

T063

D-381

中等专业学校规划教材

矿山电力拖动与控制

段浩钧 彭世生 高延民 甘行建 编

中国矿业大学出版社

862594 - 95

前 言

本书是根据 1991 年煤矿中等专业学校《矿山电工学》会议修订的《矿山电力拖动与控制》教材大纲编写的。本书是煤矿中等专业学校机电专业的教材,也可供矿山电气技术人员参考。

全书分为十一章,系统地介绍了电力拖动动力学和各种类型电动机机械特性(包括启动、调速、制动)方面的知识;电动机选择的方法;控制电器的构造、作用原理以及矿山设备电力拖动的典型控制线路。在内容上兼顾了电力拖动控制技术的发展和我国目前煤矿的生产实际,结合矿山设备的电力拖动与控制进行分析,能更好地为专业培养目标服务。书中带※号的部分是选学内容,可根据不同的学制、不同的时数选择。

本书中电路图的元件图形符号与文字符号均采用新国标,常用角标采用国际通用注脚。

本书由江西煤校段浩钧主编,大同煤校彭世生任副主编。书中绪论,第一、二、十、十一章由段浩钧编写。第三、四、九章由彭世生编写。第五、八章由泰安煤校高延民编写。第六、七章由贵阳煤校甘行建编写。全书的修改定稿由段浩钧负责。

由于编者水平所限,书中难免出现不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

1992 年 10 月

4630/01

目 录

绪 论	(1)
第一章 电力拖动动力学	(2)
第一节 电力拖动系统的转矩及运动基本方程式	(2)
第二节 电力拖动系统转矩的折算	(4)
小结	(8)
习题	(8)
第二章 电动机的机械特性	(10)
第一节 生产机械和电动机机械特性的分类	(10)
第二节 他励直流电动机的机械特性	(14)
第三节 串励直流电动机的机械特性	(23)
第四节 异步电动机的机械特性	(31)
※第五节 同步电动机机械特性概述	(44)
小结	(46)
习题	(47)
第三章 电动机起动设备的计算与选择	(51)
第一节 绕线型异步电动机起动电阻的计算	(51)
第二节 同步电动机、笼型异步电动机起动电抗器及自耦变压器的选择	(72)
小结	(74)
习题	(74)
第四章 电力拖动系统的转速调节	(76)
第一节 调速的意义与调速指标	(76)
第二节 他励直流电动机的调速	(80)
第三节 串励直流电动机的调速	(82)
第四节 异步电动机的调速	(83)
小结	(87)
习题	(88)
第五章 电动机的选择	(89)
第一节 电动机容量选择概述	(89)
第二节 电动机的发热与冷却	(90)

第三节	连续运行状态下电动机容量的选择	(94)
第四节	短时运行状态下电动机容量的选择	(102)
第五节	断续运行状态下电动机容量的选择	(104)
※第六节	电动机结构类型的选择	(105)
小结	.....	(106)
习题	.....	(106)
第六章	控制电器	(108)
第一节	按钮、组合开关、限位开关	(108)
第二节	主令控制器	(111)
第三节	接触器	(112)
第四节	控制用继电器	(115)
第五节	保护电器	(117)
第六节	自动空气开关	(120)
第七节	磁放大器	(121)
第八节	控制电机	(128)
小结	.....	(134)
习题	.....	(135)
第七章	电气控制的基本线路	(136)
第一节	电气控制系统中元件的符号与看图方法	(136)
第二节	基本控制线路	(147)
小结	.....	(153)
习题	.....	(154)
第八章	笼型异步电动机的控制	(156)
第一节	笼型异步电动机降压起动电控系统	(156)
第二节	采煤机的电控系统	(159)
第三节	采煤工作面其他机械电控系统简介	(168)
小结	.....	(174)
习题	.....	(174)
第九章	绕线型异步电动机的控制	(177)
第一节	绕线型异步电动机转子串频敏变阻器起动	(177)
第二节	矿井提升机 TKD-A 电控系统	(181)
第三节	矿井提升机其他电控系统简介	(201)
小结	.....	(206)
习题	.....	(206)

第十章 直流电动机的控制	(212)
第一节 他励直流电动机的控制简介.....	(212)
第二节 矿用电动机晶闸管脉冲调速电控系统.....	(220)
小结.....	(228)
习题.....	(229)
第十一章 同步电动机的控制	(231)
第一节 同步电动机的控制特点.....	(231)
第二节 晶闸管励磁的同步电动机电控系统.....	(232)
小结.....	(245)
习题.....	(246)
主要参考书	(247)

绪 论

电力在煤矿中占有很重要的地位,我国煤矿大量使用各种各样的生产机械,拖动这些生产机械的原动机绝大多数都是电动机。电力拖动能得到广泛应用是因为它具有如下优点:

- 1) 电动机是一种将电能转变为机械能的电磁设备,凡有电能的地方都能使用,而且电动机的效率高、运行比较经济;
- 2) 电动机的种类和型式很多,能适应各种不同生产机械和生产工艺的要求;
- 3) 电动机控制方便,并且可以实现集中控制、远程控制 and 自动控制。

随着生产发展的需要和科学的进步,电动机类型有了很大发展,电动机性能有了很大提高。电力拖动系统已由最初采用一台电动机拖动多台生产机械的“成组拖动”,发展到一台电动机拖动一台生产机械的“单电动机拖动系统”,再发展到一台生产机械由几台电动机分别拖动不同运动机构的“多电动机拖动系统”。控制电器更加精密、灵敏、准确、可靠。控制线路原来采用继电器-接触器控制系统,随着电子技术的迅速发展,无触点控制系统已被大量采用,并已发展到整个生产过程自动化和电脑控制。由于大量使用先进的电力拖动与自动化控制系统,改善了劳动条件,提高了劳动生产率,提高了产品质量。

我国已经自行设计和制造了各种系列的矿用电动机,研究和生产了自动化水平很高的拖动控制系统,近代电子技术和电子计算技术都在矿山得到了应用。今后将由单机自动化、综合自动化向全矿自动化过渡。

《矿山电力拖动与控制》是中等专业学校煤矿机电专业的主要专业课之一,是《普通电工学》、《电机学》、《电子技术》的后续课程,主要研究电动机在各种运行状态下的机械特性,电动机容量的选择,常用控制电器的工作原理以及矿山设备的各种典型控制线路等。

《矿山电力拖动与控制》的理论性、综合性和实用性都较强,学习时应着重理解基本概念、掌握基本方法和注意基本技能的训练,具体应达到下述要求:

- 1) 应用动力学运动方程式,分析电力拖动系统中电动机转矩与负载转矩之间的关系及变化规律。
- 2) 掌握电动机在各种运行状态下机械特性的基本理论,熟悉电动机起动、调速、制动特性以及起动设备的计算方法。
- 3) 正确选择电动机的容量和结构类型。
- 4) 熟悉常用控制电器的用途、构造和工作原理。
- 5) 应用电气控制的基本原则,分析矿山机械各种典型控制线路的组成、控制方法和控制过程,并具有一定的实际操作能力和处理常遇故障的能力。

