

高等学校教材

电机及拖动基础

下册

第2版

合肥工业大学 顾绳谷 主编

机械工业出版社



高等学校教材

电机及拖动基础

下 册

第 2 版

合肥工业大学 顾绳谷 主编

机械工业出版社

本书内容包括电力拖动系统的动力学基础、交、直流电动机的电力拖动、多电动机拖动系统与拖动系统电动机的选择等。重点介绍电力拖动系统的运行性能、分析计算与实验方法。

本书根据高等工业学校本科工业电气自动化专业《电机及拖动基础》教学大纲编写，内容注意理论联系实际，可作为各类高校自动化类专业的教材，对从事电气自动化方面的工程技术人员也有重要的参考价值。

电机及拖动基础

下 册

第 2 版

合肥工业大学 顾谷 主编

责任编辑：顾尚元 刘 颖 版式设计：霍永明

封面设计：郭景云 责任校对：孙志筠

责任印制：路 琳

机械工业出版社出版（北京市百万庄大街 22 号）

邮政编码：100037

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787mm×1092mm¹/₁₆·印张 10.75·字数 256 千字

1999 年 10 月第 2 版第 23 次印刷

印数 444 601—453 600 定价：15.00 元

ISBN 7-111-05364-8/TM·650（课）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话（010）68993821、68326677-2527

前 言

本书是根据 1983 年 4 月高等工业学校自动化类专业教材编审委员会在福州召开的第二次全委扩大会议拟订的《电机及拖动基础》教学大纲（试行草案）并在原教材试用本基础上修订编写的。

本书包括《电机学》及《电力拖动基础》两门课程的主要内容，合并为《电机及拖动基础》。为了便于组织教学，在修订时将“电机”及“电力拖动”两部分内容相对集中，分别安排在《电机及拖动基础》的上下两册中。为使不同类型的电机及其拖动联系更紧密，也可考虑按第一、七、八、二、三、四、九、十、十一、五、六、十二、十三章的次序安排教学，还可将变压器放在直流电机之前讲授。

电机部分的修改本着结合专业特点和兼顾电机学科体系的原则进行，以所谓传统四大电机加控制电动机作总体安排，仍以拖动系统中主要元件——交、直流电动机为主要分析对象，以可逆原理去联系发电机，略加阐述，整体内容有所增删，部分安排作了调整，删去一些非主要机种的内容，略增加一些有关统一性的内容，使电机的内在联系有所揭示，以加深对电机机理的认识。这些有关统一性内容的章节标题，或内容阐述之始加上 * 号；可以自由选读。

由于“电力拖动系统的动力学基础”是本书“拖动部分”的重点，在修订时将这部分内容独立成章并适当充实。

本书可作为高等院校工业自动化专业的教材，也可供有关专业师生、工程技术人员及其他人员参考。

本书由合肥工业大学顾绳谷教授主编并编写了“电力拖动部分”，“电机部分”由合肥工业大学姚守猷教授编写，合肥工业大学吴奕副教授对“电机部分”内容作了校阅。

全书由哈尔滨工业大学赵昌颖教授主审，哈尔滨工业大学孔昌平、陆永平两教授参加了“电机部分”内容的审稿工作，他们对书稿提出了许多宝贵意见；李明同志参加了下册的文稿和图稿的校阅誊抄等工作，在此对他们谨致以衷心的感谢。

在修订之际，对使用过本书试用本并提出了许多宝贵意见的同志表示谢意。

编 者

1996 年 5 月

目 录

前 言

第七章 电力拖动系统的动力学基础	1
第一节 电力拖动系统的运动方程式	1
第二节 工作机构转矩、力、飞轮矩和质量的折算	3
第三节 考虑传动机构损耗时的折算方法	5
第四节 生产机械的负载转矩特性	10
小结	12
第八章 直流电动机的电力拖动	13
第一节 他励直流电动机的机械特性	13
第二节 他励直流电动机的起动	19
第三节 他励直流电动机的制动	31
第四节 他励直流电动机的调速	38
第五节 晶闸管一直流电动机系统	49
第六节 他励直流电动机过渡过程的能量损耗	52
第七节 串励直流电动机的电力拖动	55
小结	58
第九章 三相异步电动机的机械特性及各种运转状态	61
第一节 三相异步电动机机械特性的三种表达式	61
第二节 三相异步电动机的固有机机械特性与人为机械特性	66
第三节 三相异步电动机的各种运转状态	69
第四节 根据异步电动机的技术数据计算异步电动机的参数	80
第五节 绕线转子异步电动机调速及制动电阻的计算	82
小结	82
第十章 三相异步电动机的起动及起动设备的计算	84
第一节 三相异步电动机的起动方法	84
第二节 改善起动性能的三相异步电动机	89
第三节 三相笼型异步电动机定子对称起动电阻的计算	90
第四节 三相笼型电动机起动自耦变压器的计算	91
第五节 三相绕线转子异步电动机转子对称起动电阻的计算	92
第六节 三相异步电动机的起动过程	94
第七节 三相异步电动机过渡过程的能量损耗	97
* 本章附录	99
* 一、三相笼型电动机定子不对称起动电阻的计算	99
* 二、三相笼型电动机定子对称与不对称起动电抗器的计算	105
* 三、三相绕线转子电动机转子不对称起动电阻的计算	107
小结	109
第十一章 三相异步电动机的调速	110

