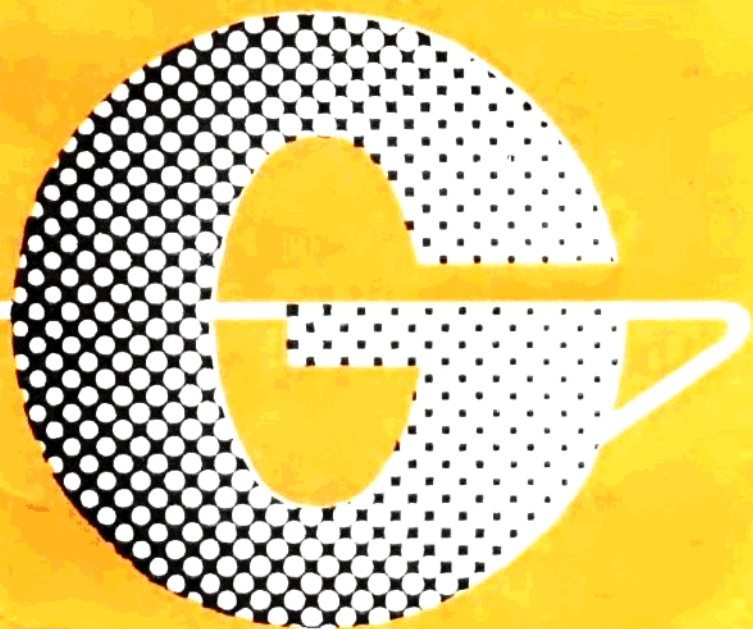


普通高等专科学校教育机电类规划教材

# 交直流电力拖动控制系统



南京动力高等专科学校 王耀德 主编

机械工业出版社

普通高等专科学校教育机电类规划教材

# 交直流电力拖动控制系统

南京动力高等专科学校 王耀德 主编



ND29/06



394998



机械工业出版社

本书是根据高等专科学校“电力拖动自动控制系统”课程组制订的大纲编写的，着重阐述直流和交流电力拖动控制系统的基本结构的控制规律，既重视系统的基本理论，又深入介绍各类系统的应用实例，内容全面，深入适度。

全书共分八章，主要内容是：电力拖动控制系统的构成和控制单元、评价系统性能的基本指标；晶闸管变流器供电的直流电动机单环调速系统、双环调速系统和可逆调速系统的静态和动态性能分析，该类系统的工程校正方法和应用实例；晶体管变流器以及由其供电的直流电动机调速系统的组成和性能分析；异步电动机（专指感应电动机）变频调速系统的基本原理、性能和实例，其中包括由晶闸管、晶体管或可关断晶闸管变频器供电的几种系统；绕线转子异步电动机串级调速系统的性能和实用系统；大型同步电动机的励磁控制；同步电动机的变频调速技术；位置随动系统的控制技术；多电动机稳速系统以及张力控制系统的基本原理、性能和应用实例。

本书可作为高等专科学校“工业电气自动化”和“电气技术”专业的“电力拖动自动控制系统”课程教材，也可供职工大学、业余大学同类和相近专业使用，还可供电气工程技术人员学习参考。

## 交直流电力拖动控制系统

南京动力高等专科学校 王耀德 主编

责任编辑：韩雪清 版式设计：冉晓华  
封面设计：刘代 责任校对：姚竹青  
责任印制：卢子祥

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）  
邮政编码：100037

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）  
北京交通印务实业公司印刷  
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张20·插页1·字数498千字  
1996年5月第1版第2次印刷  
印数5 701—7 700·定价：16.00元

ISBN 7-111-03968-8/TM·501（课）

## 前 言

1991年4月在郑州召开的“全国高等专科电气类专业教材编审委员会”会议决定统编高等专科学校用的《电力拖动控制系统》教材，并委托南京动力高等专科学校（原名南京化工动力高等专科学校）于同年6月召开课程研讨会确定教材大纲。本书就是根据该大纲编写的，是高等专科学校“工业电气自动化”专业的规划教材。本书也可供职工大学，业余大学同类和相近专业使用，还可供电气工程技术人员参考。

本书的特点是：体系上交直流拖动系统兼顾并重，体现出专科教学的实用性和针对性；讲法上理论联系实际，着重于系统的应用和物理概念的阐述，每章都有系统的应用实例；内容上兼顾了当前专科学校的教学改革实际和电气技术发展两个方面，取材实用、新颖。为反映出本书的特色，1992年4月的审稿会上一致建议新教材的书名为《交直流电力拖动控制系统》。

全书由南京动力高等专科学校王耀德主编，并负责统稿。其中第一、四、六章由南京动力高等专科学校王耀德、彭延泰、杨洛源编写；第二章由湘潭机电专科学校刘祖润编写；第三章的第一~三节由常州工业技术学院陈寿铨编写；第三章的第四~六节由哈尔滨机电专科学校仲伟峰编写；第五章第一节和第七章由长沙有色金属专科学校曹晓波编写；第五章的第二、三节和第八章由上海纺织专科学校孙玺编写。彭延泰参加了文字符号和图形符号新标准的贯彻工作。

全书由湘潭机电专科学校张永丰主审。参加审稿的有上海机械专科学校孔凡才，上海轻工专科学校张东立，南京动力高等专科学校沈德全，南京机械专科学校勾厚政，南京金陵职业大学马忠一和重庆钢铁专科学校周芒等。

