

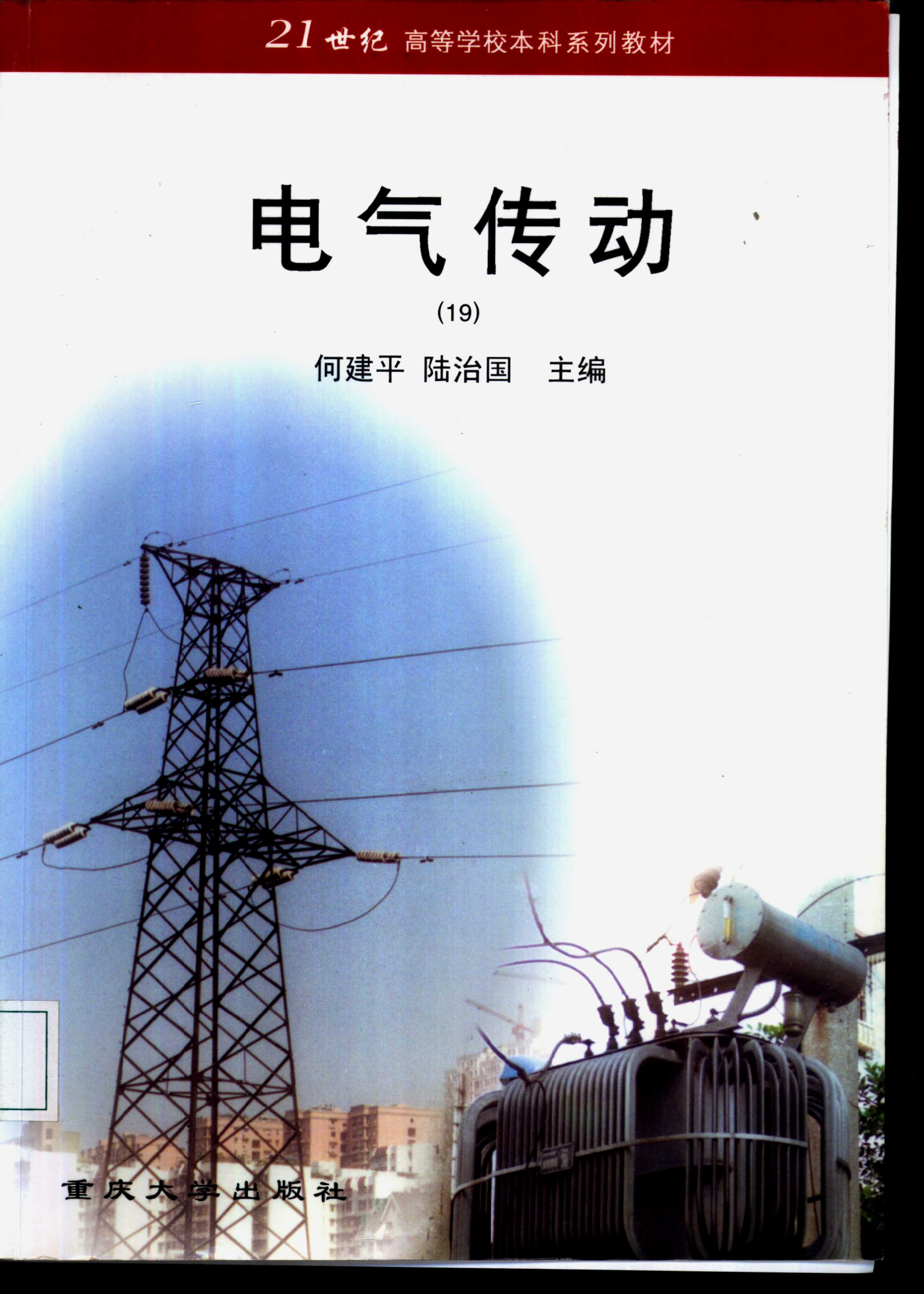
21 世纪 高等学校本科系列教材

电气传动

(19)

何建平 陆治国 主编

重庆大学出版社



TM921
H-427

电气传动

何建平 陆治国 主编

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书较为系统地介绍了交直流电气传动系统的理论及应用。直流调速系统部分包括单闭环、双闭环调速系统,可逆调速系统和脉宽调速系统。交流调速部分包括异步电动机变频调速、矢量控制、直接转矩控制,绕线式转子异步电动机串级调速系统,通用变频器等。

本书可作为电气工程及自动化专业或相近专业本科教材,也可作为科研设计单位及厂矿工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电气传动/何建平,陆治国主编. —重庆:重庆大学出版社,2002.3

电气工程及其自动化专业本科系列教材

ISBN 7-5624-2440-3

I.电... II.何...陆... III.电气传动—高等学校—教材 IV.TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 087206 号

电气传动

何建平 陆治国 主编

责任编辑 梁 涛

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

自贡新华印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:14.5 字数:362 千

2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月第 1 次印刷

印数:1—5 000

ISBN 7-5624-2440-3/TM921 定价:21.00 元

前言

《电气传动》是电气工程及自动化专业的重要专业课程之一。本书在吸收有关教材长处及本领域新技术内容的基础上,注重课程内容的整合,将交直流传动系统合在一起编写,精选课程内容;注重先进技术的应用,重点介绍了直流脉宽调速,交流调速的矢量控制、直接转矩控制原理,通用变频器的实用技术,交直流调速系统的微机控制等内容;注重理论与实践相结合,在阐述理论的基础上,适量列举工程应用实例,并配有习题,有助于读者理解掌握理论,提高处理实际问题的能力。

