由哪个装置提供?
- ⑤ 如何实现各信号的综合计算和判断偏差?
- ⑥ 控制作用通过什么部件去执行?

下面举例说明闭环控制系统的工作原理。

1. 随动系统(伺服系统)

这种系统的控制作用是时间的未知函数,即给定量的变化规律是事先不能确定的,而输出量能够准确、迅速地复现给定量(即输入量)的变化,这样的系统称为随动系统或伺服系统。

随动系统在工业、交通和国防等部门有着极为广泛的应用,如机床的自动控制、舰船的操舵系统、火炮自动控制系统和雷达天线控制系统等。

图1-4所示为雷达天线方位角随动系统。控制的任务是天线方位角按照手柄转动 θ_r 的变化规律而旋转。

首先明确如下问题。

- ① 受控对象:天线方位角。
- ② 被控量:角位置 θ_c 。
- ③ 给定值:手柄转角 θ_r 。
- ④ 测量元件:通过一对自整角机比较元件(自整角发送机—自整角变压器)得到与角差 $(\theta_c - \theta_r)$ 成比例的方位角电压误差信号。
- ⑤ 执行元件:伺服电机、减速装置。

系统的工作原理:当手柄转动时,若 θ_c 不等于 θ_r ,自整角变压器输出同角差成比例的电压,

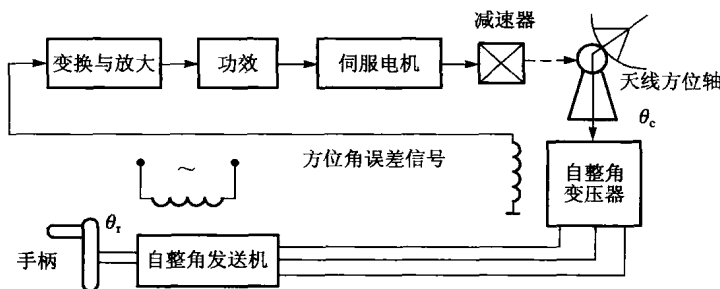


图 1-4 雷达天线方位角随动系统

它经变换和放大驱动伺服电动机,使天线朝着角差减小的方向转动,直至 $\theta_c = \theta_r$ 。若手柄连续转动,则天线方位按照 θ_r 的变化规律而旋转。该系统的方框图如图 1-5 所示。

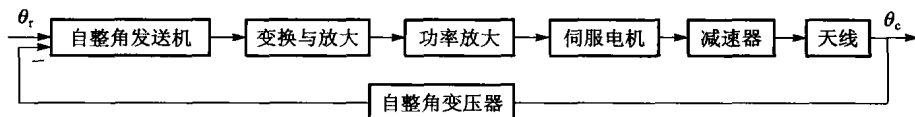


图 1-5 雷达天线方位角随动系统方框图

随动系统突出的特点是:受控对象比较简单,相当于执行机构直接拖动一个纯机械载荷;指令信号根据工作需要不断变化,且事先是无法完全确定的;可以用功率较小的指令信号操纵较大的负载(大功率的功放装置和电机);可以进行远距离控制(自整角发送机与自整角变压器只是电路上有连接关系,二者可以相隔很远)。

2. 恒值控制系统(自动稳定系统)

当给定量是一个恒值时,称为恒值控制系统,或称自动稳定系统。它的任务是保持被控量等于一个给定的常数,如各种反馈式的稳压、稳流、稳速和温度的自动调节装置;接收设备中的自动增益控制、自动频率微调电路以及各种天线座的稳定平台系统等,都属于恒值调节系统。这类系统的主要功能是能消除各种使被控量偏离该给定常数的扰动,控制的任务就是在发生扰动时尽量使被控量恢复到给定值。如果不得已而残留一些误差,则误差应尽量小。图 1-6 是水池水位自动控制系统示意图。控制的任务是保持水池水位恒定。

首先明确下列问题。

- ① 受控对象:水池。
- ② 被控量:水位。
- ③ 干扰:出水。
- ④ 测量元件:连杆、浮子、电位计,将实际水位转变为相应电压信号。