

晶闸管 直流调速系统

孔凡才 主编

北京科学技术出版社

内 容 简 介

本书主要叙述晶闸管直流调速系统的工作原理、自动调节过程、自动控制理论基础、系统性能分析、调速系统的校正和工程计算、实例分析和系统调试。

本书以系统为主。调节原理部分结合系统的性能分析来讲述,着重叙述物理过程和分析方法。本书的特点是原理和系统相结合,理论与工程实际相结合。每章均有指导复习的小结、思考题和习题,并附有实际应用的系统线路图作为读图练习。

本书可作大专教材或大专院校教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

晶闸管直流调速系统

孔 凡 才 主 编



北京科学技术出版社

(北京西外南路19号)

河北省衡水红旗印刷厂印刷

北京市新华书店发行

各地新华书店经售

开本: 787×1092毫米1/16 印张: 18.75 字数: 446千字

1985年4月第一版 1985年4月第一次印刷

印数 1-20000 定价: 3.50 元

统一书号: 15274·014

前 言

本书以不可逆直流调速系统为主,着重叙述调速系统的工作原理、自动调节过程、控制理论基础、系统性能分析、调速系统的校正和工程计算。在叙述中,主要讲述:分析思路→分析方法→主要结论→物理意义→实际应用。尽量避免烦琐的数学推导(有的推导列在附录中)。

调节原理部分,比较抽象,学生不易接受,主要是不知用于何处和怎样具体应用。因此本书将调节原理和系统的性能分析结合起来,即将调节原理作为分析系统性能的理论基础,而将系统的性能分析作为调节原理的应用举例。本书期望能做到原理与系统相结合,理论和实际相结合。

由于可逆系统和不可逆系统在分析方法上基本上是相同的。因此本书以不可逆系统为主,对可逆系统只作原理简介(最后一章)。

本书每章都有指导复习的小结、思考题和习题。习题尽量采用生产实际中的问题,并安排了实例读图练习。安排习题时,还有意识地将后继内容列为习题,以期读者通过求解习题把前后内容连贯起来。

为使读者对实际系统的分析有一个完整的认识,本书增加了实例分析和系统调试(第8章)。

本课程内容涉及到高等数学、电工基础、晶体管模拟电路、数字电路、电机学和晶闸管变流技术等多门课程的基础知识,因此在学习本课程时,要注意基础知识的复习和综合运用。

本书第1、2、3章为不可逆调速系统的工作原理和静特性的分析方法;

第4、5、6章为控制理论基础(频率法);

第7章为工程计算和参数选择;

第8章为实例分析和系统调试;

第9章为可逆系统工作原理简介。

为了适应各种教学计划的需要,可全部讲述,也可选取部分章节,使用本书时可作如下一些选择:

(1) 1~9章(全部); (2) 1~8章; (3) 1~7章; (4) 1、2、3、8、9章; (5) 1、2、3、8章; (6) 4、5、6、7章。

对第7章,也可选择其中一种计算方法。第八章也可作学生阅读材料。

本书可作大专、职工大学、业余大学教材和大专院校教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

本书由孔凡才同志主编,杨恬南同志参加了第4、5、6章的部分编写工作。

本书由上海工业大学陈伯时副教授和河北工学院沈安俊副教授审稿。他们在审阅中提出许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。在编写本书过程中,得到有关学校、工厂及研究所的大力支持和帮助,在此一并表示深切的谢意。