本书共分10章,第1章为绪论,第2章、第3章、第4章、第5章为直流传动系统及其应用,第6章、第7章、第8章、第9章为交流传动系统及其应用,第10章为交直流传动系统的微机控制简介。

本书的第1章、第2章、第3章、第4章由何建平编写,第5章、第6章、第7章、第8章、第9章、第10章由陆治国编写,其中7.6节直接转矩控制部分由王明渝编写。全书由何建平统稿。

四川工业学院张广溢教授对本书的编写提出了许多有益的建议,夏帮贵老师、研究生王铁军帮助编者做了许多具体的工作。在此,向上述人员和所列主要参考文献的作者表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有错误和不当之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2001.12

目录

第1章 绪 论	1
1.1 电气传动在国民经济中的作用及发展概况	1
1.2 电气传动的动力学基础	3
习题	8
第2章 闭环直流调速系统的组成及其特性	11
2.1 概述	11
2.2 单闭环直流调速系统的稳态特性与动态特性	14
2.3 转速、电流双闭环调速系统及其稳态特性	23
2.4 双闭环调速系统的动态特性	26
习题	32
第3章 可逆直流调速系统	34
3.1 可逆调速系统原理	34
3.2 可逆调速系统的回馈制动	37
3.3 可逆调速系统的环流	39
3.4 有环流可逆调速系统	41
3.5 无环流可逆调速系统	45
习题	57
第4章 直流脉宽调速系统	59
4.1 脉宽调制变换器	59
4.2 脉宽调速系统的开环机械特性	65
4.3 脉宽调速系统的控制电路	66
4.4 直流脉宽调速系统的特殊问题	70
习题	78
第5章 双闭环直流调速系统的工程设计	80
5.1 工程设计的基本方法	80
5.2 双闭环调速系统的设计	91
5.3 设计举例	97

习题	99
第 6 章 交流调速系统概况	101
6.1 交流调速的应用	101
6.2 交流调速的基本类型	102
6.3 交流调速的主要问题	104
6.4 交流调速的方案选择	104
习题	105
第 7 章 异步电动机变压变频调速系统	106
7.1 变频调速的基本控制方式	106
7.2 异步电动机变频调速时的稳态机械特性	108
7.3 转速开环变频调速系统	112
7.4 转差频率控制的转速闭环调速系统	130
7.5 异步电动机矢量变换控制系统	137
7.6 感应电动机的直接转矩控制	156
习题	171
第 8 章 绕线式异步电动机串级调速系统	172
8.1 串级调速工作原理	172
8.2 串级调速系统的性能	177
8.3 异步电动机在串级调速时的机械特性	180
8.4 串级调速系统的设计	188
习题	195
第 9 章 通用变频器及其应用	196
9.1 通用变频器的构成及主要功能	196
9.2 通用变频器控制方式	197
9.3 通用变频器及外部设备选择	201
9.4 通用变频器的安装、接线、调试和使用方法	204
习题	207
第 10 章 微机控制的交直流调速系统	208
10.1 微机控制调速系统的基本原理	208
10.2 微机控制的直流调速系统	209
10.3 微机控制的交流调速系统	213
习题	215
常用符号表	216
参考文献	223

第 1 章

绪 论

1.1 电气传动在国民经济中的作用及发展概况

电气传动又称电力拖动,是以电动机作为原动机驱动生产机械的系统的总称。它是为了合理地使用电动机,通过对电动机的控制,使被拖动的机械按照某种预定的要求运行。电气传动系统是将电能转变为机械能的装置,用以实现生产机械的起动、停止、速度调节以及各种生产工艺过程的要求。国际电工委员会将电气传动归入“运动控制”范畴。

电气传动系统由电动机、控制装置以及被拖动的生产机械所组成。其主要特点是功率范围极大,单个设备的功率可从几毫瓦到几百兆瓦;调速范围极宽,转速从每分钟几转到每分钟几十万转,在无变速机构的情况下调速范围可达 1:10 000;适用范围极广,可适用于任何工作环境与各种各样的负载。电气传动与国民经济、人民生活有着密切的联系并起着重要的作用,广泛用于冶金、机械、轻工、矿山、港口、石化、航空航天等各个行业以及日常生活之中。它既有轧钢机、起重机、泵、风机、精密机床等大型调速系统,也有空调机、电冰箱、洗衣机等小容量调速系统。据统计,电气传动系统的用电量占我国总发电量的 60% 以上。据预测,从 2000 年至 2010 年我国电气传动产品市场需求年增长率约为 15%,市场前景广阔。因此电气传动是国民经济中充满活力的基础技术和高新技术,它的发展和进步已成为更经济地使用材料、能源、提高劳动生产率的合理手段;成为促进国民经济不断发展的重要因素;成为国家现代化的重要标志之一。正确使用电气传动系统并使之进一步向前发展,对国民经济建设具有十分重要的现实意义。

电气传动可分为不调速和调速两大类。按照电动机的类型不同,电气传动又分为直流与交流传动两大类。直流电气传动与交流电气传动在 19 世纪先后诞生,但当时的电气传动系统是不调速系统。随着社会化大生产的不断发展,生产制造技术越来越复杂,对生产工艺的要求也越来越高,这就要求生产机械能够在工作速度、快速起动和制动、正反转运行等方面具有较好的运行性能,从而推动了电动机的调速技术不断向前发展。需要指出的是,电气传动与自动控制关系密切,调速传动的控制装置主要是各种电力电子变流器,它为电动机提供可控的直流或交流电流,并成为弱电控制强电的媒介。电力电子技术的前身是汞弧整流器、闸流管变流技术。1957 年晶闸管(SCR)的诞生标志着电力电子技术的问世。1960—1980 年为电力电子技术第一代,其特征是以晶闸管及其相控变流技术为代表,人们称第一代为整流器时代。1980 年以后进入大功率晶闸管(GTR)、可关断晶闸管(GTO)等自关断电力电子器件及逆变技术为代表的第二代,有人称其为逆变时代。1990 年以后进入复合电力电子器件及变频技术为代表的第

