

中等专业学校教材

电力拖动与自动控制

赵铁藩 王明田 编著



中国工业出版社

目 录

緒論	1
第一章 电力拖动的动力学	3
第一节 运动方程式	3
第二节 靜轉矩和飞輪力矩的折算	4
第三节 运动方程式的分析和过渡过程的时间	8
第四节 电动机的負載图	12
第二章 电动机的机械特性	17
第一节 机械特性的概念	17
第二节 他激直流电动机的机械特性	18
第三节 他激机在制动状态下的机械特性	21
第四节 他激机改变电压和磁通时的机械特性	26
第五节 他激机电枢有分路电阻时的机械特性	27
第六节 串激和复激直流电动机的机械特性	29
第七节 異步电动机的机械特性	36
第八节 異步机的各种制动状态	43
第九节 同步电动机的机械特性	49
第三章 电动机的起动和起动电阻的計算	54
第一节 电动机起动概述	54
第二节 他激直流电动机起动电阻的計算	55
第三节 繞线式異步电动机起动电阻的計算	60
第四节 串激直流电动机起动电阻的計算	62
第五节 鼠籠式異步电动机起动的計算	63
第四章 电动机的轉速調节	69
第一节 調速的基本指标	69
第二节 他激直流电动机的調速性能	71
第三节 異步电动机的調速	73
第四节 发电机—电动机系統	75
第五节 交磁放大机—电动机系統	81
第六节 自激放大机的調速系統	90
第五章 同步旋轉和随动系統	94
第一节 帶輔助电机的同步旋轉系統	94
第二节 不帶輔助电机的同步旋轉系統	97
第三节 自整角机	98
第四节 随动系統	99
第五节 随动系統举例	102

IV

第六章 电动机容量的选择	105
第一节 选择电动机容量的根据	105
第二节 电动机温升的方程式	106
第三节 连续运转电动机容量的选择	109
第四节 短时运转电动机容量的选择	116
第五节 断续运转电动机的容量选择	120
第六节 周围气温与标准值 (35°C) 不同时, 电动机容量的修正	124
第七章 自动控制电器	128
第一节 手控电器	128
第二节 主令电器	132
第三节 接触器	134
第四节 继电器	143
第五节 行程电器	153
第六节 电阻器	156
第七节 电磁装置	163
第八章 继电器、接触器控制线路	169
第一节 控制线路的基本规则	169
第二节 简单电路和保护环节	173
第三节 电动机按时间原理自动起动的线路	176
第四节 电动机按电流原理自动起动的线路	178
第五节 电动机按速度原理自动起动的线路	179
第六节 电动机的自动制动线路	180
第七节 用主控制器控制的电路	183
第八节 自动控制线路电器的选择	187
第九节 发电机电动机组的控制线路	189
第十节 同步电动机控制线路	192
第九章 连续式自动控制系统	200
第一节 截止装置	200
第二节 混合截止线路	203
第三节 磁放大器的原理和特性	205
第四节 磁放大器控制线路	211

緒 論

一切工农业生产机械，都由原动机、传动机构和工作机构三个部分组成。前两个部分的作用是传送动力，带动工作机构运动，总称为拖动装置。按动力种类分，拖动装置有蒸汽拖动，内燃机拖动，水力拖动，电力拖动等多种；在现代工业企业中电力拖动是最主要的拖动装置。

电力拖动装置主要由电动机、控制设备和传动机构组成。和其它拖动方式比较，电力拖动具有许多优越性：功率可大可小，效率较高（电动机功率小者可以是几瓦特，大者可以是几千千瓦）；速度容易调节，调节范围宽广（可达1:100以上）；转矩和转速的特性多种多样，可以满足各种生产机械的要求；控制、操作和维修简单方便，可以减轻劳动强度；易于自动控制，使生产过程自动化；电能的生产、输送和分配非常方便；电力拖动装置的安装比较简单等。这些优越性使电力拖动逐步代替了其他拖动方式。目前，其他拖动方式一般用在没有电源的地方，用于某些移动范围宽广的机械上，以及用来发电。

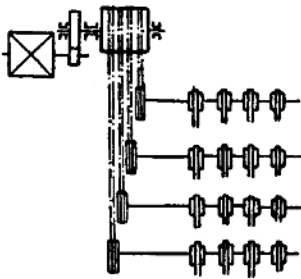


图 0-1 集中拖动方式

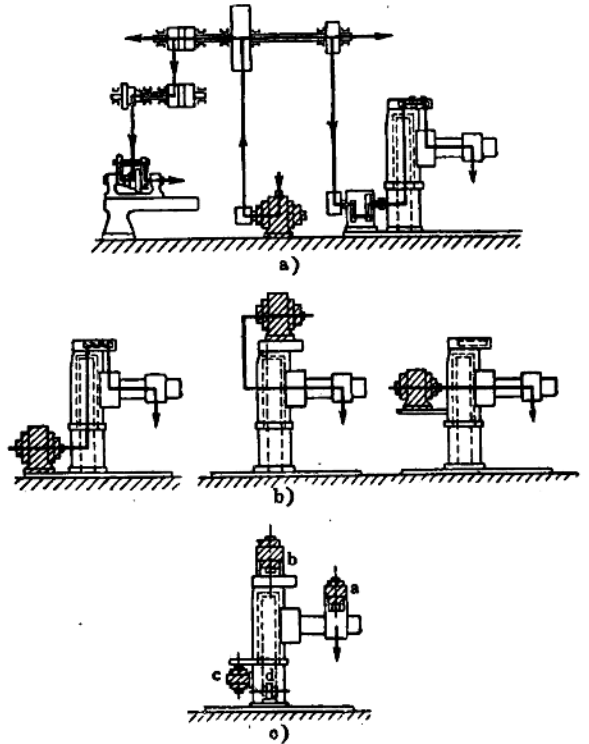


图 0-2 摇臂钻床拖动方式的演变

电力拖动在生产中开始应用时，只是用电动机代替蒸汽机。而蒸汽机都是通过天轴向各生产机械分配动力。这种拖动方式称为集中拖动，其结构如图 0-1 所示。集中拖动的传动效率低，操作不便，工艺过程受天轴位置的影响，布置不能合理，而且生产车间挂满了皮带对生产安全和卫生都很不利。随着生产实践的需要和发展，电力拖动方式由集中拖动发展为单独拖动的方式，即每个机械由单个电动机拖动。单独拖动能使每台机械按需要的转速运行，操作控制方便、安全，机械布置可以按工艺要求灵活调整。但是机械各部分都

