

高等学校教学用书

电力拖动

冶金工业出版社

高等学校教学用书

电 力 拖 动

北京科技大学 周绍英 编

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张13 3/4 字数327千字

1990年5月第一版 1990年5月第一次印刷

印数00,001~6,000册

ISBN 7-5024-0700-6

TP·35 (课) 定价**2.75元**

前 言

本书是在北京科技大学校内教材《电力拖动基础》的基础上，广泛听取校内外使用者的建议后，重新编写而成的。“电力拖动”课程是自动化专业重要的技术基础课，也是自动化专业工程技术人员必学的专业基础知识。

本书从电力拖动系统动力学入手，系统全面地介绍了直流电力拖动和交流电力拖动知识。着重分析他励直流电动机起动、制动及调速等各种运行状态的动静态特性和参数计算；异步电动机的特性分析、起动制动方法和交流机常用的调速方式。同时，对电动机容量选择的理论和方法也作了介绍，并附有用自动控制理论方法对“他励直流电动机考虑电枢电感时的过渡特性解析”和计算机计算起动电阻、绘制动态特性的程序框图。第三章还介绍了异步机参数的计算方法。

随着科学技术的发展，在电力拖动领域中，交流调速系统发展很快，为便于学生学习“近代交流调速”这门课，应在“电力拖动”课程中加强交流拖动部分，同时应使教材适于培养学生的自学能力。本书正是以此为出发点编写的，具有如下特点：

1) 反映了现代科学技术的发展，表现出较强的专业特点和时代气息。这是该书有别于同类书的主要特点之一。

2) 便于自学又不繁琐，这是本书的最大特点。内容阐述上注意了启发式，提出问题，解决问题，得出结论一环扣一环。层次清晰、逻辑性、系统性较强。重点难点突出，论述清楚。

3) 每章后面有大量的思考题和习题。

4) 是在多年教学经验基础上编写的，取材较广泛，且有自己的特色。

本书由北京科技大学自动化系周绍英副教授编；附录一由李国华副教授编写；附录二由张景民副教授和彭晓伟提供。在编著过程中，得到校内外很多同行和读者的帮助，特别是赵殿甲教授、任兴权教授和宋银宾教授，对原校内教材作了认真审阅，并写出评语。在此表示最衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中不当之处，敬请读者批评指正。

编 者

一九八九年二月

目 录

绪论	1
1 电力拖动系统动力学	2
1.1 单轴电力拖动系统运动方程式	2
1.2 多轴电力拖动系统运动方程式	9
1.3 传动机构的损耗和效率	14
小结	18
思考题及习题	18
2 直流电机的电力拖动	21
2.1 直流电动机机械特性的分类	21
2.2 他励直流电动机的机械特性	22
2.3 他励直流电动机的起动	31
2.4 起动时的过渡过程	36
2.5 他励直流电动机的制动及其过渡过程	52
2.6 他励直流电动机的速度调节	69
2.7 他励直流电动机各种工作状态分析	83
2.8 串励直流电动机的电力拖动	90
2.9 复励直流电动机的机械特性	94
小结	94
思考题及习题	95
3 三相异步电动机电力拖动系统的特性分析	99
3.1 三相异步电动机的机械特性	99
3.2 三相异步电动机的起动	104
3.3 三相异步电动机的制动运行状态	124
小结	140
思考题及习题	141
4 三相交流电动机的调速方式	143
4.1 变极调速	143
4.2 调压调速	148
4.3 滑差电机调速	151
4.4 转子串电阻调速	155
4.5 串级调速	156
4.6 变频调速	160
4.7 无换向器电机调速	164
4.8 矢量变换控制	171
小结	174
思考题及习题	175
5 电动机的容量选择	176
5.1 概述	176

5.2 电动机的发热和冷却·····	178
5.3 按发热观点对电机工作方式的分类·····	181
5.4 连续工作制电机的容量选择·····	182
5.5 短时工作制电机的容量选择·····	193
5.6 重复短时工作制电机的容量选择·····	195
5.7 鼠笼电动机每小时允许接电次数的计算·····	198
5.8 电动机容量选择的工程方法·····	198
小结·····	199
思考题及习题·····	200
附录1 他励直流电动机考虑电枢电感时的过渡特性解析·····	202
附录2 计算机计算起动电阻、绘制 $n=f(t)$ 曲线·····	211
参考文献·····	214

绪 论

在工业企业中，各种生产机械为了完成各种工艺过程的要求，大多数都需要有机械能。早期的机械能来源于水力、蒸汽。电机出现以后，由于电能具有变换、传输、分配、使用和控制都比较方便、经济，而且易于大量生产、集中管理、远距离传输和实现自动控制的优点，就由电力代替了水力和蒸汽。这种用电动机拖动生产机械的拖动方式，叫“电机拖动”或“电力拖动”。

早期的“电力拖动”方式是“成组拖动”。一台电动机通过一根长轴（俗称“天轴”）拖动全车间的数台生产机械。这样一旦电机出现故障，全车间就得停产。随着生产的发展，出现了“单电机拖动”，即由一台电机拖动一台生产机械。而一台生产机械往往又具有几个不同的运动。例如车床，就有刀架的横向移动，纵向移动和主轴的转动。单电机拖动方式不便于各种运动的分别调节，而且使传动机构复杂化。后来出现的“多电动机拖动”，由多台电机分别拖动一台生产机械的各个运动部分，就克服了“单电机拖动”的缺点。

生产的不断发展，对生产工艺也不断提出更高的要求。例如，要求加工精度高，调速范围广，快速起、制动和反转等。这些要求须通过控制设备控制电动机来实现，因此形成了由控制设备、电动机、传动机构、生产机械等主要部分组成的电力拖动系统，如图0-1所示。其中的控制设备有继电器-接触器型有触点控制系统，发电机-电动机组，放大机控制系统，磁放大器控制系统，离子拖动控制系统，近代的可控硅控制系统和计算机控制系统。由于磁放大器控制系统惯性大，离子拖动控制系统工作可靠性差，二者已被淘汰。其他控制系统目前我国都有应用。

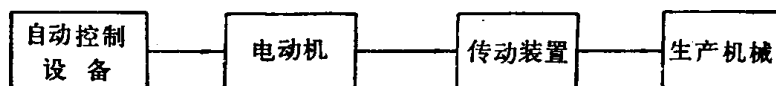


图 0-1 电力拖动系统的结构图

综上所述，凡是用电动机将电能转换成机械能，拖动生产机械，并完成一定工艺要求的系统，都称为“电力拖动系统”。

本课程研究的主要对象是电力拖动系统中的电动机、传动机构和生产机械三个主要部分。至于控制设备，将在后续课中进行研究。

本课程以数学、电工基础、电机学为基础，为可控硅电路、自动控制系统、计算机控制系统及近代交流调速等课程准备必要的理论基础。它既具有很强的理论性，又具有一定的实践性，是一门重要的技术基础课。

通过本课程的学习，要求掌握下面一些基本内容和方法。

1) 掌握分析电动机机械特性及各种运行状态（电动、制动、反转）的基本理论和基本运算；

2) 掌握电力拖动系统机械过渡过程的基本特性及主要分析方法，了解电枢电感对过

渡过程的影响；

- 3) 掌握各种调速方法的原理、特点及特性；
- 4) 掌握电动机容量选择的原理和方法；
- 5) 学习、掌握电力拖动系统的基本实验方法。

1 电力拖动系统动力学

凡是以电动机将电能转换成机械能，拖动生产机械，并完成一定工艺要求的系统，都称为电力拖动系统。最简单的电力拖动系统如日常生活中的电风扇、电唱机，工业生产中的水泵等；复杂的电力拖动系统如连轧机、可逆轧机等。电力拖动系统中所用的电机种类很多，有直流机、交流机。直流机中有他励、并励、串励、复励之分；交流机中有同步机、异步机之分。异步机又可分为绕线异步机和鼠笼异步机等等。生产机械的性质也各不相同。因此，实际的电力拖动系统有许多种，不可能分别进行研究，只有找到它们的共性，找出其普遍的运动规律，予以综合分析。无论电动机的种类如何，生产机械的性质如何，每个电力拖动系统都是一个动力学整体。从动力学角度来分析，它们都服从动力学的统一规律。因此，我们首先研究电力拖动系统的动力学，建立电力拖动系统的运动方程式。

1.1 单轴电力拖动系统运动方程式

所谓单轴电力拖动系统，就是电动机出轴直接拖动生产机械运转的系统，如图1-1所示。

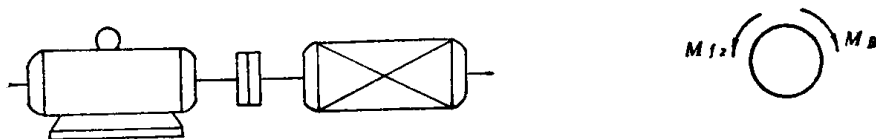


图 1-1 单轴拖动系统及轴上转矩

1.1.1 单轴电力拖动系统运动方程式

图1-1所示电力拖动系统，当电动机转矩 M_D 和负载转矩 M_{fz} 相等时，系统处于静态。或者恒速旋转，或者静止不动。此时 $M_D - M_{fz} = 0$ 。而当 $M_D \neq M_{fz}$ 时，例如 $M_D > M_{fz}$ ，则电动机转矩 M_D 除了克服运动系统的负载转矩 M_{fz} 外，还使系统沿电动机转矩 M_D 的方

向，产生角加速度 $\frac{d\Omega}{dt}$ 。当 $M_D - M_{fz} = \text{常数}$ 时，角加速度的大小与系统的转动惯量 J 成反

