

DIANLITUODONGJICHU

# 电力拖动基础

张敬南 孟繁荣★编著

3

**HEUP** 哈尔滨工程大学出版社

# 电力拖动基础

张敬南 孟繁荣 编著

## 内 容 简 介

为了适应电力拖动的发展和教学质量优化的要求,本书在同类教材的基础上,对相关知识进行了重组与添加,添加了同步电动机电力拖动基础的相关内容,并增设了电力拖动系统典型运行过程的仿真与分析。

全书共分为绪论、电力拖动系统动力学基础、直流电动机的电力拖动基础、异步电动机的电力拖动基础、同步电动机的电力拖动基础和电力拖动系统中电动机容量的选择。每章后附习题与思考题。

本书可作为电气工程、工业自动化、自动化等专业的高等院校本科生教材,也适用于各类成人继续教育的相关教材,对从事电气工程技术的各类人员,也是一本较好的学习参考资料。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力拖动基础/张敬南,孟繁荣编著. —哈尔滨:  
哈尔滨工程大学出版社, 2015. 7  
ISBN 978 - 7 - 5661 - 1057 - 2

I. ①电… II. ①张… ②孟… III. ①电力传动 - 基  
本知识 IV. ①TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 157278 号

---

出版发行 哈尔滨工程大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号  
邮政编码 150001  
发行电话 0451 - 82519328  
传 真 0451 - 82519699  
经 销 新华书店  
印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂  
开 本 787mm × 1 092mm 1/16  
印 张 14.50  
字 数 370 千字  
版 次 2015 年 7 月第 1 版  
印 次 2015 年 7 月第 1 次印刷  
定 价 31.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

---

# 前 言

## PREFACE

电力拖动基础是一门重要的专业基础课程,具有对象具体、理论性强、实践要求高的特点。为了适应电力拖动的发展和教学质量优化的要求,本书对相关知识进行了重组和添加,添加了同步电动机电力拖动基础的相关内容,并运用了仿真分析工具辅助运行过程分析。全书共分绪论、电力拖动系统动力学基础、直流电动机的电力拖动基础、异步电动机的电力拖动基础、同步电动机的电力拖动基础和电力拖动系统中电动机容量的选择等。

本书力求从注重基础掌握、加强能力培养、面向实际应用出发,着重分析基本观念、基本原理和基本方法;重点阐述电力拖动中电动机为满足不同工艺要求在启动、制动、调速等状态下的工作情况;适当地引入电力拖动系统的仿真分析方法,以培养学生的分析研究能力,并为进一步学习其他专业知识和正确使用电动机打下良好基础。

本书可作为电气工程、工业自动化、自动化等专业的高等院校本科生教材,也适用于各类成人继续教育的相关教材,对从事电气工程技术的各类人员,也是一本较好的学习参考资料。

本书由张敬南提出结构框架并主持编写,主要编写了第2,3,4章;孟繁荣编写了绪论和第1,5章;由张敬南和孟繁荣共同设计并编制了仿真分析程序。本书经哈尔滨工程大学李文秀教授、丛望教授仔细审阅,并提出了宝贵的修改意见。

由于编者学识有限,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编著者

2015年1月

# 目 录

绪论 .....	1
0.1 电力拖动及其历史沿革 .....	1
0.2 电力拖动系统的分类与特点 .....	1
0.3 本书内容和课程的性质任务 .....	2
<b>第1章 电力拖动系统动力学基础 .....</b>	<b>4</b>
1.1 电力拖动系统的运动方程 .....	4
1.2 具有传动机构的电力拖动系统的简化 .....	6
1.3 典型负载转矩特性与拖动系统的稳定运行条件 .....	12
小结 .....	16
思考题与习题 .....	16
<b>第2章 直流电动机的电力拖动基础 .....</b>	<b>19</b>
2.1 他励直流电动机的机械特性 .....	19
2.2 他励直流电动机的启动 .....	26
2.3 他励直流电动机的制动 .....	32
2.4 他励直流电动机的调速 .....	41
2.5 他励直流电动机的过渡过程及其能量损耗 .....	53
2.6 他励直流电动机拖动系统的仿真 .....	70
2.7 串励、复励直流拖动系统的运行 .....	82
2.8 复励直流电动机稳态运行的工程计算方法 .....	85
小结 .....	88
习题与思考题 .....	89
<b>第3章 异步电动机的电力拖动基础 .....</b>	<b>92</b>
3.1 异步电动机的机械特性 .....	92
3.2 异步电动机的启动 .....	103
3.3 异步电动机的制动 .....	120
3.4 异步电动机的调速 .....	130
3.5 异步电动机拖动系统过渡过程 .....	148
3.6 异步电动机拖动系统的仿真 .....	156
小结 .....	164
习题与思考题 .....	165
<b>第4章 同步电动机的电力拖动基础 .....</b>	<b>167</b>
4.1 同步电动机的分类 .....	167
4.2 同步电动机的电动势平衡方程式及相量图 .....	169

