



普通高等教育 电气工程 系列规划教材  
自 动 化

Electric Drives and  
Control System

# 电力拖动与控制

第3版

◎ 李岚 梅丽凤 等编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育 电气工程 系列规划教材  
自动化

# 电力拖动与控制

第3版

李岚 梅丽凤 等编著

机械工业出版社

本书是为适应电气工程及其自动化专业课程体系改革的需要而编写的。主要内容包括：电力拖动系统的动力学基础、直流电动机的电力拖动、三相异步电动机的电力拖动、同步电动机的电力拖动、电力拖动系统中电动机的选择、常用低压电器、电气控制电路设计、电动机的基本控制电路、电器元件的选择及电动机的保护。为了和后续课程衔接，还介绍了可编程序控制器。本书精选了基础的教学内容，并将近年发展起来的智能电器和基础的教学内容有机地整合在一起。全书以培养高级应用型人才为目标，突出生产实际应用，着力培养学生分析问题、解决问题的能力。

本书为高等工科院校电气工程及其自动化专业及相关专业的教材，也可供从事相关专业的工程技术人员参考。

为方便教师授课，本书特备有免费电子课件及习题解答，可登录 <http://www.cmpedu.com> 注册下载。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电力拖动与控制/李岚等编著. —3 版. —北京:  
机械工业出版社, 2016. 7  
普通高等教育电气工程及其自动化系列规划教材  
ISBN 978 - 7 - 111 - 54234 - 6

I. ①电… II. ①李… III. ①电力传动 - 自动控制系  
统 - 高等学校 - 教材 IV. ①TM921. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 154856 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
策划编辑: 王雅新 责任编辑: 王雅新 徐 凡  
责任印制: 常天培 责任校对: 陈秀丽  
北京京丰印刷厂印刷  
2016 年 10 月第 3 版 · 第 1 次印刷  
184mm × 260mm · 17.75 印张 · 434 千字  
标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 54234 - 6  
定价: 39.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-88379649

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面无防伪标均为盗版

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

# 前 言

本书是在第2版教材的基本框架和基本内容的基础上进行修订的。

本版教材按照巩固、完善和提高的修订原则，力图在强调基础知识与基本技能的同时，反映控制技术的科学性与先进性。

全书共分两篇，第一篇为电力拖动基础，分为五章，内容包括：电力拖动系统的动力学基础、直流电动机的电力拖动、三相异步电动机的电力拖动、同步电动机的电力拖动、电力拖动系统中电动机的选择；第二篇为电器及其控制，分为五章，内容包括：常用低压电器、电器控制电路设计、电动机的基本控制电路、电器元件的选择及电动机的保护、可编程序控制器。

与第2版相比，本书主要修订和更新的内容如下：

- 1) 删减了第二章、第三章中部分思考题。
- 2) 第三章中增加了通用变频器的主要功能、变频器的选择等内容。
- 3) 对第六章中“低压电器的发展”相关内容进行了更新。

本书在编写过程中，力求使分散在原来四门课程中的内容融会贯通，成为有机联系的知识体系。例如，根据常用低压电器的功能，将电器学、电子电器的有关内容有机地整合在一起；又如将电机拖动和电气控制的知识连续学习，前呼后应。

本书由太原理工大学李岚，辽宁工业大学梅丽凤，太原理工大学赵荣理、路秀芬、王旭平、李梅共同编著，其中梅丽凤编写了第一、二章和第五章，赵荣理编写了第三章，路秀芬编写了第四章，李岚编写了第六~八章，李梅编写了第九章，王旭平编写了第十章。全书由李岚统稿。

在本书的撰写过程中，参阅了大量的教材和参考文献，在此谨向有关作者致以衷心的感谢。

将电力拖动基础、电器学、电子电器及电器控制等课程整合为一门课程是一次尝试，加之作者学识有限，编写时间又很仓促，书中定有很多不妥之处，殷切希望读者批评指正。

编 者

# 目 录

前言

## 第一篇 电力拖动基础

<b>第一章 电力拖动系统的动力学基础</b> .....	1
第一节 单轴电力拖动系统的运动方程式 .....	1
第二节 多轴电力拖动系统转矩及飞轮矩的折算 .....	2
第三节 生产机械的负载转矩特性 .....	7
思考题与习题 .....	9
<b>第二章 直流电动机的电力拖动</b> .....	10
第一节 他励直流电动机的机械特性 .....	10
第二节 电力拖动系统稳定运行的条件 .....	17
第三节 他励直流电动机的起动 .....	18
第四节 他励直流电动机的制动 .....	22
第五节 直流电动机电力拖动系统的动态特性 .....	30
第六节 他励直流电动机的调速 .....	39
第七节 串励直流电动机的电力拖动 .....	46
第八节 复励直流电动机的机械特性 .....	49
思考题与习题 .....	50
<b>第三章 三相异步电动机的电力拖动</b> .....	53
第一节 三相异步电动机的机械特性 .....	53
第二节 三相异步电动机的固有机械特性与人为机械特性 .....	57
第三节 三相异步电动机的起动 .....	59
第四节 三相异步电动机的制动 .....	76
第五节 三相异步电动机拖动系统的调速 .....	82
第六节 三相异步电动机的四象限运行 .....	94
思考题与习题 .....	99
<b>第四章 同步电动机的电力拖动</b> .....	102
第一节 同步电动机的起动 .....	102
第二节 同步电动机的调速 .....	104
<b>第五章 电力拖动系统中电动机的选择</b> .....	106
第一节 电动机发热和冷却规律 .....	106
第二节 电动机工作方式的分类 .....	108
第三节 连续工作制下电动机容量的选择 .....	110
第四节 短时工作制下电动机容量的选择 .....	112
第五节 断续周期工作制下电动机容量的选择 .....	114
第六节 电动机容量选择的工程方法 .....	115