三代,复合器件具有快速关断、工作频率高等特点,其典型代表是绝缘栅双极晶体管(IGBT)及其应用。第三代变频技术和变频器得到了空前发展,故称其为变频时代。预计 21 世纪将进入电力电子智能化时代,其特点是电力电子器件进一步采用微电子集成电路技术,实现电力电子器件和装置的智能化。电力电子技术的进步有力地推动了电气传动调速系统的发展。下面分别介绍直流、交流电气传动的发展概况。

直流传动具有良好的调速性能和转矩控制性能,在工业生产中应用较早并沿用至今。早期直流传动采用有接点控制,通过开关设备切换直流电动机电枢或磁场回路电阻实现有级调速。1930 年以后出现电机放大器控制的旋转变流机组供电给直流电动机(由交流电动机 M 和直流发电机 G 构成,简称 G-M 系统),以后又出现了磁放大器和汞弧整流器供电等,实现了直流传动的无接点控制。其特点是利用了直流电动机的转速与输入电压有着简单的比例关系的原理,通过调节直流发电机的励磁电流或汞弧整流器的触发相位来获得可变的直流电压供给直流电动机,从而方便地实现调速。但这种调速方法后来被晶闸管可控整流器供电的直流调速系统所取代,至今已不再使用。1957 年晶闸管问世后,采用晶闸管相控装置的可变直流电源一直在直流传动中占主导地位。由于电力电子技术与器件的进步和晶闸管系统具有的良好动态性能,使直流调速系统的快速性、可靠性和经济性不断提高,在 20 世纪相当长的一段时间内成为调速传动的主流。今天正在逐步推广应用的微机控制的全数字直流调速系统具有高精度、宽范围的调速控制,代表着直流电气传动的发展方向。直流传动之所以经历多年发展仍在工业生产中得到广泛应用,关键在于它能以简单的手段达到较高的性能指标。例如高精度稳速系统的稳速精度达数十万分之一,宽调速系统的调速比达 1:10 000 以上,快速响应系统的响应时间已缩短到几毫秒以下。然而由于直流电动机具有电刷和换向器,成为限制自身发展的主要缺陷,导致其生产成本低、制造工艺复杂、运行维护工作量大,加之机械换向困难,其最大供电电压与机械强度均有限,所以直流电动机的单机容量、转速的提高以及使用环境都受到限制,很难向高速和大容量方向发展。近年来其发展速度明显滞后于交流传动系统,最终将被交流传动系统所取代。

交流电动机,特别是鼠笼式异步电动机,因其结构简单、运行可靠、价格低廉、维修方便,故应用面很广。几乎所有不调速传动都采用交流电动机。尽管从 1930 年开始,人们就致力于交流调速的研究,然而主要局限于利用开关设备来切换主回路,达到控制电动机启动、制动和有级调速的目的。例如 Y/△ 起动器、变极对数调速、电抗或自耦降压起动以及绕线式异步电动机转子回路串电阻的有级调速。交流调速进展缓慢的主要原因是决定电动机转速调节主要因素的交流电源频率的改变和电动机转矩控制都是极为困难的,使交流调速的稳定性、可靠性、经济性、效率均不能满足生产要求。后来发展起来的调压调频控制只控制了电机的气隙磁通,而不能调节转矩;转差频率控制能够在一定程度上控制电机的转矩,但它是以电机的稳态方程为基础设计的,并不能真正控制动态过程中的转矩。随着电力电子技术、计算机技术的不断发展和电力电子器件的更新换代,变频调速技术获得了飞速的发展。今天全控型高频率开关器件组成的脉宽调制(PWM)逆变器取代了晶闸管构成的方波形逆变器,而且 SPWM 逆变器及其专用芯片也得到了普遍的应用,增强和扩展了变频器(VVVF)的功能和应用范围。与此同时,交流电动机的控制技术也得到了突破性进展,能够有效地控制转矩,使电动机的转速得到快速响应。1971 年德国西门子公司 F. Blaschke 提出的矢量控制原理解决了交流电动机的转矩控制问题,实现了交流电动机调速控制理论的第一次质的飞跃。其理论是以转子磁链这一旋

转空间矢量为参考坐标,利用坐标变换实现定子电流励磁分量与转矩分量之间的解耦,使交流电机能像直流电机一样分别对励磁分量与转矩分量进行独立控制,获得像直流电机一样良好的动态性能。1985年德国鲁尔大学 M. Depenbrock 提出了直接转矩控制理论,1987年又把该理论推广到弱磁调速范围。其特点是将电机与逆变器看做一个整体,采用空间电压矢量分析方法在定子坐标系进行磁通、转矩的计算,通过磁通跟踪型 PWM 逆变器的开关状态直接控制转矩。直接转矩控制去掉了矢量变换的复杂计算,便于实现全数字化,是一种具有较高动、静态性能的交流调速方法。随着现代化控制理论的发展,交流电动机控制技术的发展方兴未艾,非线性控制、自适应控制、智能控制等各种新的控制策略正在不断涌现和完善,展现出更为广阔的应用前景。