由同一台电动机拖动，机械传动机构比较复杂，满足不了大型机械和精密机械各部分机械特性的不同需要。所以后来又发展了多电动机拖动的方式：机械各部分分别采用不同的电动机拖动。多电动机拖动可以简化机械的结构，使机械的工作性能更趋完善，为机械的自动控制创造了良好的条件。图 0-2 是摇臂钻床的拖动发展过程。其中（a）是天轴集中拖动，大功率电动机带动天轴旋转，通过天轴带动各机械工作。图（b）是单独拖动，功率较小的电动机单独带动钻床工作。图（c）是多电动机拖动，四台电动机 a、b、c、d 分别带动钻头旋转、上下，摇臂旋转，摇臂升降和冷却液泵等四个部分。

在电力拖动方式的演变过程中，电力拖动的控制方式也由手动控制逐步向自动控制方向发展。手动控制是利用刀开关、控制器等手动控制电器，由人力操纵电动机；自动控制是利用自动控制器自动操纵电动机，人在控制过程中只是发出控制信号，监视机械的运转状况。自动控制的最初阶段是自动完成起动、制动、反向、调速、停车等操作。第二阶段是自动控制生产的工艺过程，例如保持速度为恒定，按一定程序控制速度、温度等工艺参数的变化。自动控制的进一步发展是一个生产线，一个车间，以至一个工厂的综合自动化。

自动控制的电力拖动提高了劳动生产率，加快了生产速度，提高了产品质量，实现了某些人力不能控制的生产过程，所以，自动控制的电力拖动把人类的生产活动引入了新的阶段。在科学技术高度发达的今天，人们谈到电力拖动总是自动控制的电力拖动。

旧中国的工业十分落后，电力拖动的状况也不例外。那时仅仅在帝国主义开办的几个企业中有些较简单的自动控制的电力拖动，其他的工业企业大部分是集中拖动方式，而且这种拖动装置都从外国进口，本国不能独立生产。中华人民共和国成立以后，中国人民在中国共产党和毛主席的英明领导下，发扬了奋发图强、自力更生的精神，使我国的经济建设飞速发展，电力拖动技术的水平也随之迅速提高。现在，我国主要工业企业中的机械设设备都是由自动控制的电力拖动装置装备起来的。我国已能自行设计和制造常用的电力拖动装置和自动控制设备。一支又红又专的电力拖动与自动控制的技术队伍已经成长起来。随着我国电力工业的蓬勃发展，电力拖动正在日益自城市普及到农村，成为发展农业的重要技术基础之一。可以预计，我国的电力拖动与自动控制技术必将更为迅速地发展，对我国工农业产品产量、质量和品种的增长发生更大的促进作用。

“电力拖动自动控制”课程的内容就是讲述自动控制的电力拖动的基本技术原理，其中包括电动机的拖动原理，控制用电器和它的自动控制方法；学习这门课程主要应具有电工原理和电机学的基础；它是“工业企业电气装备”专业的技术人员必须掌握的专业知识，是了解现代企业生产机械电气装备的基本理论基础。

专业理论课程的主要特点是，一方面和基础理论课程相同，包含有理论、计算和实验方法的训练，另一方面和基础理论课不同，因为它与工程实际有着密切的联系，所有的理论、计算和实验都是基础理论在实际工程中的应用。因此在学习时除了应该象基础课一样继续注意理论的论述、计算的练习和实验的操作外，还应当注意各种实际问题，例如各种方法的实际运用范围与特点；电动机和电器的规格、类型和参数；分析问题的基本性能指标等。

本课程是工业企业电气装备专业学生必修的主要专业课，是必须牢固掌握的技术知识，每个人都应当努力学好这门课程，准备为祖国的社会主义建设作出更大的贡献。

第一章 电力拖动的动力学

电力拖动系统是一个机械运动系统，在这个运动系统中有能量、功率和转矩的传递。代表运动特征的量是转速 n 、转矩 M 、加速度 a 以及时间 t 等。尽管机械运动有旋转运动、直线运动和复杂运动等多种形式，但它们都遵循着一个共同规律。本章的内容就是介绍这个规律以及运用这个规律分析、解决问题的方法。

第一节 运动方程式

在电力拖动系统中，电动机产生力 F_D 或转矩 M_D 、用以克服负载阻力 F_f 或阻转矩 M_f ，当原动力或转矩与负载阻力或转矩平衡时，运动系统保持等速运动，

对于直线运动，

$$F_D = F_f \text{ 时, 速度 } v = \text{常数} \left(\text{或 } \frac{dv}{dt} = 0 \right)$$

对于旋转运动，

$$M_D = M_f \text{ 时, 角速度 } \omega = \text{常数} \left(\text{或 } \frac{d\omega}{dt} = 0 \right)$$

