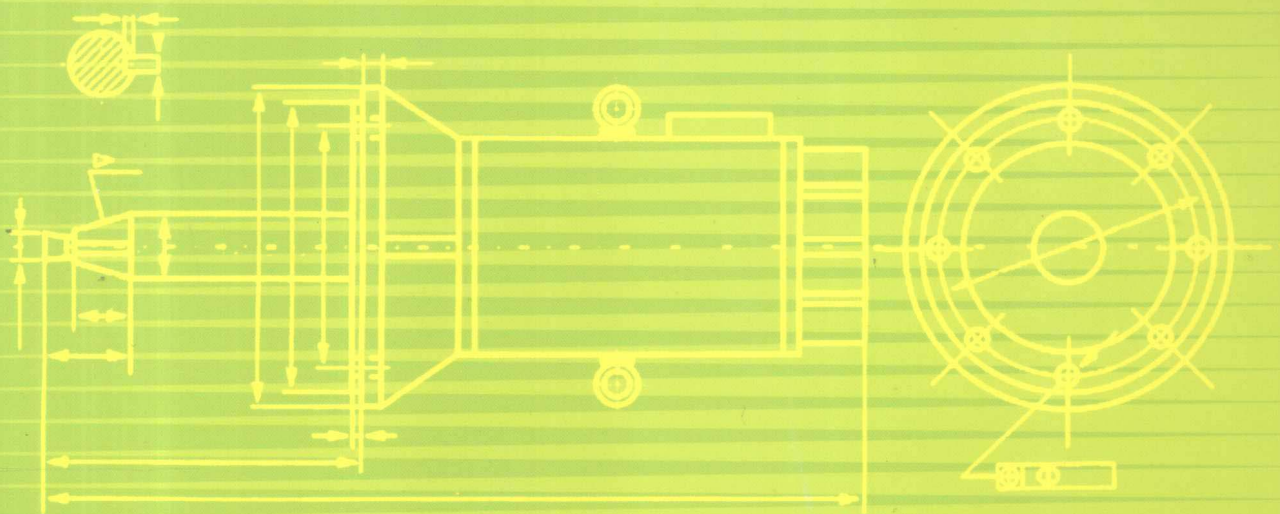




DIANJI TUODONG
JIQI KONGZHI JISHU

电机拖动 及其控制技术

王 暄 曹 辉 马永华 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电机拖动 及其控制技术

王 暄 曹 辉 马永华 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书分为直流电动机及其控制系统、交流电动机及其控制系统和控制电动机及其控制系统三篇。在每一篇内容中对各类电动机的基本原理、运行原理、电动机的控制元件、控制电路和控制方法做了全面介绍,并重点讲解了各类电动机的控制系统原理和设计方法。本书注重电动机系统的应用性,在基本理论讲解的基础上,对各类电动机的控制芯片、控制电路、控制系统的设计给出了具体的实例和讲解。注重先进性和实用性。

本书可作为高等院校自动化、机电一体化等相关专业的教材,还可作为工程技术人员和在校大学生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电机拖动及其控制技术/王暄,曹辉,马永华编著. —北京:中国电力出版社,2010.6

ISBN 978-7-5123-0350-8

I. ①电… II. ①王…②曹…③马… III. ①电机-电力传动
②电机-控制系统 IV. ①TM30

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 071795 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 7 月第一版 2010 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12 印张 287 千字

印数 0001—3000 册 定价 22.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

电机拖动系统及其控制技术是伴随着 19 世纪第一次工业革命诞生的,随着电力电子技术的发展,各类可控电子器件在电机拖动系统中的使用也越来越广泛,电机拖动系统的控制技术得到了迅速的发展。电机拖动系统也称为运动控制系统,按照电机的类型可以划分为直流电机拖动系统、交流电机拖动系统和各类控制电机的拖动系统。进入 21 世纪以后,电机拖动系统逐渐向集成化、智能化发展,许多电力电子器件加入了集成电路的模块或嵌入式系统,使电机拖动系统也步入了智能化的时代。

从电动机及其控制的发展过程看,最早由于直流电动机控制原理较为简单,可通过控制直流电动机的电枢电流和电枢电压来控制其电磁转矩和转速,因此具有较好的控制特性,因此直流拖动系统从诞生至今一直在工业生产中发挥着重要的作用,特别是近几年直流无刷电动机克服了传统直流电动机机械换向所带来的一系列缺点,而保留了直流电动机控制简单的优点,其控制系统在如空调、电动自行车等行业得到了飞速的发展。交流电动机具有结构简单、体积小、价格低、维护方便等优点,一直以来其应用范围在不断扩大,特别是随着各类控制器的不断技术革新、各类控制原理和手段的不断完善使交流变频调速系统得到了飞速的发展。