IV

第一节 变极调速	110
第二节 变频调速	113
第三节 能耗转差调速	115
小结	126
第十二章 多电动机拖动系统	128
第一节 硬轴联结的双电动机拖动系统	128
第二节 同步旋转系统(电轴)	131
小结	137
第十三章 电力拖动系统电动机的选择	139
第一节 电动机的发热和冷却及电动机工作制的分类	141
第二节 连续工作制电动机的选择	145
第三节 短时工作制电动机的选择	152
第四节 断续周期工作制电动机的选择	154
第五节 笼型异步电动机允许小时合闸次数的确定	155
第六节 带冲击负载时电动机的选择	157
第七节 选择电动机功率的统计法或类比法	160
第八节 电动机电流种类、形式、额定电压与额定转速的选择	161
小结	163
参考文献	164

第七章 电力拖动系统的动力学基础

内 容 提 要

研究电力拖动动力学的目的是为介绍电力拖动的机械特性与过渡过程等内容准备必要的理论基础。第一节及第二节分析运动方程式，对方程式中各参数（力、转矩、质量和飞轮矩等）的折算方法进行分析研究；第三节中讨论考虑传动机构损耗的简化折算方法与较准确的折算方法；最后，在第四节中将介绍几种典型生产机械的负载转矩特性。

第一节 电力拖动系统的运动方程式

“拖动”就是应用各种原动机使生产机械产生运动，以完成一定的生产任务。而用各种电动机作为原动机的拖动方式称为“电力拖动”。

一般情况下，电力拖动装置可分为电动机、工作机构、控制设备及电源等四个组成部分（如图 7-1 所示）。电动机把电能转换成机械动力，用以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。控制设备是由各种控制电机、电器、自动化元件及工业控制计算机等组成的，用以控制电动机的运动，从而对工作机构的运动实现自动控制。为了向电动机及一些电气控制设备供电，在电力拖动系统中必须设有电源部分。

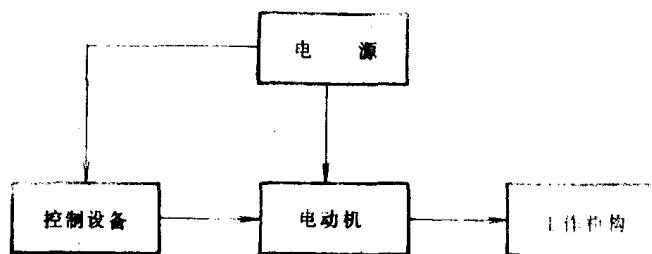


图 7-1 电力拖动系统示意图

要指出的是，在许多情况下，电动机与工作机构并不同轴，而在二者之间有传动机构，它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。

下面我们将研究电力拖动系统中电动机带动负载的力学问题。

一、运动方程式

电动机在电力拖动系统中作直线运动（如直线电动机）或旋转运动时，由力学定律可知，必须遵循下列二个基本的运动方程式。

对于直线运动，方程式为

$$F - F_r = m \frac{dv}{dt} \quad (7-1)$$

式中 F ——拖动力 (N)；

F_r ——阻力 (N)；

$m(dv/dt)$ ——惯性力，如果质量 m 的单位为 kg，速度 v 的单位为 m/s，时间 t 的单位为 s，则

惯性力的单位与 F 及 F_z 相同, 为 N 。

与直线运动时相似, 旋转运动的方程式为

$$T - T_z = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (7-2)$$

式中 T ——电动机产生的拖动转矩 ($N \cdot m$);

T_z ——阻转矩 (或称负载转矩) ($N \cdot m$);

$J (d\Omega/dt)$ ——惯性转矩 (或称加速转矩)。

转动惯量 J 可用下式表示

$$J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (7-3)$$

式中 m 与 G ——旋转部分的质量 (kg) 与重量 (N);

ρ 与 D ——惯性半径与直径 (m);

$g = 9.81 m/s^2$ ——重力加速度。

这样, 由式 (7-3) 可见, 转动惯量 J 的单位为 $kg \cdot m^2$ 。

运动方程式 (7-2) 的形式不够实用, 在实际计算中常把它化为另一种形式。

在式 (7-2) 中, 如将角速度 Ω (rad/s) 化成用每分钟转数 n (r/min) 表示的形式, 即

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

并用式 (7-3) 代入, 即得式 (7-2) 的实用形式

$$T - T_z = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (7-4)$$

式中 GD^2 ——称为飞轮矩 ($N \cdot m^2$), $GD^2 = 4gJ$ 。

必须指出, 式 (7-4) 中的数字 375 是具有加速度量纲的。

电动机电枢 (或转子) 及其他转动部件的飞轮矩 GD^2 的数值可由相应的产品目录中查到, 但是其单位目前有时用 $kg \cdot m^2$ 表示。为了化成国际单位制, 如将查到的数据乘以 9.81, 就可换算成 $N \cdot m^2$ 的单位。

电动机的工作状态可由运动方程式表示出来。分析式 (7-4) 可见

(1) 当 $T = T_z$, $\frac{dn}{dt} = 0$, 则 $n = 0$ 或 $n = \text{常值}$, 即电动机静止或等速旋转, 电力拖动系统处于稳定运转状态下。