4.3	同步电动机的机械特性与矩角特性 .....	171
4.4	同步电动机的工作特性与功率因数调节 .....	176
4.5	同步电动机的启动和调速 .....	180
4.6	同步电动机拖动系统的仿真 .....	186
	小结 .....	189
	习题与思考题 .....	190
<b>第5章</b>	<b>电力拖动系统中电动机容量的选择 .....</b>	<b>192</b>
5.1	电动机的发热与冷却 .....	192
5.2	决定电动机容量的主要因素 .....	195
5.3	连续工作方式下的电动机容量选择 .....	198
5.4	短时工作方式下的电动机容量选择 .....	212
5.5	周期性断续工作方式下的电动机容量选择 .....	216
5.6	确定电动机容量的统计法与类比法 .....	218
5.7	由特殊电源供电的电动机选择问题 .....	220
	小结 .....	222
	习题与思考题 .....	222
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>223</b>

# 绪 论

## 0.1 电力拖动及其历史沿革

现代化的工业生产中,需要采用各种生产机械,而这些生产机械又必须由原动机来拖动。19 世纪末到 20 世纪初,随着电能应用的推广,电动机逐步取代了蒸汽机,成为了拖动系统中最常用的一种原动机。这种应用各种电动机拖动各种生产机械工作的技术就是电力拖动技术,简称电力拖动,也称为电气传动。

电力拖动之所以被广泛应用是因为:①电能的传输和分配非常方便;②电动机的种类规格很多,它们具有各种各样的特性,能在很大程度上满足大多数生产机械的不同要求;③电力拖动的操作和控制比较简便,便于实现自动控制和远程操作等。因此,电力拖动在现代工业中得到最广泛的应用。可以这样说,没有电力拖动,就没有现代工业。

电力拖动的发展是从最初的成组拖动方式,经过单电动机拖动方式直至发展为现代电力拖动的基本形式——多电动机拖动方式。

成组拖动方式是用一台电动机通过拖动天轴,再由传动带或绳索分别拖动几台生产机械进行工作。显然这种拖动方式结构不尽合理,电动机性能不能充分发挥,效率很低,目前已经不采用。

20 世纪 20 年代,单电动机拖动方式被逐步采用,所谓单电动机拖动就是一台电动机拖动一台生产机械工作。由于电动机针对相对固定的生产机械进行配合,在结构上可以充分利用电动机的调速性能来满足生产机械的工艺要求。

20 世纪 30 年代,随着生产机械复杂程度的不断提升,在一台生产机械上往往同时具有多套运动机构,因此采用一台电动机已经无法满足生产机械的要求。采用多台电动机拖动生产机械工作的形式应运而生,称为多电动机拖动方式。

现代化工业生产中,生产机械除了运动方式复杂之外,对电力拖动还提出了更多更高的技术要求,如提高加工精度与工作速度,要求快速启动、制动及正反转转换,实现宽范围的速度调节和提高生产过程的自动化水平等。要实现上述要求,除了必要的电动机之外,必须有自动控制设备以组成电力拖动系统,或电力拖动自动控制系统。

## 0.2 电力拖动系统的分类与特点

根据电动机类型,电力拖动系统主要分为直流电力拖动系统与交流电力拖动系统两大类。由直流电动机作为原动机的拖动系统称为直流电力拖动系统;由交流电动机作为原动机的拖动系统称为交流电力拖动系统。

直流电力拖动系统因其启动转矩大、可在较大范围内实现速度的平滑调节、控制精度

高且易于实现等特点,被广泛应用于大负载拖动和控制精度要求高的场合。但是,由于直流电动机具有换向器和电刷装置,限制了其向高速和大容量方面的发展,并且不能直接用于易燃、易爆等工作场合。

相对于直流电动机,交流异步电动机具有结构简单、维修方便,且能在环境条件较恶劣的场合下运行,所以基于异步电动机的交流电力拖动系统在工农业生产中得到了广泛的应用。但是该系统在两个方面还有不足之处,其一是其控制精度还不能完全赶上直流电力拖动系统,所以在控制精度要求高的场合还无法取代直流电力拖动系统;其二是异步电动机的功率因数问题,在大容量的场合往往需要配备无功补偿装置或采用基于同步电动机的交流电力拖动系统。

与异步电动机相比,同步电动机的转速与电源频率严格保持同步,机械特性硬,功率因数高,对于励磁同步电动机,通过励磁调节可以实现无功调节。但同步电动机由电网直接供电时存在启动困难与失步问题。随着电力电子变频技术的发展,成功地解决了阻碍同步电动机发展的这两大问题,尤其是永磁同步电动机和直流无刷电动机等新兴同步电动机的问世,使得基于同步电动机的电力拖动系统具有广泛的应用前景。

