



卓越系列·21世纪高等教育精品规划教材



# 电机拖动与控制

ELECTRIC MACHINE  
DRIVING AND CONTROL

王进野 张纪良 主 编

 天津大学出版社  
TIANJIN UNIVERSITY PRESS



## 内 容 提 要

本书将“电机学”、“电力拖动基础”和“工厂电气控制技术”三门课程的有关内容有机整合成“电机拖动与控制”一门课程,节省了学时,密切了电机、电力拖动及电气控制之间的联系,避免了三部分中共性内容的重复。

本书主要包括电力拖动系统的基本知识、直流电机及拖动控制、变压器、交流电动机、三项异步电动机的拖动与控制、控制电机、典型生产机械的电气控制线路分析及电气控制系统的设计等基本内容。

本书在编写过程中,注重理论以够用为度,简化了烦琐的数学推导,力求深入浅出、通俗易懂,坚持科学性、先进性、实用性、综合性和新颖性。

本书可作为高等学校应用型本科自动化、机电一体化等专业以及高等职业教育相关专业的教材,也可作为工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电机拖动与控制/王进野,张纪良主编. —天津:天津大学出版社,2008.2

ISBN 978-7-5618-2624-9 主 编 王 进 野 张 纪 良

I. 电... II. ①王...②张... III. ①电机-电力传动  
②电机-控制系统 IV. TM30

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 009974 号

出版发行 天津大学出版社  
出 版 人 杨欢  
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)  
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742  
网 址 www.tjup.com  
短信网址 发送“天大”至 916088  
印 刷 昌黎太阳红彩色印刷有限责任公司  
经 销 全国各地新华书店  
开 本 169mm × 239mm  
印 张 19.75  
字 数 410 千  
版 次 2008 年 2 月第 1 版  
印 次 2008 年 2 月第 1 次  
印 数 1-4 000  
定 价 35.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

# 前 言

本书为了适应现代高等教育的改革和发展,根据应用型本科和高等职业教育的教学要求而编写。在编写过程中,充分考虑了应用型本科和高等职业教育的特点,坚持科学性、先进性、实用性、综合性和新颖性。

本教材将“电机学”、“电力拖动基础”和“工厂电气控制”三门课程有机整合成“电机拖动与控制”一门课程,这不仅避免了不必要的重复,紧缩了学时,而且密切了电机、电力拖动、电气控制之间的联系,加强了系统性。学生在学习“电工基础”等前续课程的基础上进行本课程学习,可为“交直流调速系统”、“可编程控制器”等后续课程的学习打好基础。通过本课程的学习:熟悉电力拖动系统的基本知识;掌握直流电机、变压器、交流电动机和控制电机的工作原理、结构特点及电磁能量关系;掌握交、直流电动机启动、调速、制动的工作原理和控制方法;掌握典型生产机械的电气控制线路的工作原理和分析方法;具有对一般电机、电器及电气控制系统的维护、选择、设计及故障排除能力。

本教材内容选择合理,理论联系实际,强化了应用,根据工程现场实际要求进行内容取舍,具有如下特点。

- (1)本着实用原则,简化了理论推导,注重物理概念的阐述与分析。
- (2)着重于电机在电力拖动控制系统中的应用,将电机学、电力拖动和电气控制融为一体,节省了学时,提高了知识传授的效率。
- (3)将维护和故障分析与理论教学内容进行了结合,以加强理论的实际应用,并编入了较成熟的技术,如无刷直流电动机、电动机软启动等。
- (4)书中电器的图形符号、文字符号均采用了最新的国家标准。

本书可作为高等学校应用型本科自动化、机电一体化等专业以及高等职业教育相关专业的教材,也可作为工程技术人员的参考用书。

全书共分8章,王进野、张纪良任主编,李英建、张寿伟、吴士涛任副主编。王进野编写绪论、第4章并与任保明合编第5章,张纪良编写第7章并与马进合编第8章,李英建编写第3章,张寿伟编写第1章,吴士涛编写第2章,李保银与齐爽合编第6章。在编写过程中参阅了许多专家、学者的著作,在此向他们表示衷心感谢。