(2) 当 $T > T_z$, $\frac{dn}{dt} > 0$, 电力拖动系统处于加速状态, 即处于过渡过程中。

(3) 当 $T < T_z$, $\frac{dn}{dt} < 0$, 电力拖动系统处于减速状态, 也是处于过渡过程中。

二、运动方程式中转矩的正负符号分析

应用运动方程式, 通常以电动机轴为研究对象。由于电动机类型及运转状态的不同, 以及生产机械负载类型的不同, 电动机轴上的拖动转矩 T 及阻转矩 T_z 不仅大小不同, 方向也是变化的。因此, 运动方程式可写成下列一般形式

$$\pm T - (\pm T_z) = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (7-5)$$

式 (7-5) 中转矩 T 与 T_z 前均带有正负符号, 一般可作如下规定:

如预先规定某一旋转方向 (如顺时针方向) 为正方向, 则转矩 T 的方向如果与所规定的

正方向相同, 上式 T 前带正号, 相反时带负号。而阻转矩 $\pm T_z$ 在式 (7-5) 中已带有总的负号, 因此其正负号的规定恰与转矩 T 的规定相反, 即阻转矩 T_z 的方向如果与所规定的旋转正方向相同时, T_z 前取负号, 相反时则取正号。

而在反转方向 (如逆时针方向), 则转矩 T 如与反转的方向相同时取负号, 相反时则取正号; 阻转矩 T_z 如与反转的方向相同时取正号, 相反时则取负号。

上面的规定也可归纳为: 转矩 T 正向取正, 反向取负; 阻转矩 T_z 正向取负, 反向取正。

加速转矩 $(GD^2/375)(dn/dt)$ 的大小及正负符号由转矩 T 及阻转矩 T_z 的代数和来决定。

第二节 工作机构转矩、力、飞轮矩和质量的折算

实际拖动系统的轴常是不止一根, 如图 7-2a 所示, 图中采用四个轴把电动机角速度 Ω 变成符合于工作机构需要的角速度 Ω_z 。在不同的轴上各有其本身的转动惯量及转速; 也有相应的反映电动机拖动的转矩及反映工作机构工作的阻转矩。这种系统显然比一根轴的系统要复杂, 计算起来也较为困难。

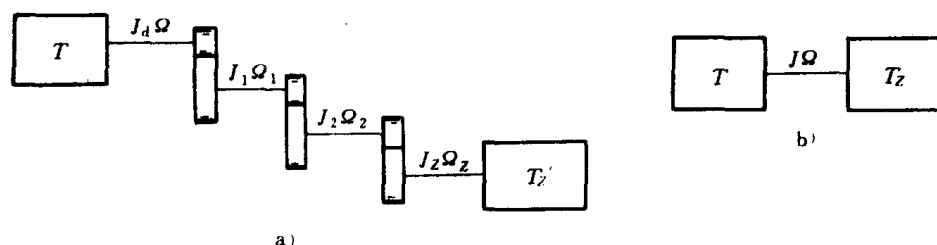


图 7-2 电力拖动系统示意图

a) 传动图 b) 等效折算图

要全面研究这个问题, 必须对每根轴列出其相应的运动方程式, 还要列出各轴间互相联系的方程式, 最后把这些方程式联系起来, 才能全面地研究系统的运动。用这种方法研究是比较复杂的。就电力拖动系统而言, 一般不须详细研究每根轴的问题, 通常只要把电动机轴作为研究对象即可。

为此, 我们引用折算的概念, 把实际的拖动系统等效为单轴系统, 折算的原则是保持两个系统传递的功率及储存的动能相同。这样, 只要研究一根轴, 如图 7-2b 中所示的电动机轴, 即可解决整个拖动系统的问题, 研究方法大为简化。

以电动机轴为折算对象, 需要折算的参量为: 工作机构转矩 T_z' , 系统中各轴 (除电动机轴外) 的转动惯量 J_1, J_2, J_z 。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_z 及运动所需克服的阻力 F_z 折算到电动机轴上去。

一、工作机构转矩 T_z' 的折算

如图 7-2a 及 7-2b 所示, 用电动机轴上的阻转矩 T_z 来反映工作机构轴上的转矩 T_z' 的工作。折算的原则是系统的传送功率不变, 暂先不考虑中间传动机构的损耗。

按传送功率不变的原则, 应有如下的关系:

$$T_z \Omega = T_z' \Omega_z$$

$$T_z = \frac{T'_z}{\left(\frac{\Omega}{\Omega_z}\right)} = \frac{T'_z}{j} \quad (7-6)$$

式中 j ——电动机轴与工作机构轴间的转速比, $j = \Omega / \Omega_z = n / n_z$ 。

传动机构如系多级齿轮或带轮变速, 而己知每级速比为 j_1 、 j_2 、 $j_3 \cdots$, 则总的速比 j 应为各级速比的乘积

$$j = j_1 \cdot j_2 \cdot j_3 \cdots$$

在一般设备上, 电动机多数是高转速的, 而工作机构轴多数是低转速的, 故 $j \gg 1$ 。在有些设备上, 如高速离心机等, 电动机的转速比工作机构轴的转速低, 这时 $j < 1$ 。

