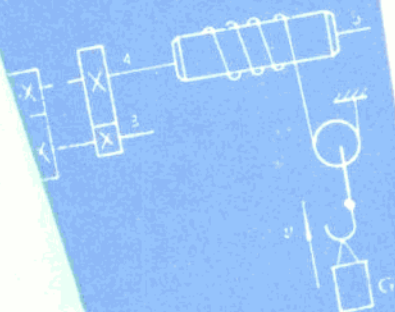


DIANLITUODONGJISHU

电力拖动基础

郑朝科 唐顺华 编



同济大学出版社

17541

前 言

本教材是根据高等工业学校“电力拖动基础”教学大纲编写的。

本书的主要内容包括：电力拖动系统运动方程，直流电机拖动系统的机械特性和动态特性，三相异步电动机的静态特性、起动、调速以及电动机选择。本书可作为普通高等工业院校和成人高等工业院校工业电气自动化专业的教材，也可供有关专业师生、工程技术人员参考。

编者根据工业电气自动化专业的性质和多年教学实践的体会，从掌握基本理论、弄清物理概念、注意联系生产实际，有利改革教学方法等要求出发，编写时力求做到重点突出、概念清楚、由浅入深、通俗易懂。每章正文之前有学习指导，每节后有小结，正文中有较多例题，这些都有利于自学，在教学中可适当减少课堂教学时数。

本书第一章至第三章由唐顺华编写，第四章至第七章由郑朝科编写。全书由郑朝科主编。在编写中主要参考了宋银宾主编的《电机及拖动基础》、陈伯时等编的《电机与拖动》、顾绳谷主编的《电机及拖动基础》和佟纯厚主编的《近代交流调速》等教材以及赵锦标的部分书稿。

上海大学陈伯时教授、同济大学周国兴教授对全书进行了认真细致的审阅，并对书稿提出了许多宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。

限于编者水平和时间仓促，书中一定会有不少缺点与错误，敬请读者批评指正。

编者

1995年4月

目 录

| | |
|------------------------|-------|
| 前言 | |
| 第一章 电力拖动系统的运动方程式 | (1) |
| 学习指导 | (1) |
| 第一节 单轴电力拖动系统的运动方程式 | (2) |
| 第二节 多轴电力拖动系统的运动方程式 | (4) |
| 第三节 生产机械的负载转矩特性 | (11) |
| 复习思考题 | (15) |
| 习题 | (15) |
| 测验作业 | (16) |
| 第二章 直流电动机的机械特性 | (19) |
| 学习指导 | (19) |
| 第一节 他励直流电动机的机械特性 | (20) |
| 第二节 他励直流电动机的起动特性 | (31) |
| 第三节 他励直流电动机制动运转特性 | (40) |
| 第四节 他励直流电动机的运转状态 | (51) |
| 第五节 他励直流电动机的速度调节及其特征 | (59) |
| 第六节 串励直流电动机的机械特性 | (69) |
| 第七节 复励直流电动机的机械特性 | (73) |
| 复习思考题 | (74) |
| 习题 | (75) |
| 测验作业 | (78) |
| 第三章 直流电力拖动系统的动态特性 | (80) |
| 学习指导 | (80) |
| 第一节 概述 | (81) |
| 第二节 他励直流电动机起动时的动态特性 | (82) |
| 第三节 他励直流电动机制动过程的动态特性 | (98) |
| 第四节 他励直流电动机励磁回路的动态过程 | (109) |
| 第五节 加快他励直流电动机机械动态过程的方法 | (113) |
| 第六节 他励直流电动机考虑电枢电感的动态过程 | (116) |
| 复习思考题 | (124) |
| 习题 | (125) |
| 测验作业 | (128) |
| 第四章 三相异步电动机拖动系统的静态特性 | (130) |

| | |
|-----------------------------------|-------|
| 学习指导 | (130) |
| 第一节 三相异步电动机的机械特性..... | (131) |
| 第二节 三相异步电动机的人为机械特性..... | (141) |
| 第三节 三相异步电动机的电动和制动运行状态..... | (147) |
| 第四节 三相异步电动机参数的工程计算法..... | (168) |
| 复习思考题..... | (173) |
| 习题..... | (174) |
| 测验作业..... | (175) |
| 第五章 三相异步电动机的起动 | (177) |
| 学习指导 | (177) |
| 第一节 三相异步电动机起动问题的提出..... | (178) |
| 第二节 小容量电动机的轻载起动——直接起动..... | (180) |
| 第三节 中、大容量电动机的轻载起动——降压起动 | (182) |
| 第四节 小容量电动机的重载起动——特殊结构的鼠笼式电动机..... | (195) |
| 第五节 中、大容量电动机重载起动——绕线式电动机的起动 | (198) |
| 第六节 三相异步电动机起动的过渡过程..... | (206) |
| 复习思考题..... | (212) |
| 习题..... | (212) |
| 测验作业..... | (213) |
| 第六章 三相交流电动机拖动系统的速度调节 | (215) |
| 学习指导 | (215) |
| 第一节 三相异步电动机的变极调速..... | (216) |
| 第二节 三相异步电动机的变频调速..... | (222) |
| 第三节 三相异步电动机改变转差率调速..... | (229) |
| 第四节 多电动机拖动系统..... | (244) |
| 第五节 同步电动机的速度调节..... | (257) |
| 复习思考题与习题..... | (264) |
| 测验作业..... | (266) |
| 第七章 电机拖动系统电动机的选择 | (267) |
| 学习指导 | (267) |
| 第一节 概述..... | (268) |
| 第二节 电动机的发热冷却规律与工作方式的分类..... | (269) |
| 第三节 电动机容量的选择..... | (274) |
| 第四节 电动机电流种类、电压、转速、型式的选择 | (291) |
| 复习思考题与习题..... | (293) |
| 测验作业..... | (294) |

第一章 电力拖动系统的运动方程式

电力拖动系统是以电动机为主要部件,并通过传动机构带动生产机械运转的一个动力学整体。为了使电力拖动系统更好地满足生产机械的要求,需要研究它的运行特性。然而生产机械的负载性质和运动形式是多种多样的,因此电力拖动系统有简单的,也有复杂的。为了便于学习,本章先分析单轴电力拖动系统,而后分析多轴电力拖动系统。

学习指导

由于电力拖动系统是一个机、电统一的运动系统,它和其他的机械运动系统一样,总可以用一个数学方程式予以描述。而且,只有为电力拖动系统建立起运动方程式(数学模型),才能深入地分析和研究其运动特性。在列写运动方程时,就必然涉及到不少动力学和机械原理等方面的知识,必须加以重视。

一、本章基本要求

1. 正确掌握电力拖动系统的基本组成部分。
2. 正确理解和熟练应用单轴电力拖动系统运动方程式 $T - T_z = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$, 它实际上是将不平衡力系转化为平衡力系, 列出该拖动系统的转矩平衡方程式。
3. 熟练掌握多轴系统中力、转矩、运动质量和飞轮矩等的折算方法。在实际电力拖动系统中, 为了使电动机的转速与生产机械所要求的速度相匹配, 一般均设有机械减速装置, 这就构成了多轴电力拖动系统, 在计算时必须先将力、转矩、运动质量、飞轮矩等折算到电动机轴上, 而后才能列出整个系统的运动方程式。

力和转矩折算的原则是系统传递的功率不变, 折算时必须注意产生运动的动力来自何方。运动质量、飞轮矩等的折算原则是保持系统贮藏的动能不变。

4. 大多数生产机械的负载为恒转矩负载特性, 它可分为两种类型, 即反抗性转矩和位能性转矩。

反抗性转矩是由摩擦力、机床切削力等产生的负载转矩, 作用方向恒与运动方向相反, 总是起阻碍运动的作用。

位能性转矩是由物体的重力等所产生的负载转矩, 其作用方向固定不变, 与运动方向无关。

5. 在多轴电力拖动系统中, 由于传动机构中齿轮的啮合和摩擦、轴承中的传动摩擦等原因, 传递能量时, 必然会产生一定的损耗, 我们称之为损耗功率或损耗转矩, 在折算时必须加以注意。

二、本章重点和难点

本章重点内容:

1. 电力拖动系统运动方程式 $T - T_z = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$ 。
2. 多轴电力拖动系统转矩和飞轮矩的折算。
3. 典型生产机械的负载转矩特性。

本章的难点——多轴电力拖动系统负载转矩和飞轮矩的折算。

三、说明

1. 电力拖动系统是由电动机和生产机械两大部分组成,在学习过程中要始终注意这两者之间的关系,并把它们作为一个整体来考虑。

2. 单轴电力拖动是一种最简单的电动机与生产机械的连接方式,但它又是学习、研究运动规律的基本出发点,通过旋转运动定律 $T - T_2 = J \frac{d\Omega}{dt}$ 得出工程上实用的电力拖动系统运动方程式: $T - T_2 = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$ 。

3. 在列写电力拖动系统运动方程式时,必须首先规定各机械量的正方向。一般规则如下:在任意确定了电动机转速 n 的正方向后,电动机转矩 T 取与 n 相同的方向为正向,当负载转矩 T_2 与 n 符号相同时,则表示 T_2 与 n 方向相反。与各转矩对应的力的正方向也符合上述规则。

4. 在实际中会遇到这样一个问题,电动机转速比较高,而生产机械运行速度却要求比较低,两者不能直接联接,中间需要减速装置,这样就构成了多轴系统。学习本章的任务之一,就是设法将一个多轴系统折算成一个单轴系统。

5. 转矩的折算按照能量守恒定律,即折算前后所传递的功率不变,所以在计算过程中,也要注意传动机构的效率,并且要注意功率传递的方向。

飞轮矩的折算按照在不同轴上储存的动能相同的原则进行。

6. 负载转矩是指 $n = f(T_2)$ 的函数关系,典型的负载转矩特性有下列三种:

- (1) 恒转矩负载,又分反抗性负载和位能性负载;
- (2) 恒功率负载;
- (3) 通风机负载。

第一节 单轴电力拖动系统的运动方程式

在研究由电动机和生产机械负载所构成的电力拖动系统的运动规律时,为了抓住本质,通常先研究最简单的,即只包含一根轴的单轴电力拖动系统,如图 1-1a) 所示。

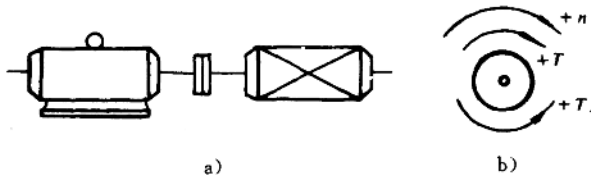


图 1-1 单轴电力拖动系统及转矩、转速正方向

研究电力拖动系统的运动方程式,通常以电动机轴为主要对象。一般来说,电动机产生的转矩 T 是推动运动的(或称为拖动转矩),而生产机械负载是阻碍运动的,负载对运动的阻碍作用表现为负载转矩 T_2 (或称为阻转矩)。图 1-1b) 给出了转矩和转速的正方向。我们的规定是:在标明转速 n 的正方向后,电动机产生的转矩 T 的正方向与 n 相同,负载转矩 T_2 的正方向与 n 相反。