比，即

$$M_D - M_{fz} = J \frac{d\Omega}{dt}$$

$$\text{或 } M_D - M_{fz} = M_g$$

式中 M_g ——惯性转矩。

下面从能量守恒原理推导运动方程式的实用公式。由物理学可知，当一个物体在外力（外力与摩擦力相等）作用下做匀速直线运动时，储存的动能为

$$W = \frac{1}{2}mv^2$$

式中 m ——物体的质量；
 v ——物体的运动速度。

那么一个旋转体在转矩作用下匀速旋转时，系统也储存动能，可表示为

$$W_d = \frac{1}{2}J\Omega^2$$

式中 J ——系统的转动惯量；
 Ω ——系统的角速度。

与直线运动的动能公式相比较，可知转动惯量相当于直线运动时的质量，是物体在转动中惯性大小的量度。转动惯量 J 等于转动体中每个质点的质量与这一质点到转轴的距离的平方之乘积的总和。

电动机拖动生产机械以角速度 Ω 恒速旋转，经过 dt 时间，转过 $d\alpha$ 角，电动机转矩 M_D 做的功为 A_D 。 A_D 除克服负载转矩 M_{fz} 所做的功 A_{fz} 以外，其余的功应该等于系统储存的动能 W_d 。因此，可以得到动能守恒方程式

$$A_D - A_{fz} = W_d \quad (1-1)$$

功对时间的变化率即为功率，所以有

$$\frac{dA_D}{dt} - \frac{dA_{fz}}{dt} = \frac{dW_d}{dt}$$

或写成为功率平衡方程式

$$P_D - P_{fz} = P_d \quad (1-2)$$

考虑到功率 P 与转矩 M 的关系为 $P = M\Omega$ ，于是有

$$M_D - M_{fz} = \frac{P_d}{\Omega_D} \quad (1-3)$$

现在只看 P_d ，对电动机轴

$$\begin{aligned} P_d &= \frac{dW_d}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J_D \Omega_D^2 \right) = \frac{d}{dt} \left(J_D \frac{\Omega_D^2}{2} \right) \\ &= J_D \Omega_D \frac{d\Omega_D}{dt} + \frac{\Omega_D^2}{2} \frac{dJ_D}{dt} \\ &= J_D \Omega_D \frac{d\Omega_D}{dt} + \frac{\Omega_D^2}{2} \frac{dJ_D}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt} \\ &= J_D \Omega_D \frac{d\Omega_D}{dt} + \frac{\Omega_D^2}{2} \frac{dJ_D}{d\alpha} \end{aligned}$$

将 P_d 表达式代入式1-3中，于是得到运动方程式的一般形式

$$M_D - M_{fz} = J_D \frac{d\Omega_D}{dt} + \frac{\Omega_D^2}{2} \frac{dJ_D}{d\alpha} \quad (1-4)$$

公式右边第一项是当角速度随时间变化时产生的惯性转矩，第二项是当转动惯量 J 随转角 α 变化时产生的惯性转矩。而在多数情况下，转动惯量 J 是不变化的，即 $\frac{dJ}{d\alpha} = 0$ ，所以可将式1-4简化。对单轴电力拖动系统，可写成

$$M_D - M_{fz} = J_D \frac{d\Omega_D}{dt} \quad (1-5)$$

式中 J_D ——电动机轴上所有转动体的转动惯量 ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$)；
 Ω_D ——电动机轴的角速度 (rad/s)。

在工程实践中，往往不用转动惯量 J 而用飞轮矩 GD^2 表示旋转体的惯性。旋转体的速度用转速 n 表示，而不用角速度 Ω 表示。因此将式1-5中的 J 用 GD^2 代替，将 Ω 用 n 代替，以得到运动方程式的实用形式。 J 与 GD^2 的关系为

$$J = m\rho^2 = \frac{G}{g} \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-6)$$

式中 m ——转动体的质量 (kg)；
 G ——转动体的重量 (N)；
 g ——重力加速度 (m/s^2)；
 D ——回转直径，或称惯性直径 (m)；
 ρ ——回转半径，或称惯性半径 (m)。

下面看一下 ρ 的物理概念。图1-2a为任意一个旋转体，以 OO' 为轴旋转。现在我们设想将围绕某一转轴旋转的物体质量 m 集中在一个点上 (如图1-2b中的 A 点)，其转动惯量与旋转体的转动惯量相等，此点到转轴的距离叫做回转半径 ρ 。注意， ρ 和物体的半径 R 是绝然不同的两个概念，一定要区别开。这里回转直径 $D = 2\rho$ ，而 $D \neq 2R$ 。如图1-2a所示，回转轴线与母线平行并通过重心的圆柱体，由表1-1知，其 $\rho^2 = \frac{R^2}{2}$ ，即

$$D = 2\rho = 2R/\sqrt{2} = 1.414R$$

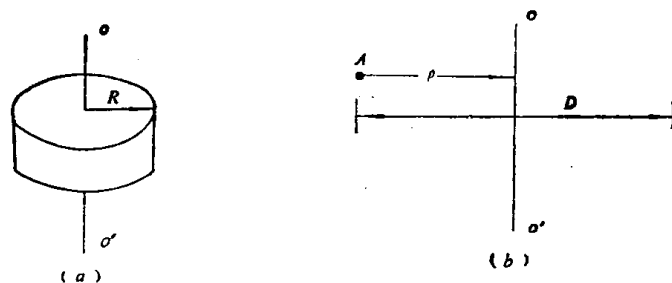


图 1-2 旋转体的回转半径和回转直径
 a—旋转体；b—回转半径

角速度 Ω 与转速 n 的关系为 $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ ，则

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt} \quad (1-7)$$

将式1-6和式1-7代入式1-5中，得

$$M_D - M_{fz} = \frac{GD_D^2}{4g} \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt}$$