二、工作机构直线作用力的折算

某些生产机械具有直线运动的工作机构, 如起重机的提升机构, 其钢绳以力 F_z 吊质量为 m_z 的重物 G_z , 以速度 V_z 等速上升或下降, 示意图如图 7-3 所示。另外, 如刨床工作台带动工件前进, 以某一切削速度进行切削, 也是直线运动机构的一例。无论是钢绳拉力或刨床切削力都将在电动机轴上反映一个阻转矩 T_z , 折算原则与上述相同, 也是以传送功率不变, 同样传动损耗暂不考虑。今以图 7-3 为例, 介绍折算方法。

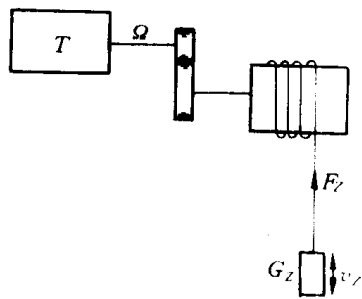


图 7-3 起重机示意图

折算时根据传送功率不变, 可写出如下关系

$$T_z \Omega = F_z v_z$$

把电动机角速度 Ω (rad/s) 换算成 r/min, 则 $\Omega = 2\pi n / 60$, 上式变成

$$T_z = 9.55 \frac{F_z v_z}{n} \quad (7-7)$$

式中 F_z ——工作机构直线作用力 (N);

v_z ——重物提升速度 (m/s);

T_z ——力 F_z 折算为电动机轴上的阻转矩 (N·m);

9.55——单位换算系数, $9.55 = 60 / 2\pi$ 。

三、传动机构与工作机构飞轮矩的折算

在类似图 7-2a 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 、 $J_3 \cdots$ 及工作机构的转动惯量 J_z 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) 来反映整个拖动系统转速不同的各轴的转动惯量 (或飞轮矩) 的影响。各轴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, 因此折算必须以实际系统与等效系统储存动能相等为原则。当各轴的角速度为 Ω 、 Ω_1 、 Ω_2 、 Ω_3 、 $\cdots$ 、 Ω_z 时, 得下列关系

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} J \Omega^2 &= \frac{1}{2} J_d \Omega^2 + \frac{1}{2} J_1 \Omega_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \Omega_2^2 + \cdots + \frac{1}{2} J_z \Omega_z^2 \\ J &= J_d + J_1 \left(\frac{\Omega}{\Omega_1} \right)^2 + J_2 \left(\frac{\Omega}{\Omega_2} \right)^2 + \cdots + J_z \left(\frac{\Omega}{\Omega_z} \right)^2 \end{aligned} \quad (7-8)$$

把式 (7-8) 化成用飞轮矩及 n (r/min) 表示的形式, 考虑到 $GD^2 = 4gJ$, $\Omega = 2\pi n / 60$, 得

$$GD^2 = GD_d^2 + \frac{GD_1^2}{\left(\frac{n}{n_1}\right)^2} + \frac{GD_2^2}{\left(\frac{n}{n_2}\right)^2} + \cdots + \frac{GD_z^2}{\left(\frac{n}{n_z}\right)^2} \quad (7-9)$$

一般情况下,在系统总的飞轮矩中,占最大比重的是电动机轴上的飞轮矩,其次是工作机构轴上的飞轮矩的折算值,占比重较小的是传动机构各轴上的飞轮矩的折算值。

四、工作机构直线运动质量的折算

以图 7-3 为例,重物 G_z 提升或下放,在其质量 m_z 中储存着动能。由于重物的直线运动由电动机带动,是整个系统的一部分,因此必须把速度 v_z (m/s) 的质量 m_z (kg) 折算到电动机轴上,用电动机轴上的一个转动惯量为 J'_z 的转动体与之等效。折算的原则是转动惯量 J'_z 中及质量 m_z 中储存的动能相等,即

$$J'_z \frac{\Omega^2}{2} = m_z \frac{v_z^2}{2}$$

把 $J'_z = (GD_z^2)' / 4g$, $\Omega = 2\pi n / 60$ 及 $m_z = G_z / g$ 代入上式并化简,得

$$(GD_z^2)' = 365 \frac{G_z v_z^2}{n^2} \quad (7-10)$$

式中 $365 = (60/\pi)^2$ 。

通过以上四段分析,可以把多轴拖动系统(在系统中可包括旋转运动及直线运动部分)折算成一个单轴拖动系统(如图 7-2b 所示)。这样,仅用一个运动方程式即可研究实际多轴系统的静态(稳定状态)与动态(过渡过程)问题(均暂未考虑传动机构中的损耗)。

第三节 考虑传动机构损耗时的折算方法

上节中讨论工作机构转矩、力、飞轮矩与质量的折算方法时,均未考虑传动机构中的损耗,现介绍两种考虑传动机构中损耗的方法:

一、考虑传动机构损耗的简化方法

在图 7-2a 及图 7-2b 中,工作机构转矩及力的折算时,传动机构损耗的简化考虑方法可在折算公式中引入传动效率 η_c 。当传送功率时,效率 η_c 的考虑方法因传送方向的不同而不同。

