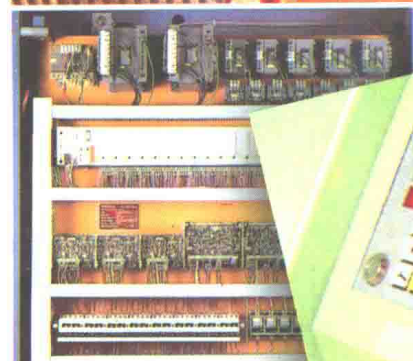
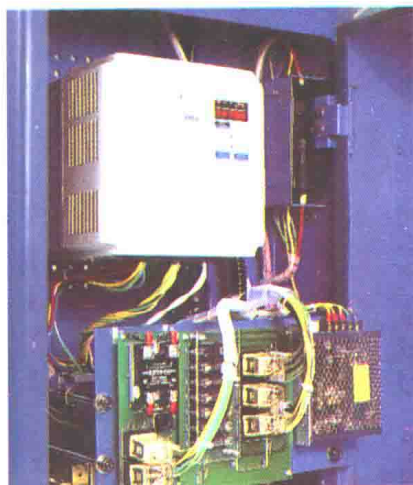


电气传动控制系统

高等纺织院校教材

陈振翼 主编

邵世煌 主审



中国纺织出版社

高等纺织院校教材

电气传动控制系统

陈振翼 主编

邵世煌 主审

中国纺织出版社

内 容 提 要

本书系统地阐述了目前工业生产中广泛采用的各类交直流调速系统。直流调速部分包括单闭环有静差、无静差调速系统,多闭环调速系统,可逆调速系统及脉宽调速系统。交流调速部分包括异步电动机变频调速、矢量变换控制及无换向器电动机调速系统。详细讨论了上述系统的组成、工作原理、特性及工程设计方法。

本书可作高等院校工业自动化专业及其他相近专业的教材。也可供厂矿、科研设计单位电气技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气传动控制系统/陈振翼主编. —北京:中国纺织出版社, 1998

高等纺织院校教材

ISBN 7-5064-1438-4/TP·0017

I. 电… I. 陈… II. 电力传动-控制系统-高等学校-教材
N. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 28555 号

责任编辑:王 颖 责任校对:郭姝兰
责任设计:任星荪 责任印制:刘 强

中国纺织出版社出版发行
地址:北京东直门南大街 6 号
邮政编码:100027 电话:010—64168226
河北省香河县印刷厂印刷 各地新华书店经销
1998 年 12 月第一版第一次印刷
开本:787×1092 1/16 印张:14.5
字数:352 千字 印数:1—3000 定价:25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

根据 1996 年纺织总会自动化专业教育委员会会议精神,决定把原《电力拖动自动控制系统》与《交流调速系统及其应用》合在一起,组成一门课程,并重新编写教材,更名为《电气传动控制系统》。

本书共分八章,前四章为直流调速系统及其应用。与原《电力拖动自动控制系统》相比,内容上作了较大压缩和调整。后四章为交流调速系统及其应用,在内容上突出介绍交流变频调速系统的构成与原理。

本书可作为自动化及其相近专业的教材,也可作为工程电气人员、研究设计人员的参考书。

本书由天津纺织工学院陈振翼主编,中国纺织大学邵世煌先生任主审,书稿第一、二、三章由陈振翼编写,第四章和第六章的第一、四节由北京服装学院吴锡祺编写,第五章和第六章的第二、三节由北京服装学院宋凌云编写,第七、八章由中国纺织大学徐银泉编写。

在本书的编写过程中,天津大学田树苞先生和郑州纺织工学院车战斌老师提出了许多宝贵建议,特此感谢!

目 录

绪论	(1)
第一章 单闭环直流调速系统	(3)
第一节 调速系统的基本概念	(3)
一、调速方法	(3)
二、供电电源	(3)
三、开环 KZ—D 系统	(3)
四、控制方式	(5)
五、调速指标	(6)
第二节 单闭环有静差自动调速系统	(8)
一、系统组成、原理与机械特性	(8)
二、静特性方程	(9)
三、闭环调速系统的基本特性	(9)
四、转速负反馈系统的动态分析与校正	(11)
五、其他反馈环节在自动调速系统中的应用	(14)
第三节 单闭环无静差自动调速系统	(17)
一、积分(I)调节器与比例积分(PI)调节器	(17)
二、带 PI 调节器的无差调速系统	(18)
第四节 调速系统的限流保护——电流截止负反馈	(20)
一、限流保护的意义	(20)
二、带电流截止环节的自动调速系统	(21)
三、结论	(23)
第五节 恒功率负载下自动调速系统	(24)
一、卷绕类恒功率负载的特点	(24)
二、张力负反馈系统的工作原理	(25)
三、张力的扰动补偿控制系统	(25)
习题	(27)
第二章 多闭环自动调速系统	(29)
第一节 转速、电流双闭环调速系统	(29)
一、理想起动过程与双闭环系统	(29)
二、双闭环调速系统静特性	(30)
三、双闭环调速系统动特性	(31)
第二节 电势与电流双闭环调速系统	(33)
一、电势与电流双闭环系统的工作原理	(33)