由于水平有限，缺点和错误之处在所难免，希望使用本教材的师生和其它读者提出批评和改进意见。

编 者

1992年8月

# 目 录

前言	
绪论	1
第一章 电力拖动控制系统的基本原理	3
第一节 系统的构成及基本原理	3
第二节 系统的控制单元	10
习题和思考题	22
第二章 直流电动机的单闭环调速系统	23
第一节 他励直流电动机调压调速时的静态和动态特性	23
第二节 晶闸管变流器的静态和动态特性	27
第三节 单环有静差调压调速系统	36
第四节 单环无静差调压调速系统	53
第五节 模拟控制系统的工程校正	58
第六节 功率晶体管的基本特性及其变流器	77
第七节 脉宽调速系统	98
习题和思考题	105
第三章 直流电动机的双闭环调速系统	108
第一节 转速、电流双闭环调速系统的组成和工作原理	108
第二节 双闭环系统的动态校正	115
第三节 双闭环调速系统设计与调试	123
第四节 直流调速系统的可逆运行及环流分析	131
第五节 有环流可逆调速系统	139
第六节 无环流可逆调速系统	150
习题和思考题	167
第四章 异步电动机的变频调速系统	169
第一节 变频变压时异步电动机的基本特性	169
第二节 电力半导体变频器	175
第三节 笼型异步电动机的变频调速系统	190
第四节 PWM型变频调速系统	199
第五节 异步电动机的矢量变换控制	214
习题和思考题	216
第五章 绕线转子异步电动机调速系统	218
第一节 串级调速系统	218
第二节 绕线转子异步电动机转子斩波调速系统	242
第三节 异步电动机调节定子电压的调速系统	247
习题和思考题	253
第六章 同步电动机的控制系统	254
第一节 同步电动机的励磁控制系统	254
第二节 它控式同步电动机变频调速系统	265
第三节 无换向器电动机的调速系统	269
习题和思考题	279
第七章 位置随动系统	280
第一节 概述	280
第二节 复合控制系统	280
第三节 随动系统中的若干问题分析	285
第四节 随动系统应用实例	293
习题和思考题	297
第八章 电力拖动的稳速系统和张力控制系统	299
第一节 稳速系统概述	299
第二节 多电动机协调稳速系统	300
第三节 张力控制系统	305
习题和思考题	313
参考文献	314

## 绪 论

电能是工业能源的重要形式之一，由于它的生产、变换、传送、分配、使用和控制都比较方便经济，而且适宜于大量生产和集中管理，因此将电能变为机械能的电动机成为现代生产的主要动力机械。控制方便、效率较高是电动机作为动力机械的突出优点，从而使电力拖动控制系统在冶金、机械、化工、石油、纺织、化纤、造纸以及矿山、水泥、铁路等工业部门和行业中得到广泛应用。

电力拖动（或称电气传动）控制系统就是对电动机实行自动控制，这门技术在近半个世纪以来获得飞速发展。由于功率半导体器件晶闸管的发展，电力拖动控制装备中的旋转交流机组为静止的晶闸管变流器所取代，使系统呈现出崭新的面貌。特别是80年代以来，由于全控型功率半导体器件、微电子器件以及现代控制理论的发展，在电力拖动控制领域中出现了一个革命性的变化，那就是交流电动机的控制技术取得了突破性的进展，并逐步形成了交流电机调速装置的新兴产业，增长速度之快令人震惊。因此说，电力拖动控制技术已进入一个更高层次的发展阶段。为适应新技术的发展，更新教材内容是势在必行的，以跟上电力拖动控制技术发展的潮流。

本教材是为高等工程专科学校工业电气自动化专业编写的，应体现专科教学的针对性和实用性、应用性和灵活性的特色。编写时作了如下安排：系统的分析先易后难，从静态特性到动态特性，从定性到定量，以定性为主，先讲直流电动机调速系统，后讲交流电动机调速系统，两者并重；进而介绍位置随动系统和多电动机稳速系统。以讲系统的基本结构和控制规律为主，部件和系统的线路为辅，选取的系统实例着眼于生产设备中正在使用和近期可能推广使用的系统，弃去一些较为陈旧的系统，使教材的篇幅不致膨胀。基本理论以够用为度，不追求完整的理论推导，以掌握概念、强化应用为重点。

全书共分八章。

第一章讲述电力拖动控制系统的构成和基本原理。提出衡量系统的性能指标，它是评价所有电力拖动控制系统的准则。在扼要阐述系统的构成之后，讲述了组成系统的主要通用的控制单元，便于以后各章以讲授控制规律为主。

第二和三两章依次讨论直流电动机的单环调速系统、双环调速系统和可逆调速系统。考虑到目前大多数工业生产设备中，使用的直流调速系统仍占有重要位置，因此以晶闸管变流器供电的直流电动机调速系统依然是课程内容的重点之一。在第二章中还介绍了大功率晶体管及由其组成的斩波器对直流电动机供电的调速系统，这是本书为适应全控型电力电子器件及其变流电路发展而增加的。在讲述上列系统的工作原理之后，两章中分别介绍了有关系统的实例。

第四、五和六章依次讨论异步电动机（感应电动机）变频调速系统、绕线转子异步电动机串级调速系统和同步电动机控制系统，它们是课程内容的又一个重点。在简要介绍晶闸管变频器后，还介绍了以全控型功率半导体器件组成的变频器，这类变频器对当今交流电动机变频调速系统得到广泛应用和推广起到关键作用。将功率晶体管器件放在第二章介绍，在第

