

高等学校教材

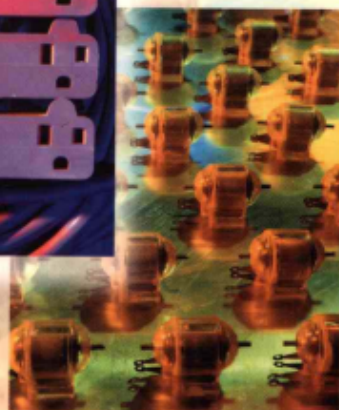
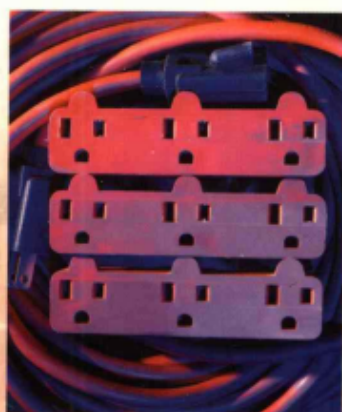
电机控制

主编 孙殿忠 贾景贵 毕国忠



吉林科学技术出版社

责任编辑/李红梅
封面设计/何 欢



ISBN 7-5384-2552-7



9 787538 425529 >

定价:32.00 元

电 机 控 制

孙殿忠 贾景贵 毕国忠 主编

吉林科学技术出版社

电机控制

孙殿忠 贾景贵 毕国忠 主编

责任编辑:张瑛琳 李红梅

封面设计:何 欢

出版 吉林科学技术出版社 787 × 1092 毫米 16 开本 19.5 印张 462 000 字
发行 2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月第 1 次印刷
印刷 吉新月历公司印刷分公司 ISBN 7-5384-2552-7/TM · 22 定价:32.00 元

社址 长春市人民大街 124 号 邮编 130021

传真 5635185

电子信箱 JLKJCBS@public.cc.jl.cn

电话 5635183

前 言

本教材是根据专业结构的调整需要和高等学校电气工程及自动化专业的教学大纲编写的。

在现代化的生产过程中，利用电动机作为生产机械的原动机，已在各行业中得到广泛的应用。因此，本书重点叙述直流拖动、交流拖动两大类拖动基础，详尽阐明了直流电动机、交流电动机的各种运行原理及特性。结合专业特点，编者力图将电机拖动基础与电动机的控制方式有机的结合起来融为一体，使学生在学的过程中就能够形成完整的专业思想体系。

本书包括主要内容：直流电机拖动，交流电机拖动，电机容量选择，交、直流电机控制系统。并且每章都附有习题、思考题及典型应用设计范例，供读者课后练习和参考。本书也可供相关专业的工程技术人员参考与借鉴。

本教材共分为八章。第一、二、三章由孙殿忠编写。第四章由贾景贵编写。第五章、第八章由毕国忠编写。第六、七章由曲萍萍、贾景贵共同编写。该书由孙殿忠、贾景贵、毕国忠担任主编。全书由北华大学电气工程学院弭洪涛副教授主审。

由于编者学识水平有限，加之编写时间仓促，书中错误或不当之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者
2002 年 1 月

目 录

第一章 电力拖动系统动力学基础	(1)
第一节 拖动系统的运动方程	(1)
第二节 多轴电力拖动系统转矩与飞轮力矩的折算	(3)
第三节 生产机械的负载特性及电力拖动系统的稳定运行	(8)
思考题及习题	(12)
第二章 直流电动机的电力拖动	(15)
第一节 他励直流电动机的机械特性	(15)
第二节 串励和复励电动机机械特性	(23)
第三节 他励电动机的起动	(24)
第四节 他励电动机的制动	(30)
第五节 各种制动方法比较及能量关系	(40)
第六节 他励电动机的调速	(44)
第七节 G - M 系统	(55)
思考题及习题	(59)
第三章 电力拖动系统的过渡过程	(66)
第一节 他励电动机过渡过程的数学分析	(66)
第二节 他励电动机起动过渡过程	(68)
第三节 他励电动机能耗制动的过渡过程	(73)
第四节 他励电动机电源反接制动的过渡过程	(75)
第五节 他励电动机考虑电枢电感的起动过渡过程	(78)
第六节 G - M 系统电动机起动过渡过程	(83)
思考题及习题	(86)
第四章 直流电机控制系统	(87)
第一节 直流电动机系统及基本概念	(87)
第二节 VT - M 开环控制系统的机械特性	(94)
第三节 VT - M 转速负反馈有静差直流调速系统	(97)
第四节 VT - M 转速负反馈有静差直流调速系统的静态设计	(104)
第五节 电压负反馈直流调速系统	(111)
第六节 单闭环无静差调速系统	(116)
第七节 转速、电流双闭环直流调速系统	(122)
第八节 电流断续对动特性影响及解决方法	(128)
第九节 直流可逆调速系统及控制	(132)
思考题及习题	(145)