二、电势调节器的动态结构图	(34)
三、典型双闭环调速系统实例	(35)
第三节 电枢电流断续时的电流自适应调节	(37)
一、电流断续对系统的影响与电流自适应调节的概念	(37)
二、电流自适应调节器的实现	(38)
第四节 三闭环调速系统及其在多电机同步传动中的应用	(40)
一、以线速度 v 为被调量的三闭环调速系统	(40)
二、以织物内张力为被调量的三闭环调速系统	(41)
三、以调整辊 a 的位置作被调量的三闭环系统	(42)
第五节 有激磁控制的多环调速系统及其应用	(44)
一、有激磁控制的调速系统	(44)
二、非独立激磁控制系统实例	(45)
第六节 调速系统中调节器的工程设计	(47)
一、控制系统的性能指标与工程设计方法	(48)
二、典型系统的参数与跟随性能指标的关系	(50)
三、非典型系统的调节器校正	(54)
第七节 双闭环调速系统的设计	(57)
一、电流环调节器设计	(58)
二、速度环调节器设计	(60)
三、双闭环调速系统的抗扰动性能分析	(62)
四、反馈校正调速系统中的应用	(66)
第八节 ST 饱和及给定积分器对双闭环系统起动过程的影响	(67)
一、ST 饱和对起动过程的影响	(67)
二、有给定积分器时双闭环系统的起动过程	(70)
三、设计举例	(71)
习题	(74)
第三章 可逆调速系统	(76)
第一节 晶闸管—电动机系统的可逆运行方案	(76)
一、可逆运行方案及回馈制动原理	(76)
二、可逆系统中的环流问题	(77)
第二节 配合控制有环流可逆调速系统	(79)
一、配合控制系统的组成及特点	(79)
二、配合控制有环流系统工作情况分析	(81)
第三节 逻辑无环流可逆调速系统	(83)
一、系统构成及工作原理	(83)
二、逻辑切换装置	(84)
习题	(89)
第四章 直流脉宽调速系统	(90)

第一节 直流电动机的 PWM 控制原理	(90)
第二节 脉宽调制变换器	(91)
一、不可逆 PWM 变换器	(92)
二、可逆 PWM 变换器	(98)
三、脉宽变换器的晶体管开关损耗和开关频率	(101)
第三节 PWM 调速系统的构成	(103)
一、脉宽调制器	(103)
二、驱动器与保护电路	(108)
第四节 PWM 控制器控制的直流调速系统	(111)
一、由集成 PWM 控制器控制的直流不可逆调速系统	(111)
二、由单片机控制的 PWM 直流可逆调速系统	(112)
习题	(114)
第五章 交流调速系统分类与基本原理	(115)
第一节 交流调速系统分类	(115)
第二节 交流调压调速原理	(116)
一、晶闸管交流调压电路	(116)
二、异步电动机调压调速机械特性	(119)
三、调压调速系统的构成	(120)
四、调压调速的功率损耗及适用范围	(123)
第三节 交流线绕异步电动机的串级调速原理	(124)
一、串级调速原理与分类	(124)
二、串级调速系统机械特性	(127)
三、串级调速系统的构成	(131)
四、串级调速系统的性能及其应用	(134)
第四节 交流变频调速的基本原理	(136)
一、变频调速的控制方式与变频装置的分类	(136)
二、 U/f 协调控制下的异步电动机的稳态机械特性	(141)
习题	(143)
第六章 异步电动机变频调速系统	(144)
第一节 正弦波脉宽调制 (SPWM) 逆变器	(144)
一、变频器的基本构成	(144)
二、SPWM 逆变器工作原理	(146)
三、谐波分析及转矩脉动	(149)
四、谐波引起的转矩脉动	(153)
五、谐波消除法	(153)
第二节 转速开环、恒压频比控制的变频调速系统	(154)
一、转速开环的交—直—交电压源变频调速系统	(154)
二、转速开环的交—直—交电流源变频调速系统	(159)