这种运动状态，常称为静态或稳态。负载阻力称为静阻力，静阻力产生的转矩 M_f 叫静转矩。

当原动力或转矩与负载阻力或转矩不平衡时，系统运动的速度随之变化。原动力或转矩大于负载阻力或转矩时，系统加速运动；反之，系统减速运动。即

$$\begin{cases} F_D - F_f > 0 \\ M_D - M_f > 0 \end{cases} \text{ 时, } \frac{dv}{dt}, \frac{d\omega}{dt} > 0, \text{ 运动加速。}$$

$$\begin{cases} F_D - F_f < 0 \\ M_D - M_f < 0 \end{cases} \text{ 时, } \frac{dv}{dt}, \frac{d\omega}{dt} < 0, \text{ 运动减速。}$$

这种运动状态称为动态。产生加速和减速的原因，是动态力 F_{ao} 或动转矩 M_{ao} 的出现，

$$\text{即} \quad \begin{cases} F_D - F_f = F_{ao} = m \frac{dv}{dt} \\ M_D - M_f = M_{ao} = J \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (1-1)$$

式中：力 F 的单位是公斤， m 是运动物体的质量（公斤/米/秒²）， v 是运动物体的速度（米/秒），转矩 M 的单位是公斤·米， J 是旋转物体的转动惯量（公斤·米·秒²）， ω 是旋转物体的角速度（1/秒）。

公式（1-1）就是描述机械系统运动状态的运动方程式。它指出了原动转矩、静转矩、

动轉矩、加速度和轉动慣量之間的相互关系。

物体的轉动慣量 $J = m \cdot \rho^2$ (质量 $\times$ 环动半径²) 在电力拖动計算中經常以其重量 G 和环动直径 D 表示。由于:

$$m = \frac{G}{g} \left(\frac{\text{公斤}}{9.81 \text{ 米/秒}^2} \right), \quad \rho = \frac{D}{2} \text{ (米)}。$$

所以

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

$G D^2$ 称为飞輪力矩, 运动方程式的另一形式为:

$$M_D - M_f = \frac{G D^2}{4g} \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

如果用物体的轉速 n (轉/分) 代替 ω , 由于

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

$$d\omega = \frac{2\pi}{60} dn, \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt}$$

运动方程式可变为:

$$M_D - M_f = \frac{G D^2}{4g} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{G D^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1-3)$$

例1-1 电車启动时的加速度为 2.5 米/秒^2 , 求車上体重为 60 公斤 的乘客所需的动态力。

[解] 物体受动态力 F_{do} 的作用产生加速度, 电車启动必須每个乘客都受到动态力的作用。

$$F_{do} = m \frac{dv}{dt}$$

$$m = \frac{G}{g} = \frac{60}{9.81} = 6.12 \quad \frac{dv}{dt} = 2.5 \text{ 米/秒}^2$$

$$F_{do} = 6.12 \times 2.5 = 15.3 \text{ 公斤}$$

例1-2 試求以 3.5 米/秒^2 的加速度提升和降落 1000 公斤 重物时, 起重机所需的力。

[解] 上升力:

$$F_D = F_f + m \cdot \frac{dv}{dt} = 1000 + 3.5 \times \frac{1000}{9.81} = 1357 \text{ 公斤}$$

下降力:

$$F_D = F_f - m \cdot \frac{dv}{dt} = 1000 - 3.5 \times \frac{1000}{9.81} = 643 \text{ 公斤}$$

第二节 靜轉矩和飞輪力矩的折算

运动方程式表示电动机轉矩和負載轉矩在同一軸上的基本关系。实际的电力拖动系統往往在电动机与負載之間裝有变速裝置, 系統中有几根軸, 軸上的轉矩和轉速也各不相同。計算和分析这种复杂运动系統时, 必須用折算的方法找出轉矩、速度等在一根軸上所

表現的作用后，才能使用运动方程式。

1. 功率、轉矩、动能和速度的关系

电动机軸上的轉矩 M (公斤·米)、机械功率 P (千瓦) 和轉速 n (轉/分) 或角速度 ω ($\frac{1}{\text{秒}}$) 間有下列关系。

$$P = M \cdot \omega (\text{公斤} \cdot \text{米} / \text{秒})$$

$$\text{因} \quad \omega = \frac{2\pi n}{60} \left(\frac{1}{\text{秒}} \right)$$

$$\text{所以} \quad P = \frac{2\pi}{60} \cdot M \cdot n (\text{公斤} \cdot \text{米} / \text{秒})$$

已知 $102 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{秒} = 1 \text{ 千瓦}$ ，可得：

$$\begin{cases} P = \frac{M \cdot n}{975} (\text{千瓦}) \\ P = \frac{M \cdot \omega}{102} (\text{千瓦}) \end{cases} \quad (1-4)$$

在直线运动中，若物体受力为 F (公斤)，运动速度为 v (米/秒)，則机械功率 P ：

$$\begin{cases} P = F \cdot v (\text{公斤} \cdot \text{米} / \text{秒}), \\ P = \frac{F \cdot v}{102} (\text{千瓦}). \end{cases} \quad (1-5)$$

以一定速度运动的物体保有一定的动能 A ：

对于直线运动：

$$A = \frac{1}{2} m v^2 (\text{公斤} \cdot \text{米})$$

对于旋轉运动：

$$A = \frac{1}{2} J \omega^2 (\text{公斤} \cdot \text{米})$$

2. GD^2 的 折 算

将复杂系統中各軸上的 GD^2 折算到一根軸上时需要遵守能量守恒定律，就是說折算前后系統的动能应保持不变。折算后的单軸可以是复杂系統中的任意一根軸，在計算电动机运动状态时，要选为电动机軸。設有图 1-1 所示的系統，各軸上的 GD^2 (J) 值和速度 ω 已在图中标明，系統的动能为：

$$A_1 = J_0 \frac{\omega_0^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + (J_2 + J_3) \frac{\omega_1^2}{2} + (J_4 + J_5) \frac{\omega_2^2}{2} + m \frac{v^2}{2},$$

若折算到电动机軸上的等值轉动慣量为 J_s ，折算后，电动机軸上的动能为：

$$A_2 = J_s \frac{\omega_0^2}{2}$$

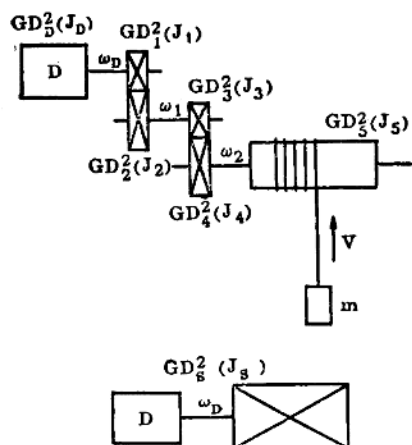


图 1-1 电力拖动系统传动图

令 $A_1 = A_2$, 并用 $\frac{\omega_D^2}{2}$ 除全式得,

$$J_s = (J_0 + J_1) \left(\frac{\omega_D}{\omega_D} \right)^2 + (J_2 + J_3) \left(\frac{\omega_1}{\omega_D} \right)^2 + (J_4 + J_5) \left(\frac{\omega_2}{\omega_D} \right)^2 + m \cdot \left(\frac{v}{\omega_D} \right)^2,$$

根据 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ 的关系, 上式可改写为,

$$J_s = (J_0 + J_1) \left(\frac{n_D}{n_D} \right)^2 + (J_2 + J_3) \left(\frac{n_1}{n_D} \right)^2 + (J_4 + J_5) \left(\frac{n_2}{n_D} \right)^2 + m \cdot \left(\frac{60v}{2\pi n_D} \right)^2, \quad (1-6)$$

由此可得计算等值转动惯量 J_s 的方法如下:

(1) 在电动机同轴上的转动惯量直接相加。

(2) 不在电动机轴上的旋转部分的等值转动惯量, 等于各部分转动惯量乘以该部分转速与电动机转速比的平方和。

(3) 直线运动部分的等值转动惯量, 等于直线运动部分的质量乘以该部分的线速度 v 和电动机角速度 ω_D 之比的平方。

由于 $J = \frac{GD^2}{4g}$, 可以得出等值飞轮力矩 GD_s^2 的折算公式为,

$$GD_s^2 = GD_{s1}^2 + GD_{s2}^2 + GD_{s3}^2 \quad (1-7)$$

其中, GD_{s1}^2 是电动机轴上各飞轮力矩的等值飞轮力矩, $GD_{s1}^2 = GD_0^2 + GD_1^2$;

GD_{s2}^2 是不在电动机轴上各旋转部分的等值飞轮力矩, $GD_{s2}^2 = (GD_2^2 + GD_3^2) \left(\frac{n_1}{n_D} \right)^2 +$

$$(GD_4^2 + GD_5^2) \left(\frac{n_2}{n_D} \right)^2;$$

GD_{s3}^2 是直线运动部分的等值飞轮力矩, $GD_{s3}^2 = \frac{4gm v^2}{\omega_D^2}$ 。考虑到 $G = m \cdot g$

$$GD_{s3}^2 = \frac{4g \cdot m v^2}{\omega_D^2} = \frac{4G \cdot v^2}{\omega_D^2} = \frac{4(60)^2}{(2\pi)^2} \cdot \frac{G \cdot v^2}{n_D^2} = \frac{365G \cdot v^2}{n_D^2}$$

注意, v 的单位是米/秒。

3. 静转矩 M_j 的折算

转矩 M_j 的折算, 根据折算前后系统功率守恒的原则进行。

电动机轴上的机械功率。

$$P_1 = M_D \omega_D$$

負載軸上的機械功率。

$$P_2 = M'_j \omega_j$$

在運動系統處於穩態時，根據系統功率守恆的原則，令 $P_1 = P_2$ ，

即

$$M_D \omega_D = M'_j \omega_j$$

$$M_D = M'_j \frac{\omega_j}{\omega_D} \quad (1-8)$$

若電動機軸轉速與負載軸轉速比 $\frac{\omega_D}{\omega_j} = i$ ，可得靜轉矩的折算公式為：

$$M_D = \frac{M'_j}{i} = M_j \quad (1-9)$$

實際上，轉矩在電動機軸和負載軸間傳送過程中，傳動機構上會損耗一部分能量，一般用傳動效率 η 表示其大小。這個損耗應由主動軸負擔。當電動機軸為主動軸時，

$$M_D \omega_D \eta = M'_j \omega_j,$$

所以

$$M_D = \frac{\omega_j}{\omega_D} \frac{M'_j}{\eta} = \frac{M'_j}{i \eta}, \quad (1-10)$$

當負載軸為主動軸時，

$$M_D \omega_D = M'_j \omega_j \eta$$

所以

$$M_D = \frac{M'_j \omega_j \eta}{\omega_D} = \frac{M'_j \eta}{i}. \quad (1-11)$$

例1-3 計算圖1-2所示系統中，電動機軸上的轉速，靜轉矩和靜功率，圖中：

重物 $G = 10,000$ 公斤；

上升速度 $v = 0.6$ 米/秒；

卷筒直徑 $D_t = 0.9$ 米；

每對齒輪轉速比 $i_1 = i_2 = 6$ ；

每對齒輪效率 $\eta_s = 0.94$ ；

卷筒效率 $\eta_t = 0.95$ ；

滑輪效率 $\eta_h = 0.96$ ；

〔解〕 作用在卷筒上的轉矩：

$$M_t = \frac{F_j \cdot R_t}{\eta_t \eta_h} = \frac{\frac{G}{2} \cdot \frac{D_t}{2}}{\eta_t \cdot \eta_h}$$

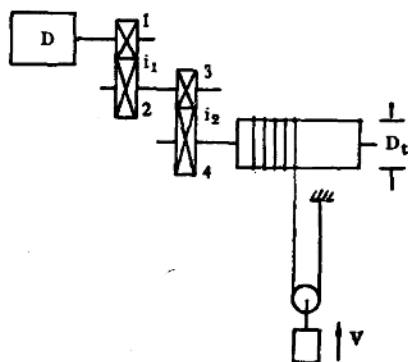


圖 1-2 傳動系統圖

$$= \frac{10000 \times 0.9}{2 \times 2 \times 0.96 \times 0.95} = 2470 \text{ 公斤} \cdot \text{米}$$

折算到电动机轴上的轉矩,

$$M_j = \frac{M_i}{i_1 i_2 \eta_3^2} = \frac{2470}{6 \times 6 \times 0.94 \times 0.94} = 77.6 \text{ 公斤} \cdot \text{米}$$

卷筒轉速:

$$n_t = \frac{60 \times 2v}{\pi \cdot D_t} = \frac{60 \times 2 \times 0.6}{3.14 \times 0.9} = 25.5 \text{ 轉/分}$$

电动机轉速:

$$n_D = n_t i_1 \cdot i_2 = 25.5 \times 6 \times 6 = 918 \text{ 轉/分}$$

电动机轴上的靜功率:

$$P_j = \frac{M_j \cdot n_D}{975} = \frac{77.6 \times 918}{975} \approx 73.2 \text{ 千瓦}$$

例 1-4 图 1-2 中, 如果电动机、卷筒、齿轮的飞輪力矩分别为: $GD_D^2 = 1 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2$, $GD_t^2 = 4 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2$, $GD_1^2 = 0.1 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2$, $GD_2^2 = 1 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2$, $GD_3^2 = 0.5 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2$, $GD_4^2 = 2 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2$, 求系統的飞輪力矩。

[解] 电动机轴上的飞輪力矩:

$$GD_{s1}^2 = GD_D^2 + GD_1^2 = 1 + 0.1 = 1.1 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2$$

各轴上旋轉物体折算到电动机轴上的飞輪力矩,

$$\begin{aligned} GD_{s2}^2 &= \sum \frac{GD_x^2}{i_x^2} = \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{i_1^2} + \frac{GD_4^2 + GD_t^2}{i_1^2 \cdot i_2^2} \\ &= \frac{1 + 0.5}{6 \times 6} + \frac{2 + 4}{6 \times 6 \times 6 \times 6} = 0.047 + 0.0046 \\ &= 0.0516 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2 \end{aligned}$$

直线运动物体折算到电动机轴的飞輪力矩,

$$GD_{s3}^2 = 365 \frac{Gv^2}{n_D^2} = \frac{365 \times 10000 \times 0.6^2}{918^2} = 1.56 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2$$

整个系統折算到电动机轴上的飞輪力矩

$$\begin{aligned} GD_s^2 &= GD_{s1}^2 + \sum \frac{GD_x^2}{i_x^2} + 365 \frac{Gv^2}{n_D^2} \\ &= 1.1 + 0.05 + 1.56 = 2.71 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2 \end{aligned}$$

第三节 运动方程式的分析和过渡过程的时间

运动方程式中的靜轉矩 M_j , 按照它的力学性质, 可分为两类, 一类叫反应轉矩(或无效轉矩), 一类叫位能轉矩(或有效轉矩)。

反应轉矩的特点是永远对运动起阻碍作用, 它的方向与运动方向相反, 随运动方向而改变, 由摩擦、非弹性体的压缩、拉伸与扭轉等作用所形成的靜轉矩都具有这种特点。車床的切削轉矩便是反应轉矩。

位能轉矩的特点是它的方向恒定, 与运动方向无关, 由物体重力和弹性物体压缩、拉伸、扭轉等作用所形成的靜轉矩都属于这种轉矩, 它有时可以阻碍系統运动, 有时可以促

进系统运动。吊钩吊钩和重物在卷筒上形成的转矩便是位能转矩，提升重物时它阻碍系统运动，放下重物时则促进系统运动。

电动机的转矩 M_D 可能与系统运动方向相同或相反，相同时是原动转矩，是运动的原动力，相反时是制动转矩。

在应用运动方程式时，必须注意这些问题，按 M_j 与 M_D 的方向正确地确定其符号；

当电动机转矩 M_D 的方向与系统运动方向一致时，可定为正号，反之为负；与此相应，当静转矩 M_j 的方向与系统运动方向相反时定为正号并且认为是制动转矩；相同时定为负号，起原动转矩作用。

图 1-3，是反应转矩和位能转矩的特性曲线。图 a 是反应转矩的特性，曲线 1 是转矩恒定的反应转矩，曲线 2 是转矩随速度而变的反应转矩，在运动方程式中它们都应取正号；图 b 是位能转矩曲线，当转矩方向与系统运动方向相同应取正号，曲线在第一象限；反之，应取负号，曲线在第四象限。

例 1-5 判定起重机在提升重物过程中起动和制动时，电动机转矩 M_D 与负载静转矩 M_j 的符号。

〔解〕 (1) 起动过程：电动机转矩拖动重物上升，电动机转矩方向与系统运动方向一致，应取正号（参看图 1-4）。

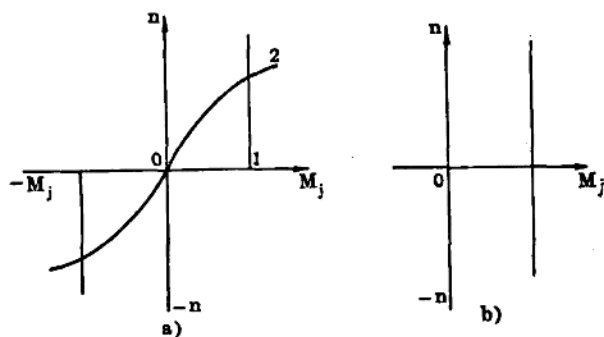


图 1-3 静转矩特性曲线

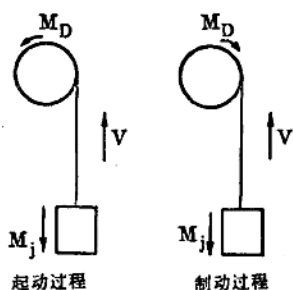


图 1-4 起动过程和制动过程

负载静转矩是位能转矩，方向永远向下与系统运动方向相反，取正号，这时的运动方程式为：

$$M_D - M_j = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

(2) 制动过程：电动机转矩反对系统运动，应取负号；负载静转矩与起动过程一样，仍是阻碍系统运动，应取正号。所以运动方程式应为：

$$-M_D - M_j = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$$

系统的过渡过程时间，即系统由一个静态过渡到另一个静态，例如从 n_1 变至 n_2 所需的时间，可以用运动方程式准确地计算。由运动方程式 (1-3) 可得，已知 M_D 、 M_j 、 GD^2 时，速度变化 dn 所需时间 dt 为：

$$dt = \frac{GD^2}{375(M_D - M_f)} dn,$$

所以自 n_1 改变至 n_2 所需时间:

$$t = \int_{n_1}^{n_2} \frac{GD^2 dn}{375(M_D - M_f)} \quad (\text{秒}) \quad (1-12)$$

如果在过渡过程中, $M_D - M_f$ 保持不变, 即 M_{d0} 为常数, 系统为等加速运动,

$$\begin{aligned} t &= \frac{GD^2}{375(M_D - M_f)} \int_{n_1}^{n_2} dn \\ &= \frac{GD^2(n_2 - n_1)}{375(M_D - M_f)} \quad (\text{秒}) \end{aligned} \quad (1-13)$$

式中: n_1 为初始转速, n_2 为终了转速。可以看出过渡过程时间与系统的 GD^2 和速度改变量成正比, 而与动转矩成反比。

当 $M_D - M_f > 0$, $n_1 = 0$ 时, 系统加速至 n_2 所需时间 t_q 为起动时间:

$$t_q = \frac{GD^2 n_2}{375(M_D - M_f)} \quad (\text{秒}) \quad (1-14)$$

当 $M_D - M_f < 0$ 时, 系统自 n_1 减速至 $n_2 = 0$ 所需时间 t_i 为制动时间:

$$t_i = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{-n_1}{M_D - M_f} \quad (\text{秒}) \quad (1-15)$$

如果制动过程是自由停车, 即 $M_f = 0$, 则制动时间 t_i 为:

$$t_i = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_1}{M_f} \quad (\text{秒})$$

例 1-6 图1-5中负载静转矩 M_f 是恒定值, 电动机转矩 M_D 在起动过程中随转速成线性关系变化, 求转速自 $n_1 = 0$ 过渡到 $n_2 = n_B$ 所需的时间。系统的 $GD^2 = 2$ 公斤·米²。

[解] 运用起动时间公式 (1-14) 求解。由于 M_D 在起动过程中由 M_1 变至 M_f , 不是恒值, 使用这个公式时可取其平均值。

$$\begin{aligned} M_{D.P} &= \frac{M_1 + M_f}{2} \\ M_{D.P} &= \frac{M_1 + M_f}{2} = \frac{26 + 10}{2} = 18 \text{ 公斤} \cdot \text{米} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore t_q &= \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_2}{M_{D.P} - M_f} \\ &= \frac{2}{375} \cdot \frac{750}{18 - 10} = 0.5 \text{ 秒} \end{aligned}$$

应当指出, 当电动机转矩随速度变化时, 利用其平均值计算出的过渡时间是近似的, 但在实际工程计算中是可用的。

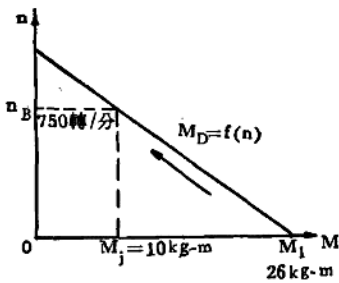
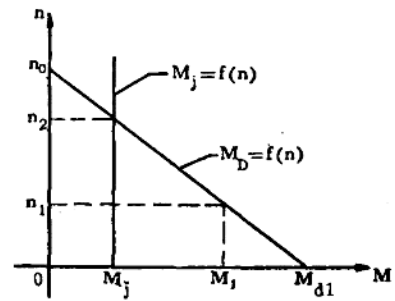


图 1-5 转矩变化图

图 1-6 $M_D = f(n)$ 曲线

上例过渡时间的计算如果不用简单的近似方法,就要用比较复杂的计算。对于静转矩 M_j 为常数,电动机转矩和转速成直线关系的电力拖动系统,速度自 n_1 过渡到 n_2 所需时间的计算过程如下。

设 $M_D = f(n)$ 的关系如图 1-6 所示。

根据解析几何学直线方程的截距式得 $\frac{M_D}{M_{d1}} + \frac{n}{n_0} = 1$

$$\therefore M_D = M_{d1} \left(1 - \frac{n}{n_0} \right) \quad (1-16)$$

又 $M_j = f(n)$ 可用短路转矩 M_{d1} 的关系来表达

$$M_j = M_{d1} \left(1 - \frac{n_2}{n_0} \right) \quad (1-17)$$

在过渡过程中,电动机的转矩,速度时刻都满足运动方程式(1-3),将 M_D 及 M_j 值代入后可得,

$$M_{d1} \left(1 - \frac{n}{n_0} \right) - M_{d1} \left(1 - \frac{n_2}{n_0} \right) = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

整理后得,

$$M_{d1} \frac{n_2 - n}{n_0} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

式中: M_{d1} 、 n_0 、 GD^2 均为常数,令

$$\frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_0}{M_{d1}} = T_{JJ}, \text{称为机械时间常数}$$

则

$$n_2 - n = T_{JJ} \frac{dn}{dt}$$

并且

$$\frac{dn}{n - n_2} = \frac{dt}{-T_{JJ}}$$

两边积分得

$$\ln(n - n_2) - \ln c = -\frac{t}{T_{JJ}}$$

式中 c 为积分常数。将上式整理后,可得:

$$n = ce^{-\frac{t}{T_{JJ}}} + n_2 \quad (1-18)$$

积分常数 c 由初始条件决定。当 $t = 0$ 即过渡过程开始时 $n = n_1$, 代入(1-18)式,

$$c = n_1 - n_2$$

代入(1-18)式,

$$n = (n_1 - n_2)e^{-\frac{t}{T_{JJ}}} + n_2 \quad (1-19)$$

或

$$n = n_2(1 - e^{-\frac{t}{T_{jj}}}) + n_1 e^{-\frac{t}{T_{jj}}} \quad (1-20)$$

这就是速度 n 在过渡过程中自 n_1 变化至 n_2 所遵循的关系。

令 $n_1 = 0$, 则

$$n = n_2(1 - e^{-\frac{t}{T_{jj}}}) \quad (1-21)$$

它说明电动机自 $n_1 = 0$ 起动至 $n = n_2$ 时速度按指数曲线变化:

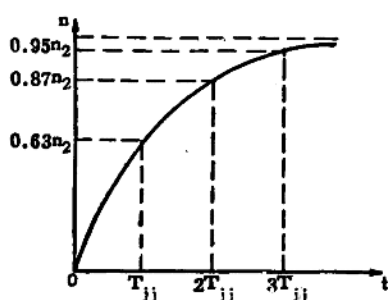


图 1-7 起动过程速度的变化

当	$t = T_{jj}$	$n = 0.632n_2$
	$t = 2T_{jj}$	$n = 0.865n_2$
	$t = 3T_{jj}$	$n = 0.95n_2$
	$t = 4T_{jj}$	$n = 0.987n_2$
	$t = 5T_{jj}$	$n = 0.994n_2$
	$t = \infty$	$n = n_2$

实际上当 $t = (3 \sim 4)T_{jj}$ 时, 可认为速度已经达到 n_2 , 过渡过程已经结束。这个过程, 如图1-7所示。它反映的物理过程是这样的: 起动开始时动转矩最大, 电动机加速度最大, 速度迅速上升。随着速度的上升, 电动机转矩、动

转矩随之减少, 系统的加速度和速度的上升也随之减慢……如此下去, 当电动机转矩与静转矩平衡时, 达到稳定速度 n_2 , 过渡过程结束。

在 (1-20) 式中, 若 $n_2 = 0$, 则

$$n = n_1 e^{-\frac{t}{T_{jj}}} \quad (1-22)$$

它说明电动机速度自 n_1 停车的过程。

第四节 电动机的负载图

电动机的负载电流、转矩、功率, 以及转速对时间的关系曲线叫做负载图。它的作用是描述电动机工作过程中负载的变化情况, 用以研究电力拖动系统运行状况和确定电动机容量。

负载图可以用实验方法获得。把安培计或瓦特计接在工作电动机的线路中, 每隔一定时间记录一次电枢电流或输入功率即可得到电流的负载图 $I = f(t)$ 或功率的负载图 $P = f(t)$ 。时间间隔愈小记录结果愈准确。用自动记录仪表, 可以在记录纸上直接画出 $I = f(t)$ 或 $P = f(t)$ 曲线来。

在设计电力拖动系统时, 负载图是对负载工作情况进行分析和计算而得出的。绘制周期工作的负载图时只需做出一个工作周期的负载图就可以了。一般一个周期是由起动、恒速运转、制动和停止四个阶段组成。例如吊车卷扬机构的每个工作周期包括四个操作: 重物的升、降和空载升、降, 每一操作都有起动、恒速运转、制动和停止期间。卷扬机构的整个工作过程就是上述工作周期的重复过程。

下面用一个实例来说明负载图的计算方法。

例1-7 一台加工钢轴的专用车床, 用 $P_B = 29$ 千瓦, $n_B = 1000$ 转/分, $GD_D^2 = 4.8$ 公斤·米² 的电动机拖动。已知

加工工件：直径 $d=25$ 毫米，长度 $L=3$ 米，工件的 $GD^2=36$ 公斤·米²。

切削用量：切削力 $F=2840$ 公斤，切削速度 $v=50$ 米/分，进给量 $S=2.5$ 毫米/转。

车床数据：传动效率 $\eta=0.88$ ，电机至花盘传速比 $i=15.7$ ，花盘 $GD^2_k=250$ 公斤·米²。花盘空载转矩 $M'_{jo}=10$ 公斤·米。

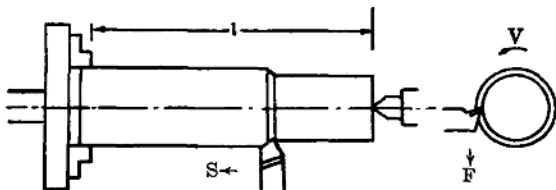


图 1-8 车床切削图

当每根轴加工完毕后停车10分钟时，试作出电动机的负载图。

〔解〕 车床的负载图是加工每根轴的负载变化。加工一根轴构成负载图的一个周期，每一周期，由六个部分组成，即起动、进刀、切削、退刀、制动和停止。作出负载图就是要计算出各组成部分的电动机转矩和相应的时间。计算如下：

(1) 系统的 GD^2_s ：

$$GD^2_s = GD^2_b + \frac{GD^2_k + GD^2_o}{i^2} = 4.8 + \frac{250 + 36}{15.7^2} = 5.96 \text{ 公斤·米}^2$$