本书由于志强、赵宏志老师担任主审,在此向他们表示衷心感谢。

由于编者水平有限,本书难免出现某些错误和不妥之处,欢迎各位读者批评指正。

编 者

2008年1月

# 目 录

绪论 .....	(1)
1 电力拖动系统的基础 .....	(4)
1.1 电力拖动系统的概述 .....	(4)
1.2 电力拖动系统机械负载的转矩特性 .....	(7)
1.3 基本电气控制元件 .....	(10)
1.4 基本控制电路环节 .....	(14)
1.5 常用低压电器的结构和工作原理 .....	(18)
习题 .....	(39)
2 直流电机及其拖动控制 .....	(41)
2.1 直流电机的概述 .....	(41)
2.2 直流电机的电枢绕组 .....	(50)
2.3 直流电机的磁场分布与换向的改善 .....	(56)
2.4 直流电动机 .....	(64)
2.5 直流发电机简介 .....	(70)
2.6 他励直流电动机的机械特性 .....	(76)
2.7 他励直流电动机的启动 .....	(82)
2.8 他励直流电动机的制动 .....	(87)
2.9 他励直流电动机的调速 .....	(95)
2.10 串励直流电动机的拖动与控制 .....	(100)
2.11 无刷直流电动机简介 .....	(104)
2.12 直流电机的故障分析及维护 .....	(105)
习题 .....	(109)
3 变压器 .....	(115)
3.1 变压器概述 .....	(115)
3.2 变压器的空载运行分析 .....	(120)
3.3 单相变压器的负载运行分析 .....	(125)
3.4 变压器参数的试验测定 .....	(130)
3.5 变压器的运行特性 .....	(134)
3.6 三相变压器 .....	(137)
3.7 自耦变压器及仪用互感器 .....	(143)
习题 .....	(147)
4 交流电动机 .....	(150)
4.1 三相异步电动机的工作原理和结构 .....	(150)

4.2	交流电机的定子绕组 .....	(159)
4.3	三相异步电动机的电路分析 .....	(165)
4.4	三相异步电动机的功率与电磁转矩 .....	(173)
4.5	三相异步电动机的工作特性及参数测定 .....	(176)
4.6	三相异步电动机的故障分析及维护 .....	(180)
4.7	单相异步电动机 .....	(183)
4.8	三相同步电动机 .....	(187)
	习题 .....	(192)
5	三相异步电动机的拖动与控制 .....	(195)
5.1	三相异步电动机的机械特性 .....	(195)
5.2	三相鼠笼异步电动机的启动与控制 .....	(200)
5.3	三相绕线转子异步电动机的启动与控制 .....	(213)
5.4	三相异步电动机的调速与控制 .....	(217)
5.5	三相异步电动机的制动与控制 .....	(225)
	习题 .....	(233)
6	控制电机 .....	(236)
6.1	伺服电动机 .....	(236)
6.2	测速发电机 .....	(241)
6.3	步进电动机 .....	(244)
6.4	直线电动机 .....	(246)
6.5	自整角机 .....	(248)
	习题 .....	(251)
7	典型生产机械的电气控制线路分析 .....	(253)
7.1	电气控制系统图的类型及有关规定 .....	(253)
7.2	电气控制线路分析基础 .....	(257)
7.3	普通车床的电气控制 .....	(259)
7.4	铣床的电气控制 .....	(261)
7.5	磨床的电液控制 .....	(269)
7.6	起重机械电气控制线路分析 .....	(274)
	习题 .....	(286)
8	电气控制系统的设计 .....	(287)
8.1	电气控制线路设计的一般原则和基本内容 .....	(287)
8.2	电力拖动方案的确定和电动机的选择 .....	(289)
8.3	电气控制原理线路设计的方法和步骤 .....	(297)
8.4	电气控制设备的工艺设计 .....	(305)
	习题 .....	(308)
	参考文献 .....	(309)

。电动机的主要作用是拖动各种生产机械，如机床、电动机车、轧钢机、起重机械、抽水机、鼓风机和各种农业机械等；在自动控制技术中也大量应用电动机，各种小巧灵敏的控制电动机广泛地作为检测、放大、执行和解算组件。在日常生活中家用电器应用也越来越广泛，如电风扇、洗衣机、吸尘器、空调、冰箱和电动自行车等，同样是应用电动机。

目前，电机制造业的发展主要有如下几大趋势。(a)大型化：单机容量越来越大。(b)微型化：为适应设备小型化的要求，电机的体积越来越小，重量越来越轻。(c)新

## 绪 论

### 一、电机及电力拖动系统概述

电机是指依据电磁感应定律实现电能与机械能之间转换或电能与电能之间转换的装置。电机种类繁多，其类别与分类方法有关。

如果按功能用途分类，电机可分为力能电机(包括发电机、电动机、变压器三大类)和控制电机。前者主要是进行能量转换，人们关心其力能指标，如功率、转速、转矩及效率等等；后者主要是指自动控制系统中用于信号的转换或传递的微型电机，人们只关心其控制性能即可靠性、快速性及信号的精度等。

