

中等专业学校试用教材

电力拖动基础

上海电机制造技术专科学校 海定广 主编

ZHONGDENG
ZHUANYE
XUEXIAO
JIAOCAI



机械工业出版社

前 言

本书是根据原国家机械工业委员会 1986 年 11 月制订的中等专业学校工业企业电气化专业教学计划与《电力拖动基础》课程教学大纲编写的。

本书打破了以电动机为主线附带拖动内容的传统编写方法，而改为以拖动内容为主线的课程体系，重点放在直流他励电动机和感应电动机的拖动上，并将机械特性、各种运转状态、起动和制动电阻的计算以及调速作为基本内容，进行比较详细的分析。为了加强理论联系实际，书中结合生产实际和应用，列举了大量的例题、思考题与习题。

全书共五章，主要内容包括：电力拖动的机械特性；电动机的转速调节；电力拖动的过渡过程；电动机容量的选择等。

本书第一至四章由海定广编写，第五章由王景山编写，附录由褚文奎编写。

本书由上海大学工学院史美刚副教授担任主审。参加审稿的有徐虎、陈英、胡辛鸣、李林等同志，编者对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，殷切希望读者批评指正。

编 者

1989年3月

目 录

第一章 绪论	1	§ 4-1 概述	102
§ 1-1 电力拖动的应用及其优越性	1	§ 4-2 直流他励电动机在恒定负载下的过渡过程	103
§ 1-2 电力拖动的组成与发展	1	§ 4-3 直流他励电动机启动过渡过程	105
§ 1-3 课程的性质、任务和内容	2	§ 4-4 直流他励电动机能耗制动的过渡过程	108
第二章 电力拖动的机械特性	3	§ 4-5 直流他励电动机反向的过渡过程	110
§ 2-1 生产机械和电动机的机械特性	3	§ 4-6 发电机—电动机系统启动的过渡过程	111
§ 2-2 电力拖动系运动方程式	5	§ 4-7 发电机—电动机系统的过渡过程	114
§ 2-3 直流他励电动机的机械特性	12	第五章 电动机的选择	120
§ 2-4 直流他励电动机的启动和启动电流的计算	17	§ 5-1 概述	120
§ 2-5 直流他励电动机的制动	22	§ 5-2 电动机的发热和冷却	120
§ 2-6 直流串励电动机的机械特性及各种运转状态	31	§ 5-3 电动机容量选择的步骤	123
§ 2-7 直流复励电动机的机械特性及各种运转状态	39	§ 5-4 连续工作制电动机容量的选择	125
§ 2-8 三相感应电动机的机械特性	40	§ 5-5 短时工作制电动机容量的选择	133
§ 2-9 三相感应电动机的启动	51	§ 5-6 周期性断续工作制电动机容量的选择	135
§ 2-10 感应电动机的各种运行状态	56	§ 5-7 笼型感应电动机允许接电次数的计算	138
第三章 电动机的调速调节	65	§ 5-8 选择电动机容量的统计法和类比法	139
§ 3-1 调速的基本概念和指标	65	§ 5-9 电动机种类、额定电压、额定转速和结构型式的选择	140
§ 3-2 直流他励电动机的调速	70	附录	142
§ 3-3 直流串励电动机的调速	79	本书主要符号表	154
§ 3-4 直流发电机—电动机调速系统	80	主要参考书目	156
§ 3-5 具有电机放大机的发电机—电动机调速系统 (AG—G—M调速系统)	82		
§ 3-6 感应电动机的转速调节	83		
第四章 电力拖动的过渡过程	102		

第一章 绪 论

§ 1-1 电力拖动的应用及其优越性

在现代工业、农业、交通运输的各个部门中，为了实现生产工艺过程的各种要求，需要广泛采用各种各样的生产机械，其中一部分生产机械采用气动或液压拖动，而大多数生产机械都采用电动机拖动，电力已成为主要动力。电力拖动工作机械有许多优点：

(1) 电能的生产、变换、传输、分配都比较经济，使用和控制比较方便；
(2) 电力拖动比以蒸汽、水力、压缩空气等为动力的拖动效率要高，且电动机与被拖动机械的连接简便；

(3) 电力拖动所用电动机的类型很多，具有各种运行特性，适应不同生产机械的需要，还可借助于控制设备和仪表的远距离测量，实现局部工作自动化或整个过程的自动化。

因此，电力拖动对于实现工业自动化、改善工人劳动条件、减轻繁重体力劳动、简化机器结构、减少能量损耗、改善产品质量和提高机器生产率起重要作用。

§ 1-2 电力拖动的组成与发展

驱使机器工作机构运动的电气机械装置或系统称为电力拖动装置 (Electric Driving Set) 或电力拖动系统 (Electric Driving System)，它是机器设备的一个部分，由四个环节组成，如图 1-1 所示。

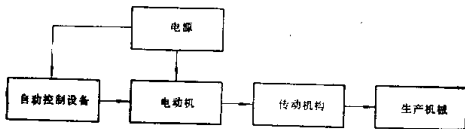


图 1-1 电力拖动系统组成示意图

1. 电动机 (Motor)

在电动状态下，产生原动力，把电能转换为机械能；在制动状态下，产生制动力，把机械能转换为电能或热能。所以说，电动机是用来实现电能与机械能互相转换的机械。

2. 传动机构 (Transmission Mechanism)

用来传递动力，实现速度和运动方式的变换，如减速箱、皮带、联轴节等。

3. 控制设备 (Control Appliance)

控制电动机运转的设备，由各种控制电机、电器、自动化元件及工业控制计算机等组成。

4. 电源 (Power Supply)

向电动机及控制设备供电的部分叫电源。

工业上应用的电力拖动有三种方式：成组电力拖动、单机电力拖力和多机电力拖动。自从 19 世纪末电动机逐渐代替蒸汽机以后，最初应用成组拖动，即由一台电动机拖动天轴，再经过皮带或绳索来分别拖动许多工作机械，这种拖动能量损失很大，效率很低，不能运用电动机调速性能，不能实现自动控制，且不安全，一般已不使用。

20 世纪 20 年代开始采用单机拖动，即由一台电动机拖动一台工作机械，这就减少了中间传动机构，提高了效率，可充分利用电动机调速性能，满足生产机械的要求。随着生产的发展和产品质量的提高，加工工艺越来越复杂，需制造出各种大量复杂机器设备，一台机器上有许多运动机构，如用一台电动机拖动，传动机构就很复杂。在 30 年代用多电动机拖动，即用单独电动机分别拖动复杂机械的各个工作机构，在这种拖动中容易实现自动化，提高劳动生产率。目前工厂企业中，多数生产机械采用单电动机和多电动机拖动方式。

在控制方面可分为两种控制系统：

(1) 断续控制系统 控制不连续，比较简单，目前工厂中广泛应用，采用的元件多数是继电器、接触器，所以又称为继电器-接触器控制系统 (Relay-Contactor Control System)。

(2) 连续控制系统 控制连续，可获得较好的静态和动态特性，用作连续控制系统的元件有放大机、磁放大器、电子放大器等。因采用了各种反馈环节，故又可称为反馈控制系统 (Feed-back Control System)。

由于近 20 年来电子技术和控制理论迅速发展，电动机的调速已形成了电子功率元件晶闸管与自动控制相结合的新领域，特别是电子计算机 (Computer) 的出现和应用，为生产过程自动化开辟了新的途径。

§ 1-3 课程的性质、任务和内容

本课程是工业企业电气化专业基础课，其主要任务是使学生学会计算和选择电力拖动装置所必需的基础理论知识和实际技能，同时给学习“电力拖动自动控制系统”课程打下良好的基础。在学习时要注意理论联系实际，重视习题和实验。

本课程主要内容分四个部分：电力拖动的机械特性、电动机转速的调节、电力拖动的过渡过程和电动机容量的选择。在学习中应注意它们之间的联系，力求达到融会贯通。

第二章 电力拖动的机械特性

§ 2-1 生产机械和电动机的机械特性

生产机械运行时常用转矩标志其负载的大小。在电力拖动系统中存在着两个主要转矩，一个是生产机械的负载转矩 T_L ，一个是电动机的电磁转矩 T 。这两个转矩与转速之间的关系分别叫做生产机械的机械特性 $n = f(T_L)$ 和电动机的机械特性 $n = f(T)$ 。由于电动机和生产机械是紧密相联的，它们的机械特性必须适当配合才能得到合理的工作状态，因此为了满足生产工艺过程要求，正确选择电力拖动系统，就需要了解生产机械的机械特性和研究电动机的机械特性。

一、生产机械的机械特性

作为电动机负载的生产机械的负载转矩可分为两类，即反抗力矩和位能力矩。

反抗力矩——它是摩擦力造成的力矩，它不管运动方向如何，始终阻碍运动，见图 2-1 a。

位能力矩——它是重垂、弹性体的压缩力、张力和扭转造成的力矩，在某一运动方向它阻碍运动，在相反的运动方向却促进运动，如起重机的负载，无论是上升 ($n > 0$) 或下降 ($n < 0$)，因重力作用，负载转矩始终向下，见图 2-1 b。

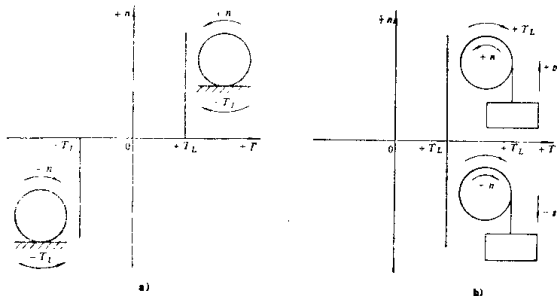


图 2-1

a) 反抗力矩 b) 位能力矩

不同类型生产机械的机械特性也不同，可以归纳有以下几种类型：

1. 恒转矩负载特性 其负载转矩与速度无关，并始终保持为恒定值，例如起重机(Crane)、卷扬机(Whim)、皮带输送机(Belt Conveyer)及各种机床的进给机构(Feed Mechanism)等机械的负载转矩，见图 2-2 a。

2. 变转矩负载特性 其负载转矩随速度变化, 根据变化规律不同, 又可分为

(1) 负载转矩与速度成比例变化, 例如励磁恒定, 带不变的外接电阻负载运转的直流他励发电机轴上的负载转矩, 即对于拖动发电机的电动机来说属于此类负载, 见图 2-2 b 中曲线 1;

(2) 负载转矩与速度的二次方成比例变化, 例如通风机、螺旋桨、水泵、油泵等机械的负载转矩, 见图 2-2 b 中曲线 2;

(3) 恒功率负载的转矩与转速成反比, 但其乘积(功率)近似保持不变, 见图 2-2 b 中曲线 3。例如车床 (Lathe), 在粗加工时, 切削量大, 切削力大, 速度低; 在精加工时, 切削量小, 速度高。

二、电动机的机械特性

分析电动机的性能时, 机械特性具有重要的意义, 多数电动机的机械特性是转速随转矩增加而下降, 但是不同的电动机其下降程度不同, 一般用特性硬度评价电动机机械特性变化程度。

所谓机械特性硬度是指在机械特性曲线的工作范围内某一点转矩对该点转速的微分

$$\beta = \frac{dT}{dn}$$

按照机械特性硬度概念, 所有电动机的机械特性可以分类如下:

(1) 绝对硬特性——转矩变化, 转速不变化。如同步电动机的机械特性

$$\beta = \frac{\Delta T}{\Delta n} = \infty$$

(2) 硬特性——转矩变化, 转速降落小。 $\beta = 40 \sim 10$, 属于这一类的有直流他励电动机和感应电动机直线部分的机械特性。

(3) 软特性——转矩变化, 转速降落较大。 β 小于 10, 如直流串励电动机的机械特性。

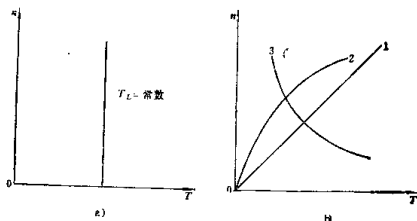


图 2-2 电动机的负载类型
a) 恒转矩负载 b) 变转矩负载

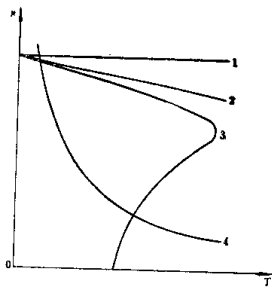


图 2-3 几种类型电动机的机械特性曲线
1—同步电动机机械特性 2—他励电动机机械特性 3—感应电动机机械特性 4—串励电动机机械特性

§ 2-2 电力拖动系统运动方程式

在一个电力拖动系统中，电动机处于稳定状态或过渡状态，主要决定于电动机所产生的转矩 T 和负载转矩 T_L 是否平衡，其运行状态取决于电动机的机械特性和生产机械静阻转矩的机械特性。为了深入地分析和研究静态和动态特性，需要用数学模型描述，建立电力拖动系统运动方程式。

一、运动方程式

根据力的平衡原理，在作直线运动时，作用力 F 总是为机器的阻力 F_L 以及由速度变化时产生的惯性力 $m \frac{dv}{dt}$ 所平衡。根据牛顿第二定律，在直线运动中力的平衡方程式为

$$F - F_L = m \frac{dv}{dt} \quad (2-1)$$

式中 F ——作用力，
 F_L ——静阻力，
 v ——线速度，
 m ——物体质量。

与直线运动相似，在旋转运动中，根据能量平衡原则，功率平衡方程式为

$$P - P_L = P_J$$

$$P_J = \frac{dA}{dt}$$

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

$$P - P_L = \frac{dA}{dt} = J \Omega \frac{d\Omega}{dt}$$

即

$$T \Omega - T_L \Omega = J \Omega \frac{d\Omega}{dt}$$

式中 P ——电动机功率，
 P_L ——负载功率，
 P_J ——动态功率，
 A ——旋转体动能。

当电动机与被拖动的生产机械是在同一根轴上，而转速相同时，则消去等式两边 Ω ，得到转矩平衡方程式为

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2-2)$$

上式称为电力拖动系统的运动方程式。

式中 J ——拖动系统的转动惯量，
 Ω ——拖动系统的旋转角速度。

转动惯量也可用下面公式表示：

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

式中 ρ ——旋转体的惯性半径，单位为 m ；

D ——旋转体的惯性直径，单位为 m ；

m ——旋转体质量，单位为 kg ；

G ——旋转体所受的重力（和质量 m 的关系是 $G = mg$ ），单位为 N ；

g ——重力加速度，单位为 m/s^2 。

由此得 $GD^2 = 4gJ$

GD^2 是表示物体飞轮矩这一物理量的符号，它作为一个整体物理量，称为飞轮惯量或飞轮矩。电动机的飞轮惯量在产品目录中给出。

角速度 Ω 可用下面公式表示：

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

式中 n ——拖动系统的转速，单位为 r/min 。

把方程式 (2-2) 中的 J 和 Ω 代之以 GD^2 和 n ，可得到在实际计算中常用的运动数值方程式：

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = T_J \quad (2-3)$$

式中 T ——电动机产生的电磁转矩，称为电动机的拖动转矩，单位为 $N \cdot m$ ；

T_L ——被电动机拖动的负载转矩，称为静态阻转矩，单位为 $N \cdot m$ ；

$\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$ ——动态转矩，也称为惯性转矩， GD^2 的单位为 $N \cdot m^2$ ， $\frac{dn}{dt}$ 的单位为 $(r \cdot min^{-1})/s$ 。

运动方程式中各转矩的方向作如下规定：任意确定某一转向为 n 的正向后，取 T 与 n 的方向一致为正向，取 T_L 和 T_J 与 n 相反的方向为正向。

根据上述规定可判定各转矩的性质：当 T 与 n 符号相同时，表示 T 与 n 的作用方向相同，称为拖动转矩；当 T 与 n 的符号相反时，表示 T 与 n 的作用方向相反，称为制动转矩；当 T_L 和 T_J 与 n 的符号相同时，表示它们的作用方向与 n 相反，称为制动转矩；当 T_L 和 T_J 与 n 的符号相反时，表示它们的作用方向与 n 相同，称为拖动转矩。

分析方程式 (2-3) 可以看出：

(1) 当 $T > T_L$ 时， $\frac{dn}{dt} > 0$ ，即拖动系统加速；

(2) 当 $T < T_L$ 时， $\frac{dn}{dt} < 0$ ，即拖动系统减速；

(3) 当 $T = T_L$ 时， $\frac{dn}{dt} = 0$ ，即拖动系统稳定运行。

由此可知，系统在一定转速下 $T = T_L$ 稳定运行时，一旦受到外界干扰，使转速波动失去平衡，对于一个稳定系统来说，要求具有恢复平衡状态的能力。

对于在非电发动机阻转矩变化时，发动机要恢复平衡，需要专门调节器，使能源调节以增加或减少燃料或蒸汽的馈送。用电动机时，电动机的电动势起着自动调整的作用，无须专

门调节器，阻转矩变化时，电动机能自动保持平衡，这是电动机十分有价值的特有性能。例如一台直流他励电动机拖动一个恒转矩负载（图 2-4 a）。设图中 T_1 、 T_2 、 T_3 为电磁转矩， T_{L1} 、 T_{L2} 、 T_{L3} 为负载转矩，在 n_A 点稳定运行， $T_1 = T_{L1}$ ， $\frac{dn}{dt} = 0$ 。当负载转矩瞬时增大到 T_{L2} 时，即 $T_{L2} > T_1$ ， $\frac{dn}{dt} < 0$ ，系统减速，电动势 $E \downarrow$ ， $I \uparrow$ ， $T \uparrow$ 。直到 $T_2 = T_{L2}$ ，系统在 n_B 速度下稳定运行。当负载转矩由 T_{L2} 恢复到 T_{L1} ，瞬时 $T_2 > T_{L1}$ ， $\frac{dn}{dt} > 0$ ，系统加速，电动势 $E \uparrow$ ， $I \downarrow$ ， $T \downarrow$ ，直到 $T_1 = T_{L1}$ ，系统又恢复到 n_A 点稳定运行。

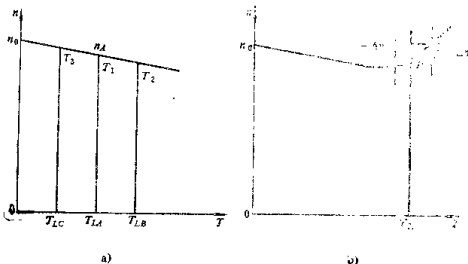


图 2-4 直流他励电动机的机械特性

如图 2-4 b 所示，考虑电枢反应影响时的电动机机械特性。当负载大到一定程度，特性向上翘，并与恒负载特性交于 D 点，若此时转速稍有增加，则 $T > T_L$ ，使电动机转速继续增加；若转速稍有下降，则 $T < T_L$ ，使电动机转速继续减小。这说明在 D 点不论转速瞬时细微的增加或减小，拖动系统都没有恢复到原来转速 n_B 的能力，所以 D 点是不稳定运行点。

综上所述，电力拖动系统稳定状态与平衡状态是有区别的，生产机械特性与电动机机械特性具有交点，这是平衡状态，即 $T = T_L$ ， $\frac{dn}{dt} = 0$ ；而稳定状态要求更高，除了具备平衡条件外，还要求系统在某种干扰（电网电压波动、负载转矩变化等）作用下，离开原来平衡状态时能够自动得到新的平衡状态，或者在干扰消除后，系统有能力恢复到原来的平衡状态。由此得出结论，拖动系统稳定平衡的充分和必要条件是：

$$\text{在 } T = T_L \text{ 处，} \frac{dT}{dn} < \frac{dT_L}{dn}$$

二、静阻力矩的折算

上述运动方程式的各量都是指同一根轴而言的，但是多数情况下电动机和工作机械并不直接连接在同一轴上，中间需要有传动装置，如齿轮、皮带轮等等。这是因为电动机都做成高额定转速，而很多机械工作速度低（30~900 r/min），需要用传动装置降低转速。

图 2-5 为某一机械的传动系统图。电动机和机械不在一根轴上，每个轴各有不同的转速，因此在运用运动方程式时，应把所有转矩折算到同一个轴上，一般折算到电动机轴上。

折算的原则是：电动机轴上的输出功率应等于工作机械轴上需要的功率。

如果不考虑中间轴的传动损耗，其折算后的功率 P_{ef} 应当保持和折算前的静态功率 P_n 相等：

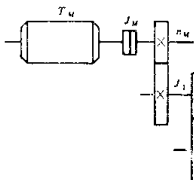


图2-5 机械的传动示意图

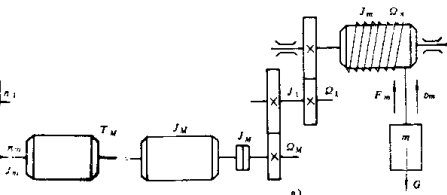
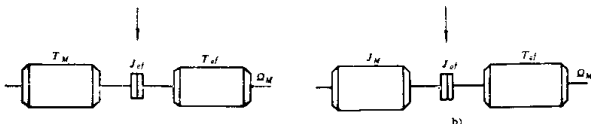


图2-6 起重装置示意图



$$T_n \Omega_n = P_n = P_{ef} = T_{ef} \Omega_M$$

折算到电动机轴上 (Ω_M) 的等效静态转矩 (T_{ef}) 为

$$T_{ef} = \frac{\Omega_n}{\Omega_M} T_n = \frac{n_n}{n_M} T_n = \frac{1}{j} T_n$$

当考虑到传动机构中的摩擦损耗时，折算到电动机轴上的等效静态转矩 (T_{ef}) 为

$$T_{ef} = \frac{\Omega_n}{\Omega_M} T_n \frac{1}{\eta} = \frac{n_n}{n_M} T_n \frac{1}{\eta} = T_n \frac{1}{j\eta} \quad (?-4)$$

式中 T_n ——工作机械的静阻转矩；

T_{ef} ——折算到电动机轴上的等效静阻转矩；

Ω_M ——电动机轴角速度；

Ω_n ——工作机械角速度；

η ——从电动机轴到工作机轴的全效率，即所有环节效率的乘积： $\eta = \eta_1 \times \eta_2 \times \dots \times \eta_n$ ；

$j = \frac{\Omega_M}{\Omega_n}$ ——电动机轴对工作机轴的转速比。

对于具有直线运动部分的机械，例如卷扬机和辘道等，需要把直线运动部分的静阻力矩折算为旋转运动中的等效转矩。

$$T_{ef} \Omega_M = \frac{F_n v}{\eta}$$

折算到电动机轴上的静阻转矩 $T_{ef} = \frac{F_n v}{\Omega_M \eta}$

由于 $\Omega_M = \frac{2\pi n_M}{60} = \frac{n_M}{9.55}$, 可得数值公式为

$$T_{ef} = 9.55 \frac{F_M v}{n_M \eta} \quad (2-5)$$

式中 F_M ——工作机构直线作用力, 单位为 N;

v ——重物提升速度, 单位为 m/s;

n_M ——电动机的转速, 单位为 r/min;

η ——提升传动效率。

三、飞轮矩的折算

为了使复杂的多轴运动系统简化为等效的单轴系统, 在运用运动方程式分析问题时, 不仅对静态力矩要进行折算, 而且与动态力矩有关的转动惯量 (Rotating Inertia)、飞轮矩 (Flywheel Moment) 也要进行折算, 其折算原则是: 折算时不改变系统的动能, 即折算后系统所储藏的动能等于实际系统所储藏的动能, 系统的惯性作用不因折算而有所改变。

1. 旋转运动

图 2-5 拖动系统中各旋转部分的转动惯量为 J_M 、 J_1 、 J_n 角速度为 Ω_M 、 Ω_1 、 Ω_n , 整个系统旋转体所储藏的动能为

$$A = J_M \frac{\Omega_M^2}{2} + J_1 \frac{\Omega_1^2}{2} + J_n \frac{\Omega_n^2}{2} \quad (2-6)$$

设 J_{ef} 为折算到电动机轴上的等效转动惯量, 则

$$J_{ef} \frac{\Omega_M^2}{2} = J_M \frac{\Omega_M^2}{2} + J_1 \frac{\Omega_1^2}{2} + J_n \frac{\Omega_n^2}{2}$$

如果拖动系统有多根轴 (n 根轴) 时, 则

$$\begin{aligned} J_{ef} &= J_M + J_1 \left(\frac{\Omega_1}{\Omega_M} \right)^2 + J_2 \left(\frac{\Omega_2}{\Omega_M} \right)^2 + \cdots + J_n \left(\frac{\Omega_n}{\Omega_M} \right)^2 + J_n \left(\frac{\Omega_n}{\Omega_M} \right)^2 \\ &= J_M + J_1 \left(\frac{n_1}{n_M} \right)^2 + J_2 \left(\frac{n_2}{n_M} \right)^2 + \cdots + J_n \left(\frac{n_n}{n_M} \right)^2 + J_n \left(\frac{n_n}{n_M} \right)^2 \\ &= J_M + J_1 \frac{1}{j_1^2} + J_2 \frac{1}{j_2^2} + \cdots + J_n \frac{1}{j_n^2} + J_n \frac{1}{j_n^2} \end{aligned} \quad (2-7)$$

式中 j_1 、 j_2 、 \cdots 、 j_n ——电动机轴对各个轴的转速比 (Speed Ratio)。

以 4.8 乘以式 (2-7) 两边, 则折算后的飞轮矩为

$$GD_{ef}^2 = GD_M^2 + GD_1^2 \frac{1}{j_1^2} + GD_2^2 \frac{1}{j_2^2} + \cdots + GD_n^2 \frac{1}{j_n^2} + GD_n^2 \frac{1}{j_n^2} \quad (2-8)$$

由上式可知, 旋转部分系统中任一元件的等效飞轮矩等于该元件对自己轴的飞轮矩除以折算到对该元件的转速比的平方。在一般情况下, 传动机构的等效转动惯量或等效飞轮矩 GD^2 , 在折算后占整个系统的比重不大, 因此在计算系统的等效转动惯量或等效飞轮矩时, 用适当加大电动机电枢 (Armature) 的 J_M 或 GD_M^2 来考虑, 即

$$\begin{aligned} J_{ef} &= \delta J_M + J_n \frac{1}{j_n^2} \\ GD_{ef}^2 &= \delta GD_M^2 + GD_n^2 \frac{1}{j_n^2} \end{aligned} \quad (2-9)$$

式中 $\delta = 1.1 \sim 1.3$ 。

2. 直线运动

上面我们讨论飞轮矩的折算，是指系统中的生产机械是作旋转运动的，但在生产中也有直线运动的负载。如起重机械所吊的重物，见图 2-6。其飞轮矩的折算原则：折算前后的动能应该是相等的，即

$$\frac{mv^2}{2} = J \frac{\Omega_M^2}{2} \quad (2-10)$$

折算到电动机轴上的负载转动惯量为

$$J = m \left(\frac{v}{\Omega_M} \right)^2$$

将 $GD^2 = 4gJ$ ， $m = \frac{G}{g}$ ， $\Omega_M = \frac{2\pi n_M}{60}$ 代入上式，经过变换后得到数值公式为

$$GD^2 = \frac{365Gv^2}{n_M^2}$$

式中 GD^2 ——直线运动物体的飞轮矩，单位为 $N \cdot m^2$ ；

v ——直线运动物体的速度，单位为 m/s 。

如果多轴拖动系统中有直线运动 (Linear Motion) 的部件也有旋转运动的部件，则根据式 (2-8) 和 (2-10) 得到折算到电动机轴上的总的飞轮矩为

$$GD_{\Sigma}^2 = GD_M^2 + GD_1^2 \frac{1}{j_1^2} + GD_2^2 \frac{1}{j_2^2} + \dots + GD_n^2 \frac{1}{j_n^2} + \frac{365Gv^2}{n_M^2} \quad (2-11)$$

对于多轴拖动系统的静阻力矩和飞轮矩折算到电动机轴以后的运动方程式为

$$T - T_{ef} = J_{\Sigma} \frac{d\Omega}{dt}$$

数值方程式为

$$T - T_{ef} = \frac{GD_{\Sigma}^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

但在以后的应用中，将略去表示的等效 (Equivalent Effective) 的符号 ef 仍写成式 (2-2) 和 (2-3) 的形式。

例题 2-1 在图 2-5 a 所示的拖动系统中，电动机轴上转动惯量 $J_M = 3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，转速 $n_M = 800 \text{ r/min}$ ；中间转动轴的转动惯量 $J_1 = 2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，转速 $n_1 = 250 \text{ r/min}$ ；生产机械轴的转动惯量 $J_n = 20 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，转速 $n_n = 50 \text{ r/min}$ 。试求折算到电动机轴上的等效转动惯量以及折算到生产机械轴上的等效转动惯量。

解 按式 (2-7)，折算到电动机轴上的转动惯量为

$$\begin{aligned} J_{\Sigma} &= J_M + \left(\frac{n_1}{n_M} \right)^2 J_1 + \left(\frac{n_n}{n_M} \right)^2 J_n \\ &= \left[3 + \left(\frac{250}{800} \right)^2 \times 2.5 + \left(\frac{50}{800} \right)^2 \times 20 \right] \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ &= (3 + 0.244 + 0.078) \text{ kg} \cdot \text{m}^2 = 3.322 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

同理，折算到生产机械轴上的等效转动惯量为：

$$\begin{aligned}
 J_{ef} &= J_a + \left(\frac{n_1}{n_m}\right)^2 J_1 + \left(\frac{n_M}{n_m}\right)^2 J_M \\
 &= \left[20 + \left(\frac{250}{50}\right)^2 \times 2.5 + \left(\frac{800}{50}\right)^2 \times 3\right] \text{kg} \cdot \text{m}^2 \\
 &= (20 + 62.5 + 768) \text{kg} \cdot \text{m}^2 = 850 \text{ kg} \cdot \text{m}^2
 \end{aligned}$$

从结果分析, 根据在折算过程中动能不变的原则, 折算到低速轴时, 其转动惯量要大很多。

例题2-2 图 2-6 a 所示的起重机构有关数据如下:

提升重物所受的力 $G = 20000 \text{ N}$;

提升速度 $v = 0.5 \text{ m/s}$;

齿轮的传动效率 (Transmitting Efficiency) $\eta_1 = \eta_2 = 0.96$;

卷筒效率 $\eta_f = 0.95$;

卷筒的直径 $D_f = 0.4 \text{ m}$;

齿轮的传动比 $j_1 = 6$ 、 $j_2 = 10$;

电动机的飞轮矩 $GD_1^2 = 10 \text{ N} \cdot \text{m}^2$;

卷筒的飞轮矩 $GD_f^2 = 9.8 \text{ N} \cdot \text{m}^2$;

齿轮的飞轮矩 $GD_2^2 = 0.98 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 、 $GD_3^2 = 20 \text{ N} \cdot \text{m}^2$

$$GD_4^2 = 5.5 \text{ N} \cdot \text{m}^2, \quad GD_5^2 = 50 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

试求: (1) 电动机以等速提升重物所需发出的转矩;

(2) 整个拖动系统 (Drive System) 的等效飞轮矩。

解 重物加到卷筒轴上的静阻转矩为

$$T_f = \frac{G(D_f/2)}{\eta_f} = \frac{20000 \times 0.4/2}{0.95} \text{ N} \cdot \text{m} = 4210.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 为

$$T_L = T_f \frac{1}{i_1 i_2 \eta_1 \eta_2} = 4210.5 \times \frac{1}{6 \times 10 \times 0.96 \times 0.96} \text{ N} \cdot \text{m} = 76.14 \text{ N} \cdot \text{m}$$

电动机稳定运转的条件是 $T = T_L$, 因此等速提升时电动机应发出的转矩为

$$T = T_L = 76.14 \text{ N} \cdot \text{m}$$

卷筒的角速度为

$$\Omega_f = \frac{V}{r_f} = \frac{0.5}{\frac{0.4}{2}} \text{ rad/s} = 2.5 \text{ rad/s}$$

电动机的角速度为

$$\Omega_M = \Omega_f j_1 j_2 = (2.5 \times 6 \times 10) \text{ rad/s} = 150 \text{ rad/s}$$

整个传动系统的等效飞轮矩为

$$\begin{aligned}
 GD_f^2 &= GD_f^2 + GD_1^2 + \frac{GD_2^2}{i_1^2} + \frac{GD_3^2}{i_1^2} + \frac{GD_4^2}{i_1^2 i_2^2} + \frac{GD_5^2}{i_1^2 i_2^2} + \frac{4Cr^2}{\Omega_f^2} \\
 &= \left(10 + 0.98 + \frac{20}{6^2} + \frac{5.5}{6^2} + \frac{50}{6^2 \times 10^2} + \frac{9.8}{6^2 \times 10^2} + \frac{4 \times 20000 \times 0.5^2}{150^2}\right) \text{ N} \cdot \text{m}^2 \\
 &= 12.60 \text{ N} \cdot \text{m}^2
 \end{aligned}$$

§ 2-3 直流他励电动机的机械特性

一、机械特性方程式

图2-7为直流他励电动机接线图，若略去电枢反应和电枢电阻变化等影响（在实际应用中这些变化是允许的），电动机的机械特性可以用数学分析式表达。在稳定状态下，若电动机的外加电压和磁通不变，则有下列关系式：

由基尔霍夫定律知电枢电路的电压平衡方程式

$$U = E + I(R_a + R_s) \quad (2-12)$$

由法拉第电磁感应定律知电动机的感生电动势 (Electromotive Force) ($E \cdot M \cdot F$)

$$E = C_e \phi n \quad (2-13)$$

由安培力定律知电动机产生的电磁转矩 (Electromagnetic Torque)

$$T = C_t \phi I \quad (2-14)$$

由牛顿第二定律知，使拖动系统加速的运动数值方程式

$$T - T_{\text{L}} = \frac{GD^2 J}{375} \frac{dn}{dt}$$

式(2-12)~式(2-14)的符号含义为

E ——电枢绕组的感应电动势，单位为V；

T ——电磁转矩，单位为N·m；

ϕ ——电动机的每极磁通，单位为Wb；

n ——电动机的转速，单位为r/min。

根据电机原理：

$$C_e = \frac{pN}{60a}$$

$$C_t = \frac{pN}{2\pi a}$$

式中 C_e 、 C_t ——取决于电机结构的系数；

p ——电动机的磁极对数；

N ——电枢绕组的有效导体数；

a ——电枢绕组的并联支路对数。

由此可得

$$\frac{C_e}{C_t} = \frac{\frac{pN}{60a}}{\frac{pN}{2\pi a}} = 0.105 \quad (2-15)$$

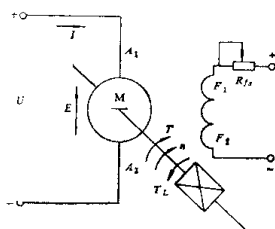


图2-7 直流他励电动机接线图

把式(2-13)、(2-14)代入式(2-12)中, 则得机械特性方程式 $n = f(T)$:

$$\frac{U}{C_e \Phi} = n + \frac{IR}{C_e \Phi} = n + \frac{TR}{C_e C_t \Phi^2}$$

$$\text{或} \quad n = n_0 - \frac{TR}{C_e C_t \Phi^2} = n_0 - \Delta n \quad (2-16)$$

式中的 $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ 称为理想空载转速, 即 $U = E$ 、 $I = 0$ ($T = 0$) 时电动机具有的转速, R 是电枢电路总电阻, 它是电枢电阻 (Armature Resistance) R_a 和电枢串接电阻 R_s 之和, 即 $R = R_a + R_s$; $\Delta n = \frac{IR}{C_e \Phi} = \frac{KT}{C_e C_t \Phi^2}$, 即电动机在 R 和 T 为某一定值下的转速降, 它是由于负载电流流过电枢电路产生电压降 (Voltage Drop) 而造成的, 负载越大, 转速降越大。

应该指出, 机械特性方程式中的 T 是指电动机所发出的电磁转矩, 由于要克服轴承摩擦损耗、通风损耗和铁心损耗, 故电动机轴上的转矩在电动状态下将小于电磁转矩。在计算机械特性时, 一般按电磁转矩计算, 而把轴承摩擦损耗、风损和铁损等力矩当作电动机轴上负载的附加转矩来看。我们称这些损耗力矩为电动机的空载转矩 (No-load Torque) T_0 , 其数值仅为电动机额定转矩的 2% ~ 5%, 所以在许多场合下常把它们略去不计, 而假定电磁转矩等于轴上转矩。

由机械特性方程式(2-16)可知, 直流他励电动机的机械特性为一条直线, 其截距为 n_0 , 斜率

为 $b = \frac{R}{C_e C_t \Phi^2}$ 。可把机械特性方程式写成

$$n = n_0 - bT$$

他励电动机 (Separate Excitation Motor) 没有外接电阻时, 其机械特性较硬, 如图产 Z₂ 系列直流他励电动机, 规定 Δn_N 为 10% ~ 18%, 而大容量电机为 3% ~ 8%。 Δn_N 为额定转速变化率, 其值为

$$\Delta n_N = \frac{n_0 - n_N}{n_N}$$

式中 n_N — 电动机的额定转速。

二、固有特性与人为特性

电动机的机械特性有固有特性和人为特性的区别。

固有特性: 表示电动机在额定参数运转条件下的 $n = f(T)$ 。例如直流他励电动机在额定电压、额定磁通而电枢内无外加电阻时的机械特性, 感应电动机在额定电压、额定频率且转子电路无外加电阻时的机械特性称为固有特性。

人为特性: 改变电动机的一种或数种参数, 使之不等于额定值时的机械特性称为人为特性。

对于直流他励电动机, 其在额定磁通下转速与电流的关系 $n = \varphi(I)$ 也称为机械特性。

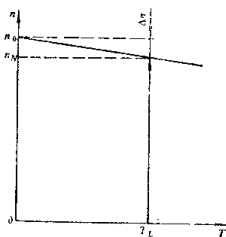


图2-8 直流他励电动机的机械特性

他励电动机的固有特性：当 $U = U_N$, $\Phi = \Phi_N$, 电枢串接电阻 $R_a = 0$, 其方程式为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_r \Phi_N^2} T \quad (2-17)$$

因为转速降 Δn 的大小与枢磁电励成正比, Δn 很小, 所以固有特性是一根斜率很小的硬特性。

他励电动机的人为特性一般有下列几种:

1. 电枢串接电阻时的人为特性

$U = U_N$, $\Phi = \Phi_N$, 当电枢电路串联 R_s 时, 则 Δn 变大, 人为特性硬度降低, 使特性软化。外加电阻越大, 人为特性越软, 电动机的稳定性就越差, 即负载稍有变化, 将会引起较大的转速变化。图2-9所示为不同外加电阻交于纵轴上一点 ($n = n_0$) 但具有不同斜率时的人为特性, 其特性方程式

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_s}{C_e C_r \Phi_N^2} T \quad (2-18)$$

2. 改变电枢电压时的人为特性

当外加电阻 $R_s = 0$, $\Phi = \Phi_N$ 时, 改变电动机的电枢电压, 则理想空载转速 n_0 随电压的下降而降低, 而转速降 Δn 不变化, 因此电动机在低于额定电压 (Voltage Rating) 变化下的人为特性是平行于固有特性的, 如图2-10所示, 其特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_r \Phi_N^2} T$$

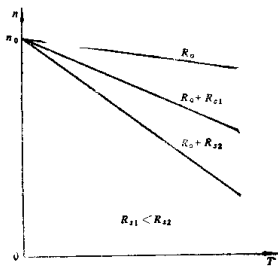


图2-9 直流他励电动机电枢外接电阻时的人为特性

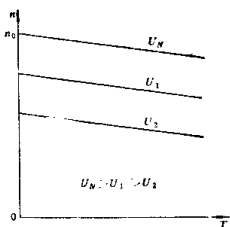


图2-10 直流他励电动机电枢电压不同时的人为特性

3. 减弱电动机磁通时的人为特性

当 $U = U_N$, $R_s = 0$ 时, 在励磁回路串接电阻 R_f , 并改变其值, 减弱电动机的磁通, 其特性方程式为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_r \Phi^2} T \quad (2-19)$$

$n = f(I)$ 特性方程式为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I \quad (2-20)$$