

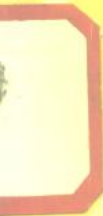


电力 拖动基础

DIANLI TUODONG JICHU

杨长能 编

重庆大学出版社



T14991
713

293917

电力拖动基础

杨长能 编

1802
217

1804
217

1805
217

1806
217



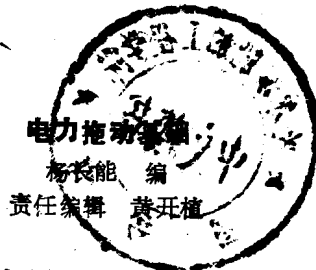
重庆大学出版社

1923/06

内 容 介 绍

本书叙述了电力拖动的动力学基础,直流电动机和三相异步电动机的电力拖动。包括电动机的机械特性,电力拖动系统稳定运行的条件,电动机的起动、制动、各种运转状态、调速、过渡过程中的能量损耗及电力拖动系统中电动机的选择方法。

本书适用于高等工科院校工业电气自动化以及电气类专业的师生使用,也可供工厂电气工程技术人员参考。



重庆大学出版社出版发行
新华书店经销
重庆花溪印制厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 14 字数: 349千
1994年1月第1版 1996年1月第2次印刷
印数: 3001—6000
ISBN 7-5624-0210-8/TM·14 定价: 10.80元
(川)新登字020号

前 言

本书是根据全国高等工业学校自动化专业类教材编审委员会制定的《电机及拖动基础》教学大纲中关于《电力拖动基础》部分编写的。将《电机学》和《电力拖动基础》分开，可以使两部分内容更加系统，每一部分内容前后部分之间的联系更加紧密，同时使用也比较灵活。

本书共分四章。第一章为电力拖动的动力学基础，介绍直流及交流电力拖动系统共同的基础知识，第二章为直流电机的电力拖动，第三章为三相异步电机的电力拖动，第四章为电力拖动系统电机的选择。每一章最后一节为小结，章后附有较多的思考题及习题，以帮助读者更好地理解 and 掌握各章的主要内容。全部内容的讲授学时约为50~60学时。

本书着重基本原理、基本概念、基本方法的分析和运用。对于直流电机的电力拖动和三相异步电机的电力拖动采用前后呼应的写法，使这两章内容在形式和分析方法上尽量统一，以便对比掌握。本书在编写中，吸收了同类书籍的优点，力图体现众家之长，而又自成体系。本书结构严谨、分析详细、概念清楚、容易理解，因此比较适宜于自学，有利于教学方法的改革。

本书可作为高等工业学校、职工业余大学工业电气自动化以及电气类专业的教材及教学参考用书，也可供从事电气技术的工程技术人员参考。

由于编者水平有限，书中可能有不少缺点错误，恳请读者批评指正。

编 者

一九九三年

本书常用物理量的单位符号及其汉字名称

m	—	米
cm	—	厘米
mm	—	毫米
s	—	秒
h	—	小时
m/s	—	米每秒
m/s ²	—	米每二次方秒
kg	—	千克
N	—	牛〔顿〕
N·m	—	牛米
N·m ²	—	牛二次方米
kg·m ²	—	千克二次方米
rad/s	—	弧度每秒
r/min	—	转每分
W	—	瓦〔特〕
J	—	焦〔耳〕
V	—	伏〔特〕
A	—	安〔培〕
Ω	—	欧〔姆〕
Wb	—	韦〔伯〕
H	—	亨〔利〕
Hz	—	赫〔兹〕
°C	—	摄氏度
J/°C	—	焦每摄氏度
J/°C·s	—	焦每摄氏度秒
m ³ /s	—	立方米每秒
N/m ³	—	牛每立方米
Pa	—	帕〔斯卡〕

目 录

绪 论	(1)
第一章 电力拖动系统的动力学基础	(3)
§1-1 电力拖动系统的运动方程式	(3)
§1-2 负载转矩和飞轮矩的折算	(4)
§1-3 生产机械的负载转矩特性	(10)
§1-4 小结	(12)
思考题	(13)
习 题	(13)
第二章 直流电机的电力拖动	(17)
§2-1 他励直流电动机的机械特性	(17)
§2-2 电力拖动系统稳定运行的条件	(22)
§2-3 他励直流电动机的起动	(25)
§2-4 他励直流电动机的制动	(38)
§2-5 他励直流电动机的运转状态	(50)
§2-6 他励直流电动机的调速	(52)
§2-7 他励直流电动机过渡过程中的能量损耗	(65)
§2-8 发电机-电动机系统的过渡过程	(69)
§2-9 串励直流电动机的电力拖动	(77)
§2-10 复励直流电动机的电力拖动	(81)
§2-11 小结	(83)
思考题	(87)
习 题	(89)
第三章 三相异步电动机的电力拖动	(94)
§3-1 三相异步电动机机械特性的三种表达式	(94)
§3-2 三相异步电动机的固有特性及人为特性	(100)
§3-3 三相异步电动机的起动	(104)
§3-4 三相异步电动机的制动	(125)
§3-5 三相异步电动机的运转状态	(133)
§3-6 三相异步电动机的调速	(138)
§3-7 三相异步电动机过渡过程中的能量损耗	(161)
§3-8 小结	(164)
思考题	(169)
习 题	(170)
第四章 电力拖动系统电机的选择	(173)
§4-1 概述	(173)