当电动机的拖动转矩 T 克服了系统的负载阻转矩 T_2 之后,才能使整个电力拖动系统沿着电动机转矩 T 的作用方向产生角加速度 $\frac{d\Omega}{dt}$,而角加速度的大小与拖动系统的转动惯量 J 成反比,把这个关系用方程式来表示,即:

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

式中 J ——拖动系统的转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$);

Ω ——电动机轴旋转的角速度($1/\text{s}$);

$\frac{d\Omega}{dt}$ ——电动机轴旋转的角加速度($1/\text{s}^2$)。

式(1-1)为单轴电力拖动系统的运动方程式,它与直线运动系统的运动方程式($F_1 - F_2 = m \frac{dv}{dt}$)相似,所以实质上式(1-1)就是旋转运动系统的牛顿第二定律。

转动惯量 J 是物理学中常用的参量,在实际的电力拖动系统中则用飞轮惯量(即飞轮矩) GD^2 来表示,单位为 $\text{N} \cdot \text{m}^2$ 。两者之间有下列关系:

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

式中 g ——重力加速度 $g = 9.80\text{m}/\text{s}^2$;

m ——整个系统旋转部分的质量($\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$);

ρ ——系统转动部分质量对其旋转轴的回转半径(m)。

应当注意, GD^2 这个物理量是整个旋转系统的飞轮惯量,虽有两个符号,但 GD^2 代表一整体,不能分开。

把角速度 $\Omega(1/\text{s})$ 换算成转速 $n(\text{r}/\text{min})$, 其关系为:

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60}$$

则有 $J \frac{d\Omega}{dt} = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} (\text{N} \cdot \text{m})$

其中换算常数 375 是具有 $\text{m}/\text{min} \cdot \text{s}$ 的量纲,于是式(1-1)可改写为如下的实用公式:

$$T - T_z = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1-3)$$

式(1-3)是今后常用的电力拖动系统的基本运动方程式,它表征了电力拖动系统机械运动的普遍规律,是研究电力拖动系统各种运转状态的基础,也是生产实践中设计计算的依据。

下面举例说明如何应用运动方程式来判断电力拖动系统的运动状态。

当 $T - T_z = 0$ 时, $\frac{dn}{dt} = 0, n = \text{常数}$ (或 $n = 0$), 系统稳定运转或静止,视运动初始状态而定。

当 $T - T_z > 0$ 时, $\frac{dn}{dt} > 0, n$ 不断增长,系统加速运转;

当 $T - T_z < 0$ 时, $\frac{dn}{dt} < 0, n$ 不断降低,系统减速运转。

为了使运动方程式具有普通性,并能用来描述各种运动形式和运行状态的系统,式中转矩 T 与 T_z 应带有正、负号。一般首先规定某一旋转方向(如顺时针方向)为正方向。对于电动机的转矩,若转矩方向与所规定的正方向相同,则 T 带正号,反之则带负号。而负载转矩

的正负号与上述规定正好相反。即负载转矩的方向与所规定的正方向相同时,则 T_z 带负号,相反时则带正号。因此运动方程式的一般形式为:

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

练习与思考题

题 1-1 什么是电力拖动系统? 试举例说明。

题 1-2 在电力拖动系统的运动方程式中,电动机的转矩 T 、负载转矩 T_z 和动态转矩 $\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$ 的概念是什么? 它们的正方向是怎样规定的? 如果实际方向与规定正方向相反,说明什么问题?

题 1-3 拖动系统的飞轮矩 GD^2 与转动惯量 J 的关系怎样,两者有什么差异?

题 1-4 从运动方程式中怎样看出系统是处于加速的、减速的、稳定的、静止的各种运转工作状态?

题 1-5 试写出下列情况下拖动系统的运动方程式,见图 1-2,并说明系统运行于加速、减速还是稳定运转状态?(图中 T 为电动机拖动转矩, T_z 为负载转矩)。

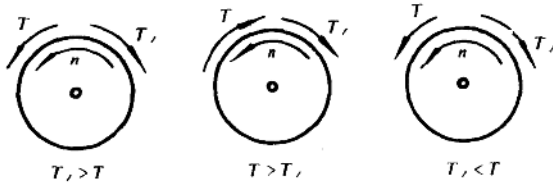


图 1-2 电力拖动系统的运行情况

小 结

1. 单轴电力拖动系统是研究旋转运动的基础。电动机与生产机械之间的关系具体表现在电动机的拖动转矩 T 与负载转矩 T_z 之间的关系上,即 $T - T_z = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$,这就是电力拖动系统的基本运动方程式。

2. 如 $T = T_z$,即电动机的拖动转矩与轴上的负载转矩大小相等,方向相反,那么, $\frac{dn}{dt} = 0$,系统到底处于稳定运转状态还是静止状态,还要看初始状态。

第二节 多轴电力拖动系统的运动方程式

在实际应用中,许多生产机械为满足其工艺过程的要求,需要较低的速度,而电动机大多具有较高的速度。因此,生产机械和电动机之间必须装设减速机构,如减速齿轮箱,蜗轮蜗杆或皮带等传动装置,从而构成了所谓的多轴电力拖动系统。