第七节 电动机种类、额定电压、额定转速及外部结构形式的选择 .....	116
思考题与习题 .....	118

## 第二篇 电器及其控制

<b>第六章 常用低压电器</b> .....	120
第一节 概述 .....	120
第二节 常用低压电器的基本问题 .....	125
第三节 接触器 .....	131
第四节 继电器 .....	140
第五节 配电电器 .....	154
第六节 主令电器 .....	162
第七节 电磁执行机构 .....	167
思考题与习题 .....	169
<b>第七章 电气控制电路设计</b> .....	171
第一节 电气控制电路的常用符号及绘制原则 .....	171
第二节 电气控制电路的基本环节 .....	179
第三节 电气控制电路的一般设计方法 .....	183
第四节 电气控制电路的逻辑设计方法 .....	193
思考题与习题 .....	202
<b>第八章 电动机的基本控制电路</b> .....	204
第一节 直流电动机的控制电路 .....	204
第二节 三相异步电动机的起动控制电路 .....	209
第三节 三相异步电动机的正反转控制电路 .....	215
第四节 三相异步电动机的制动控制电路 .....	216
第五节 三相异步电动机的调速控制电路 .....	219
第六节 同步电动机的控制电路 .....	226
第七节 典型机床电气控制电路 .....	227
思考题与习题 .....	234
<b>第九章 电器元件的选择和电动机的保护</b> .....	236
第一节 电器元件的选择 .....	236
第二节 电动机的保护 .....	241
思考题与习题 .....	246
<b>第十章 可编程序控制器 (PLC)</b> .....	247
第一节 PLC 的基本结构和工作原理 .....	247
第二节 PLC 的指令系统 .....	251
第三节 机床电气的 PLC 控制技术 .....	265
思考题与习题 .....	274
<b>参考文献</b> .....	276



# 第一篇 电力拖动基础

## 第一章 电力拖动系统的动力学基础

由原动机带动生产机械运转称为拖动。用各种电动机作为原动机带动生产机械运转，以完成一定的生产任务的拖动方式，称为电力拖动。电力拖动系统，一般由电动机、机械传动机构、生产机械的工作机构、控制设备和电源五部分组成，如图 1-1 所示。其中电动机作为原动机，通过传动机构带动生产机械的工作机构执行某一项生产任务；机械传动机构用来传递机械能；控制设备则用来控制电动机的运转；电源的作用是向电动机和其他电气设备供电。通常把机械传动机构及工作机构称为电动机的机械负载。

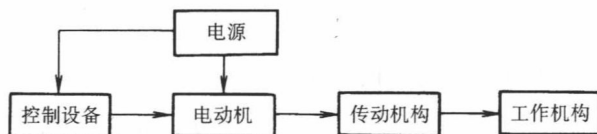


图 1-1 电力拖动系统示意图

电动机和负载构成了电力拖动系统。要研究电力拖动系统，不仅要研究电动机自身的运行性能，还要研究电动机和负载之间的运动规律——电力拖动系统的运动方程式。

### 第一节 单轴电力拖动系统的运动方程式

所谓单轴电力拖动系统，就是电动机与工作机构采用同轴连接，直接拖动生产机械运转的系统，如图 1-2 所示。图 1-2 中，作用在该轴上的转矩有电动机的电磁转矩  $T$ 、电动机的空载转矩  $T_0$  及生产机械的负载转矩  $T_m$ ， $T_0 + T_m = T_L$ 。  $T_L$  为电动机的负载转矩。轴的旋转角速度为  $\Omega$ ，电动机转子的转动惯量为  $J_R$ ，生产机械转动部分的转动惯量为  $J_m$ 。联轴器的转动惯量比  $J_R$  及  $J_m$  小很多，可忽略，因此单轴拖动系统对转轴的总转动惯量为  $J = J_R + J_m$ 。图 1-2b 给出了各物理量的参考正方向。假定两轴之间为刚性连接，并忽略轴的弹性变形，那么图 1-2 所示的单轴拖动系统可以看成刚体绕固定轴转动。根据力学中刚体转动定律及各量的参考正方向，可写出如下的转动方程式

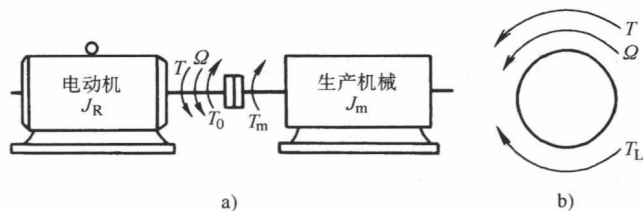


图 1-2 单轴电力拖动系统及各量的参考方向

a) 单轴电力拖动系统 b) 各量的参考方向

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

式中,  $T$  为电动机的电磁转矩 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ );  $T_L$  为电动机的负载转矩 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ );  $J$  为电动机轴上的总转动惯量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ );  $\Omega$  为电动机的角速度 ( $\text{rad/s}$ )。

式 (1-1) 称为单轴电力拖动系统的运动方程式, 它描述了作用于单轴拖动系统的转矩与速度变化之间的关系, 是研究电力拖动系统各种运转状态的基础。

转动惯量  $J$  是物理学中常用的参量, 在实际的电力拖动工程中则采用飞轮惯量 (即飞轮矩)  $GD^2$  代替转动惯量  $J$ ; 用转速  $n$  代替角速度  $\Omega$ 。  $n$  与  $\Omega$  的关系为  $\Omega = \frac{2\pi}{60}n$ , 则

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt} \quad (1-2)$$

$J$  与  $GD^2$  之间的关系为

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

式中,  $m$  为系统转动部分的质量 ( $\text{kg}$ );  $G$  为系统转动部分的重力 ( $\text{N}$ );  $\rho$  为系统转动部分的回转半径 ( $\text{m}$ );  $D$  为系统转动部分的内径 ( $\text{m}$ );  $g$  为重力加速度, 可取  $g = 9.81 \text{m/s}^2$ 。

