

高等学校教学用书

矿山电力拖动与 控制基础

开

(修訂本)

北京矿业学院矿山电工教研室編



中国工业出版社

目 录

緒 論	1
第一章 电力拖动动力学基础	3
§ 1-1 电力拖动运动基本方程式	3
§ 1-2 静态力矩和动态力矩的折算	6
§ 1-3 传动的功和功率	9
§ 1-4 起动和减速停車時間	10
第二章 电动机的机械特性	14
§ 2-1 直流他激电动机的性质和它的机械特性分析	15
§ 2-2 直流串激电动机的性质和它的机械特性分析	24
§ 2-3 直流复激电动机的性质和它的机械特性分析	28
§ 2-4 感应电动机的性质和它的机械特性分析	28
§ 2-5 卷线型感应电动机拖动轉子回路接起电抗器的机械特性分析	37
§ 2-6 特种感应电动机的机械特性分析	40
§ 2-7 同步电动机的机械特性分析	42
第三章 电力拖动的速度調整	44
§ 3-1 直流他激电动机的調速性能	45
§ 3-2 直流串激电动机的調速性能	47
§ 3-3 交流感应电动机的調速性能	49
§ 3-4 发电机-电动机組的調速性能	51
§ 3-5 具有交磁放大机的調速系統	57
§ 3-6 离子拖动系統的調速性能	62
§ 3-7 双电机拖动方式及其調速性能	70
第四章 起动設備的計算和选择	81
§ 4-1 直流串激电动机起动設備的計算	81
§ 4-2 发电机-电动机組起动激磁电阻計算	84
§ 4-3 交流鼠籠型感应电动机和同步电动机起动設備的計算和选择	87
§ 4-4 卷线型感应电动机起动变阻器計算	92
§ 4-5 金属变阻器的結構及选择	96
第五章 电力拖动的負載曲綫及过渡过程	98
§ 5-1 研究电力拖动的負載曲綫及过渡过程的意义	98
§ 5-2 过渡过程的分类	99
§ 5-3 静态力矩恒定、机械特性曲綫为直线的电力拖动的机械过渡过程	100
§ 5-4 静态力矩恒定、机械特性曲綫为直线的电力拖动的起动过程	103
§ 5-5 静态力矩恒定、机械特性曲綫为直线的电力拖动的制動过程	107
§ 5-6 机械过渡过程的近似計算法	113

IV

§ 5-7 发电机-电动机组的机电过渡过程·····	118
第六章 电动机容量的计算及选择·····	128
§ 6-1 电动机容量选择的一般概念·····	128
§ 6-2 电动机的发热和冷却·····	130
§ 6-3 工作状态的分类·····	134
§ 6-4 负载长期不变或极少变动时电动机容量的选择·····	135
§ 6-5 连续变动负载时电动机容量的选择·····	135
§ 6-6 短时工作状态下电动机容量的选择·····	137
§ 6-7 重复短时工作状态下电动机容量的选择·····	138
§ 6-8 容量选择的实例·····	140
第七章 电力拖动的控制电器·····	141
§ 7-1 引言·····	141
§ 7-2 控制装置·····	142
第八章 电力拖动自动控制原理·····	152
§ 8-1 电力拖动自动控制系统图的绘制原则和控制元件代表符号·····	152
§ 8-2 电力拖动控制自动化的基本原理·····	155
§ 8-3 起动控制原则的分析·····	155
§ 8-4 制动控制原则的分析·····	158
§ 8-5 负载和电网电压对过渡过程的影响·····	161
§ 8-6 控制系统之基本要求及不同控制方法之比较·····	163
§ 8-7 电力拖动的控制线路示例·····	165
結束語·····	174
主要参考书·····	177

緒 論

电力拖动与控制这门学科是研究用电动机来带动生产机械运转的各种问题。总的可分为电力拖动原理及控制两部分。前者是在已知电动机的机械特性和生产机械特性的基础上研究有关生产机械运转的性能，即生产机械的运动规律，加速、减速过程，转速随负载变化的规律等问题；而后者是研究为达到生产机械某种运转性能的要求，控制线路及控制设备的設計选择问题。

电力机械（发电机及电动机）的出现，在技术史上是继蒸汽机之后的一个极其伟大的成就，它标志着一个新的更高的生产力的出现，使整个工业面貌大为改观。列宁给共产主义所下的简明而深刻的定义——共产主义等于苏维埃政权加电气化，充分说明了电气化在提高劳动生产率和加强国民经济实力上的重要意义。所谓电气化，主要是用电力来代替蒸汽及其他动力。电力比其他动力优越处就在于它的传递、控制方便，损耗少，效率高，在改善劳动条件及安装维护上更是其他动力所不能比拟的。这也就说明了为什么在电力机械出现后短短的几十年中电气化得到如此巨大的发展。

电气化在实践中基本上包括两大部分，即电力的传递和电能与机械能的转换。电力拖动与控制是属于第二部分的基础理论之一。1920年以前本学科没有单独设立，而是附设于电机学中。由于工业企业电气化的迅速发展，在实践中电力拖动控制方面的成果已无法概括在电机学中，因而开始形成了一个独立的学科。近十几年来由于电气化和自动化的巨大发展，使得这门学科的内容大为丰富，同时它所研究的领域也相应地有些改变。