则运动方程式的实用形式为

$$M_D - M_{fz} = \frac{GD_D^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-8)$$

式中 M ——电动机产生的转矩 ($N \cdot m$);

M_{fz} ——负载转矩 ($N \cdot m$);

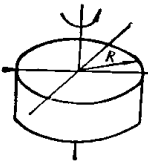
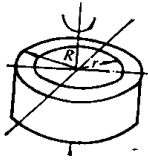
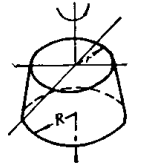
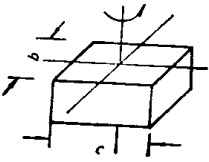
$\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = Mg$ ——惯性转矩 ($N \cdot m$);

GD^2 ——旋转体的飞轮矩 ($N \cdot m^2$)。

式1-8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行状态的基础，也是生产实践设计计算的依据，是个重要的公式。因为今后研究的全是电动机单轴系统，所以为简便起见，可将 M_D 和 GD_D^2 等量的下标去掉。

表 1-1

规则物体的回转半径

几何图形	物体名称与回转轴线	回转半径 ρ 的平方
	回转轴线与母线平行并通过重心的圆柱体	$\rho^2 = \frac{R^2}{2}$
	回转轴线与母线平行并通过重心的空心圆柱体	$\rho^2 = \frac{R^2 + r^2}{2}$
	回转轴线与锥底面垂直并通过重心的截锥体	$\rho^2 = \frac{3}{10} \frac{R^5 - r^5}{R^3 - r^3}$
	回转轴线通过重心并与长方体的一棱平行	$\rho^2 = \frac{b^2 + c^2}{12}$

1.1.2 各量的物理意义及正方向的规定

运动方程式中各量的物理意义都在前面做了标注。这里值得提出的是 GD^2 ，其中 G 是旋转体的重量， D 是回转直径，但是从 $J=GD^2/4g$ 来看， GD^2 做为一个整体代表旋转体的惯性大小，切不可将它割裂开而理解为 G 与 D^2 的乘积。在进行设计计算时，由电动机的产品样本可查出电动机电枢的飞轮矩 GD^2 值，从机械设计部门得到生产机械各旋转部件的 GD^2 值。对于几何形状规则的部件，也可从表1-1查出回转半径 ρ 的数值，再根据 $GD^2=4G\rho^2$ 计算出 GD^2 的值（因为 $GD^2=4gJ$ ， $J=m\rho^2$ ， $m=\frac{G}{g}$ ，所以 $GD^2=4G\rho^2$ ）。一些几何形状不规则的部件，可先设法分成几个形状简单的部分，进行上述计算，然后把各部分的 GD^2 加起来，求出整个部件的 GD^2 。对于一些常见的齿轮、抱闸轮和飞轮等，也可以根据它的外径和重量进行估算，常用的经验公式如下：

$$\text{齿轮的飞轮矩 } GD_{ch}^2 \approx 0.6 \times G_{ch} \times D_j^3 \quad \text{N} \cdot \text{m}^2$$

其中 G_{ch} ——齿轮的重量 (N)；

D_j ——齿轮的节圆直径(m)。

$$\text{飞轮的飞轮矩 } GD_f^2 \approx 0.65 \times G_f \times D_j^3 \quad \text{N} \cdot \text{m}^2$$

其中 G_f ——飞轮的重量 (N)；

D_j ——飞轮的外径(m)。

因为 $4g \times 60/2\pi = 375 (\text{m/s}^2)$ ，所以式1-8中的“375”是具有加速度量纲的常数。

再看正方向的规定。一般习惯上规定转速 n 对观察者顺时针为正；转矩 M 与 n 的正方向相同为正；负载转矩 M_{fz} 与 n 的正方向相反为正。将 $+n$ 、 $+M$ 、 $+M_{fz}$ 表示在轴的剖面图和直角坐标系上，如图1-3所示。

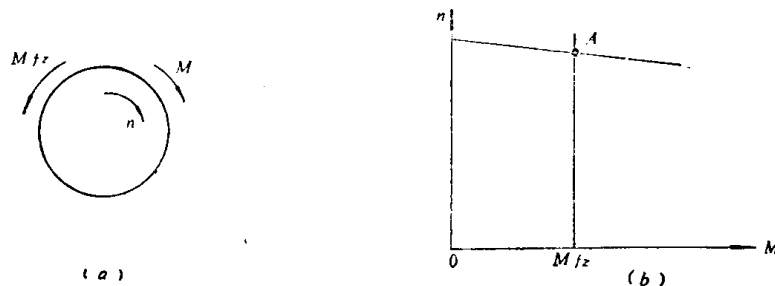


图 1-3 转速 n 、转矩 M 、负载转矩 M_{fz} 的正方向

a—轴的剖面图；b—直角坐标系

明确了各量的物理意义及各量正方向的规定，下面再说明一下如何应用运动方程式来判断电力拖动系统的运行状态。当 $M=M_{fz}$ 时， $dn/dt=0$ ，系统处于静态，此时转速 $n=0$ 或 $n=常数$ ，即系统静止或以恒定转速运行。当 $M>M_{fz}$ 时， $dn/dt>0$ ，转速 n 随着时间 t 的增加而增加，即系统处于加速状态。反之，当 $M<M_{fz}$ 时，系统处于减速状态，此时若 $n=0$ ，系统仍静止不动。不管是加速状态还是减速状态，电力拖动系统的转速都在变化，相对于转速 n 恒定不变的静态来讲，统称为动态。因此，只要 $M \neq M_{fz}$ ，系统就处于动态。