将式 (1-2) 和式 (1-3) 代入式 (1-1), 可得

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

式中,  $GD^2$  为系统转动部分的总飞轮矩 ( $\text{N} \cdot \text{m}^2$ ); 375 为具有加速度量纲的系数,  $375 = 4g \times 60/2\pi$ 。

式 (1-4) 就是电力拖动系统的基本运动方程式。它表明电力拖动系统的转速变化  $dn/dt$  (即加速度) 是由作用在转轴上所有转矩的代数和  $T - T_L$  决定的。

当  $T > T_L$  时,  $dn/dt > 0$ , 系统加速; 当  $T < T_L$  时,  $dn/dt < 0$ , 系统减速。这两种情况, 系统的运动都处在过渡过程之中, 称为动态或过渡状态。

当  $T = T_L$  时,  $dn/dt = 0$ , 转速不变, 系统以恒定的转速运行, 或者静止不动。这种运动状态称为稳定运转状态或静态, 简称稳态。

必须注意,  $T$ 、 $T_L$  及  $n$  都是有方向的, 假如规定: 转速  $n$  对观察者而言逆时针为正, 则转矩  $T$  与  $n$  的正方向相同为正; 负载转矩  $T_L$  与  $n$  的正方向相反为正。在代入具体数值时, 如果其实际方向与规定的正方向相同, 就用正数, 否则应当用负数。把握住这一点, 就可以正确应用基本运动方程式了。

## 第二节 多轴电力拖动系统转矩及飞轮矩的折算

所谓多轴电力拖动系统, 就是在电动机与工作机构之间增设传动机构的系统。

在实际生产中, 许多生产机械为满足工艺要求需要较低的转速, 或者需要平移、升降、往复等不同的运动形式, 但在制造电动机时, 为了节省材料, 一般都制成额定转速较高的旋转电动机, 因此其间必须加装减速机构, 例如齿轮减速箱、传动带、蜗杆等传动机构。

图 1-3 所示为多轴电力拖动系统, 图中采用四个轴把电动机转速  $\Omega$  变成符合生产机械工



作机构需要的转速  $\Omega_m$ ，不同的轴上有不同的转动惯量和转速，也有相应地反映电动机拖动的转矩及反映工作机构工作的阻转矩，这种系统比单轴拖动系统复杂，计算较为困难，为了简化计算，一般都采用折算的办法，把多轴电力拖动系统折算为等效的单轴系统，然后按单轴电力拖动系统的运动方程式来分析。这样就不必详细研究每根轴的问题，只把电动机轴作为研究对象即可。

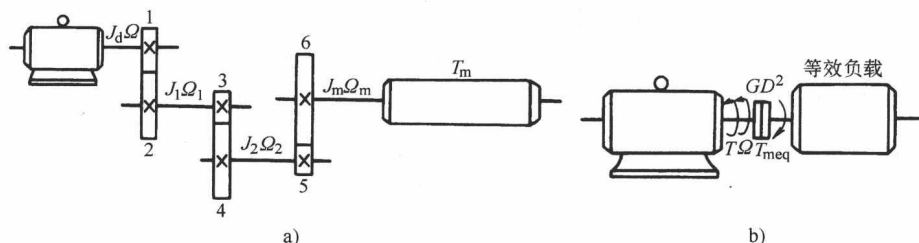


图 1-3 多轴电力拖动系统示意图

a) 多轴系统 b) 等效折算图

应注意的是在使用运动方程式进行分析时，式中的  $T_L$  应是折算后的等效负载转矩  $T_{meq}$  (忽略  $T_0$ )， $GD^2$  是折算后系统总的等效飞轮矩  $GD_{eq}^2$ 。

因此本节重点研究负载转矩和飞轮矩的具体折算方法。折算的原则是：按照能量守恒定律，系统在折算前和折算后应具有相等的机械功率和动能。

### 一、工作机构旋转运动时转矩和飞轮矩的折算

#### 1. 转矩的折算

转矩的折算按照所传递的功率相等的原则进行。在图 1-3 所示的电力拖动系统中，工作机构上的阻转矩是  $T_m$ ，折算到电动机轴上的阻转矩是  $T_{meq}$ ，如不考虑传动机构的损耗，则有

$$\begin{aligned} T_{meq}\Omega &= T_m\Omega_m \\ T_{meq} &= \frac{T_m\Omega_m}{\Omega} = \frac{T_m}{j} \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中， $j$  为电动机轴与工作机构轴间的转速比。如传动机构为多级齿轮或带轮变速，各级的速比为  $j_1$ 、 $j_2$ 、 $j_3$ 、 $\dots$ ，则总速比  $j = j_1 j_2 j_3 \dots$ ， $j = \frac{\Omega}{\Omega_m} = \frac{n}{n_m}$

考虑传动机构的传动损耗时，负载转矩的折算值还要大些

$$T_{meq} = \frac{T_m}{j\eta} \quad (1-6)$$

这就是负载转矩的折算公式。式中， $\eta$  为传动机构的总效率，等于各级传动效率的乘积

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots$$

以上分析是电机工作在电动状态，由电动机带动工作机构旋转时，功率由电动机传给负载的情况，传动损耗由电动机承担。如果电动机工作在制动状态，例如提升机构下放重物时，为保持下放速度不至于过快而且是匀速下放，就应该使电动机轴上产生一个与下放速度方向相反的转矩，与负载转矩相平衡。此时是重物带动电动机轴旋转，即电动机由工作机构带动，功率传递方向是从负载传向电动机，传动损耗就由工作机构承担，按传动功率不变的原则

$$T_{\text{meq}}\Omega = T_m\Omega_m\eta$$

因此

$$T_{\text{meq}} = \frac{T_m}{j}\eta \quad (1-7)$$

## 2. 飞轮矩的折算

在图 1-3 所示的多轴系统中，必须将传动机构各轴的转动惯量  $J_1$ 、 $J_2$  及工作机构的转动惯量  $J_m$  折算到电动机轴上，用电动机轴上一个等效的转动惯量  $J$ （或飞轮矩  $GD^2$ ）来反映各轴的转动惯量对整个拖动系统的影响。各轴的转动惯量对运动过程的影响直接反映在各轴转动惯量所储存的动能上。因此飞轮矩的折算原则必须是折算前后系统储存的动能不变。由力学的规律可知，旋转体的动能为  $\frac{1}{2}J\Omega^2$ ，设各轴的角速度为  $\Omega$ 、 $\Omega_1$ 、 $\Omega_2$ 、 $\Omega_m$  时，可得下列关系式