限于编者水平,书中难免存在错误和不妥之处,殷切期望广大读者不吝指正。

编者 1983年9月于上海

目 录

第1章 晶闸管直流调速系统概述 1

1.1 引言 1

1.2 晶闸管直流调速系统的调速特点 2

1.2.1 直流电动机的调速特点 2

1.2.2 晶闸管整流电路的特点 5

1.2.3 晶闸管整流供电的直流电动机机械特性 7

1.3 晶闸管直流调速系统的分类 10

1.3.1 开环控制系统和闭环控制系统 10

1.3.2 有静差调速系统和无静差调速系统 12

1.3.3 其他分类方法 13

1.4 自动调速系统的组成 13

1.5 自动调速系统的技术指标 14

1.5.1 静态指标 14

1.5.2 动态指标 17

1.6 自动调速系统的研究方法 19

第2章 单闭环有静差直流调速系统 21

2.1 反馈控制系统 21

2.1.1 反馈环节的作用 21

2.1.2 反馈量和反馈方式的选择 21

2.2 静态结构图和静态特性方程的求取 25

2.2.1 静态结构图 25

2.2.2 自动调速系统静态特性方程的求取 29

2.2.3 对闭环系统静态特性方程的分析 30

2.2.4 增设电流截止负反馈环节后的静态特性分析 32

2.3 具有电压负反馈、电流正反馈及电流截止负反馈的调速系统 36

2.3.1 系统的组成 36

2.3.2 静态结构图和静态特性方程 37

2.4 小功率有静差直流调速系统实例分

析 39

2.4.1 技术数据、技术指标和结构特点 39

2.4.2 定性分析 39

2.4.3 静特性的定量估算 46

2.4.4 系统的调试与整定 46

第3章 无静差调速系统与双闭环调速系统 52

3.1 无静差调速系统 52

3.1.1 积分环节的作用和特点 52

3.1.2 调速系统无静差的实现 54

3.1.3 比例—积分调节器 55

3.1.4 比例—积分调节器在调速系统中的应用 56

3.2 PI调节器的实用线路 57

3.2.1 PI调节器零点飘移的抑制 57

3.2.2 调节器的输入限幅与输入滤波电路 57

3.2.3 调节器的输出限幅电路 58

3.2.4 调节器的输出功率放大电路 59

3.2.5 比例系数可调的PI调节器电路 60

3.2.6 积分时间常数可调的PI调节器电路 61

3.2.7 实用线路举例 62

3.3 速度与电流双闭环调速系统 62

3.3.1 系统的组成 63

3.3.2 结构特点和两个调节器的作用 64

3.3.3 突加给定时的起动过程 65

3.3.4 突加负载时的工作过程 68

3.3.5 双闭环调速系统的抗扰能力 68

3.3.6 双闭环调速系统的静特性 70

3.3.7 典型线路举例 70

3.4 调压调磁直流调速系统 70

3.4.1 概述 70

3.4.2 调压调磁调速系统的激磁控制方式 71

3.4.3 非独立控制激磁的调压调磁调速系统的工作原理	72	关系	149
第4章 自动调速系统的数学模型	80	5.2.3 自动调速系统的稳态误差	151
4.1 系统的微分方程	80	5.2.4 稳态误差与开环对数频率特性(Bode图)间的关系	152
4.1.1 系统微分方程式的建立	80	5.3 自动调速系统动态性能分析	153
4.1.2 系统微分方程建立举例	80	5.3.1 求取动态指标的一般方法	153
4.2 传递函数和动态结构图	82	5.3.2 二阶系统的跟随动态性能分析	156
4.2.1 传递函数的概念	82	5.3.3 由开环频率特性分析系统的动态性能	159
4.2.2 动态结构图	83	5.3.4 由闭环频率特性分析系统的动态性能	161
4.2.3 传递函数的求取方法	84	5.3.5 综述	163
4.3 典型环节及其传递函数	87	5.3.6 二阶系统的抗扰性能	164
4.3.1 比例环节	87	第6章 自动控制系统的校正	171
4.3.2 积分环节	89	6.1 校正装置	171
4.3.3 惯性环节	89	6.2 串联校正	173
4.3.4 微分环节	92	6.2.1 用(PD)校正装置进行串联校正(相位超前校正)	173
4.3.5 振荡环节	94	6.2.2 用(PI)校正装置进行串联校正(相位滞后校正)	174
4.3.6 延迟环节	98	6.2.3 用(PID)校正装置进行串联校正(相位滞后—超前校正)	176
4.3.7 PI调节器	99	6.2.4 非典型系统的典型化	177
4.4 自动调速系统的结构图及其传递函数	101	6.3 反馈校正	178
4.4.1 自动调速系统的动态结构图	101	第7章 自动调速系统的计算方法	181
4.4.2 多环系统结构图的化简和传递函数的求取	103	7.1 由开环对数频率特性(Bode图)进行分析计算的方法	181
4.5 频率特性	109	7.1.1 预期对数频率特性的建立	181
4.5.1 频率特性的概念	110	7.1.2 系统固有特性的确定	182
4.5.2 频率特性的求取方法	111	7.1.3 系统固有部分的近似处理方法	185
4.5.3 频率特性的表示方法	112	7.1.4 双闭环调速系统的计算举例	186
4.5.4 典型环节的频率特性	114	7.2 自动调速系统的工程计算方法 (“最佳化”准则、 $M_r = M_{r\min}$ 准则、 $\gamma = \gamma_{\max}$ 准则)	190
4.5.5 串联环节的对数频率特性	122	7.2.1 典I和典II系统的跟随性能	190
4.5.6 系统的闭环频率特性	128	7.2.2 典I和典II系统的抗扰性能	195
第5章 自动调速系统的性能分析	133	7.2.3 工程计算举例	197
5.1 自动调速系统的稳定性分析	133	7.3 近似处理对计算结果的影响	205
5.1.1 稳定性概念	133		
5.1.2 系统稳定性与数学模型之间的关系	134		
5.1.3 稳定判据	135		
5.1.4 稳定裕量与相对稳定性	137		
5.1.5 对数频率判据	139		
5.2 自动调速系统稳态性能分析	147		
5.2.1 稳态误差	147		
5.2.2 稳态误差与系统类型、输入信号间的			

7.3.1 速度调节器(ST)饱和对起 动性能的影响.....	205	9.2 可逆拖动的四种工作状态	249
7.3.2 电动机电势 E 对电枢电流 的影响.....	206	9.2.1 有源逆变的概念	249
7.3.3 机械上的扭振对系统稳定 性的影响.....	207	9.2.2 可逆拖动的工作状态	249
7.4 关于参数选择的若干说明	207	9.3 有环流可逆调速系统	251
7.4.1 系统的固有参数	207	9.3.1 环流的形成	251
7.4.2 系统的预选参数	209	9.3.2 均衡电抗器	253
7.4.3 调节器参数	210	9.3.3 有环流可逆调速系统的工作原 理	254
第8章 直流调速系统的实例分析和系统 调试.....	216	9.4 逻辑控制的无环流可逆系统	256
8.1 直流调速系统实例的分析与计 算.....	216	9.4.1 系统的组成	256
8.1.1 本系统的主要技术性能要求	216	9.4.2 逻辑切换指令的选择	257
8.1.2 主电路	216	9.4.3 电平检测器	257
8.1.3 触发电路	225	9.4.4 逻辑判断电路	260
8.1.4 控制电路	229	9.4.5 延时电路	261
8.1.5 检测电路	234	9.4.6 逻辑保护环节	263
8.1.6 综合分析	236	9.5 错位控制无环流可逆调速系 统	263
8.2 自动调速系统的调试	237	9.5.1 错位控制原理	264
8.2.1 系统调试前的准备工作	237	9.5.2 死区的产生	266
8.2.2 控制电路检查、调试	237	9.5.3 错位无环流可逆调速系统的结 构和死区的压缩	267
8.2.3 轻载主回路通电调试	238	10 附录	270
8.2.4 负载调试	240	10.1 转速、电流和电压检测	270
8.3 维护使用及故障检查	241	10.1.1 转速的检测.....	270
8.3.1 维护使用	241	10.1.2 直流电流的检测.....	271
8.3.2 故障检查	242	10.1.3 直流电压的检测.....	273
第9章 晶闸管直流可逆自动调速系 统	245	10.2 拉普拉斯(Laplace)变换	276
9.1 晶闸管-电动机可逆调速电路的 几种形式	245	10.2.1 Laplace变换的概念.....	276
9.1.1 电枢可逆线路	245	10.2.2 Laplace变换的主要运算定 理.....	280
9.1.2 磁场可逆线路	247	10.2.3 Laplace反变换.....	284
9.1.3 电枢可逆方案与磁场可逆方案的 比较	248	10.2.4 Laplace变换应用举例.....	284
9.1.4 电枢可逆系统的几种线路	248	10.3 逆变颠覆与逆变角的限制	287
		10.4 本书符号说明	289
		10.4.1 系统参数和物理量的符号.....	289
		10.4.2 元件与装置符号.....	291
		参考书籍	291

第1章 晶闸管直流调速系统概述

内 容 提 要

本章将概括地介绍晶闸管(Thyristor)①直流调速系统的基本原理和特点,自动调速系统的基本结构和分类,自动调速系统的技术指标以及研究自动调速系统的方法。

本章是全书的概述,是学习晶闸管直流调速系统的入门与基础。

1.1 引 言

在工业、农业、交通运输和国防上,广泛应用电动机来拖动工作机械。较先进的工作机械和生产工艺,普遍要求对电动机的转速实行自动控制。即在没有人直接参与的情况下,利用控制装置使电动机按照预定的规律运行或变速。控制装置和电动机,就组成为特定的自动控制系统。由于其被控制量是电动机的转速,一般称它为自动调速系统(Automatic Speed Control System)。