图 1-3a)为多轴电力拖动系统的结构示意图,它由多根轴所构成,由于不同轴上具有不同的转动惯量和不同的转速,因此需要对拖动系统的每根轴分别列出其运动方程式。而且这些方程式又都是互相关联的,联立求解这些方程式,消除中间变量,才能分析研究整个系统的运动,显然这是比较麻烦的。

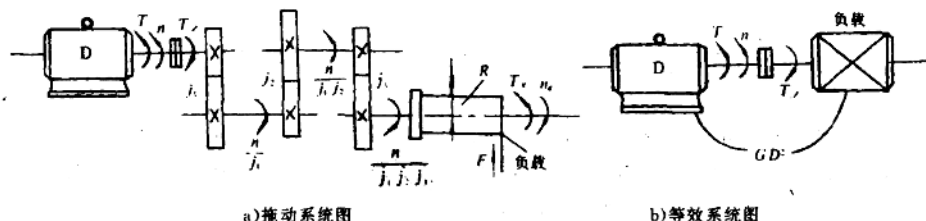


图 1-3 多轴电力拖动系统

为了简化计算,我们力图用该系统中的某一根轴的运动来代替整个拖动系统的运动,即把实际多轴系统等效为单轴系统,如图 1-3b)所示,折算的原则是保持系统传送的功率及储存的动能不变。在工程应用中,通常是把整个系统折算到电动机轴上,这样只要研究如图 1-3b)所示的电动机轴即可解决整个拖动系统的问题,使研究工作大为简化,但这时电机轴上的参数已不再是其本身的参数,而是代表整个系统的参数,下面按不同的运动形式分别讨论其折算方法。

一、工作机构旋转运动时转矩和飞轮矩的折算

很多生产机械的工作机构属于旋转运动,如图 1-3a)为具有三级传动齿轮的车床主轴旋转系统。

设 F 为切削力(N), R 为工件半径(m),则车床主轴所负担的切削转矩为

$$T_z = F \cdot R (\text{N} \cdot \text{m})$$

又设 n 为电动机转速(r/min), n_z 为车床主轴转速(r/min), j_1, j_2, j_3 为各对齿轮的速比。一般齿轮均为减速,取 $j > 1$ (个别机械具有升速齿轮,则 $j < 1$),于是

$$n_z = \frac{n}{j_1 \cdot j_2 \cdot j_3} = \frac{n}{j}$$

式中 $j = j_1 \cdot j_2 \cdot j_3$ 是传动机构总的速比。

1. 负载转矩的折算

按照能量守恒定律,电动机带动主轴旋转时的输出功率(即负载功率)应等于主轴的切削功率再加上传动机构中的损耗,即

$$T_z \Omega = \frac{T_z \Omega_z}{\eta_c}$$

$$T_z = \frac{T_z \Omega_z}{\eta_c \Omega} = \frac{T_z}{\eta_c} \cdot \frac{n_z}{n} = \frac{T_z}{j \cdot \eta_c} \quad (1-5)$$

以上分析是电动机工作在电动状态,此时电动机带动工作机构,功率由电动机向工作机构传送,传动损耗由电动机承担。如果电动机工作在发电制动状态,则此时功率由工作机构向电动机传送,因此传动损耗由工作机构承担,于是

$$T_z \Omega = T_g \Omega_g \eta_c$$

$$T_z = \frac{T_g \Omega_g \eta_c}{\Omega} = \frac{T_g \eta_c}{\Omega / \Omega_g} = \frac{T_g \eta_c}{j} \quad (1-6)$$

式中 Ω, Ω_g 是电动机轴和工作机构主轴的角速度；

T_z 是折算到电动机轴上的负载转矩；

η_c 是传动机构的总效率，等于各级传动效率的乘积，即 $\eta_c = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdots$

不同种类的传动机构，其每级传动效率是不同的，当负载大小不同时，传动效率也不同，通常在进行粗略计算时，不考虑这个差别，而采用满载效率进行计算。

2. 飞轮矩的折算

在动态过程中，还要考虑运动部件的飞轮矩 GD^2 。如果电动机转子的飞轮矩是 GD_D^2 ，主轴和工件的飞轮矩是 GD_g^2 ，它们的转速分别是 n 和 n_g ，那么，在考虑整个系统的飞轮矩时，能把两部分直接相加吗？仔细分析一下就可知道，不能直接相加，其中也有一个折算问题。

由力学中的规律可知，旋转物体的动能为

$$A = \frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{GD^2}{4g} \cdot \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 = \frac{\pi^2}{7200g} GD^2 n^2 = \frac{GD^2 n^2}{7150} (\text{J})$$

如果 GD_2^2 是主轴折算到电动机轴上的飞轮矩，那么按照能量守恒的原则，应有

$$GD_g^2 \cdot n_g^2 = GD_2^2 \cdot n^2$$

$$GD_2^2 = GD_g^2 \cdot \frac{n_g^2}{n^2} = \frac{GD_g^2}{j^2} \quad (1-7)$$

由式(1-7)可以看出飞轮矩应按转速平方的反比来折算。低速轴上的飞轮矩折算到高速轴上后就小多了。如果把系统中所有轴的飞轮矩都折算到电动机轴上，再相加起来，便可得到整个拖动系统的总飞轮矩：

$$GD^2 = GD_D^2 + GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{j_1^2} + \frac{GD_4^2 + GD_5^2}{j_1^2 \cdot j_2^2} + \frac{GD_6^2 + GD_7^2}{j_1^2 \cdot j_2^2 \cdot j_3^2}$$