(一) 工作机构转矩 T'_z 的简化折算

现就工作机构转矩 T'_z 折算的两种情况,分别讨论如下:

1. 电动机工作在电动状态 此时由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,电动机发出的功率比生产机构消耗的功率大,按传送功率不变的原则,应有如下的关系,即

$$\begin{aligned} T_z \Omega &= T'_z \Omega_z / \eta_c \\ T_z &= \frac{T'_z}{\eta_c \left(\frac{\Omega}{\Omega_z} \right)} = \frac{T'_z}{\eta_c j} \end{aligned} \quad (7-11)$$

2. 电动机工作在发电制动状态 此时由工作机构带动电动机,功率传送方向与电动状态时相反,即由工作机构向电动机传送,传动损耗功率由工作机构承担,传送到电动机轴上的功率较工作机构轴上的功率小。此时可得下列关系

$$\begin{aligned} T_z \Omega &= T'_z \Omega_z \eta_c \\ T_z &= \frac{T'_z}{j} \eta_c \end{aligned} \quad (7-12)$$

在式 (7-11) 及式 (7-12) 中, η_c 为传动机构总效率,在使用多级传动时,如各级效率为

η_{c1} 、 η_{c2} 、 η_{c3} ...，则 η_c 应为各级效率的乘积：

$$\eta_c = \eta_{c1} \cdot \eta_{c2} \cdot \eta_{c3} \cdots$$

不同种类的传动机构，其每级效率是不同的。例如：每对齿轮（用滚动轴承）的满载效率为 0.975~0.985，蜗轮蜗杆传动的满载效率为 0.5~0.7，这些数值可由机械工程手册上查到。总传动效率是各级效率的乘积，其值较低。例如，车床的满载效率为 0.7~0.8，刨床为 0.65~0.75。对于某一具体的生产机械，负载大小不同，效率也不同，往往空载效率比满载效率低。粗略计算时，一般可以不考虑这个差别，用满载效率值来计算。

（二）工作机构直线作用力的简化折算

以图 7-3 为例，考虑传动损耗时简化的折算方法的原则与上述相同，传动损耗也用传动效率考虑，根据功率传送方向，也有两种情况：

1. 电动机工作在电动状态 此时电动机带动工作机构，使重物提升。

$$\begin{aligned} T_z \Omega &= \frac{F_z v_z}{\eta_c} \\ T_z &= 9.55 \frac{F_z v_z}{n \eta_c} \end{aligned} \quad (7-13)$$

式中 η_c ——提升传动效率。

2. 电动机工作在发电制动状态 此时工作机构带动电动机，使重物下放。

$$T_z = 9.55 \frac{F_z v_z}{n} \eta'_c \quad (7-14)$$

式中 v_z ——重物下放速度 (m/s)；

η'_c ——下放传动效率。

在提升与下放时传动损耗相等的条件下，下放传动效率 η'_c 与提升传动效率之间有下列关系。

$$\eta'_c = 2 - \frac{1}{\eta_c} \quad (7-15)$$

该式可证明如下：

当重物下放时，功率由工作机构向电动机传送，传动损耗功率由工作机构承担。

提升与下放时的传动损耗功率相等，其值由下式表示。

$$\Delta P = \frac{F_z v_z}{\eta_c} - F_z v_z = F_z v_z \left(\frac{1}{\eta_c} - 1 \right)$$

当重物下放时，工作机构功率即为传动机构的输入功率 P_1 ，其计算公式为

$$P_1 = F_z v_z$$

工作机构功率 P_1 克服传动损耗功率 ΔP 后，向电动机轴上传送机械功率 P_2 ， P_2 亦即为传动机构的输出功率。

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 - \Delta P = F_z v_z - F_z v_z \left(\frac{1}{\eta_c} - 1 \right) \\ &= F_z v_z \left(2 - \frac{1}{\eta_c} \right) = P_1 \left(2 - \frac{1}{\eta_c} \right) \end{aligned}$$

由上式可见，当 $\eta_c < 0.5$ 时（这一情况出现在轻载或空钩提升或下放时）， P_2 为负值，此时电动机轴上输入负的机械功率，即输出机械功率以克服部分传动损耗功率，电动机在轻载

或空钩下放时不能发电，仍为电动状态。工作机构的功率此时不足以克服传动机构的损耗功率，而必须求电动机助其一臂之力，即损耗功率由工作机构与电动机共同承担。

从上式即得

$$\eta_c = \frac{P_2}{P_1} = 2 - \frac{1}{\eta_c}$$

由于传送惯性转矩（或加速转矩） $J(d\Omega/dt)$ 而引起的传动损耗在大多数情况下较小，因此在简化折算方法时，通常忽略不计。在飞轮矩和质量的折算公式中就不乘任何系数了。

二、考虑传动机构损耗的较准确方法

（一）电力拖动系统处于稳定运转状态下

对于有些工作机构，其负载转矩是变化的，由于此时需要知道不同负载下的传动效率，利用式（7-11）、式（7-12）、式（7-13）及式（7-14）来折算是困难的。如采用下列方法则比较准确地考虑传动机构中的损耗。