在电力拖动发展的初期，工作机组包含着三个组成部分：原动机（在电力拖动中即为电动机）、机械传动装置和生产机械。而现代的电力拖动与控制学科已经不包括机械传动装置这部分内容了。主要的原因是机械传动装置在拖动系统中不是一个必须的环节，目前的趋势是尽量除去这部分，而使电动机与生产机械靠近，甚至结合成一体。新近的趋向是研究及采用液压传动及电磁联轴器新型传动装置。

在早期，电力拖动研究的内容多偏重于用电的经济性问题。因此改善用电指数是该学科的一个主要内容。而在现代电力拖动与控制中研究的内容多偏重于电力拖动的控制性能，即加速过渡过程调速的性能，以及与之有关的拖动系统动态稳定问题。

在早期电力拖动学科中，对拖动系统的自动调整问题也进行了某些探讨。近代，由于伺服系统的出现和发展，尤其是其中闭环调整系统的发展，使得电力拖动及控制的内容大大丰富了。同时由于伺服系统的发展，关于调整系统的动态稳定就成为一项急需解决的问题。用古典的解决电力拖动系统的过渡过程的办法已经不能满足要求。因此就产生了一门新的学科——自动调整原理。由于这一学科的迅速发展，给电力拖动与控制的飞跃发展打下巩固的理论基础。如果说过去由于工业企业电气化的发展促进了电力拖动与控制学科的建立和发展，那么现在日益增长的工业企业自动化的要求就引起了电力拖动与控制学

科的巨大发展，它反轉过来又大大地促进了工业企业向自动化发展。

电力拖动与控制学科的发展不是孤立进行的，它与其他科学技术的发展密切相关。譬如脉冲技术，計算技术，栅控水銀整流器，半导体，高磁性材料，放射性同位素的新成就，以及电机、电器和机械制造等方面的新成就都促进电力拖动与控制的发展。

电力拖动与控制在国民經济的发展中占有极其重要的地位。它不但促进工业企业、农业以及运输业的电气化、自动化，提高劳动生产率，同时在制造高精度、高质量的产品上也起着决定性的作用，而后者在发展国家的科学和以更新的技术装备国民經济各部門，促进整个国民經济和文化更进一步的发展上起着巨大的作用。

电力拖动与控制在現代化矿山企业中也起着很重要的作用。譬如矿井提升机，露天挖掘机，露天电机车，大型皮带运输机等矿山机械的电力拖动与控制都是极重要的科学技术课题，这些矿山机械的电力拖动与控制的改善，不仅使机械的生产率提高，工作可靠性增加，电能的損耗减少，同时也可使生产机械的机械結構及其传动系統簡化，因而生产机械的重量也可相应地減輕。

我国解放前在反动派的統治下，工业极其落后，沒有自己独立的工业系統。解放后在党和毛主席的英明领导下，自力更生，奋发图强，大搞群众运动，我国逐渐建立了現代化的大企业，基本上已能以自己生产的机器装备国民經济各部門，大大地改变了我国的經济面貌。尤其是在1958年党提出了鼓足干劲、力爭上游、多快好省地建設社会主义总路綫后，全国人民开展了历史上空前的社会主义建設高潮，发挥了破除迷信，敢想敢說敢干的共产主义风格，創造了无数奇迹。在世界先进科学技术的研究和应用方面也获得了伟大的成就。其中也包括电力拖动与控制这門学科。

在今后我国社会主义建設高潮中，为了實現我国科学技术現代化，电力拖动及控制也将担负着重要的任务。我們深信，在毛泽东思想指导下，在不久的将来，我国在所有生产技术装备上将赶上世界最先进的水平。

第一章 电力拖动动力学基础

§1-1. 电力拖动运动基本方程式

任何一种生产机械，其电力拖动系统的运动，均包括两种方式（或称过程）：稳定的运动方式及不稳定的运动方式（或称过渡过程）。这些过程的发生，决定于电气化机组的原动力矩及阻力矩的变化规律。表明过程变化规律的方程式称为运动方程式。

某些电气化机组，在连续的生产过程中，常常频繁地进行启动与制动。因此，启动和制动过渡过程的长短将直接影响生产机械的生产率，所以研究拖动系统过渡过程有重要的实际意义。要研究拖动系统的过渡过程，可以求解运动方程式。其方程式的解答可以确定拖动系统中所需运动力、力矩或电流值变化的规律（即对时间的函数）。根据这些函数关系可以正确选择电动机的容量及检验电动机的发热。

在电力拖动系统中，电动机将取自电网的电能为机械能，带动生产机械。由理论力学得知，当机组处于稳定运转时（速度不变），电动机产生的轴力矩 M （原动力矩或称驱动力矩）仅需克服静态力矩 M_c 。（即与机械运动部分摩擦有关的静态阻力矩。以及与生产机械完成有用功有关的静态位力矩，如矿井提升重物）。而当机组处于过渡过程时，则电动机除需克服上述力矩外，尚需克服由机组运动部分的惯量因速度变化而引起的动态力矩 M_j 。由此可写出运动方程式：

$$M = M_c + M_j, \text{ 或 } M - M_c = M_j. \quad (1-1)$$

式中 M ——电动机产生的原动力矩（公斤·米）；

M_c ——静态力矩（公斤·米）；

M_j ——动态力矩（公斤·米）。

现在我们分析一下动态力矩：

由于拖动系统具有机械惯性，因此当拖动系统工作时，各个运动部分储存有一定数量的动能。当稳定运转时，各运动部分储存的动能是恒定的。当拖动系统加速、减速或在其他不稳定运转情况下，系统的动能储存量将发生变化，例如：加速时，动能的储存量将增加，而此部分能量将由拖动的电动机供给；减速时，拖动系统的运动部分将放出能量。由理论力学得知，以角速度 ω 转动的系统，其动能储存量等于：