本书在结构上分为三篇内容。

第一篇内容是直流电动机及其控制系统,共包括 5 章内容,对直流电动机原理及其控制系统做了详细的介绍。其中第二章介绍了直流电动机的基本原理,包括直流电动机的结构、工作原理、磁场、励磁方式以及直流电动机的基本方程式。第三章介绍了直流电动机的运行特性,包括其工作特性和机械特性,此外还介绍了直流电动机的参数和选型。第四章主要介绍直流电动机的电气控制,在介绍了常用电力电子开关器件的基础上详细讲解了单相和三相晶闸管整流电路的原理以及直流 PWM 变换器的基本控制原理。第五章主要讲述直流电动机控制和调速系统,包括直流电动机的启动、制动和调速的基本方法,在此基础上讲解了直流电动机开环和闭环控制系统的结构、控制原理及方法。第六章主要通过两个微机控制直流调速系统的实例来介绍直流调速系统的应用,两个系统均采用 8051 单片机来实现对系统电压变换器的控制,电压变换器采用晶闸管整流电路和 PWM 变换器,此类应用是直流电动机最为常用的控制手段。

第二篇内容是交流电动机及其控制系统,共包括 4 章内容,对交流电动机原理及其控制系统做了详细的介绍。其中第七章为交流电动机的基本原理,介绍了交流电动机的基本结构、定子磁场、运行原理、感应电动势、定子和转子电路、交流电动机的参数和选型以及其他几类常见的交流电动机的介绍等内容。第八章主要介绍三相异步电动机的运行特性,包括三相异步电动机的功率和电磁转矩、三相异步电动机的工作特性和各种机械特性等。第九章主要介绍三相异步电动机的电气控制,在讲解了几类常用的低压电器的基础上,重点讲解了

三相异步电动机的启动、制动、调速的电气控制线路，并在最后通过一个完整的 C650-2 卧式车床控制系统例子对其控制线路进行了详细的分析和说明。第十章介绍了交流异步电动机的调速系统，重点介绍了变频调速系统的基本原理、通用变频器的基本原理和使用方法，变频调速系统的组成结构、控制方法，并通过一个恒压供水的具体应用实例来做进一步的说明和讲述。

第三篇内容为控制电动机及其控制系统，共包括 4 章内容，对各类控制电动机原理及控制方法进行了讲解。第十一章介绍了用于测量速度和位置的几种传感器，包括自整角机、旋转变压器、光电编码器、霍尔元件的基本原理和控制方法。第十二章介绍了伺服电动机及其控制系统，包括直流伺服电动机的基本原理及其驱动芯片的使用、控制方法和应用实例。第十三章讲解了步进电动机及其控制系统的相关内容，包括步进电动机的基本原理、各类驱动电路原理、驱动芯片的使用和应用电路，并通过一个具体的 PLC 控制步进电动机的实例来阐述其具体的使用方法。第十四章介绍的是直流无刷电动机及其控制系统，包括直流无刷电动机的基本原理、直流无刷电动机控制器的集成电路，并通过一个具体的实例来说明其使用的方法。

本书由王暄、曹辉、马永华编著。其中，王暄编写了第四章、第五章、第九章、第十章，曹辉编写了第六章、第十二章、第十三章、第十四章，马永华编写了第二章、第三章、第七章、第八章、第十一章，第一章绪论由王暄和马永华共同编写，同时感谢陈惠荣老师协助编写了第九章的部分内容，马栋萍、霍璽、李志娟、耿瑞芳等也做了大量的工作，在此一并表示感谢。

限于作者知识水平，书中难免有错误和不当之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2010 年 3 月

前言

第一章 绪论	1
思考题	6

第一篇 直流电动机及其控制系统

第二章 直流电动机的基本原理	7
第一节 直流电动机的基本结构	7
第二节 直流电动机的工作原理	8
第三节 直流电动机的磁场	9
第四节 直流电动机的电枢电动势和电磁转矩	10
第五节 直流电动机的励磁方式	12
第六节 直流电动机的基本方程式	12
思考题	14
第三章 直流电动机的运行特性	15
第一节 他励直流电动机的工作特性	15
第二节 他励直流电动机的机械特性	16
第三节 直流电机的参数和选型	19
思考题	21
第四章 直流电动机的电气控制	22
第一节 常用的电力变流开关器件	22
第二节 晶闸管整流电路	33
第三节 PWM 变换器	45
思考题	53
第五章 直流电动机控制和调速系统	54
第一节 直流电动机的启动、制动	54
第二节 直流电动机的调速	58
思考题	67
第六章 基于微机控制的直流调速系统	68
第一节 微机控制的晶闸管直流调速系统	68
第二节 微机控制的 PWM 直流调速系统	74
思考题	75

第二篇 交流电动机及其控制系统

第七章 交流电动机的基本原理	76
第一节 三相异步电动机的基本结构	76
第二节 三相异步电动机的定子磁场	78
第三节 三相异步电动机的运行原理	81
第四节 三相异步电动机的感应电动势	82
第五节 三相异步电动机的定子和转子电路	82
第六节 三相异步电动机的参数和选型	83
第七节 其他交流电动机	87
思考题	90
第八章 三相异步电动机的运行特性	91
第一节 三相异步电动机的功率和电磁转矩	91
第二节 三相异步电动机的工作特性	93
思考题	96
第九章 三相异步电动机的电气控制	97
第一节 常用的低压电器	97
第二节 三相异步电动机的启动及其控制电路	103
第三节 三相异步电动机的制动及其控制电路	110
第四节 三相异步电动机的其他控制电路	113
思考题	119
第十章 交流异步电动机调速系统	121
第一节 交流异步电动机变频调速的基本原理	121
第二节 通用变频器原理、分类及其使用	127
第三节 变频器—交流电动机调速系统	131
思考题	136