自动调速系统的性能优劣,直接影响到产品的质量、产量、成本和劳动条件。因此,很早就为人们所重视。它发展迅速,经历过多次重大的变革。

在本世纪20~30年代,电动机的调速系统是由接触器和继电器所组成的断续(Chopping)控制系统。它可以实现电动机的起动、制动、正反转以及有级调速等,但调速精度不高,快速性较差,且多为手动调速。然而,它具有简单、可靠、成本低等优点。所以,在要求不高的场合至今还在大量应用。到了40年代,出现了由电机放大机-发电机-电动机(F-D)组成的连续(Continuous)控制系统。它是一种具有反馈环节的闭环控制系统,是无级调速,在调速精度和快速性方面比断续控制系统要好得多。所以在要求较高的场合获得广泛的应用。例如,大型龙门刨就采用电机放大机-发电机-电动机控制系统。在50年代,又出现了磁放大器(Magnetic Amplifier)和水银整流器(Mercury-arc rectifier)控制系统。这种系统改革了电机放大机-发电机-电动机系统中的机械旋转部分。但水银整流器的可靠性差、维护工作量大。所以,刚兴起十几年就被淘汰了。50年代末期,晶闸管元件的出现,开辟了自动调速系统的新纪元。晶闸管自动调速系统具有效率高、体积小、寿命长、反应快、控制特性好、消耗钢铁材料少等显著优点,因而获得了强大的生命力,迅速取代了其他调速系统。目前,国内已生产0.4kW~200kW的晶闸管直流调速系统的定型设计产品,晶闸管交流调速系统也取得了不少进展。70年代以后,随着数控技术的发展,还出现了高精度的数控调速系统。我国已有少数单位试制和应用。80年代,随着电子计算机和微处理机的推广应用,又出

①全称为晶体闸流管,简称晶闸管,又叫可控硅,可控硅英文缩写为SCR(Silicon-Controlled-Rectifier)。

现了由计算机(Computer)或微处理机(Microprocessor)控制的自动调速系统,并使自动调速系统的性能达到了一个新的高度。

在自动调速系统的发展过程中,自动控制理论起着十分重要的作用。控制理论是研究自动控制中的共同规律,对于各种自动控制系统都有指导意义。在对自动调速系统的动态性能进行定量分析时,尤需借助于它。晶闸管变流技术和新的控制理论相结合,正在形成自动调速系统的新的发展领域。

自动调速系统的发展方向将是:不断采用先进的电机、电器、变流装置和控制器件,向微型化、集成化和电机-控制装置一体化的方向发展;不断提高自动调速系统的标准化、系列化、通用化水平,提高系统的静态和动态精度、效率、功率因素、可靠性、经济性以及自动化的程度。大力运用新的控制理论(现代控制理论),采用电子计算机(特别是微处理机)实现速度、位置等多参量的数字控制以及组成综合自动化控制系统。

晶闸管直流调速系统,具有调速比大、精度高、动态性能好、效率高、易控制等优点,目前已比较成熟。在调速要求较高的场合,大多采用直流调速系统。因此,本书将通过晶闸管直流调速系统阐明自动调速系统的工作原理,分析其物理过程,叙述以频率特性法为主的反馈控制理论基础。并在此基础上,进一步阐述自动调速系统的分析方法和调试过程。

1.2 晶闸管直流调速系统的调速特点

1.2.1 直流电动机(Direct-Current Motor)的调速特点

1. 直流电动机的工作原理

直流电动机的激磁绕组(Field Winding)通以激磁电流(Field Current) I_L , 便产生工作磁通 ϕ 。当电枢(Armature)两端加上电压 U_d 后,便产生电枢电流 i_d , 此电流在磁场的作用下,产生电磁转矩(Electromagnetic Torque) M_d , $M_d = C_m \phi i_d$ (C_m 为转矩常量)。在电磁转矩作用下,克服摩擦(Friction)和机械负载(Load)的阻力转矩(Drag Torque) M_{fz} , 使电动机以转速 n 旋转,根据刚体转动定律有:

$$M_d - M_{fz} = J \frac{d\omega}{dt}$$

式中 J 为转动部分折算到电动机转轴上的转动惯量(Moment of Inertia), 而

$$J = m R^2 = \left(\frac{G}{g} \right) \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \frac{GD^2}{4g}$$

由于 $\omega = \frac{2\pi}{60} n$, 所以

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt}$$

于是

$$M_d - M_{fz} = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

令 $\frac{GD^2}{375} = J_G$ (转速惯量)

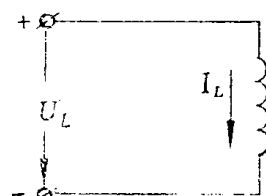
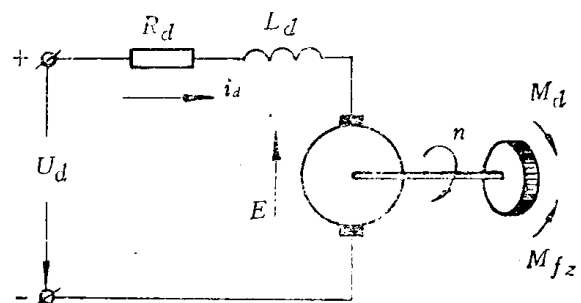


图1-1 直流电动机电路图

则上式可写成

$$M_d - M_{fz} = J_G \frac{dn}{dt} \quad (1-1)$$

式中 G ——转动部分重量(N);

D ——转动部分的等效的回转直径(m);

n ——转速(rpm);

M_d ——电磁转矩(kg·m);

M_{fz} ——折合到电动机轴上的摩擦和负载转矩(kg·m);

J_G ——转速惯量(kg·m·s²)。

当电动机转动时, 绕组在磁场中产生感生电动势 (Electromotive Force) (E.M.F) E , $E = C_e \phi n$ (C_e 为电势常量), 此时电枢回路电压方程由基尔霍夫(Kirchhoff)定律有:

$$U_d = i_d R_d + L_d \frac{di_d}{dt} + E \quad (1-2)$$

式中 R_d ——电枢电阻(Ω)(Armature Resistance);