四章中进而介绍可关断晶闸管，避免不必要的重复。本书对晶体管变频器供电的交流电动机变频调速系统给予充分的重视，是由于这类系统有着非常广阔的发展前景，在许多场合将取代直流调速系统。

绕线转子异步电动机串级调速系统属于高效调速系统，在节能技术中有着潜在的优势。第五章在讲述该系统的组成和工作原理之后，介绍了目前国内推广应用的系统实例。大型同步电动机的励磁控制技术是一项值得重视的技术，而同步电动机变频调速系统也是交流电机调速系统中很重要的一个分支，第六章对这两方面作了专门讨论。

第七章介绍的是位置随动系统，虽说这类控制系统是输出量为电机轴上的转角（即位置），但它有特定的结构和性能要求。第八章则是介绍多电动机稳速系统以及张力控制系统，这类系统在造纸机、化纤纺丝机、印染机以及轧钢机等设备上得到广泛应用，每一个电力拖动控制系统就是生产过程综合自动化的基础单元。

本书前五章是基本部分，后三章可视各校教学情况选讲部分内容。个别加\*的小节作为参考内容。

编者

1993年2月

# 第一章 电力拖动控制系统的基本原理

电力拖动控制系统是以电动机为受控对象，对生产机械按工艺要求进行控制的电力拖动系统。这类系统的基本部分可以包括电动机、控制电器、检测元件、功率半导体器件和处理信息的微电子器件等。如果采用数字控制方案，还可能包含微型计算机。一个现代化的生产车间往往有许多套电动机拖动控制系统，可能要用多级微型计算机进行控制，还有通信设备和屏幕显示器等。

电力拖动控制系统一般以实现一种预定的自动控制功能为目的，来满足生产工艺和过程的要求，并达到最优的技术经济指标。因此，这类系统总是整个生产设备中的重要组成部分之一，它的性能和质量将在很大程度上影响到产品的质量、产量、生产成本和工人的劳动条件。

过去，在电力拖动控制系统的实际应用中，直流电动机调速系统占主要地位，交流电动机调速系统在应用中仅处于补充的辅助地位，应用量很少。但是，随着电力电子器件和微电子器件的发展，交流电动机调速系统已进入实用化阶段，特别是在交流电动机变频调速领域内正在日新月异地向前发展，已具有能与直流调速系统相竞争的地位。因此，本书将不限于只讨论直流调速系统，也重视交流调速系统的讨论。

## 第一节 系统的构成及基本原理

### 一、电动机的调速方法

#### (一) 直流他励电动机的调速

直流他励电动机的转速与其控制量和参数的关系为

$$n = \frac{(U_a - I_a R_a)}{K_a \phi} \quad (1-1)$$

式中， $n$ 为电动机转速； $U_a$ 为电枢电压； $I_a$ 为电枢电流； $R_a$ 为电枢电阻； $\phi$ 为励磁磁通； $K_a$ 为直流电动机的电动势系数，它决定于电动机结构参数。

由式(1-1)可见，控制直流他励电动机的转速可以有三种方法：①改变向电枢供电的电压 $U_a$ ，通常只能在额定电枢电压以下调节；②改变电动机磁通 $\phi$ ，通常只能在额定磁通以下调节；③在电枢电路中串接附加电阻，用这种方法实现调速时，附加电阻上的损耗较大，电动机的机械特性较软，一般应用于少数小功率场合。工程上常用的主要是前两种调速方法。

#### 1. 改变电枢供电电压来调速

从式(1-1)可知，在他励直流电动机上，电枢电压一般只向小于额定电压的方向变化，电动机转速将低于额定转速，机械特性将向下平行移动。

为了得到可调节的直流电压，常常需要用专门的电源来实现。过去，是由专用的直流发电机作为直流电压可调电源，由交流电动机（异步或同步电动机）带动直流发电机，如图



1-1所示，发电机向需要调速的直流电动机供电，调节发电机的励磁电流 $I_f$ 的大小，能够方便地改变其输出电压 $U_a$ ，从而调节直流电动机的转速 $n$ 。这里的交流电动机和直流发电机，称为旋转变流机组，所组成的调速系统简称为G-M系统。

为了供给直流发电机和电动机的励磁电流，还需设置一台直流励磁发电机GE、它可以装在变流机组上由交流电动机同轴带动，也可以另外专用一台交流电动机拖动。励磁发电机的电压一般为固定大小和极性。通过调节电位器RP便可改变 $I_f$ 的大小，即可调节 $U_a$ 的大小。如要改变发电机的励磁电流 $I_f$ 的方向，则要用正向和反向继电器KF和KR（或用正反方向接触器）来切换，电枢电压 $U_a$ 的极性和转速 $n$ 的转向都跟着改变。因此，调速电动机的可逆旋转是比较容易实现的。

旋转变流机组包括两台与调速电动机容量相当的旋转电机和另一台容量小一些（约为调速电动机励磁功率的两倍）的励磁发电机，因此设备多，体积大，费用高，效率低，机组安装需要基础，运行有噪声，维护工作量大。为了克服这些缺点，从60年代以来，旋转变流机组逐渐为静止的晶闸管变流装置所代替，后者设备少，体积小，费用低，效率高，装置无需基础，运行噪声低，维护工作量小，但是这类装置技术较为复杂，对维护人员的技术水平要求较高，对元器件质量要求较高（否则将导致装置的可靠性下降），另外存在深控时功率因数低以及冲击负载时对电网有功和无功功率冲击大等缺点。