第三篇 控制电动机及其控制系统

第十一章 速度与位置传感器	138
第一节 自整角机	138
第二节 旋转变压器	141
第三节 光电编码器	142
第四节 霍尔元件	146
思考题	148
第十二章 伺服电动机及其控制系统	149
第一节 伺服电动机原理和特性	149
第二节 直流伺服电动机的驱动芯片	151

思考题.....	154
第十三章 步进电动机及其控制系统	156
第一节 步进电动机的原理.....	156
第二节 驱动电路.....	158
第三节 常用步进电动机的驱动芯片 A3977 	162
第四节 基于 PLC 的步进电动机驱动控制系统应用 	167
思考题.....	170
第十四章 直流无刷电动机及其控制系统	171
第一节 直流无刷电动机原理.....	171
第二节 直流无刷电动机控制器集成电路.....	177
思考题.....	181
参考文献	182

第一章 绪 论

一、电机拖动及其控制技术简介

电机拖动系统在国民生产和生活中发挥着极为重要的作用,电机拖动是指由交流电机或直流电机作为原动机拖动生产机械进行运动的过程。一个典型的电机拖动系统是由电动机、控制装置以及被拖动的生产机械所组成的。电机拖动系统是把电能转换为机械能的装置,其主要的特点是功率范围极大,调速范围宽,适用于各类负载。电机拖动广泛应用于冶金、机械、轻工、纺织、石化、航空航天等行业,在人们的日常生活中也有着非常重要的作用,如空调、洗衣机、电脑等家电都属于小容量的拖动系统。

电机拖动系统的分类方法很多,如按照电机的类型划分,可以分为直流拖动系统、交流拖动系统和伺服系统;如按照调速方法划分,可分为不可调速系统和可调速系统;如按照拖动系统的运行方式划分,可分为可逆系统和不可逆系统;如按照控制系统结构划分,又可分为单闭环系统、双闭环系统和多闭环系统等。

电机拖动系统及其控制技术是伴随着 19 世纪第一次工业革命诞生的,当时的电机拖动控制技术还很原始,基本属于不可调速系统。随着电力电子技术的逐渐发展,越来越多的电力电子器件应用于电机拖动系统中,使电机拖动系统的控制技术得到了迅速的发展,其主要的发展阶段可以概括为 4 个时代:第一代是 20 世纪 60 年代,其突出的特点是晶闸管(Silicon Controlled Rectifier, SCR)的出现,带动了相控变流技术的发展,这一阶段称为整流器时代;第二代在 20 世纪 70 年代,这时出现了大功率晶体管(Giant Transistor, GTR)、可关断晶闸管(Gate Turn-off Thyristor, GTO)等自关断器件,控制技术也由原有整流技术为主发展为整流与逆变技术结合的控制方法,这一阶段称为逆变时代;第三代是在 20 世纪 80 年代,这个时期出现了复合电力电子器件和变频技术,如绝缘栅场效应管(Insulated-Gate Bipolar Transistor, IGBT),其快速关断、高频率的特点使变频技术得到了空前的发展,这个阶段称为变频时代;第四代是在进入 21 世纪以后,电力电子技术向智能化发展,更多的电力电子器件加入了很多集成电路的模块或嵌入式系统,使电力电子器件更智能化、性能更高,因此与之相对应的电机拖动系统也步入了智能化的时代。

电动机是电机拖动系统中将电能转换为机械能的装置,在系统中的作用非常重要。电动机又分为直流电动机和交流电动机,由于这两类电动机的原理不同,因此其控制技术也是不同的。直流电动机原理较为简单,其电磁转矩和电动机电流成正比,因此具有较好的转矩控制性能,同时其转速与电枢电压也是线性关系,因此调速性能也较好。由于直流拖动系统的控制原理简单、控制设备投资小,所以直流拖动系统从诞生至今一直在工业生产中发挥着重要的作用。但直流拖动系统的缺点是传统的直流电动机具有换向器和电刷,因此有噪声大、体积大、维护困难、机械特性较软等问题。

交流电动机,特别是笼形电动机具有结构简单、体积小、价格低、维护方便等优点,其应用范围非常广泛。尤其是随着电力电子器件的发展,交流调速控制技术也越来越成熟,各类控制器技术的不断革新,使交流变频调速系统得到了飞速的发展。目前全控型的脉宽调制(Pulse Width

Modulation, PWM) 变频器成为了交流调速系统主要采用的控制器, 市场上也出现了许多专用的 PWM 芯片, 这些都为交流拖动系统的应用提供了技术支持。在交流电机拖动技术发展上, 有两个重要的理论不得不提, 其从原理上突破了交流电动机调速技术的瓶颈。一是 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转矩控制的问题, 实现了交流电机调速技术理论上的第一次飞跃; 二是 1985 年德国鲁尔大学 M. Depenbrock 提出的直接转矩控制理论, 它是建立在矢量控制原理的基础上的, 但简化了矢量控制的复杂计算, 便于利用计算机实现全数字化的一种方法, 这又是交流电动机调速理论上的一个重要的里程碑。随着计算机技术的不断发展, 今后电机拖动系统的发展必将更依赖于计算机, 各种控制技术如自适应控制、智能控制、模糊控制等控制策略的不断涌现必将使交流电机调速系统得到更快的发展。