$$A_j = J \frac{\omega^2}{2}. \quad (1-2)$$

式中 J ——系统的转动惯量。

当拖动系统的动能储存量变化时，产生动态功率，动态功率等于动能对时间的导数：

$$P_j = \frac{dA_j}{dt}. \quad (1-3)$$

已知动态功率，即可求得以角速度 ω 旋轉的拖动系統的动态力矩值：

$$M_j = \frac{P_j}{\omega}. \quad (1-4)$$

拖动系統的轉动慣量，对某些生产机械來說是一个变量，并且是旋轉角度 α 的函数 $J=f(\alpha)$ 。在矿山方面屬於这类的生产机械包括活塞式压气机，簸动运输机和带有圓錐形滾筒的提升机。因此在一般情况下，动态功率的計算式如下：

$$\begin{aligned} P_j &= \frac{dA_j}{dt} = \frac{d}{dt} \left(J \frac{\omega^2}{2} \right) \\ &= J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt} \\ &= J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^3}{2} \frac{dJ}{d\alpha}. \end{aligned} \quad (1-5)$$

根据式(1-4)求得动态力矩：

$$M_j = \frac{P_j}{\omega} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}. \quad (1-6)$$

将式(1-6)代入(1-1)式則可得到一般形式的运动方程式：

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}. \quad (1-7)$$

式中 $J = m\rho^2$ ——轉动慣量(公斤·米·秒²)；

$\frac{d\omega}{dt}$ ——角加速度(秒⁻²)；

ω ——角速度(秒⁻¹)；

ρ ——回轉半径(米)。

在实际工作中，大多数生产机械的轉动慣量是常量，因此上述运动方程式可簡化为电力拖动中一般采用的形式：

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-8)$$

下面我們对运动方程式加以分析：

根据运动方程式可以确定拖动系統的运动状态。在运动方程式中，根据 M 和 M_c 的相互关系，运动可能是加速的、减速的或等速的。

1) $M - M_c > 0$; $M_j > 0$; $\frac{d\omega}{dt} > 0$ ——加速运动；

2) $M - M_c < 0$; $M_j < 0$; $\frac{d\omega}{dt} < 0$ ——减速运动；

3) $M - M_c = 0$; $M_j = 0$; $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ——等速运动。

当起动时 $\omega_{nau} = 0$ ，虽然 $M = M_c$ ，机組仍然靜止而不可能轉动。因为在起动时，电动机产生的起动力矩必須大于靜态力矩，即 $M_n > M_c$ 方能起动。

运动方程式

$$(\pm M) - (\pm M_c) = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1-9)$$

其中各个量的符号及数值确定如下:

力矩符号(正或负)的确定是以拖动系统的运动方向为依据,即首先将电动机可能有的两个运动方向,根据实际情况选定其一为正方向。

当电动机产生的原动力矩的方向与生产机械运动的正方向一致,即当电动机产生的力矩 M 协助生产机械转动时,力矩 M 取正号,称为拖动力矩,如图1-1, a所示。

当 M 的方向与运动的正方向相反时,为负力矩,取负号。

负力矩阻碍运动,称为制动力矩,如图1-1, b所示。

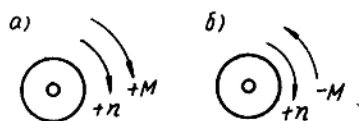


图 1-1 电动机产生的拖动(正)和制动(负)力矩

静态力矩 M_c 的方向与选定的运动正方向相反时,取正号,即当静态力矩阻止运动时算作正力矩。静态力矩协助运动时则取负号。

所有的静态力矩,根据其性质可以分为两类,即阻力矩和位力矩。

阻力矩永远阻碍运动。当运动方向改变时,阻力矩亦随之改变其作用方向,即永远起制动作用。这类力矩包括摩擦力矩、切割和破碎造成的力矩(如截煤机,联合采煤机及破碎机等负载力矩)。

位力矩与运动方向无关。当运动方向改变时,位力矩仍保持其原先的作用方向,如提升重物力矩。

动态力矩 M_j 的方向决定于原动力矩和静态力矩的相对大小,即由两者的代数和确定。

动态力矩确定如下:在电力拖动应用中,计算动态力矩时,一般不采用转动惯量 J ,而采用飞轮惯量 GD^2 ,上述两者的关系以下列等式表示:

$$J = \frac{GD^2}{4g}. \quad (1-10)$$

式中 G ——转动物体重量(公斤);

$D=2\rho$ ——回轉直径(米);

g ——重力加速度(米·秒⁻²);

GD^2 ——飞轮惯量(公斤·米²)。

GD^2 的数值对于电动机的轉子、齿輪传动装置及提升机的滾筒等,通常均載于样本中,亦可用計算或实验的方法求出^①。

将转动惯量数值代入动态力矩公式:

$$M_j = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{4g} \frac{d}{dt} \left(\frac{2\pi n}{60} \right) = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}. \quad (1-11)$$

式中 $\frac{dn}{dt}$ ——电动机每秒钟的轉速变化;