L_d ——电枢漏磁电感(H)(Armature Leakage Inductance)。

上面所述的四个关系式构成了直流电动机内部相互联系的基本关系, 现列于下:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_d - M_{fz} = J_G \frac{dn}{dt} \end{array} \right. \quad (1-1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = i_d R_d + L \frac{di_d}{dt} + E \end{array} \right. \quad (1-2)$$

$$M_d = C_m \phi i_d \quad (1-3)$$

$$E = C_e \phi n \quad (1-4)$$

在电动机处于稳定状态(Steady-state)时, 即 $\frac{di_d}{dt} = 0$, 及 $\frac{dn}{dt} = 0$, 则上四式为

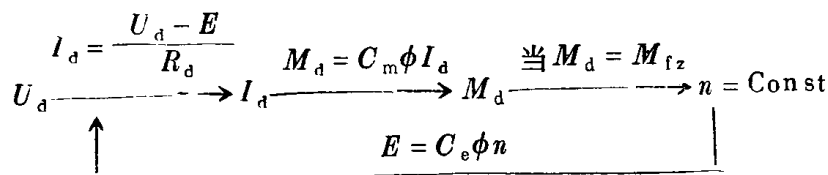
$$\left\{ \begin{array}{l} M_d = M_{fz} \end{array} \right. \quad (1-5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = I_d R_d + E \text{ 或 } I_d = \frac{U_d - E}{R_d} \end{array} \right. \quad (1-6)$$

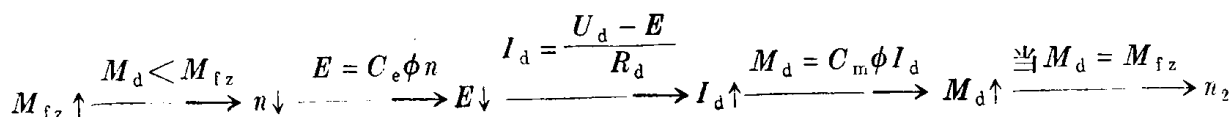
$$\left\{ \begin{array}{l} M_d = C_m \phi I_d \end{array} \right. \quad (1-7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E = C_e \phi n \text{ 或 } n = \frac{E}{C_e \phi} = \frac{U_d - I_d R_d}{C_e \phi} \end{array} \right. \quad (1-8)$$

电动机在稳态运行时, 各量间的关系可列表如下:



当电动机负载转矩 M_{fz} 发生变化时, 直流电动机内部将会自动进行调节, 以达到新的平衡状态(Balance state)。现以 M_{fz} 增加为例, 分析其自动调节过程如下:



最后当 $M_d = M_{fz}$ 时, 转速稳定在 n_2 不再下降。由式(1-8)有:

$$n = \frac{U_d - I_d R_d}{C_e \phi} = \frac{U_d}{C_e \phi} - \frac{I_d R_d}{C_e \phi} = n_0 - \Delta n \quad (1-9)$$

由以上分析可以看出, 当负载转矩 M_{fz} 增大时, 直流电动机通过转速的下降, 使反电势下降, 从而使电枢电流、电磁转矩增加, 而达到新的平衡状态。其转速降 Δn 的大小与 $I_d R_d$ 的大小有关, I_d 愈大, 则 Δn 亦愈大。见式(1-9)和图1-2。图1-2为恒压供电时电动机的机械特性①(Speed-Torque Characteristic)。

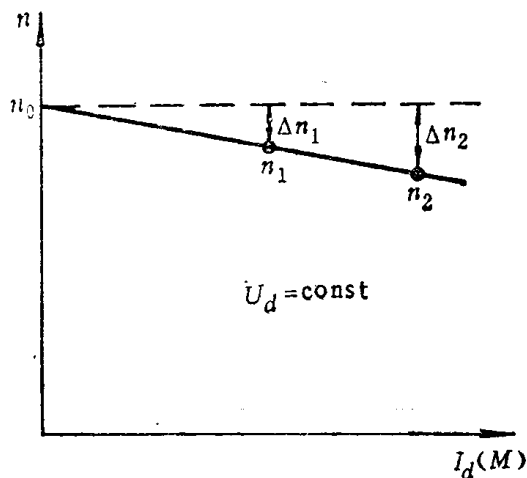


图1-2 直流电动机的机械特性

2. 直流电动机的调速方案

由公式(1-9)可见, 改变直流电动机的转速的方案可以有:

- (1) 改变电枢电压 U_d ;
- (2) 改变激磁绕组电压(Excitation Voltage) U_L , [即改变工作磁通 (Magnetic Flux) ϕ];
- (3) 改变电枢回路电阻。

这三种调速方案的特点介绍如下:

(1) 改变电枢电压 U_d , 由式(1-9)可知, 即相当改变机械特性的起始点 n_0 的大小, 而 Δn 则不受影响。在一定的负载下, 增大 U_d 即可增加转速 n , 其调速特性可见图1-3。采用改变电枢电压调速的系统称为调压调速系统。它是最常用的调速方案。

(2) 改变激磁电压 U_L , 即改变激磁电流 I_L , 从而改变工作磁通 ϕ 的调速系统称为调磁调速系统。增加 U_L 以使 ϕ 增大, 由式(1-9)可见, 转速将降低, 但电动机的工作磁通一般都接近饱和状态 (Saturation State), 所以增磁的余地是不大的。若减小 U_L 使 ϕ 减弱, 则可使转速升高。由式(1-9)可见, ϕ 减弱, n_0 与 Δn 都将增加, 这表明转速升高, 机械特性将会变软。其调速特性见图1-4。

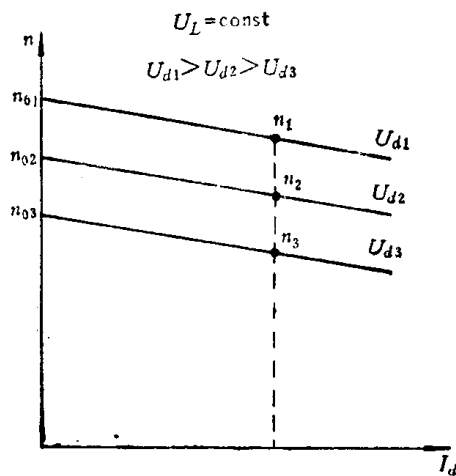


图1-3 调压调速特性

此外, 减弱磁场, 将使电动机的电磁转矩 M_d 减小, 若负载转矩不变, 则必然导致电枢电流 I_d 增加, 而 I_d 增加, 又将导致机械特性变软和发热加重, 这些都是弱磁升速的缺点。因此, 通常只在额定转速(Rated Speed)以上才采用调磁调速的方案。

(3) 改变电枢回路电阻的调速方案, 实际上是在电枢回路中串接一附加可变电阻 R , 利用电枢电流 I_d 在 R 上的压降, 使转速降低。由式(1-9)可见, 亦即以增加 Δn 的办法使转速降低, 其调速特性见图1-5。

①调速系统的机械特性一般是指转速与负载转矩间的关系, 即 $n = f(M_{fz})$ 。若略去电动机的摩擦阻力矩, 则 $M_d \approx M_{fz}$, 而 $M_d \propto I_d$ (在磁场恒定的情况下), 所以可以近似用 $n = f(I_d)$ 来代替机械特性。