在近十几年运动控制系统的发展过程中, 直流拖动系统和交流拖动系统的控制技术都得到了快速的发展, 尤其是直流无刷电动机控制技术的发展克服了传统直流电动机机械换向所带来的一系列缺点, 而保留了直流电动机控制简单的优点, 因此在很多场合得到了应用, 如空调、电动自行车等行业。从目前的发展趋势看, 交流调速系统仍然是技术发展的热点, 同时直流调速系统的应用范围也在不断扩展, 尤其是随着交流伺服电动机、直流伺服电动机、直流无刷电动机等新型电动机及其控制技术的不断发展和完善, 今后的电动机及其控制技术将不断涌现出新的技术手段。

二、生产机械的负载转矩特性

生产机械运行时常用电机负载转矩标志其负载的大小。不同的生产机械的负载转矩随转速变化规律不同, 一般用转矩特性来表示, 即生产机械的转速 n 与负载转矩 T_L 之间的关系 $n=f(T_L)$ 。各种生产机械特性大致可归纳为以下 3 种类型。

1. 恒转矩负载特性

所谓恒转矩负载是指生产机械的负载转矩 T_L 的大小不随转速 n 变化, T_L 的大小为常数, 这种特性称为恒转矩负载特性。根据负载转矩的方向特点又分为反抗性和位能性负载两种。

(1) 反抗性恒转矩负载。反抗性恒转矩负载的特点是负载转矩的大小不变, 但负载转矩的方向始终与生产机械运动的方向相反, 总是阻碍电动机的运转, 当电动机的旋转方向改变时, 负载转矩的方向也随之改变, 始终是阻转矩。属于这类特性的生产机械有轧钢机和机床的平移机构等, 负载特性如图 1-1 所示。

(2) 位能性恒转矩负载。这种负载的特点是负载转矩由重力作用产生, 不论生产机械运动的方向变化与否, 负载转矩的大小和方向始终不变。例如, 起重设备提升重物时, 负载转矩为阻转矩, 其作用方向与电动机旋转方向相反, 当下放重物时, 负载转矩变为驱动转矩, 其作用方向与电动机旋转方向相同, 促使电动机旋转, 负载特性如图 1-2 所示。

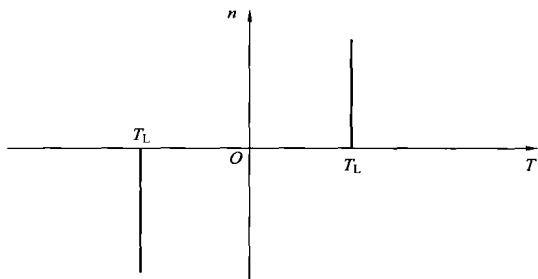


图 1-1 反抗性恒转矩负载特性图

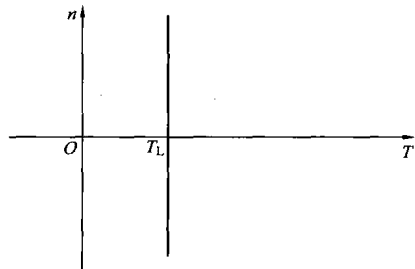


图 1-2 位能性恒转矩负载特性图

2. 恒功率负载特性

恒功率负载属于反抗性负载，其特点是无论转速如何变化，负载从电动机吸收的功率为恒定值，即负载转矩与转速成反比，其表达式为

$$P_1 = T_L \omega = T_L \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi}{60} T_L n = \text{常数} \quad (1-1)$$

例如，一些机床切削加工，车床粗加工时，切削量大（即 T_L 大），用低速挡；精加工时，切削量小（即 T_L 小），用高速挡。恒功率负载特性曲线如图 1-3 所示。

3. 通风机型负载特性

通风机型负载也属于反抗性负载，其特点是负载转矩的大小与转速 n 的平方成正比，即

$$T_L = Kn^2 \quad (1-2)$$

式中 K ——比例常数。

常见的这类负载如风机、水泵、油泵等，负载特性曲线如图 1-4 所示。

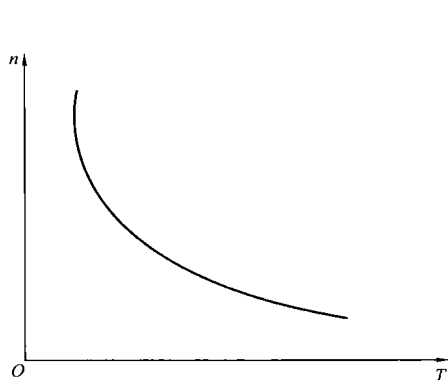


图 1-3 恒功率负载特性曲线

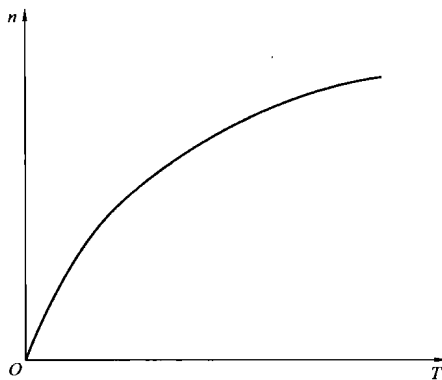


图 1-4 通风机负载特性曲线图

应该指出，以上 3 类是典型的负载特性，实际生产机械的负载特性常为几种类型负载的相近或综合。例如，起重机提升重物时，电动机所受到的除位能性负载转矩外，还要克服系统机械摩擦所造成的反抗性负载转矩，所以电动机轴上的负载转矩 T_L 应是上述两个转矩之和。