当 $M - M_{fz} = \text{常数}$ 时，系统处于匀加速或匀减速运动状态。其加速度和减速度的大小都与系统的飞轮矩 GD^2 的大小成反比。系统的惯性越大，转速的变化越小；惯性越小，则转速的变化越大。这正是将 M_g 称为惯性转矩的原因所在。

为了很好地掌握和运用运动方程式，研究电力拖动系统的各种运行状态，还要对其中的转矩 M 和负载转矩 M_{fz} 进行深入的研究。 M 是电动机的转矩，它和转速 n 的关系是电动机很重要的特性，在第二章中要专门研究，下面对负载转矩 M_{fz} 进行分析。

1.1.3 负载转矩

广义的负载转矩是指生产机械的负载转矩 M_{fz} 与生产过程中的某些因素，例如转速、行程、时间等的关系。而在电力拖动系统中，为了使电动机的机械特性与负载转矩特性相配合，研究电动机的各种运行状态所涉及到的负载转矩特性，是指负载转矩 M_{fz} 与转速 n 的关系。在此定义下，典型的负载转矩特性有如下几种。

1.1.3.1 恒转矩负载特性

所谓恒转矩负载特性，是指负载转矩 M_{fz} 与其转速 n 无关。无论转速 n 如何变化，负载转矩始终保持为常数。在恒转矩负载中，又分为反抗性恒转矩负载和位能性恒转矩负载两种。

反抗性恒转矩负载 反抗性恒转矩负载的转矩作用方向总是阻碍运动的方向，因此随转速方向改变而改变。摩擦类负载的转矩就具有这种性质。当外加转矩使系统向某一个方向旋转时，摩擦转矩就阻碍系统旋转；当外加转矩方向改变，使系统朝和原来旋转方向相反的方向旋转时，则摩擦转矩的方向也随之反过来，仍阻碍系统的旋转。所以，正的反抗性恒转矩负载特性位于第一象限；负的反抗性恒转矩负载特性位于第三象限。当转速 $n = 0$ 时，即外加转矩不足以使系统运动时，根据作用力与反作用力原理，这时反抗性负载转矩的大小和方向决定于外加转矩的大小和方向，即与外加转矩大小相等、方向相反。此间负载转矩特性与横轴重合。

根据以上分析，可以得到如图1-4a所示的反抗性恒转矩负载特性。当电动机拖动反抗性恒转矩负载正转时，转速 n 、转矩 M 、负载转矩 M_{fz} 全为正，它们的方向如图1-4b所示。

属于这一类的生产机械如起重机的吊车、小车移行机构，皮带运输机，龙门刨床的传动系统，机床刀架平移机构等。

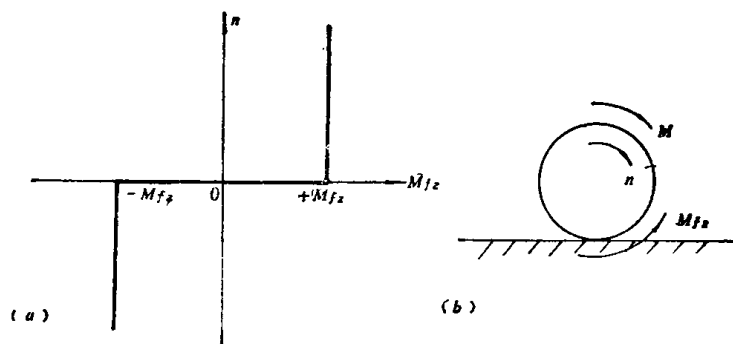


图 1-4 反抗性恒转矩负载特性及其正方向

a—反抗性恒转矩负载特性；b—负载转矩正方向

位能性恒转矩负载 因为位能性恒转矩负载的转矩是受重力作用产生的，所以它具有固定不变的方向，其方向不随转速方向的改变而改变。

最典型的位能性负载是起重机的提升机构。不论是提升重物还是下放重物，重力的作用方向总是向下的，重力产生的位能性转矩的方向是固定不变的。因此，位能性恒转矩负载的转矩特性是贯穿第一、四象限的一条直线，如图1-5所示。