### 0.3 本书内容和课程的性质任务

电力拖动基础就是要研究电力拖动系统的运行特性、能量关系及工程运用等问题。

首先,必须掌握电力拖动系统的动力学规律、典型负载的机械特性、复杂系统的简化计算以及系统稳定运行的分析和判断等。这一切就是所谓电力拖动系统动力学。

其次,还必须分析交直流电动机的机械特性,并结合负载的机械特性,分别针对由直流电动机和交流电动机组成的直、交流电力拖动系统的运行进行全面分析。其中,既有电动、制动等各种稳定运行,又有包括启动和制动过程在内的各种过渡过程。此外,还要对启动、制动及调速的设备,进行设置和计算。

另外,电力拖动的根本问题就是根据各种生产机械的需要,如何正确选择和使用电动机的问题。因此,电动机的选择也是电力拖动的一个重要内容。一般来说,电动机的选择应包括很多内容,如电动机种类的选择、容量的选择、电压等级的选择、转速选择及防护形式的选择等,其中尤以容量的选择与组成系统的负载关系密切。而各种负载又是千变万化的,这就使容量的选择更为复杂和重要,因而成为电力拖动的重要内容。

考虑到目前各种特殊电源对电力拖动系统中电动机供电的情况日益增多,如可控晶闸管整流装置对直流电动机供电,以及变频电源对三相异步电动机供电等,在这些情况下,电动机的选择应有一些特殊考虑。为此,本书适当地加入了这些新内容。

随着计算机仿真技术的发展,特别是像 MATLAB 这样一些仿真软件的不断推出,为电力拖动系统的动态分析和稳态分析提供了新颖的技术工具。为此,本书在相应章节引入电力拖动系统的 MATLAB 仿真分析的内容。

电力拖动基础是一门综合性很强的课程,涉及物理学、电工原理、电子技术、机械原理、电机学、电力电子技术等多门课程的知识。在学习本课程之前,应对上述课程有较好的掌握和理解。同时,在学习过程中必须注意理论联系实际,通过实验验证所学知识,通过仿真深入探讨所学理论,既要注意理论分析,又要掌握工程实际计算方法。

电力拖动基础课程为电气工程及其自动化专业、工业自动化专业的一门专业基础课



程。通过本课程的学习,应该掌握典型电动机所组成的电力拖动系统的基本理论和系统运行在各种状态时的静、动态特性分析计算方法,以及如何进行电动机容量选择等基本技能。从而为进一步学习本专业的后续课程——电力拖动自动控制系统提供必备的基础知识。

# 第 1 章 电力拖动系统动力学基础

本章首先介绍了电力拖动系统的组成和电力拖动系统的运动方程;然后针对多轴电力拖动系统等效为单轴系统的折算方法进行了分析;并结合不同运动形式的工作机构,针对转矩及系统飞轮矩的折算方法、传动机构的效率问题进行了叙述;最后,介绍了生产机械的负载转矩特性和电力拖动系统稳定运行的条件。本章内容不仅适用于直流电力拖动系统,也适用于交流电力拖动系统,是交直流电力拖动系统的共同问题,也是电力拖动部分的基础。

## 1.1 电力拖动系统的运动方程

### 1.1.1 电力拖动系统的组成

凡是由电动机作为原动机拖动各类生产机械完成一定的生产工艺要求的系统都称为电力拖动系统。电力拖动系统一般由电动机、传动机构、工作机构、电源和控制设备 5 部分组成,其结构如图 1-1 所示。其中,传动机构和工作机构构成电动机的负载,称为生产机械。

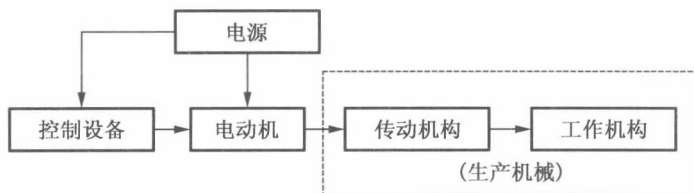


图 1-1 电力拖动系统

电动机把电能转换成机械动力拖动生产机械工作。传动机构是生产机械中实现机械运动状态改变的部分;工作机构是生产机械中执行某一任务的机械部分。控制设备由各种电气元件和装置组成,用以控制电动机的运转,从而对工作机构的运动实现自动控制。电源用来向控制设备和电动机提供电能。

图 1-1 中的电源和控制设备部分将由有关专门课程讲述,本书主要针对“电力拖动系统”中电动机拖动生产机械工作的各种运行状态进行讲述。

### 1.1.2 电力拖动系统的运动方程

电力拖动系统的种类很多,无法逐一进行研究,因此要找到它们共同的运动规律加以综合分析。电力拖动系统的运动规律可以用动力学中的运动方程来描述。为了便于问题研究,首先针对旋转运动中简单的单轴电力拖动系统进行分析。所谓单轴电力拖动系统就是转子轴直接拖动生产机械进行旋转运动的系统,如图 1-2(a)所示。