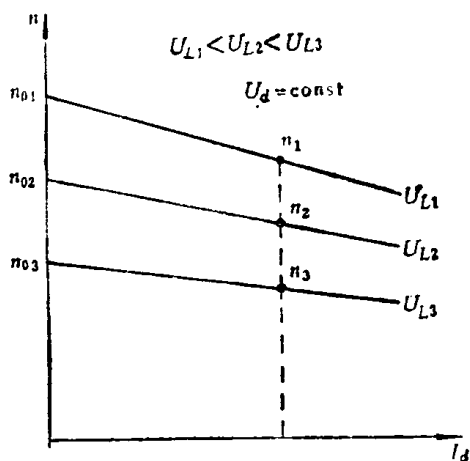


图1-4 调磁调速特性

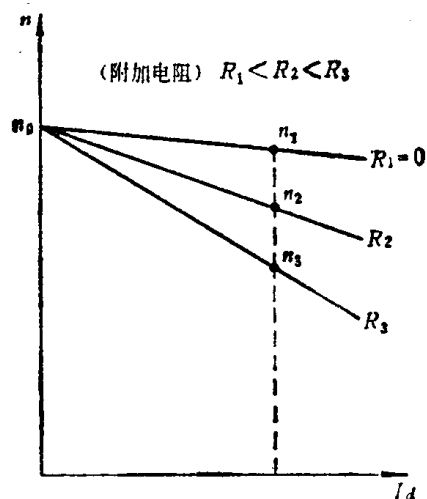


图1-5 调节电枢回路附加电阻的调速特性

这种方案的机械特性软，而且耗能多，一般较少采用。但由于它无需很多设备，在调速比不大(2:1以下)的小功率调速系统中，仍有应用。

由以上分析可知，在平衡状态，电动机的电磁转矩 M_d 的大小主要取决于负载转矩 M_{Lz} ($M_d = M_{Lz}$)，亦即电枢电流 I_d 的大小是由机械负载来决定的。电动机的理想空载转速的大小则取决于电枢电压 U_d 和工作磁通 ϕ 。

1.2.2 晶闸管整流电路的特点

1. 晶闸管元件的额定电流是用最大通态平均电流来度量的。电动机的转矩与电枢电流成正比，所以电动机的转矩也是与整流电流的平均值(Average Value)成正比的。而晶闸管元件和电动机的发热，却和整流电流的平方成正比的，亦即与整流电流的有效值(Effective Value)(RMS Value)成正比。因此，当电流断续时，导通角小，同样的平均电流，与它对应的有效值要大得多，发热也严重得多。这个特点是在选择晶闸管元件、电机容量、整流电路形式和电抗器(Reactor)时必须注意的。

2. 晶闸管整流电路的工作，使交流侧电流中含有较多的谐波成份(Harmonic Content)，对电网(line)(AC Supply)产生不利影响。因此在大、中功率整流电路的交流侧大多采用交流电抗器(串接电抗器 Series Reactor)或通过整流变压器(Rectifier Transformer)供电，以抑制谐波分量(Harmonic Component)。

3. 晶闸管元件的过载能力很小，因此不仅要限制过电流(Overcurrent)和反向过电压(Reverse Overvoltage)，而且还要限制电压上升率(Rate of Rise of Voltage) (dv/dt) 和电流上升率(di/dt)。所以晶闸管整流电路设有许多保护环节(Protective Device)，如快速熔断丝(Fast Melting Fuse)、过电流继电器(Overcurrent Relay)、阻容吸收电路(RC Snubber)、硒堆(Seleton)、或压敏电阻(Voltage-Dependent Resistor)等过电流与过电压保护装置。

4. 晶闸管直流调速系统中，采用的整流电路的形式有单相半控桥式(Single-Phase Half-Wave Bridge Rectifier)，单相全控桥式，三相半控桥式和三相全控桥式(Three-Phase Full-Wave Bridge Rectifier)等几种。三相零式电路，由于中线有较大的直流分量通过，对电网影响较大，一般较少采用。但以它为例来分析三相整流电路的共同特点，简单明了。因此在举例中往往采用三相零式电路。

现将几种常用的整流电路的有关参数列于表 1-1 中。

表 1-1-1 常用的晶闸管整流电路的参数

整流电路形式		单相半控桥	单相全控桥	三相半波(零式)	三相半控桥	三相全控桥
$\alpha = 0^\circ$ 时, 空载直 流输出电 压平均值 U_{d0}	(A)	$0.9U_2$	$0.9U_2$	$1.17U_{2\phi}$	$2.34U_{2\phi}$	$2.34U_{2\phi}$
	(B)	$\frac{1 + \cos\alpha}{2} U_{d0}$	$\frac{1 + \cos\alpha}{2} U_{d0}$	当 $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{6}$ 时, $U_{d0} \cos\alpha$ 当 $\frac{\pi}{6} < \alpha \leq \frac{5}{6}\pi$ 时, $0.577 \times U_{d0} \left[1 + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) \right]$	$\frac{1 + \cos\alpha}{2} U_{d0}$	当 $0 \leq \alpha \leq \frac{1}{3}\pi$ 时, $U_{d0} \cos\alpha$ 当 $\frac{1}{3}\pi < \alpha \leq \frac{2}{3}\pi$ 时, $U_{d0} \left[1 + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right]$
		$\frac{1 + \cos\alpha}{2} U_{d0}$	$U_{d0} \cos\alpha$	$U_{d0} \cos\alpha$	$\frac{1 + \cos\alpha}{2} U_{d0}$	$U_{d0} \cos\alpha$
$\alpha = 0^\circ$ 时 脉动电压	最低脉动频率	$2f$	$2f$	$3f$	$6f$	$6f$
	脉动系数	0.666	0.666	0.25	0.057	0.057
元件承受最大电压	(A)	$\sqrt{2} U_2$	$\sqrt{2} U_2$	$\sqrt{6} U_{2\phi}$	$\sqrt{6} U_{2\phi}$	$\sqrt{6} U_{2\phi}$
	(B)	$0 \sim \pi$	$0 \sim \pi$	$0 \sim \frac{5}{6}\pi$	$0 \sim \pi$	$0 \sim \frac{2}{3}\pi$
		$0 \sim \pi$	$0 \sim \pi/2$	$0 \sim \frac{1}{2}\pi$	$0 \sim \pi$	$0 \sim \frac{1}{2}\pi$
最大导通角		π	π	$\frac{2}{3}\pi$	$\frac{2}{3}\pi$	$\frac{2}{3}\pi$
适用场合		各项指标尚好, 晶闸管元件少, 用于小功率负载	各项指标尚好, 用于小功率可 逆系统	指标一般, 但中线直流电流大, 一般较少采用	各项指标较好, 适用不可逆中 型调速系统	各项指标好、适用中、大型调速 系统及可逆调速系统