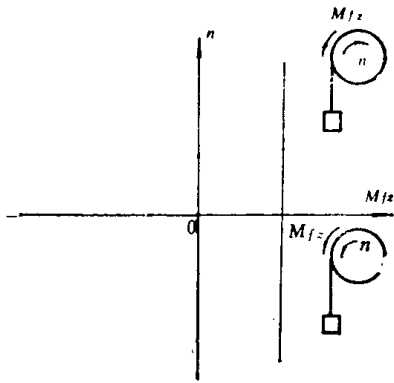


图 1-5 位能性恒转矩特性

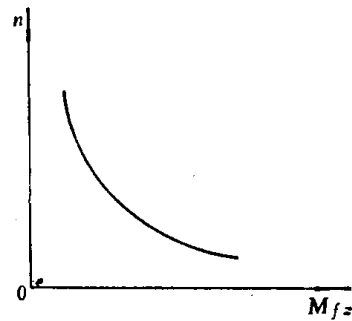


图 1-6 恒功率负载特性

1.1.3.2 恒功率负载

所谓恒功率负载，是当转速 n 变化时，从电动机吸收的功率基本不变。负载从电动机吸收的功率也就是电动机轴上输出的功率 P_2

$$\because P_2 = M_{fz} \Omega = \text{常数}$$

$$\therefore M_{fz} = \frac{P_2}{\Omega} = P_2 \frac{60}{2\pi n}$$

因 P_2 为常数，所以负载转矩应该随着转速 n 的增加而减小，即 M_{fz} 与 n 成反比。其负载转矩特性如图1-6所示。

典型的恒功率负载有车床的主轴机构和轧钢机的主传动。车床在进行粗加工时，切削量比较大，切削阻力比较大，即负载转矩大。宜用低速加工。到精加工时，为使工件的表面光洁度好，切削量要小，切削阻力小，即负载转矩小。这时一般都进行高速切削。这样在不同的转速下，负载转矩 M_{fz} 就近似与转速 n 成反比 ($M_{fz} = K/n$)，即切削功率 P_{fz} 为

$$P_{fz} = M_{fz} \Omega = \frac{K}{n} \times \frac{2\pi n}{60} = \text{常数}$$

因此负载从电动机得到的功率近似不变。

1.1.3.3 风机类负载

属于这类的负载有离心式鼓风机、水泵、油泵等，其中空气、水、油等介质对机器中的叶片之阻力基本上和转速的平方成正比，即

$$M_{fz} = Kn^2$$

式中 K 为比例系数。其负载转矩特性如图1-7中实线所示。

以上是几种典型的负载转矩特性。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，实际的鼓风机由于轴承上有一定的摩擦转矩 M_m ，是反抗

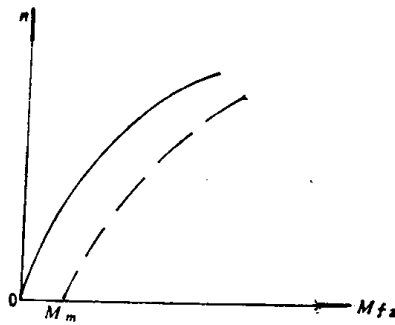


图 1-7 风机类负载特性

性负载性质的,要由外加转矩克服了这个 M_m 后,才能使鼓风机转动。因此实际的鼓风机负载转矩为

$$M_{fz} = M_m + Kn^2$$

其负载转矩特性如图1-7中虚线所示。再如起重机的提升机构,除位能转矩外,系统也存在摩擦转矩,因此实际提升机构的负载转矩特性是反抗性负载和位能性负载两种典型特性的综合(详见2.7节)。

1.2 多轴电力拖动系统运动方程式

1.1节中介绍的是单轴电力拖动系统运动方程式,实际的电力拖动系统中,一般生产机械为满足其工艺要求,需要较低的转速。而电动机为了节省材料,一般转速都比较高。因为电动机的功率 $P = M\Omega$,为保证一定的输出功率,当 $P = \text{常数}$, Ω 值小,即转速低时, M 值要大,即磁通 Φ 和电枢电流 I_a 要大。电动机的每极磁通 Φ 大,意味着所用的铁磁材料多;电流大,意味着电枢导线粗,即消耗的有色金属多。所以,为了节省铁磁材料和有色金属,一般电动机转速都比较高。这点也可以从电动机设计的阿诺德公式加以说明。根据电机设计部门提供的资料,存在着下列关系

$$P = CD^2ln$$

式中 C ——阿诺德常数,它与电机的电磁参数(线负荷与磁密)有关;

D ——电动机的电枢直径;

l ——电枢的有效长度;

n ——电动机的转速。

电动机的重量 G 和体积成正比,也有 $G \propto D^2l$ 的关系。由此可看出,提高电动机的转速 n ,就可以减小电机的体积。因此,一般都希望制造转速较高的电机。所以,电动机和生产机械之间必须装设减速机构,例如齿轮减速箱、蜗轮蜗杆、皮带等。图1-8a所示是在电动机和生产机械之间设齿轮减速箱的电力拖动系统示意图。由图可以看出,在电动机和生产机械之间要经过多根轴传动,所以生产实践中的电力拖动系统多为多轴电力拖动系统。