第五章 直流电机控制系统的工程设计方法	(148)
第一节 典型系统的性能指标和参数关系	(149)
第二节 系统的校正——调节器设计	(158)
第三节 双闭环不可逆控制系统设计	(165)
第四节 数字式直流调速系统	(177)
思考题及习题	(183)
第六章 三相异步电动机的电力拖动	(185)
第一节 三相异步电动机的机械特性	(185)
第二节 三相异步电动机的起动	(192)
第三节 异步电动机起动时间的计算	(208)
第四节 三相异步电动机的制动	(211)
第五节 异步电动机起、制动过程能量损耗	(222)
第六节 三相异步电动机的调速	(223)
思考题及习题	(238)
第七章 交流电机控制系统	(241)
第一节 交流调压调速系统	(241)
第二节 绕线式异步电动机的串级调速系统	(251)
第三节 异步电动机变频调速系统	(258)
第四节 通用变频器及应用	(263)
思考题及习题	(275)
第八章 电动机的选择	(277)
第一节 电动机的一般选择	(277)
第二节 电动机的发热和冷却	(280)
第三节 长期恒定负载运行时电动机容量的选择	(284)
第四节 长期变动负载运行时电动机容量的选择	(287)
第五节 短时负载运行时电动机容量的选择	(291)
第六节 重复短时工作制电动机容量的选择	(294)
第七节 鼠笼型电动机允许接电次数的确定	(298)
思考题及习题	(299)
参考文献	(304)

第一章 电力拖动系统动力学基础

电力拖动系统是指应用各种电动机作为各类生产机械的原动机,即用电动机拖动生产机械以完成一定生产任务的系统。一般情况下,电力拖动系统是由电动机、生产机械、传动装置、控制设备及电源等五个部分组成,如图 1-1 所示。

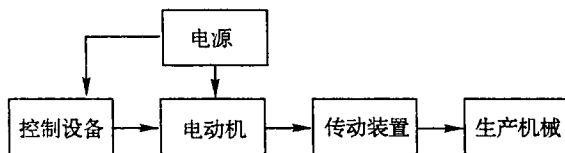


图 1-1 电力拖动系统示意图

在系统中,电动机的主要任务是把电能转换成机械能,用其拖动生产机械进行工作,它是电力拖动系统中的主要设备。传动装置是电动机及生产机械两者间的传动设备,三者构成一个完整的机电运动的整体。控制设备是由各种控制电机、电器及自动化元件或工业控制计算机等组成,其作用是用以控制电动机的运转,从而满足生产机械的运动规律,实现自动控制。在电力拖动系统中还必须设有交、直流电源,其作用是向电动机及控制设备供电。

本课程主要任务,研究电动机及其拖动的生产机械(视为电动机的负载)静态与动态的特性。由于电力拖动系统是一个机、电统一的运动系统,运动中必然涉及一些力学方面的问题。本章以讨论拖动系统的运动方程为中心,进而阐明转矩与飞轮力矩的计算,电动机及生产机械的机械特性和系统的静态稳定等问题。

第一节 拖动系统的运动方程

如图 1-2 所示的直线运动系统中,当外力 F (作用力) 大于物体运动过程中所受到的阻力 F_z 时,由运动力学可知,当物体作加速运动时,作用到物体上的合力应为:

$$F - F_z = ma = m \frac{dv}{dt} \quad (1-1)$$

式中 F ——驱动力,牛顿(N);

F_z ——阻力,牛顿(N);

$ma = m \frac{dv}{dt}$ ——使物体加速的惯性力,又称动态力;

m ——物体质量,千克(kg);

$a = \frac{dv}{dt}$ ——物体加速,米/秒²(m/s²)。

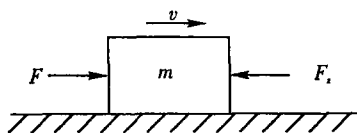


图 1-2 直线运动系统

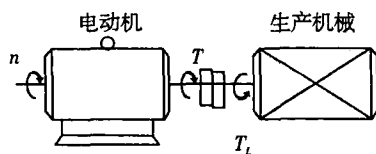


图 1-3 单轴电机拖动系统

与物质作直线运动相似,在图 1-3 所示的单轴电机拖动的旋转系统中,运动方程式应为:

$$T - T_f = T_d = J\alpha = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-2)$$