1-2-3 晶闸管整流供电的直流电动机机械特性

晶闸管整流供电的电动机, 在电流连续时, 其机械特性基本上是直线, 当电流断续时, 其机械特性便呈非线性(nonlinear)形状, 现以三相半波晶闸管整流供电的调速系统为例来分析这两种情况。

1. 电流连续时的晶闸管直流调速系统的机械特性

当主电路中串接了足够大的平波电抗器(Filter Reactor) L_d , 而且电动机的负载电流也足够大, 主电流波形便是连续的。

由式(1-9)有

$$n = \frac{U_d - I_d R_d}{C_e \phi}$$

由晶闸管整流电路可知

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha - I_d \frac{3X_B}{2\pi} - I_d R_B - \Delta U \quad (1-10)$$

代入式(1-9)有

$$\begin{aligned} n &= \frac{1}{C_e \phi} \left(U_{d0} \cos \alpha - I_d \frac{3X_B}{2\pi} - I_d R_B - I_d R_d - \Delta U \right) \\ &= \frac{1}{C_e \phi} (U_{d0} \cos \alpha - I_d R_x - \Delta U) \end{aligned} \quad (1-11)$$

在上式中,

U_{d0} —— $\alpha = 0^\circ$ 时, 空载直流输出电压的平均值, 对三相半波整流电路 $U_{d0} = 1.17 U_{\Delta\phi}$ 。

R_x ——电枢回路总等效电阻 (Total Equivalent Resistance)。

$$R_x = \frac{3X_B}{2\pi} + R_B + R_d = R_x + R_d$$

X_B ——整流变压器折算到副边的等效漏磁电抗 (Equivalent Leakage Reactance)。

$I_d \frac{3X_B}{2\pi}$ ——三相半波电路中变压器漏磁电抗 x_B 引起的换向压降 (Commutating Voltage Drop)。

R_B ——变压器副边的内阻 (Internal Resistance)。

R_d ——电动机电枢电阻 [包括换向器 (Commutator) 的接触电阻 (Contact Resistance)]。

R_x ——电枢回路中除电枢电阻外, 其余各项电阻之和。

ΔU ——晶闸管元件的正向压降 (Forward Voltage Drop)。

由式(1-11)可见, 当控制角 α 一定时, 转速 n 与电流 I_d 成线性关系, 调速系统的机械特性如图 1-6 所示。图中虚线部分是假定电流连续时画出的, 但实际上, 当整流电流小于某一数值后, 电流便不连续了, 而应按电流断续运行状态去进行分析。由式(1-11)和图 1-6 还可以清楚地看出, 调节晶闸管的控制角 α (触发角 Firing Angle) (Delay Angle), 就可以很方便地调节电动机的转速。

2. 电流断续时晶闸管调速系统的机械特性

由于电流断续时, 整流电路不存在换相过程, 所以三相电路可用单相等效电路来进行分

析。等效电路图见图 1-7a)，其电压和电流波形见图 1-7b)。

由于 R_z 很小，在小电流时，便可略去 I_d R_z 项，于是电路电压方程可写为

$$u_A = \sqrt{2} U_{2\phi} \sin \omega t = E + L_d \frac{di_d}{dt}$$

设在 $\omega t_1 = \frac{\pi}{6} + \alpha$ 时刻， T_1 管被触发导

通，解上列微分方程，并以在 $\omega t_1 = \frac{\pi}{6} + \alpha$

时， $i_d = 0$ 的初始条件代入，可得

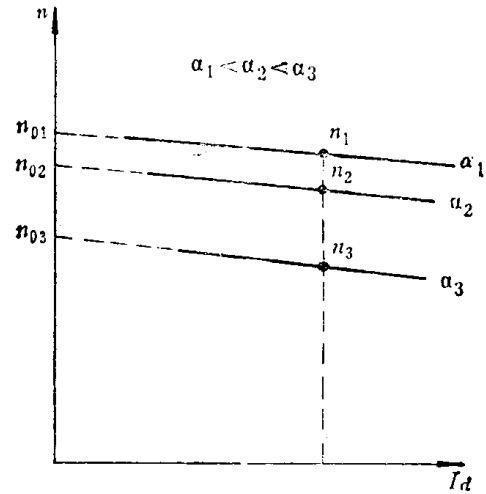
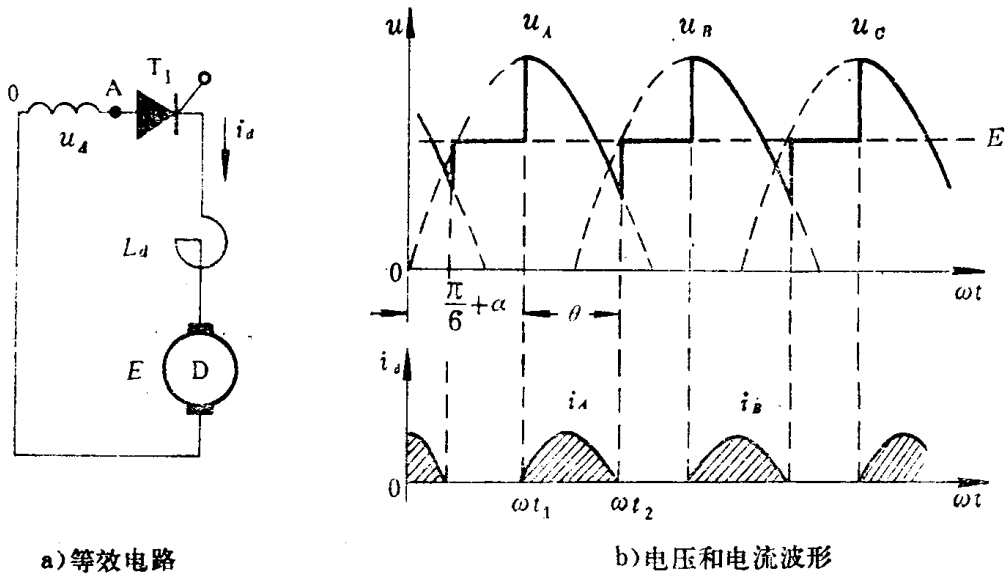


图1-6 电流连续时的晶闸管调速系统机械特性



a) 等效电路

b) 电压和电流波形

图1-7 电流断续时的等效电路与电压电流波形

$$i_d = -\frac{\sqrt{2} U_{2\phi}}{\omega L_d} \left[\cos \omega t - \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right] - \frac{E t}{L_d} + \frac{E}{\omega L_d} \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \quad (1-12)$$