微处理器引入控制系统,促进了模拟控制系统向数字控制系统的转化。从 8~16 位的单片机,到 16~32 位的数字信号处理器(DSP),再到 32~64 位的精简指令集计算机(RISC),位数增多,运行速度加快,控制能力增强。例如,以 32 位 RISC 芯片为基础的数字控制模板能够实现各种算法,WINDOWS 操作系统的引入将使可自由设计图形编程的控制技术有很大发展。数字化技术使复杂的电机控制技术得以实现,简化了硬件,降低了成本,提高了控制精度,拓宽了交流传动的应用领域。主要表现在节能调速技术的发展,从根本上改变了风机、水泵等传动系统过去因交流电动机不调速而依赖挡板和阀门来调节流量的状况。这类传动系统几乎占工业电气传动系统总量的一半,采用交流调速后,每台风机、水泵可节能 20%,其经济效益相当可观。其次对特大容量、极高转速负载的拖动,交流调速弥补了直流调速的不足。可以预计,高性能交流调速系统的发展必将取代直流传动系统,成为电气传动领域中的主要力量。

1.2 电气传动的动力学基础

1.2.1 电气传动系统的运动方程式

从动力学的角度分析,电气传动系统的运动规律可以用运动方程来描述。电动机作为原动机驱动生产机械运行,其电磁转矩 T_e 的正方向规定为与传动系统在电动状态下的转速 n 的方向一致,则负载转矩 T_L 的正方向与 n 相反。根据旋转运动系统的牛顿第二定律可得

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.1)$$

式中 $J d\omega/dt$ ——惯性转矩, $N \cdot m$ 。

在工程上一般用飞轮惯量(飞轮矩) GD^2 代替转动惯量 J ,二者关系为

$$GD^2 = 4gJ$$

式中 G ——旋转部分重量, N ;

D ——旋转部分惯性直径, m ;

g ——重力加速度, $g = 9.8 m/s^2$ 。

角速度 ω (rad/s) 与转速 n (r/min) 的关系为 $\omega = 2\pi n/60$, 故电气传动系统的运动方程式可改写为

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1.2)$$

电气传动

上式中 T_e 和 T_L 都是带有方向的变量。在进行计算时,如果实际方向与规定的正方向相同,就用正数,反之就用负数。

由式(1.2)可知,电气传动系统的运动状态是由作用在电动机轴上的两个转矩 T_e 、 T_L 决定的。当 $T_e > T_L$ 时, $dn/dt > 0$, 系统加速;当 $T_e < T_L$ 时, $dn/dt < 0$, 系统减速。这两种情况系统都处在变速运动状态,称为动态。当 $T_e = T_L$ 时, $dn/dt = 0$, $n = 0$ 或 $n = \text{常数}$, 系统静止或匀速运行,称为稳态或静态。

1.2.2 电气传动系统的负载特性

负载特性指电气传动系统同一转轴上负载转矩与转速之间的关系,即 $n = f(T_L)$ 。不同类型的生产机械在运动中所受阻阻力性质不同,其负载特性曲线也不同,常分为下列三类:

(1) 恒转矩负载特性

此类负载特性的特点是 $T_L = \text{常数}$ 且与转速变化无关。依据负载转矩与运动方向的关系,恒转矩负载又分为两种:

1) 反抗性恒转矩负载

反抗转矩又称摩擦转矩,是由摩擦、非弹性体的压缩、拉伸与扭转等作用产生的负载转矩。其特点是负载转矩的方向总是与运动方向相反,即总是阻碍运动的。当运动方向发生改变时,负载转矩的方向也随之改变。例如机床刀架的平移运动、金属的压延等。

按照转矩正方向的规定,对于反抗性恒转矩负载,当 n 为正方向时, T_L 与 n 的正方向相反, T_L 为正,特性曲线在第一象限; n 为反方向时, T_L 与 n 的正方向相同, T_L 为负,特性曲线在第三象限,如图 1.1 所示。

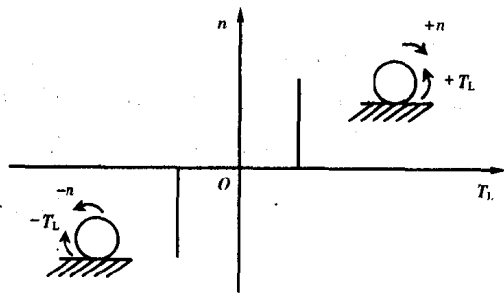


图 1.1 反抗性恒转矩负载特性

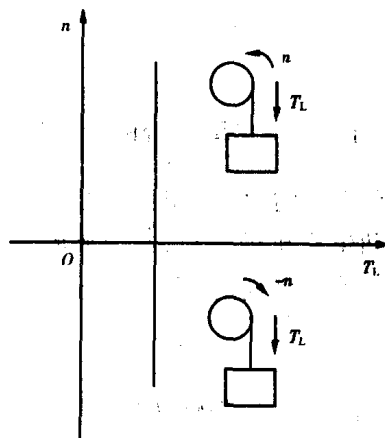


图 1.2 位能性恒转矩负载特性

2) 位能性恒转矩负载

位能性负载转矩是由物体的重力和弹性体的压缩、拉伸与扭转等作用所产生的。其特点是负载转矩的作用方向恒定,与转速方向无关,它在某一方向阻碍运动,而在相反方向促进运动。例如,起重机提升或下放重物时,重物的重力所产生的负载转矩 T_L 总是作用在重物下降方向。设提升时转速 n 为正方向,则这时 T_L 作用方向与 n 相反, T_L 为正,负载特性在第一象限;若下降时 n 为反向, T_L 方向不变,虽与下降时 n 同向,但仍与 n 的正方向相反,故 T_L 仍为正,负载特性在第四象限,如图 1.2 所示。