对于多轴电力拖动系统,如果用单轴系统运动方程式研究其运动情况的话,则需要对每根轴分别写出运动方程式,再列出各轴间相互关系的方程式,消去中间变量,联立求解。显然这是很麻烦的。而对电力拖动系统,一般不须详细研究每根轴的问题,而只须研

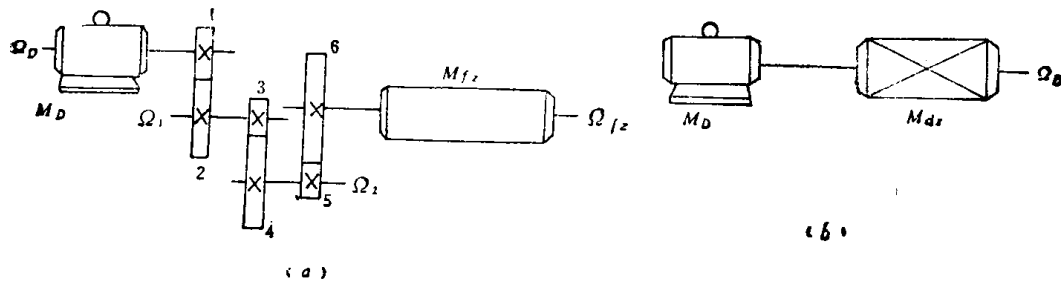


图 1-8 多轴拖动系统折算成单轴拖动系统
a—多轴系统；b—单轴系统

究电动机轴。因此，为简单起见，采用了折算的办法。将多轴电力拖动系统折算成单轴电力拖动系统，即将转动惯量和负载转矩折算到一根轴上去，然后再分析其运动情况。例如，把图1-8 a 的多轴系统等效成图1-8 b 的单轴系统。这样便可利用单轴系统的运动方程式来分析多轴系统的运动情况，所以多轴系统运动方程式和单轴系统运动方程式形式上是一样的，只是式中的 M_{fz} 是折算后的等效负载转矩 M_{dx} ， GD^2 是折算后的系统总的等效飞轮矩 GD_x^2 而已。因此，应重点研究负载转矩和飞轮矩的具体折算方法。折算的原则是保证两个系统传送的功率和储存的动能相同。原则上向哪根轴折算都可以，但是由于我们研究的对象是电动机，而且电动机轴一般是高速轴，根据传送功率不变的原则，高速轴上的负载转矩数值小。因此，一般多向电动机轴进行折算。

1.2.1 负载转矩和直线力的折算

1.2.1.1 负载转矩的折算（多轴旋转系统折算成等效的单轴旋转系统）

由能量守恒定律可知，负载转矩的折算原则应该是：折算前后系统传送的功率不变。也就是说，在多轴系统中，负载转矩所消耗的功率应该和单轴系统中等效负载转矩消耗的功率相等。在图1-8 a 中，当不考虑系统的损耗时，有

$$M_D \Omega_D = M_{fz} \Omega_{fz}$$

考虑系统的传动损耗时，在电动机处于电动状态时，损耗由电动机承担。所以，应将电动机功率乘以一个小于1的系数 η_c （ η_c 为传动效率），即

$$\eta_c M_D \Omega_D = M_{fz} \Omega_{fz}$$

$$\therefore M_D \Omega_D = \frac{M_{fz} \Omega_{fz}}{\eta_c} \quad (1-9)$$

从式1-9看出，由于系统实际上有损耗，要适当加大电动机的输出功率，才能保证负载得到的功率不变。

设折算成单轴系统后的等效转矩为 M_{dx} ，则在图1-8 b 中

$$M_D \Omega_D = M_{dx} \Omega_D \quad (1-10)$$

根据折算原则，有

$$M_{dx} \Omega_D = \frac{M_{fz} \Omega_{fz}}{\eta_c}$$

所以，等效转矩 M_{dx} 为

$$M_{dx} = M_{fz} \frac{\Omega_{fz}}{\Omega_D} \times \frac{1}{\eta_c} = M_{fz} \frac{1}{j\eta_c} \quad (1-11)$$

式中 $j = \frac{\Omega_D}{\Omega_{fz}}$ ——系统的传速比。

如已知各级的传速比或齿轮齿数，可做如下变换

$$M_{dx} = M_{fz} \frac{\Omega_1}{\Omega_D} \frac{\Omega_2}{\Omega_1} \frac{\Omega_{fz}}{\Omega_2} \frac{1}{\eta_c}$$

由此可得

$$M_{dx} = M_{fz} \frac{n_1}{n} \frac{n_2}{n_1} \frac{n_{fz}}{n_2} \frac{1}{\eta_c} \quad (1-12)$$

$$M_{dx} = M_{fz} \frac{1}{j_1 j_2 j_{fz} \eta_c} \quad (1-13)$$

式中 n 、 n_1 、 n_2 、 n_{fz} ——分别为电动机轴、第一根轴、第二根轴及负载轴的转速；
 j_1 、 j_2 、 j_{fz} ——各级的传速比。

当一对齿轮互相啮合，同时旋转时，如图1-8a中的齿轮3和齿轮4，其齿数 Z 和转速 n 的关系为

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{Z_4}{Z_3}$$

因此可得

$$M_{dx} = M_{fz} \frac{Z_1}{Z_2} \frac{Z_3}{Z_4} \frac{Z_5}{Z_6} \frac{1}{\eta_c} \quad (1-14)$$