第三节 转速闭环、转差频率控制的变频调速系统	(164)
一、转差频率控制的基本概念	(164)
二、转差频率控制规律	(165)
三、转差频率控制的变频调速系统	(166)
第四节 通用变频器及应用	(169)
一、通用变频器原理及方案	(170)
二、通用变频器电路	(171)
习题	(174)
第七章 异步电动机矢量变换控制系统	(175)
第一节 矢量变换控制的基本思想	(175)
第二节 坐标变换和矢量变换	(176)
一、三相/两相变换($3\phi/2\phi$)	(177)
二、矢量旋转变换(VR)	(178)
三、直角坐标/极坐标变换(K/P)	(179)
第三节 矢量变换控制的异步电动机数学模型	(180)
一、双轴理论和原型电动机的电压方程	(180)
二、用 $\alpha-\beta$ 轴坐标系描述的异步电动机数学模型	(182)
三、用 $M-T$ 轴坐标系描述的异步电动机数学模型	(183)
四、数学模型中各变量的关系	(184)
五、两种数学模型比较	(186)
第四节 异步电动机磁通的检测和运算	(187)
一、磁通检测法	(187)
二、磁通观察器法	(188)
第五节 带有速度传感器的矢量变换控制系统	(190)
一、原理性的异步电动机矢量变换控制系统	(190)
二、电流型逆变器供电的异步电动机转差型矢量变换控制系统	(191)
三、微机矢量变换控制 SPWM 变频调速系统	(193)
第六节 无速度传感器矢量控制变频调速系统	(195)
一、无速度传感器矢量控制变频调速系统的控制策略	(195)
二、转速 ω_r 的模拟计算	(195)
三、电动机定子电流角频率 ω_s 的模拟计算	(196)
四、无速度传感器矢量控制变频调速系统的构成	(197)
第七节 矢量变换控制系统的特点及调节器的设计问题	(200)
一、矢量控制系统的特点	(200)
二、矢量控制系统中调节器的设计问题	(201)
习题	(202)
第八章 无换向器电动机调速系统	(203)
第一节 无换向器电动机的工作原理	(203)

一、无换向器电动机的基本原理	(203)
二、无换向器电动机的组成	(204)
第二节 无换向器电动机的换流	(206)
一、自然换流法(反电势换流法)	(206)
二、断续电流换流法	(207)
第三节 无换向器电动机的基本特性及调速方法	(207)
一、电枢反应和换流剩余角	(208)
二、负载特性和过载能力	(208)
三、机械特性和调速方法	(209)
第四节 无换向器电动机调速系统	(211)
一、无换向器电动机调速系统的组成	(211)
二、正反转运行	(212)
三、 γ 信号处理	(213)
第五节 交流无换向器电动机及其在涤纶牵伸加捻机上的应用	(215)
一、主电路	(215)
二、分配器	(217)
三、系统工作原理	(219)
四、交流无换向器电动机在涤纶牵伸加捻机上的应用	(219)
习题	(220)
参考文献	(221)

绪 论

任何工厂都有大量生产机械,如一个 10 万纱锭的纺织厂,就有 40 多台粗纱机,240 多台细纱机,3000 多台布机;一个年产 8000 万米的印染厂至少有上百台各种类型的联合机。这些生产机台都必须依靠电力传动(即电动机带动生产机械)才能运转起来,才能形成生产力。电力传动在整个工业生产中占有极为重要的地位。维护所有生产机台的正常运行,不断研究性能更好的电力传动系统,是电气自动化技术人员的重要职责之一。

随着生产过程向自动化连续化的发展,生产机械常常需要依靠电力传动来完成各种复杂运动,使生产机械能够按要求加速、减速、制动、反转;使被控制量保持恒定或按一定的规律变化,等等。例如一台印染联合机,通常要有几台,甚至十几台电动机联合传动。如图所示。

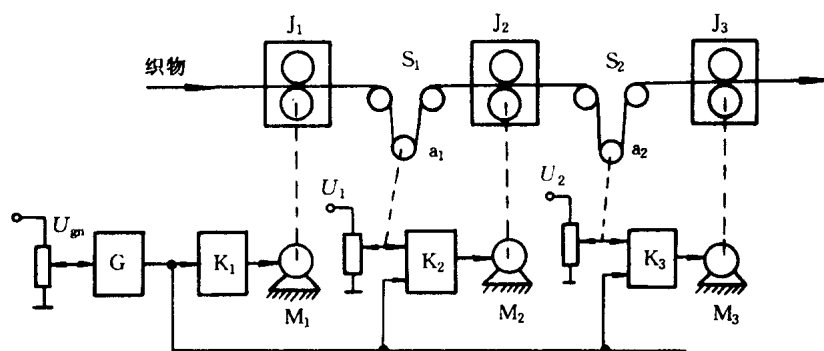


图 0-1 印染联合机传动示意图

G—速度给定积分器 J₁~J₃—单元机加工机械 M₁~M₃—各单元传动电动机

U_{gm}—总的速度控制信号 K₁~K₃—各单元电动机控制电路 S₁、S₂—松紧架装置

当两个相邻单元间线速度波动时,相应的调整辊 a₁、a₂ 将上下移动,从而调节 K₂、K₃ 输入端的辅助控制电压 U₁、U₂,以调整后续单元的车速,与左边单元保持协调一致。