综上所述,在运动方程式中,反抗负载转矩 T_L 的符号有时为正,有时为负,而位能负载转矩 T_L 的符号总是正的。

(2) 恒功率负载特性

这类负载得名于在改变转速时,负载功率 P_L 保持不变。例如车床在粗加工时,切削量大,负载阻力大,应为低速;在精加工时,切削量小,阻力也小,常为高速,以保证高低速下功率不变。其表达式为

$$P_L = T_L \omega = \frac{2\pi n}{60} T_L = \frac{c}{9.55} = \text{常数}$$

可见,负载转矩与转速成反比,即

$$T_L = c/n$$

T_L 与 n 之关系为一双曲线,称之为恒功率负载特性,见图 1.3。

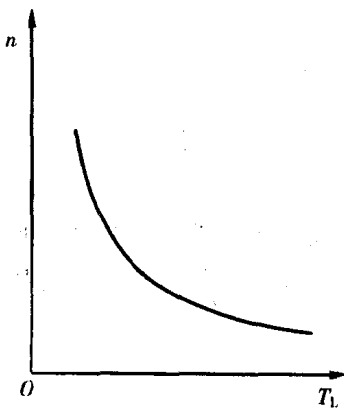


图 1.3 恒功率负载特性

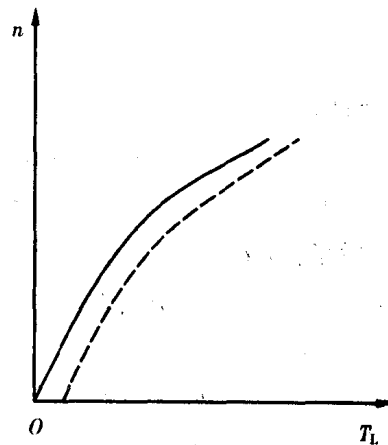


图 1.4 通风机负载特性

(3) 通风机负载特性

属于这类负载的生产机械是按离心力原理工作的,如风机、水泵、油泵等。其负载转矩是由其中的空气、水、油等介质对机器叶片的阻力所产生的,因此也属于反抗性的。其特点是这类负载转矩并不恒定,基本上与转速的平方成正比,即

$$T_L = kn^2$$

式中 k 为比例常数。

由上式可见,通风机型负载特性为一抛物线,如图 1.4 所示。

除了上述 3 种典型的负载特性以外,还有直线型负载特性,即 $T_L = cn$; 曲柄连杆机构负载特性,其 T_L 是随转角 α 而变化的;球磨机、碎石机等负载特性,其 T_L 随时间作无规律的随机变化等。另外,实际负载可能是单类型的,也可能是几种类型的综合,具体问题应具体分析。例如,实际通风机除了主要是通风机性质的负载特性外,轴上还存在摩擦转矩 T_0 ,因此其负载特性为 $T_L = T_0 + kn^2$,如图 1.4 中虚线所示。

1.2.3 转矩、飞轮矩的折算

在电气传动系统中,有时电动机和被拖动的生产机械并不直接连接在同一轴上,二者之间

通过齿轮减速箱、皮带等构成多轴传动,各轴的转速和飞轮矩都不相同。图 1.5 给出了带减速器的双轴传动和起重机传动的示意图。在分析和计算这类传动时,应将多轴系统折算为等效的单轴系统,通常将所有的转矩都折算到电动机轴上,再使用前面介绍的运动方程式。

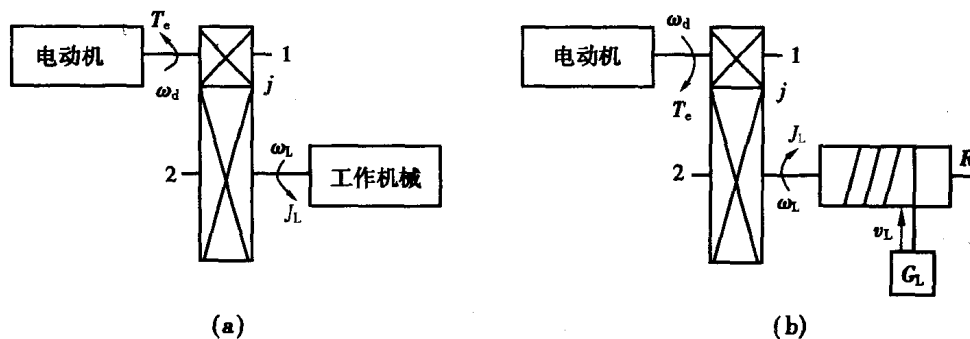


图 1.5 带减速器的多轴传动系统

(a) 双轴传动 (b) 起重传动

(1) 转矩的折算

在图 1.5 中,设 T_L 为从动轴上的负载转矩, T'_L 为折算到主动轴(电动机轴)上的负载转矩, ω_d, ω_L 分别为主、从动轴旋转角速度。在图 1.5(b)中, R 为卷筒半径, G_L, m 分别为升降重物的重量和质量,且 $G_L = mg$ 。根据能量守恒定律,折算到电动机轴上的负载功率应该等于工作机构的负载功率加上传动机构中的损耗,即折算的负载功率等于实际负载功率除以传动效率 η 。

$$\text{双轴传动} \quad T'_L \omega_d = T_L \omega_L / \eta \quad (\text{旋转运动})$$

$$\text{起重传动} \quad T'_L \omega_d = G_L R \omega_L / \eta \quad (\text{直线运动})$$

折算到电动机轴上的转矩分别为

$$T'_L = \frac{T_L}{j\eta} \quad (1.3)$$

$$T'_L = \frac{G_L R}{j\eta} = \frac{G_L v_L}{\eta \omega_d} \quad (1.4)$$

式中 j ——主动轴与从动轴的转速比, $j = \omega_d / \omega_L = n_d / n_L$;

v_L ——重物上升速度, $v_L = \omega_L R = 2\pi R n_L / 60$ 。

(2) 飞轮矩的折算

设电动机的转动惯量为 J_d (飞轮矩为 GD_d^2), 负载轴的转动惯量为 J_L (飞轮矩为 GD_L^2), 电动机轴上等效的转动惯量为 J (飞轮矩为 GD^2)。根据动能守恒定律可知,折算后等效系统存储的动能应该等于实际系统的动能。因此,对于双轴传动系统有

$$\frac{1}{2} J \omega_d^2 = \frac{1}{2} J_d \omega_d^2 + \frac{1}{2} J_L \omega_L^2$$