一般说来，在总的 GD^2 中，电动机的 GD_D^2 占有主要的成分，而各齿轮的飞轮矩又往往是不知道的，计算起来也很麻烦，因此上式可简化为

$$GD^2 = (1 + \delta) GD_D^2 \quad (1-8)$$

如果在电动机上除了第一级小齿轮外没有其他旋转部件，常取 $\delta = 0.1 \sim 0.25$ ；如果尚有其他部件，如抱闸的闸轮等，则需专门考虑。

二、工作机构直线运动时转矩和飞轮矩的折算

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往复运动都属于直线运动工作机构。现以图 1-4 的提升装置为例，说明工作机构作直线运动时的折算问题。

1. 负载转矩的折算

图中的传动机由一级齿轮和卷筒钢丝绳组成,它将电动机的旋转运动变成工作机构(吊钩)的直线运动。

设 F 为工作机构直线作用力(N), v_g 为重物提升或下降速度(m/s),当电动机带动工作机构提升重物时,电动机处于电动状态,而钢丝绳拉力将在电动机轴上反映一个阻转矩,按系统功率保持不变的原则,考虑到传动机构中的损耗后,电动机轴上的负载功率为

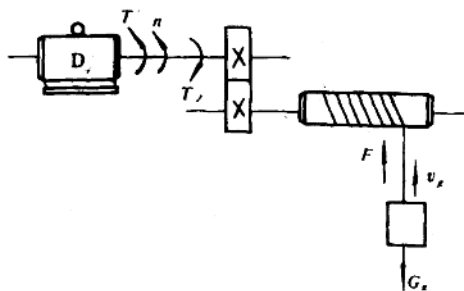


图 1-4 起重机提升装置

$$T_z \Omega = \frac{F \cdot v_g}{\eta_c}$$

因此折算到电动机轴上的负载转矩为

$$T_z = \frac{F v_g}{\eta_c \cdot \Omega} = \frac{F v_g}{\eta_c \cdot \frac{2\pi n}{60}} = 9.55 \frac{F v_g}{\eta_c \cdot n} \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (1-9)$$

式中 η_c ——提升传动效率。

当工作机构带动电动机下放重物时,电动机处在发电制动状态,功率由工作机构向电动机传送,传动损耗由工作机构承担,于是可得式

$$T_z = 9.55 \frac{F v_g}{n} \cdot \eta'_c \quad (1-10)$$

式中 η'_c ——下放传动效率。

在提升与下放传动损耗相等的条件下可以证明 η'_c 与 η_c 有如下关系

$$\eta'_c = 2 - \frac{1}{\eta_c} \quad (1-11)$$

2. 飞轮矩的折算

图 1-4 中质量为 m_g 的重物 G_g 以 v_g 速度提升或下放时,系统储存着动能,由于重物是整个系统中的一个部分,因此必须把速度为 v_g 的质量 m_g 折算到电动机轴上,用电动机轴上转动惯量为 J_z 的旋转体与之等效,并保持折算前后转动惯量 J_z 和质量 m_g 中储存的动能相等,即

$$\frac{1}{2} J_z \Omega^2 = \frac{1}{2} m_g v_g^2$$

把 $J_z = \frac{GD_z^2}{4g}$, $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$, $m_g = \frac{G_g}{g}$ 代入上式并化简得

$$GD_z^2 = 365 \frac{G_g v_g^2}{n^2} \quad (1-12)$$

通过上述分析,把多轴电力拖动系统折算成单轴电力拖动系统。这样用一个运动方程式就可研究多轴系统的静态与动态问题。

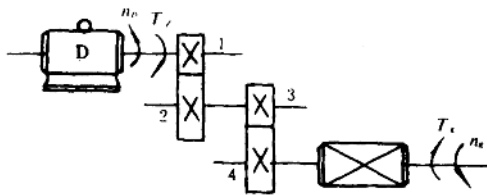


图 1-5 三轴电力拖动系统

例 1-1 有一三轴电力拖动系统如图 1-5 所示。

已知：减速齿轮箱的齿轮比 $\frac{z_2}{z_1}=3, \frac{z_4}{z_3}=5$ ，而且传动系统的效率 $\eta_c=0.92$ ，各齿轮的飞转矩分别为

$$GD_1^2=30\text{N}\cdot\text{m}^2$$

$$GD_2^2=80\text{N}\cdot\text{m}^2$$

$$GD_3^2=50\text{N}\cdot\text{m}^2$$

$GD_4^2=200\text{N}\cdot\text{m}^2$ ，电动机的飞转矩 $GD_D^2=300\text{N}\cdot\text{m}^2$ ，负载的飞转矩 $GD_2^2=450\text{N}\cdot\text{m}^2$ ，静阻转矩 $T_g=470\text{N}\cdot\text{m}$ 。

试求：

- (1) 折算到电动机轴上的静阻转矩；
- (2) 折算到电动机轴上的系统总飞转矩。

解 首先必须弄清楚静阻转矩和飞转矩的折算原则。

静阻转矩的折算是以折算前后系统的传输功率不变为原则进行的。因为 $P=T\Omega$ ，所以在功率一定的情况下，速度越高则转矩越小，速度越低则转矩越大。本例的齿轮箱是减速的，负载转速低于电动机转速，所以折算到电动机轴上的转矩 T_z 必然小于负载轴上的阻转矩 T_g 。