实际生产中,工艺要求是多种多样的。如要求织物在无张力下加工;或要求各单元机之间车速成一定比例,以使织物在规定张力下加工等。又如,有些机台要求起制动过程尽可能协调、平稳,避免冲击等。可见电动机并不只是简单地传动生产机械,而必须满足生产上提出的各种要求。而这些要求通常是由建立在反馈控制理论上的一套完善的控制电路来保证的。电力传动加上相应的一套控制电路,就构成了电力传动自动控制系统。当然,任何传动系统都还必须有一套相应的保护电路,以保证电气装置、设备和人身安全。

由于生产机械对电力传动最主要、最普遍的要求是要有良好的调速性能和起制动性能,即要求机台起制动和运行状态既快又稳。所以电力传动自动控制中研究最广泛的是自动调速系统。

按拖动电动机的类型来分,自动调速系统有直流调速系统和交流调速系统两类。尽管交流电动机比直流电动机具有一系列优点,如结构简单、价格便宜、制造方便、维修容易等。但在 70

年代以前,由于直流电动机具有良好的起制动性能,能方便地在大范围内平滑调速。所以凡对调速性能要求较高的生产机械几乎都采用直流调速,80年代以来,交流调速,尤其是变频调速获得迅猛发展,应用日益广泛,预计在不久的将来,交流调速将逐步取代直流调速。

但由于目前国内生产机械中直流调速仍占主要地位,并且交直流调速系统在构成方法和设计原则上基本相同,所以本书在内容安排上将交、直流调速系统各占50%。

本课程是电气自动化专业的专业课,是建立在《功率电子学》、《电机及拖动基础》、《自动控制原理》等先修课程基础上的。它运用以前所学的电动机、半导体、电子电路等知识,在控制理论的指导下,根据生产工艺所提出的要求,去构成各种电力传动自动控制系统。

第一章 单闭环直流调速系统

第一节 调速系统的基本概念

一、调速方法

直流电动机的转速表达式为

$$n = \frac{U_d - I_d R}{C_e \Phi}$$

式中: U_d —— 电枢电压;

I_d —— 电枢回路电流;

R —— 电枢回路总电阻;

Φ —— 激磁磁通;

C_e —— 电动机电势系数。

可见,它有三种调速方法,即改变电枢回路总电阻 R ; 减弱激磁磁通 Φ ; 调节电枢供电电压 U_d 。

其中以调压调速方式最好,调速范围广,调节平滑。但它只能从基速向下调节。在实际生产中,还常常利用减弱激磁向基速以上调节。这样,调磁与调压相结合,可以扩大调速范围,或在联合机同步运行中,利用磁场作辅助调节,起到协调车速的作用。

二、供电电源

采用调压调速,必须有一个平滑可调的直流供电电源。50年代前,工业生产中的直流调速系统,几乎全都采用旋转式变流机组供电。60年代起,静止式硅整流技术迅速发展,使调压器—硅整流供电系统逐步代替了原来的变流机组。几乎与此同时,出现了更先进的晶闸管整流装置,它具有效率高、成本低、体积小、无噪声、放大倍数高、响应快等优点,从而很快取代了前两类供电系统,这里主要介绍晶闸管—直流调速系统,简称 KZ—D 系统。

70年代以来,随着可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)、功率场效应管(P—MOSFET)、绝缘栅极晶体管(IGBT)等全控式电力电子器件的迅速发展,脉宽调制(PWM)变换器供电的直流调速系统日益广泛应用。与晶闸管相控装置相比,PWM系统具有开关频率高、低速运行稳定、动静态性能优良、装置效率高等一系列优点,第四章将专门介绍这类系统的构成和原理。

三、开环 KZ—D 系统

关于晶闸管技术,在《功率电子学》课程中介绍。最简单的 KZ—D 系统如图 1-1 所示, U_{gn} 是输入量,电动机 M 是被控对象,转速 n 是被调量,即输出量。称为 KZ—D 开环调速系统。这里 U_{gn} 是触发电路 CF 的移相电压。