所以

$$J = J_d + J_L / j^2 \quad (1.5)$$

同理

$$GD^2 = GD_d^2 + GD_L^2 / j^2 \quad (1.6)$$

对于起重传动系统有

$$\frac{1}{2} J \omega_d^2 = \frac{1}{2} J_d \omega_d^2 + \frac{1}{2} J_L \omega_L^2 + \frac{1}{2} m v_L^2$$

$$J = J_d + J_L/j^2 + mw_L^2/\omega_d^2 \quad (1.7)$$

$$GD^2 = GD_d^2 + GD_L^2/j^2 + 365(G_L v_L^2/n_d^2) \quad (1.8)$$

式中 n_d ——电动机的转速, r/min;

G_L ——直线运动部分的重量。

由上式看出, 减速传动 $j > 1$, 电动机轴上转动惯量 J_d 是总转动惯量中的主要部分, 而其他轴上的惯性折算值在总转动惯量中占次要成分, 因此工程上常用下式作近似计算, 即

$$GD^2 = (1 + \delta) GD_d^2 \quad (1.9)$$

式中 $\delta = 0.2 \sim 0.3$ 。

传动系统的飞轮矩还可通过实验测定。

对于两级以上的多级传动, 应按上述原理一级一级地将转矩和飞轮矩折算到同一轴上(一般是折算到电动机轴), 不再详述。

例 题

例 1.1 如图 1.6 所示的电力拖动系统中, 已知飞轮矩 $GD_d^2 = 14.5 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, $GD_b^2 = 18.8 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, $GD_L^2 = 120 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, 传动效率 $\eta_1 = 0.91$, $\eta_2 = 0.93$, 负载转矩 $T_L = 85 \text{ N} \cdot \text{m}$, 转速 $n = 2450 \text{ r/min}$, $n_b = 810 \text{ r/min}$, $n_L = 150 \text{ r/min}$, 忽略电动机空载转矩, 求:

(1) 折算到电动机轴上的系统总飞轮矩 GD^2 ;

(2) 折算到电动机轴上的负载转矩 T'_L 。

解 (1) 系统总飞轮矩

$$GD^2 = GD_d^2 + \frac{GD_b^2}{(n/n_b)^2} + \frac{GD_L^2}{(n/n_L)^2} = 14.5 \text{ N} \cdot \text{m}^2 + \frac{18.8 \text{ N} \cdot \text{m}^2}{(2450/810)^2} + \frac{120 \text{ N} \cdot \text{m}^2}{(2450/150)^2} = 17.01 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

(2) 负载转矩

$$T'_L = \frac{T_L}{\frac{n}{n_L} \eta_1 \eta_2} = \frac{85 \text{ N} \cdot \text{m}}{\frac{2450}{150} \times 0.91 \times 0.93} = 6.15 \text{ N} \cdot \text{m}$$

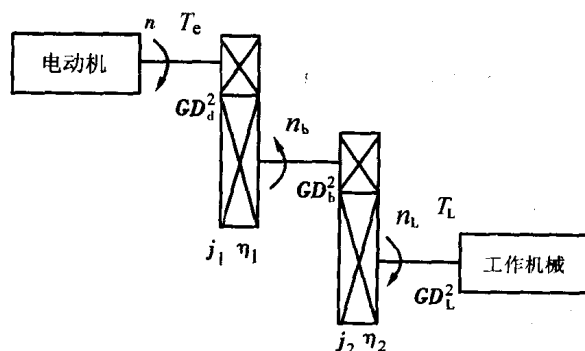


图 1.6 带减速器的三轴传动系统

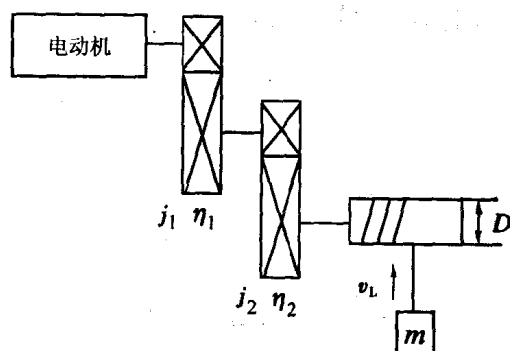


图 1.7 起重传动系统

例 1.2 在图 1.7 所示的起重传动系统中, 已知重物 $m = 5000 \text{ kg}$, 上升速度 $v_L = 1.2 \text{ m/s}$,

电气传动

每对齿轮的传动比 $j_1 = j_2 = 6$, 每对齿轮的效率 $\eta_1 = \eta_2 = 0.94$, 卷筒直径 $D = 0.9\text{m}$ 。求:

(1) 系统中电动机的转速 n 、折算到电动机轴上的负载转矩 T'_L ;

(2) 电动机、齿轮、卷筒的转动惯量分别为 $J_d = 2.5\text{kg}\cdot\text{m}^2$, $J_1 = 0.25\text{kg}\cdot\text{m}^2$, $J_2 = 2.5\text{kg}\cdot\text{m}^2$, $J_3 = 1.25\text{kg}\cdot\text{m}^2$, $J_4 = 5\text{kg}\cdot\text{m}^2$, $J_m = 10\text{kg}\cdot\text{m}^2$, 若电动机起动时间 $t_{st} = 2\text{s}$, 电动机的起动转矩是多少?