(2) 空载转矩 M_{jo} 的折算：

$$M_{jo} = \frac{M'_{jo}}{i\eta} = \frac{10}{15.7 \times 0.88} = 0.73 \text{ 公斤·米}$$

(3) 电动机起动转矩 M_q ：

设

$$M_q = 1.5 M_B$$

$$\therefore M_q = 1.5 \times \frac{975 P_B}{n_B} = 1.5 \times \frac{975 \times 29}{1000} = 42.5 \text{ 公斤·米}$$

(4) 起动时间 t_q ：因车床是空载起动，负载只是空载转矩 M_{jo} ：

$$t_q = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_B}{M_q - M_{jo}} = \frac{5.96}{375} \cdot \frac{1000}{42.5 - 0.73} = 0.38 \text{ 秒}$$

(5) 制动停车时间 t_r ：

设

$$M_z = 1.5 M_B$$

则

$$M_z = 1.5 \times \frac{975 P_B}{n_B} = 1.5 \times \frac{975 \times 29}{1000} = 42.5 \text{ 公斤·米}$$

$$t_r = \frac{GD^2}{375} \times \frac{n_B}{M_z + M_{jo}} = \frac{5.96}{375} \times \frac{1000}{42.5 + 0.73} = 0.36 \text{ 秒}$$

(6) 切削转矩 M_j 和切削时间 t_o ：

切削静功率

$$P_j = \frac{F \cdot v}{60 \times 102 \eta} = \frac{2840 \times 50}{60 \times 102 \times 0.88} = 26.5 \text{ 千瓦}$$

切削静转矩

$$M_j = \frac{975 P_j}{n_B} = \frac{975 \times 26.5}{1000} = 25.8 \text{ 公斤·米}$$

切削时间

$$t_o = \frac{L}{S \cdot n} = \frac{3}{0.0025 \times 63.6} = 18.9 \text{ 分}$$

其中，工作轴的转速：

$$n = \frac{v}{\pi d} = \frac{50}{0.025 \times 3.14} = 63.6 \text{ 转/分}$$

(7) 设起动后进刀、制动前退刀所用时间 t_{o1} 皆为 6 秒 (0.1 分)。

(8) 繪制轉矩負載圖 $M=f(t)$ 如图1-9所示。

(9) 速度的負載圖 $n=f(t)$ 也可相應地繪出。

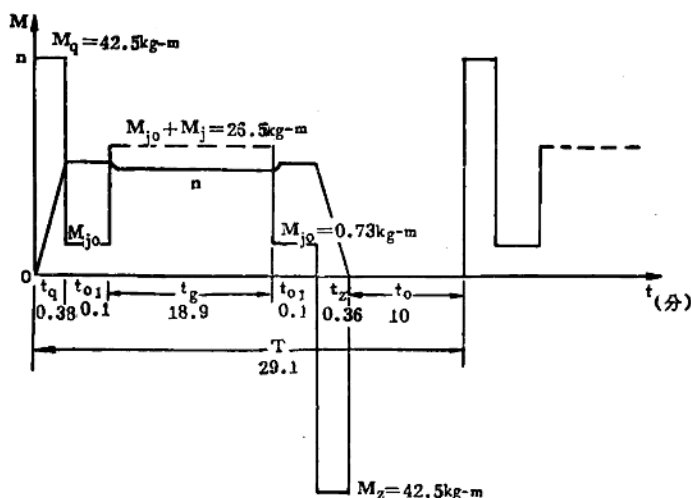


图 1-9 車床負載圖

(10) 負載工作一個周期所需時間：

$$T = t_q + t_o + 2t_{o1} + t_z + t_o = \frac{0.38 + 0.36}{60} + 0.1 \times 2 + 18.9 + 10 = 29.11 \text{ 分}$$

應該指出，上述負載圖的計算過程是簡化的，有許多問題沒有考慮進去，它只是指出了繪制負載圖的基本方法。

練習題

1-1. 電梯升降室的穩定速度 $v=3.5$ 米/秒，起動時升降室的加速度 $\frac{dv}{dt}=2.5$ 米/秒²。求當升降室上升起動時，作用在體重為60公斤乘客的加速力是多少。如卷筒直徑 $D_t=0.5$ 米，電動機到卷筒的減速比 $i=6$ ，試求電動機的穩定轉速是多少。

1-2. 吊起重物 $G=1000$ 公斤的卷揚機，由於電源中斷，重物在8秒內下降10米，卷筒直徑 $D_t=0.5$ 米，減速器傳速比 $i=15$ ，克服系統的摩擦損失所必需的重物重量為400公斤，試按圖1-10計算出整個系統對電動機軸的等值飛輪力矩。

1-3. 對圖1-10所示的卷揚機構，計算：

(1) 以恆速 $v=0.9$ 米/秒提升和降落重物時，電動機發出的功率；

(2) 以 $\frac{dv}{dt}=0.5$ 米/秒² 的加速度提升和降落重物時電動機應具有的起動轉矩。

已知：提升時折合到電動機軸上的靜轉矩 $M_j^s=42$ 公斤·米，放落時折合到電動機軸上的靜轉矩 $M_j^s=34$ 公斤·米，折算到電動機軸上的系統飛輪力矩 $GD_s^2=18.9$ 公斤·米²，電動機轉速 $n_B=1430$ 轉/分。

1-4. 已知圖1-11中的電動小車，折算到電動機軸上的靜轉矩 $M_j=0.95$ 公斤·米，系統的飛輪力矩 $GD_s^2=2.11$ 公斤·米²，小車速度 $v=80$ 米/分，電動機轉速 $n_B=960$ 轉/分。當電動機起動轉矩 $M_q=2.5$ 公斤·米時，試求小車在起動時的加速度。