电流连续情况下电枢回路的平均电压平衡方程式为

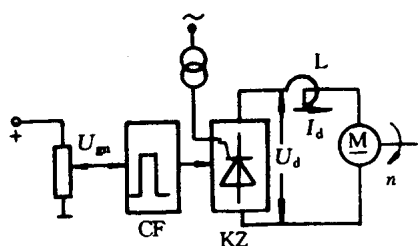


图 1-1 KZ-D 系统

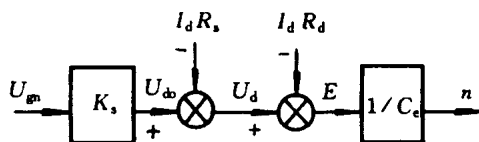


图 1-2 开环系统静态结构图

$$U_{d0} = E + I_d R_z \quad (1-1)$$

式中: U_{d0} —— 理想空载整流电压;

R_z —— 主回路等效总电阻;

$$R_z = R_b + R_{hx} + R_d$$

式中: R_b —— 从变压器次级计算的变压器等效电阻;

R_{hx} —— 变压器漏抗 X_b 引起的换向压降所对应的电阻;

R_d —— 电动机电枢回路(包括平波电抗器)电阻。

在以后的分析中,用 $R_s = (R_b + R_{hx})$ 表示晶闸管整流装置的等效内阻。则总电阻 $R_z = R_s + R_d$ 。

把 $E = C_e n$ 代入式(1-1),得到转速表达式

$$n = \frac{U_{d0}}{C_e} - \frac{I_d R_z}{C_e} = n_0 - \Delta n$$

式中: $n_0 = \frac{U_{d0}}{C_e}$ —— 理想空载转速,其中 C_e 为 $C_e \Phi$ 的简写,除调磁调速系统外,均简写成 C_e ;

$\Delta n = \frac{I_d R_z}{C_e}$ —— 对应于负载电流 $I_{Lz} = I_d$ 情况下的转速降。

按图(1-1),可以画出表示稳态信号传递关系的静态结构图(1-2)。

图中 K_s 表示晶闸管装置的电压放大倍数, $K_s = \frac{U_{d0}}{U_{gn}}$ 。相应的转速表达式可以写为

$$n = \frac{U_{gn} K_s}{C_e} - \frac{I_d R_z}{C_e} = n_0 - \Delta n \quad (1-2)$$

这就是电流连续情况下 KZ-D 开环系统机械特性。如图 1-3 实线部分所示。

结合图 1-1 可见,调节控制电压 U_{gn} ,也就改变了晶闸管触发电路的移相角 α ,从而调节了晶闸管的空载整流电压 U_{d0} ,也就调节了理想空载转速 n_0 。又从式(1-2)可见, U_{gn} 与 n_0 之间是线性对应关系。操作人员正是根据这种对应关系,就可以根据工艺要求预先给定出所需的 U_{gn} 值,以便确定所需的转速值,所以常常称 U_{gn} 为转速给定值。

必须说明,由于晶闸管整流装置的输出电压是脉动的,相应的负载电流也是脉动的。这样,在电动机负载较轻,或主回

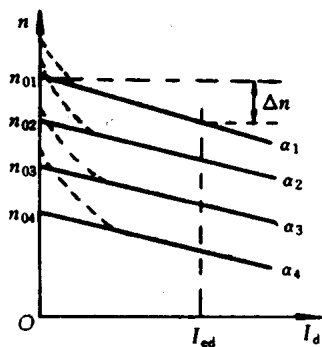


图 1-3 开环机械特性

路电感量不足的情况下,就造成了电流断续。这时,电动机的反电势值受负载电流 I_d 的影响很大,随着负载电流的减小,反电势急剧升高。使理想空载转速比图 1-3 中的 n_0 高得多,如图中虚线所示。一般当主回路中电感足够大,电机又有一定的空载电流时,近似认为电机工作在电流连续段内,并把特性曲线与纵轴的直线交点 n_0 作为理想空载转速。为分析方便,除特别说明外,以下都按电流连续情况来讨论。

由式(1-2)可知,当电动机轴上加机械负载时,电枢回路就要产生相应的电流 I_d (实际上理想空载是不存在的)。此时即产生 $\Delta n = \frac{I_d R_z}{C_e}$ 的转速降。 Δn 的大小反映了机械特性的硬度, Δn 越小,硬度越高。显然,由于系统开环运行, Δn 的大小完全取决于电枢回路电阻 R_z 及所加负载的大小。即造成转速降落的根本原因是电路内存在电阻压降。

在自动调速系统中,把负载电流变化引起转速的波动,称为负载扰动;负载电流引起的转速偏离理想空载转速 n_0 的下降量 Δn ,称为静态偏差。须知, Δn 的大小对实际生产机械常具有十分重要的意义。例如,对于图 0-1 所示的印染联合机,调试时常常先在不穿布的情况下逐个单元调整、使各个单元机在空载下的稳态转速基本一致。然后再带上织物联合运行。如果各单元机系统的 Δn 差异较大,则虽然空载时车速是协调一致的,带载后也会不一致,严重时无法开车。或者,即使在某一状态下已调整到一致,但当某一单元负载发生波动时,其协调状态也要受到破坏。因此在调速系统设计中,首先要设法使 Δn 尽可能小,甚至使 $\Delta n = 0$ 。