由图 1-7b) 可见，当 $\omega t_2 = \frac{\pi}{6} + \alpha + \theta$ 时， i_d 又降为零，于是将此条件再代入式(1-12)，可得

$$E = \frac{2\sqrt{2} U_{2\phi}}{\theta} \sin \left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{\theta}{2} \right) \sin \frac{\theta}{2} \quad (1-13)$$

当 i_d 很小， $i_d R_z$ 项相对 E 可以略而不计时， $U_d \approx E$ ，即

$$U_d \approx E = \frac{2\sqrt{2} U_{2\phi}}{\theta} \sin \left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{\theta}{2} \right) \sin \frac{\theta}{2} \quad (1-14)$$

另一方面，将式(1-13)代入式(1-9)则

$$n = \frac{E}{C_e \phi} = \frac{2\sqrt{2} U_{2\phi}}{C_e \phi \theta} \sin \left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{\theta}{2} \right) \sin \frac{\theta}{2} \quad (1-15)$$

分析式(1-14)和(1-15)，不难看出，当电流断续时，整流输出电压 U_d 及转速 n 都将随着导通

角(Angle of Flow) θ 的减小而升高。

为了获得调速系统的机械特性,下面再求取电流 I_d 与导通角 θ 间的关系

$$I_d = \frac{1}{\frac{2}{3}\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha+\theta} i_d d\omega t$$

将式(1-12)代入上式,可解得

$$I_d = \frac{3}{2\pi} \frac{\sqrt{2}U_{2\phi}}{\omega L_d} \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{\theta}{2}\right) \left(\theta \cos\frac{\theta}{2} - 2\sin\frac{\theta}{2}\right) \quad (1-16)$$

在控制角 α 一定的条件下,式(1-15)和式(1-16)通过参变量 θ 建立了 n 与 I_d 之间的关系。即给出不同的 θ ,就可求出对应的 n 与 I_d ,从而求得电流断续时调速系统的机械特性,如图1-8弯曲部分所示,直线部分则为电流连续时的特性。

电流断续时的晶闸管调速系统的机械特性有两个显著的特点:

第一个特点是理想空载转速 n_0 升高。

以 $\alpha = 60^\circ = \frac{\pi}{3}$ 时为例,当 $\alpha = \frac{\pi}{3}$,

并令 $\theta = 0^\circ$,则 $\sin(\theta/2)/(\theta/2) \rightarrow 1$,由式(1-15)有

$$n_0 = \frac{\sqrt{2}U_{2\phi}}{C_e\phi} \sin\left(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{3}\right) = \frac{1.41U_{2\phi}}{C_e\phi}$$

而同样 $\alpha = \frac{\pi}{3}$ 时,若电流连续,则理想空载转速 n'_0 ,由式(1-11)并以 $I_d = 0$ 代入,有

$$n'_0 = \frac{1.17U_{2\phi}\cos\alpha - \Delta U}{C_e\phi} \approx \frac{1.17U_{2\phi}\cos 60^\circ}{C_e\phi} = \frac{0.585U_{2\phi}}{C_e\phi}$$

比较 n_0 与 n'_0 可见, $n_0 = 2.4n'_0$,即电流断续时的理想空载转速 n_0 为假设电流连续计算出来的空载理想转速 n'_0 的2.4倍

此外,当 $\alpha \leq \frac{\pi}{3}$ 时,由图1-7b)的波形图可见,要满足 $i_d = 0$,则必须 $E \geq \sqrt{2}U_{2\phi}$,

而 E 最大只能为 $u_{2\phi}$ 的峰值 $\sqrt{2}U_{2\phi}$,所以当 $\alpha \leq \frac{\pi}{3}$ 时,理想空载转速 n_0 均为

$$n_0 = \frac{\sqrt{2}U_{2\phi}}{C_e\phi} \quad \left(\alpha \leq \frac{\pi}{3}\right)$$

当 $\alpha > \frac{\pi}{3}$ 时, u_d 电压波形最大瞬时值(Maximum Instantaneous Voltage)为 $\sqrt{2}U_{2\phi}$

$\cos\alpha$,这表明,当 $\alpha > \frac{\pi}{3}$ 时,控制角 α 增大,则 n_0 将减小,见图1-8。

第二个特点是电流断续时,调速系统的机械特性显著变软。

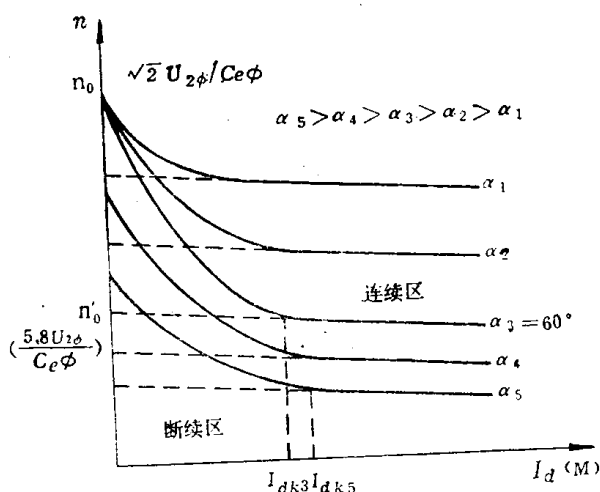


图1-8 电流断续时晶闸管调速系统的机械特性

这是由于电流断续后,晶闸管导通角变小,电流波形的底宽(Base Width)变小,而转矩是与电流的平均值成正比的,平均值对应 i_d 波形的面积,如今底宽很小,就必然需要很大的电流幅值。这就要求 $(U_d - E)$ 有足够的数值。当 U_d 一定时,则必然导致反电势(Back EMF) E 显著降低,亦即转速必然显著降低,才能获得足够的电流增量 ΔI_d ,以适应负载转矩 M_{fz} 的增加,从而达到新的平衡状态。因此机械特性变得很软,见图1-8)。

综上所述,直流电动机由晶闸管整流供电时,在电流连续时,其机械特性与恒压供电时相似,基本上是一条直线,特性较硬。但当电流断续时,机械特性类似串激直流电动机特性,特性很软。因此尽可能保证晶闸管整流电流连续,是改善晶闸管直流调速系统性能必须注意的问题。

3. 临界电流 I_{dk} (Critical current)

整流电流连续与断续的临界值,称为临界电流,用 I_{dk} 表示。由上述分析已知,电流连续与否对机械特性影响很大。因此,在电枢回路中大多串接电抗器 L_d ,以使临界电流 I_{dk} 值减小。