由晶闸管可控整流装置VTH供电给直流电动机的系统如图1-2所示。通过调节触发器AT的控制电压 $U_c$ 来移动触发脉冲相位，便可改变整流电压 $U_d$ ，经平波电抗器LF向直流电动机供电，电动机励磁恒定，从而实现电动机在额定转速以下的调速。与旋转变流机组相比，晶闸管可控整流装置不仅在经济性和可靠性上有所提高，而且在技术性能上还有很大的优势，如晶闸管可控整流装置的功率放大系数在 $10^4$ 以上，比变流机组的约高三个数量级；在控制作用的快速性上，晶闸管装置是ms级，而机组是s级；因此，在图1-2系统基础上构成的闭环系统的动态性能，要比图1-1系统的高得多。目前，世界上各主要工业国家的直流调速系统都已改用晶闸管可控整流装置来供电。

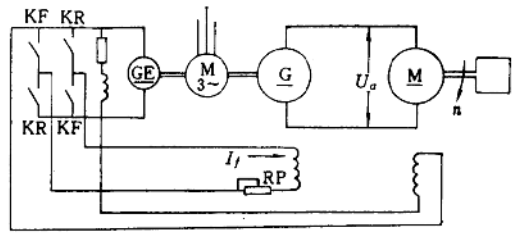


图1-1 用变流机组的直流电动机调速系统

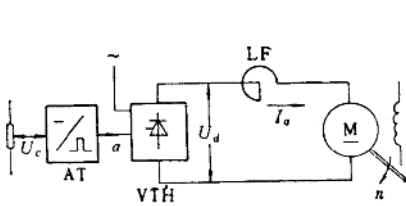


图1-2 晶闸管整流器供电的直流电动机调速系统

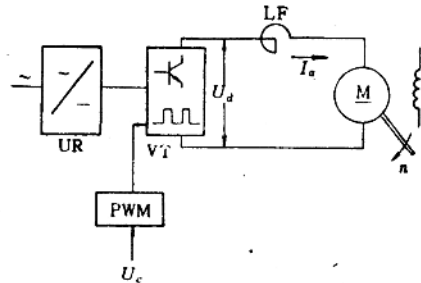


图1-3 晶体管斩波器供电的直流电动机调速系统

对于小容量直流电动机拖动系统,可以用硅二极管整流电路UR,先将电网交流电整为直流电,通过大功率晶体管组成的斩波器VT得到可变的直流电压 $U_d$ ,经平波电抗器LF向直流电动机供电,从而实现电动机的调速,如图1-3所示。直流斩波器输出电压 $U_d$ 平均值是由其输出脉冲占空比来调节的,改变脉宽调制器PWM的控制电压 $U_c$ 即可以改变输出脉冲的占空比。这类装置除具有晶闸管可控整流装置的一般优点外,还具有功率因数高的优点。这类系统还可用于有公共直流电源或蓄电池供电的场合,如电车和蓄电池车(电瓶车)等电动车辆。

## 2. 改变励磁电流来调速

他励直流电动机的励磁电流一般只能向小于额定励磁电流的方向变化,于是磁通总是小于额定值,电动机的转速在额定电枢电压下都将高于额定转速,其机械特性向上移动。减弱磁通,电动机能运行的最高转速 $n_{max}$ 受到电动机换向和机械强度的限制,其值由制造厂规定。

减少励磁电流的方法,过去是由固定直流电源向电动机的励磁绕组供电,用串接附加电阻的方法来调低电流;或者用特殊的交磁电机放大机来调节励磁电流。所谓交磁电机放大机就是一种具有功率和电流放大作用的特殊电机。在现代直流调速系统中,往往由专用的晶闸管可控整流电路或其它型式的半导体器件的可控电路向电动机励磁绕组供电,调低供电电压,便可减少励磁电流。

## (二) 异步电动机<sup>⊖</sup>的调速

异步电动机的转速与其控制量和参数的关系为

$$n = \frac{60f_1(1-s_p)}{p} \quad (1-2)$$

式中, $n$ 为电动机转速(r/min); $f_1$ 为定子供电频率(Hz); $p$ 为极对数; $s_p$ 为转差率。

由此,改变异步电动机的转速,可以有三种方法:①改变供电频率 $f_1$ ;②改变电动机的转差率 $s_p$ ;③改变极对数 $p$ ,这种调速方法是靠改变笼型异步电动机定子绕组接法来改变定子极对数,需要专用的双速或多速电动机,且只有两个或多个运行转速,不能实现连续调速。工程上常用的连续调速方法是前两种。

用一个输出频率和电压可变的变频器GF对异步电动机M供电,如图1-4所示,改变变频器输出频率,便可调节异步电动机的转速。加在电动机定子上的频率向额定频率以下变化时,电动机的转速将低于额定转速,机械特性向下移动;当定子频率向额定频率以上变化时,转速将高于额定转速,机械特性向上移动。