在转速自控系统中,无论怎样调节, Δn 都无法消除的系统,称为有差系统。凡是通过适当调节而可以使 $\Delta n = 0$ 的系统,称为无差系统。本章主要解决如何减小、消除静差的问题。

四、控制方式

前述已知,从控制理论的角度看,上面讨论的尽可能减小甚至消除静态偏差 Δn ,以使转速稳定在给定值上,是恒值系统的主要静态性能要求。

对恒值系统,常用的有两种控制方式,一种是按反馈原理组成被调量的直接负反馈系统,如图 1-4 所示。系统利用被调量与给定量之间的偏差值,通过调节器所确定的调节规律,对 KZ—D 系统进行自动调节,使输出量尽可能稳定在给定值上。所以反馈控制也称按偏差控制。反馈控制是各类自动控制中最基本的控制方式。

此外,也常采用按扰动调节的方式来实现恒值控制。在调速系统中,引起转速波动的因素很多,除了上述提到的由于负载加大引起转速降外,交流电源电压的波动,电动机激磁电流的波动,温升引起的主回路电阻的增大等,都将引起转速波动。在自控系统中,把给定值不变时引起被调量波动的因素,称为对系统的扰动作用。

如果某种扰动因素已知,并被检测出来,就可利用扰动信号来产生一种与扰动效果相反的补偿作用,从而使被调量尽可能维持在给定值上。这种控制称为按扰动控制。

如图 1-1 所示的开环调速系统,当负载电流加大时,其转速降 $\Delta n = \frac{I_d R}{C_e}$ 也加大。如果把电流信号 I_d 检测出来,转换成与 I_d 成正比的电压信号 U_i , $U_i = I_d \beta$ 。系数 β 称为电流反馈系数。并把它与转速给定信号 U_{gn} 相加,作为晶闸管装置的移相信号。如图 1-5 所示。 $U_k = U_{gn} + U_i$ 。显然,当负载电流 I_d 加大时, U_i 也成比例加大,使 U_k 加大,则 U_d 加大,使转速产生一个与 U_i 对应的上升量。如果 U_i 的值取得适当,可使 U_i 所产生的附加速升等于 $(I_d \cdot R_z)$ 产生的转速降,就可以消除负载对转速的扰动作用。当然这里只是为了说明扰动补偿控制原理,实际使用还要

考虑其他方面的问题。

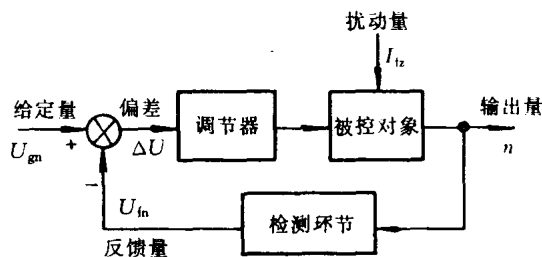


图 1-4 反馈控制原理图

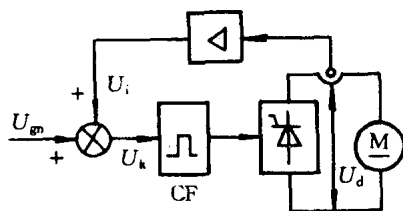


图 1-5 扰动补偿控制原理

按扰动组成的自调系统与按偏差控制的自调系统不同,前者只能补偿某一种预定的扰动所产生的偏差。而反馈控制可以抑制反馈环内主通道上一切扰动造成的偏差。如果把这两种方法同时使用到一个系统中,则称为复合控制系统。

五、调速指标

一个调速系统性能好坏,可以用静态、动态两方面的性能指标来描述。必须说明,对不同类型的系统,由于工作特点不同,其性能指标的规定也不同。这里主要叙述电气传动中稳速系统的性能指标。

笼统地说,一个好的调速系统,应该既能在较宽的范围内平滑地调速,又要求一旦把转速调整到某一数值后,尽可能不受外部或内部干扰的影响。同时还要求系统具有良好的起制动性能。

为了准确地评价一个调速系统的好坏,把上述要求归结为如下指标。

1. 静态指标

(1) 调速范围 D : 在额定负载下,电动机能达到的最高转速 $n_{\max}$ 与最低转速 $n_{\min}$ 之比。即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1-3)$$