通过本课的学习和实践,为从事煤矿电气化工作打下牢固的基础。

第一章 电力拖动动力学

第一节 电力拖动系统的转矩及运动基本方程式

“拖动”是应用各种原动机使生产机械产生运动,来完成一定的生产任务。用电动机作为原动机来拖动生产机械的拖动方式,称为“电力拖动”

电力拖动系统是一个统一的动力学系统。系统的运动方程式,由电动机产生的电磁转矩与生产机械负载转矩之间的关系决定。要研究电力拖动系统,就必须分析电动机与负载之间的关系。从动力学的角度来看,它们服从动力学统一的规律。

一、电力拖动装置的组成

一般情况下,电力拖动装置由电动机、工作机构、控制设备及电源四部分组成,如图 1-1 所示。

电动机将取自电网的电能为机械能,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。控制设备是指各种控制电机、电器,用来控制电动机的运行。电源是向电动机及一些电气控制设备供电的部分。

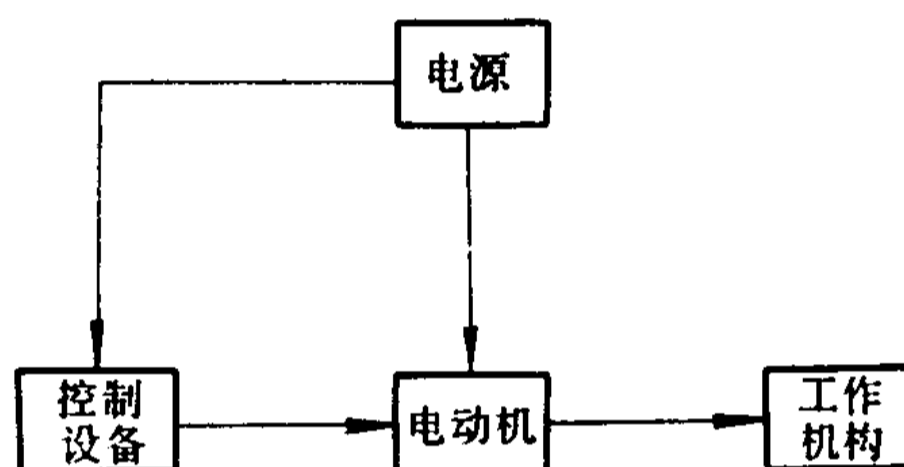


图 1-1 电力拖动系统框图

在许多情况下,电动机与生产机械的工作机构并不同轴,它们之间还有传动机构,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。

二、电力拖动系统的转矩

在电力拖动系统中,有三种转矩存在。

- 1) 拖动转矩——电动机轴上输出的转矩,在一般工程计算中,可认为等于电动机产生的电磁转矩。
- 2) 阻转矩——生产机械的负载转矩。
- 3) 动态转矩——电机转速发生变化时,因为电机转子和被它拖动的生产机械具有惯性而产生的一个惯性转矩。

三、运动方程式

在拖动系统中,当电动机以恒定的转速拖动工作机构稳定运行时,电动机产生的拖动转矩应克服系统的负载转矩。如果要使工作机构变速运行,电动机产生的拖动转矩除克服负载转矩外,还应克服由于运动部分的惯性所引起的动态转矩。按照动力学平衡的观点,将系统中各个转矩联系起来,组成了运动方程式。

$$M - M_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-1)$$

式中 M ——电动机产生的拖动转矩, $N \cdot m$;

M_L ——负载转矩, $N \cdot m$;

$J \frac{d\Omega}{dt}$ ——惯性转矩, $N \cdot m$;

J ——转动惯量, $kg \cdot m^2$;

Ω ——电机轴旋转角速度, rad/s 。

转动惯量 J 是物理学中常用的参量, 在实际的工程应用中则采用飞轮惯量 GD^2 , 其单位是 $N \cdot m^2$ 。两者的关系为

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

式中 m 与 G ——转动部分的质量与重力, 单位分别为 kg 与 N ;

ρ 与 D ——质量 m 的转动半径与直径, m ;

g ——重力加速度, m/s^2 。

通常电动机的转速用每分钟的转数 n 表示, 而不用角速度 Ω 。

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (1-3)$$

将式(1-2)、(1-3)代入式(1-1), 得到运动方程式的实用形式为

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

式中, 换算常数 375 具有加速度的量纲。

应当注意, GD^2 是代表物体旋转惯性的一个整体物理量, 不能分开。电动机电枢(或转子)及其它转动部件的 GD^2 可由产品样本和有关设计资料中查到, 但其单位目前尚用 $kg \cdot m^2$ 表示。为了化成国际单位, 将查到的数据乘以 9.81 则换算成 $N \cdot m^2$ 。

电动机的工作状态可由运动方程式表示出来, 分别由式(1-4)可知:

1) 当 $M > M_L$ 时, $\frac{dn}{dt} > 0$, 电力拖动系统处于加速状态;

2) 当 $M < M_L$ 时, $\frac{dn}{dt} < 0$, 电力拖动系统处于减速状态;

在上述两种情况下, 拖动系统处于变速过程, 称为动态。

3) 当 $M = M_L$ 时, $\frac{dn}{dt} = 0$, 则 $n = 0$ 或 $n = \text{常数}$, 拖动系统静止或以恒定的转速运行, 称为稳定运行状态, 也称静态。

四、运动方程式中转矩正负号的分析

应用运动方程式, 通常以电动机轴为研究对象。由于电动机运行状态不同, 以及生产机械负载类型不同, 作用在电动机轴上的电磁转矩 M 及阻转矩 M_L 不仅大小在变化, 方向也是变化的。因此转矩 M 与 M_L 都有正负之分, 运动方程式可写成

$$\pm M - (\pm M_L) = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-5)$$

在应用运动方程式时,必须注意转矩的正负号,一般规定如下:

预先规定某一旋转方向(如顺时针方向)为正方向,则另一旋转方向(如逆时针方向)为负方向。当电磁转矩 M 的方向与规定的旋转正方向一致时, M 前面取正号,如图 1-2a 所示。相反时,则取负号,如图 1-2b 所示。

阻转矩 M_L 的方向如与所规定的旋转正方向相同时, M_L 前面取负号,如图 1-2c 所示。相反时,则取正号,如图 1-2d 所示。

动态转矩 $\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$ 的大小及正负号,则由 M 与 M_L 的代数和来决定。