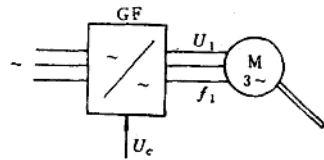


图1-4 交流电动机的变频调速

过去,变频电源也用变频机组组成,它由异步电动机带动直流发电机和由直流电动机带动同步发电机的两套机组构成。直流发电机对直流电动机供电,调节直流发电机的电枢电压,便可改变直流电动机的转速,从而改变同步发电机的输出频率,以达到变频的要求。由于这种旋转机组的变频设备庞大、效率低、性能差,因此无法普及使用,只有在晶闸管或晶

<sup>⊖</sup>本书中异步电动机专指感应电动机。

体管的静止变频器技术实用化后,变频调速才能得以广泛应用。采用静止变频器可使异步电动机具有高效、宽范围的调速性能,而且还能获得良好的动态特性。这类调速方案正受到国内外的普遍重视。

此外,通过改变异步电动机转子电路外接阻抗或附加电动势,通过改变异步电动机定子电压(频率不变),都有可能改变电动机的转差率,从而实现调速。这类方案技术上均较为简单,但其效率和调速性能一般较差,应用中有局限性。

## 二、系统的静态和动态性能指标

### (一)系统的静态性能指标

系统的静态性能指标有静差率、调速范围和调速平滑性等项。

静差率用来表示负载转矩变化时电动机转速变化程度,其涵义是,在系统的一条机械特性(曲线)上,如图1-5所示,电动机的负载由理想空载增加到额定值 $T_N$ ,所引起的转速降落 $n_{d.N}$ 与理想空载转速 $n_0$ 之比,用百分数 $s$ 表示,即

$$s = \left( \frac{n_{d.N}}{n_0} \right) \times 100\% \\ = \frac{n_0 - n_N}{n_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

可见,在相同的空载转速下,机械特性越硬,转速降 $n_{d.N}$ 越小,静差率 $s$ 越小。如图1-5中所示的两条相互平行的直线型的机械特性的静差率是不同的,虽然两个特性有相同的转速降落,但低速时对应的理想空载转速较低,故低速时静差率变大。在一个电力拖动系统中,如果能满足最低转速运行时静差率 $s \leq (n_{d.N}/n_{0.min}) \times 100\%$ 的要求,则其它转速下的静差率一般都能满足要求。

需要指出的,在考核实际的电力拖动系统的静差率时,由于理想空载转速不易确定,常常将静差率定义为,负载由空载 $T_I$ 到额定负载 $T_N$ ,空载下转速 $n_I$ 与额定负载下转速 $n_N$ 之差的相对值,即

$$s = - \frac{n_I - n_N}{n_N} \times 100\% \quad (1-4)$$

这个定义以额定负载下的转速 $n_N$ 为基值,取实际空载而不是“理想”空载,更合乎实用。

电力拖动控制系统的调速范围,是指电动机在额定负载下静差率 $s$ 不大于指定值时,运行的最高转速 $n_{max}$ 与最低转速 $n_{min}$ 之比,以 $D$ 代表,即有

$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}} \quad (1-5)$$

它又称为调速比。根据这个指标,电力拖动系统可以分为:①调速范围小的系统,一般指 $D < 3$ ;②调速范围中等的系统, $3 \leq D < 50$ ;③调速范围宽的系统,一般指 $D \geq 50$ 。现代电力拖动控制系统的调速范围可以做到 $D \geq 10000$ 。

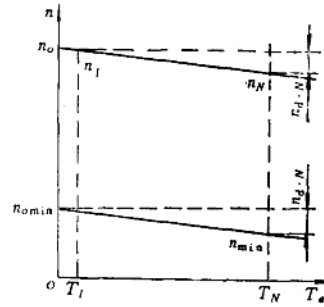


图1-5 调速时机械特性

若要获得尽可能大的调速比,就需增大 $n_{max}$ 或减少 $n_{min}$ 。实际上它们是不能任意增大或减小的。电动机的最高工作转速 $n_{max}$ 受到机械强度等因素的限制,通常就是电动机的额定转速 $n_N$ 。而最低转速 $n_{min}$ 又受到静差率的限制,因为电动机负载是经常发生变化的,静差率大时将会出现较大的转速波动,甚至会使电动机停转,而无法稳定运行。因此,对一个电力拖动系统而言,离开静差率来讲调速范围,将是无意义的,必须以一定的静差率为条件来定义调速范围。参见图1-5,假定以电动机的额定转速 $n_N$ 为最高工作转速 $n_{max}$ ;在最低工作转速 $n_{min}$ 下满足静差率 $s$ 的要求,利用式(1-3)就有

$$s = (n_{d \cdot N} / (n_{d \cdot N} + n_{min})) \times 100\%$$

$$\text{即 } n_{min} = n_{d \cdot N}(1-s)/s$$

于是调速范围 $D$ 可以表示为

$$\begin{aligned} D &= \frac{n_{max}}{n_{min}} = \frac{n_N}{\frac{n_{d \cdot N}(1-s)}{s}} \\ &= \frac{s n_N}{(1-s)n_{d \cdot N}} \end{aligned} \quad (1-6)$$

可见,在电动机额定转速 $n_N$ 和静差率指标 $s$ 一定的条件下,要扩大调速范围 $D$ 必须减小转速降 $n_{d \cdot N}$ ,即要提高机械特性硬度。

应当指出,电力拖动控制系统中电动机的转速调节与一个机械特性上的转速变化 $n_d$ 是两个不同的问题。一个机械特性上的转速变化是指电动机在一定的电源和电路参数下,由负载转矩变化引起的。而电动机的转速调节是指在一定负载条件下,靠改变专门的电源或电路参数,使电动机运行到另一个机械特性上,使转速得以改变。这种电气参数的改变,可以用人工变动或自动调节系统参数的方法来实现。