而飞转矩是以折算前后系统所储存的动能不变为原则进行的，因为 $A=\frac{1}{2}J\Omega^2$ ，又 $J=\frac{GD^2}{4g}$ ，所以在动能一定的情况下，转速高的轴飞转矩必然小，而转速低的轴飞转矩必然大。由于本例是降速系统，所以折算到电动机轴上的飞转矩必然小于各轴飞转矩之和。即 $GD^2 < GD_D^2 + \sum_{i=1}^4 GD_i^2 + GD_g^2$ ，而且一般传动机构的飞转矩的折算值约占电动机轴的飞转矩的 0.1~0.25。

(1) 求折算到电动机轴上的静阻转矩。根据式(1-5)有

$$T_z = \frac{T_g}{j\eta_c}$$

$$\begin{aligned} \text{机构的总传动比 } j &= \frac{n_D}{n_g} = \frac{n_D}{n_2} \cdot \frac{n_2}{n_g} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{n_3}{n_4} \\ &= \frac{z_2}{z_1} \cdot \frac{z_4}{z_3} = j_1 \cdot j_2 \end{aligned}$$

折算到电动机轴上的静阻转矩为

$$T_z = T_g \cdot \frac{1}{\frac{z_2}{z_1} \cdot \frac{z_4}{z_3} \cdot \eta_c} = 470 \times \frac{1}{3 \times 5 \times 0.92} = 34.06\text{N}\cdot\text{m}$$

(2) 求折算到电动机轴上的系统总飞转矩。

根据式(1-8)把各轴的飞轮矩和负载的飞轮矩分别折算到电动机轴上,然后再相加,即得系统总的飞轮矩

$$GD^2 = GD_D^2 + GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2} + \frac{GD_4^2 + GD_8^2}{\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2 \left(\frac{z_4}{z_3}\right)^2}$$

$$= 300 + 30 + \frac{80 + 50}{3^2} + \frac{200 + 450}{3^2 \times 5^2} = 347.33 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

如近似地认为传动机构的飞轮矩约为电动机轴上的飞轮矩的 0.1~0.25,则有

$$GD^2 = (1 + \delta)GD_D^2 + \frac{GD_8^2}{\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2 \left(\frac{z_4}{z_3}\right)^2}$$

取 $\delta = 0.15$,则有

$$GD^2 = (1 + 0.15) \times 300 + \frac{450}{3^2 \times 5^2} = 347 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

可见两种方法计算的结果近似,误差并不大。因此在工程计算中,常用近似公式估算。

例 1-2 如图 1-6 所示龙门刨床的传动系统。已知:切削力 $F = 19600 \text{ N}$;切削速度 $v = 10 \text{ m/min}$,工作台重量 $G_T = 29400 \text{ N}$;工件重量 $G_J = 5880 \text{ N}$;工作台与导轨的摩擦系数 $\mu = 0.1$ 。齿轮 8 的直径 $D_8 = 0.5 \text{ m}$;各个传动齿轮的齿数与飞轮矩见表 1-1。每对齿轮的传动效率 $\eta_c = 0.8$,由垂直方向切削力所引起的工作台与导轨之间的摩擦损失可略去不计。试求:

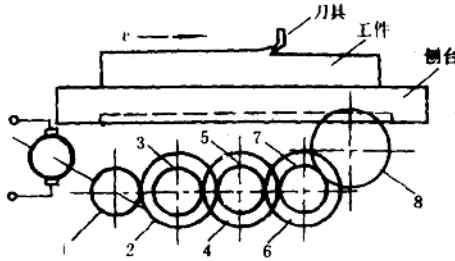


图 1-6 龙门刨床传动系统图

- (1) 折算到电动机轴上的静阻转矩;
- (2) 折算到电动机轴上的传动系统的总飞轮矩。

表 1-1 传动齿轮的齿数与飞轮矩

| 齿轮号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 齿数 z | 15 | 47 | 22 | 58 | 18 | 58 | 14 | 46 |
| 飞轮矩 $GD^2 (\text{N} \cdot \text{m}^2)$ | 3.04 | 14.90 | 7.84 | 23.52 | 13.72 | 37.24 | 25.48 | 41.16 |

解 本例也是一降速系统,不仅有旋转部件,而且还有平移部件,因此在计算飞轮矩时,要应用到将平移部件的质量折算为电动机轴上的飞轮矩公式。

(1) 求折算到电动机轴上的静阻转矩

$$T_z = \frac{[F + \mu(G_r + G_j)] \frac{D_8}{2}}{\left(\frac{z_2}{z_1}\right) \left(\frac{z_4}{z_3}\right) \left(\frac{z_6}{z_5}\right) \left(\frac{z_8}{z_7}\right) \cdot \eta_c^4}$$

$$= \frac{[19600 + 0.1(29400 + 5880)] \times \frac{0.5}{2}}{\frac{47}{15} \times \frac{58}{22} \times \frac{58}{18} \times \frac{46}{14} \times 0.8^4} = 161.4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(2) 求折算到电动机轴上的传动系统的总飞轮矩

$$GD^2 = GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2} + \frac{GD_4^2 + GD_5^2}{\left(\frac{z_4}{z_3}\right)^2 \cdot \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2} + \frac{GD_6^2 + GD_7^2}{\left(\frac{z_6}{z_5}\right)^2 \cdot \left(\frac{z_4}{z_3}\right)^2 \cdot \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2}$$

$$+ \frac{GD_8^2}{\left(\frac{z_8}{z_7}\right)^2 \cdot \left(\frac{z_6}{z_5}\right)^2 \cdot \left(\frac{z_4}{z_3}\right)^2 \cdot \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2} + 365 \frac{(G_r + G_j)v^2}{n^2}$$

因为切削速度: $v = \pi D_8 n_8$,

所以齿轮 8 的转速: $n_8 = \frac{v}{\pi \cdot D_8} = \frac{10}{\pi \times 0.5} = 6.37 \text{ r/min}$

电动机转速为

$$n = \frac{z_8}{z_7} \cdot \frac{z_6}{z_5} \cdot \frac{z_4}{z_3} \cdot \frac{z_2}{z_1} n_8 = 557 \text{ r/min}$$

将以上数据代入,最后可得折算到电动机轴上传动系统的总飞轮矩

$$GD^2 = 3.04 + \frac{14.90 + 7.84}{\left(\frac{47}{15}\right)^2} + \frac{23.52 + 13.72}{\left(\frac{47}{15}\right)^2 \cdot \left(\frac{58}{22}\right)^2} + \frac{37.24 + 25.48}{\left(\frac{47}{15}\right)^2 \cdot \left(\frac{58}{22}\right)^2 \cdot \left(\frac{58}{18}\right)^2}$$

$$+ \frac{41.16}{\left(\frac{47}{15}\right)^2 \cdot \left(\frac{58}{22}\right)^2 \cdot \left(\frac{58}{18}\right)^2 \cdot \left(\frac{46}{14}\right)^2} + 365 \frac{(29400 + 5880) \cdot \left(\frac{1}{6}\right)^2}{557^2} = 7.151 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

练习与思考题

- 题 1-6 什么叫多轴电力拖动系统? 为什么会出现多轴电力拖动系统?
- 题 1-7 为什么在多轴电力拖动系统中要进行参数的折算? 负载转矩和飞轮矩的折算原则是什么?
- 题 1-8 在输出功率相同的情况下,低速轴转矩大,高速轴转矩小,这是什么原因?
- 题 1-9 为什么系统中低速轴的 GD^2 比高速轴的 GD^2 大得多?
- 题 1-10 为什么系统中提升传动效率 η 和下放传动效率 η' 不相等?

小 结

1. 学习和研究多轴电力拖动系统的运动规律,可以将多轴系统等效成单轴系统,但必须保证折算前后

系统所传递的功率及系统储存的动能不变。

2. 转矩折算的原则是系统传递的功率相等,所以它和传动效率有关;飞轮矩的折算原则是按照不同轴上储存的动能相同。

3. 在考虑传动机构损耗时,必须注意功率的流向,当系统的功率是由电动机传递给生产机械时,那么损耗应该由电动机承担,当系统的功率是由生产机械传递给电动机时,那么损耗应该由生产机械承担。

4. 转矩和飞轮矩可以折算到电动机轴上,也可以折算到生产机械负载轴上,一般取前者。

第三节 生产机械的负载转矩特性

生产机械的转速 n 与对应的负载转矩 T_z 的关系式 $n=f(T_z)$ 称为生产机械的负载转矩特性。在生产实践中,生产机械工作机构的种类繁多,但其负载转矩的特性可以归纳为三大类典型特性,即恒转矩特性、恒功率特性和通风机型特性。

一、恒转矩负载特性

恒转矩负载特性的特点是负载转矩 T_z 的大小与其转速 n 无关,当转速变化时,负载转矩保持常数。恒转矩负载特性又分为反抗性和位能性两种。

1. 反抗性(又称摩擦性)恒转矩负载

这类负载的特点是:无论生产机械的工作机构朝哪个方向运动,负载转矩的大小不变,但其方向始终与运动方向相反。

属于这类特性的生产机械主要有:金属压延机构(如 1-7a)所示,以及机床刀架移动机构等。

对于反抗性恒转矩负载,当 n 为正向时, T_z 亦为正(按规定,以反对正向运动的方向作为正方向);当转速为负向时, T_z 也改变方向,变为负值。我们用直角坐标来表示:横坐标代表转矩,纵坐标代表转速,那么反抗性恒转矩负载特性应画在第一与第三象限内,如图 1-7b)所示。

2. 位能性恒转矩负载

图 1-8a)所示为提升机构的示意图,例如吊车的提升机构、矿井卷扬机构等,这些都属于位能性负载的生产机械,位能性负载的特点是由物体的重力等产生的负载转矩,其作用方向固定不变,即与物体的运动方向无关。当提升机构提升重物时,负载转矩为阻转矩,其作用方向与电动机转速方向相反,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的转速方向相同,促使电动机旋转,其特性如图 1-8b)所示。

当然,恒转矩负载特性,也可以坐落在第二和第三象限中,下面就以电梯轿厢的拖动机构为例,如图 1-9 所示,其工作状态按轿厢重量 G 的不同分为:

(1) 重载上升:轿厢一边的重量 G 超过平衡重的重量($G_0+40\%G_N$),其负载特性与起重机的提升机构相似,假定此运动状态的转矩 T_z 与 n 均为正方向,负载特性画于第一象限。

(2) 重载下降:轿厢一边的重量 G 超过平衡重的重量,负载转矩的方向与状态(1)相同,但轿厢在下降,故转速的方向与状态(1)相反,负载特性应画于第四象限。

(3) 轻载上升(指轿厢中乘客少的情况),此时,轿厢一边的重量小于平衡重的重量,即 $G < G_0 + 40\%G_N$ 。轿厢在上升, n 的方向与状态(1)同,但负载转矩的方向与状态(1)相反,