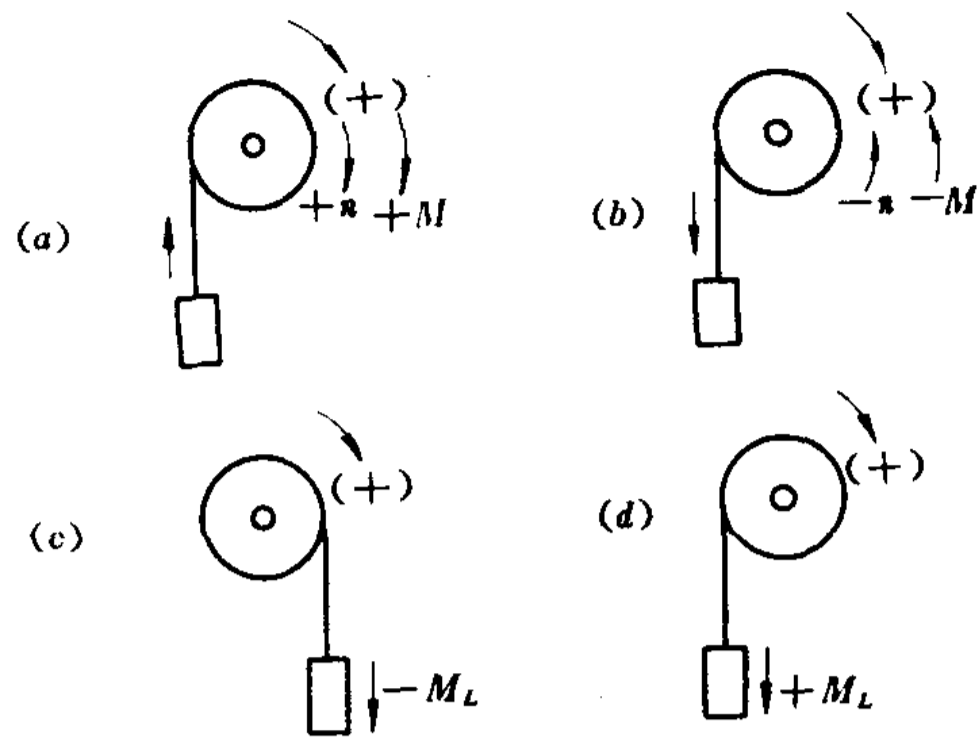


图 1-2 M 和 M_L 的方向与规定正方向的关系

第二节 电力拖动系统转矩的折算

电力拖动系统中,电动机和工作机构不一定直接相联,往往装有若干传动齿轮或其它传动机械,形成多轴系统,如图 1-3a 所示。经过传动装置的变速后,各根传动轴上的转速都不一样,因而各轴上的转矩也不一样。研究这个系统,需要对每根轴分别列出相应的运动方程式,然后联立求解,显然这是很麻烦的。

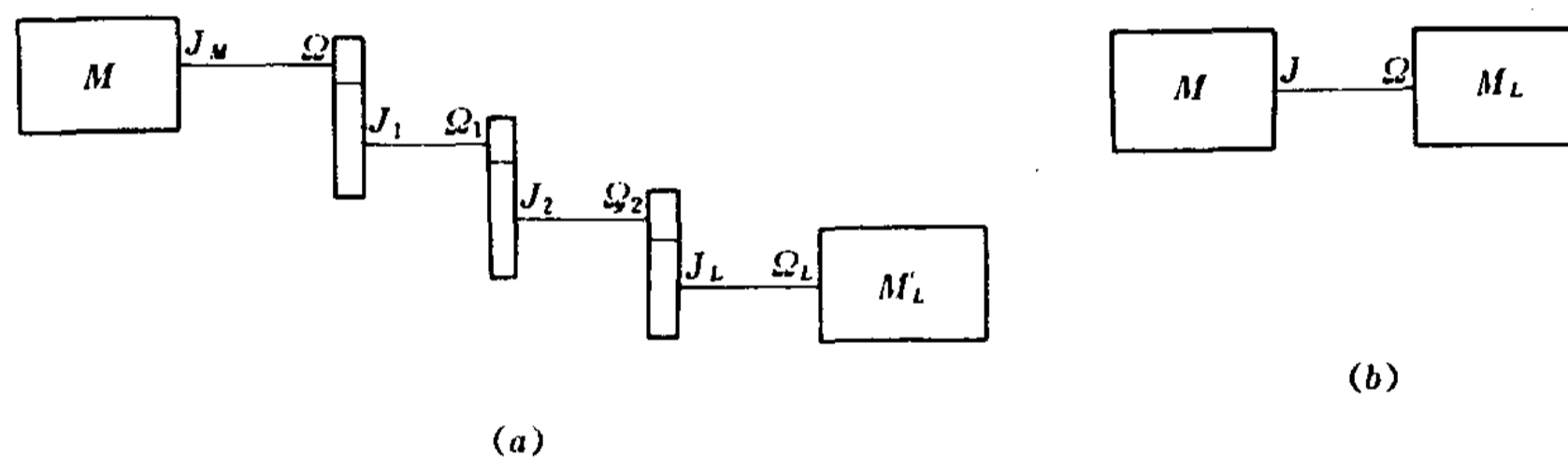


图 1-3 电力拖动系统图
a—传动图, b—等效折算图

研究电力拖动系统,通常只需要研究电动机轴的运转规律,并不需要研究每根轴的问题。为简化运算,可采用等值折算的方法,把工作机构实际负担的转矩折算成电动机轴需要付出的转矩。这样就将多轴系统折算成为等效的单轴系统,如图 1-3b 所示。折算的原则是保持拖动系统在折算前后,其传送的功率和储存的动能不变。

以电动机轴为研究对象,需要折算的参数有:工作机构转矩 M'_L ,系统中各轴(除电动机轴外)的转动惯量 J_1, J_2, \dots, J_L 。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 及运动所需克服的阻力 F_L 折算到电动机轴上去。

一、工作机构转矩的折算

如图 1-3b 所示,用电动机轴上的负载转矩 M_L 来反映工作机构轴上的负载转矩 M'_L 。

折算前,工作机构的功率为

$$P'_L = M'_L \Omega_L \quad (1-6)$$

折算到电动机轴上的功率为

$$P_L = M_L \Omega \quad (1-7)$$

式中 M_L ——折算到电动机轴上的等效负载转矩；

Ω ——电动机转子的角速度。

根据折算前后功率不变的原则，应有下列关系：

$$\begin{aligned} M_L \Omega &= M'_L \Omega_L \\ M_L &= M'_L \frac{\Omega_L}{\Omega} = M'_L \frac{1}{j} \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中 $j = \frac{\Omega}{\Omega_L} = \frac{n}{n_L}$ 为电动机轴与工作机构轴的转速比。

上式说明，在工作机构的低速轴上，转矩 M'_L 较大，而折算到高速的电动机轴上时，其等效的转矩 M_L 就减小了。实际上在传动过程中，传动机构还存在着功率损耗，此损耗称为传动损耗，可用传动效率 η_G 表示。

1) 电动机工作在电动状态时，由电动机带动工作机构，传动损耗应由电动机承担，电动机输出的功率比生产机械消耗的功率大，这时的功率关系为

$$\begin{aligned} M_L \Omega &= M'_L \Omega_L \frac{1}{\eta_G} \\ M_L &= M'_L \frac{1}{j \eta_G} \end{aligned} \quad (1-9)$$