电力拖动系统的另一项静态指标是调速平滑性,它用调速时可以得到相邻转速之比来说明。无级调速时,该比值接近于1,即转速可以连续平滑调节。

## (二)系统的动态性能指标

电力拖动控制系统从一种转速调节到所需的另一种转速,并不是瞬间就能完成的,由于实际系统存在着电磁和机械惯性,因此总有一个动态过程。衡量电力拖动控制系统动态性能的主要指标是两个方面:

一是电动机转速对给定输入跟随的性能指标,对于一般的调速系统而言,可以用单位阶跃输入 $X_{in}(t)$ 下系统输出 $X_{ss}(t)$ 响应的过渡过程时间 $t_t$ 和超调量 $\sigma$ 来表示系统对给定输入的跟随能力,如图1-6所示。粗略地讲,过渡过程时间 $t_t$ 短表示系统跟随的快速性好;超调量 $\sigma$ 小表示系统的稳定性好。然而在实际系统中,快速性和稳定性往往是互相矛盾的。压低了超调量往往就延长了过渡过程;加快了过渡过程却又增大了超调量。对于一般要求的系统,可以根据生产工艺的要求,哪一方面的性能是主要的,就以哪方面为主。对于特殊的要求较高的系统还可以考虑采用一些综合性的优化性能指标,本书只讨论前者。

二是电动机转速对扰动作用抵抗能力的性能指标,系统抗扰能力的动态性能指标可以用突加阶跃扰动 $X_N(t)$ 下输出 $X_{ss}(t)$ 响应的最大动态降落百分数 $C_{max}\%$ 和恢复到其稳态值的95%(或98%)以内所需的时间 $t_r$ 来表示, $t_r$ 叫做恢复时间,如图1-7所示。粗略地讲,阶跃扰动作用下电动机转速的动态升降愈小,恢复得越快,说明系统的抗扰能力愈强。

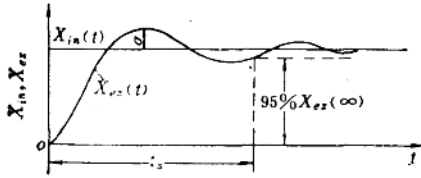


图1-6 跟随性能指标

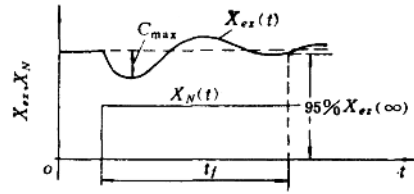


图1-7 抗扰性能指标

上述这些动态性能指标都属于时域上的，它们能够直观地反映生产机械和工艺对电力拖动控制系统的要求。

### 三、转速负反馈系统的组成

前面讲到的直流和交流电动机系统都是没有反馈控制的开环系统，其特点是在直流电动机的供电电压一定，或者交流电动机的供电频率和电压一定时，负载变化（如增加）时，电动机转速也相应变化（如下降）。这种情况下，电动机的转速变化往往较大，不能得到较大的调速范围。

为了减小静态转速降落，提高机械特性硬度，扩大电动机的调速范围，常常引入转速负反馈构成闭环控制系统。为便于说明该类系统的构成原理，现以晶闸管可控整流器供电的直流电动机系统为例进行讨论。

典型的晶闸管整流器供电的直流电动机拖动系统如图1-8所示。直流他励电动机由晶闸管可控整流器VTH经平波电抗器LF供电，整流器VTH用方框来代表，内画一个晶闸管符号，它可以由任何一种单相或多相晶闸管整流电路组成，其整流电压 $U_d$ 由控制角 $\alpha$ 来调节。触发器AT的输入电压为放大器A的输出电压 $U_{ct}$ ，而放大器A的输入信号 $U_c$ 为转速给定电压 $U_n^*$ 与转速反馈信号电压 $U_n$ 之差，即

$$U_c = U_n^* - U_n \quad (1-7)$$

式中 $U_c$ 又称为偏差信号。转速反馈信号 $U_n$ 取自测速发电机TG电枢。测速发电机与主电动机同轴联结（或经齿轮等传动机械联结），图中示出的测速机为永磁式的，也可以用其它类型的。测速发电机的电枢电压 $U_{tg}$ 与主电动机M的转速 $n$ 成正比，即有

$$U_{tg} = C_{e, tg} n \quad (1-8)$$

式中 $C_{e, tg}$ ——测速发电机的电动势常数。

$U_{tg}$ 经电位器分压，引出与之成正比例的 $U_n$ 作为反馈信号。

在讨论图1-8中系统的转速自动调节过程之前，先讲一讲没有反馈时直流电动机在晶闸管可控整流器供电下的机械特性方程。在控制角 $\alpha$ 为某一值时，晶

管整流器的整流输出电压 $U_{d.o} = U_{d.m} \cos \alpha$ ，这里 $U_{d.m}$ 为 $\alpha = 0$ 时晶闸管可控整流器输出的最大整流电压，于是可以写出直流电动机的转速方程为