在三相半波电路中,临界电流 I_{dk} 是对应晶闸管导通角 θ 从小于 $\frac{2\pi}{3}$ 增大到等于 $\frac{2\pi}{3}$ 的电流值,因此将 $\theta = \frac{2\pi}{3}$ 代入式(1-16)中,即可得临界电流

$$I_{dk} = \frac{0.462}{\omega L_d} U_{2\phi} \sin \alpha \quad (1-17)$$

式中 L_d 是电枢回路总电感,当 $I_d \geq I_{dk}$ 时,电流连续。由式(1-17)可见,在 $U_{2\phi}$ 、 α 一定时, L_d 越大,则 I_{dk} 越小,即电流连续工作区域越大。

为保证电机工作在电流连续区,一般使其最小工作电流 $I_{dmin} > I_{dk}$ 。或者,采用足够大的平波电抗器 L_d ,使 $I_{dk} < I_{dmin}$ (一般 I_{dmin} 为电机额定电流的5%)。

1.3 晶闸管直流调速系统的分类

1.3.1 开环控制系统和闭环控制系统

按照系统有无反馈(Feedback)环节,自动调速系统可分为开环控制系统(Open-Loop Control System)和闭环控制系统(Closed-loop Control System)。

1. 开环控制系统

若系统的输出量不被引回来对系统的控制部分产生影响,这样的系统称为开环控制系统。如图1-9所示的是一个利用晶闸管调节电动机电压以改变电动机转速的开环控制系统。

其调节过程如下:当给定电压 U_g 增加时,通过触发器使晶闸管的导通角增加,晶闸管变流装置输出电压 U_d 增加,由于其激磁电流是恒定的,

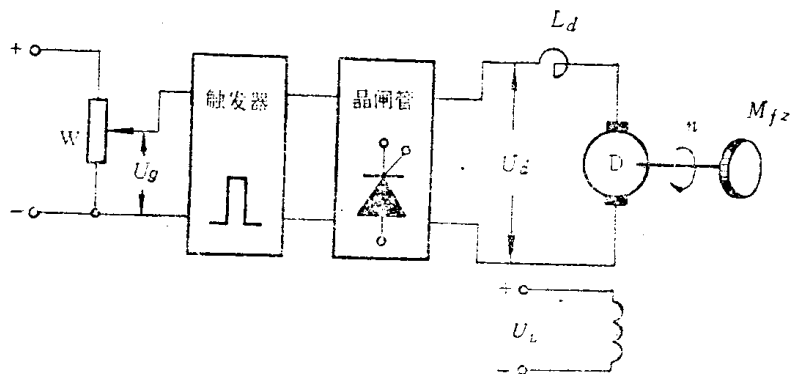


图1-9 电动机调速的开环控制

则电动机的转速将增加。即 $U_g \uparrow \rightarrow U_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$ 。

上述系统可以用方块图加以表示,如图1-10所示。其中控制转速的给定电压 U_g 称为控制量或输入量 (Input), 电动机的转速 n 则称为被控制量或输出量 (Output)。由图可见输出量并不返回来影响控制部分。

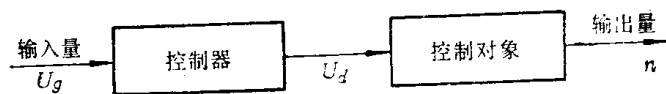


图1-10 开环控制方块图

开环控制系统在电力拖动和机械加工行业中的应用还是很多的。例如,一般的组合机床或流水线大多是开环控制系统,它们是依靠预先设定的行程位置(行程开关)、液压压力(压力继电器)和时间(时间继电器)等的控制而进行加工的,其加工精度便取决于这些事先设定量的准确度,而在加工中出现偏差时,开环系统是不能自动地进行校正的。所以开环系统必须预先精确地对有关设定量进行校准。并且在工作过程中保持这些校正值不发生变化。

开环系统一般结构简单、稳定、成本低。在输入量和输出量之间的关系固定,内部参数和外部负载等扰动因素不大的情况下,应尽量采用开环控制系统。但是当各种无法预计的扰动因素使被调量产生的偏差超过允许的限度时,则不能采用开环控制而要采用闭环控制系统。

2. 闭环控制系统

若系统输出量通过反馈环节返回来作用于控制部分,形成闭合环路,这样的系统称为闭环系统,又称为反馈控制系统(Feedback Control System)。图1-11所示的是具有转速反馈的闭环控制系统,图1-12为闭环控制系统方块图。

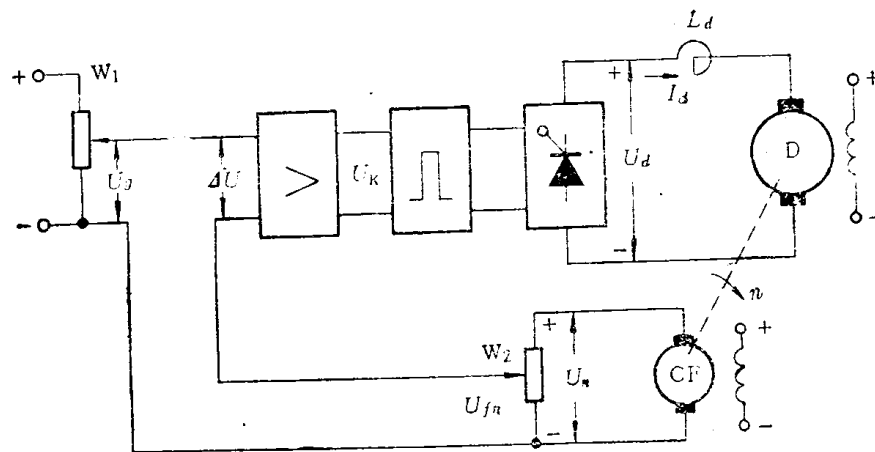


图1-11 具有转速反馈的闭环控制系统

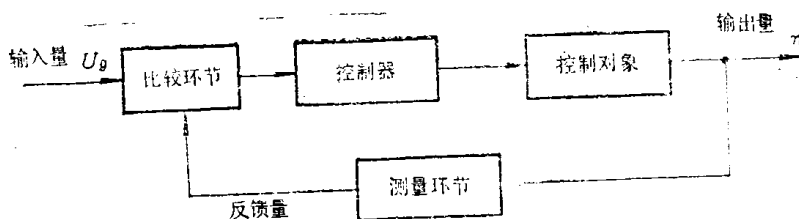


图1-12 闭环控制方块图

与图1-9相比,增加了转速反馈环节。其测速反馈电压 U_{fn} 与系统输出量(转速 n)成正比。这时,作用于放大器的电压不再是给定电压 U_g ,而是偏差(Error)电压 $\Delta U = (U_g - U_{fn})$ 。当

电动机的转速因某些因素(如负载增加)而降低时,则测速发电机(Tachogenerator)电压 U_{fn}