在调速系统设计中,一般以电动机额定转速 n_{ed} 作为 $n_{\max}$, 如图 1-6 所示。

(2) 静差率 s : 是指当电动机负载由理想空载增加到额定负载 I_{ed} 时所产生的转速降 Δn_{ed} , 与理想空载转速 n_0 之比, 即

$$s = \frac{\Delta n_{ed}}{n_0}, \text{ 常用百分数表示为}$$

$$s = \frac{\Delta n_{ed}}{n_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

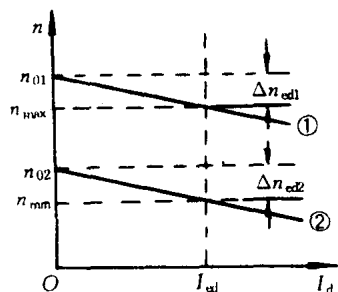


图 1-6 不同理想空载转速时特性的静差率

静差率 s 表征了调速系统的实际转速 n 相对于理想空载转速 n_0 的相对误差。即表示系统在负载扰动下被调量 n 偏离给定值的程度, s 越小, 转速的相对波动量越小, 稳速精度越高。

由式(1-4)可知, 静差率不仅与转速降有关, 还与理想空载转速的大小有关。图 1-6 中, 特性①与②硬度一样, 两者在额定负载下的转速降相等, 即 $\Delta n_{ed1} = \Delta n_{ed2}$ 。但由于理想空载转速不

同, $n_{01} > n_{02}$, 所以两者的静差率不同

$$s_1 = \frac{\Delta n_{ed1}}{n_{01}} \times 100\% < s_2 = \frac{\Delta n_{ed2}}{n_{02}} \times 100\%$$

即随着理想空载转速的降低, 相对转速降增大。所以实际应用中, 生产机械对电力传动系统所提出的静差率要求, 是指最低速而言的。低速时能满足要求, 高速时也就一定能满足要求。于是就存在这样一个问题: 一个调速系统, 调速范围 D 越大, 最低理想空载转速也就越低, 这个系统的静差率 s 也就越大。可见, 调速范围 D 、静差率 s 、额定转速降 Δn_{ed} 这三者是互相关联、互相制约的。

它们之间的数量关系为

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_{\max}}{n_{02} - \Delta n_{ed}}$$

由低速时静差率 $s = \frac{\Delta n_{ed}}{n_{02}}$ 得 $n_{02} = \frac{\Delta n_{ed}}{s}$ 。代入前式, 得

$$D = \frac{n_{\max}}{\frac{\Delta n_{ed}}{s} - \Delta n_{ed}} = \frac{n_{\max} \cdot s}{\Delta n_{ed}(1-s)} = \frac{n_{ed} \cdot s}{\Delta n_{ed}(1-s)} \quad (1-5)$$

式(1-5)的物理意义是很清楚的, 当 n_{ed} 、 Δn_{ed} 一定时, 对静差率要求越高, 即 s 越小, 则允许的调速范围 D 就越小。所以若要同时满足工艺上对静差率和调速范围的要求, 就必须把转速降 Δn_{ed} 限制在一定的范围内。即 $\Delta n_{ed} = \frac{n_{ed}s}{D(1-s)}$ 。

例 某生产机械, 其传动电动机额定转速 $n_{ed} = 1430 \text{ r/min}$, 额定转速降 $\Delta n_{ed} = 115 \text{ r/min}$ 。若要求调速范围 $D = 5$, 静差率 $s = 0.1$, 问此系统能否满足要求?

解 根据式(1-5), 要满足静态指标 $D = 5$ 、 $s = 0.1$, 则相应允许的转速降

$$\Delta n_{ed} = \frac{n_{ed} \cdot s}{D(1-s)} = \frac{1430 \times 0.1}{5(1-0.1)} = 31.8$$

很明显, 系统实际转速降远大于 Δn_{ed} , 不能满足要求。

上例若保持静差率 $s = 0.1$, 转速降 $\Delta n_{ed} = 115 \text{ r/min}$, 则系统可达到的调速范围由式(1-5)

求得: $D = \frac{n_{ed} \cdot s}{\Delta n_{ed}(1-s)} = \frac{1430 \times 0.1}{115(1-0.1)} = 1.38$, 远小于原规定的值。

必须注意, 静态指标 D 、 s 是生产工艺为保证加工质量所要求的, 是不能随便改变的, 例如印染纺织类生产机械, 其调速范围一般为 $D = 3 \sim 10$, 其静差率为 $s = 0.3 \sim 0.5$ 。某些加工精度较高的印染机台, 要求 $s = 0.1 \sim 0.2$, 实现这一指标唯一的办法是减小 Δn_{ed} 。这对开环系统是无能为力的, 因为在额定负载下 $\Delta n_{ed} = \frac{I_{ed} R_{\Sigma}}{C_e}$ 是一个固定值。通常的方法是采用被调量的直接负反馈, 组成闭环系统, 从而减小静态误差。