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}J\Omega^2 &= \frac{1}{2}J_d\Omega^2 + \frac{1}{2}J_1\Omega_1^2 + \frac{1}{2}J_2\Omega_2^2 + \frac{1}{2}J_m\Omega_m^2 \\ J &= J_d + J_1\left(\frac{\Omega}{\Omega_1}\right)^2 + J_2\left(\frac{\Omega}{\Omega_2}\right)^2 + J_m\left(\frac{\Omega}{\Omega_m}\right)^2 \end{aligned}$$

式中， $J_d$  为电动机轴的转动惯量。考虑到  $J = \frac{GD^2}{4g}$ ， $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ ，上式又可写成

$$GD^2 = GD_d^2 + \frac{GD_1^2}{\left(\frac{n}{n_1}\right)^2} + \frac{GD_2^2}{\left(\frac{n}{n_2}\right)^2} + \frac{GD_m^2}{\left(\frac{n}{n_m}\right)^2} \quad (1-8)$$

式中， $GD_d^2$ 、 $GD_1^2$ 、 $GD_2^2$ 、 $GD_m^2$  为各轴和电动机轴上相应的飞轮矩。

推广到一般，各种多轴拖动系统飞轮矩的折算可用下式表示

$$GD^2 = GD_d^2 + \frac{GD_1^2}{\left(\frac{n}{n_1}\right)^2} + \frac{GD_2^2}{\left(\frac{n}{n_2}\right)^2} + \dots + \frac{GD_m^2}{\left(\frac{n}{n_m}\right)^2} \quad (1-9)$$

一般情况下，传动机构的飞轮矩折算到电动机轴上以后的数值，在等效单轴系统的总飞轮矩  $GD^2$  中是次要部分，而电动机转子本身的飞轮矩则是总飞轮矩中的主要部分。在实际工作中，为了计算方便起见，通常采用适当增大电动机转子飞轮矩的方法来考虑传动机构各轴的飞轮矩。于是，有如下的估算公式

$$GD^2 \approx \delta GD_d^2 + GD_m^2 \frac{1}{j^2} \quad (1-10)$$

式中， $\delta$  为大于 1 的系数，一般取  $\delta = 1.1 \sim 1.25$ 。

**例 1-1** 某电力拖动系统如图 1-4 所示。已知飞轮矩  $GD_d^2 = 14.5\text{N} \cdot \text{m}^2$ ， $GD_1^2 = 18.8\text{N} \cdot \text{m}^2$ ， $GD_m^2 = 120\text{N} \cdot \text{m}^2$ ，传动效率  $\eta_1 = 0.91$ ， $\eta_m = 0.93$ ，转矩  $T_m = 85\text{N} \cdot \text{m}$ ，转速  $n = 2450\text{r}/\text{min}$ ， $n_1 = 810\text{r}/\text{min}$ ， $n_m = 150\text{r}/\text{min}$ ，忽略电动机空载转矩，试求：

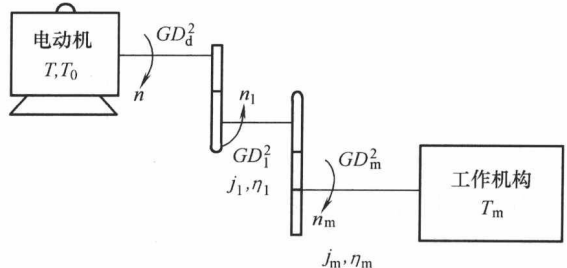


图 1-4 某电力拖动系统示意图

(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  $T_{meq}$

解 (1) 系统总飞轮矩

$$GD^2 = GD_d^2 + \frac{GD_1^2}{\left(\frac{n}{n_1}\right)^2} + \frac{GD_m^2}{\left(\frac{n}{n_m}\right)^2} = 14.5 \text{N} \cdot \text{m}^2 + \frac{18.8}{\left(\frac{2450}{810}\right)^2} \text{N} \cdot \text{m}^2 + \frac{120}{\left(\frac{2450}{150}\right)^2} \text{N} \cdot \text{m}^2$$

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

(2) 负载转矩

$$T_{meq} = \frac{T_m}{\frac{n}{n_m} \eta_1 \eta_m} = \frac{85}{\frac{2450}{150} \times 0.91 \times 0.93} \text{N} \cdot \text{m} = 6.15 \text{N} \cdot \text{m}$$

## 二、工作机构直线运动时转矩与飞轮矩的折算

某些生产机械具有直线运动的工作机构，如起重机的提升装置，刨床工作台带动工件前进来进行切削加工的工作机构等都属于此类直线运动工作机构。直线运动又分为平移运动和升降运动两种，其转矩和飞轮矩的折算公式有其自己的特点。

(一) 平移运动

### 1. 转矩的折算

有些生产机械，例如刨床，其工作机构作平移运动，如图 1-5 所示，切削时工件与工作台的速度为  $v$  (m/s)，刨刀固定不动，刨刀作用在工件上的力为  $F$  (N)，传动机构的效率为  $\eta$ 。切削时的切削功率  $P$  (W) 为