2) 电动机工作在制动状态时，由工作机构带动电动机，传动损耗就由工作机构承担，传送到电动机轴上的功率比工作机构轴上的功率小。这时的功率关系是

$$\begin{aligned} M_L \Omega &= M'_L \Omega_L \eta_G \\ M_L &= \frac{M'_L}{j} \eta_G \end{aligned} \quad (1-10)$$

如传动机构采用多级变速，则总的转速比 j 为各级转速比之积，

$$j = j_1 j_2 \cdots \quad (1-11)$$

一般设备上，电动机在高转速运行，而工作机械在低转速运行，故 $j \gg 1$ 。

在多级传动中，传动的总效率 η_G 为各级传动效率 η_1, η_2, \cdots 之积，

$$\eta_G = \eta_1 \eta_2 \cdots \quad (1-12)$$

不同种类的传动机构，每级效率不同。对于某一具体生产机械，负载大小不同时，效率也不同，一般是空载低，满载高。粗略计算时，可以不考虑这种变化，都可以采用满载效率值来计算。

二、工作机械直线运动作用力的折算

某些生产机械具有直线运动的工作机构，如矿用绞车的钢丝绳以力 F_L 吊质量为 m_L 的重物 G_L ，以速度 v_L 上升或下降，如图 1-4 所示。图中力 F_L 在电动机轴上的反映就是负载转矩 M_L ，其折算方法与上述相同。

当电动机工作在电动状态时，应有如下关系：

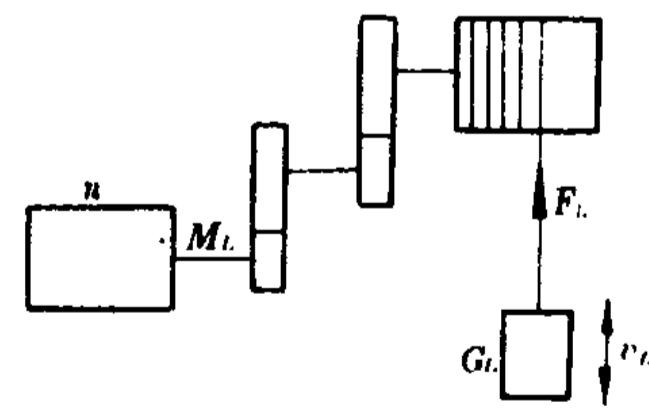


图 1-4 矿井绞车提升装置系统图

$$M_L \Omega = \frac{F_L v_L}{\eta_G}$$

把电动机角速度 Ω 化成每分转速 n , 则得

$$M_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n \eta_G} \quad (1-13)$$

当电动机工作在制动状态时, 则有如下关系:

$$M_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n} \eta_G \quad (1-14)$$

三、传动机构与工作机构飞轮惯量的折算

在一个多轴系统中, 为了反映系统中不同转速轴的转动惯量对运动系统的影响, 可以将传动机构各轴的转动惯量 J_1, J_2, \dots 及工作机构的转动惯量 J_L , 都折算到电动机的轴上, 用电动机轴上一个等效的转动惯量 J 表示。由于各轴的转动惯量对运动过程的影响, 直接反映在各轴所储存的动能上, 因此折算原则是: 折算前的实际系统与折算后的等效系统所储存的动能相等。若各轴的角速度分别为 $\Omega_1, \Omega_2, \dots$ 时, 则得下列关系:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} J \Omega^2 &= \frac{1}{2} J_M \Omega^2 + \frac{1}{2} J_1 \Omega_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \Omega_2^2 + \dots + \frac{1}{2} J_L \Omega_L^2 \\ J &= J_M + J_1 \left(\frac{\Omega_1}{\Omega} \right)^2 + J_2 \left(\frac{\Omega_2}{\Omega} \right)^2 + \dots + J_L \left(\frac{\Omega_L}{\Omega} \right)^2 \end{aligned} \quad (1-15)$$

若用飞轮惯量和转速表示, 则得

$$GD^2 = GD_M^2 + GD_1^2 \left(\frac{n_1}{n} \right)^2 + GD_2^2 \left(\frac{n_2}{n} \right)^2 + \dots + GD_L^2 \left(\frac{n_L}{n} \right)^2 \quad (1-16)$$

或

$$GD^2 = GD_M^2 + \frac{GD^2}{j_1^2} + \frac{GD_2^2}{(j_1 j_2)^2} + \dots + \frac{GD_L^2}{(j_1 j_2 \dots j_L)^2} \quad (1-17)$$

一般情况下, 在系统总的飞轮惯量中, 电动机轴上的飞轮惯量 GD_M^2 所占的比重较大, 工作机构轴上飞轮惯量折算值 $GD_L^2 \left(\frac{n_L}{n} \right)^2$ 所占的比重较小。

四、工作机构直线运动质量的折算

工作机构作直线运动时, 其质量 m_L 中储存有动能, 造成机械运动的惯性, 使速度不能突变。这种直线运动是由旋转的电动机带动的, 因此必须把速度为 v_L 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 的转动体与之等效。折算的原则是转动体储存的动能与质量 m_L 中储存的动能相等。即

$$\frac{1}{2} J_L \Omega^2 = \frac{1}{2} m_L v_L^2 \quad (1-18)$$

考虑到 $J_L = \frac{GD_L^2}{4g}$, $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ 及 $m_L = \frac{G_L}{g}$, 可把式(1-18)化成用飞轮惯量的表示式。即

$$GD_L^2 = \frac{364 G_L v_L^2}{n^2} \quad (1-19)$$

通过上述折算, 把具有多根轴的既有旋转运动又有直线运动的系统, 折算成一个单轴的旋转运动系统。这样仅用一个运动方程式, 就可以研究实际的多轴系统了。

例 1-1 如图 1-5 所示的双滚筒提升绞车。已知数据如下: 提升高度 $H=200\text{m}$, 罐笼内一辆矿车自重 $G_T=6376\text{N}$, 载重 $G_L=9810\text{N}$, 罐笼及挂绳设备重 $G_C=15696\text{N}$, 钢丝绳每米重量 $P=15.69\text{N/m}$, 提升电动机转子飞轮惯量 $GD_M^2=255\text{N} \cdot \text{m}^2$, 电动机额定转速 $n_N=$

975r/min, 绞车按 $a=0.5\text{m/s}^2$ 作等加速起动, 滚筒直径 $D=2\text{m}$, 绞车的转速比 $j=20$, 传动效率 $\eta_G=0.9$, 折算到滚筒圆周上的滚筒和减速器的重量 $G_D+G_{D_e}=100552\text{N}$, 每个天轮折算到滚筒圆周上的重量 $G_w=3532\text{N}$, 试计算电动机的起动转矩。

解:

(1) 求折算到电动机轴上的负载转矩 M_L

作用到滚筒圆周上的负载力 F_L

对于滚筒而言, 两罐笼自重、两矿车自重及井口平台以上两根钢丝绳的重量都是平衡的。负载力只是由矿车载重 G_L 和井口平台以下两根钢丝绳长度差的重量 PH 以及系统运动所受到的摩擦阻力造成。对罐笼而言, 摩擦阻力为 $0.2G_L$, 因此可求出 F_L 为

$$\begin{aligned} F_L &= G_L + 0.2G_L + PH \\ &= 1.2G_L + PH \\ &= 1.2 \times 9810 + 15.69 \times 200 \\ &= 14910\text{N} \end{aligned}$$

作用到滚筒上的负载转矩 M'_L

$$M'_L = F_L \frac{D}{2} = 14910 \times \frac{2}{2} = 14910\text{N} \cdot \text{m}$$

折算到电动机轴上的负载转矩 M_L

$$M_L = \frac{M'_L}{j\eta_G} = \frac{14910}{20 \times 0.9} = 828.3\text{N} \cdot \text{m}$$

(2) 求折算到电动机轴上的飞轮惯量 GD^2

作用到滚筒圆周上的运动部分的重量

系统中作直线运动的各部分, 都由滚筒通过钢丝绳带动, 它们的运动速度都等于滚筒圆周的线速度, 所以这些部分折算到滚筒圆周上的重量就等于它们的实际重量。折算到滚筒圆周上各运动部分的重量有:

滚筒及减速器

$$G_D + G_{D_e} = 100552\text{N}$$

两个天轮

$$2G_w = 7064\text{N}$$

两条钢丝绳

$$\begin{aligned} 2G_R &= 2P(H + h + L + l + \pi Dn) \\ &= 2 \times 15.69(200 + 10 + 20 + 30 + 3.14 \times 2 \times 3) \\ &= 8750\text{N} \end{aligned}$$

式中, $h=10\text{m}$, 为井口平台与天轮间距离; $L=20\text{m}$, 为钢丝绳弦长; $l=30\text{m}$, 为滚筒上钢丝绳备用长度; $n=3$, 为摩擦圈数。

提升载重

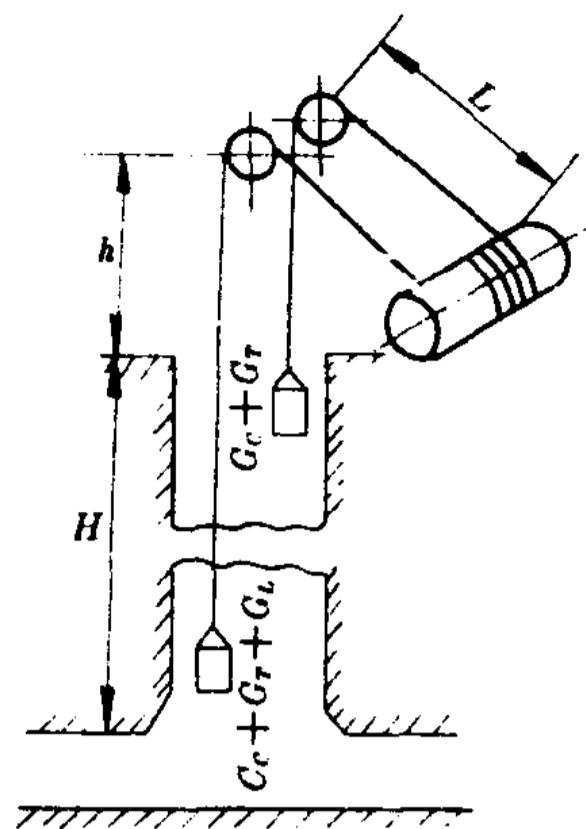


图 1-5 双罐笼提升系统图

$$G_L = 9810\text{N}$$

矿车及罐笼自重

$$2G_T + 2G_C = 2 \times 6376 + 2 \times 15696 = 44144\text{N}$$

折算到滚筒圆周上的运动部分总重量为

$$\begin{aligned} G &= G_D + G_{De} + 2G_W + 2G_R + G_L + 2G_T + 2G_C \\ &= 100552 + 7064 + 8750 + 9810 + 44144 \\ &= 170320\text{N} \end{aligned}$$

运动部分的飞轮惯量 GD_L^2

$$GD_L^2 = 170320 \times 2^2 = 681280\text{N} \cdot \text{m}^2$$

折算到电动机轴上总的飞轮惯量 GD^2

$$\begin{aligned} GD^2 &= GD_M^2 + \frac{GD_L^2}{j^2} = 255 + \frac{681280}{20^2} \\ &= 1958\text{N} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

(3) 求电动机平均起动转矩 M_s

起动时间 t_1

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{v_{\max}}{a} = \frac{1}{a} \frac{\pi D n_N}{60j} = \frac{3.14 \times 2 \times 975}{0.5 \times 60 \times 20} \\ &= 10.2\text{s} \end{aligned}$$

式中, v_{\max} 为提升机的最大速度(m/s)。

电动机平均起动转矩 M_s

$$\begin{aligned} M_s &= M_L + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = 828.3 + \frac{1958}{375} \frac{975}{10.2} \\ &= 1327.3\text{N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

式中, $\frac{dn}{dt} = \frac{n_N}{t_1}$ (按等加速起动考虑)。

小 结

1) 电力拖动系统主要是研究电动机的电磁转矩与工作机构的负载转矩的关系, 可用拖动系统的运动方程式来说明, 即

$$M - M_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

2) 在实际的多轴拖动系统中, 由于各运动部分的速度不同, 转动惯量和转矩也不相同, 使问题的研究比较复杂。为了简化计算, 引入了折算的概念, 把各个轴的影响都折算到电动机轴上, 使电动机和生产机械成为单轴联接的系统。折算原则是保持折算前后系统传送的功率及储存的动能相同。

习 题

1. 什么是电力拖动系统? 它包括哪些部分? 各起什么作用? 举例说明。

2. 电力拖动系统的阻转矩分哪几种? 各有什么特点?
3. 负载转矩和惯性转矩有什么区别和联系?
4. 转矩的正负号是怎样确定的?
5. 试说明 J 和 GD^2 的概念。
6. 试由拖动系统的运动方程式说明系统的加速、减速、稳定或静止的各种工作状态。
7. 什么叫单轴系统, 什么叫多轴系统? 多轴的拖动系统为什么要折算成单轴的拖动系统?
8. 把多轴系统折算为单轴系统时, 哪些量需要进行折算? 折算的原则是什么?
9. 拖动系统如图 1-6 所示。已知罐笼重量 $G_C=4900\text{N}$, 重物重量 $G_L=11770\text{N}$, 平衡物重量 $G_b=7840\text{N}$, 电动机额定转速 $n_N=980\text{r/min}$, 罐笼提升速度 $v_L=2\text{m/s}$, 传动效率 $\eta_G=0.86$ 。试求折算到电动机轴上的负载转矩。