① 參看苏联B.П.安德列耶夫等著:“电力驱动基础”上册,中譯本129—132頁,电力工业出版社,1956年。

n ——电动机的轉速（轉·分⁻¹）。

將動態力矩表示式（1-11）代入（1-1）式并考慮到力矩可能的作用方向，則得到拖動中通常應用的運動方程式：

$$(\pm M) - (\pm M_c) = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}. \quad (1-12)$$

以上分析的是旋轉運動系統的運動方程式或稱力矩方程式。同樣可對直線運動系統列出運動方程式：

$$F - F_c = F_j, \quad (1-13)$$

式中 F ——原動力（公斤）；

F_c ——靜態力（公斤）；

F_j ——動態力（公斤）。

直線運動物體的動能儲積量為：

$$A_j = m \frac{v^2}{2}. \quad (1-14)$$

式中 m ——物體質量（公斤·米⁻¹·秒²）；

v ——綫速度（米·秒⁻¹）。

動態功率：

$$P_j = \frac{dA_j}{dt} = mv \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2} \frac{dm}{ds} \frac{ds}{dt} = mv \frac{dv}{dt} + \frac{v^3}{2} \frac{dm}{ds}. \quad (1-15)$$

式中 $\frac{dv}{dt}$ ——加速度（米·秒⁻²）。

動態力：

$$F_j = \frac{P_j}{v} = m \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2} \frac{dm}{ds}. \quad (1-16)$$

將動態力代入（1-13）式得到一般形式的運動方程式：

$$F - F_c = m \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2} \frac{dm}{ds}. \quad (1-17)$$

當運動物體的質量為常量時，上式簡化為一般採用的形式：

$$(\pm F) - (\pm F_c) = m \frac{dv}{dt}. \quad (1-18)$$

上述對於旋轉運動方程式的一些分析，原則上對於直線運動物體是同樣適用的。

§ 1-2. 靜態力矩和動態力矩的折算

在電力拖動系統中，常常包括有以不同速度轉動和移動的元件，在分析系統的運動狀態時，通常是把一個真實的拖動系統以一個簡化的等值系統來代替。等值系統中，各個元件將具有相同的速度。這就需要對真實系統中以不同速度運動的元件進行折算。折算後各個元件的速度均將相等。一般是等於電動機的速度，即將各個元件折算到電動機軸上去。折算後的等值系統，其力學特性應與真實的拖動系統相同。

由一軸將靜態力矩折算至另一軸須保持兩軸功率相等，並考慮中間傳動部分的損失。

图1-2表示一級齒輪传动系統。

机組轉动部分靜态力矩折算至电动机軸上时按下列公式計算，

$$M'_c = \frac{M_c \omega}{\omega_d \eta} = \frac{M_c}{j \eta} \quad (1-19)$$

式中 M'_c ——机組轉动部分靜态力矩折算至电动机軸上的力矩；

M_c ——轉动部分的靜态力矩；

ω ——轉动部分的角速度；

ω_d ——电动机的角速度；

η ——电动机与轉动部分間传动裝置的效率；

$j = \frac{\omega_d}{\omega}$ ——电动机与轉动部分間的傳速比（角速度比）。

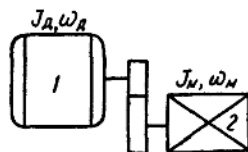


图 1-2 一級齒輪傳动系統
1—电动机；2—生产机械

机組移动部分靜态力矩折算至电动机軸上时按下列公式計算：

$$M''_c = \frac{F_c v}{\omega_d \eta} \quad (1-20)$$

式中 F_c ——移动部分的靜态力；

v ——移动部分的綫速度。

如果电动机以发电机方式运转并向电网送电时，能量从生产机械传至电动机，例如提升机下放重物时，根据以下公式求折算至电动机軸上的轉动部分和移动部分的靜态力矩：

$$M'_c = \frac{M_c \eta}{j} \quad (1-21)$$

$$M''_c = \frac{F_c v \eta}{\omega_d} \quad (1-22)$$

根据上述的折算原則，可以将拖动系統各部分的靜态力矩或靜态力导至任意选定的轉軸。

当拖动系統中同时包括轉动及移动部分时，簡化等值系統折算后总的靜态力矩值为：

$$M_{cnp} = \Sigma M'_c + \Sigma M''_c \quad (1-23)$$

式中 $\Sigma M'_c$ ——拖动系統中各个轉动部分折算后靜态力矩之和；

$\Sigma M''_c$ ——拖动系統中各个移动部分折算后靜态力矩之和。

在根据上列公式进行計算时，确定传动裝置的效率是比較困难的，因为影响传动效率的因素很多：例如传动形式、負載的大小、潤滑情况、生产机械的速度等，通常是根据效率曲綫确定其数值，图1-3給出了标准齒輪传动的效率曲綫，图中 K_s 称为負載系数：

$$K_s = \frac{M}{M_n} \quad (1-24)$$

式中 M ——实际传动力矩；

M_n ——传动裝置的額定力矩。

图中各条曲綫，分別对应于不同額定效率 η_n 的齒輪传动裝置。

用一个等值系統代替一个真实的拖动系統时，为了保持折算前后系統的动力学特性相同，动态力矩同样需要进行折算，折算前后系統中的动能儲积量应保持相等。

折算后的动态力矩按下列公式计算：

$$M_{J_{np}} = J_{np} \frac{d\omega_D}{dt} = \frac{(GD^2)_{np}}{375} \frac{dn_D}{dt}. \quad (1-25)$$