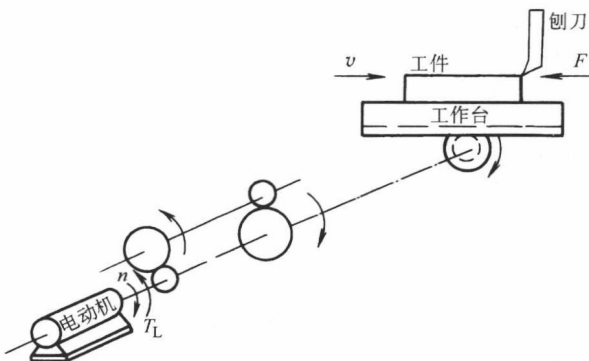


图 1-5 工作机构作平移运动的示意图

考虑到传动机构中的损耗，电动机轴上的负载功率为

$$P = Fv$$

考虑到传动机构中的损耗，电动机轴上的负载功率为

$$T_{meq} \Omega = \frac{P}{\eta} = \frac{Fv}{\eta}$$

$$T_{meq} = \frac{Fv}{\eta \Omega} = \frac{Fv}{\eta \frac{2\pi n}{60}} = 9.55 \frac{Fv}{n\eta} \quad (1-11)$$

式 (1-11) 就是平移运动的负载转矩折算公式。

### 2. 飞轮矩的折算

设平移运动部件的重量为  $G = mg$ ，则平移运动部件的动能为

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{G}{g} v^2$$

又设拟折算到电动机轴上的转动惯量为  $J_{eq}$ ，那么折算到电动机轴上后的动能为

$$\frac{1}{2} J_{eq} \Omega^2 = \frac{1}{2} \frac{GD_{eq}^2}{4g} \left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2$$

根据折算前后动能不变的原则有

$$\frac{1}{2} \frac{G}{g} v^2 = \frac{1}{2} \frac{GD_{eq}^2}{4g} \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

所以 
$$GD_{eq}^2 = 4 \times \frac{Gv^2}{\left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2} = 365 \frac{Gv^2}{n} \quad (1-12)$$

$GD_{eq}^2$  为折算到电动机轴上的等效飞轮矩，单位为  $N \cdot m^2$ 。

为了求得等效单轴系统的总飞轮矩，还需要计算传动机构各旋转轴飞轮矩的折算值，其方法与多轴旋转系统飞轮矩的折算方法相同，不再赘述。

### (二) 升降运动

桥式起重机的提升机构、电梯、矿井卷扬机等，它们的工作机构都是作升降运动的。升降运动虽然属于直线运动，但它与重力有关。

#### 1. 转矩的折算

图 1-6 所示为一起重机示意图，通过传动机构（减速箱）拖动一个卷筒，缠在卷筒上的钢丝绳悬挂一重物，重物的重力为  $G = mg$ ，传动机构总速比为  $j$ ，重物提升时传动机构效率为  $\eta$ ，卷筒半径为  $R$ ，转速为  $n$ ，重物提升或下放的速度都为  $v_L$ ，是个常数。

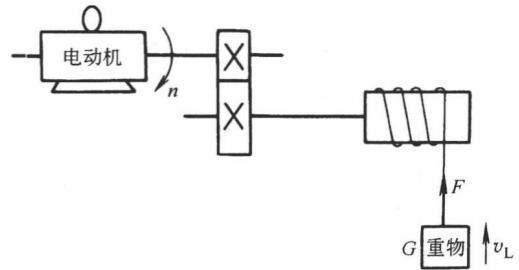


图 1-6 起重机示意图

重物作用在卷筒上，重物对卷筒轴上的负载转矩为  $GR$ ，不计传动机构损耗时，折算到电动机轴上的负载转矩为

$$T_{meq} = \frac{GR}{j} \quad (1-13)$$

考虑传动机构有损耗，当提升重物时，这个损耗由电动机负担，因此折算到电动机轴上的负载转矩应为

$$T_{meq} = \frac{GR}{j\eta} \quad (1-14)$$

传动机构的损耗转矩  $\Delta T$  是由摩擦产生的，其值为

$$\Delta T = \frac{GR}{j\eta} - \frac{GR}{j}$$

下放重物时，工作机构带动电动机使重物下放，传动损耗由工作机构承担，于是可得

$$T_{meq} = \frac{GR}{j} \eta' \quad (1-15)$$

式中， $\eta'$  为重物下放时传动机构的效率，在提升与下放传动损耗相等（提升与下放同一重物）的条件下，可以证明  $\eta'$  与  $\eta$  有如下关系

$$\eta' = 2 - \frac{1}{\eta} \quad (1-16)$$

#### 2. 飞轮矩的折算

升降运动飞轮矩的折算，因不涉及传动损耗，因此和平移运动飞轮矩的折算相同。

**例 1-2** 某刨床电力拖动系统如图 1-5 所示。已知切削力  $F = 10000N$ ，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  $n=1450\text{r/min}$ ，电动机的飞轮矩  $GD_d^2=100\text{N}\cdot\text{m}^2$ ，试求：

(1) 切削时折算到电动机轴上的负载转矩；

(2) 估算系统总的飞轮矩；

(3) 不切削时，工作台及工件反向加速，电动机以  $\frac{dn}{dt}=500\text{m/s}^2$  恒加速度运行，计算此时系统的动态转矩绝对值。

解：(1) 切削功率

$$P = Fv = 10000 \times 0.7\text{W} = 7000\text{W}$$

切削时折算到电动机轴上的负载转矩

$$T_{\text{meq}} = 9.55 \frac{Fv}{n\eta} = 9.55 \times \frac{7000}{1450 \times 0.81} \text{N}\cdot\text{m} = 56.92\text{N}\cdot\text{m}$$

(2) 估算系统总的飞轮矩

$$GD_{\text{eq}}^2 \approx 1.2GD_d^2 = 1.2 \times 100\text{N}\cdot\text{m}^2 = 120\text{N}\cdot\text{m}^2$$

(3) 不切削时 ( $T_{\text{meq}}=0$ )，工作台与工件反向加速时，系统动态转矩绝对值

$$T - T_{\text{meq}} = \frac{GD_d^2}{375} \frac{dn}{dt} = \frac{120}{375} \times 500\text{N}\cdot\text{m} = 160\text{N}\cdot\text{m}$$

### 第三节 生产机械的负载转矩特性

负载转矩特性是指生产机械工作机构的转矩与转速之间的函数关系，即  $T_L = f(n)$ 。不同的生产机械其负载转矩特性也不相同。典型的负载转矩特性有恒转矩特性、恒功率特性和通风机型特性三种。

#### 一、恒转矩负载特性

凡是负载转矩  $T_L$  的大小为一定值，而与转速  $n$  无关的称为恒转矩负载。根据负载转矩的方向是否与转向有关又分为两种。

##### 1. 反抗性恒转矩负载特性

这种负载转矩是由摩擦阻力产生的。它的特点是  $T_L$  大小不变，但作用方向总是与运动方向相反，是阻碍运动的制动性质转矩。属于这一类负载的生产机械有带式输送机、轧钢机、起重机的行走机构等。

从反抗性恒转矩负载的特点可知，当  $n$  为正向时， $T_L$  亦为正（按规定，以反对正向运动的方向作为  $T_L$  的正方向）；当  $n$  为负向时， $T_L$  也改变方向（阻碍运动、与  $+n$  同方向），变为负值。因此，反抗性恒转矩负载特性应画在第一与第三象限内，如图 1-7 所示。

##### 2. 位能性恒转矩负载特性

这种负载转矩是由重力作用产生的。它的特点是  $T_L$  大小不变，而且作用方向也保持不变。

最典型的位能性负载是起重机的提升机构及矿井卷扬机。这类负载无论是提升重物还是下放重物，重力的作用方向不变。如果以提升作为运动的正方向，则  $n$  为正向时， $T_L$  反对

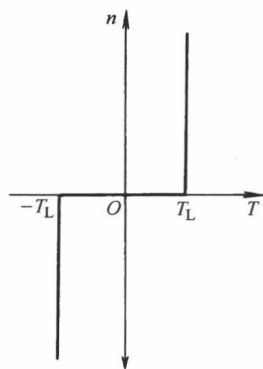


图 1-7 反抗性恒转矩负载特性

运动，也为正值；当下放重物， $n$ 为负向时， $T_L$ 的方向不变，仍为正，表明这时 $T_L$ 是帮助运动的， $T_L$ 成为拖动转矩了。其特性应画在第一和第四象限内，如图1-8所示。

### 二、恒功率负载转矩特性

某些生产机械，例如车床，在粗加工时，切削量大，因而切削阻力也大，这时运转速度低；在精加工时，切削量小，因而切削阻力也小，这时运转速度高。因此，在不同转速下，负载转矩 $T_L$ 基本上与转速成反比，即：

$$T_L = \frac{K}{n}$$

切削功率为

$$P_L = T_L \Omega = T_L \frac{2\pi n}{60} = K_1$$

可见，切削功率基本不变，因此，把这种负载称为恒功率负载。

恒功率负载特性 $T_L$ 与 $n$ 成双曲线关系，如图1-9所示。

### 三、通风机型负载转矩特性

属于通风机型负载的生产机械有：通风机、水泵、液压泵等。这种负载转矩是由周围介质（空气、水、油等）对工作机构产生阻力所引起的阻转矩，转矩基本上与 $n^2$ 成正比，即

$$T_L = kn^2$$

式中， $k$ 为比例系数。

其负载转矩特性如图1-10实线所示。

以上三类都是很典型的负载特性，实际负载可能是一种类型，也可能是几种类型的综合。例如，实际的通风机由于轴承上有一定的摩擦转矩 $T_{m0}$ ，因此实际的通风机负载转矩为

$$T_L = T_{m0} + kn^2$$

与其相应的特性如图1-10中虚线所示。再如起重机的提升机构，除位能转矩 $T_L$ 外，传动机构也存在摩擦转矩 $T_{m0}$ ， $T_{m0}$ 具有反抗性恒转矩负载性质。因此实际提升机构的负载转矩特性是反抗性负载和位能负载两种典型特性的综合，相应的负载转矩特性如图1-11所示，提升重物时， $T_{L1} = T_L + T_{m0}$ ；下放重物时， $T_{L2} = T_L - T_{m0}$ 。