三、运动控制的基本方程式

1. 拖动系统的运动方程

图 1-5 所示为一单轴机电拖动系统，系统中由电动机 M 产生电磁转矩 T_{em} ，用来克服负载转矩 T_L 和电动机的空载阻转矩 T_0 （ T_0 很小，可忽略），以带动生产机械运动，当这两个转矩平衡时，传动系统维持恒速转动，转速 n 或角速度 ω 不变，加速度 $dn/dt=0$ 或角加速度 $d\omega/dt=0$ 。这种运动状态称为静态（相对静止状态）或稳态（稳定运行状态）。

当 $T_{em} \neq T_L$ 时，速度（ n 或 ω ）就要变化，产生加速或减速，速度变化的大小与传动系统的转动惯量 J 有关，把上述的这些关系根据动

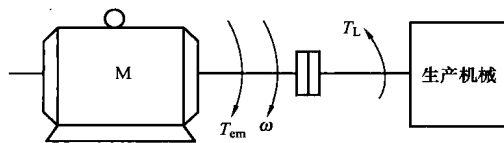


图 1-5 单轴机电拖动系统

力学定律用方程式表示, 即为

$$T_{\text{em}} - T_{\text{L}} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-3)$$

式中 T_{em} ——电动机产生的电磁转矩, 即拖动转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;

T_{L} ——单轴传动系统的负载转矩, 即阻转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;

J ——单轴传动系统的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

ω ——单轴传动系统的角速度, rad/s ;

t ——时间, s 。

这就是单轴电力拖动系统的运动方程式。

在实际工程计算中, 经常用转速 n 代替角速度 ω 来表示系统转动速度, 用飞轮矩 GD^2 代替系统转动惯量 J 来表示系统的机械惯性。 ω 与 n 的关系, J 与 GD^2 的关系分别如下:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (1-4)$$

$$J = m\rho^2 = \frac{G}{g} \times \frac{D^2}{4} = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-5)$$

式中 m ——系统转动部分的质量, kg ;

ρ 与 D ——系统转动部分的惯性半径与惯性直径, m ;

G ——系统转动部分的重力, N ;

g ——重力加速度, 取 $g=9.8\text{m/s}^2$;

GD^2 ——转动部分的飞轮矩, 是一个整体的物理量, 反映了转动体的惯性大小, $\text{N} \cdot \text{m}^2$ 。

将式 (1-4) 和式 (1-5) 代入式 (1-3) 中, 化简得

$$T_{\text{em}} - T_{\text{L}} = \frac{GD^2}{375} \times \frac{dn}{dt} \quad (1-6)$$

2. 拖动系统加速、减速和恒速运行的条件

式 (1-6) 中, 当 $T_{\text{em}} > T_{\text{L}}$ 时, 加速度 dn/dt 为正, 拖动系统为加速运动; 当 $T_{\text{em}} < T_{\text{L}}$ 时, dn/dt 为负, 系统为减速运动。系统处于加速或减速的运动状态称为动态。当 $T_{\text{em}} = T_{\text{L}}$ 时, 系统恒速运转, 系统处于稳态。但当受到外界的干扰时, 如负载转矩的增加或减小, 电源电压的变化等因素影响时, 平衡将被打破, 转速将发生变化。对于一个稳定的电力拖动系统来说, 当系统的平衡状态被打破后, 应具有恢复新的平衡状态的能力, 在新的平衡状态下稳定运行。

式 (1-6) 中 T_{em} 、 T_{L} 、 n 都是有方向的量, 计算时必须正确确定各量的正、负号, 才能正确反映各量之间的动力学关系。关于电磁转矩正方向的约定: 因为电动机和生产机械以共同的转速旋转, 所以, 一般以转动方向为参考来确定转矩的正负。设电动机某一转动方向的转速 n 为正, 则约定电动机转矩 T_{em} 与 n 一致的方向为正向, 负载转矩 T_{L} 与 n 相反的方向为正向。根据上述约定就可以从转矩与转速的符号上判定 T_{em} 与 T_{L} 的性质: 若 T_{em} 与 n 符号相同, 则表示 T_{em} 的作用方向与 n 相同, T_{em} 为拖动转矩; 反之, T_{em} 为制动转矩。而若 T_{L} 与 n 符号相同, 则表示 T_{L} 的作用方向与 n 相反, T_{L} 为制动转矩; 反之, T_{L} 为拖动转矩。