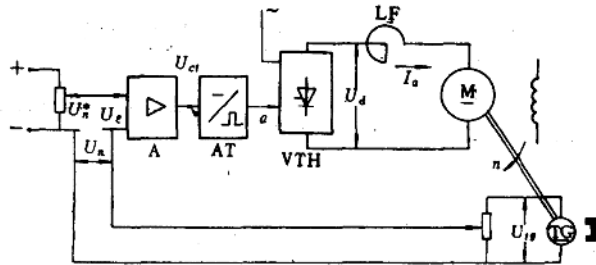


图1-8 直流电动机闭环调速系统

$$n = \frac{U_{d,m} \cos \alpha - I_a R}{C_e} \quad (1-9)$$

式中  $R$ ——主回路的总电阻，包括平波电抗器电阻和电动机电枢电阻。不考虑电枢电流断续的情况，即假定电流总是连续的，可视  $R$  为常值。

当系统为开环控制时，控制角  $\alpha$  固定不变，电动机负载增大时，电枢电流也要增大，由于主回路存在  $R$ ，产生电压降  $I_a R$ ，使得电动机电枢电动势降低，转速降落较大。

当系统接有转速负反馈之后，将产生如下的转速自动调节过程。在某一规定转速下，加给系统的输入信号是固定的给定电压  $U^*$ 。设电动机空载运行时，电枢电流  $I_a$  很小，接近于零，加到放大器A输入端的电压  $U_i = U^* - U_n$ ，放大器A输出电压  $U_{ci} = K_p U_i$ ，这里的  $K_p$  为放大器的电压放大系数。触发器AT的输入为电压  $U_{ci}$ ，其输出是控制角为  $\alpha$  的触发脉冲。晶闸管可控整流器输出电压为  $U_{d,o}$ ，电动机以规定的转速  $n$  运行。与  $n$  对应，系统中有转速负反馈电压信号  $U_n$ ，当电动机轴上负载转矩增加时，电枢电流  $I_a$  增大，由于产生电压降  $I_a R$ ，使电动机转速下降，小于规定转速  $n$ ，于是测速发电机的电枢电压  $U_{iz}$  和反馈电压  $U_n$  跟着下降，由于转速给定电压  $U^*$  是固定的，加到放大器输入端的电压  $U_i$  便自动增加了，从而使  $U_{ci}$  增大，控制角  $\alpha$  减小，晶闸管可控整流器输出电压增加到  $U'_{d,o} > U_{d,o}$ ，电动机转速  $n$  便能回升，以维持转速近似不变，于是因负载增大引起的转速降比开环控制时小了。

从以上分析可知，构成转速负反馈系统可以减小静态转速降落。放大器的电压放大系数越大，这种转速自动调节作用越强。放大器可以是简单直放放大器，也可以采用运算放大器。当采用运算放大器时，

系统的组成如图1-9所示，其中运算放大器N上采用并联输入接法，因为运算放大器的反相输入端  $\sigma$  可看成虚地，故能将几个有共地点的电压输入信号组合变为几个电流输入信号的组合。这样就可以避免信号串联输入接法的缺点（由于几个输入信号串联，不可能有公共接地端，没有公共接地线易引入干扰）。

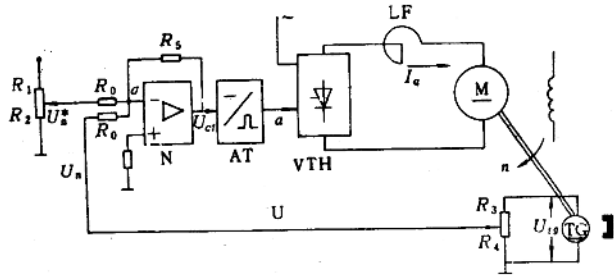


图1-9 直流电动机闭环调速系统

若在运算放大器输出与输入之间接入不同阻抗的反馈网络，便可实现对输入信号的组合和运算，以满足对系统的性能指标要求。通常将运算放大器及其反馈网络的组合称为调节器，调节器线路和性能的详细分析，下面还要专门讨论。

同样，改变系统的转速给定电压  $U^*$  就可以方便地改变电动机的转速，这就是系统的调速功能。例如当转速给定电压由  $U^*_{n1}$  增加到  $U^*_{n2}$  时，电动机转速就会从  $n_1$  提高到  $n_2$ 。因为原来与  $U^*_{n1}$  对应的有转速反馈  $U_{n1}$ 、偏差电压  $U_{i1}$  产生控制电压  $U_{ci1}$ ，晶闸管整流器输出整流电压  $U_{d,o1}$ ，使电动机得以在转速  $n_1$  下运行。现在  $U^*_{n1}$  变大为  $U^*_{n2}$ ，转速尚未改变，则偏差电压  $U_i$  就要增大，相应地  $U_{ci}$ 、 $U_{d,o}$  都要变大，电枢电流  $I_a$  增大，电动机产生的转矩增大，转速必然提高，直至  $n_2$ ，在新的工作点运行。这时相应地有  $U_{i2}$ 、 $U_{ci2}$ 、 $U_{d,o2}$  和  $U_{n2}$ ，保持新的平衡，即有  $U^*_{n2} - U_{n2} = U_{i2}$  产生  $U_{d,o2}$ ，维持电动机稳定运行。