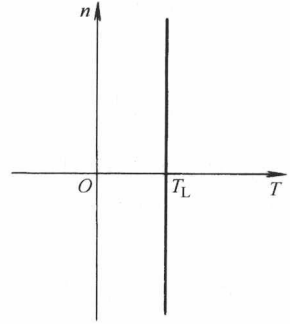


图1-8 位能性恒转矩负载特性

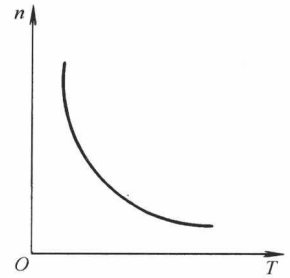


图1-9 恒功率负载特性

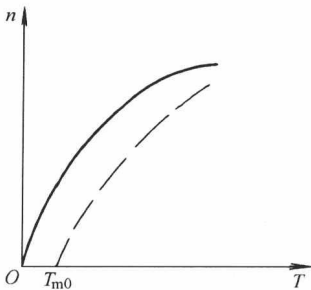


图1-10 风机泵类负载特性

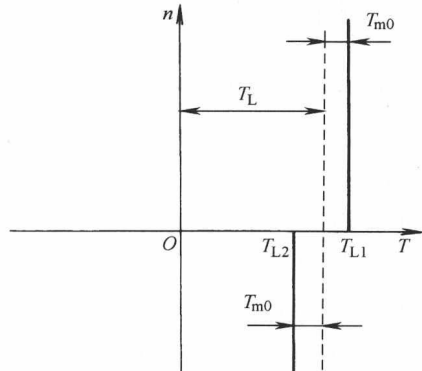


图1-11 提升机构负载特性



### 思考题与习题

- 1-1 什么是电力拖动系统？它包括哪几部分？都起什么作用？举例说明。
- 1-2 电力拖动系统运动方程式中  $T$ 、 $T_L$  及  $n$  的正方向是如何规定的？如何表示它的实际方向？
- 1-3 试说明  $GD^2$  的概念。
- 1-4 从运动方程式中如何看出系统是处于加速、减速、稳速或静止等运动状态的？
- 1-5 多轴电力拖动系统为什么要折算为等效单轴系统？
- 1-6 把多轴电力拖动系统折算为等效单轴系统时，负载转矩按什么原则折算？各轴的飞轮矩按什么原则折算？
- 1-7 什么是动态转矩？它与电动机负载转矩有什么区别？
- 1-8 负载的转矩特性有哪几种类型？各有什么特点？
- 1-9 某拖动系统如图 1-12 所示。当系统以  $1\text{m/s}^2$  的加速度提升重物时，试求电动机应产生的电磁转矩。折算到电动机轴上的负载转矩  $T_{\text{meq}} = 195\text{N}\cdot\text{m}$ ，折算到电动机轴上的系统总（包括卷筒）转动惯量  $J = 2\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ，卷筒直径  $d = 0.4\text{m}$ ，减速机的速比  $j = 2.57$ 。计算时忽略电动机的空载转矩。

1-10 试求图 1-13 所示拖动系统提升或下放罐笼时，折算到电动机轴上的等效负载转矩以及折算到电动机轴上的拖动系统升降部分的飞轮矩。已知罐笼的质量  $m_0 = 300\text{kg}$ ，重物的质量  $m = 1000\text{kg}$ ，平衡锤的质量  $m_p = 600\text{kg}$ ，罐笼提升速度  $v_m = 1.5\text{m/s}$ ，电动机的转速  $n = 980\text{r/min}$ ，传动效率  $\eta_0 = 0.85$ 。传动机构及卷筒的飞轮矩略而不计。

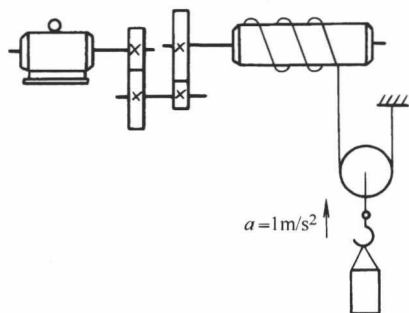


图 1-12 拖动系统传动机构图

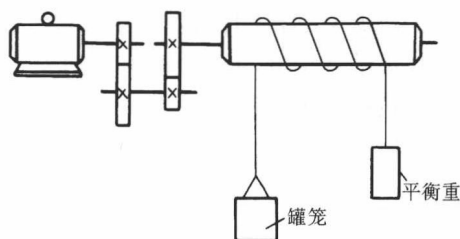


图 1-13 拖动系统传动机构图

1-11 某卷扬机为三轴电动机拖动系统，其传动系统如图 1-14 所示，现已知：提升的重物  $G = 2000\text{kg}$ ，提升速度  $v = 30\text{m/min}$ ，传动齿轮的效率  $\eta_1 = \eta_2 = 0.96$ ，卷筒的效率  $\eta_5 = 0.95$ ，卷筒的直径  $d_5 = 0.4\text{m}$ ，齿轮的转速比  $j_1 = 6$ ， $j_2 = 10$ ，电动机的飞轮矩  $GD_4^2 = 10\text{N}\cdot\text{m}^2$ ，齿轮的飞轮矩分别为  $GD_1^2 = 1\text{N}\cdot\text{m}^2$ ， $GD_2^2 = 20\text{N}\cdot\text{m}^2$ ， $GD_3^2 = 5\text{N}\cdot\text{m}^2$ ， $GD_4^2 = 50\text{N}\cdot\text{m}^2$ ，卷筒的飞轮矩  $GD_5^2 = 10\text{N}\cdot\text{m}^2$ 。试求：

- (1) 电动机以等速提升重物时所产生的电磁转矩；
- (2) 整个拖动系统折算到电动机轴上的飞轮矩。

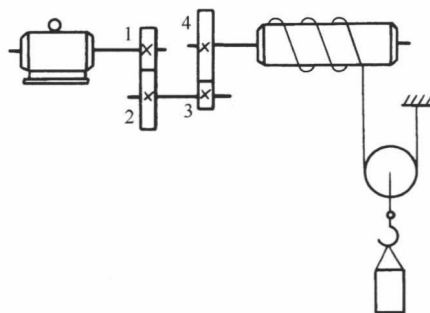


图 1-14 卷扬机传动系统图

## 第二章 直流电动机的电力拖动

在现代工业生产过程中,为了实现各种生产工艺过程,需要使用各种各样的生产机械。而拖动各种生产机械运转,可以采用气动、液压传动和电力拖动方式。由于电力拖动具有控制简单、调节性能好、损耗小、经济、能实现远距离控制和自动控制等一系列优点,因此大多数生产机械均采用电力拖动。按照电动机的种类不同,电力拖动系统分为直流电力拖动系统和交流电力拖动系统两大类。本章重点介绍直流电动机的电力拖动。