按电机中电流的形式分类，电机可以分成直流电机和交流电机。交流电机又可分为同步电机和异步电机两大类，现代电力工业几乎都是采用交流同步发电机，而交流异步电机主要用做电动机。异步电动机中又有三相异步电动机和单相异步电动机两类；因转子结构不同又有鼠笼异步电动机和绕线式转子异步电动机。

按运动与否分类，电机可分为静止的电机和运动的电机。静止的电机主要是变压器，变压器属于交流电机，主要是用在供电系统作为电力变压器，其他用途的变压器称作特殊变压器；运动的电机大多是转子作旋转运动的普通旋转电机，应用在特殊场合也有转子作直线运动的直线电机。

电动机广泛应用于工业和农业生产中，作为原动机去拖动各种生产机械，如机床、电动机车、轧钢机、起重机械、抽水机、鼓风机和各种农业机械等；在自动控制技术中也大量应用电动机，各种小巧灵敏的控制电动机广泛地作为检测、放大、执行和解算组件。在日常生活中家用电器应用也越来越广泛，如电风扇、洗衣机、吸尘器、空调、冰箱和电动自行车等，同样是应用电动机。

目前，电机制造业的发展主要有如下几大趋势。(a)大型化：单机容量越来越大。(b)微型化：为适应设备小型化的要求，电机的体积越来越小，重量越来越轻。(c)新

原理、新工艺、新材料的电机不断涌现,如无刷直流电机、直线电机、开关磁阻电机等。

以电动机作为原动机来拖动生产机械运行的拖动方式,称为电力拖动。与蒸汽机、水轮机、内燃机等其他拖动方式相比较,电力拖动具有调节性能好、效率高、控制简单、能实现远距离控制和自动控制等优点,因而被大多数生产机械所采用,逐渐取代了其他拖动方式。电力拖动系统主要由电动机、传动机构和控制设备三个基本环节组成。

## 二、电力拖动控制系统的发展概况

从结构上看,电力拖动经历了“成组拖动”(即单台电动机拖动一组机械)、“单电机拖动”(即单台电动机拖动单台机械)、“多电机拖动”(即单台设备中采用多台电动机)三个阶段。

从控制上看,电力拖动控制系统的控制方式经历了仅采用继电-接触器组成的断续控制系统,到采用电动机扩大机、磁放大器构成的连续控制以及目前普遍采用由电力电子变换器供电的连续控制系统几大阶段。继电-接触器控制系统是由各种有触头的接触器、继电器、按钮、行程开关等组成的控制电路来实现对电力拖动控制系统的启动、制动、反转和调速的控制。该控制的输入、输出信号只有通、断两种状态,不能反映信号的变化,故称为断续控制。电力电子变换器供电的连续控制系统包括由相控变流器或斩波器供电的直流电力拖动控制系统和由变频器或伺服驱动器供电的交流调速系统两大类。连续控制系统不仅能反映信号的通与断,而且能反映信号的大小和变化,使控制系统获得更好的静态与动态特性,完成更复杂的控制任务。

随着电力电子技术、控制理论以及微处理器技术的发展,电力电子变换器供电的连续控制系统使电力拖动控制系统的性能指标上了一个大台阶,不仅可以满足生产机械快速启、制动以及正、反转的要求(即四象限运行状态),而且可以确保整个电力拖动控制系统工作在具有较高的调速、定位精度和较宽的调速范围内。这些性能指标的提高,使得设备的生产率 and 产品质量大大提高。除此之外,随着多轴电力拖动控制系统的发展,过去许多难以解决的问题也变得迎刃而解,如复杂曲轴、曲面的加工,机器人、航天器等复杂轨迹的控制和实现等。

目前,电力拖动控制系统正朝着网络化、信息化方向发展,包括现场总线、智能控制策略以及因特网技术在内的各种新技术、新方法均在电力拖动领域中得到了应用。

尽管电力拖动控制系统已可以实现无触头、连续控制、弱电化、微机控制,但由于继电-接触器控制系统具有结构简单、价格低廉等优点,仍能够满足各种生产机械的不同工艺的过程控制,目前仍然广泛应用于工程之中。

## 三、课程的性质和任务

“电机拖动与控制”是自动化、机电一体化等专业的一门主要课程,学生在学习“电工基础”等前续课程的基础上可进行本课程的学习。它是将原属于“电机学”、“电力拖动基础”和“工厂电气控制”三门课程的内容进行了有机融合,形成包含电机原