T_{z0} 为负值, 负载特性应画于第二象限。

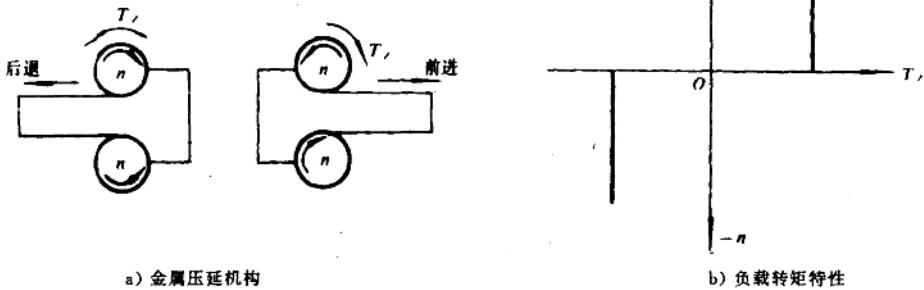


图 1-7 反抗性恒转矩负载

(4) 轻载下降: (指轿厢在乘客少的情况下下放), 轿厢一边的重量仍小于平衡重的重量, 故 n 的方向与状态(1)相反, 负载特性应画于第三象限。

从以上分析可见, 电梯的负载特性可分为重载上升、重载下降、轻载上升和轻载下降四种情况, 分别画于四个象限中, 如图 1-10 所示。

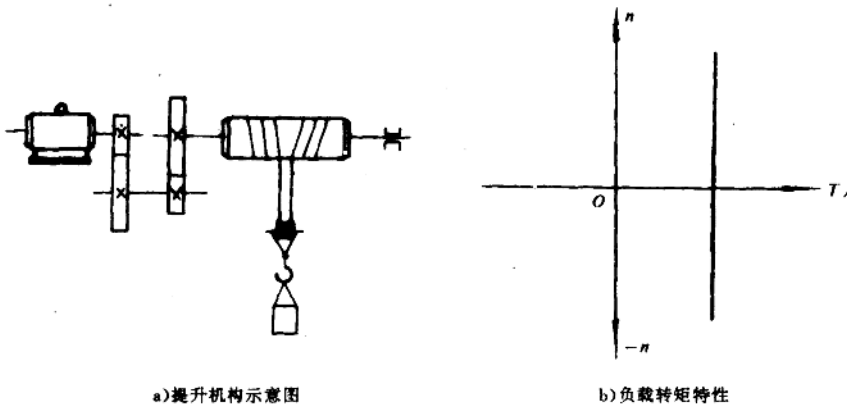


图 1-8 位能性恒定转矩负载

二、通风机型负载特性

属于通风机型负载的生产机械有: 离心式水泵、鼓风机等, 如图 1-11a) 所示。其中, 空气、水、油等介质对机器叶片的阻力矩基本上和转速的平方成正比, 即

$$T_z = kn^2$$

式中 K 为比例系数。通风机的负载特性是一条抛物线, 如图 1-11b) 所示。

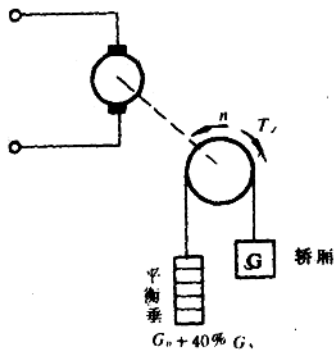


图 1-9 电梯轿厢传动机构示意图

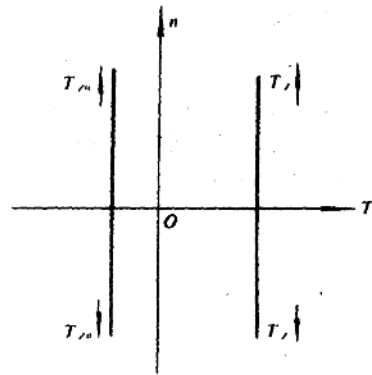
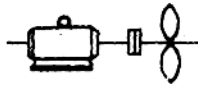
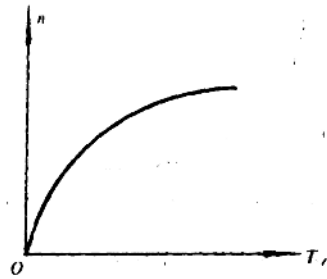


图 1-10 电梯轿厢的负载转矩特性



a) 通风机型负载示意图



b) 负载转矩特性

图 1-11 通风机型负载

三、恒功率负载特性

某些机床,在粗加工时,切削量大,因而阻力也大,通常开低速;在精加工时,切削量小,阻力也小,往往开高速。这样在不同转速下,负载转矩 T_z 基本上与 n 成反比,即

$$T_z = \frac{k}{n}$$

或切削功率

$$P_z = T_z \Omega = T_z \cdot \frac{2\pi n}{60} = \frac{T_z \cdot n}{9.55} = \frac{k}{9.55} = \text{常数}$$

也就是说,在调速时电动机输出的功率基本不变,形成恒功率的负载特性, T_z 与 n 的关系是双曲线,如图 1-12 所示。

需要指出,恒功率只是机床加工时的一种选择,并非必须如此。如果在低速时采用小吃刀量当然也是允许的,这要由加工工艺来决定,只要不超过电动机的负载能力就可以了。另