四、运动控制系统的调速指标

运动控制系统为了满足系统在调速、稳速和加减速控制的要求可以归纳为稳态和动态两

方面的性能指标。

1. 稳态性能指标

所谓稳态性能指标是指系统在稳定运行时所具有的性能指标,如静差率和调速范围等。

(1) 静差率 s 。静差率是指系统在某一转速稳定运行时,负载由理想空载增加到额定值时所引起的转速差 Δn 与理想空载转速 n_0 之比。即

$$s = \frac{\Delta n}{n_0} = \frac{n_0 - n_N}{n_0}$$

也可用百分数表示,即

$$s\% = \frac{\Delta n}{n_0} \times 100\% \quad (1-7)$$

静差率是用来表示负载转矩变化时电动机转速变化的程度的,与机械特性的硬度有直接的关系,机械特性越硬则静差率越小,当负载产生变化时运动控制系统的转速稳定性越好。

值得注意的是,不同的系统如果机械特性硬度相同(斜率相同),其静差率并不相同。理想空载转速较低的系统静差率较大,其转速的相对稳定度也较差。在一个运动控制系统中,如果能满足最低速时对静差率的要求,则大于最低速时的静差率也能满足需要。因此,一般运动控制系统所提出的静差率要求均是针对最低速的静差率指标。

(2) 调速范围 D 。调速范围是指电动机在额定负载下运行的最高转速和最低转速之比。即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1-8)$$

对于调速系统来说一般最高转速就是电动机的额定转速 n_N 。调速范围 D 越大,说明系统的速度范围越宽。根据调速范围的大小,可把运动控制系统分为三类: $D < 3$ 为调速范围小的系统; $3 \leq D < 50$ 为调速范围中等的系统; $D \geq 50$ 为调速范围宽的系统。现代运控系统的调速范围最多可达到 $D \geq 10\,000$ 。

(3) 静差率 s 与调速范围 D 的关系。调速范围和静差率两项性能指标是彼此相关的,一个系统的调速范围 D 是指其在最低转速时满足一定静差率 s 的情况下系统所能达到的最大调速范围,也就是说,调速范围 D 所对应的最低转速 $n_{\min}$ 必须满足系统静差率的要求。即

$$s = \frac{\Delta n}{n_{0\min}}$$

将 $n_{\min} = n_{0\min} - \Delta n = \frac{\Delta n}{s} - \Delta n = \frac{1-s}{s} \Delta n$ 代入调速范围 D 的公式中,即

$$D = \frac{n_N}{\frac{1-s}{s} \Delta n} = \frac{s n_N}{\Delta n (1-s)} \quad (1-9)$$

对于同一个调速系统其机械特性的硬度 Δn 是一定的,因此从式(1-9)中可以看出对静差率 s 的要求越小,则系统所能达到的调速范围就越小。

例如,某系统的额定转速 $n_N = 1450 \text{ r/min}$,机械特性的速度差为 $\Delta n = 80 \text{ r/min}$,当系统要求静差率 $s \leq 25\%$ 时,其调速范围是

$$D = \frac{s n_N}{\Delta n (1-s)} = \frac{0.25 \times 1450}{80 \times (1-0.25)} = 6.04$$

如果要求静差率 $s \leq 15\%$,其调速范围是

$$D = \frac{sn_N}{\Delta n(1-s)} = \frac{0.15 \times 1450}{80 \times (1-0.15)} = 3.2$$

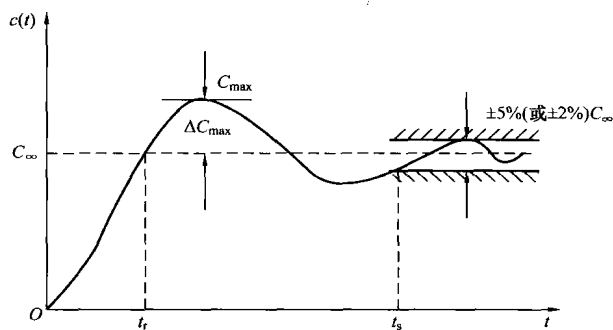


图 1-6 运动控制系统阶跃响应曲线

2. 动态性能指标

(1) 上升时间 t_r 。如图 1-6 所示, 在运动控制系统阶跃响应曲线上, 输出量从零开始, 第一次到达稳态值所需要的时间称为上升时间, 它反映了系统的初始快速性。

(2) 最大超调量 $M_p\%$ 。如图 1-6 所示, 在阶跃响应过程中, 输出量超出稳态值的最大偏差与稳态值之比称为最大超调量。

$$M_p\% = \frac{C_{\max} - C_{\infty}}{C_{\infty}} \times 100\%$$

(3) 调节时间 t_s 。在阶跃响应过程中, 输出量衰减到与稳态值之差在 $\pm 2\%$ 或 $\pm 5\%$ 误差等级范围内所需要的最短时间, 称为系统的调节时间。调节时间是用来衡量系统整个过渡过程的快慢的, 调节时间越短, 系统的响应的总体快速性越好。

思 考 题

1. 生产机械的负载转矩特性归纳起来有哪几种类型?
2. 电力拖动系统运行方程式中各量的物理意义是什么? 它们的正、负号如何确定?
3. 根据运动学方程式电力拖动系统在何时会加速、减速? 何时又会稳定运行?
4. 运动控制系统的稳态性能指标是什么? 各有何含义。
5. 运动控制系统的动态性能指标是什么? 各有何含义。
6. 已知一个调速系统, 其某系统的额定转速为 $n_N = 1500 \text{ r/min}$, 机械特性的速度降落为 $\Delta n = 50 \text{ r/min}$, 当系统要求的调速范围为 10 时, 其静差率 s 为多少? 如果要求静差率 $s \leq 20\%$, 其调速范围 D 应为何值?