### 第一节 他励直流电动机的机械特性

机械特性是电动机的主要特性,是分析电动机起动、制动、调速等问题的重要工具。

在电力拖动系统中,实际上是由电动机产生电磁转矩  $T$ ,拖动生产机械以转速  $n$  旋转。 $T$  和  $n$  是生产机械对电动机提出的两项基本要求。学习电力拖动,特别要关心  $T$  和  $n$ 。在电动机内部, $T$  和  $n$  并不是相互孤立的,在一定条件下,它们之间存在着确定的关系,这个关系就叫做机械特性,可写成  $n = f(T)$ 。

他励直流电动机的机械特性是指在电枢电压、励磁电流、电枢总电阻均为常数的条件下,电动机的转速  $n$  与电磁转矩  $T$  的关系曲线:  $n = f(T)$ 。

#### 一、机械特性方程式

为了研究  $T$  和  $n$  之间的关系,首先要建立二者之间的关系式。为此我们按照惯例画出他励直流电动机的拖动系统原理图,如图 2-1 所示。忽略电枢反应时,根据图中给出的正方向,可列出电枢回路的电压平衡方程式

$$U = E_a + I_a(R_a + R_c) \quad (2-1)$$

由电机学知,电动机产生的电磁转矩及电枢电动势分别为

$$E_a = C_e \Phi n \quad (2-2)$$

$$T = C_T \Phi I_a \quad (2-3)$$

联解上述方程,整理后可得

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_c}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (2-4)$$

式中,  $R_a$  为电枢电阻;  $R_c$  为电枢回路外串电阻;  $C_e$  为电动势常数,  $C_e = \frac{pN}{60a}$ ;  $C_T$  为转矩常数,  $C_T = \frac{pN}{2\pi a} = 9.55C_e$ 。

当  $U$ 、 $\Phi$  及  $R_a + R_c$  都保持为常数时,式 (2-4) 表示的就是  $n$  与  $T$  之间的函数关系,即他励直流电动机的机械特性方程式。

可以把式 (2-4) 写成如下形式

$$n = n_0 - \beta T \quad (2-5)$$

式中,  $n_0$  为理想空载转速,  $n_0 = U/C_e\Phi$ ;  $\beta$  为机械特性的斜率,  $\beta = (R_a + R_c) / (C_e C_T \Phi^2)$ 。

式 (2-4)、式 (2-5) 可用曲线表示, 如图 2-2 所示, 它是穿越三个象限的一条直线。下面讨论机械特性上的两个特殊点。

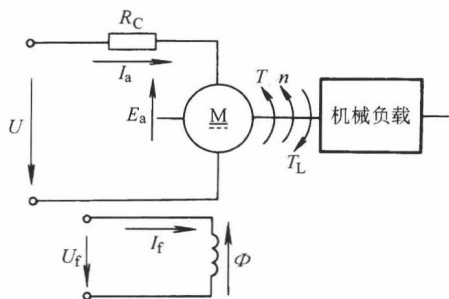


图 2-1 他励直流电动机拖动系统

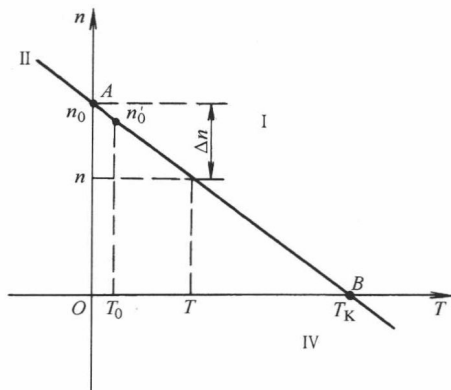


图 2-2 他励直流电动机的机械特性

### 1. 理想空载点

图 2-2 中的 A 点即为理想空载点。在 A 点:  $T=0$ ,  $I_a=0$ , 电枢压降  $I_a(R_a + R_c) = 0$ , 电枢电动势  $E_a = U$ , 电动机的转速  $n = n_0 = U / (C_e\Phi)$ 。

理想空载转速和实际空载转速是不同的。由电机学我们知道:  $T = T_2 + T_0$ , 电动机在实际的空载状态下运行时, 虽然轴输出转矩  $T_2 = 0$ , 但由于空载转矩  $T_0$  不为零, 使得电动机的电磁转矩  $T \neq 0$ , 所以实际空载转速  $n'_0$  为

$$n'_0 = n_0 - \beta T_0$$

### 2. 堵转点

图 2-2 的 B 点即为堵转点。在 B 点,  $n=0$ , 因而  $E_a=0$ 。由于  $U = E_a + I_a(R_a + R_c)$ , 所以电枢电流  $I_a = U / (R_a + R_c) = I_K$ , 称为堵转电流, 与  $I_K$  相对应的电磁转矩  $T_K = C_T\Phi I_K$  称为堵转转矩。

## 二、固有机机械特性

电动机本身固有的特性称为固有机机械特性, 它应具备的条件是:

①电源电压  $U = U_N$ ; ②励磁磁通  $\Phi = \Phi_N$ ; ③电枢所串电阻  $R_c = 0$

把上述条件代入式 (2-4), 即得固有机机械特性方程式

$$n = \frac{U_N}{C_e\Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (2-6)$$

固有机机械特性的理想空载转速及斜率分别为  $n_0 = U_N / C_e\Phi_N$  和  $\beta_N = R_a / (C_e C_T \Phi_N^2)$ , 所以固有机机械特性也可表示为

$$n = n_0 - \beta_N T \quad (2-7)$$

在固有机机械特性上, 当电磁转矩为额定转矩时, 其对应的转速称为额定转速。即

$$n_N = n_0 - \beta_N T_N = n_0 - \Delta n_N \quad (2-8)$$

式中,  $\Delta n_N$  为额定转速降,  $\Delta n_N = \beta_N T_N$ 。

图 2-3 所示为他励直流电动机的固有机机械特性曲线, 它是一条略微向下倾斜的直线。由