式中 $Z_1 \sim Z_6$ ——各齿轮齿数。

当已知总传速比、各轴转速、各级传速比或齿轮齿数时，可分别用式1-11、式1-12、式1-13、式1-14计算等效转矩 M_{dx} 。

若电动机工作在制动状态，如提升机构下放重物时，为使下放速度不致过快，应该使电动机工作在制动状态，产生一个与转速方向相反的转矩，与负载转矩相平衡，保证以恒定的转速下放重物。这时，负载为原动力，由工作机构向电动机传送功率，因此系统的损耗应该由工作机构承担。此时等效转矩的公式为

$$M_{dx} = M_{fz} \frac{\eta_c}{j} \quad (1-15)$$

同样也可以导出与式1-12~式1-14相类似的公式。

1.2.1.2 直线作用力的折算

在提升机构中，如果不知道负载转矩，而是已知直线作用力 F_{fz} ，如图1-9所示，此时有两种处理方法。一是将直线作用力 F_{fz} 乘以卷筒半径与钢绳半径之和，得到负载转矩 M_{fz} ，再按负载转矩公式折算。另一方法是将直线作用力直接进行折算。下面推导直线作用力的折算公式。

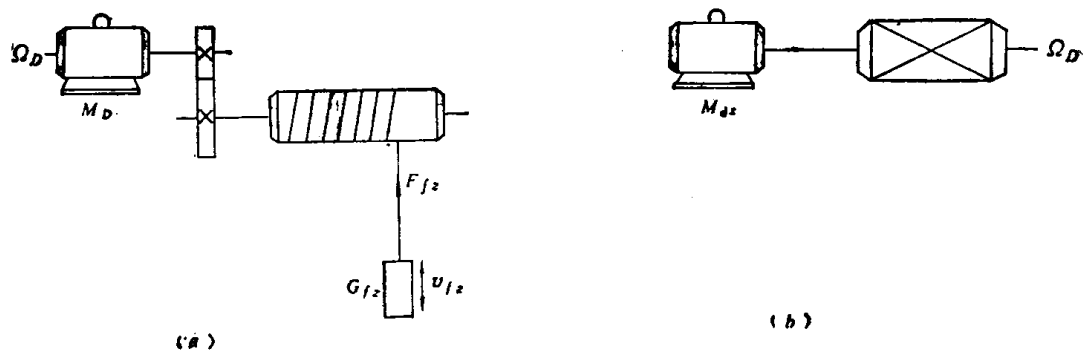


图 1-9 直线运动系统折算成单轴系统

a—直线运动系统；b—单轴系统

当电动机工作在电动状态时（如提升重物），有

$$M_D \Omega_D = \frac{F_{fz} v_{fz}}{\eta_c^t} = M_{dx} \Omega_D$$

$$M_{dx} = F_{fz} \frac{v_{fz}}{\Omega_D} \frac{1}{\eta_c^t}$$

再将 Ω_D 换成电动机的转速 n ，于是

$$M_{dx} = 9.55 \frac{F_{fz} v_{fz}}{n \eta_c^t} \quad (1-16)$$

式中 F_{fz} ——工作机构的直线作用力 (N)；

v_{fz} ——重物提升速度 (m/s)；

n ——电动机的转速 (r/min)。

当电动机工作在制动状态（如下放重物）时，有

$$M_{dx} = 9.55 \frac{F_{fz} v_{fz}}{n} \eta_c^t \quad (1-17)$$

1.2.2 转动惯量的折算

图1-10是一个提升机构的示意图。在此系统中，各级齿轮和卷筒的转动惯量和作直线运动的重物质量都要进行折算。现分别进行研究。

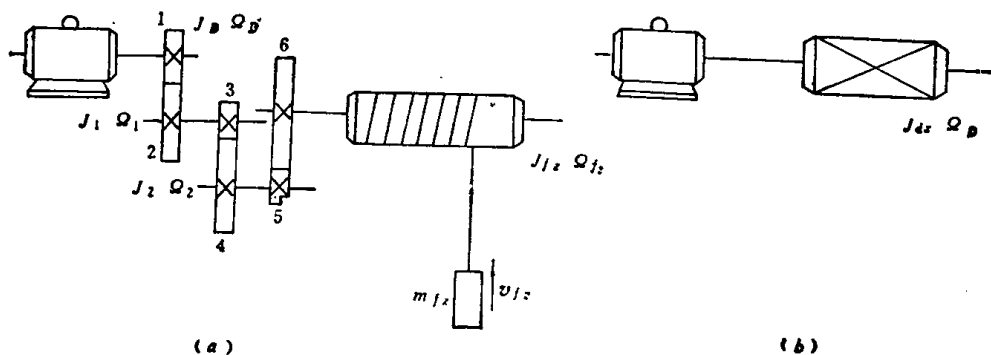


图 1-10 提升机构飞轮矩 GD^2 的折算

a—多轴系统；b—单轴系统