第一篇

直流电动机及其控制系统

第二章 直流电动机的基本原理

直流电动机和交流电动机相比,具有良好的启动和调速性能,在电力拖动系统中应用广泛。在自动控制系统中,小容量的直流电动机应用也很广泛。直流电动机虽然有功率大小和用途的不同,但其基本结构和基本电磁关系大体相同。

本章主要介绍直流电动机的结构、原理和基本方程式。

第一节 直流电动机的基本结构

直流电动机由定子与转子(电枢)两大部分组成,定子与转子之间有空隙,称为气隙。

定子部分包括机座、主磁极、换向极、端盖、电刷等装置;转子部分包括电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴、风扇等部件。

直流电动机主要部件的作用与基本结构如图 2-1 所示。

1. 定子部分

定子是静止不动,它的作用是产生磁场和作为电机机械的支撑。

(1) 机座。机座一般用铸铁、铸钢或厚钢板焊接而成,机座中传导磁通的部分称为磁轭。机座的主要作用有三个:一是作为磁轭传导磁通,是电动机磁路的一部分;二是用来固定主磁极、换向极、端盖等;三是借助机座的底脚把电动机固定在基础上。机座必须具有良好的导磁性能和机械强度。

机座上还装有接线盒,电枢绕组和励磁绕组通过接线盒与外部连接。

(2) 主磁极。主磁极的作用是产生气隙磁场,由主磁极铁芯和套在上面的主磁极绕组(励磁绕组)构成。主磁极铁芯通常由 1.0~1.5mm 厚的低碳钢板冲片叠压而成,包括极身和极靴两部分。铁芯靠近气隙的部分做成弧形,以使气隙磁通较均匀分布,并能挡住套在铁芯上的励磁绕组,使其不致脱落。铁芯的弧形部分通常称为极靴或极掌。极身上面套有励磁

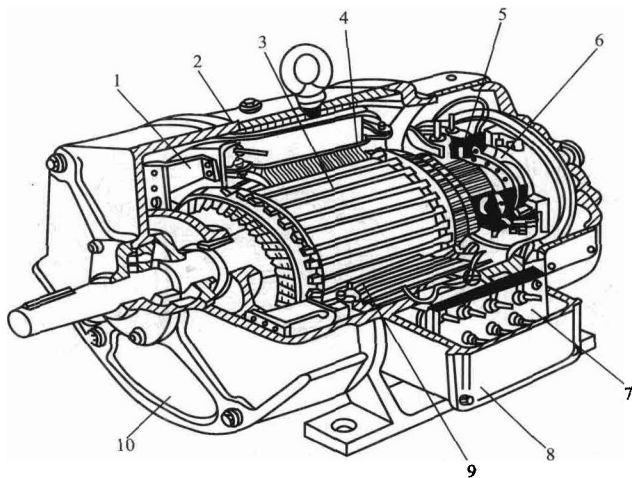


图 2-1 直流电动机的结构图

1—风扇; 2—机座; 3—电枢; 4—主磁极; 5—刷架;
6—换向极; 7—接线板; 8—出线盒; 9—换向器; 10—端盖

绕组, 绕组中通入直流电流。整个磁极用螺钉固定在机座上。

(3) 换向极。换向极用来改善直流电动机的换向性能, 由铁芯和套在铁芯上的绕组构成。换向极铁芯一般用整块锻钢制成, 如换向要求较高, 则用 $1.0 \sim 1.5\text{mm}$ 厚的钢板叠压而成, 其绕组中流过的是电枢电流。换向极装在相邻两主磁极之间, 其极数一般与主磁极极数相等, 用螺钉固定在机座上。

(4) 电刷装置。电刷装置有电刷、刷握、刷杆、刷杆架、弹簧、铜辫构成。它们固定在定子上, 其电刷与换向器保持滑动接触, 以便将电枢绕组和外电路接通并把电枢绕组中的交流量转变成电刷端的直流量。电刷组的个数一般等于主磁极的个数。

2. 转子部分

转子是直流电动机的重要部件。由于在转子绕组中产生感应电动势和电磁转矩, 因此转子是机械能与电能相互转换的枢纽。

(1) 电枢铁芯。电枢铁芯用来嵌放电磁绕组和构成电机的磁路, 其外圆周开槽。电枢旋转时, 电枢铁芯中的磁场是交变的, 为了减少涡流损耗, 电枢铁芯一般用 0.5mm 厚、两边涂有绝缘漆的硅钢片冲压而成, 如图 2-2 所示。电枢铁芯固定在转轴或转子支架上。铁芯较长时, 可把电枢铁芯沿轴方向分成数段, 段与段之间留有通风孔, 以改善铁芯的冷却条件。

(2) 电枢绕组。电枢绕组是用许多绝缘导线绕成的线圈, 按一定规律与换向器连接构成。它的作用是产生感应电动势和电磁转矩, 使电动机实现能量转换。

(3) 换向器。换向器是由多个彼此相互绝缘的换向片组成的, 片与片之间用一层薄云母绝缘, 电枢绕组各元件的始端和末端与换向片按一定规律连接, 如图 2-3 所示。换向器与转轴固定在一起。