式中 J_{np} 及 $(GD^2)_{np}$ —— 折算后的转动惯量及飞轮惯量值。

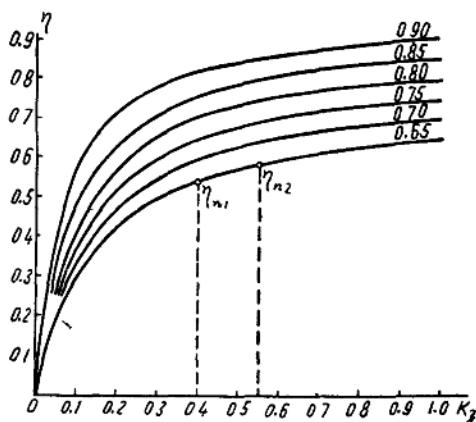


图 1-3 一级齿轮传动的效率曲线

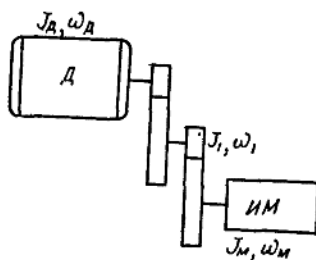


图 1-4 多级传动系统

机组转动部分转动惯量的折算，根据折算前后储能相等得到（传动系统见图 1-4）：

$$J'_{np} \frac{\omega^2}{2} = J \frac{\omega^2}{2}.$$

由此求得：

$$J'_{np} = J \frac{\omega^2}{\omega_D^2} = \frac{J}{j^2}. \quad (1-26)$$

同样可求得飞轮惯量的折算公式如下：

$$(GD^2)'_{np} = \frac{(GD^2)}{j^2}. \quad (1-27)$$

机组移动部分的质量折算为转动惯量，同样根据系统储能不变的原理计算：

$$J''_{np} \frac{\omega_D^2}{2} = m \frac{v^2}{2}.$$

由此求得

$$J''_{np} = m \frac{v^2}{\omega_D^2}. \quad (1-28)$$

根据 (1-10) 可求得折算后的飞轮惯量值：

$$(GD^2)''_{np} = 4gJ''_{np} = 4gm \frac{v^2}{\omega_D^2} = 4g \frac{Q}{g} \frac{v^2}{\omega_D^2} = \frac{4Qv^2}{\omega_D^2}.$$

$$\text{或} \quad (GD^2)''_{np} = \frac{4Qv^2}{\left(\frac{2\pi n_D}{60}\right)^2} = \frac{364Qv^2}{n_D^2}. \quad (1-29)$$

式中 Q —— 移动部分的重量（公斤）。

当拖动系统中同时包括转动及移动部分时，简化等值系统折算后总飞轮惯量值为：

$$(GD^2)_{np} = (GD^2)'_{np} + (GD^2)''_{np}. \quad (1-30)$$

将上式 $(GD^2)_{np}$ 代入(1-25)式, 則得到总动态力矩。

在計算动态力矩时, 准确地考虑传动損失是比較困难的, 因之在动态力矩的折算中就不考虑传动效率了。

当电动机与生产机械轉动部分間有数級传动装置时, 如图1-4所示, 其各級傳速比及效率分別为 $j_1, j_2 \dots$ 及 $\eta_1, \eta_2 \dots$, 靜态力矩按下式折算:

$$M'_c = \frac{M_c}{j_1 j_2 \dots \eta_1 \eta_2 \dots} \quad (1-31)$$

当电动机与移动部分間有数級传动装置时, 靜态力矩按下列公式折算:

$$M''_c = \frac{F_c v}{\omega_0 \eta_1 \eta_2 \dots} \quad (1-32)$$

經過折算后, 拖动系統的运动状态可以用下列运动方程式表示:

$$\begin{aligned} M &= M_c + M_j \\ &= (M'_c + M''_c) + \frac{(GD^2)_{np}}{375} \frac{dn_0}{dt} \end{aligned} \quad (1-33)$$

$$\text{式中 } (GD^2)_{np} = (GD^2)_0 + (GD^2)_1 \frac{1}{j_1^2} + (GD^2)_2 \frac{1}{j_2^2} + \dots + (GD^2)_n \frac{1}{j_n^2}.$$

§ 1-3. 传动的功和功率

机組轉动部分运动时, 由角度 α_1 轉至角度 α_2 , 拖动装置所作之功:

$$A = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} M d\alpha = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} M_c d\alpha + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} M_j d\alpha = A_c + A_j \quad (1-34)$$

式中 α_1 和 α_2 —— 轉动部分的起始角度和最后角度;

A_c —— 拖动装置轉动角度 $(\alpha_2 - \alpha_1)$, 克服靜态力矩消耗之功 (公斤·米);