因此，一个调速系统就具有两方面的功能，一是转速跟随给定的调节功能，另一是抑制负载转矩对转速的影响，即抗扰动的功能。全面评价一个系统的性能往往要从这两方面来评估。

## 第二节 系统的控制单元

电力拖动控制系统大体上可以分成电力和控制两大部分，电力部分通常包括电动机、变流器和工作机械，其功能是进行能量转换和调节；控制部分通常包括检测、转换环节和调节器，其功能是取得和处理系统中有关变量的信息，并按预定的控制（或调节）规律产生控制信号或作用。具体来讲，控制部分可以由一些基本的控制单元组成，如控制用的直流稳压电源、给定信号发生器、调节器、电流和电压检测单元、转速检测单元以及晶闸管的触发器和晶体管的驱动器等。

涉及上述控制单元的线路，有的已在其它课程中（如电子技术、电力电子学等）讨论过或详细讨论过，就不再重复。这里仅介绍电力拖动控制系统中，有特定技术要求的，或是交直流系统中通用的一些单元。有些单元的线路将在以后各章介绍系统时予以讨论。

### 一、模拟型调节器

电力拖动控制系统中所用的模拟型调节器大都是由半导体运算放大器和电阻、电容网络组成的。由于所用运算放大器有很高的开环放大系数（可达 $10^6$ ）和很高的输入电阻（可达兆欧级），很小的输入电流，所以在正常工作范围内，就认为调节器是由理想的运算放大器构成的，即认为放大器的放大系数无穷大，输入电流为零。图1-10a线路是反相调节器，而图1-10b是同相调节器线路，图1-10c则是另一种反相调节器线路。

按图1-10a线路可以写出输入和反馈电路的电压方程为

$$U_{in} - U_{\sigma} = IZ_r, \quad U_{\sigma} - U_{ox} = IZ_f$$

式中  $Z_r$ 、 $Z_f$ ——分别为输入网络和反馈网络的复数阻抗。

按理想调节器的假定，输入电流  $I$  等于反馈电流  $I_f$ ， $U_{\sigma} = 0$ ， $\sigma$  为虚地，那么反相调节器的传递函数就是

$$W(s) = - \frac{Z_f}{Z_r} \quad (1-10)$$

类似地可以求得图1-10b中同相调节器的传递函数为

$$W(s) = 1 + \frac{Z_f}{Z_p} \quad (1-11)$$

反相调节器用得最多，除特别说明外，以后所说的调节器均是指反相调节器。

由式(1-10)和式(1-11)可见，调节器的传递函数可由输入和反馈网络的复数阻抗求得。用不同结构和参数的电阻-电容网络，就可求出各种结构的调节器的传递函数。表1-1列出几种常用的调节器的线路、传递函数以及对阶跃

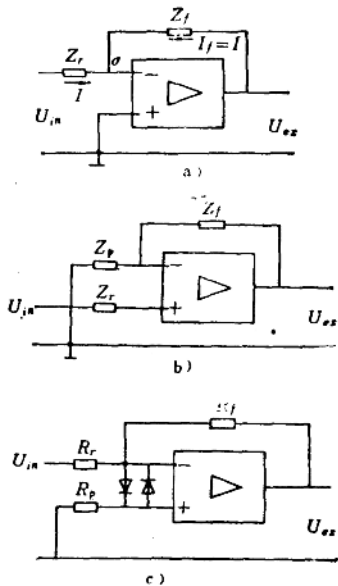


图1-10 调节器单元线路

表1-1 调节器的类型和性能

符号	名称	线路图	传递函数	阶跃输入过渡函数	对数频率特性	备注
P	比例		$W(s) = K_p$ $K_p = \frac{R_f}{R_r \beta}$ $\beta = (10 - \alpha) / 10$			$K_p = 1$ 为倒相器 $R_w, R_f$
I	积分		$W(s) = \frac{1}{\tau_i s}$ $\tau_i = R_r C_f$			
PI	比例-积分		$W(s) = K_p + \frac{1}{\tau_i s} = K_p \frac{1 + \tau_d s}{\tau_d s}$ $K_p = R_f / R_r$ $\tau_i = R_r C_f$ $\tau_d = K_p \tau_i = R_f C_f$			
D	微分		$W(s) = \tau_d s$ $\tau_d = R_f C_r$			



(续)

符号	名称	线路图	传递函数	阶跃输入过渡函数	对数频率特性	备注
PD	比例		$W(s) = K_p(1 + \tau_d s)$ $K_p = R_f / R_r$ $\tau_d = R_r C_r$			
	微分		$W(s) = K_p(1 + \tau_d s)$ $K_p = 2R_f / R_r$ $\tau_d = \frac{R_f C_f}{2}$			
PID	比例		$W(s) = \frac{(1 + \tau_{d1}s)(1 + \tau_{d2}s)}{\tau_i s}$ $= K_p \frac{(1 + \tau_{d1}s)(1 + \tau_{d2}s)}{\tau_{d1}s}$ $K_p = R_{f1} / R_r$ $\tau_{d1} = K_p \tau_i$ $\tau_{d2} = R_{f1} C_{f1}$			
	积分		$W(s) = \frac{(1 + \tau_{d1}s)(1 + \tau_{d2}s)}{\tau_i s}$ $= K_p \frac{(1 + \tau_{d1}s)(1 + \tau_{d2}s)}{\tau_{d1}s}$ $K_p = R_f / R_r$ $\tau_{d1} = K_p \tau_i$ $\tau_{d2} = \frac{R_{f1} R_{f2} C_{f1}}{R_{f1} + R_{f2}}$			$R_{f1}, R_{f2}$ $C_{f1}, C_{f2}$