解 (1) 卷筒转速 $n_m = \frac{60v_L}{\pi D} = \frac{60 \times 1.2\text{m/s}}{3.14 \times 0.9\text{m}} = 25.5 \text{ r/min}$

电动机转速 $n = n_m j_1 j_2 = 6 \times 6 \times 25.5 \text{ r/min} = 918 \text{ r/min}$

重物重力 $G_L = mg = 5000\text{kg} \times 9.81\text{m/s}^2 = 49050 \text{ N}$

折算到电动机上的负载转矩

$$T'_L = \frac{G_L v_L}{\omega_d \eta_1 \eta_2} = \frac{60 G_L v_L}{2\pi n \eta_1 \eta_2} = \frac{60 \times 49050\text{N} \times 1.2\text{m/s}}{2 \times 3.14 \times 918\text{r/min} \times 0.94 \times 0.94} = 693 \text{ N}\cdot\text{m}$$

(2) 电动机轴上的转动惯量

$$J_{d1} = J_d + J_1 = 2.5\text{kg}\cdot\text{m}^2 + 0.25\text{kg}\cdot\text{m}^2 = 2.75 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

其余各轴上旋转部件折算到电动机轴上的转动惯量

$$J_{d2} = \frac{J_2 + J_3}{j_1^2} + \frac{J_4 + J_m}{j_1 j_2^2} = \frac{2.5\text{kg}\cdot\text{m}^2 + 1.25\text{kg}\cdot\text{m}^2}{6^2} + \frac{5\text{kg}\cdot\text{m}^2 + 10\text{kg}\cdot\text{m}^2}{6^2 \times 6^2} = 0.115 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

直线运动部件折算到电动机轴上的转动惯量

$$J_{d3} = m \left(\frac{v_L}{\omega_d} \right)^2 = m \left(\frac{60 v_L}{2\pi n} \right)^2 = 5000\text{kg} \times \left(\frac{60 \times 1.2\text{m/s}}{2 \times 3.14 \times 918\text{r/min}} \right)^2 = 0.78 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

整个系统折算到电动机轴上的转动惯量

$$J = J_{d1} + J_{d2} + J_{d3} = 3.645 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

计算动态转矩时假设起动期间为等加速运动, 则

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n}{t_{st}} = \frac{918\text{r/min}}{2\text{s}} = 459 \text{ (r/min)/s}$$

起动期间电动机轴上的加速动态转矩

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{J}{9.55} \frac{dn}{dt} = \frac{3.645\text{kg}\cdot\text{m}^2}{9.55} \times 459 \text{ (r/min)/s} = 175 \text{ N}\cdot\text{m}$$

电动机的起动转矩为

$$T_{st} = T'_L + J \frac{d\omega}{dt} = 693\text{N}\cdot\text{m} + 175\text{N}\cdot\text{m} = 868 \text{ N}\cdot\text{m}$$

习 题

1.1 电气传动系统由哪几部分组成? 各起什么作用?

1.2 电气传动系统分别在什么情况下处于加速、减速和稳定运行状态?

1.3 将有传动机构的多轴传动系统简化为单轴电气传动系统时, 负载的转矩按什么原则进行折算? 各轴的飞轮矩按什么原则进行折算?

1.4 电动机拖动机床切削金属时, 传动机构的损耗由电动机还是由负载负担?

1.5 起重机提升重物与下放重物时,传动机构的损耗由电动机还是重物负担? 提升或下放同一重物时,传动机构损耗的转矩一样大吗? 传动机构的效率一样高吗?

1.6 电动机采用恒转矩调速方式与拖动恒转矩负载是一样的吗?

1.7 电动机的调速方式与拖动的负载性质为什么要匹配? 不匹配有什么问题?

1.8 已知某传动系统负载的实际转矩 $T_L = 420\text{N}\cdot\text{m}$, 飞轮矩 $GD_L^2 = 630\text{N}\cdot\text{m}^2$, 系统中减速机构的传动比 $j = 4.57$, 电动机及减速机构折算至电动机轴上的飞轮矩为 $GD_d^2 = 160\text{N}\cdot\text{m}^2$, 若电动机电磁转矩 $T_e = 180\text{N}\cdot\text{m}$, 求:

(1) 电动机在起动时的加速度;

(2) 当起动时间为 2.1s 时, 电动机的转速为多少(设传动效率 $\eta = 0.8$)?

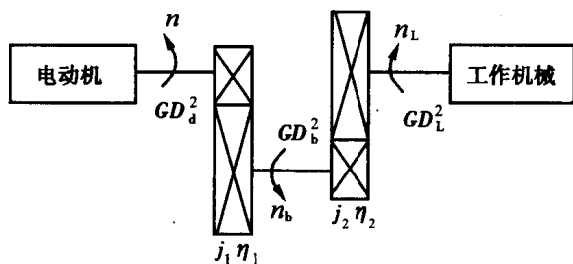


图 1.8 传动系统示意图

1.9 某传动系统如图 1.8 所示, 已知负载转矩 $T_L = 300\text{N}\cdot\text{m}$, 各轴的传动比分别为 $j_1 = 3.45$, $j_2 = 2.85$, 传动效率 $\eta_1 = \eta_2 = 0.86$, 各轴飞轮矩 $GD_d^2 = 265\text{N}\cdot\text{m}^2$, $GD_b^2 = 572\text{N}\cdot\text{m}^2$, $GD_L^2 = 1\,220\text{N}\cdot\text{m}^2$, 电动机起动转矩 $T_{st} = 82\text{N}\cdot\text{m}$, 求:

(1) 电动机起动时的加速度;

(2) 若将一飞轮矩 $GD_s^2 = 1\,260\text{N}\cdot\text{m}^2$ 的飞轮附加在工作机械轴上, 电动机起动时加速度又为多少?