§4-2 电机的发热和冷却过程.....	(175)
§4-3 电机工作方式的分类.....	(178)
§4-4 连续(长期)工作制电动机容量的选择.....	(179)
§4-5 短时工作制电动机容量的选择.....	(194)
§4-6 重复短时工作制电动机容量的选择.....	(199)
§4-7 鼠笼式异步电动机允许小时合闸次数的计算.....	(202)
§4-8 选择电动机功率的实用方法.....	(203)
§4-9 电动机种类、电压、转速及类型的选择.....	(205)
§4-10 小结.....	(207)
思考题.....	(209)
习 题.....	(210)
习题答案.....	(212)

绪 论

电力拖动又称电气传动，就是用电动机作原动机，把电能转变为机械能，去拖动各种生产机械的工作机构运动，以实现各种生产工艺的要求。所谓工作机构，就是生产机械中的运动部分，例如轧钢机的轧辊，龙门刨床的工作台，起重机的提升机构及行走机构，风机的叶片等等。在电力拖动中，工作机构就是电动机的机械负载。因此，电力拖动又可称为电动机带负载，如图0-1所示。实现电力拖动的装置称为电力拖动装置或系统。它的基本组成是电动机和工作机构。从广义来讲，它应该包括产生原动力的电动机、作为拖动对象的工作机构、传递机械能的传动机构、控制电动机运转的电气控制设备以及对电动机和电气控制设备供电的电源等，如图0-2所示。

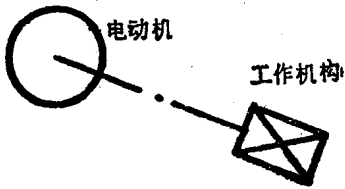


图0-1 电力拖动

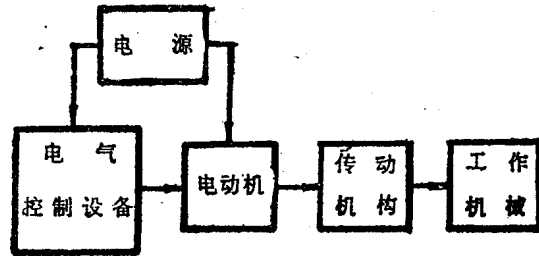


图0-2 电力拖动装置(系统)

按照电动机的种类不同，电力拖动分为直流拖动和交流拖动两类。采用直流电动机拖动的称为直流拖动，采用交流电动机拖动的称为交流拖动。交流电动机具有结构简单、价格便宜、维护方便、运行可靠、单机容量大、电压和转速可以做得较高、惯性小等一系列优点，因此，交流拖动应用十分广泛。直流电动机则具有较好的起动性能和调速性能，因此，直流拖动在对起动、制动、正反转、调速等有较高要求的场合应用得很广泛。但由于直流电动机存在着结构复杂、价格较贵、维修困难、安装环境受到一定限制、单机容量不高以及电压、转速较低等缺点，使得直流拖动在很多领域受到限制。近年来，由于电力电子技术的迅速发展，使得交流调速系统得以实现，这就使交流拖动的应用范围更加扩大，它在工业电气自动化中的地位也就日趋重要了。

《电力拖动基础》是工业电气自动化专业的一门技术基础课。主要研究工业企业中常用电力拖动系统的基本理论及其在生产实践中的应用，具有很强的基础性，又有一定的实践性。结合对基本理论的阐述，还适当地介绍一些生产实践中分析和处理问题的工程观点和工程方法，使理论与实践密切结合。它所研究的内容，在一定程度上体现了工业电气自动化专业的性质与任务。后续的《直流拖动自动控制系统》、《交流调速系统》等专业课程，都是在它的基础上的深化与扩展，因此，它在工业电气自动化专业中占有重要地位，是从事工业电气自动化专业的同志所必须学习和掌握的。

本课程所研究的主要内容有：

- (1) 电力拖动系统的动力学基础；
- (2) 电动机的机械特性及各种运转状态；

(3) 电动机的起动、制动、调速；

(4) 电动机的过渡过程；

(5) 电动机容量的选择。

整个内容都以电动机为核心，以电力拖动系统的运动方程及电动机的静态特性和动态特性为工具来分析和研究电力拖动系统的运动规律、运行特性、能量关系以及工程应用等方面的问题。因此，在学习本课时，必须注意理论联系实际，既要抓住基本理论和基本概念，又要注意掌握分析问题的方法，初步学会运用理论去分析和解决实际问题。

第一章 电力拖动系统的动力学基础

§1-1 电力拖动系统的运动方程式

电力拖动系统的运动规律可以用运动方程来描述。作用在电动机轴上的转矩有电动机的电磁转矩 M 和负载转矩 M_z 。一般来说， M 是推动运动的，而 M_z 是反抗运动的。为此，在列写电力拖动系统的运动方程时，我们对转矩的正方向作如下规定：在事先选定转速 n 的正方向以后，电磁转矩 M 的正方向与 n 相同，负载转矩 M_z 的正方向与 n 相反，如图1-1所示。于是，根据旋转运动系统的牛顿第二定律可得

$$M - M_z = J \frac{d\omega}{dt} = M_g$$

式中 M ——电动机的电磁转矩 $N \cdot m$ ，
 M_z ——负载转矩 $N \cdot m$ ，
 J ——旋转体的转动惯量 $kg \cdot m^2$ ，

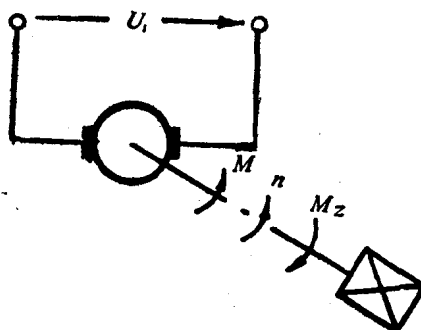


图1-1 转矩的正方向

ω ——电动机轴旋转的角速度 rad/s ，
 t ——时间 s ，
 M_g ——惯性转矩 $N \cdot m$ 。

转动惯量 J 是物理学中常用的物理量，在工程上则采用飞轮惯量或飞轮矩 GD^2 ，其单位是 $N \cdot m^2$ 。 GD^2 与 J 之间的关系为

$$GD^2 = 4gJ$$

式中 G ——电动机轴上旋转体的重量 N ，
 D ——电动机轴上旋转体的惯性直径 m ，
 g ——重力加速度， $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

角速度 ω (rad/s)与转速 n (r/min)的关系为

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi}{30} n$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi}{30} J \frac{dn}{dt} = \frac{\pi}{30} \frac{GD^2}{4g} \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2 dn}{375 dt}$$

常数375具有 $m/min \cdot s$ 的量纲。于是，电力拖动系统的运动方程式可改写为

$$M - M_z = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = M_g \tag{1-1}$$

由运动方程式可见，电力拖动系统的运动状态是由作用在电动机轴上的两个转矩 M 、 M_z 来决定的。

(1) 当 $M > M_s$ 时, $\frac{dn}{dt} > 0$, 系统加速; 当 $M < M_s$ 时, $\frac{dn}{dt} < 0$, 系统减速。这两种情况, 系统的运动都处在变速过程中, 叫做动态。

(2) 当 $M = M_s$ 时, $\frac{dn}{dt} = 0$, $n = 0$ 或 $n = \text{常数}$, 系统静止或等速运行, 叫做稳定运转状态, 简称稳态或静态。

在运用运动方程式时, 必须注意到转矩的符号, 由于 M 和 M_s 都是带有方向性的量, 因此 M 和 M_s 本身的符号将随其方向不同而异。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; 反之就用负数。

§1-2 负载转矩和飞轮矩的折算

在实际应用中, 很多生产机械都是采用多轴电力拖动系统, 如图1-2(a)所示。这是因为生产机械为了满足其工艺要求, 其工作机构的速度往往与电动机的转速不同, 因此在工作机构与电动机之间必须装设变速机构, 如齿轮变速、蜗轮蜗杆变速、皮带变速等。

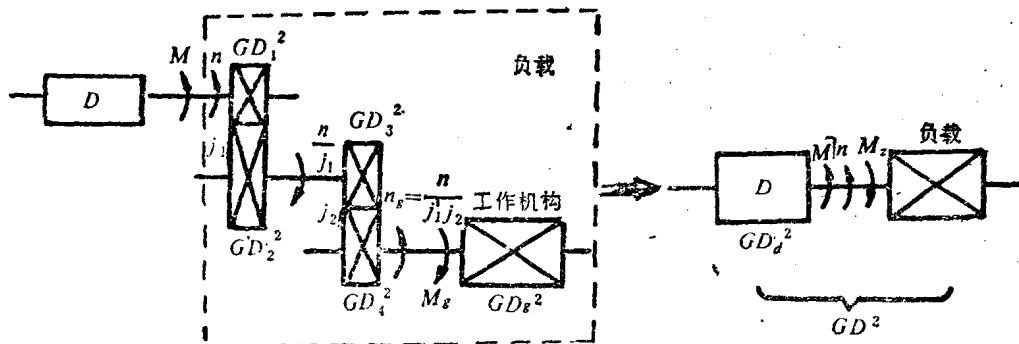


图1-2 多轴电力拖动系统等效成单轴系统

(a) 多轴电力拖动系统 (b) 等效单轴系统

但就电力拖动系统而言, 一般都不需研究每根轴上的问题, 通常只需以电动机轴为研究对象, 把一个实际的多轴系统等效为单轴系统, 即把传动机构和工作机构等效成电动机轴上的一个负载, 如图1-2(b)所示。

等效单轴系统的运动方程式为

$$M - M_s = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

式中 M ——电动机的电磁转矩;

M_s ——折算到电动机轴上的负载转矩;

GD^2 ——折算到电动机轴上的总飞轮矩, 包括电动机转子的飞轮矩 GD_1^2 和折算到电动机轴上的负载飞轮矩 GD_s^2 。

可见, 要将实际的多轴系统等效成单轴系统, 就必须进行负载转矩和飞轮矩的折算。根据能量守恒定律, 折算的原则是折算前的多轴系统与折算后的单轴系统在能量或功率关系上应保持不变。

转矩和飞轮矩的折算随工作机构的运动形式不同而不同，现分别加以讨论。

一、旋转运动

在实际生产中，有很多生产机械的工作机构的运动都属于旋转运动。下面仍以图1-2为例，说明旋转运动转矩及飞轮矩的折算。图中 n 为电动机转速， n_g 为工作机构转速， i_1 、 i_2 为各对齿轮的转速比，又叫传动比。则有

$$n_g = \frac{n}{i_1 \cdot i_2} = \frac{n}{j}$$

式中 $j = i_1 \cdot i_2$ ，称为传动机构的总速比，或总传动比。一般， $n_g < n$ ， $j > 1$ ，传动机构是减速的；有时， $n_g > n$ ， $j < 1$ ，传动机构是加速的。

1. 转矩的折算

设 ω 、 ω_g 分别为电动机轴和工作机构轴的角速度， M_g 为工作机构轴上的负载转矩， M_z 为折算到电动机轴上的负载转矩， η_c 为传动机构的效率，在多级传动时， η_c 应为各级效率的乘积，即 $\eta_c = \eta_{c1} \cdot \eta_{c2} \cdot \eta_{c3} \dots$ 。由于传动机构要损耗一部功率，因此 $\eta_c < 1$ 。不同种类的传动机构，其传动效率不同，可以由机械工程手册上查到。例如，每对齿轮（用滚动轴承）的满载效率为0.975~0.985；蜗轮蜗杆的满载效率为0.5~0.7。

负载转矩折算的原则是折算前后的功率不变。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，因此，负载折算到电动机轴上的功率应等于负载功率除以传动效率，即

$$M_z \omega = \frac{M_g \omega_g}{\eta_c}$$

$$M_z = M_g / \eta_c \left(\frac{\omega}{\omega_g} \right) = M_g / \eta_c \left(\frac{n}{n_g} \right) = \frac{M_g}{\eta_c j} \quad (1-2)$$

这就是负载转矩的折算公式。可以看出，由低速轴折算到高速轴时， $j > 1$ ，负载转矩将变小；反之则变大。

2. 飞轮矩的折算

在图1-2中，我们把传动机构当作电动机负载的一部分，传动机构和工作机构轴上的飞轮矩折算到电动机轴上后与电动机转子的飞轮矩 GD_1^2 相加，就是折算到电动机轴上的总飞轮矩 GD_z^2 ，也就是等效单轴系统的飞轮矩。

负载转矩折算的原则是折算前后的动能不变。

旋转体的动能为

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

因此，对应图1-2所示的系统，飞轮矩折算的关系应为

$$\frac{GD_z^2 n^2}{7150} = \frac{GD_1^2 n^2}{7150} + \frac{(GD_2^2 + GD_3^2) n^2}{7150 j_1^2} + \frac{(GD_4^2 + GD_g^2) n^2}{7150 j_1^2 j_2^2}$$

$$GD_z^2 n^2 = GD_1^2 n^2 + \frac{(GD_2^2 + GD_3^2) n^2}{j_1^2} + \frac{(GD_4^2 + GD_g^2) n^2}{j_1^2 j_2^2}$$

$$GD_z^2 = GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{j_1^2} + \frac{GD_4^2 + GD_g^2}{j_1^2 j_2^2} \quad (1-3)$$

式中 GD_1^2 、 GD_2^2 、 GD_3^2 、 GD_4^2 为各个齿轮的飞轮矩。由式 (1-3) 可知, 每级的飞轮矩折算到电动机轴上, 应除以电动机与该级的速比的平方。因此, 各级的飞轮矩折算到电动机轴上的折算值可以表示为

$$GD_k^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(GD_i^2)_k}{j_i^2} \quad (1-4)$$

式中 $(GD_i^2)_k$ 、 j_k ——分别为第 k 级传动轴的飞轮矩和速比。

折算以后系统总的飞轮矩为

$$GD^2 = GD_1^2 + GD_2^2 \quad (1-5)$$

一般情况下, 在总的飞轮矩 GD^2 中, 电动机的飞轮矩 GD_1^2 占的比重最大, 其次是工作机构轴上飞轮矩的折算值, 传动机构飞轮矩的折算值所占比重最小。所以在实际工作中, 为了计算简便起见, 有时用适当加大电动机的飞轮矩的办法来计算总的飞轮矩, 于是系统总的飞轮矩的计算可以简化为

$$GD^2 = (1 + \delta) GD_1^2 \quad (1-6)$$

式中 δ 为小于 1 的数, 一般取 $\delta = 0.2 \sim 0.3$ 。如果在电动机轴上还有其它大飞轮矩的部件, 如抱闸的闸轮等, 则需专门考虑。

二、平移运动

某些生产机械具有作平移运动的工作机构, 如刨床的工作台。平移运动属于直线运动, 它的转矩和飞轮矩的折算公式有其自己的特点。

1. 转矩的折算

设 F 为工作机构作直线运动时所克服的阻力, 即直线作用力; v_g 为工作机构的直线速度, 则工作机构的功率为

$$P_g = Fv_g$$

折算到电动机轴上的负载转矩应满足折算前后功率相等的原则, 考虑到传动损耗由电动机负担, 则负载折算到电动机轴上的功率应等于负载功率除以传动效率, 即

$$M_z \omega = \frac{P_g}{\eta_c} = \frac{Fv_g}{\eta_c}$$

$$M_z = \frac{Fv_g}{\eta_c \omega} = Fv_g / \eta_c \cdot \frac{2\pi n}{60} = 9.55 \frac{Fv_g}{\eta_c n} \quad (1-7)$$

设 m_g 为直线运动部分的质量; G_g 为直线运动部分的重量, 则直线运动部分的动能为

$$\frac{1}{2} m_g v_g^2 = \frac{1}{2} \frac{G_g}{g} v_g^2$$

直线运动部分折算到电动机轴上的飞轮矩 GD^2 应满足折算前后动能不变的原则, 即

$$\frac{1}{2} \frac{G_g}{g} v_g^2 = \frac{GD^2 n^2}{7150}$$

$$\therefore GD^2 = \frac{7150}{2g} \cdot \frac{G_g v_g^2}{n^2} = 365 \frac{G_g v_g^2}{n^2} \quad (1-8)$$

三、升降运动

有些生产机械具有作升降运动的工作机构, 如电梯、提升机、起重机等。升降运动和平

移运动都属于直线运动，但各有其特点，现以起重机为例来进行讨论。起重机示意图如图1-3所示。

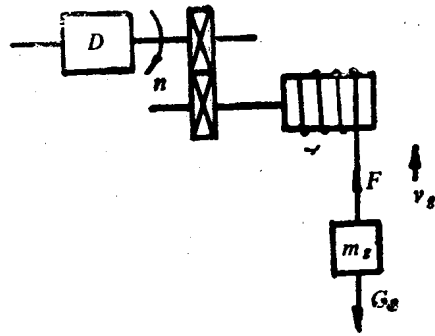


图1-3 起重机示意图

1. 转矩的折算

升降运动的转矩折算与功率传送的方向有关，有以下两种情况：

(1) 提升运动 此时电动机带动负载（重物）提升，功率传送方向是由电动机到负载，传动损耗由电动机负担，因此，负载折算到电动机轴上的功率应等于负载功率除以传动效率，即

$$M_z \omega = \frac{F v_s}{\eta_c^{\uparrow}}$$

$$\therefore M_z = \frac{F v_s}{\eta_c^{\uparrow} \omega} = 9.55 \frac{F v_s}{\eta_c^{\uparrow} n} \quad (1-9)$$

式中 η_c^{\uparrow} ——提升传动效率

(2) 下降运动 当提升机挂上重物下降时，是负载带动电动机，负载转矩是推动运动的，而电动机的电磁转矩反而是反抗运动的了。此时，功率传送方向是负载到电动机，传动损耗由负载来负担，因此，负载折算到电动机轴上的功率应等于负载功率乘以传动效率，即

$$M_z \omega = F v_s \cdot \eta_c^{\downarrow}$$

$$\therefore M_z = \frac{F v_s}{\omega} \eta_c^{\downarrow} = 9.55 \frac{F v_s}{n} \cdot \eta_c^{\downarrow} \quad (1-10)$$

式中 η_c^{\downarrow} ——下降传动效率

比较式(1-9)和式(1-10)可见，同一负载在提升和下降时折算后的负载转矩不一样，下降时折算的转矩小于提升时折算的转矩。此外，提升传动效率 η_c^{\uparrow} 与下降传动效率 η_c^{\downarrow} 也不相等。对于同一负载的提升和下降，传动损耗可以认为不变，令它等于 Δp ，则

$$\text{提升时} \quad \Delta p = \text{电动机功率} - \text{负载功率} = \frac{F v_s}{\eta_c^{\uparrow}} - F v_s = F v_s \left(\frac{1}{\eta_c^{\uparrow}} - 1 \right)$$

$$\text{下降时} \quad \Delta p = \text{负载功率} - \text{电动机功率} = F v_s - F v_s \cdot \eta_c^{\downarrow} = F v_s (1 - \eta_c^{\downarrow})$$

因为提升和下降时的 Δp 相等，则

$$F v_s \left(\frac{1}{\eta_c^{\uparrow}} - 1 \right) = F v_s (1 - \eta_c^{\downarrow})$$

$$\frac{1}{\eta_c^{\uparrow}} - 1 = 1 - \eta_c^{\downarrow}$$

$$\eta_c^{\downarrow} = 2 - \frac{1}{\eta_c^{\uparrow}} \quad (1-11)$$

由于重物下降时功率传送方向是由负载到电动机，因此

$$\eta_c^{\downarrow} = \frac{\text{电动机功率}}{\text{负载功率}} = \frac{(\text{负载功率} - \Delta p)}{\text{负载功率}}$$

当 $\eta_i^l < 0.5$ 时（这一情况出现在轻载或空钩时），则 $\eta_i^l < 0$ ，说明负载功率不足以克服传动损耗 ΔP ，此时电动机必须产生推动下降运动的转矩，以助一臂之力，才能推动负载下降。

在实际生产中， η_i^l 为负值是有益的，它起到安全保护作用。即，如没有电动机推动，负载是掉不下来的，这叫做传动机构的自锁作用，它对于象电梯这类涉及人身安全的机械尤为重要。要使 η_i^l 为负，必须采用低提升效率（即高损耗）的传动机构，例如蜗轮蜗杆传动，其提升效率 $\eta_i^l = 0.3 \sim 0.5$ 。

2. 飞轮矩折算

飞轮矩的折算不涉及传动损耗和效率，因此升降运动与平移运动都相同，其折算公式如式(1-8)。

上面讲了不同运动形式的负载转矩及飞轮矩的折算。如果一个电力拖动系统中既有旋转运动又有直线运动，那么整个负载飞轮矩的折算值应等于旋转运动部分飞轮矩的折算值与直线运动部分飞轮矩的折算值之和，然后将整个负载飞轮矩的折算值加上电动机转子的飞轮矩就是整个系统折算到电动机轴上的等效飞轮矩。

例1-1 刨床传动系统如图1-4所示。若电动机D的转速 $n = 420 \text{ r/min}$ ，其转子的飞轮矩 $GD_1^2 = 110.5 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ ，工作台重 $G_1 = 12050 \text{ N}$ ，工件重 $G_2 = 17650 \text{ N}$ ，切削力 $F = 10000 \text{ N}$ ，传动效率 $\eta_c = 0.7$ ，各齿轮的齿数及飞轮矩如表1-1，齿轮8的节距为 $t_p = 25.13 \text{ mm}$ ，工作台与床身的摩擦系数为0.1。试计算折算到电动机轴上的总的飞轮矩 GD^2 和负载转矩 M_z 。

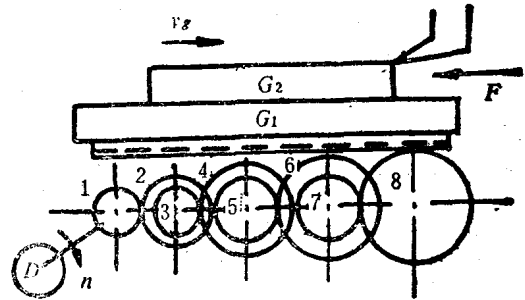


图1-4 刨床传动系统图

表 1-1 齿轮的齿数及飞轮矩

齿轮号	1	2	3	4	5	6	7	8
齿数 z	20	55	30	64	30	78	30	66
$GD^2(\text{N}\cdot\text{m}^2)$	4.12	20.10	9.81	28.40	18.60	41.20	24.50	63.75

解：1. 求折算到电动机轴上的总的飞轮矩 GD^2

(1) 旋转部分（不包括电动机转子）折算到电动机轴上的飞轮矩 GD_z^2

齿轮变速时，其转速与齿轮的齿数成反比，则

$$\begin{aligned}
 GD_z^2 &= GD_2^2 + (GD_3^2 + GD_4^2) / (z_2/z_1)^2 + (GD_5^2 + GD_6^2) / (z_2/z_1)^2 \cdot (z_4/z_3)^2 \\
 &\quad + (GD_7^2 + GD_8^2) / (z_2/z_1)^2 \cdot (z_4/z_3)^2 \cdot (z_6/z_5)^2 + GD_8^2 / (z_2/z_1)^2 \cdot (z_4/z_3)^2 \\
 &\quad \cdot (z_6/z_5)^2 \cdot (z_8/z_7)^2 \\
 &= 4.12 + (20.1 + 9.81) / \left(\frac{55}{20}\right)^2 + (28.4 + 18.6) / \left(\frac{55}{20}\right)^2 \cdot \left(\frac{64}{30}\right)^2 + (41.2 \\
 &\quad + 24.5) / \left(\frac{55}{20}\right)^2 \cdot \left(\frac{64}{30}\right)^2 \cdot \left(\frac{78}{30}\right)^2 + 63.75 / \left(\frac{55}{20}\right)^2 \cdot \left(\frac{64}{30}\right)^2 \cdot \left(\frac{78}{30}\right)^2 \cdot \left(\frac{66}{30}\right)^2
 \end{aligned}$$

$$=9.81 \text{ (N}\cdot\text{m}^2)$$

(2) 直线运动部分折算到电动机轴上的飞轮矩 GD_2^2 ;

齿轮 8 的转速

$$\begin{aligned} n_8 &= n / (z_2/z_1) \cdot (z_4/z_3) \cdot (z_6/z_5) \cdot (z_8/z_7) \\ &= 420 / (55/20) \cdot (64/30) \cdot (78/30) \cdot (66/30) = 12.5 \text{ (r/min)} \end{aligned}$$

工作台及工件的直线运动速度 v_g 等于齿轮 8 圆周的线速度

$$v_g = z_8 r_8 n_8 = \frac{66 \times 25.13 \times 10^{-3} \times 12.5}{60} = 0.347 \text{ (m/s)}$$

$$\therefore GD_2^2 = 365 \frac{(G_1 + G_2) v_g^2}{n^2} = 365 \times \frac{(12050 + 17650) \times 0.347^2}{420^2} = 7.35 \text{ (N}\cdot\text{m}^2)$$

(3) 折算到电动机轴上的总飞轮矩

$$GD^2 = GD_1^2 + GD_2^2 + GD_3^2 = 110.5 + 9.81 + 7.35 = 127.66 \text{ (N}\cdot\text{m}^2)$$

2. 求折算到电动机轴上的负载转矩 M_z

刨床的工作机构(工作台)作直线运动, 其阻力(直线作用力)为

F = 切削力 + 摩擦力

$$= \text{切削力} + (G_1 + G_2) \times \text{摩擦系数}$$

$$= 10000 + (12050 + 17650) \times 0.1 = 12970 \text{ (N)}$$

$$\therefore M_z = 9.55 \frac{F v_g}{\eta_c n} = 9.55 \times \frac{12970 \times 0.347}{0.7 \times 420} = 146.2 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

例1-2 某提升机拖动系统如图1-5所示。空罐笼重 $G_0 = 2940\text{N}$, 重物重 $G = 900\text{N}$, 平衡块重 $G_p = 5880\text{N}$, 罐笼提升速度 $v_g = 1.5\text{m/s}$, 电动机转速 $n = 980\text{r/min}$, 提升传递效率 $\eta_c = 0.85$, 传动机构及鼓轮的转动惯量忽略不计。试求:

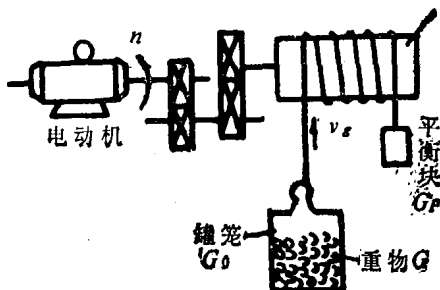


图1-5 提升机拖动系统

(1) 折算到电动机轴上的直线运动部分的飞轮矩;

(2) 罐笼提升和下放时, 折算到电动机轴上的负载转矩。

解: (1) 直线运动部分的重量:

$$G_g = G_0 + G + G_p = 2940 + 900 + 5840 = 18620 \text{ (N)}$$

$$GD_2^2 = 365 \times \frac{G_g v_g^2}{n^2} = 365 \times \frac{18620 \times 1.5^2}{980^2} = 15.92 \text{ (N}\cdot\text{m}^2)$$

(2) 罐笼提升时

$$M_z = 9.55 \frac{F v_g}{\eta_c n}$$

G_0 、 G 、 G_p 可以用一个直线作用力 F 来等效, 即 G_0 、 G 、 G_p 对鼓轮所产生的转矩与 F 对鼓轮所产生的转矩是等效的。设鼓轮半径为 R , 则

$$(G_0 + G)R - G_p R = FR$$

$$F = G_0 + G - G_p = 2940 + 9800 - 5840 = 6860 \text{ (N)}$$

$$M_z = 9.55 \times \frac{6860 \times 1.5}{0.85 \times 980} = 117.97 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

罐笼下放时

$$\eta_c = 2 - \frac{1}{\eta_c^i} = 2 - \frac{1}{0.85} = 0.82$$

$$M_z = 9.55 \frac{Fv_c}{n} \eta_c^i = 9.55 \times \frac{6860 \times 1.5}{980} \times 0.82 = 82.2 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

§1-3 生产机械的负载转矩特性

由电力拖动系统的运动方程式可知，系统的运动状态取决于电动机和负载双方。因此，在分析系统的运动状态时，必须知道电动机的电磁转矩 M 和负载转矩 M_z 与转速 n 之间的关系。 M 与 n 的关系即 $n=f(M)$ 称为电动机的机械特性； M_z 与 n 的关系即 $n=f(M_z)$ 称为生产机械的负载转矩特性(简称负载特性)。本节将只讨论生产机械的负载转矩特性，电动机的机械特性将留到以后有关章节介绍。

典型的负载转矩特性可归纳为以下三类：

一、恒转矩负载特性

其特点是负载转矩 M_z 的大小恒定不变，与转速无关，即 $M_z = \text{常数}$ 。恒转矩负载又有两种：

1. 反抗性恒转矩负载(又称为摩擦转矩负载)

其特点是负载转矩的方向总是与运动方向相反，即总是反抗运动的。运动方向改变时，负载转矩方向也随之改变。摩擦类型的转矩就具有这样的性质，例如机床刀架的平移运动、电车在平道上的行驶、金属的压延等。

根据§1-1中对 M_z 正负号的规定，对于反抗性恒转矩负载，当 n 为正向时， M_z 与 n 的正向相反， M_z 应为正，负载特性在第一象限；当 n 为负向时， M_z 与 n 的负向相反，即与 n 的正向相同，故 M_z 应为负，负载特性在第二象限，如图1-6所示。

2. 位能性恒转矩负载

其特点是负载转矩的大小和方向固定不变，与转速的方向无关。具有位能的部件产生的转矩就具有这样的性质，例如起重机

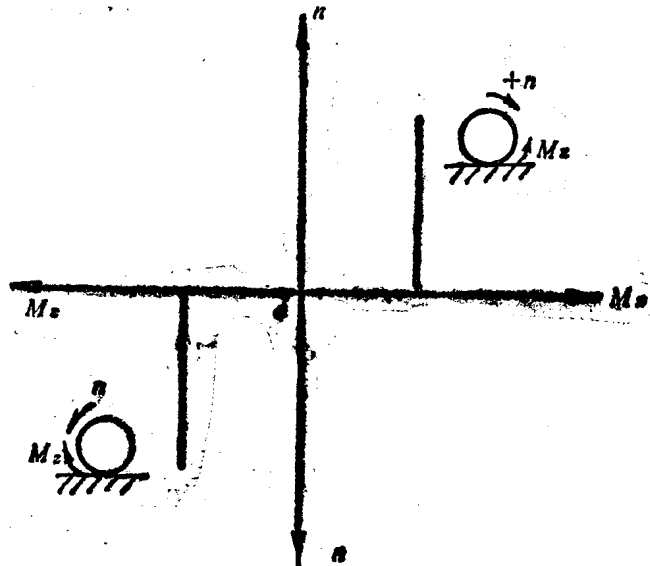


图1-6 反抗性恒转矩负载特性