式中 T ——电动机的驱动转矩即电磁转矩, $\text{N}\cdot\text{m}$;

T_f ——系统的静阻(态)转矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; 静态转矩为负载转矩与电动机空载转矩之和 $T_f = T_L + T_0$;

$T_d = J \frac{d\Omega}{dt}$ ——系统的惯性转矩, 又称动态转矩, $\text{N}\cdot\text{m}$;

J ——系统的旋转惯量, 千克·米² ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$);

$\alpha = \frac{d\Omega}{dt}$ ——系统的旋转角加速度, rad/s^2 ;

Ω ——系统的旋转角速度, rad/s 。

公式(1-2)为单轴拖动系统以转矩表示的运动方程式和公式(1-1)一样,实质上是旋转运动系统的牛顿第二定律。此式在工程上应用不太方便,须将其转化为实用形式。由工程力学可知

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

式中 g ——重力加速度, $g = 9.81\text{m/s}^2$

G ——系统旋转部件的重量, N ;

ρ ——旋转部件的折算半径, m ;

D ——系统旋转部件的折算半径, m 。

系统旋转角速度 Ω 与转速 n 的关系为

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

将 J 及 Ω 值代入公式(1-2),经整理得

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

公式(1-4)是以后经常用到的运动方程式,它表征了电力拖动系统运动的普遍规律,是研究电力拖动系统各种运行状态的基础。

需要特别指出的是: GD^2 是表示整个系统惯性的整体物理量,切不可将其割裂开理解为系统中旋转部件的重量与它几何直径平方的乘积。通常将 GD^2 称为飞轮惯量或飞轮力矩,单位为牛·米² ($\text{N}\cdot\text{m}^2$)。电动机转子及其他机械传动部件的飞轮力矩 GD^2 数值,可从相应的产品目录或有关手册查得。另外,目前 GD^2 的单位有的还用 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 的,为了化为国际单位制,可将查

得的数据乘以 9.81 即可换算成 $\text{N}\cdot\text{m}^2$ 的单位。

在一般情况下,由于电动机的空载转矩只是额定负载转矩的百分之几,所以在一般工程计算中可略去 T_0 ,既 $T_{\beta} = T_L$ 。这样公式(1-4)也可以表示为

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-5)$$

从式(1-5)可以看出,电力拖动系统运行可分为三种状态:

(1)当 $T > T_{\beta} = T_L$ 时, $T_{\alpha} > 0$ 即 $\frac{dn}{dt} > 0$, 系统作加速运动,电动机将从电网吸收电能,转换为旋转系统的动能,使系统的动能增加;

(2)当 $T < T_{\beta} = T_L$ 时, $T_{\alpha} < 0$ 即 $\frac{dn}{dt} < 0$, 此时电力拖动系统作减速运动,系统将放出动能,使系统的动能减少,则电机吸收系统的动能转换成电能反馈回电网。

(3)当 $T = T_{\beta} = T_L$ 时, $T_{\alpha} = 0$ 即 $\frac{dn}{dt} = 0$, 此时 $n = \text{常数}$, 系统处于稳定运行(或静止)状态。

由于电动机的运行状态不同,以及生产机械的类型、工艺不同,电动机的电磁转矩并不是在任何情况下都是驱动转矩,有时会转化为制动转矩(相对旋转系统来说为阻转矩);同样,负载转矩也不能视为任何运行状态下都为阻转矩,在有些运行状态下,其同样也可以转化为驱动转矩。也就是说:电磁转矩与负载转矩它们随之运行状态的不同而数值大小变化,而且作用方向也会变化。所以公式(1-5)中 T 与 T_L 是含有正负号的。一般作如下规定:

预先规定某一旋转方向(如图 1-4 所示顺时针方向)为正方向,则电磁转矩 T 正方向与旋转正方向相同,负载转矩 T_L 的正方向与旋转正方向相反。当 T 与 T_L 的实际方向与规定正方向相同时则以正值代入方程;反之,则应以负值代入。

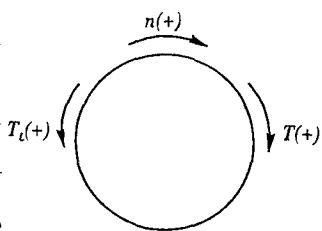


图 1-4 T 与 T_L 的正方向

第二节 多轴电力拖动系统转矩与飞轮力矩的折算

在前一节中只是对单轴电力拖动系统的运动方程式作了介绍。但是在工业企业中的实际生产过程中,更多的生产机械是经多轴传动的电力拖动系统。这是因为许多生产机械为满足其生产工艺过程的要求,往往需要较低的转速,而电动机的转矩有如下关系:

$$T = 9.55 \frac{P_M}{n_N} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = \frac{1}{\pi} pN \Phi i_a \quad (1-6)$$

由上式可以看出,相同容量的电动机中,转速越高,则转矩越小,电动机的全磁通和电枢安培导线数越小,从而减小金属材料的消耗量,降低电机的制造成本。由于电动机宜选取较高的转速,电动机与生产机械的额定转速常常不能一致。因此电动机不能直接与生产机械连接,而需要在两者之间安装减速装置进行传动,从而构成了多级减速的多轴电力拖动系统。

图 1-5a 所示为一多轴电力拖动系统,它由 4 根传动轴所构成,在不同的轴上各具有其本身的转速、转矩及转动惯量。这种系统虽然要比单轴系统复杂,要全面研究每根轴的问题更为

繁杂。而电力拖动系统主要的研究对象是电动机,既只需要研究电动机轴上的物理量。为此,我们引用折算的概念,既把一个实际为多轴的传动系统,将其转换成一个等值的单轴系统。所谓“等值”是指折算原则要保持两个系统传送的功率及储存的动能应相同。

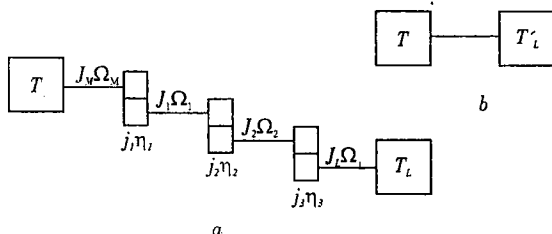


图 1-5 多轴电力拖动系统折算示意图

a—多轴拖动系统;b—等值的单轴系统

一、旋转运动系统负载转矩的折算

如图 1-5a 所示,设作用在生产机械轴上的实际负载转矩为 T_L ,现在我们用电机轴上等值负载转矩 T'_L (图 1-5b) 来代替它。

1. 电动机工作在电动运行状态

此时由电动机带动生产机械,功率是由电动机向生产机械传送,电动机输出的机械功率为 $T'_L \Omega_M$;而生产机械接收的功率为 $T_L \Omega_L$ 。考虑传动机械的损耗,电动机向生产机械输出的净功率应为 $\eta_c T'_L \Omega_M$ 。按照传送功率不变的原则,应有如下的关系

$$\eta_c T'_L \Omega_M = T_L \Omega_L$$

所以可以得到

$$T'_L = \frac{T_L \Omega_L}{\eta_c \Omega_M} = T_L \frac{1}{\eta_c (\Omega_M / \Omega_L)} = T_L \frac{1}{\eta_c j} \quad (1-7)$$

式中 Ω_L ——生产机械的旋转角速度;

Ω_M ——电动机的旋转角速度; $\Omega_M = \frac{2\pi n_M}{60}$

T_L ——生产机械的实际负载转矩;

T'_L ——生产机械负载转矩折算到电动机轴上的等值负载转矩;

$j = \Omega_M / \Omega_L = n_M / n_L$ ——传动机构总的转速比,写成一般形式为 $j = j_1 \cdot j_2 \cdot j_3 \cdots$,既等于各级转速比的乘积;

η_c 为系统的传送总效率,其值应为各级传送效率的乘积。既 $\eta_c = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdots$ 。

2. 电动机工作在制动运行状态

此时由生产机械带动电动机,功率传送方向与电动运行状态时相反,既由生产机械向电动机传送。传送功率过程中的损耗由生产机械承担。传送到电动机轴上的功率比生产机械轴上的功率要小些。因此

$$\begin{aligned} T'_L \Omega_M &= \eta_c \cdot T_L \cdot \Omega_L \\ T'_L &= T_L \cdot \eta_c \cdot \Omega_L / \Omega_M = T_L \cdot \eta_c \cdot \frac{1}{j} \end{aligned} \quad (1-8)$$

不同种类的传动机构,每级效率是不同的。例如:每对齿轮(用滚动轴承)的效率为 0.975~0.985,而采用蜗轮蜗杆传动,其效率仅为 0.5~0.7,这些数据可由机械工程手册中查得。