理、电力拖动和继电-接触器控制系统基本知识的“电机拖动与控制”课程。不难看出,它是一门兼有基础理论性和专业实践性的、介于专业基础课与专业课之间的课程。

本课程的任务是讲授电机学、电力拖动和继电-接触器控制方面的基本知识,使学生了解交直流电机、电力变压器的基本结构与工作原理,熟悉机、电、磁相结合的综合性问题的分析方法;掌握电力拖动控制系统中电动机的运行性能和基本控制方法,通过对典型机械设备电气控制系统的分析,起到举一反三的作用;熟悉和掌握工厂常用的继电-接触器电气控制技术。一方面是为培养学生的职业技能与素质,为毕业后从事本专业实际技术工作奠定必要的基础并具有适应技术发展的能力;另一方面也为学习“交直流调速系统”、“可编程控制器”、“数控机床”、“计算机控制技术”等后续课程准备必要的基础知识。本课程应配以一定的实验课和习题课以及继电-接触器控制部分的课程设计或工程实践等实践性教学环节,力求理论联系实际。

学习本课程后,应达到的具体要求有下面几点。

(1)熟悉常用低压电器的功能及用途,了解其基本结构、工作原理,具有正确使用和选择的能力。

(2)掌握直流电动机、电力变压器、三相异步电动机的基本结构、工作原理、工作特性、基本分析方法以及使用和维护方面的知识;了解常用特殊变压器、其他交直流电动机及控制电机的结构、性能、用途和特点等知识。

(3)掌握直流电动机和三相异步电动机的机械特性及电力拖动控制系统的分析计算方法;掌握其启动、制动、调速的原理和控制方法。

(4)掌握电机与电力拖动控制系统的基本实验方法和技能。

(5)熟练掌握继电-接触器控制系统基本环节的组成、功能和分析方法。

(6)掌握典型生产机械的继电-接触器控制电路的原理,具有系统的安装、调试和排除故障的能力。

(7)具有设计和改进一般生产机械电气控制电路的基本能力。

...不... ..

... ..

1 ... ..

# 电力拖动系统的基础

## 1.1 电力拖动系统的概述

本章只介绍在学习不同电力拖动系统时必须首先了解的一些具有共性的基础知识,包括系统的组成、电力拖动系统的运动方程式、机械负载的机械特性、常用控制元件、控制系统的基本控制环节以及涉及的一些基本概念等。

电力拖动系统主要由电动机、传动机构和控制设备三个基本环节组成。图 1.1 是电力拖动系统的框图。



图 1.1 电力拖动系统框图

所谓电力拖动系统,是指采用电动机拖动机械负载的传动系统。在目前的工程实际中,采用三相异步电动机和直流电动机的电力拖动系统应用最多。而所谓的控制是指对电力拖动系统中的电动机进行控制,这种控制是由手动控制方式逐步向自动控制方式发展的。继电-接触器控制是应用最早的控制系...

电力拖动系统的运行状态根据转速是否变化可分为静态和动态:静态也称稳定运行状态或稳态;动态也称暂态或过渡状态,即不稳定运行状态。在电力拖动系统中,电动机的工作状态是静态还是动态,取决于电动机所产生的电磁转矩与负载转矩是否平衡。当系统转矩平衡时电动机的转速恒定,即工作于静态,此时可以采用电动机的机械特性和生产机械的负载转矩特性进行运行状态的分析;当系统中的转矩不...

平衡时,电动机转速则处于变化中,即工作于动态,此时必须用动力学平衡条件建立数学模型即系统的运动方程式,作为分析系统运行状态的工具。

在电力拖动系统中,电动机将取自电网的电能转换成机械能,拖动生产机械实现生产工艺过程。电动机带动生产机械工作时,向负载传递功率和转矩。电动机与生产机械的工作机构之间如果采用直接连接,称为单轴拖动系统;如果电动机通过各种传动机构变速后与生产机械的工作机构之间相联接,则称为多轴拖动系统。单轴系统是最简单、最基本的拖动系统,因为单轴系统中只有一个负载转矩和一个转动惯量,数学模型最为简单,便于从动力学角度研究整个系统的运动规律。多轴系统经过转速和转动惯量的“折算”即可以看成是等效的单轴系统,因此在研究电力拖动系统运动规律时,虽然不同生产系统的具体结构和负载特性各不相同,但都可以将电动机、传动机构和生产机械的工作机构的系统抽象为一个等效的单轴系统。所以,本节只对单轴拖动系统的运动方程式进行讨论。

### 1.1.1 电力拖动系统运动方程式

所谓电力拖动系统的运动方程式,实质上就是牛顿第二定律表达式的应用形式。

根据力的平衡原理,在直线运动中,作用力总是由阻力及由速度变化引起的惯性力所平衡,这就是牛顿第二定律。在直线运动中,牛顿第二定律表达式即系统的运动方程式为

$$F - F_L = m \frac{dv}{dt} \quad (1.1)$$

式中:  $F$ ——作用在直线运动部件上的拖动力, N;

$F_L$ ——作用在直线运动部件上的阻力, N;

$v$ ——直线运动部件的线速度, m/s;

$m$ ——直线运动部件的质量, kg。

与直线运动相似,在旋转运动中,电动机产生的电磁转矩总是由负载转矩及由速度变化引起的惯性转矩所平衡,牛顿第二定律表达式或系统的运动方程式为

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1.2)$$

式中:  $T$ ——电动机的电磁转矩, N·m;

$T_L$ ——生产机械的负载转矩, N·m;

$J$ ——转动部分的转动惯量, kg·m<sup>2</sup>;

$\Omega$ ——转动部分的机械角速度, rad/s。

虽然方程式(1.2)的形式较简洁,用来分析和说明问题比较方便,但目前的工程计算中一般不用转动惯量而常采用飞轮矩  $GD^2$  表示惯性的大小;一般也不用角速度而用转速即每分钟的转数表示旋转速度。

转动惯量表示转动部分的惯性,转动惯量越大,其惯性越大,改变其角速度就越困难。转动惯量表达式为

$$J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{g} \cdot \frac{1}{4} = \frac{GD^2}{4g} \quad (1.3)$$

式中： $m$ ——转动部分的质量，kg；

$\rho$ ——转动部分的惯性半径，m；

$G$ ——转动部分的重量，N；

$D$ ——转动部分的惯性直径，m；

$g$ ——重力加速度， $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

$GD^2$ 作为一个整体，称为飞轮矩，单位为  $\text{N}\cdot\text{m}^2$ ，在数值上等于  $G$  和  $D^2$  的乘积，表示转动部分的惯性。电动机的飞轮矩在产品目录中给出。

角速度  $\Omega$  与转速  $n$  的关系为

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (1.4)$$

将转动惯量  $J$ 、角速度  $\Omega$  的表达式代入方程式(1.2)中，即得电力拖动系统运动方程式的另一种形式，即

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1.5)$$

式中： $\frac{dn}{dt}$ ——电动机转速的变化率， $\text{r}/(\text{min}\cdot\text{s})$ ；

375——具有加速度量纲的系数。

利用方程式(1.5)可以判断电力拖动系统的运行状态：

①当  $T > T_L$  时，转速变化率  $dn/dt > 0$ ，则拖动系统加速运行；

②当  $T < T_L$  时，转速变化率  $dn/dt < 0$ ，则拖动系统减速运行；

③当  $T = T_L$  时，转速变化率  $dn/dt = 0$ ，则拖动系统处于稳态运行状态。

### 1.1.2 电力拖动系统中转速和转矩的正方向

在电力拖动系统中，各物理量与电路中的电流、电压、电动势等量类似，如式(1.5)中的转速  $n$ 、电磁转矩  $T$ 、负载转矩  $T_L$  等是有方向的，但是只有非此即彼的两个方向，即要么顺时针方向，要么逆时针方向。由于电动机运行状态的不同和生产机械负载类型的不同，电动机的电磁转矩  $T$ 、负载转矩  $T_L$  和转速  $n$  均为变量，不仅大小经常变化，且方向也可能变化。为此，在列写和应用运动方程式时，必须首先按所谓“电动机惯例”规定转速和各种转矩的正方向。正方向一旦规定了，当转速或某转矩为正值时，就说明其实际方向与正方向相同；当它们为负值时，就说明其实际方向与正方向相反。

由于各转矩正方向的确定与转速的正方向是相关联的，按“电动机惯例”规定正方向，也就是按电动机正常运行时转速与各转矩方向的相应关系来规定正方向。在首先选定转速  $n$  的正方向以后，分别根据电磁转矩  $T$  和负载转矩  $T_L$  与转速  $n$  的方向关系确定它们各自的正方向。

①规定电磁转矩  $T$  的正方向与转速  $n$  的正方向相同,即认为电磁转矩是驱动转动的力矩。

②负载总转矩  $T_L$  的正方向与转速  $n$  的正方向相反,即认为负载总转矩是阻碍转动的力矩。

电力拖动系统各量的正方向规定如图 1.2 所示。显然,电动机在正常的电动运行时各量均为正值,符合人们在讨论电动机问题时的习惯,故称“电动机惯例”。

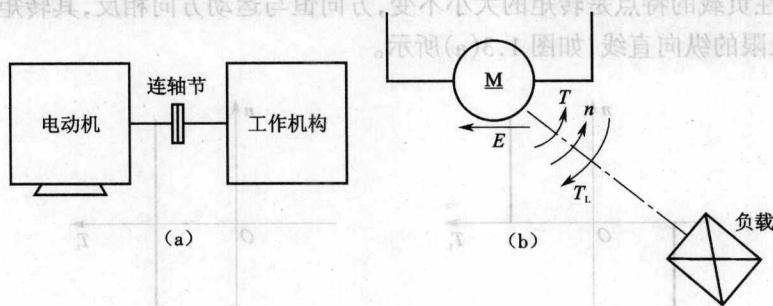


图 1.2 电力拖动系统转速、转矩的正方向规定

关于转速  $n$  的正方向的规定,原则上可以任意选取。在实际工程应用中也有一些习惯上的规定方法,如习惯上规定沿顺时针方向转动时转速为正值,沿逆时针方向转动时为负值;对于起重机,习惯上规定提升重物时的方向为正方向;对于龙门刨床,规定工作台切削时的方向为正方向,等等。

## 1.2 电力拖动系统机械负载的转矩特性

生产机械运行时常用转矩标志其负载的大小。在电力拖动系统中存在着两个主要转矩,一个是机械的负载转矩,一个是电动机的电磁转矩。这两个转矩与转速之间的关系分别称为生产机械的负载转矩特性  $n = f(T_L)$  和电动机的机械特性  $n = f(T)$ 。由于电动机轴和生产机械轴是相连接的,它们的特性必须适当配合才能得到合理的工作状态。因此,为了满足生产工艺过程要求,正确选择电力拖动系统,就需要了解生产机械的负载转矩特性和电动机的机械特性。本节只讨论生产机械的负载转矩特性(简称负载特性),电动机的机械特性将在后续相关章节讨论。

生产机械的种类繁多,它们的负载特性各不相同,但常见的负载特性可以归纳为恒转矩、恒功率和风机泵类三种典型特性。

### 1.2.1 恒转矩负载特性

负载转矩  $T_L$  的大小与转速  $n$  无关,转速  $n$  变化时,负载转矩  $T_L$  保持恒定不变,这种负载称为恒转矩负载。恒转矩负载又分为反抗性负载和位能性负载两种。

### 1. 反抗性负载

这类负载的转矩  $T_L$  是由摩擦产生的,所以  $T_L$  总是与转速  $n$  的方向相反,是反抗运动的。根据运动方程中正方向的规定,当转速为正值时,负载转矩为正值,负载特性曲线在第一象限;当转速为负值时,负载转矩为负值,负载特性曲线在第三象限;当转速为零时,负载转矩也为零。皮带运输机、轧钢机、机床的刀架平移和行走机构(如工作台)等由摩擦力产生转矩的机械都属于反抗性恒转矩负载。

反抗性负载的特点是转矩的大小不变,方向恒与运动方向相反,其转矩特性为位于一、三象限的纵向直线,如图 1.3(a)所示。

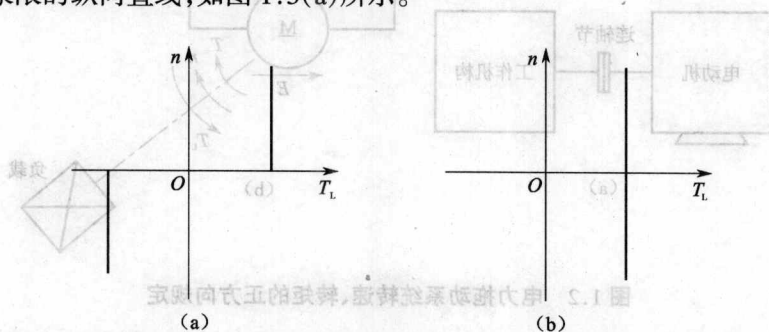


图 1.3 恒转矩负载特性

(a) 反抗性负载 (b) 位能性负载

### 2. 位能性负载

位能性负载的转矩一般是由物体的重力产生的,它的大小和方向与转速无关,始终保持不变。如起重机负载,在提升重物时,负载转矩的方向为向下;当下放重物时,由于重力的作用,负载转矩的方向仍为向下,即负载转矩的方向与运动方向无关。若设提升重物时的转速为正,根据转矩正方向的规定,提升重物时负载转矩与转速方向相反,转速与负载转矩均为正值,负载特性曲线在第一象限;下放重物时转速为负值,负载转矩方向不变,仍为正值,负载特性曲线在第四象限。位能性负载的特点是除了负载转矩的大小不变外,负载转矩的方向也是不变的,与运动方向无关。其转矩特性曲线是纵贯一、四象限的直线,如图 1.3(b)所示。

#### 1.2.2 恒功率负载特性

这类负载当转速  $n$  变化时,负载从电动机轴上吸收的功率基本不变,所以称为恒功率负载,即负载功率

$$P_L = T_L \Omega = \text{恒定值} \quad (1.6)$$

此时负载转矩

$$T_L = \frac{P_L}{\Omega} = P_L \frac{60}{2\pi n} \quad (1.7)$$

例如金属切削机床是典型的恒功率负载,在粗加工时,切削量大,切削力和负载转矩

大,通常切削速度较低;精加工时,切削量小,切削力和负载转矩小,但由于对加工精度要求高而使切削速度较高,切削功率则基本不变。又如轧钢机轧制钢板时,小工件需要高速度低转矩,大工件需要低速度高转矩,这些工艺要求都是恒功率负载特性。

恒功率负载特性曲线呈双曲线。正反转时曲线分别处于一、三象限,如图 1.4 所示,图中只画出了正转时的特性曲线。

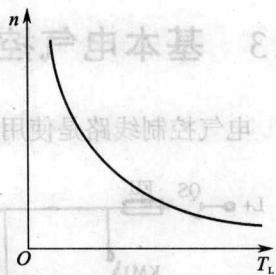


图 1.4 恒功率负载特性曲线

### 1.2.3 风机泵类负载特性

这类负载是按离心原理工作的,如通风机、水泵等。它们的负载转矩与转速的平方成正比,称为风机泵类负载。即

$$T_L = kn^2 \quad (2.8)$$

式中, $k$  为比例系数。

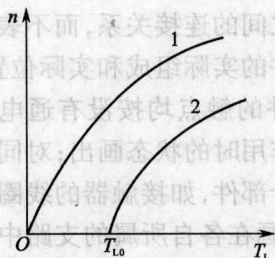


图 1.5 风机泵类负载特性曲线

风机泵类负载的负载特性曲线呈抛物线形状,如图 1.5 中曲线 1 所示,图中只在第一象限画出了转速为正时的特性,当转速为负时,特性应在第三象限,且与第一象限的特性对称。

以上介绍的恒转矩负载特性、恒功率负载特性和风机泵类负载特性都是从实际各种负载中概括出来的典型负载特性。实际生产机械的负载转矩特性可能是以某种典型特性为主,或是以上几种典型特性的结合。

例如,实际通风机除了主要是风机负载特性外,由于其轴承上还有一定的摩擦转矩  $T_{L0}$ ,因而实际通风机的负载转矩特性应为

$$T_L = T_{L0} + kn^2$$

其转矩特性右移,如图 1.5 中曲线 2 所示。

又如实际的起重机械除了主要的位能性恒转矩负载之外,也存在摩擦阻转矩即反抗性恒转矩负载,所以其实际负载特性是反抗性恒转矩负载和位能性恒转矩负载二者的叠加,但是由于比起位能性负载转矩来,反抗性负载转矩很小,重载时可以忽略不计。在提升重物时,二者均为阻碍提升方向相同故相加,叠加后的实际负载转矩有所增大,其曲线右移,一般仍然在第一象限;当下放重物时,由于重力引起的位能性负载转矩是起驱动下放的作用,而反抗性的摩擦阻转矩是起阻碍下放的作用,二者方向相反,故相互抵消,所以其实际负载转矩比理想的位能性负载转矩有所减小,其特性曲线左移,一般仍然在第四象限。

## 1.3 基本电气控制元件

电气控制线路是使用电气控制元件来实现对电力拖动系统中电动机的启动、制动、反向和调速等运行状态进行控制

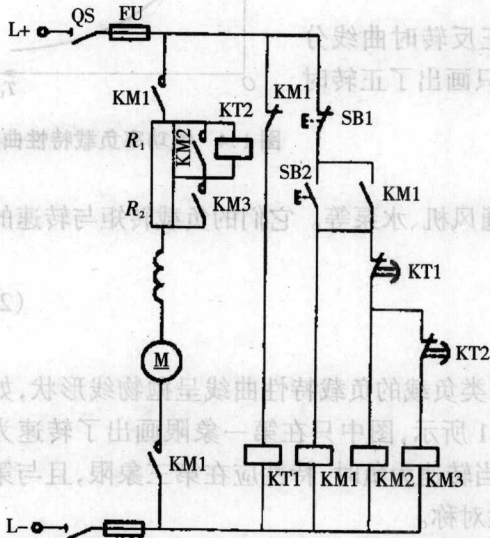


图 1.6 直流串励电动机的控制原理图

及保护的。继电器-接触器控制线路是由继电器、接触器等常用的基本控制元件连接而成的。如直流串励电动机典型控制线路就由熔断器、组合开关、时间继电器、接触器和按钮等电气元件连接而成,如图 1.6 所示。图中电气元件是采用展开形式绘制的,这种图称为电气原理图,将在后面进一步介绍。注意,它只是反映了所有电气元件之间的连接关系,而不表示各电气元件的实际组成和实际位置;图中各元件的触点均按没有通电或不受外力作用时的状态画出;对同一电器的各个部件,如接触器的线圈和触点,分别画在各自所属的支路中并

标注相同的文字符号。作为必须掌握的系统基础知识,本节只介绍继电器-接触器控制电路常用的基本元件的图形及文字符号和基本功能。至于这些元件的具体结构和原理在 1.5 节作详细介绍。

### 1.3.1 熔断器

熔断器是一种最简单有效的过电流保护元件,串联在所保护的电路中。当电路发生短路或严重过载时,熔体中流过很大的故障电流,当电流产生的热量使熔体温度上升到熔点时,熔体熔断,产生电弧,并迅速地将电弧熄灭,切断电路,从而达到保护电气设备的目的。熔断器的符号如图 1.7 所示,右图为三相的熔断器。

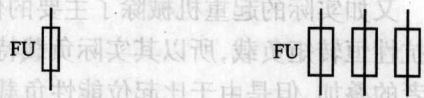


图 1.7 熔断器的图形及文字符号

### 1.3.2 开关元件

#### 1. 低压隔离器

低压隔离器也称刀开关,是控制元件中结构比较简单、应用十分广泛的一类手动操作电器,品种很多,主要有低压刀开关、熔断器式刀开关和组合开关三种。刀开关



主要作用是电动机停止工作后将控制线路与电源完全断开,保障检修人员的安全。

熔断器式刀开关由刀开关和熔断器组合而成,故兼有两者的功能,即电源隔离和电路保护功能,可分断一定的负载电流。

图 1.8 是普通刀开关的图形及文字符号。

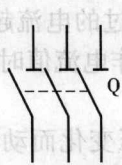


图 1.8 刀开关的图形及文字符号

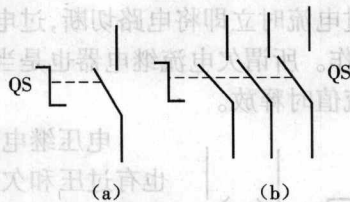


图 1.9 组合开关的图形及文字符号  
(a)单极式 (b)三极式

## 2. 自动开关

自动开关又称自动空气低压断路器。若电压正常,可以采用手动或自动操作机构将自动开关合闸并且锁住而接通电路。如果此时电路发生过流、欠压、失压、过载等故障,则通过各种脱扣器能够立即将电路断开。自动开关中使用的脱扣器包括过电流、欠电压(失电压)脱扣器和热脱器等。

自动开关在控制系统中常用做电源进线开关,对电动机进行过载、短路和失压等保护。

图 1.10 是自动开关的图形及文字符号。

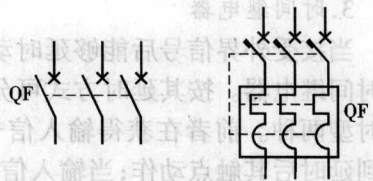


图 1.10 自动开关的图形及文字符号

### 1.3.3 接触器

接触器是能频繁远距离地自动接通或断开电动机供电主电路或大容量控制电路的一种自动控制元件,具有较强的灭弧能力,常用于控制电动机或其他负载的大电流电路,由于具备低电压释放功能,还可以起到失压保护作用。按照控制电流种类的不同,接触器可分为交流接触器和直流接触器两类。

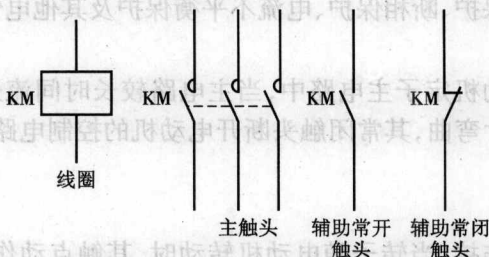


图 1.11 接触器的图形及文字符号

接触器的图形及文字符号如图 1.11 所示。在原理图中,其触点和线圈常分别画在主电路和辅助电路中。

### 1.3.4 继电器

电磁式继电器是一种根据输入信号的变化来控制触头的动作,实现接通或断开小电流电路的自动控制元件。常用的继电器主要有电压继电器、电流继电器、中间继电器、时间继