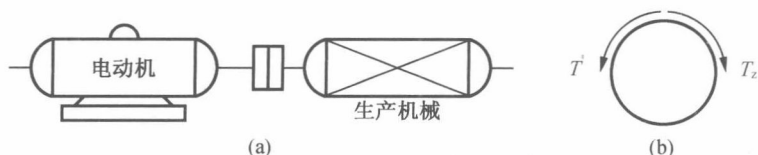


图 1-2 单轴电力拖动系统

(a) 单轴电力拖动系统; (b) 电动机轴上的作用转矩

作用在电动机轴上的转矩如图 1-2(b) 所示, 包括由电动机产生的电磁转矩  $T(\text{N} \cdot \text{m})$  和阻转矩(或称负载转矩)  $T_z(\text{N} \cdot \text{m})$ , 其中阻转矩包括生产机械产生的负载转矩  $T_L(\text{N} \cdot \text{m})$  和电动机空载阻转矩  $T_0(\text{N} \cdot \text{m})$ 。一般来说, 电动机产生的电磁转矩是拖动运动的, 阻转矩是阻碍运动的。则根据刚体转动定律, 有如下旋转运动的方程式

$$T - T_z = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-1)$$

式中  $J$ ——转动惯量( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ );

$\Omega$ ——电动机的机械角速度( $\text{rad/s}$ );

$\frac{d\Omega}{dt}$ ——电动机轴的机械角加速度( $\text{rad/s}^2$ );

$J \frac{d\Omega}{dt}$ ——电动机轴系统的惯性转矩(或称为加速转矩)。

在实际工程计算中, 经常用转速  $n(\text{r/min})$  代替机械角速度  $\Omega$  来表示系统旋转速度, 用飞轮惯量(或称为飞轮矩)  $GD^2(\text{N} \cdot \text{m}^2)$  代替转动惯量  $J$ 。  $\Omega$  与  $n$  的关系为

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

$GD^2$  与  $J$  之间的关系为

$$J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-3)$$

式中  $m$  与  $G$ ——分别为旋转部分的质量( $\text{kg}$ )和重力( $\text{N}$ );

$\rho$  与  $D$ ——分别为旋转部分的转动惯性半径( $\text{m}$ )与转动惯性直径( $\text{m}$ );

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

将式(1-2)和式(1-3)代入式(1-1)中, 并化简为实用的电力拖动系统的运动方程形式, 则有

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

式中 375——具有加速度量纲的系数, 其单位为  $\text{m}/(\text{min} \cdot \text{s})$ 。

式(1-4)中,  $(T - T_z)$  称为动态转矩, 显然, 当动态转矩为零时, 系统处于恒转速运行的稳态; 动态转矩大于零时, 系统处于加速运动的过渡状态; 动态转矩小于零时, 系统处于减速运动的过渡状态。

有一点需要引起注意,  $T$  与  $T_z$  都是有方向性的变量。对其正方向做如下规定: 以转轴转速  $n$  的正方向为参考方向, 电磁转矩  $T$  的正方向与  $n$  相同, 负载转矩  $T_z$  的正方向与  $n$  相反。在应用电力拖动系统的运动方程时, 如果参数的实际方向与规定的正方向相同, 就用正数, 否则就用负数。

## 1.2 具有传动机构的电力拖动系统的简化

实际的电力拖动系统常常是通过传动机构(如齿轮减速箱、皮带轮变速装置等)与工作机构联结,使电动机的转速变成符合工作机构需要的转速。由于这类拖动系统有两根或两根以上不同转速的轴,被称为多轴旋转系统,简称多轴系统,如图 1-3(a)所示。