A_j —— 拖动装置轉动同一角度克服动态力矩消耗之功 (公斤·米)。

拖动装置克服动态力矩所消耗之功:

$$\begin{aligned} A_j &= \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} M_j d\alpha = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} J \frac{d\omega}{dt} d\alpha = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\alpha}{dt} d\omega \\ &= J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega d\omega = J \frac{\omega_2^2}{2} - J \frac{\omega_1^2}{2} \\ &= \frac{GD^2 (n_2^2 - n_1^2)}{7200} \end{aligned} \quad (1-35)$$

$$\text{式中 } 7200 \approx \frac{4g \cdot 2 \cdot 3600}{4\pi^2}.$$

当拖动装置从靜止起动的轉速达到 n_c , 即起始角速度从 $\omega_1 = 0$ 达稳定角速度 $\omega_2 = \omega_c$ 时, 动态力矩或加速力矩所作的功等于:

$$A_{jn} = J \frac{\omega_c^2}{2} = \frac{GD^2 n_c^2}{7200} \quad (1-36)$$

式中 n_c —— 起动的 (加速) 完了时的稳定轉速。

拖动装置停止时减速力矩所作之功，等于停止起始瞬间运动部分储存之动能，此时 $\omega_2=0$ ， $\omega_1=\omega_c$ 由(1-35)式得到：

$$A_{jm} = -J \frac{\omega_c^2}{2} = -\frac{GD^2 n_c^2}{7200} \quad (1-37)$$

加速时运动物体储藏动能，减速时放出。减速时动能消耗于静态力矩上或制动设备中，变为热能；发电制动时，一部分能量可以反馈给电网。

当直线运动时，拖动装置运动力所作的功，由以下公式求出：

$$A = \int_{s_1}^{s_2} F dS = \int_{s_1}^{s_2} F_c dS + \int_{s_1}^{s_2} F_j dS = A_c + A_j \quad (1-38)$$

拖动装置克服动态力所消耗之功等于：

$$\begin{aligned} A_j &= \int_{s_1}^{s_2} F_j dS = \int_{s_1}^{s_2} m \frac{dv}{dt} dS = m \int_{s_1}^{s_2} \frac{dS}{dt} dv \\ &= \int_{v_1}^{v_2} v dv = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} \end{aligned} \quad (1-39)$$

起动时， $v_1=0$ 而 $v_2=v_c$ 得到：

$$A_{jn} = \frac{mv_c^2}{2} \quad (1-40)$$

停止时， $v_2=0$ 而 $v_1=v_c$ 则：

$$A_{jm} = -\frac{mv_c^2}{2} \quad (1-41)$$

根据以下公式可以求出任一瞬间拖动装置的功率：

当转动运动时：

$$\begin{aligned} P &= \frac{dA}{dt} = \frac{M d\alpha}{dt} = M \omega \left(\frac{\text{公斤} \cdot \text{米}}{\text{秒}} \right) \\ &= \frac{M \cdot \omega}{102} \text{ 瓩} = \frac{Mn}{975} \text{ 瓩} \end{aligned} \quad (1-42)$$

式中 $975 = \frac{102 \cdot 60}{2\pi}$ 。

当直线运动时：

$$P = \frac{dA}{dt} = \frac{F ds}{dt} = Fv \left(\frac{\text{公斤} \cdot \text{米}}{\text{秒}} \right) = \frac{Fv}{102} \text{ 瓩} \quad (1-43)$$

§ 1-4. 起动和减速停车时间

在连续生产过程中经常起动和制动的机组，其生产率将直接受到拖动装置起动和制动时间的影响，这些时间可以根据运动方程式加以确定。

当电力拖动装置起动时，运动方程式如下：

$$M - M_c = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-44)$$

根据上式可求得启动过渡过程的延续时间:

$$t_1 = \frac{GD^2}{375} \int \frac{dn}{M - M_c} \quad (1-45)$$

如果加速力矩 $M - M_c$ 在启动过程中维持不变, 则可求出启动时间

$$t_1 = \frac{GD^2}{375} \int_0^{n_c} \frac{dn}{M - M_c} = \frac{GD^2 n_c}{375(M - M_c)} \quad (1-46)$$

式中 n_c ——电动机的稳定转速, 转·分⁻¹;

GD^2 、 M_c ——折算至电动机轴上的飞轮惯量及静态力矩值。

当减速停止电动机时, 常常人为的产生一个制动力矩(电气的或机械的), 在制动力矩和负载力矩作用下, 拖动系统逐渐减速, 以至停止。

拖动装置制动时的运动方程式如下:

$$-M - M_c = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-47)$$

制动过程延续时间

$$t_2 = -\frac{GD^2}{375} \int \frac{dn}{M + M_c} \quad (1-48)$$

如果减速力矩 $M + M_c$ 在制动过程中维持不变, 可求得减速停车时间

$$\begin{aligned} t_2 &= -\frac{GD^2}{375} \int_{n_c}^0 \frac{dn}{M + M_c} = \frac{GD^2}{375(M + M_c)} \int_0^{n_c} dn \\ &= \frac{GD^2 n_c}{375(M + M_c)} \end{aligned} \quad (1-49)$$

在实际工作中, 加速和减速力矩并不经常保持恒定。为了求得启动和减速停车时间, 必须知道加速和减速力矩与转速 n 间的函数关系, (1-45) 及 (1-48) 式始有可能积分。如果函数关系不能以方程式表示, 则采用图解法以求得所需的结果。

为了提高生产率, 我们常常希望缩短启动和制动时间。根据 (1-46) 及 (1-49) 式缩短过渡过程时间我们可以采用下列方法:

1. 减小飞轮惯量 GD^2 ;
2. 充分利用电动机过载能力, 增大加速力矩 $M - M_c$ 或减速力矩 $M + M_c$;
3. 选择适当的传动比 j 。

例题1-1. 根据下列数据计算提升绞车电动机之启动力矩,

电动机启动时间 $t_n = 0.8$ 秒;