10. 求图 1-7 所示的拖动系统提升重物时, 折算到电动机轴上的负载转矩及折算到电动机轴上的系统直线运动部分的转动惯量。罐笼重量 $G_C=3924\text{N}$, 重物重量 $G_L=9810\text{N}$, 提升速度 $v_L=1.5\text{m/s}$, 电动机额定转速 $n_N=720\text{r/min}$, 传动效率 $\eta_G=0.85$, 传动机构及滚筒的转动惯量折算值忽略不计。

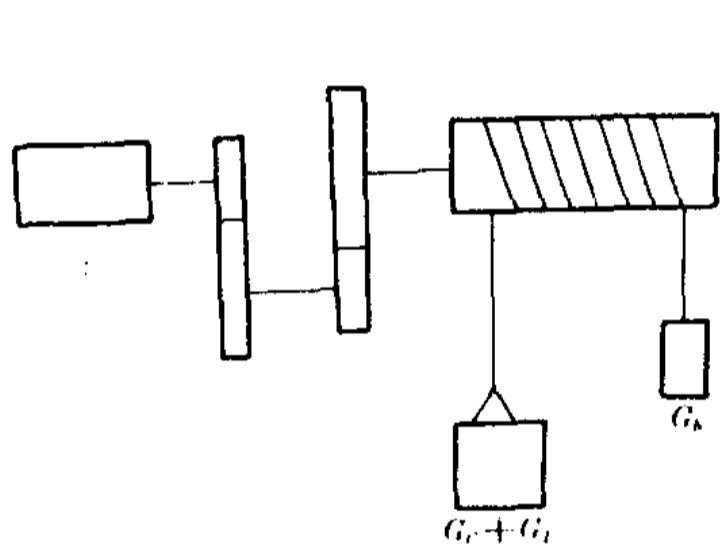


图 1-6 习题 9 的拖动系统图

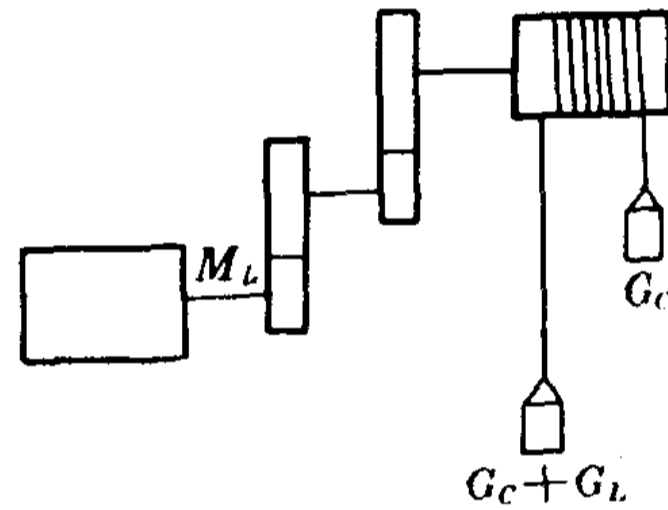


图 1-7 习题 10 的拖动系统图

11. 拖动系统如图 1-8 所示, 已知提升重物 $G_L=19620\text{N}$, 提升速度 $v_L=0.51\text{m/s}$, 滚筒直径 $D=0.4\text{m}$, 转子飞轮惯量 $GD_M^2=9.81\text{N}\cdot\text{m}^2$, 滚筒飞轮惯量 $GD_b^2=9.81\text{N}\cdot\text{m}^2$, 齿轮飞轮惯量 $GD_1^2=0.98\text{N}\cdot\text{m}^2$, $GD_2^2=19.62\text{N}\cdot\text{m}^2$, $GD_3^2=4.91\text{N}\cdot\text{m}^2$, $GD_4^2=49\text{N}\cdot\text{m}^2$, 电动机转速 $n_N=1450\text{r/min}$, 各级转速比 $j_1=6$, $j_2=10$, 传动效率 $\eta_1=0.96$, $\eta_2=0.95$, 电动机起动时间 $t_1=2\text{s}$ 。试求电动机的起动转矩。

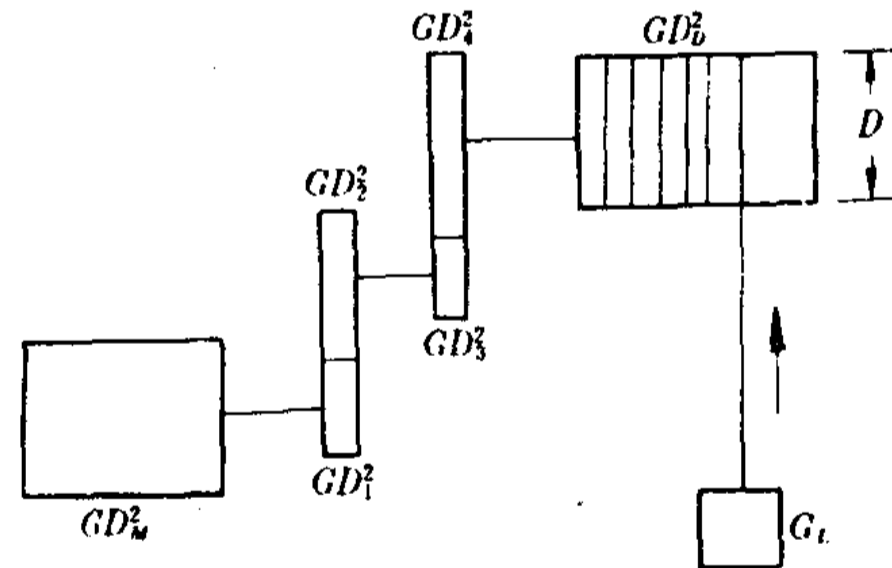


图 1-8 习题 11、12 的拖动系统图

12. 拖动系统见图 1-8, 已知重物的质量 $m_L=5000\text{kg}$, 滚筒直径 $D=1.2\text{m}$, 提升速度 $v_L=1.7\text{m/s}$, 电动机飞轮惯量 $GD_M^2=62.72\text{N}\cdot\text{m}^2$, 各齿轮飞轮惯量 $GD_1^2=9.8\text{N}\cdot\text{m}^2$, $GD_2^2=78.4\text{N}\cdot\text{m}^2$, $GD_3^2=38.2\text{N}\cdot\text{m}^2$, $GD_4^2=156.8\text{N}\cdot\text{m}^2$, 滚筒飞轮惯量 $GD_b^2=294\text{N}\cdot\text{m}^2$, 各级转速比 $j_1=j_2=6$, 每对齿轮效率 $\eta_G=0.94$, 起动时间 $t=2\text{s}$, 试求电动机的起动转矩。

第二章 电动机的机械特性

第一节 生产机械和电动机机械特性的分类

电动机是拖动系统中的原动机,要使生产机械正常而有效的工作,必须使电动机的机械性能满足生产机械的要求。电动机的机械特性是机械性能的主要表现,它决定了电动机在各种运行状态下的工作情况。