2. 动态指标 一个自控系统通常受到给定和扰动两个输入作用。因此系统的动态指标也包括两个方面: 对给定输入应该尽快地、不失真地跟踪, 其相应的动态指标称为跟随性指标; 对干扰输入, 系统应尽量不受影响, 一旦受到影响, 应尽快通过自动调节而加以消除, 其相应动态指标称为抗扰动性能指标。总之, 要求系统的动态过程既快又稳。

这里只粗略地介绍动态指标的概念, 具体动态指标的定义, 将在后面介绍。

第二节 单闭环有静差自动调速系统

一、系统组成、原理与机械特性

若在图 1-1 所示开环系统的触发器 CF 前加上放大器 FD, 其放大倍数为 K_p 。并用一台与主传动电动机硬轴联接的测速发电机 TG 作为转速 n 的检测元件, 它的输出电压 $U_{TG} = K_e n$ 正比于转速 n , 经电位器 R_p 分压, 取出一部分 $U_{fn} = KU_{TG} = an$, 加到放大器 FD 输入端与给定电压 U_{gn} 比较后, 得到偏差电压 $\Delta U = U_{gn} - U_{fn}$, 该偏差信号经放大器放大后, 即为晶闸管触发装置的控制电压 U_k 。这样就构成了一个转速负反馈自动调速系统。如图 1-7 所示。这里 a 称为转速反馈系数。

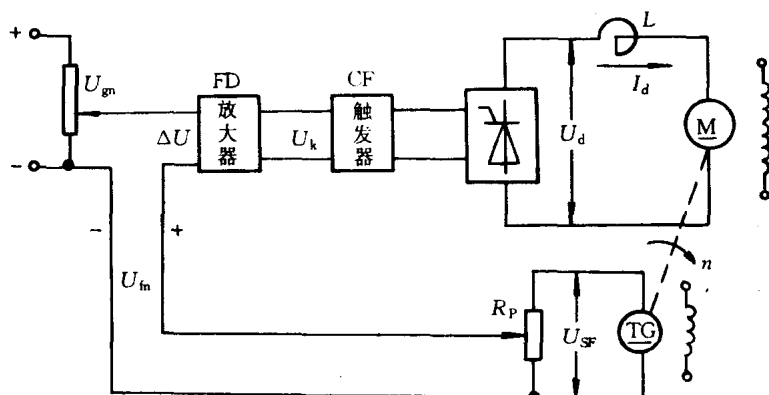


图 1-7 转速负反馈调速系统

这时系统工作情况与开环时有着本质的不同, 设图 1-8 中一组平行的斜线表示原开环系统的机械特性。现组成闭环系统后, 设当给定电压为 U_{gn1} 时, 相应控制电压为 U_{k1} , 电动机端电压为 U_{d1} 。在负载电流为 I_{d1} 时, 电动机运行在 U_{d1} 决定的开环特性的 a 点上, 此时电动机转速为 n_1 , 且有: $U_{fn1} = a \cdot n_1$

$$(U_{gn1} - U_{fn1})K_p = \Delta U_1 \cdot K_p = U_{k1}$$

然后将电动机轴上负载加大到 I_{d2} , 如果是开环情况, 转速最后将稳定到 a' 点上。但闭环情况则不同, 此时随着转速 n 的下降, 将引起 U_{fn} 的下降, 从而使 ΔU 加大, 相应 U_{k1} 加大到 U_{k2} , 整流电压增加到 U_{d2} , 转速最后将稳定到由 U_{d2} 所决定的特性上的 b 点。同理, 如果负载加大到 I_{d3} , 由于同样的调节过程, 转速将不是稳定到 a'' 点上, 而是稳定到 c 点。

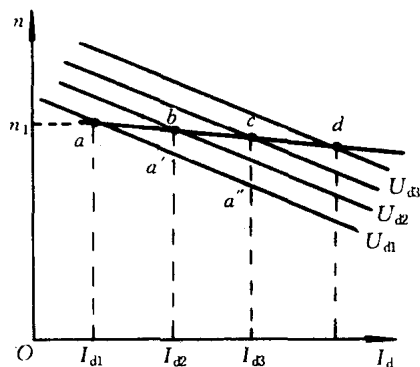


图 1-8 闭环系统静特性的形成

上述调节过程表明, 由于组成了被调量的闭环控制, 在给定值不变的情况下, 随着负载加大, 系统依靠负反馈的调节作用, 能自动地提高整流电压, 获得一条新的机械特性 $a-b-c-d$ 。此特性实际上是一组开环机械特性上的各相应工作点的集合。它表示组成闭环以后, 系统