稳定运转时电动机之转速 $n_c = 1440$ 转·分⁻¹;

提升的重物 $G = 2000$ 公斤;

绞车滚筒的直径 $D_g = 0.4$ 米;

重物提升的速度 $v = 0.5$ 米·秒⁻¹;

转子之飞轮惯量 $GD_r^2 = 1$ 公斤·米²;

靠背轮的飞轮惯量 $GD_m^2 = 0.3$ 公斤·米²;

滚筒的飞轮惯量 $GD_g^2 = 1$ 公斤·米²;

齿轮的飞轮惯量:

$$GD^2 z_1 = 0.1 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2; \quad GD^2 z_2 = 2 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2;$$

$$GD^2 z_3 = 0.5 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2; \quad GD^2 z_4 = 5 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2;$$

传动比 $j_1 = 6$, $j_2 = 10$;

传动效率 $\eta_1 = \eta_2 = 0.96$ 。

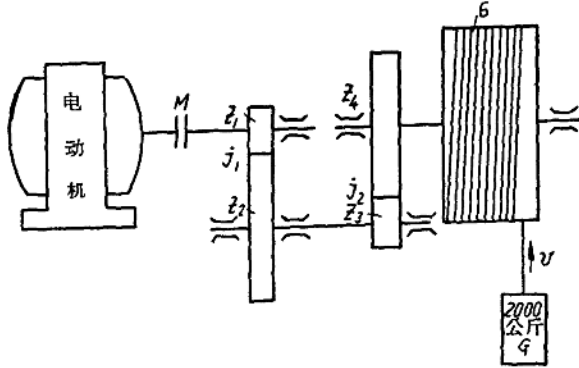


图 1-5 电力拖动提升绞车运动系统略图

解:

1. 求折算至电动机轴上的静态力矩 (阻力矩):

$$M_c = \frac{G \cdot D}{2 \cdot j_1 j_2 \eta_1 \eta_2} = \frac{2000 \times 0.4}{2 \times 6 \times 10 \times 0.96 \times 0.96} = 7.25 \text{ 公斤} \cdot \text{米}.$$

2. 求电动机轴上的飞轮惯量:

$$GD^2_{\phi} = GD^2_{\phi} + GD^2_{\mu} + GD^2_{z_1} = 1 + 0.3 + 0.1 = 1.4 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2.$$

3. 求所有运转部分折算至电动机轴上的飞轮惯量:

$$GD^2 = GD^2_{\phi} + \frac{GD^2_{z_2} + GD^2_{z_3}}{j_1^2} + \frac{GD^2_{z_4} + GD^2_{\phi}}{(j_1 \cdot j_2)^2} + \frac{364 \cdot G \cdot v^2}{n_c^2}$$

$$= 1.4 + \frac{2 + 0.5}{6^2} + \frac{5 + 1}{(6 \times 10)^2} + \frac{364 \times 2000 \times 0.5^2}{1440^2} = 1.562 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2.$$

4. 根据下式求折算至电动机轴上的动态力矩:

$$M_d = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{1.562}{375} \times \frac{1440}{0.8} = 7.5 \text{ 公斤} \cdot \text{米}.$$

注: 计算动态力矩时, 我们假设起动期间为等加速运动, 即:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n_c}{t_n} = \text{const}$$

5. 电动机所需之起动力矩为

$$M_n = M_c + M_d = 7.25 + 7.5 = 14.75 \text{ 公斤} \cdot \text{米}.$$

例题 1-2. 按照下列数字计算 2BM2000/1020A 型双滚筒, 提升绞车电动机起动时的转动转矩。该提升机安装在竖井地面上, 用以提升重物和人。提升高度 $H=200$ 米, 罐笼内矿车数一个, 矿车载重 $Q'=1000$ 公斤, 矿车自重 $Q_0=650$ 公斤, 罐笼及挂绳设备 $Q_c=1600$ 公斤, 钢丝绳每米重量 $p=1.6$ 公斤, 提升电动机为 115 瓩 (轴上), 380/220 伏, JR 6-117-6 型三相交流卷线型感应电动机, 额定转速 $n_n=975$ 转/分。起动时须保证罐笼一定

的加速度 $a = dv/dt = 0.5 \text{ 米} \cdot \text{秒}^{-2}$ 。

解：根据矿山提升中无尾绳机组公式，计算提升机滚筒圆周之静态力（阻力）。

$$F_c = KQ' + pH = 1.2 \times 1000 + 1.6 \times 200 = 1520 \text{ 公斤}。$$

式中 K ——考虑因摩擦而生附加阻力的固定系数即矿

井阻力系数，该系数取 $K = 1.2$ 。

求对滚筒轴心静态力矩：

$$M_c = F_c \cdot \frac{D_g}{2} = 1520 \frac{2}{2} = 1520 \text{ 公斤} \cdot \text{米}。$$

式中 D_g ——滚筒直径 2 米。

折算至电机轴的静态力矩等于：

$$M'_c = \frac{M_c}{j_1 \cdot \eta_1} = \frac{1520}{20 \times 0.9} = 84.4 \text{ 公斤} \cdot \text{米}。$$

式中 $j_1 = 20$ ——提升机转速比；

$\eta_1 = 0.9$ ——提升机传动效率。

计算折算至电动机轴上之动态力矩以前，先计算折算至滚筒圆周上之提升机所有运动部分的重量和质量（不包括电动机转子）。折算重量：

1. 2BM2000/1020A型提升机，1951年苏联国立煤矿技术书籍出版社出版矿井电气绞车和提升机手册载有 $G'_g = 10250$ 公斤。

2. 天轮（两个）按经验公式：

$$2G'_{tu} = 2 \times 90 D_{tu}^2 = 2 \times 90 \times 2^2 = 720 \text{ 公斤}。$$

3. 钢丝绳：

$$\begin{aligned} 2G'_k &= 2p[H + h + L + l + \pi D_g \cdot t] \\ &= 2 \times 1.6[200 + 10 + 20 + 30 + 3.14 \times 2 \times 3] \approx 900 \text{ 公斤} \end{aligned}$$

式中 $H = 200$ 米——提升高度；

$h = 10$ 米——井口装卸台与天轮（导向滑轮）间的距离；

$L = 20$ 米——钢丝绳之弦长（指钢丝绳离开滚筒上之点到与天轮接触点间之距离）；

$l = 30$ 米——滚筒上钢丝绳备用长度；

$t = 3$ ——摩擦圈数。

4. 提升重量：

$$Q' = 1000 \text{ 公斤}。$$

5. 矿车及罐笼自重：

$$2 \times Q'_{c,s} = 2Q_c + 2Q_s = 2 \times 1600 + 2 \times 650 = 4500 \text{ 公斤}。$$

折算至滚筒圆周上之提升设备，所有运动部分的重量：

$$G' = G'_g + 2G'_{tu} + 2G'_k + Q' + 2 \cdot Q'_{c,s}。$$

$$= 10250 + 720 + 900 + 1000 + 4500 = 17370 \text{ 公斤}。$$

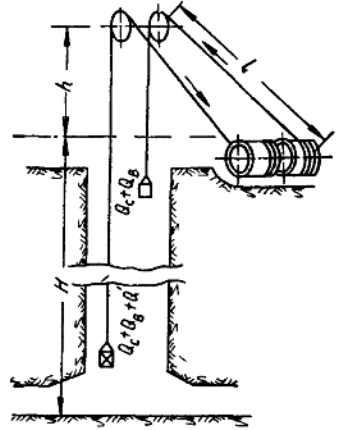


图 1-6 双罐笼提升系统示意图

折算质量:

$$m = \frac{G'}{g} = \frac{17370}{9.81} = 1770.5 \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 \cdot \text{米}^{-1}.$$

提升设备所有移动和转动部分, 对滚筒轴心綫转动惯量 (不包括电动机轉子):

$$J'_{y_{cr}} = m \cdot \left(\frac{D_{\sigma}}{2} \right)^2 = 1770.5 \times \left(\frac{2}{2} \right)^2 = 1770.5 \text{ 公斤} \cdot \text{米} \cdot \text{秒}^2.$$

提升设备的飞輪惯量:

$$G' D_{\sigma}^2 = 17370 \times 2^2 = 69480 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2.$$

折算至电动机軸上整个提升设备全部的飞輪惯量:

$$(GD^2)_{y_{cr}} = (GD^2)_{\sigma}^2 + \frac{G' D_{\sigma}^2}{j_1^2} = 26 + \frac{69480}{20^2} = 1997 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2.$$

式中 $(GD^2)_{\sigma} = 26$ —— 电动机轉子的飞輪惯量 (由样本中找)。

电动机起动力矩:

$$\begin{aligned} M_n &= M'_c + \frac{(GD^2)_{y_{cr}}}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = 84.4 + \frac{199.7}{375} \times \frac{975}{10.2} \\ &= 84.4 + 50.9 = 135.3 \text{ 公斤} \cdot \text{米}. \end{aligned}$$

式中 $\frac{dn}{dt} = \frac{n_n}{t_1} = \frac{975}{10.2}$ —— 按所給条件电动机为等加速起动。

上式中 t_1 之求得为:

$$t_1 = \frac{v_{max}}{\alpha} \approx \frac{\pi \cdot D_{\sigma} \cdot n_n}{\alpha \cdot 60 \cdot j_1} = \frac{3.14 \times 2 \times 975}{0.5 \times 60 \times 20} = 10.2 \text{ 秒} \text{ —— 加速时间(秒)}.$$

第二章 电动机的机械特性

电动机轉速与轉动力矩間之关系 $n = f(M)$, 叫做电动机的机械特性曲綫。此处轉动力矩系指电动机的电磁力矩, 由于机械損失和鉄損失的关系, 它比电动机軸上的輸出轉矩大些。

机械特性曲綫分为固有的和人为的。电动机的固有特性曲綫是指电动机端电压为額定电压, 頻率 (指交流电动机)、激磁电流 (指直流电动机) 也是額定值, 同时电动机电力回路中无附加电阻时所具有之特性。不具备上述条件的机械特性曲綫称为人为特性曲綫。

电动机轉速随負載轉矩变化的程度, 用机械特性曲綫的硬度来代表。特性曲綫上任一点的硬度, 即該点轉矩对轉速的导数, 以公式表示如下:

$$\alpha = \frac{dM}{dn} \quad (2-1)$$

式中 α —— 硬度;

M —— 轉矩 (公斤·米);

n —— 轉速 (轉·分⁻¹)。

当选择拖动电动机时, 必須了解工作机械的要求及电动机的机械特性, 电动机的机械