在电力拖动系统中,电动机的转矩 M 拖动生产机械做各种形式的运动,以及做各种状态的运行。但是不同类型的生产机械,负载转矩的特性不同。不同类型的电动机,机械特性的形状也不相同。

一、生产机械的负载转矩特性

生产机械在运转中会受到阻转矩的作用,此转矩称为负载转矩 M_L 。生产机械负载转矩的大小和许多因素有关,通常把负载转矩与转速的关系 $M_L=f(n)$ 称为生产机械的机械特性,或叫做负载转矩特性。根据统计,大多数生产机械的负载转矩特性可归纳为三种类型。

1. 恒转矩负载特性

所谓恒转矩负载特性,是指当转速变化时,负载转矩保持常值,如图 2-1 所示。画图时,习惯上把 M_L 作为横坐标,把 n 作为纵坐标。矿井提升机、皮带输送机等具有此种特性。

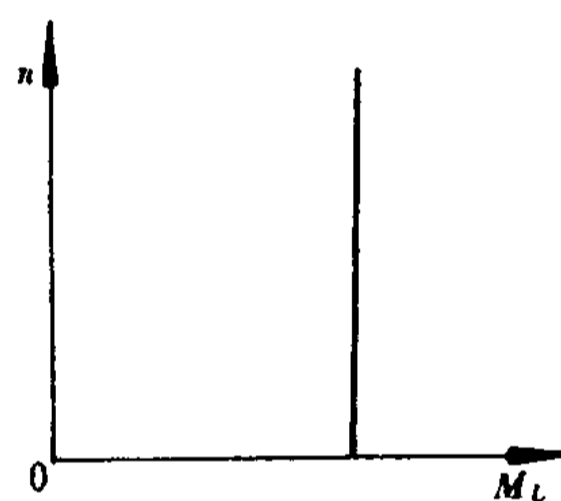


图 2-1 恒转矩负载特性

根据负载转矩的方向是否与转动方向有关又分为两大类,一类是反作用转矩,另一类是位能转矩。

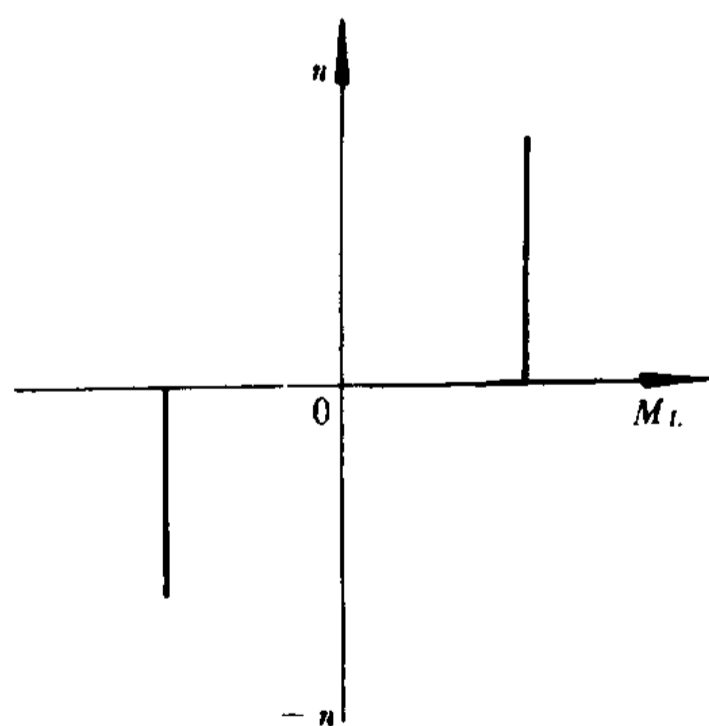


图 2-2 反作用性质恒转矩负载特性

反作用恒转矩负载特性的特点是:负载转矩 M_L 总是反对运动的, M_L 的方向永远与转速方向相反。根据 M_L 正负符号的规定,当顺时针方向旋转时, n 为正,转矩 M_L 与正旋转方向相反,应取正号。当逆时针方向旋转时, n 为负,转矩 M_L 为顺时针方向,应取负号,如图 2-2 所示。由图可知,反作用性质的恒转矩负载特性在第一与第三象限内。采煤机的负载转矩属于这类特性。

位能性恒转矩负载特性的特点是:负载转矩 M_L 具有固定的方向,不随转速方向的改变而改变,如图 2-3 所示。特性在第一与第四象限内。矿井提升机的载荷对滚筒形成的负载转矩,属于这类特性。如以电动机顺时针旋

转时提升重物,逆时针旋转时下放重物,则不论重物运行方向是提升或是下放,负载的重力作用总是向下的。提升时, M_L 取正号, M_L 反对运动。下放时, M_L 方向不变,仍取正号,这时 M_L 协助运动。

2. 通风机负载特性

通风机负载转矩是反作用转矩,如矿井扇风机、水泵等,其中空气、水对机器叶片的阻力基本上和转速的平方成正比,即

$$M_L = Kn^2$$

式中 K ——比例常数。

通风机负载特性是一条抛物线,如图 2-4 所示。

3. 恒功率负载特性

某些机床,如车床车削工件,粗加工时,切削量大,因而切削阻力大,采用低速。精加工时,切削量小,阻力也小,采用高速。但负载功率基本不变,形成恒功率的负载特性。

负载功率恒定时,则负载转矩与转速成反比,即

$$P_L = M_L \Omega = M_L \frac{2\pi n}{60} = \frac{M_L n}{9.55} = \frac{K}{9.55} = \text{常数}$$

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

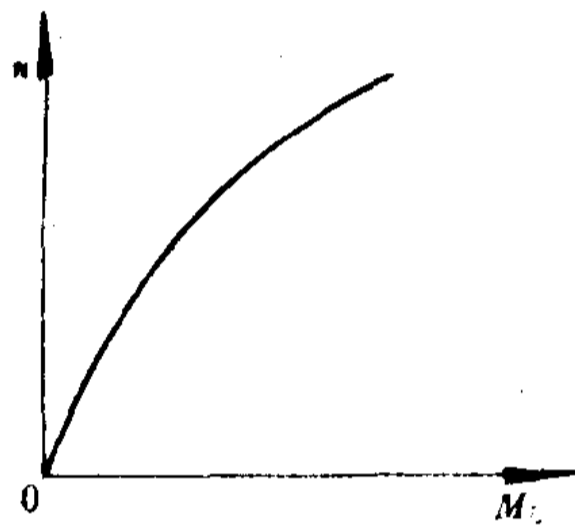


图 2-4 通风机负载特性

式中 P_L ——负载功率, W。

恒功率负载特性是一条双曲线,如图 2-5 所示。

二、电动机的机械特性

电动机带动负载,其作用就是给生产机械的工作机构发出一定的转矩 M ,并使它有一定的转速 n 。所以 M 和 n 是生产机械对电动机提出的两项基本要求。确定了 M 和 n 后,不但确定了电动机的运行点,而且电动机的功率 P 也就知道了。

