

Kuangshan Dianli Tuodong Yu Kongzhi

矿山电力拖动与控制

主 编 曹 翯
副主编 孙慧峰 郭宗跃

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

矿山电力拖动与控制

主 编 曹 翯

副主编 孙慧峰 郭宗跃

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是高职高专教材,介绍了电力拖动基础、直流电动机拖动、异步电动机机械特性、控制电器等几方面知识。适合高职高专教学使用,也可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿山电力拖动与控制/曹翔主编. —徐州:中国
矿业大学出版社,2007.9
ISBN 978 - 7 - 81107 - 737 - 7

I. 矿… II. 曹… III. 煤矿—电力拖动—高等学校:技
术学校—教材 IV. TD53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 141503 号

书 名 矿山电力拖动与控制
主 编 曹 翔
责任编辑 耿东锋
责任校对 周俊平
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 787×1092 1/16 印张 17 插页 1 字数 426 千字
版次印次 2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月第 1 次印刷
定 价 22.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

本书是根据段浩钧主编的《矿山电力拖动与控制》而修订的教材大纲编写的高职高专学校专业教材,也可供矿山电气技术人员参考。

为了配合高职高专教育的教学改革,满足培养生产第一线应用性人才的要求,本教材在编写中,依据“淡化理论,够用为度,培养技能,重在应用”的原则,力求做到概念准确、内容精练、突出重点、联系实际、通俗易懂、便于自学。具体体现在以下几个方面:

(1) 注重基本原理和基本概念的阐述,降低理论分析的难度,删去繁琐的公式推导,重点强调基本理论的实际应用。

(2) 注重反映新的调速技术,加强了交流拖动的内容,并适当编入工程中较成熟的技术。

(3) 为便于巩固应掌握的基本知识,书中所涉及的实训环节的内容,附在教材中。

(4) 内容叙述上力求简明扼要,通俗易懂,富于启发性。

本书中电路图的原件图形符号和文字符号均采用新国标,常用角标采用国际通用注脚。

本书由曹翮任主编,孙慧峰、郭宗跃任副主编。书中第四、五、八、九章由曹翮编写,第一、二、三章由孙慧峰编写,第六、七、十章由平顶山工业职业技术学院郭宗跃编写。全书的修改定稿由曹翮负责。此外,参与本书资料收集和审读的还有赵利、马蕴琪、李欣、刘会、赵满兴、钱建塘、林启、申金乡。

由于编者水平有限,书中难免出现不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2007年7月

目 录

第一章 电力拖动基本知识	1
第一节 概述.....	1
第二节 电力拖动系统的转矩及运动基本方程式.....	3
第三节 电力拖动系统转矩的折算.....	5
第四节 生产机械和电动机机械特性的分类.....	9
第五节 电动机稳定运行条件	12
小结	13
习题	14
第二章 直流电动机电力拖动	15
第一节 他励直流电动机的机械特性	15
第二节 他励直流电动机的起动	20
第三节 他励直流电动机的制动	21
第四节 他励直流电动机的调速	28
第五节 串励直流电动机的电力拖动	34
小结	40
习题	40
第三章 异步电动机的机械特性	42
第一节 三相异步电动机的机械特性	42
第二节 三相异步电动机的起动	49
第三节 交流异步电动机的电气制动	59
第四节 异步电动机的调速	65
第五节 同步电动机机械特性概述	73
小结	76
习题	77
第四章 控制电器	78
第一节 按钮、组合开关、限位开关	78
第二节 主令控制器	81
第三节 接触器	82
第四节 控制用继电器	85

第五节	保护电器	88
第六节	自动空气开关	90
第七节	电子型开关	91
第八节	电子式软起动器	93
第九节	控制电机	97
第十节	微型特种电机	102
小结	.....	109
习题	.....	110
第五章	电气控制的基本线路	111
第一节	电气控制的基本知识	111
第二节	基本控制线路	120
第三节	电动机起动的自动控制	128
第四节	异步电动机的制动控制线路	133
第五节	异步电动机的调速控制线路	134
第六节	直流电动机的控制线路	137
小结	.....	138
习题	.....	139
实训课题	基本控制线路实训	141
实训 1	电动机起动的自锁控制	141
实训 2	电动机的能耗制动控制	143
实训 3	电动机的正反转控制	145
实训 4	电动机的自动顺序控制	147
实训 5	电动机的 Y/ Δ 降压起动控制	148
第六章	700 系列电牵引采煤机电气系统介绍	152
第一节	概述	152
第二节	700 系列电牵引采煤机电气系统原理介绍	153
第三节	700 系列电牵引采煤机电气控制系统	158
第四节	700 系列电牵引采煤机电气系统操作	173
附录 A	变频装置使用指南	179
第七章	主提升交流拖动电控系统	186
第一节	提升机电力拖动的控制过程	186
第二节	TKD—A 型提升机电气控制线路	190
小结	.....	208
习题	.....	208

第八章 直流电动机的控制	209
第一节 他励直流电动机的控制简介.....	209
第二节 矿用电动机晶闸管脉冲调速电控系统.....	217
小结.....	226
习题.....	227
第九章 同步电动机的控制	228
第一节 同步电动机的控制特点.....	228
第二节 晶闸管励磁的同步电动机电控系统.....	229
小结.....	241
习题.....	241
第十章 电动机的选择	242
第一节 电动机容量选择概述.....	242
第二节 电动机的发热与冷却.....	243
第三节 连续运行状态下电动机容量的选择.....	248
第四节 短时运行状态下电动机容量的选择.....	255
第五节 断续运行状态下电动机容量的选择.....	257
第六节 电动机结构类型的选择.....	257
小结.....	258
习题.....	259
主要参考文献	261

第一章 电力拖动基本知识

第一节 概 述

拖动是指应用各种原动机带动生产机械运动,来完成一定的生产任务的过程。用电动机作为原动机来拖动生产机械的拖动方式,称为电力拖动,也称电机拖动。它由电动机、控制设备和机械传动机构三个环节组成,其作用是将电能转换成各种生产机械所需要的机械能。在现代工业生产中,大多数生产机械都采用电力拖动。现代电力拖动系统已由各种控制元件组成的自动控制系统紧密地联系在一起,这对电力拖动系统在准确性、经济性、先进性以及调试维修等方面提出了越来越高的技术要求。

“电力拖动与控制”是专门研究用电动机来带动生产机械运转中的各种问题的,它可以分为电力拖动原理及控制两部分。前者是在已知生产机械的机械特性和电动机的机械特性的基础上研究有关生产机械运转的性能,如生产机械的运动规律,加速、减速、制动、反转等过程,转速随时间变化的规律以及起动设备和电动机的选择等问题;后者则是为达到生产机械的某种运转的要求而研究控制方法、选择控制电器、控制线路等。

电力拖动在工业、农业、交通等部门中得到了广泛的应用。其主要原因是:

- (1) 电能输送方便,分配简单,价格低廉;
- (2) 电动机是一种将电能转变为机械能的电磁设备,凡有电能的地方都能使用,而且电动机的效率高、运行比较经济;
- (3) 电力拖动效率高,控制方便,拖动性能好;
- (4) 电动机的种类和型式很多,能适应各种不同生产机械和生产工艺的要求;
- (5) 电力拖动具有良好的调速性能,起动、制动、调速、反转等控制简便而迅速;
- (6) 便于通过各种仪表和仪器进行检查和观察,以便对生产过程进行干预,使之达到生产工艺要求的最佳工作状态;
- (7) 便于实现远距离控制和自动调节,便于集中管理,实现生产过程自动化。

因此,电力拖动,特别是自动化的电力拖动就成为现代工业生产高度自动化的基础和核心。

一、自动控制的发展

19世纪末,在生产机械的拖动系统中,电动机逐渐代替了蒸汽机,出现了电力拖动。最初是由一台电动机通过天轴拖动数台乃至一个车间的生产机械,这种拖动方式叫成组拖动。成组拖动传动机构复杂,转速不高,效率低,灵活性差,又不安全。随着生产发展的需要,20世纪20年代电力拖动系统由最初的成组拖动发展到一台电动机拖动一台生产机械的单电机拖动方式,这样就减少了中间传动机构,提高了效率,为生产机械提供了更大的动力和更高的速度。随着生产规模的扩大,逐渐出现了大型复杂的机械设备,这些机械上的运动机构

和运动形式也相应增加。如果仍用一台电动机拖动,势必使传动机构十分复杂,因此 20 世纪 30 年代又出现了一台机械由多台电机拖动的多电机拖动方式。采用多电机拖动方式后,大大简化了机械结构,使各个工作机构采用最合理的运动速度,缩短了机动与辅助工时,便于实现生产机械的自动化,提高了生产率。目前,绝大多数的生产机械采用单电机拖动或多电机拖动。

电力拖动可以分为直流拖动和交流拖动两大类。由于交流电动机具有结构简单、运行维护方便、不需要整流设备、价格便宜等优点,所以应用最为广泛。但直流电动机具有良好的起动、控制和调速性能,可以方便地在很宽的范围内平滑地调速,尤其是大功率晶闸管的问世,为直流拖动提供了方便的电源,所以在频繁起动、制动及调速要求较高的场合,直流拖动占据了重要地位。然而近年来由于电子计算机技术的发展,解决了变频和逆变等技术问题,又为交流电机的变频调速、串级调速的应用开辟了广阔的天地。至此,交流电动机在调速性能上也不亚于直流电动机。

在电力拖动方式的演变过程中,电力拖动的控制方式由手动控制逐步向自动控制方向发展。最初的自动控制是用数量不多的继电器、接触器及保护元件组成的继电器—接触器控制系统。这种控制具有使用的单一性,即一台控制装置只能针对某一种固定程序的设备,一旦程序有所变动,就得重新配线。而且这种控制的输入、输出信号只有通和断两种状态,因而这种控制是断续的,不能连续反映信号的变化,故称为断续控制。

为了使控制系统获得更好的静态和动态特性,完成更复杂的控制任务,常采用反馈控制系统。反馈控制系统由连续控制元件组成,它不仅能反映信号的通或断,而且能反映信号的大小和变化,这种由连续控制元件组成的反馈控制系统,称为连续控制系统。用于连续控制的元件,以前普遍采用电机扩大机和磁放大器,随着半导体器件和晶闸管的发展,现在越来越多地采用晶闸管作为控制元件的晶闸管控制系统。

20 世纪 60 年代出现了一种能够根据生产需要,方便地改变控制程序的顺序控制器。它是通过组合逻辑元件的插接或编程来实现继电器—接触器控制线路的装置,能满足程序经常改变的控制要求,使控制系统具有较大的灵活性和通用性,但仍使用硬件手段且装置体积大,功能也受到一定限制。70 年代出现了用软件手段来实现各种控制功能以微处理器为核心的新型工业控制器——可编程序控制器。它不仅充分利用微处理器的优点来满足各种工业领域的实时控制要求,同时也照顾到现场电气操作维护人员的技能和习惯,摒弃了微机常用的计算机编程语言的表达形式,独具风格地形成一套以继电器梯形图为基础的形象编程语言和模块化的软件结构,使用户程序的编制清晰直观,方便易学,且调试和查错容易。它不仅可取代继电器、接触器为主的顺序控制器,而且广泛应用于大规模的生产过程控制,具有通用性强、程序可变、编程容易、可靠性高、使用维护方便等优点,故目前在世界各国已作为一种标准化通用设备普遍应用于工业控制。

由于数控技术的发展和电子计算机的应用,电力拖动自动控制发展到了一个新水平,正向着生产过程自动化的方向发展。

二、课程的性质与要求

本课程是一门实践性强的主要专业课之一,是普通电工学、电机学、电子技术的后续课程,在进行了电工实践的基础上进行讲授,使学生具有较牢固的基础理论知识和较强的感性认识。

电力拖动与控制课程的理论性、综合性和实用性都较强,学习时应着重理解基本概念、掌握基本方法和注意基本技能的训练,具体应达到下述要求:

(1) 应用动力学运动方程式,分析电力拖动系统中电动机转矩与负载转矩之间的关系及变化规律。

(2) 掌握电动机在各种运行状态下机械特性的基本理论,熟悉电动机启动、调速、制动特性以及启动设备的计算方法。

(3) 正确选择电动机的容量和结构类型。

(4) 熟悉常用控制电器的用途、构造和工作原理。

(5) 熟练掌握电气控制线路的基本环节,具有对一般电气控制线路的分析能力。

(6) 熟悉典型生产设备电气控制系统,具有从事电气设备安装、调试、运行、维修的能力。

(7) 具有设计和改进一般生产设备电气控制线路的能力。

通过本课的学习和实践,可为从事工矿企业电气化工作打下牢固的基础。

第二节 电力拖动系统的转矩及运动基本方程式

电力拖动系统是一个统一的动力学系统。系统的运动方程式由电动机产生的电磁转矩与生产机械负载转矩之间的关系决定。要研究电力拖动系统,就必须分析电动机与负载之间的关系。从动力学的角度来看,它们服从动力学统一的规律。

一、电力拖动装置的组成

一般情况下,电力拖动装置由电动机、工作机构、传动机构、控制设备及电源五部分组成,如图 1-1 所示。

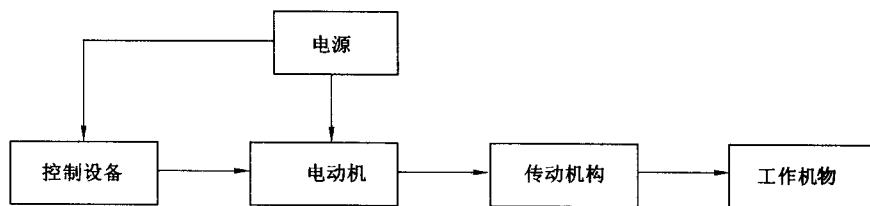


图 1-1 电力拖动系统示意图

电动机将取自电网的电能为机械能,用于拖动生产机械的某一工作机构。工作机构是生产机械为执行某一任务的机械部分。控制设备是指各种控制电机、电器,用来控制电动机的运行。电源是向电动机及一些电气控制设备供电的部分。电动机与生产机械的工作机构并不同轴,它们之间还有传动部分,称为传动机构,把电动机的运动,经过中间变速或变换运动方式后,再传给生产机械的工作机构。

二、电力拖动系统的转矩

在电力拖动系统中,有三种转矩存在。

(1) 拖动转矩——电动机轴上输出的转矩,在一般工程计算中,可认为等于电动机产生的电磁转矩。

(2) 阻转矩——生产机械的负载转矩。

(3) 动态转矩——电机转速发生变化时,因为电机转子和被它拖动的生产机械具有惯性而产生的一个惯性转矩。

三、运动方程式

在拖动系统中,当电动机以恒定的转速拖动工作机构稳定运行时,电动机产生的拖动转矩应克服系统的负载转矩。如果要使工作机构变速运行,电动机产生的拖动转矩除克服负载转矩外,还应克服由于运动部分的惯性所引起的动态转矩。按照动力学平衡的观点,将系统中各个转矩联系起来,组成了运动方程式。

$$T_m - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-1)$$

式中 T_m ——电动机产生的拖动转矩, $N \cdot m$;

T_L ——负载转矩, $N \cdot m$;

$J \frac{d\Omega}{dt}$ ——惯性转矩, $N \cdot m$;

J ——转动惯量, $kg \cdot m^2$;

Ω ——电机轴旋转角速度, rad/s 。

转动惯量 J 是物理学中常用的参量,在实际的工程应用中则采用飞轮惯量 GD^2 ,其单位是 $N \cdot m^2$ 。两者的关系为

$$J = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-2)$$

式中 G ——转动部分的重力, N ;

D ——转动部分的直径, m ;

g ——重力加速度, m/s^2 。

通常电动机的转速用每分钟的转数 n 表示,而不用角速度 Ω 。

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (1-3)$$

将式(1-2)、式(1-3)代入式(1-1),得到运动方程式的实用形式为

$$T_m - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-4)$$

式中,换算常数 375 具有加速度的量纲。

应当注意, GD^2 是代表物体旋转惯性的一个整体物理量,不能分开。电动机电枢(或转子)及其他转动部件的 GD^2 可由产品样本和有关设计资料中查到,但其单位目前尚用 $kg \cdot m^2$ 表示。为了化成国际单位,将查到的数据乘以 9.81 则换算成 $N \cdot m^2$ 。

电动机的工作状态可由运动方程式表示出来,由式(1-4)可知:

(1) 当 $T_m > T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} > 0$, 电力拖动系统处于加速状态。

(2) 当 $T_m < T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} < 0$, 电力拖动系统处于减速状态。

在上述两种情况下,拖动系统处于变速过程,称为动态。

(3) 当 $T_m = T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} = 0$, 则 $n = 0$ 或 $n = \text{常数}$, 拖动系统静止或以恒定的转速运行,称

为稳定运行状态,也称静态。

四、运动方程式中转矩正负号的分析

应用运动方程式,通常以电动机轴为研究对象。由于电动机运行状态不同,以及生产机械负载类型不同,作用在电动机轴上的电磁转矩 T_m 及阻转矩 T_L 不仅大小在变化,方向也是变化的,因此转矩 T_m 与 T_L 都有正负之分,运动方程式可写成

$$\pm T_m - (\pm T_L) = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-5)$$

在应用运动方程式时,必须注意转矩的正负号,一般规定如下:预先规定某一旋转方向(如顺时针方向)为正方向,则另一旋转方向(如逆时针方向)为负方向。当电磁转矩 T_m 的方向与规定的旋转正方向一致时, T_m 前面取正号,如图 1-2(a)所示。相反时,则取负号,如图 1-2(b)所示。

阻转矩 T_L 的方向与所规定的旋转正方向相同时, T_L 前面取负号,如图 1-2(c)所示。相反时,则取正号,如图 1-2(d)所示。

动态转矩 $\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$ 的大小及正负号,由 T_m 与 T_L 的代数和来决定。

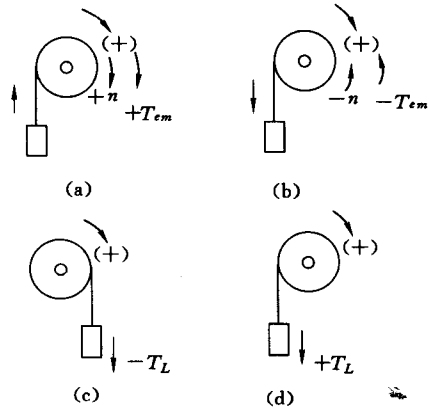


图 1-2 T_m 和 T_L 的方向与规定正方向的关系

第三节 电力拖动系统转矩的折算

电力拖动系统中,电动机和工作机构不一定直接相联,往往装有若干传动齿轮或其他传动机械,形成多轴系统,如图 1-3(a)所示。经过传动装置的变速后,各根传动轴上的转速都不一样,因而各轴上的转矩也不一样。研究这个系统,需要对每根轴分别列出相应的运动方程式,然后联立求解,显然这是很麻烦的。

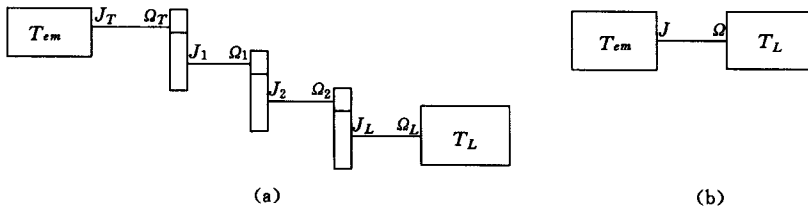


图 1-3 电力拖动系统图
(a) 传动图;(b) 等效折算图

研究电力拖动系统,通常只需要研究电动机轴的运转规律,并不需要研究每根轴的问题。为简化运算,可采用等值折算的方法,把工作机构实际负担的转矩折算成电动机轴需要付出的转矩。这样就将多轴系统折算成为等效的单轴系统,如图 1-3(b)所示。折算的原则是保持拖动系统在折算前后,其传送的功率和储存的动能不变。

以电动机轴为研究对象,需要折算的参数有:工作机构转矩 T_L' ,系统中各轴(除电动机轴外)的转动惯量 J_1, J_2, \dots, J_L 。对于某些作直线运动的工作机构,还必须把进行直线运动的质量 m 及运动所需克服的阻力 F_L 折算到电动机轴上去。

一、工作机构转矩的折算

如图 1-3(b)所示,用电动机轴上的负载转矩 T_L 来反映工作机构轴上的负载转矩 T_L' 。

折算前,工作机构的功率为

$$P_L' = T_L' \Omega_L \quad (1-6)$$

折算到电动机轴上的功率为

$$P_L = T_L \Omega \quad (1-7)$$

式中 T_L ——折算到电动机轴上的等效负载转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;

Ω ——电动机转子的角速度, rad/s 。

根据折算前后功率不变的原则,应有下列关系

$$\begin{aligned} T_L \Omega &= T_L' \Omega_L \\ T_L &= T_L' \frac{\Omega_L}{\Omega} = T_L' \frac{1}{j} \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中, $j = \frac{\Omega}{\Omega_L} = \frac{n}{n_L}$, 为电动机轴与工作机构轴的转速比。

上式说明,在工作机构的低速轴上,转矩 T_L' 较大,而折算到高速的电动机轴上时,其等效的转矩 T_L 就减小了。实际上在传动过程中,传动机构还存在着功率损耗,此损耗称为传动损耗,可用传动效率 η_G 表示。

(1) 电动机工作在电动状态时,由电动机带动工作机构,传动损耗应由电动机承担,电动机输出的功率比生产机械消耗的功率大,这时的功率关系为

$$\begin{aligned} T_L \Omega &= T_L' \Omega_L \frac{1}{\eta_G} \\ T_L &= T_L' \frac{1}{j \eta_G} \end{aligned} \quad (1-9)$$

(2) 电动机工作在制动状态时,由工作机构带动电动机,传动损耗就由工作机构承担,传送到电动机轴上的功率比工作机构轴上的功率小,这时的功率关系是

$$\begin{aligned} T_L \Omega &= T_L' \Omega_L \eta_G \\ T_L &= \frac{T_L'}{j} \eta_G \end{aligned} \quad (1-10)$$

如传动机构采用多级变速,则总的转速比 j 为各级转速比之积,即

$$j = j_1 j_2 \dots \quad (1-11)$$

一般设备上,电动机在高转速运行,而工作机械在低转速运行,故 $j \gg 1$ 。

在多级传动中,传动的总效率 η_G 为各级传动效率 $\eta_1 \eta_2 \dots$ 之积,即

$$\eta_G = \eta_1 \eta_2 \dots \quad (1-12)$$

不同种类的传动机构,每级效率不同。对于某一具体生产机械,负载大小不同时,效率也不同,一般是空载低,满载高。粗略计算时,可以不考虑这种变化,都可以采用满载效率值来计算。

二、工作机械直线运动作用力的折算

某些生产机械具有直线运动的工作机构,如矿用绞车的钢丝绳以力 F_L 吊质量为 m_L 的重物 G_L ,以速度 v_L 上升或下降,如图 1-4 所示。图中力 F_L 在电动机轴上的反映就是负载转矩 T_L ,其折算方法与上述相同。

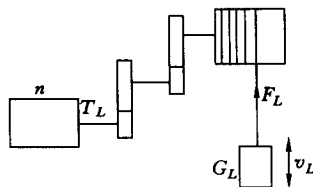


图 1-4 矿井绞车提升装置系统图

当电动机工作在电动状态时,应有如下关系

$$T_L \Omega = \frac{F_L v_L}{\eta_G}$$

把电动机角速度 Ω 化成每分转速 n ,则得

$$T_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n \eta_G} \quad (1-13)$$

当电动机工作在制动状态时,则有如下关系

$$T_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n} \eta_G \quad (1-14)$$

三、传动机构与工作机构飞轮惯量的折算

在一个多轴系统中,为了反映系统中不同转速轴的转动惯量对运动系统的影响,可以将传动机构各轴的转动惯量 J_1, J_2, \dots 及工作机构的转动惯量 J_L ,都折算到电动机的轴上,用电动机轴上一个等效的转动惯量 J 表示。由于各轴的转动惯量对运动过程的影响,直接反映在各轴所储存的动能上,因此折算原则是:折算前的实际系统与折算后的等效系统所储存的动能相等。若各轴的角速度分别为 $\Omega_1, \Omega_2, \dots$ 时,则得下列关系

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} J \Omega^2 &= \frac{1}{2} J_T \Omega^2 + \frac{1}{2} J_1 \Omega_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \Omega_2^2 + \dots + \frac{1}{2} J_L \Omega_L^2 \\ J &= J_T + J_1 \left(\frac{\Omega_1}{\Omega} \right)^2 + J_2 \left(\frac{\Omega_2}{\Omega} \right)^2 + \dots + J_L \left(\frac{\Omega_L}{\Omega} \right)^2 \end{aligned} \quad (1-15)$$

若用飞轮惯量和转速表示,则得

$$GD^2 = GD_T^2 = GD_1^2 \left(\frac{n_1}{n} \right)^2 + GD_2^2 \left(\frac{n_2}{n} \right)^2 + \dots + GD_L^2 \left(\frac{n_L}{n} \right)^2 \quad (1-16)$$

或

$$GD^2 = GD_T^2 + \frac{GD_1^2}{j_1^2} + \frac{GD_2^2}{(j_1 j_2)^2} + \dots + \frac{GD_L^2}{(j_1 j_2 \dots j_L)^2} \quad (1-17)$$

一般情况下,在系统总的飞轮惯量中,电动机轴上的飞轮惯量 GD_T^2 所占的比重较大,工作机构轴上飞轮惯量折算值 $GD_L^2 \left(\frac{n_L}{n} \right)^2$ 所占的比重较小。

四、工作机构直线运动质量的折算

工作机构作直线运动时,其质量 m_L 中储存有动能,造成机械运动的惯性,使速度不能突变。这种直线运动是由旋转的电动机带动的,因此必须把速度为 v_L 的质量 m_L 折算到电动机轴上,用电动机轴上一个转动惯量为 J_L 的转动体与之等效。折算的原则是转动体储存的动能与质量 m_L 中储存的动能相等,即

$$\frac{1}{2} J_L \Omega^2 = \frac{1}{2} m_L v_L^2 \quad (1-18)$$

考虑到 $J_L = \frac{GD_L^2}{4g}$, $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ 及 $m_L = \frac{G_L}{g}$, 可把式(1-18)化成用飞轮惯量的表示式,即

$$GD_L^2 = \frac{364G_L v_L^2}{n^2} \quad (1-19)$$

通过上述折算,把具有多根轴的既有旋转运动又有直线运动的系统,折算成一个单轴的旋转运动系统。这样仅用一个运动方程式,就可以研究实际的多轴系统了。

例 1-1 如图 1-5 所示为双滚筒提升绞车。已知数据如下:提升高度 $H=200$ m,罐笼内一辆矿车自重 $G_T=6\ 376$ N,载重 $G_L=9\ 810$ N,罐笼及挂绳设备重 $G_C=15\ 696$ N,钢丝绳每米重量 $P=15.69$ N/m,提升电动机转子飞轮惯量 $GD_T^2=255$ N·m²,电动机额定转速 $n_N=975$ r/min,绞车按 $a=0.5$ m/s² 作等加速起动,滚筒直径 $D=2$ m,绞车的转速比 $j=20$,传动效率 $\eta_C=0.9$,折算到滚筒圆周上的滚筒和减速器的重量 $G_D+G_D=100\ 552$ N,每个天轮折算到滚筒圆周上的重量 $G_w=3\ 532$ N。试计算电动机的起动转矩。

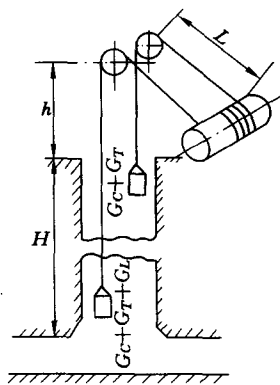


图 1-5 双罐笼提升系统图

解 (1) 求折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 和作用到滚筒圆周上的负载力 F_L 。

对于滚筒而言,两罐笼自重、两矿车自重及井口平台以上两根钢丝绳的重量都是平衡的。负载力只是由矿车载重 G_L 和井口平台以下两根钢丝绳长度差的重量 PH 以及系统运动所受到的摩擦阻力造成。对罐笼而言,摩擦阻力为 $0.2G_L$,因此可求出 F_L 为

$$\begin{aligned} F_L &= G_L + 0.2G_L + P \cdot H = 1.2G_L + P \cdot H \\ &= 1.2 \times 9\ 810 + 15.69 \times 200 = 14\ 910 \text{ (N)} \end{aligned}$$

作用到滚筒上的负载转矩 T_L' 为

$$T_L' = F_L \frac{D}{2} = 14\ 910 \times \frac{2}{2} = 14\ 910 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 为

$$T_L = \frac{T_L'}{j\eta_C} = \frac{14\ 910}{20 \times 0.9} = 828.3 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

(2) 求折算到电动机轴上的飞轮惯量 GD^2 和作用到滚筒圆周上的运动部分的重量。

系统中作直线运动的各部分,都由滚筒通过钢丝绳带动,它们的运动速度都等于滚筒圆周的线速度,所以这些部分折算到滚筒圆周上的重量就等于它们的实际重量。折算到滚筒圆周上各运动部分的重量有:

滚筒及减速器:

$$G_D + G_D = 100\ 552 \text{ N} \cdot \text{m}$$

两个天轮:

$$2G_w = 7\ 064 \text{ N}$$

两条钢丝绳:

$$\begin{aligned} 2G_R &= 2P(H+h+L+l+\pi Dn) \\ &= 2 \times 15.69(200+10+20+30+3.14 \times 2 \times 3) \\ &= 8\ 750 \text{ (N)} \end{aligned}$$

式中, $h=10$ m, 为井口平台与天轮间距离; $L=20$ m, 为钢丝绳弦长; $l=30$ m, 为滚筒上钢丝绳备用长度; $n=3$, 为摩擦圈数。

提升载重:

$$G_L = 9\,810 \text{ (N)}$$

矿车及罐笼自重:

$$2G_T + 2G_C = 2 \times 6\,376 + 2 \times 15\,696 = 44\,144 \text{ (N)}$$

折算到滚筒圆周上的运动部分总重量为

$$\begin{aligned} G &= G_D + G_{D^*} + 2G_w + 2G_R + G_L + 2G_T + 2G_C \\ &= 100\,552 + 7\,064 + 8\,750 + 9\,810 + 44\,144 \\ &= 170\,320 \text{ (N)} \end{aligned}$$

运动部分的飞轮惯量 GD_L^2 为

$$GD_L^2 = 170\,320 \times 2^2 = 681\,280 \text{ (N} \cdot \text{m}^2)$$

折算到电动机轴上总的飞轮惯量 GD^2 为

$$GD^2 = GD_T^2 + \frac{GD_L^2}{j^2} = 255 + \frac{681\,280}{20^2} = 1\,958 \text{ (N} \cdot \text{m}^2)$$

(3) 求电动机平均起动转矩 T_x 。

起动时间 t_1 为

$$t_1 = \frac{v_{\max}}{a} = \frac{1}{a} \frac{\pi D n_N}{60j} = \frac{3.14 \times 2 \times 975}{0.5 \times 60 \times 20} = 10.2 \text{ (s)}$$

式中, v_{\max} 为提升机的最大速度(m/s)。

电动机平均起动转矩 T_x 为

$$T_x = T_L + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = 828.3 + \frac{1\,958}{375} \frac{975}{10.2} = 1\,327.3 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

式中, $\frac{dn}{dt} = \frac{n_N}{t_1}$ (按等加速起动考虑)。

第四节 生产机械和电动机机械特性的分类

电动机是拖动系统中的原动机,要使生产机械正常而有效地工作,必须使电动机的机械性能满足生产机械的要求。电动机的机械特性是机械性能的主要表现,它决定了电动机在各种运行状态下的工作情况。

在电力拖动系统中,电动机的转矩 T_m 拖动生产机械作各种形式的运动,以及作各种状态的运行。但是不同类型的生产机械,负载转矩的特性不同;不同类型的电动机,机械特性的形状也不相同。

一、生产机械的负载转矩特性

生产机械在运转中会受到阻转矩的作用,此转矩称为负载转矩 T_L 。生产机械负载转矩的大小和许多因素有关,通常把负载转矩与转速的关系 $T_L = f(n)$ 称为生产机械的机械特性,或叫做负载转矩特性。根据统计,大多数生产机械的负载转矩特性可归纳为三种类型。

1. 恒转矩负载特性

所谓恒转矩负载特性,是指当转速变化时,负载转矩保持常值,如图 1-6 所示。画图时,

习惯上把 T_L 作为横坐标,把 n 作为纵坐标。矿井提升机、胶带输送机中具有此种特性。

根据负载转矩的方向是否与转动方向有关,又分为两大类,一类是反作用性质负载转矩,另一类是位能性负载转矩。

反作用恒转矩负载特性的特点是:负载转矩 T_L 总是反对运动的, T_L 的方向永远与转速 n 方向相反。根据 T_L 正负符号的规定,当顺时针方向旋转时, n 为正,转矩 T_L 与正旋转方向相反,应取正号;当逆时针方向旋转时, n 为负,转矩 T_L 为顺时针方向,应取负号,如图 1-7 所示。由图可知,反作用性质的恒转矩负载特性在第一象限与第三象限内。采煤机的负载转矩属于这类特性。

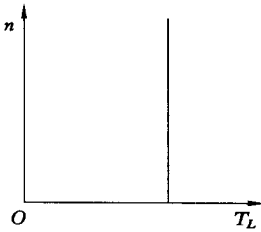


图 1-6 恒转矩负载特性

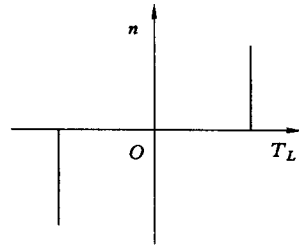


图 1-7 反作用性质恒转矩负载特性

位能性恒转矩负载特性的特点是:负载转矩 T_L 具有固定的方向,不随转速 n 方向的改变而改变,如图 1-8 所示。特性在第一象限与第四象限内。矿井提升机的载荷对滚筒形成的负载转矩,属于这类特性。如以电动机顺时针旋转时提升重物,逆时针旋转时下放重物,则不论重物运行方向是提升还是下放,负载的重力作用总是向下的。提升时, T_L 取正号, T_L 反对运动;下放时, T_L 方向不变, T_L 仍取正号,这时 T_L 协助运动。

2. 通风机类负载特性

通风机类负载转矩是反作用转矩,如矿井扇风机、水泵等,其中空气、水对机器叶片的阻力基本上和转速的平方成正比,即

$$T_L = Kn^2$$

式中 K ——比例常数。

通风机负载特性是一条抛物线,如图 1-9 所示。

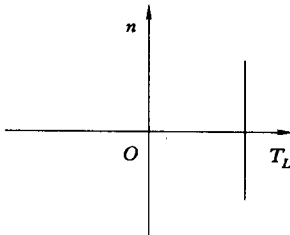


图 1-8 位能性质恒转矩负载特性

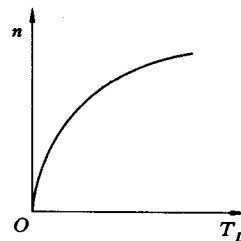


图 1-9 通风机类负载特性

3. 恒功率负载特性

某些机床,如车床车削工件,粗加工时,切削量大,因而切削阻力大,采用低速;精加工时,切削量小,阻力也小,采用高速。但负载功率基本不变,形成恒功率的负载特性。