二、旋转系统飞轮力矩的折算

如图 1-5a 所示的多轴传动系统中,必须将传动机构各轴的转动惯量 J_1 、 J_2 、 J_3 …及生产机械旋转机构的转动惯量 J_L 折算到电动机轴上,用电动机轴上一个等值的转动惯量 J 来代替整个拖动系统转速不同的各轴的转动惯量的影响。转动惯量的折算原则是折算前后系统储存的动能不变。根据折算原则可以得到:

$$\frac{1}{2} J \Omega_M^2 = \frac{1}{2} J_M \Omega_M^2 + \frac{1}{2} J_1 \Omega_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \Omega_2^2 + \cdots + \frac{1}{2} J_L \Omega_L^2$$

两边除以 $\frac{1}{2} \Omega_M^2$, 则有:

$$J = J_M + J_1 \left(\frac{\Omega_1}{\Omega_M} \right)^2 + J_2 \left(\frac{\Omega_2}{\Omega_M} \right)^2 + \cdots + J_L \left(\frac{\Omega_L}{\Omega_M} \right)^2 = J_M + J_1 \frac{1}{j_1^2} + J_2 \frac{1}{j_2^2} + \cdots + J_L \frac{1}{j_L^2} \quad (1-9)$$

式中 $j_1 = \frac{\Omega_M}{\Omega_1}$, $j_2 = \frac{\Omega_M}{\Omega_2}$... $j_L = \frac{\Omega_M}{\Omega_L}$

要把公式(1-9)转换为飞轮力矩 GD_1^2 、 GD_2^2 ...形式,可将 $J = \frac{GD^2}{4g}$ 及 $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ 代入公式(1-9),便得到折算到电动机轴上的系统总的飞轮力矩为:

$$GD^2 = GD_M^2 + \frac{GD_1^2}{j_1^2} + \frac{GD_2^2}{j_2^2} + \cdots + \frac{GD_L^2}{j_L^2} \quad (1-10)$$

在一般情况下,传动机构的飞轮力矩 GD_1^2 、 GD_2^2 ...等,折算后占整个系统的飞轮力矩的比重并不大。所在在实际工作中为了计算方便起见,多采用适当加大电动机轴上的飞轮力矩的方法,来考虑传动机构的飞轮力矩,这样近似得到系统总的飞轮力矩为

$$GD^2 = \delta GD_M^2 + GD_L^2 \frac{1}{j_L^2} \quad (1-11)$$

式中 一般取 $\delta = 1.1 \sim 1.25$ 。

三、直线运动系统中负载转矩的折算

直线运动系统可分为平移运动系统(例如龙门刨床的工作台)和升降系统(例如起重机的提升机构)两种。今以图 1-6 所示的起重机的提升机构为例,说明做直线运动系统负载转矩的折算。

设提升机构的钢绳以力 F_L 吊质量为 m_L 的重物 G_L ,以线速度 v_L 匀速提升或下降。下面分别讨论提升、下降运行时作用到电动机轴上负载转矩的折算方法。

1. 电机工作在电动运行状态(提升重物)

根据折算原则并考虑传动装置的损耗,同样可以得到

$$T'_L \Omega_M = \frac{F_L v_L}{\eta_c} \quad (1-12)$$

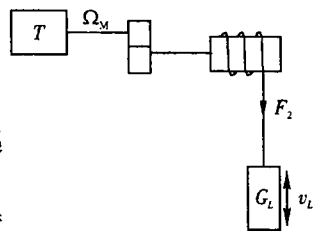


图 1-6 起重工作机构示意图

将 $\Omega_M = \frac{2\pi n_M}{60}$ 代入上式, 经整理可得折算到电动机轴上的等值负载转矩

$$T'_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n_M \cdot \eta_c} \quad (1-13)$$

式中 F_L ——工作机构直线作用力(N);

v_L ——重物提升线速度(m/s);

n_M ——为电动机的转速(r/min);

η_c ——提升的传动效率;

T'_L ——力 F_L 折算为电动机轴上的负载转矩(N·m)。

2. 电机工作在制动运行状态(例如限速下放重物)

电动机工作在制动运行时, 功率是由负载向电动机传送的, 而传动机构的损耗是由负载承担的, 这时负载做用的直线力折算到电动机轴上的等值负载转矩为

$$T'_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n_M} \eta'_c \quad (1-14)$$

式中 η'_c ——为下放的传动效率。

在提升与下放的传动损耗相同的条件下, 提升与下放的传动效率有如下的关系

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

公式(1-15)可证明如下:

提升重物时, 由电动机向生产机械传送功率, 这时的传动损耗由电动机承担, 传动损耗应为

$$\Delta P = \frac{F_L v_L}{\eta_c} - F_L v_L = F_L v_L \left(\frac{1}{\eta_c} - 1 \right)$$

下放重物时, 由生产机械向电动机传送功率, 传动损耗是由生产机械承担。生产机械提供的系统输入功率为 $F_L v_L$; 设传动损耗不变, 则系统输出功率, 既电动机得到功率为 $F_L v_L - \Delta P$ 。因此下放重物时的传动效率为

$$\eta'_c = \frac{F_L v_L - \Delta P}{F_L v_L} = 1 - \frac{\Delta P}{F_L v_L} = 1 - \left(\frac{1}{\eta_c} - 1 \right) = 2 - \frac{1}{\eta_c}$$

从以上推导过程可知升降运动系统, 提升与下放的传动效率之所以不同, 是由于负载性质决定的。下放重物时, 重力变成拖动系统的驱动力, 这时的动能有可能向电动机反馈。

但在平移系统中, 负载对运动系统的作用力, 其总是与运动方向相反的阻力。功率总是由电动机传送到生产机械, 传动损耗总是由电动机承担, 因此传动效率与运动方向无关。

四、直线运动系统中负载飞轮力矩的折算

以图(1-6)为例, 由于重物作直线运动是由电动机拖动的, 其是整个旋转系统的一部分, 因此必须把重物作直线运动的速度 v_L 及重物的质量 m_L 折算到电动机轴上, 用电动机轴上一个转动惯量为 J'_L 的转动体与之等值。折算的原则是两者储存的动能相等, 既为

$$\frac{1}{2} J'_L \Omega_M^2 = \frac{1}{2} m_L v_L^2$$

把 $J'_L = \frac{GD_L^2}{4g}$ 、 $\Omega_M = \frac{2\pi n_M}{60}$ 及 $m_L = \frac{G_L}{g}$ 代入式得

$$[GD_L^2]' = 365 \frac{G_L v_L^2}{n_M^2} \quad (1-16)$$

整个旋转系统的飞轮力矩则为

$$GD^2 = GD_M^2 + GD_1^2/j_1^2 + GD_2^2/j_2^2 + \cdots + 365 \frac{G_L v_L^2}{n_M^2}$$

与公式(1-11)一样,上式也可以化简为

$$GD^2 = \delta GD_M^2 + 365 \frac{G_L D_L^2}{n_M^2} \quad (1-18)$$

经过上面的折算,在实际的生产当中,一个多轴拖动系统的旋转运动,可以用公式(1-5)单轴系统运动方程式来表达。但是在方程式(1-5)中的 T_L 应为多轴传动系统的负载转矩折算到电动机轴上的等值负载转矩;同理 GD^2 则是折算到电动机轴上的整个旋转运动系统的等值飞轮力矩。

例 1-1 有一三轴传动系统如图 1-7 所示。已知减速齿箱的齿轮齿比为 $Z_2/Z_1 = 3$, $Z_4/Z_3 = 5$, 传动系统的总效率为 $\eta = 0.92$, 各齿轮的飞轮力矩为 $GD_1^2 = 29.43\text{N}\cdot\text{m}^2$, $GD_2^2 = 78.48\text{N}\cdot\text{m}^2$, $GD_3^2 = 49.05\text{N}\cdot\text{m}^2$, $GD_4^2 = 196.2\text{N}\cdot\text{m}^2$, 电动机及生产机械的飞轮力矩分别为 $GD_M^2 = 294.3\text{N}\cdot\text{m}^2$, $GD_L^2 = 451.26\text{N}\cdot\text{m}^2$, 静阻负载转矩为 $T_L = 470\text{N}\cdot\text{m}^2$ 。试求(1)负载转矩折算到电动机轴上的等效转矩为多少?(2)折算到电动机轴上的系统飞轮力矩为多少?