折算到电动机轴上的阻转矩 T_z 可表达为

$$T_z = T_{z0} + \Delta T \quad (7-16)$$

式中 T_{z0} ——不考虑传动损耗时折算到电动机轴上的阻转矩；

ΔT ——由于传动机构的摩擦所引起的附加转矩。

ΔT 可看作空载的摩擦转矩 T_0 和由于传送 T_{z0} 所引起的附加摩擦转矩 ΔT_0 之和。 ΔT_0 可近似地认为与 T_{z0} 成正比。于是可得

$$\left. \begin{aligned} \Delta T &= T_0 + \Delta T_0 \\ \Delta T_0 &= c T_{z0} \end{aligned} \right\} \quad (7-17)$$

将式（7-17）代入式（7-16），得

$$T_z = T_{z0}(1 + c) + T_0 \quad (7-18)$$

以提升或下放工作机构为例，式（7-18）可用以计算提升时的 T_z 。当下放时，由于式（7-16）中 T_{z0} 为负值，将式（7-17）代入式 $T_z = -T_{z0} + \Delta T$ ，得下放时的 T_z ，即

$$T_z = -T_{z0}(1 - c) + T_0 \quad (7-19)$$

要利用式（7-18）及式（7-19）进行计算，如 T_0 为已知，则 c 的数值可通过额定传动效率 η_{cN} 求得。

由式（7-17）可得

$$c = \frac{\Delta T_{0N}}{T_{z0N}} = \frac{\Delta T_N - T_0}{T_{z0N}} \quad (7-20)$$

式中 ΔT_N ——额定负载下传动机构的总摩擦附加转矩，其值为

$$\Delta T_N = T_{z0N} \left(\frac{1 - \eta_{cN}}{\eta_{cN}} \right) \quad (7-21)$$

（二）电力拖动系统处于加速运转状态下

在这种情况下，附加摩擦转矩 ΔT_0 不能认为与 T_{z0} 成正比，因为此时传送通过传动机构，除了 T_{z0} 外，还有惯性转矩。惯性转矩从系统的一个区段传送到另一个区段时，要发生变化。在个别情况下，惯性转矩的数值可能较大。

因此，在加速运转状态下，当计算附加摩擦转矩时，除了要考虑阻转矩外，还必须考虑从一个传动机构传送到另一个传动机构的惯性转矩。

现以如图 7-4 所示的等效拖动系统代替真实的拖动系统。在等效拖动系统中,各阻转矩及惯性转矩均已折算到电动机转速(相当于未考虑传动机构损耗时的折算值),因此系统中任一区段的角速度与角加速度分别等于电动机的角速度与角加速度。等效系统中传动机构的数目与真实系统中相等。

当传动机构为 m 个时,则拖动系统由 $m+1$ 个部件组成,其中第一个部件包括电动机的电枢(或转子)、它的轴以及第一个传动机构的主动环节,而最后的第 $(m+1)$ 个部件则包括工作轴和最后第 m 个传动机构的从动环节。

在此情况下,某一部件的转矩应为传送到紧邻着它的下一部件去的转矩和部件摩擦损耗转矩之和,而摩擦损耗此时又附加了用以使部件加速应克服的一部分。

可以认为,每个部件的摩擦损耗均集中于传动机构中,并且每个部件(如第 i 个部件)的摩擦损耗转矩可表示为

$$\Delta T_i = T_{oi} + c_i T'_i \quad (7-22)$$

式中 ΔT_i ——第 i 个部件的总摩擦转矩;

T_{oi} ——第 i 个部件的空载摩擦转矩;

T'_i ——进入第 i 个传动机构的转矩,它可表示为

$$T'_i = T_i - J_i \frac{d\Omega}{dt} \quad (7-23)$$

将式 (7-23) 代入式 (7-22) 得第 i 个部件的损耗转矩为

$$\Delta T_i = T_{oi} + c_i \left(T_i - J_i \frac{d\Omega}{dt} \right) \quad (7-24)$$

传送到第 $(i+1)$ 个部件的转矩为

$$T_{i+1} = T_i - J_i \frac{d\Omega}{dt} - \Delta T_i \quad (7-25)$$

将式 (7-24) 代入式 (7-25), 得

$$T_{i+1} = T_i(1 - c_i) - J_i(1 - c_i) \frac{d\Omega}{dt} - T_{oi} \quad (7-26)$$

如果对图 7-4 的等效拖动系统中的所有部件(即从前述的第一个部件开始到最后第 $(m+1)$ 个部件)均采用类似的方法,就能得到传送到每个部件轴的转矩的表达式。

第一个部件的转矩为 T_1

$$T_1 = T \quad (T \text{ 即为电动机转矩}) \quad (7-27)$$

传送到第二个部件上的转矩为 T_2

$$T_2 = T_1(1 - c_1) - J_1(1 - c_1) \frac{d\Omega}{dt} - T_{o1} \quad (7-28)$$

传送到第三个部件上的转矩为 T_3 ,

$$T_3 = T_2(1 - c_2) - J_2(1 - c_2) \frac{d\Omega}{dt} - T_{o2} \quad (7-29)$$

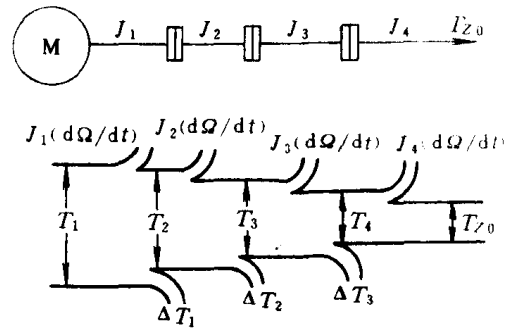


图 7-4 等效拖动系统及系统中传送转矩的变化图

将式 (7-28) 代入式 (7-29), 可得

$$T_3 = T_1(1 - c_1)(1 - c_2) - [J_1(1 - c_1) + J_2](1 - c_2) \frac{d\Omega}{dt} - T_{01}(1 - c_2) - T_{02} \quad (7-30)$$