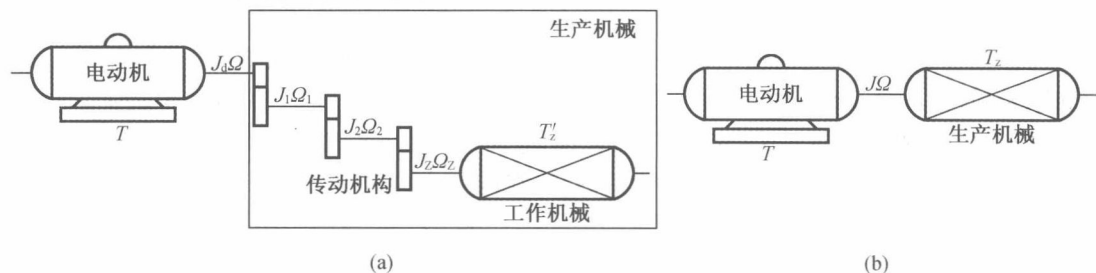


图 1-3 多轴电力拖动系统

(a) 多轴电力拖动系统; (b) 等效单轴电力拖动系统

对于多轴电力拖动系统,如果用单轴系统运动方程来研究其运行状态,则需对每根轴分别写出运动方程,再写出各轴间相互关系的方程,消去中间变量,联立求解,这显然非常烦琐。就电力拖动系统而言,一般是研究一定负载作用在电动机轴上时电动机的各种运行状态,也就是说,不需要研究每根轴上的情况,只需要研究作用在电动机轴上的情况即可。所以引入折算的概念,把传动机构和工作机构体现的负载情况等效到电动机的旋转轴上,这样就将一个实际的多轴系统等效为一个单轴系统,如图 1-3(b)所示。

折算的原则包括 2 条:折算前后系统传递的功率不变;折算前后系统所存储的动能不变。

获得电动机轴上的等效转矩和飞轮矩的折算过程随工作机构运动形式的不同而不同。对于旋转运动的折算过程就是在折算原则的基础上将各传动轴的负载转矩和飞轮矩折算到电动机轴上;对于存在直线运动部件,折算过程则是将直线运动部件的负载力和质量折算为电动机轴上的等效转矩和飞轮矩。

### 1.2.1 旋转运动

在实际生产中,很多生产机械工作机构的运动都属于旋转运动。下面以图 1-3(a)所示的多轴电力拖动系统为例来说明旋转运动转矩和飞轮矩的折算。

#### 1. 转矩的折算

工作机构的负载转矩为  $T'_z$ , 转速为  $n_z$ , 对应的角速度为  $\Omega_z$ , 工作机构的功率为

$$P_z = T'_z \Omega_z$$

折算到电动机轴上的转矩为  $T_z$ , 转速为  $n$ , 角速度为  $\Omega$ , 折算后的功率为

$$P_z = T_z \Omega$$

根据折算前后功率不变的原则,应有

$$T'_z \Omega_z = T_z \Omega$$

所以

$$T_z = T'_z \frac{\Omega_z}{\Omega} = T'_z \frac{n_z}{n} = \frac{T'_z}{j} \quad (1-5)$$

式中  $j$ ——电动机与工作机构的转速比,  $j = \Omega/\Omega_z = n/n_z$ 。

一般来说,  $j > 1$ , 即传动机构是减速的。式(1-5)表明, 在工作机构的低速轴上, 转矩  $T'_z$  比较大, 而折算到电动机的高速轴上时, 等效转矩  $T_z$  数值减小。从功率不变的观点来看, 低速轴的转矩大, 高速轴的转矩小是显然的。

实际中, 在机械功率的传递过程中, 传动机构存在着功率损耗, 称为传动损耗。传动损耗可以在传动机构的效率  $\eta$  中考虑。

当电动机带动工作机构旋转时, 功率的传递方向是由电动机到负载, 传动损耗由电动机负担, 即

$$T_z \Omega \eta = T'_z \Omega_z$$

所以

$$T_z = \frac{T'_z \Omega_z}{\Omega \eta} = \frac{T'_z}{j \eta} \quad (1-6)$$

式(1-6)中, 电动机轴与工作机构轴的转速比  $j$  为总的转速比。在多级传动中, 应为各级转速比之积, 即  $j = j_1 j_2 \dots$ ; 传动效率  $\eta$  是传动机构的总效率, 同样为各级传动效率之积, 即  $\eta = \eta_1 \eta_2 \dots$ 。

## 2. 飞轮矩的折算

飞轮矩的大小是旋转物体机械惯性大小的体现。旋转体的动能为

$$\frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{GD^2}{4g} \cdot \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

在类似图 1-3(a) 所示的多轴系统中, 将各级传动轴作为电动机负载的一部分, 在等效为图 1-3(b) 所示的单轴系统时, 必须将各级传动轴的飞轮矩  $GD_1^2, GD_2^2$  和负载转轴的飞轮矩  $GD_z^2$  折算到电动机轴上, 用一个等效的飞轮矩  $GD^2$  来表示实际的多轴电力拖动系统各个传动轴的飞轮矩对实际电动机轴的影响。各级飞轮矩的大小反映出运动中的各传动机构所存储动能的大小。因此, 对如图 1-3(a) 所示的多轴电力拖动系统而言, 飞轮矩折算的关系应为

$$GD^2 = GD_d^2 + \frac{GD_1^2}{j_1^2} + \frac{GD_2^2}{j_1 j_2^2} + \frac{GD_z^2}{j_1 j_2 j_3^2} \quad (1-7)$$

式中  $GD_d^2$ ——电动机转子轴的飞轮矩;

$GD_1^2 \sim GD_2^2$ ——各个传动轴的飞轮矩;

$GD_z^2$ ——负载轴的飞轮矩。

由式(1-7)可知, 各级飞轮矩在折算到电动机轴上时, 应除以电动机与该级之间转速比的平方。

一般情况下, 在总的飞轮矩  $GD^2$  中, 电动机转子本身的飞轮矩  $GD_d^2$  占的比重最大, 工作机构轴上的飞轮矩折算值占的比重较小, 而传动机构飞轮矩的折算值所占比重则更小。因此, 在实际工作中, 为了减少折算的麻烦, 往往可以采用下式来估算系统的总飞轮矩

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

式中,  $GD_d^2$  是电动机转子本身的飞轮矩, 其值可从产品目录中查得;  $\delta$  为小于 1 的数, 一般取  $\delta = 0.2 \sim 0.3$ 。需要注意的是, 如果电动机轴上还有其他大飞轮矩的部件, 如制动器的闸轮、船舶推进的螺旋桨等, 则  $\delta$  值需相应加大。

**例 1-1** 如图 1-4 所示的电力拖动系统中,已知飞轮矩  $GD_a^2 = 14.5 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ,  $GD_b^2 = 18.8 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ,  $GD_z^2 = 120 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ , 传动效率  $\eta_1 = 0.91$ ,  $\eta_2 = 0.93$ , 转矩  $T'_z = 85 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 转速,  $n = 2450 \text{ r/min}$ ,  $n_b = 810 \text{ r/min}$ ,  $n_z = 150 \text{ r/min}$ , 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  $T_z$ 。

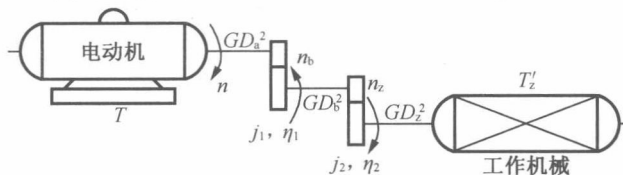


图 1-4 例 1-1 附图

**解** (1) 系统总飞轮矩

$$GD^2 = \frac{GD_z^2}{\left(\frac{n}{n_z}\right)^2} + \frac{GD_b^2}{\left(\frac{n}{n_b}\right)^2} + GD_a^2 = \frac{120}{\left(\frac{2450}{150}\right)^2} + \frac{18.8}{\left(\frac{2450}{810}\right)^2} + 14.5$$

$$= 0.45 + 2.055 + 14.5 = 17.005 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

(2) 负载转矩

$$T_z = \frac{T'_z}{\frac{n}{n_z} \eta_1 \eta_2} = \frac{85}{\frac{2450}{150} \times 0.91 \times 0.93} = 6.15 \text{ N} \cdot \text{m}$$

### 1.2.2 平移运动

有些生产机械的工作机构做平面运动,例如龙门刨床的工作台。平面运动属于直线运动,它的转矩和飞轮矩的折算公式有其自己的特点。

图 1-5 为刨床电力拖动示意图,经多级齿轮减速后,通过齿轮与齿条的啮合,电动机的旋转运动变成直线运动。

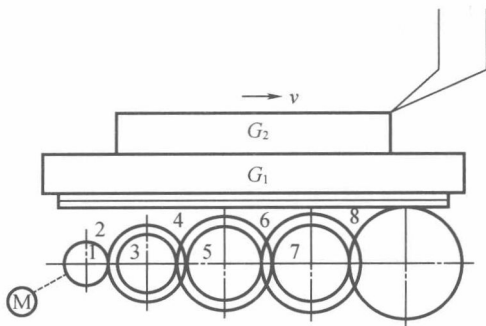


图 1-5 刨床电力拖动示意图

#### 1. 转矩的折算

结合图 1-5, 定义  $F$  为工作机构做平移运动时受到的阻力, 即切削力;  $v$  为工作机构的平移速度。则工作机构的功率(即切削功率)为

$$P = Fv$$

切削力反映到电动机轴上表现为负载转矩  $T_z$ ,  $T_z$  应满足折算前后功率不变的原则。若

不计传动机构损耗,则有

$$Fv = T_z \Omega$$

将  $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$  代入上式,则

$$Fv = T_z \frac{2\pi n}{60}$$

所以

$$T_z = \frac{Fv}{\frac{2\pi n}{60}} = 9.55 \frac{Fv}{n} \quad (1-8)$$

同理,旋转运动若考虑传动机构损耗由电动机负担,则有

$$T_z = 9.55 \frac{Fv}{n\eta} \quad (1-9)$$

## 2. 飞轮矩的折算

设直线运动部分的重力  $G_z = m_z g$ , 直线运动速度为  $v$ , 则其所产生的动能为

$$\frac{1}{2} m_z v^2 = \frac{1}{2} \frac{G_z}{g} \cdot v^2$$

要将这部分动能折算到电动机轴上,需在电动机轴上用一个转动惯量为  $J_z$  的转动体与之等效。此转动体产生的动能为

$$\frac{1}{2} J_z \Omega^2 = \frac{1}{2} \frac{GD_z^2}{4g} \cdot \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

依据折算前后动能相等的原则,有

$$\frac{1}{2} \frac{G_z}{g} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \frac{GD_z^2}{4g} \cdot \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

整理后可得

$$GD_z^2 = 365 \frac{G_z v^2}{n^2} \quad (1-10)$$

式(1-10)为直线运动部分折算到电动机轴上的飞轮矩。传动机构中转动部分  $GD^2$  的折算与前述方法相同,两部分之和是系统的总飞轮矩。

**例 1-2** 某刨床电力拖动系统如图 1-5 所示。已知切削力  $F = 10\,000\text{ N}$ , 工作台与工件运动速度  $v = 0.7\text{ m/s}$ , 传动机构总效率  $\eta = 0.81$ , 电动机转速  $n = 1\,450\text{ r/min}$ , 电动机的飞轮矩  $GD_d^2 = 100\text{ N} \cdot \text{m}^2$ , 求:(1) 切削时折算到电动机轴上的负载转矩;(2) 估算系统的总飞轮矩;(3) 不切削时,工作台及工件反向加速,电动机以  $\frac{dn}{dt} = 500\text{ r/min} \cdot \text{s}^{-1}$  恒加速度运行,计算此时系统的动转矩绝对值。

**解** (1) 切削功率

$$P = Fv = 10\,000 \times 0.7 = 7\,000\text{ (W)}$$

切削时折算到电动机轴上的负载转矩

$$T_z = 9.55 \frac{Fv}{n\eta} = 9.55 \times \frac{7\,000}{1\,450 \times 0.81} = 56.92\text{ (N} \cdot \text{m)}$$

(2) 估算系统的总飞轮矩

$$GD^2 \approx 1.2GD_d^2 = 1.2 \times 100 = 120\text{ (N} \cdot \text{m)}$$

(3) 不切削时,工作台与工件反向加速,系统动转矩绝对值

$$T = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{120}{375} \times 500 = 160 (\text{N} \cdot \text{m})$$

### 1.2.3 升降运动

有些生产机械的工作机构做升降运动,如电梯、起重机等。升降运动也是直线运动,但与平移运动不同,工作机构的重力在提升和下放运动中体现了不同的性质。现以起重机为例来进行讨论。

图 1-6 所示为起重机电力拖动示意图,电动机通过减速装置拖动卷筒,绕在卷筒上的钢丝绳悬挂一个重为  $G = mg$  的重物。显然,重物升降运动的转矩折算与功率传递方向有密切关系。现分别讨论如下。

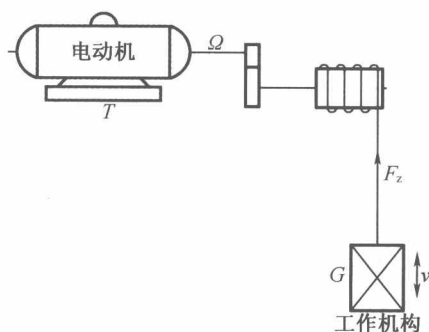


图 1-6 起重机电力拖动示意图

#### 1. 提升运动时负载转矩的折算

电动机带动负载提升。设卷筒半径为  $R$  (单位为  $\text{m}$ ), 则卷筒的提升转矩为

$$T'_z = FR = GR$$

如不计传动机构的损耗,折算到电动机轴上的负载转矩为

$$T_z = \frac{T'_z}{j} = \frac{GR}{j} \quad (1-11)$$

如考虑传动机构的损耗,则在提升重物时,这个损耗应由电动机来承担。因此,折算到电动机轴上的负载转矩应为

$$T_z = \frac{T'_z}{j\eta_{\text{up}}} = \frac{GR}{j\eta_{\text{up}}} = 9.55 \frac{Gv}{n\eta_{\text{up}}} \quad (1-12)$$

式中  $T_z$ ——提升重物时转矩折算值;

$\eta_{\text{up}}$ ——提升重物时的传动效率。

由式(1-11)和式(1-12)可知,提升时传动机构的损耗转矩为

$$\Delta T = \frac{GR}{j\eta_{\text{up}}} - \frac{GR}{j} \quad (1-13)$$

#### 2. 下放重物时负载转矩的折算

下放重物时,重物对卷筒轴的负载转矩大小仍为  $GR$ 。不计传动损耗,折算到电动机轴上的负载转矩仍为  $GR/j$ 。但在下放重物时,是重物在重力作用下拉着整个系统反向运动,而电动机的电磁转矩反而是在阻碍运动。此时,功率的传递方向是由负载到电动机,传动