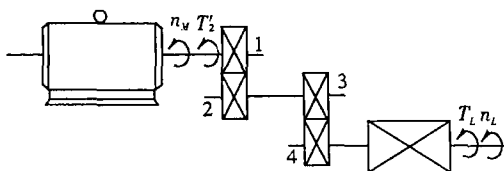


图 1-7 三轴传动系统

解:(1)先计算出电动机轴与生产机械轴的转速比

$$j = \frac{n_M}{n_L} = \frac{n_M}{n_2} \cdot \frac{n_2}{n_4} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{n_3}{n_4} = \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{Z_4}{Z_3} = 3 \times 5 = 15$$

所以得到折算到电动机轴上的等效负载转矩为

$$T'_L = T_L \frac{1}{z\eta} = 470 \times \frac{1}{15 \times 0.92} = 34\text{N}\cdot\text{m}$$

(2)计算旋转系统的飞轮力矩值

从图(1-7)中可知:齿轮 1 与电动机同轴,齿轮 2 与齿轮 3 同轴,齿轮 4 与生产机械同轴联接。所以系统的 GD^2 值应为

$$\begin{aligned} GD^2 &= GD_M^2 + GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{(n_M/n_2)^2} + \frac{GD_4^2 + GD_L^2}{(n_M/n_L)^2} \\ &= GD_M^2 + GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{(Z_2/Z_1)^2} + \frac{GD_4^2 + GD_L^2}{\left(\frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{Z_4}{Z_3}\right)^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 294.3 + 294.3 + \frac{78.48 + 49.05}{3^2} + \frac{196.2 + 451.26}{(3 \times 5)^2} \\
 &= 294.3 + 294.3 + 14.17 + 2.9 \\
 &= 340.8 \text{ N} \cdot \text{m}^2
 \end{aligned}$$

如用近似公式(1-11)计算系统的飞轮转矩则为:(取 $\delta = 1.15$)

$$GD^2 = \delta GD_M^2 + GD_L^2 \frac{1}{J_L^2} = 1.15 \times 294.3 + \frac{196.2 + 451.26}{15^2} = 341.3 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

从近似计算结果可知,计算误差并不大。

第三节 生产机械的负载特性及电力拖动系统的稳定运行

电力拖动系统是由电动机和生产机械两个方面对立物的统一体。系统的运动是由电动机的机械特性和负载的机械特性决定的。只有分别讨论清楚它们各自的特性后,才能够掌握整个系统的运动规律。

一、负载特性

同一转轴上的转速与负载转矩之间的函数关系,称之为生产机械的机械特性,简称为负载特性。在实际的生产当中,大多数生产机械的负载特性主要可以分为以下几种类型。

1. 恒转矩负载特性

这一类负载比较多见,它的负载特性特点是负载转矩下的数值大小与转速 n 无关,即当转速的高低发生变化时,而负载转矩的绝对值大小是恒定不变的。恒转矩负载,常见的例如:起重机、卷扬机、皮带运输机和金属切削车床等。恒转矩负载又可分为反抗性负载转矩和位能性负载转矩两种。

(1) 反抗性恒转矩负载

反抗性负载转矩是由摩擦阻力产生的转矩,它的特点是转矩的作用方向总是与运动方向相反,即为阻碍运动的制动性转矩。如图 1-8a 所示桥式起重机行走机械的行走车轮,在轨道上的摩擦力总是和运动方向相反。负载转矩在第一节中已规定:当它的作用方向与旋转正方向相反时为正。所以如将行走轮逆时针旋转规定为正转时,这时反抗性负载转矩为正。而随着旋转方向改变(n 为负值),则反抗性负载转矩也同时改变符号为负值。其负载特性曲线如图 1-8b 所示。

(2) 位能性恒转矩负载

位能性恒转矩负载是由重力作用产生的。起重机提升或下放重物就属于这种类型。这类负载的特点是工作机构的转矩绝对值大小是恒定的,而转矩的作用方向是固定不变的。当提升过程中,重力的作用形成的转矩作用与运动方向相反,它是阻碍运动的;而在下放过程中,重力的作用方向与运动方向相同,变为促进运动的驱动转矩。图 1-9a 为位能性恒转矩负载的示意图。图 1-9b 为位能性恒转矩负载特性曲线。在 b 图中忽略传动装置的转矩损耗。若规定提升方向为运动正方向,这时 T_L 为正值,当下放重物时, n_L 为负值,而 T_L 方向不变仍为正值。

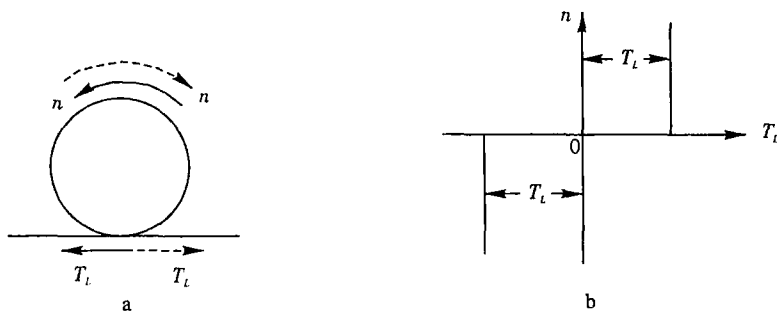


图 1-8 反抗性恒转矩负载特性

a—示意图;b—反抗性负载特性曲线

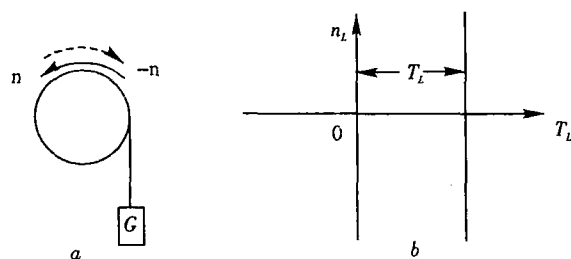


图 1-9 位能性负载转矩特性

a—示意图;b—位能性负载特性曲线

二、恒功率负载

车床在进行切削工件的过程中,就其每次进刀切削转矩都属于恒转矩特点。但是在粗加工时,需要较大的吃刀量,切削阻转矩也就大;而精加工时则需要较小的吃刀量较小,切削转矩也就小些。为了提高生产效率及工艺要求,粗加工时,负载转矩大而转速低些;精加工时则负载转矩小而转速高些。针对这种切削的全部过程来看,它体现了负载转矩与其转速之积为常数,即机械功率为常数,对于类似负载,我们称之为恒功率负载。恒功率负载转基本上与转速成反比即

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

或切削功率

$$P_L = \frac{T_L n_L}{9.55} = \frac{K}{9.55} = \text{常数}$$

恒功率负载特性如图(1-10)所示。

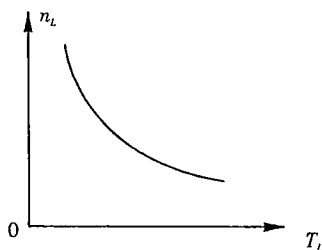
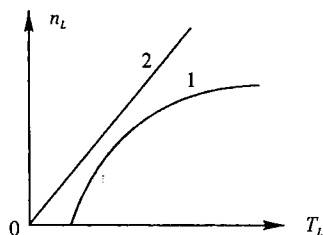


图 1-10 恒功率负载特性

图 1-11 其它类负载特性 2
泵类负载特性 1

三、泵类负载及其它类负载

属于通风机负载特性的生产机械如：通风机、水泵、油泵、风扇及螺旋桨等。其空气、油、水等对叶片的阻力基本上与转速的平方成正比即

$$T_L = kn_L^2$$

通风机式负载特性如图(1-11)中曲线 1 所示。

另外,在实验过程中,用作模拟负载的他励发电机的转矩,当励磁电流和电枢电阻保持不变时,电磁转矩与其转速成正比(发电机为实验电动机的负载)。其实验电动机的负载特性如图 1-11 中曲线 2 所示。

综上所述恒转矩负载、恒功率负载及泵类负载都是从各种生产实践中概括出来的几种典型的负载型式,而实际生产中的机械的负载特性很可能是几种以上典型特性的综合及其它特性。例如图 1-11 曲线 1 就是恒转矩与通风机负载转矩的混合。又如起重机的提升机构的拖动电动机,重物作用所产生的转矩是位能性转矩,而传动装置的摩擦转矩对电动机而言又是反抗性负载转矩。

四、电力拖动系统的稳定运行条件

綜前所述,生产机械及传动装置经过折算之后,这样,电力拖动系统便由电动机和负载(生产机械)两大部分组成。而对电动机而言,其电磁转矩与之转速的函数关系称为机械特性,不同种类的电动机又具有不同的机械特性,可以用数学式表示,也可以画成机械特性曲线。各种电动机的机械特性将在后面各章节中相继阐述。下面着重分析电力拖动系统的稳定运行问题,并且认为电动机的机械特性曲线为已知。

从前面所讲述过的电力拖动系统运动方程式可知,系统能够稳定运行(恒速转动)的必要条件是动态转矩为零,即

$$T = T_L$$

因为电动机与生产机械是旋转系统的统一体,所以在分析系统运行时,往往把电动机的机械特性与负载特性画在同一个坐标曲线上,如图 1-12 所示,其中曲线 1 是他励直流电动机的机械特性,曲线 2 是恒转矩负载的转矩特性,图中忽略空载转矩 T_0 的影响。当系统稳定运行时, $T = T_L$,则在图(1-12)中,两条特性的交点 A 满足这个条件, A 点则为系统稳定运行的工作点。