1.10 某提升机传动系统如图 1.9 所示, 空罐笼重 $G_0 = 2\,940\text{N}$, 重物重 $G_L = 900\text{N}$, 平衡块重 $G_p = 5\,880\text{N}$, 罐笼提升速度 $v_L = 1.5\text{m/s}$, 电动机转速 $n = 980\text{r/min}$, 提升时传动效率 $\eta = 0.85$, 传动机构及卷筒的转动惯量忽略不计。求:

(1) 折算到电动机轴上的直线运动部分的飞轮矩;

(2) 罐笼提升和下放时, 折算到电动机轴上的负载转矩。

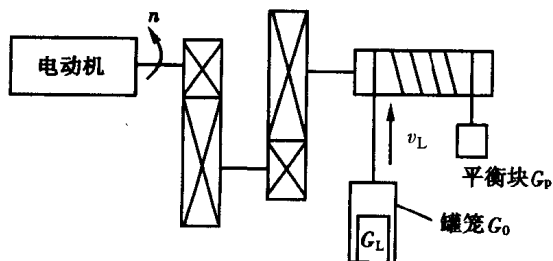


图 1.9 提升机传动系统

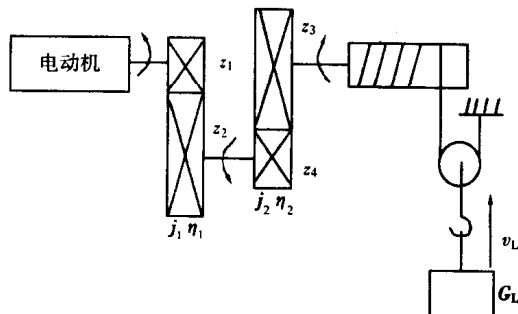


图 1.10 起重传动系统

电气传动

1.11 在图 1.10 所示的三轴起重传动系统中,已知提升重物的重量 $G_L = 19\,600\text{N}$,提升速度 $v_L = 0.5\text{m/s}$,传动效率 $\eta_1 = \eta_2 = 0.96$,卷筒的效率 $\eta_3 = 0.95$,卷筒直径 $D = 0.4\text{m}$,减速传动比 $j_1 = 6, j_2 = 10$,电动机转子的飞轮矩 $GD_d^2 = 9.8\text{N}\cdot\text{m}^2$,齿轮的飞轮矩分别为 $GD_1^2 = 0.98\text{N}\cdot\text{m}^2$, $GD_2^2 = 19.6\text{N}\cdot\text{m}^2$, $GD_3^2 = 4.9\text{N}\cdot\text{m}^2$, $GD_4^2 = 4.9\text{N}\cdot\text{m}^2$,卷筒的飞轮矩 $GD_L^2 = 9.8\text{N}\cdot\text{m}^2$,求:

- (1)电动机以恒速提升重物时所产生的转矩;
- (2)整个传动系统折算到电动机轴上的飞轮矩。

第 2 章

闭环直流调速系统的组成及其特性

2.1 概 述

直流电动机具有良好的起、制动性能,宜于在较宽的范围内平滑调速。直流调速系统在理论上和实践上都比较成熟,在工业生产中得到了广泛应用。从闭环控制理论的角度来看,它又是交流调速系统的基础,所以应该很好地掌握直流调速系统。

2.1.1 直流传动调速要求

调速是指在某一负载情况下,通过改变电动机或电源的参数使机械特性发生相应改变,从而使电动机转速变化或保持不变。

直流电动机转速 n 的变化可用下式表示

$$n = \frac{U - IR}{K_e \Phi} \quad (2.1)$$

式中 U ——电枢电压, V;

I ——电枢电流, A;

R ——电枢回路总电阻, Ω ;

Φ ——励磁磁通, Wb;

K_e ——与电机结构有关的电动势常数。

由式(2.1)可知,改变电枢回路电阻 R 、减弱励磁磁通 Φ 、调节电枢电压 U 均可调节电动机转速 n 。然而,改变电阻只能实现有级调速,减弱磁通实现的平滑调速范围有限,这是因为弱磁调速只能在电动机额定转速以上作小范围的升速。因此,对于要求在一定范围内无级调速的直流传动系统而言,改变电枢电压调节转速的方式是最好的选择。

在变压调速方案中,现在主要用两种可控直流供电电源。一是在交流供电系统中,采用可控变流装置,以获得可调的直流电压,这种方式在工厂企业中应用较多;二是在具有恒定直流供电电源之处,采用全控型电力电子器件构成的直流斩波器,实现脉宽调压调速。

各类不同的生产机械,由于其具体的生产工艺过程不同,因而对调速系统的转速控制要求也不完全相同。例如,重型铣床的进给机构快速移动时的最高速为 600mm/min,而粗加工时最低速为 2mm/min;又如巨型可逆初轧机的轧辊在不到 1s 的时间内就得完成从正转到反转的全部过程;凡此种种,不胜枚举。所有这些生产设备量化了的技术指标,经过一定的折算,可以转化成调速系统的稳态或动态性能指标,作为系统设计的依据。