机构的损耗应由负载来负担。因此,在下放重物时,折算到电动机轴的负载转矩为

$$T_Z = \frac{GR}{j} \cdot \eta_{\text{down}} = 9.55 \frac{Gv}{n} \cdot \eta_{\text{down}} \quad (1-14)$$

式中  $\eta_{\text{down}}$ ——下放重物时的传动效率。

对于同一重物的提升和下放,可以认为传动机构的损耗转矩  $\Delta T$  不变,即

$$\Delta T = \frac{GR}{j\eta_{\text{up}}} - \frac{GR}{j} = \frac{GR}{j} - \frac{GR}{j} \eta_{\text{down}}$$

故

$$\eta_{\text{down}} = 2 - \frac{1}{\eta_{\text{up}}} \quad (1-15)$$

由式(1-15)可以看出,提升效率  $\eta_{\text{up}}$  与下放效率  $\eta_{\text{down}}$  在数值上并不相等。当  $\eta_{\text{up}} = 0.5$  时,  $\eta_{\text{down}} = 0$ ; 当  $\eta_{\text{up}} < 0.5$  时,  $\eta_{\text{down}} < 0$ 。这说明当  $\eta_{\text{up}} = 0.5$  时,电动机的提升转矩只有一半去克服重力,另一半则消耗在传动机构中。因此在下放时,重力作用刚好和损耗平衡,电动机不再承担任何转矩,折算到电动机轴上的等效转矩  $T_Z$  为零。如  $\eta_{\text{up}} < 0.5$ , 则损耗更大,下放时重力产生的转矩不足以克服传动机构的损耗转矩,因此电动机必须产生与转速方向相同的转矩,以帮助重物下放,此时称为强迫下放。这就是  $\eta_{\text{down}}$  为负值的原因。

在生产实际中,  $\eta_{\text{down}}$  为负值是有益的,能起到安全保护的作用。这样的提升系统在轻载的情况下,如果没有电动机做下放方向的驱动,负载是掉不下来的,这称为提升机构的自锁作用,它对于电梯这类涉及人身安全的提升机械尤为重要。要使  $\eta_{\text{down}}$  为负,必须采用高损耗的传动机构,如蜗轮蜗杆传动,其提升效率  $\eta_{\text{up}}$  仅为 0.3 ~ 0.5。

### 3. 飞轮矩的折算

升降运动与平移运动都是直线运动,因此与飞轮矩的折算方法相同。

**例 1-3** 某起重机电力拖动系统如图 1-7 所示。电动机  $P_N = 20 \text{ kW}$ ,  $n_N = 950 \text{ r/min}$ , 传动机构转速比  $j_1 = 3, j_2 = 3.5, j_3 = 4$ , 各级齿轮传递效率  $\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = 0.95$ , 各轴上的飞轮矩  $GD_a^2 = 123 \text{ N} \cdot \text{m}^2, GD_b^2 = 49 \text{ N} \cdot \text{m}^2, GD_c^2 = 40 \text{ N} \cdot \text{m}^2, GD_d^2 = 465 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ , 卷筒直径  $D = 0.6 \text{ m}$ , 吊钩重  $G_0 = 1962 \text{ N}$ , 被吊重物  $G = 49050 \text{ N}$ 。忽略电动机空载转矩、钢丝绳质量和滑轮传递的损耗,求:(1)以速度  $v = 0.3 \text{ m/s}$  提升重物时,负载(重物及吊钩)转矩、卷筒转速、电动机输出转矩及电动机转速;(2)负载及系统的飞轮矩(折算到电动机轴上);(3)以加速度  $a = 0.1 \text{ m/s}^2$  提升重物时,电动机输出的转矩。

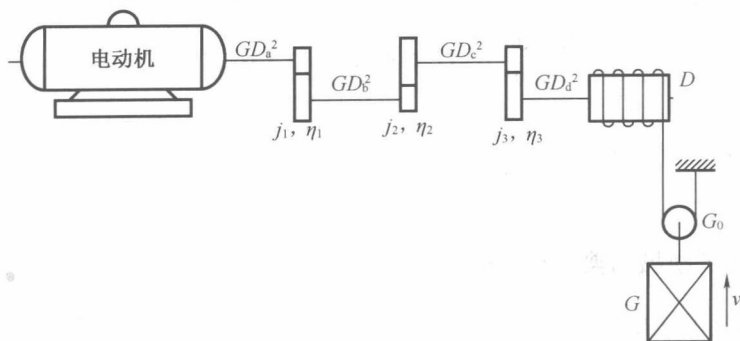


图 1-7 某起重机电力拖动系统示意图

**解** (1)以  $v = 0.3 \text{ m/s}$  提升重物时,负载(吊钩及重物)转矩