用同样的方法, 可得传送到第四个部件上的转矩 T_4 :

$$T_4 = T_1(1 - c_1)(1 - c_2)(1 - c_3) - [J_1(1 - c_1)(1 - c_2) + J_2(1 - c_2) + J_3](1 - c_3) \frac{d\Omega}{dt} - T_{01}(1 - c_2)(1 - c_3) - T_{02}(1 - c_3) - T_{03} \quad (7-31)$$

......

传送到最后第 $(m+1)$ 个部件上的转矩为 T_{m+1}

$$T_{m+1} = T_1(1 - c_1)(1 - c_2) \cdots (1 - c_m) - [J_1(1 - c_1)(1 - c_2) \cdots (1 - c_m) + J_2(1 - c_2)(1 - c_3) \cdots (1 - c_m) + \cdots + J_m(1 - c_m)] \frac{d\Omega}{dt} - T_{01}(1 - c_2)(1 - c_3) \cdots (1 - c_m) - T_{02}(1 - c_3) \cdots (1 - c_m) \cdots - T_{0m} \quad (7-32)$$

工作轴的转矩为

$$T_{x0} = T_{m+1} - J_x \frac{d\Omega}{dt} \quad (7-33)$$

式中 J_x ——工作机构的转动惯量 (已折算到电动机转速, 但未考虑传动损耗时)。

把式 (7-32) 代入式 (7-33) 并除以乘积 $(1 - c_1)(1 - c_2) \cdots (1 - c_m)$ 后, 可整理成如下的形式。

$$T_1 - \left[\frac{T_{01}}{1 - c_1} + \frac{T_{02}}{(1 - c_1)(1 - c_2)} + \cdots + \frac{T_{0m} + T_{x0}}{(1 - c_1)(1 - c_2) \cdots (1 - c_m)} \right] = \left[J_1 + \frac{J_2}{1 - c_1} + \frac{J_3}{(1 - c_1)(1 - c_2)} + \cdots + \frac{J_x}{(1 - c_1)(1 - c_2) \cdots (1 - c_m)} \right] \frac{d\Omega}{dt} \quad (7-34)$$

与下列电动机轴上的转矩式

$$T - T_x = J \frac{d\Omega}{dt}$$

相比较, 可见

$$T = T_1;$$

$$T_x = \frac{T_{01}}{1 - c_1} + \frac{T_{02}}{(1 - c_1)(1 - c_2)} + \cdots + \frac{T_{0m} + T_{x0}}{(1 - c_1)(1 - c_2) \cdots (1 - c_m)} \quad (7-35)$$

$$J = J_1 + \frac{J_2}{1 - c_1} + \frac{J_3}{(1 - c_1)(1 - c_2)} + \cdots + \frac{J_x}{(1 - c_1)(1 - c_2) \cdots (1 - c_m)} \quad (7-36)$$

式中 T_x ——考虑传动损耗时折算到电动机转速的阻转矩;

J ——拖动系统在考虑传动损耗时折算到电动机转速的等效转动惯量。

在极个别的情况下, 当 $c_1 = c_2 = c_3 = \cdots = c_m = c$ 时, 式 (7-35) 及式 (7-36) 将变为

$$T_x = \frac{T_{01}}{1 - c} + \frac{T_{02}}{(1 - c)^2} + \cdots + \frac{T_{x0} + T_{0m}}{(1 - c)^m} \quad (7-37)$$

$$J = J_1 + \frac{J_2}{1-c} + \frac{J_3}{(1-c)^2} + \cdots + \frac{J_z}{(1-c)^m} \quad (7-38)$$

第四节 生产机械的负载转矩特性

在运动方程式中,阻转矩(或称负载转矩) T_z 与转速 n 的关系 $T_z=f(n)$ 即为生产机械的负载转矩特性。

负载转矩 T_z 的大小和多种因素有关。以车床主轴为例,当车床切削工件时,主轴转矩和切削速度、切削量大小、工件直径、工件材料及刀具类型等都有密切关系。

根据统计,大多数生产机械的负载转矩特性可归纳为下列三种类型。

一、恒转矩负载特性

所谓恒转矩负载特性,就是指负载转矩 T_z 与转速 n 无关的特性,即当转速变化时,负载转矩 T_z 保持常值。

恒转矩负载特性多数是反抗性的,也有位能性的。

反抗性恒转矩负载特性的特点是,恒值转矩 T_z 总是反对运动的方向。根据第七章第一节中对转矩 T_z 正负符号的规定,当正转时, n 为正,转矩 T_z 为反向,应取正号,即为 $-T_z$;而反转时, n 为负,转矩 T_z 为正向,应变为 $-T_z$,如图7-5所示。显然,反抗性恒转矩负载特性应画在第一与第三象限内。属于这类特性的负载有金属的压延、机床的平移机构等。

位能性恒值负载转矩则与反抗性的特性不同,它由拖动系统中某些具有位能的部件(如起重类型负载中的重物)造成,其特点是转矩 T_z 具有固定的方向,不随转速方向改变而改变。如图7-6所示,不论重物提升(n 为正)或下放(n 为负),负载转矩始终为反方向,即 T_z 始终为正,特性画在第一与第四象限内,表示恒值特性的直线是连续的。

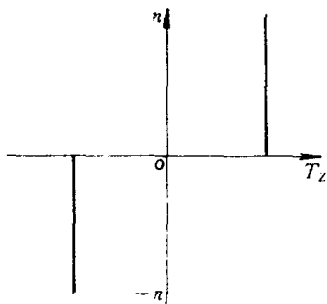


图 7-5 反抗性恒转矩负载特性

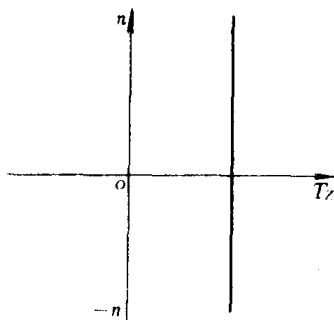


图 7-6 位能性恒转矩负载特性

由图7-6可见,提升时,转矩 T_z 反对提升;下放时, T_z 却帮助下放,这是位能性负载的特点。

二、通风机负载特性

通风机的负载的转矩与转速大小有关,基本上与转速的平方成正比,即

$$T_z = Kn^2$$

式中 K ——比例常数。

通风机负载特性如图 7-7 所示。图中只在第一象限画了转速正向时的特性, 鉴于通风机负载是反抗性的, 当转速反向 (n 为负) 时, T_z 是负值, 第三象限中应有与第一象限特性对称的曲线。

属于通风机负载的生产机械有通风机、水泵、油泵等, 其中空气、水、油等介质对机器叶片的阻力基本上和转速的平方成正比。

三、恒功率负载特性

一些机床, 如车床, 在粗加工时, 切削量大, 切削阻力大, 此时开低速; 在精加工时, 切削量小, 切削力小, 往往开高速。因此, 在不同转速下, 负载转矩基本上与转速成反比, 即

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

$$P_z = T_z \Omega = T_z \frac{2\pi n}{60} = \frac{T_z n}{9.55} = \frac{K}{9.55} = K_1$$

式中 $K_1 = \frac{K}{9.55} = \text{常数}$;

P_z ——负载 (切削) 功率 (W)。

可见, 切削功率基本不变, 负载转矩 T_z 与 n 的特性曲线呈现恒功率的性质, 如图 7-8 所示。

必须指出, 实际生产机械的负载转矩特性可能是以上几种典型特性的综合。例如, 实际通风机除了主要是通风机负载特性外, 由于其轴承上还有一定的摩擦转矩 T_0 , 因而实际通风机负载特性应为

$$T_z = T_0 + Kn^2$$

与上式相应的特性如图 7-9 所示。

又如, 机床刀架等机构在平移时, 负载的性质基本上是反抗性恒转矩负载, 但从静止状态起动及当转速还很低时, 由于润滑油没有散开, 静摩擦系数较动摩擦系数大, 摩擦阻力较大。另外, 当传动机构在旋转时, 有一些油或风的阻力, 带一些通风机负载的性质, 这导致在转速较高时, 负载转矩 T_z 会略见增高, 因此, 机床平移机构的实际负载特性如图 7-10 所示。

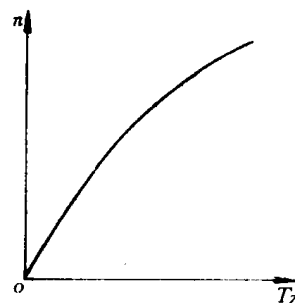


图 7-7 通风机负载特性

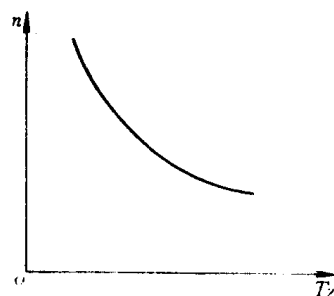


图 7-8 恒功率负载特性

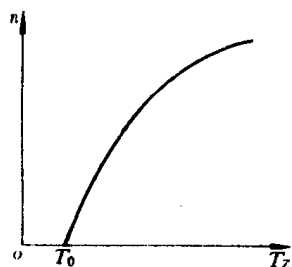


图 7-9 实际的通风机负载特性

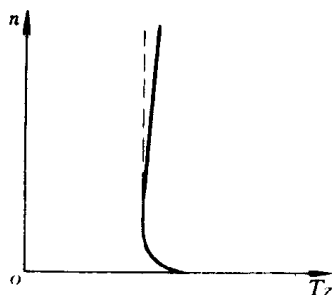


图 7-10 机床平移机构实际的负载特性