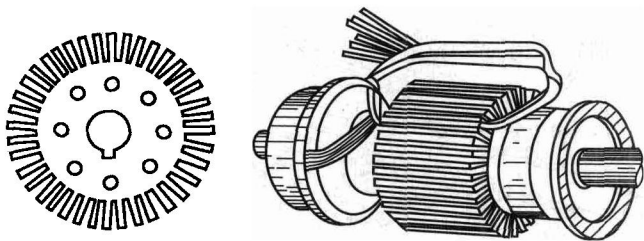


图 2-2 电枢铁芯

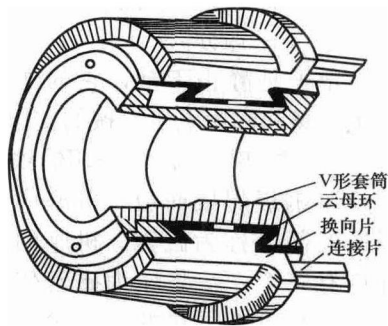


图 2-3 换向器

换向器是直流电动机最重要的部件之一, 也是最薄弱的环节, 其工作状态正常与否基本上决定了直流电动机运行的可靠性。

直流电动机和发电机在结构上没有什么差别。只是由于外部条件不同, 得到相反的能量转换过程: 发电机是将机械能转换为电能, 电动机是将电能转换为机械能。

第二节 直流电动机的工作原理

直流电动机的工作原理是基于安培定律的。若均匀磁场与导体相互垂直, 且导体中通过电流 I , 则作用于载流导体上的电磁力 f 为

$$f = B_x L I \quad (2-1)$$

式中 B_x ——导体所在磁场的磁通密度, Wb/m^2 ;

L ——导体的有效长度, m ;

I ——导体中流过的电流, A ;

f ——电磁力, N 。

由式(2-1)可知,对长度一定的导体来说,所受电磁力的大小由导体所处的磁通密度和通过导体的电流决定,电磁力的方向由左手定则来确定。

为了讨论直流电动机的原理,可把复杂的直流电动机结构简化为如图2-4所示的形式。电动机只有一对磁极N和S,是固定不动的定子磁极,电枢绕组只是一个转子线圈abcd,线圈两端a和b分别连在两个换向片上,换向片上压着电刷A和B。转子绕组与外电路的连接是通过放置在换向片上固定不动的电刷实现的。若把电刷AB接到一直流电源上,电刷A接电源正极,电刷B接电源负极,此时在电枢绕组中将有电流流过。

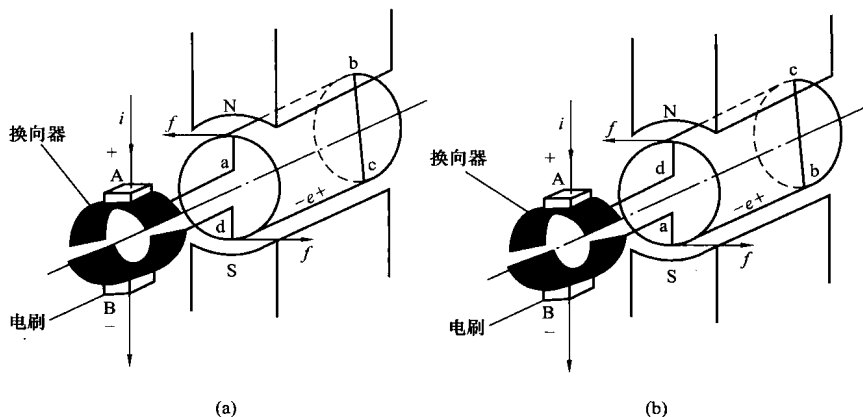


图 2-4 直流电动机的简化结构

(a) 电流从电刷 A 流入 B 流出的情况; (b) 电流从电刷 B 流入 A 流出的情况

在图2-4(a)中,电流从电刷A流入电枢的线圈,然后从电刷B流出。位于N极下的导体ab的电流是由a到b,根据左手定则导体ab受力方向为从右向左,而位于S极下的导体cd受力方向为从左向右。两个电磁力对转轴形成的电磁转矩使电动机逆时针方向旋转。当电枢转过 180° 之后,如图2-4(b)所示的位置时,导体cd转到N极下,其电流方向为从d到c,受力方向为从右向左;而导体ab转到S极下时,受力方向为从左向右。该转矩的方向仍为逆时针方向,线圈在此转矩作用下继续按逆时针方向旋转。这样虽然线圈中流通的电流为交变的,但在一定的磁极下的导线电流方向始终保持不变,所以电动机的转矩和旋转方向保持不变。

实际直流电动机中,由许多线圈牢固地嵌在电枢铁芯槽中,磁极N、S也是根据需要交替放置多对。当线圈中通过电流时,处于磁场中的导体因受到电磁力而运动,即带动整个电枢旋转,通过转轴便可带动工作机械。这就是直流电动机的基本工作原理。

第三节 直流电动机的磁场

直流电动机的磁场是由主磁极产生的励磁磁场和电枢绕组电流产生的电枢磁场合成的一