在电动机内部,电磁转矩 M 和转速 n 存在着一定的关系, $n=f(M)$,这个关系称为机械特性。

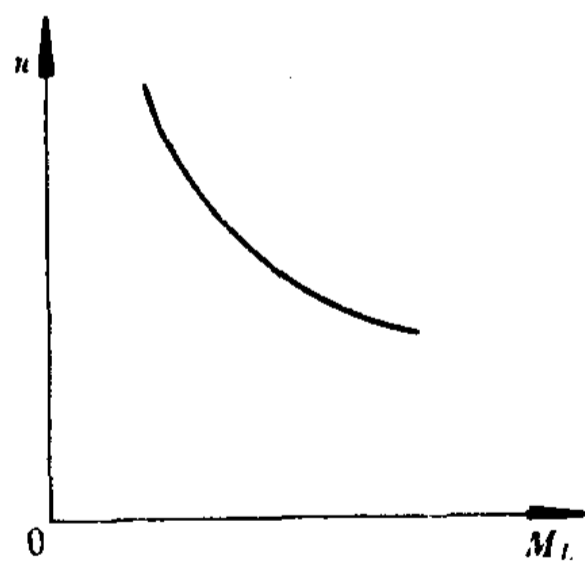


图 2-5 恒功率负载特性

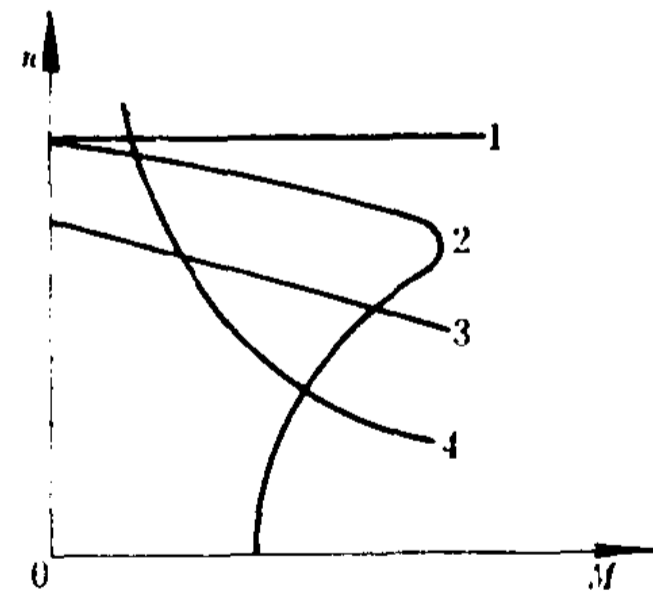


图 2-6 常用电动机的机械特性

机械特性是电动机机械性能的主要表现,是生产机械选择电动机的主要依据。各种常用电动机的机械特性在《电机学》中已有初步阐述,它们的机械特性曲线如图 2-6 所示。其中曲线 1 为同步电动机机械特性;曲线 2 为异步电动机机械特性;曲线 3 为他励直流电动机机械特性;曲线 4 为串励直流电动机机械特性。

对这样多的电动机机械特性,为了表征其特性形状的特点,引入了机械特性“硬度”的概念。所谓特性的“硬度”,是指电动机转矩的改变引起转速变化的程度,通常用硬度系数 α 表示。特性曲线上任一点的硬度系数,就是该点转矩变化的百分数与转速变化百分数之比,即

$$\alpha = \frac{\Delta M\%}{\Delta n\%} \quad (2-1)$$

根据硬度系数的大小,可以把电动机的机械特性分成三类:

1) 绝对硬特性 当转矩变化时,电动机的转速恒定不变,硬度系数 $\alpha = \infty$ 。同步电动机机械特性属于此种特性。

2) 硬特性 当转矩变化时,电动机的转速变化不大,硬度系数 $\alpha = -(40 \sim 10)$ 。因为特性曲线是向下倾斜的,随着转矩的增加,转速略有下降,故硬度系数为负值。异步电动机机械特性的工作部分和他励直流电动机的机械特性属于硬特性。

3) 软特性 当转矩增加时,转速下降幅度很大, $\alpha = -(5 \sim 1)$ 左右。串励直流电动机具有此种特性。

在生产实践中选用何种特性的电动机,要根据生产机械的要求决定。例如空气压缩机选用绝对硬特性的电动机,矿井提升机、水泵等选用硬特性的电动机,矿用电机车则选用软特性的电动机。

三、电动机稳定运行条件

电动机拖动生产机械运行时,负载转矩通过传动机械作用于电动机轴上,所以在系统运行中,电动机的机械特性与生产机械的负载转矩特性是同时存在的。为了分析拖动系统的运行问题,把两个特性画在同一坐标图上。要使电动机稳定运行,必须具有下述条件。

1. 必要条件

根据运动方程式可以知道,在电动机的机械特性与生产机械负载转矩特性的交点处,转矩 M 与 M_L 大小相等,方向相反,相互平衡,此时的转速为某一稳定值,此交点称为运行工作点。在工作点处,系统处于稳态。所以两个特性有交点是稳定运行的必要条件。如图 2-7 所示,图中 A 点为他励直流电动机拖动恒转矩负载的一个稳定运行点。如负载转矩由 M_{L1} 增加到 M_{L2} ,则电动机转矩也相应增加,系统工作点从 A 点移到 B 点,又稳定运行于 B 点。

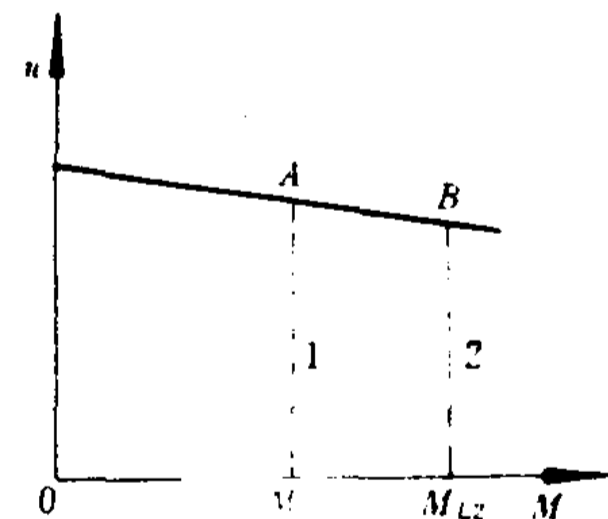


图 2-7 他励直流电动机拖动恒转矩负载的稳定运行条件

2. 充分条件

设拖动系统原来在某交点处稳定运行,由于受到外界的某种干扰作用,如电网电压的波动或负载的突然变化等,使电动机的转速发生变化,离开了原来的工作点。当干扰消除后,拖动系统应有能力使转速恢复到原来交点处的数值,如能满足此条件,则系统是稳定的。现以图 2-8 所示的特性为例,分析如下: