

普通高等教育机电类规划教材

电力拖动基础

上海工程技术大学 魏炳贵 主编

机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

电力拖动基础

主编 魏炳贵

参编 袁汉生 张植保

主审 马国琳



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书主要内容有：电力拖动的动力学基础、交直流电动机拖动系统的各种运行状态和过渡过程、多电机拖动系统及拖动系统中电动机的容量选择等。

本书读者对象为：高等工科院校电气技术专业和工业自动化等电类专业学生，电大和职大电类专业学生和有关专业工程技术人员。

电力拖动基础

上海工程技术大学 魏炳贵 主编

责任编辑：贡克勤 责任校对：王颖

封面设计：方芬 版式设计：黄薇

责任印制：王国光

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

邮政编码：100037

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本787×1092¹/₁₆·印张10.75·字数259千字

1994年10月北京第1版·1994年10月北京第1次印刷

印数 0 001—5 000·定价：6.75元

ISBN 7-111-04191-7/TM·524(课)

前 言

本书是根据1989年7月在武汉召开的全国高等工业院校电气技术教材编审委员会所制定的“电力拖动基础”教学大纲而编写的。

本书对于电气工程类专业学生在学完《电机学》后为进一步学习专业后续课程,如《(自动控制系统)、(交、直流调速)》《工厂电气控制技术》等而编写的一门专业基础课。

全书共分六章,主要包括:电力拖动的动力学基础,交直流拖动系统的各种运行状态,如起动、制动、调速及过渡过程,多电机拖动系统、电动机的容量选择等。本书在编写中着重于基本原理、基本方法,基本概念的分析和应用基础上,充分注意到把交、直流两大拖动系统在形式上和方法上予以统一,前后呼应,以利读者类比和对照。每一章附有小结和力图与生产实践相结合的一定数量的思考题和习题,以帮助读者提高解决实际问题的能力。

本书可作为高等工业院校电气技术专业、工业自动化及其它电气类专业的教材和教学参考用书,亦可用作相应专业的专科学校、业余大学的教材和有关电气工程技术人员参考书,全部内容讲授约50~60学时。

本书第一、三章由江南大学袁汉生编写,第二、五章由江苏工学院张植保编写,第四、六章及绪论由上海工程技术大学魏炳贵编写并任主编。

上海大学马国琳教授担任本书主审,参加审稿的还有冯梁荪、蔡德福等同志。编者对他们的辛勤工作一并表示深切的谢意。

由于编者的水平有限,书中谬误之处在所难免,望读者不赐指教为幸。

编者

1993年10日

6930+112

目 录

前言		
绪论	1	
第一章 电力拖动系统的动力学		
基础	3	
第一节 电力拖动系统的运动方程式	3	
第二节 工作机构的转矩和飞轮矩的折算	4	
第三节 生产机械的典型负载转矩特性	11	
第四节 电力拖动系统稳定运行的条件	12	
小结	18	
思考题	19	
习题	20	
第二章 直流电动机拖动系统	23	
第一节 他励直流电动机的起动	23	
第二节 他励直流电动机的调速	27	
第三节 他励直流电动机的制动运行	34	
第四节 直流拖动系统的过渡过程	43	
第五节 其它类型直流电动机的运行特点	60	
小结	68	
思考题	68	
习题	69	
第三章 三相异步电动机的机械特性、起动和制动	73	
第一节 三相异步电动机的机械特性	73	
第二节 三相笼型异步电动机的起动	80	
第三节 三相绕线转子异步电动机的起动	90	
第四节 三相异步电动机的制动	99	
第五节 三相异步电动机的四象限运行(应用实例)	106	
小结	111	
思考题	112	
习题	113	
第四章 交流异步电动机拖动系统		
的调速	115	
第一节 绕线转子异步电动机转子串电阻调速	115	
第二节 改变定子电压调速	116	
第三节 改变定子极数调速	119	
第四节 变频调速	122	
第五节 绕线转子异步电动机的串级调速	125	
第六节 电磁转差离合器调速	129	
小结	133	
思考题	134	
习题	134	
第五章 多电动机拖动系统	135	
第一节 双电动机拖动系统	135	
第二节 电轴系统	137	
小结	144	
思考题	145	
习题	145	
第六章 电动机的选择	146	
第一节 概述	146	
第二节 电动机发热和冷却的一般规律	148	
第三节 生产机械负载图与电动机的工作制	149	
第四节 连续工作制下电动机容量的选择	152	
第五节 短时工作制下电动机容量的选择	158	
第六节 断续周期工作制下电动机容量的选择	161	
第七节 选择电动机容量的工程方法	163	
小结	164	
思考题	164	
习题	165	
参考文献	166	

绪 论

一、电力拖动系统的发展与应用

在现代化工业生产过程中，除了一部分生产机械是采用气动或液压拖动以外，绝大部分的生产机械是采用电动机来拖动的，例如，各类机床设备、运输机械、起重机、电动车、纺织机械等，它们均以电动机作为原动机来拖动。

由电动机来拖动生产机械运行的系统，称为电力拖动系统。

自19世纪末电动机逐步代替蒸汽机以来，电力拖动的发展，大体上经历了成组拖动、单机拖动和多电动机拖动三个阶段。所谓成组拖动即用一台电动机拖动一根天轴，再经过传动带或绳索来分别拖动几台生产机械，这种拖动型式由于结构不合理，电动机性能不能充分发挥，而且效率很低，所以现在已经很少采用。其后，在20世纪20年代开始采用了单机拖动，即用一台电动机来拖动一台生产机械，减少了中间传动机构，提高了效率，并可充分利用电动机的调速性能来满足生产机械的工艺要求。随着社会的进步和生产力的发展，一台生产机械往往具有许多运动机构，如仍用一台电动机来拖动，显然是不适合的，因此，在30年代后，人们开始采用了多电动机来拖动运动机构较复杂的生产机械，即用一台电动机来拖动生产机械中某一个运动部件，这样也易实现自动化生产，所以，现代化电力拖动系统基本上是采用这种多电动机拖动型式的。

本世纪60年代后，随着科学技术发展，尤其大功率电子元器件不断涌现及控制理论不断完善，加上微型计算机广泛应用，使当今电力拖动已进入到一个自动化电力拖动系统崭新的阶段。

然而，不论现代电力拖动系统结构如何复杂，从原理上讲，它们仍然是由原动机、传动机构和生产机械三个部分组成，见图1-1。

其中，电动机是一个机电能量转换器，它把从电源输入的电能转换成生产机械所需的机械能或将机械能(由动能或位能转换而来)转换成电能馈送至电网。传动机构是用于传送动力，实现速度和运行方式的变换。

电力拖动系统包括直流电力拖动系统和交流电力拖动系统两种，它们是以拖动生产机械的电动机类型来分类的。

由直流电动机作为原动机的拖动系统称为直流电力拖动系统。其优点是系统的起动转矩大，在较大范围内能进行速度的平滑调节且控制简便。然而，由于直流电动机具有换向器和电刷，给运行带来了不少麻烦，如不能使用在易燃、易爆工业场合，以及限制了电动机向高速、大容量方面发展，尽管这样，直流电力拖动系统至今在各个工业传动中仍发挥着重要的作用。

以交流电动机作为原动机的拖动系统，称为交流电力拖动系统。由于交流电能输送方便，交流异步电动机(本书中均指感应电动机)的结构简单、价格便宜、维护方便，且能在高速及环境条件较恶劣场合下应用等优点，故使交流电力拖动获得极广泛的应用。但是，长期来由于交流电力拖动的调速性能(如调速范围、调速精度、平滑性、过载能力)等指标都不及直流

电力拖动,因此,在要求较高调速系统中,交流电力拖动应用仍一度受到了限制。直至如今,由于电力电子技术飞跃发展,出现了各种类型的晶闸管整流电路及逆变电路,它不但为直流电力拖动系统解决了可控制直流电源问题,同时也为交流电力拖动系统提供了频率和电压可调的交流电源,这显然为交流调速系统开辟了新的前景。

可以深信,今后电力拖动系统发展和应用,必然会在交、直流拖动系统相互竞争和交替发展过程中不断完善并进入到一个划时代的新领域。

二、本课程的性质和任务

本课程是电气技术专业,工业自动化专业的一门重要的技术基础课,学生在掌握了电路、电子、电机学等课程知识后、通过本课程学习,将获得由各种电动机所组成的电力拖动系统的基本理论,系统在各种运行状态时的静、动态特性与计算方法,并能掌握结合生产实践,用工程方法正确地选择电动机的容量等基本技能。同时也为进一步学习本专业有关后续课程,如《自动控制系统》、《交、直流调速》等具备必要的基础知识。

本课程在学习时要注意到各章节之间相互内在联系,力求达到融会贯通。认真做好每章思考题和习题是学好本课程的关键。实验及课程设计是必要的实践性教学环节,应给予一定的重视。

第一章 电力拖动系统的动力学基础

本章介绍电力拖动系统的组成和电力拖动系统的运动方程式；生产机械转矩及系统飞轮矩的折算方法；生产机械各种类型的机械特性；最后介绍电力拖动系统稳定运行的条件。本章内容不仅适用于直流电力拖动，也适用于交流电力拖动，是交、直流电力拖动系统的共同问题，是电力拖动部分的基础。

第一节 电力拖动系统的运动方程式

一、电力拖动系统的组成

原动机带动生产机械运动叫做拖动。用电动机带动生产机械运动的拖动方式叫电力拖动，电动机是原动机，生产机械是电动机的负载。最简单的电力拖动，如日常生活中的电风扇、洗衣机、工业生产中的水泵等；复杂的电力拖动，如钢厂中的连轧机和可逆轧机等。

电力拖动系统一般是由电动机、生产机械的工作机构、传动机构、控制设备以及电源等五部分组成，如图 1-1 所示。电动机把电能转换成机械动力，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。控制设备由各种电器元件组成，用以控制电动机的运转，从而对工作机构的运动实现自动控制。电动机与工作机构之间的传动机构，是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。电源用来向电动机及电气控制设备供电。

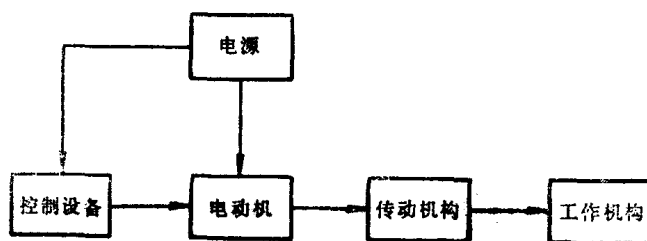


图1-1 电力拖动系统示意图

用以控制电动机的运转，从而对工作机构的运动实现自动控制。电动机与工作机构之间的传动机构，是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。电源用来向电动机及电气控制设备供电。

二、电力拖动系统的运动方程式

电力拖动系统的运动规律可以用运动方程来描述。作用在电动机轴上的转矩有电动机的电磁转矩 T 和负载转矩 T_L (T_L 又叫阻转矩)。一般来说，电动机是推动运动的，负载是反抗运动的。为此在列写电力拖动系统的运动方程时，我们对转矩和转速的正方向(即参考方向)作如下规定：在画出转速 n 的正方向后，电磁转矩 T 的正方向与 n 相同，负载转矩 T_L 的正方向与 n 相反，如图 1-2 所示。这样，根据刚体转动定律有：

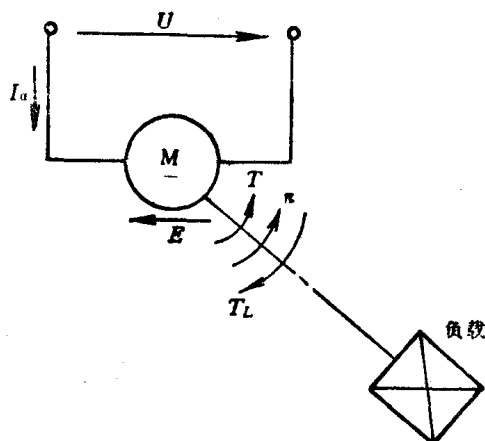


图1-2 电力拖动系统

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-1)$$

式中, J 为转动惯量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$); Ω 为电动机轴的角速度 (rad/s); $d\Omega/dt$ 为电动机轴的角加速度 (rad/s^2); $J \frac{d\Omega}{dt}$ 为电动机轴系统的惯性转矩或加速转矩。

转动惯量 J 可用下式表示: $J = m\rho^2 = GD^2/(4g)$, 其中 m 与 G 分别为旋转部分的质量 (kg) 和重力 (N); ρ 与 D 分别为旋转部分的惯性半径与直径 (m); $g = 9.81 \text{m/s}^2$ 为重力加速度。

将 $\Omega = 2\pi n/60$ 及 $J = GD^2/(4g)$ 代入式 (1-1) 即得实用的电力拖动系统的运动方程式:

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

式中, $GD^2 = 4gJ$ 为旋转部分的飞轮矩 ($\text{N}\cdot\text{m}^2$); 常数 375 具有加速度量纲, 即 $\text{m}/(\text{min}\cdot\text{s})$; 转矩的单位为 $\text{N}\cdot\text{m}$, 转速的单位为 r/min 。

式 (1-2) 表明, 电力拖动系统的运动状态是由作用在转轴上所有转矩的代数和决定的。当 $T > T_L$ 时, $dn/dt > 0$, 系统加速; 当 $T < T_L$, $dn/dt < 0$, 系统减速。这两种情况, 系统的运动都处于过渡过程之中, 叫做动态。当 $T = T_L$ 时, $dn/dt = 0$, 转速不变, 系统或以恒速运行或者静止, 这叫做稳定运转状态, 简称稳态。静止状态只是转速为零的一种特殊的稳态。

这里必须注意, T 与 T_L 本身都是有方向性的变量, 在代入具体数值时, 如果其实际方向与规定的正方向相同, 就用正数, 否则就用负数。掌握这一点, 才能正确运用系统的运动方程式。

第二节 工作机构的转矩和飞轮矩的折算

上节讨论的拖动系统中, 电动机和工作机构直接相联, 这时工作机构的转速等于电动机的转速, 工作机构负载转矩就等于作用在电动机轴上的阻转矩 (忽略电动机空载转矩 T_0), 这种系统称为单轴系统。

实际的拖动系统, 往往不是单轴系统, 而是通过传动机构使电动机的转速 n 变换为工作机构所需要的转速 n_L , 这种系统称为多轴系统。图 1-3 a 就是一种三轴的拖动系统。其传动机构为两级齿轮减速机构, 其转速比为 i_1 、 i_2 , 传动效率为 η_1 、 η_2 。三根转速不相同的转轴, 其转速分别为 n 、 $n_1 =$

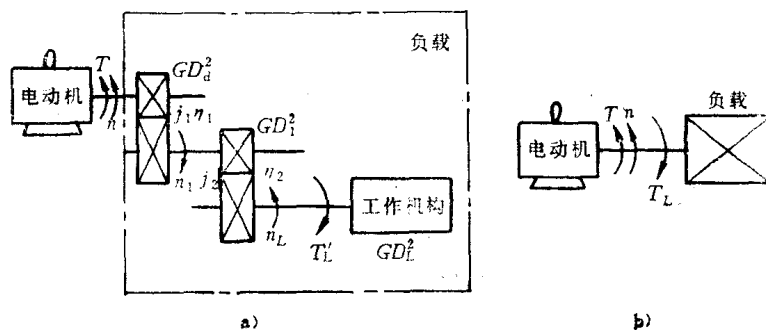


图 1-3 多轴拖动系统等效成单轴系统
a) 多轴系统 b) 等效单轴系统

n/i_1 、 $n_2 = n/(i_1 i_2)$ 。三根轴上的转矩和飞轮矩也都不一样。

显然, 要研究一个多轴电力拖动系统的运动情况, 就必须列出每根轴的运动方程式和各轴之间互相联系的方程式, 最后把这些方程式联系起来, 才能全面地研究系统的运动。然而这是相当复杂的, 而且也无必要这样做。因为就电力拖动系统而言, 我们主要是把电动机作为研究对象, 并不需要研究每根轴的问题。为此我们引入折算的概念, 把实际的拖动系统等效为单轴系统。折算的原则是, 保持系统传递的功率及系统所贮存的动能不变。这样, 在分

析计算该系统时,首先就要从已知的实际负载转矩 T_L' 求出折算到电动机轴上的等效负载转矩 T_L ,这称为负载转矩的折算;从已知的各转轴上的飞轮矩 GD_0^2 、 GD_1^2 和 GD_L^2 ,求出系统的总飞轮矩 GD^2 ,这称为系统飞轮矩的折算。

转矩和飞轮矩的折算随工作机构运动形式的不同而不同,现分别加以讨论。

一、旋转运动

在实际生产中,有很多生产机械的工作机构的运动都属于旋转运动,如车床的主轴。下面仍以图1-3为例来说明旋转运动转矩和飞轮矩的折算。

(一)转矩的折算

设工作机构的负载转矩为 T_L' ,转速为 n_L ,对应的角速度 $\Omega_L=2\pi n_L/60$,则工作机构对应的功率为

$$P_L' = T_L' \Omega_L$$

而折算后的功率 P_L 为

$$P_L = T_L \Omega$$

式中 T_L 为折算到电动机轴上的等效负载转矩; Ω 为电动机轴的角速度, $\Omega=2\pi n/60$ 。

根据折算前后功率不变的原则,应有下列关系;

$$T_L' \Omega_L = P_L' = P_L = T_L \Omega$$

$$\therefore T_L = T_L' \frac{\Omega_L}{\Omega} = T_L' \frac{n_L}{n} = \frac{1}{j} T_L' \quad (1-3)$$

$j = \Omega/\Omega_L = n/n_L$ 为电动机与工作机构的转速比,一般来说, $j > 1$,即传动机构是减速的。

式(1-3)表明:在工作机构的低速轴上,转矩 T_L' 较大,而折算到电动机的高速轴上时,等效转矩 T_L 数值减小。从功率不变的观点来看,显然低速轴的转矩大,高速轴的转矩小。实际上在机械功率的传递过程中,传动机构存在着功率损耗,称为传动损耗。传动损耗可以在传动机构的效率 η_c 中考虑。

当电动机带动工作机构旋转时,功率的传递方向是由电动机到负载,传动损耗由电动机负担,电动机输出的功率比生产机械消耗的功率大,这时的功率关系应为

$$P_L = P_L' \frac{1}{\eta_c}$$

$$T_L \Omega = T_L' \Omega_L \frac{1}{\eta_c}$$

$$\therefore T_L = T_L' \frac{1}{j \eta_c} \quad (1-4)$$

式(1-4)中,电动机轴与工作机构轴的转速比 j 为总的转速比,在多级传动中应为各级转速比之积,即 $j = j_1 j_2 \dots$ 。传动效率 η_c 是传动机构的总效率,同样为各级传动效率之积,即 $\eta_c = \eta_1 \eta_2 \dots$ 。

不同种类的传动机构,其传动效率是不同的,并且负载大小不同时,其效率也不同。通常均采用满载效率进行计算。传动效率可从《机械工程手册》上查得,例如,每对齿轮(用滚动轴承)的满载效率为0.975~0.985,蜗轮蜗杆的满载效率为0.5~0.7。

(二)飞轮矩的折算

飞轮矩的大小是旋转物体机械惯性大小的体现。旋转体的动能为 $J\Omega^2/2$ 。设折算成单轴系统后的等效转动惯量为 J ,则对应于图1-3的系统有

$$\frac{1}{2}J\Omega^2 = \frac{1}{2}J_e\Omega^2 + \frac{1}{2}J_1\Omega_1^2 + \frac{1}{2}J_L\Omega_L^2$$

公式两边同乘以 $4g$ ，除以 Ω^2 ，即可得与 J 相对应的等效飞轮矩 GD^2 的折算公式。

$$GD^2 = GD_e^2 + GD_1^2 \frac{1}{i_1^2} + GD_L^2 \frac{1}{i_1^2 i_2^2} \quad (1-5)$$

式(1-5)右边各项的 GD^2 是系统每根轴的 GD^2 。如在图1-3中，电动机轴的 GD_e^2 为电动机转子的飞轮矩与装在该轴的齿轮飞轮矩之和；第二根轴的飞轮矩 GD_1^2 为该轴上两个齿轮飞轮矩之和；第三根轴的飞轮矩 GD_L^2 为工作机构飞轮矩与该轴齿轮飞轮矩之和。

一般情况下，在总的飞轮矩 GD^2 中，电动机转子本身的飞轮矩 GD_e^2 占的比重最大，工作机构轴上的飞轮矩折算值占的比重较小，而传动机构飞轮矩的折算值所占比重则更小。因此在实际工作中，为了减少折算的麻烦，往往可以采用下式估算系统的总飞轮矩

$$GD^2 = (1 + \delta) GD_e^2$$

GD_e^2 是电动机转子本身的飞轮矩，其值可从产品目录中查得； δ 为小于1的数，一般取 $\delta = 0.2 \sim 0.3$ 。如果在电动机轴上还有其它大飞轮矩的部件，如制动器的闸轮等， δ 值则需加大。

二、平移运动

有些生产机械，其工作机构是作平面运动的，例如刨床的工作台。平面运动属于直线运动，它的转矩和飞轮矩的折算公式有其自己的特点。

图1-4表示刨床的传动示意图，电动机经多级齿轮减速后，通过齿轮与齿条的啮合，将旋转运动变成直线运动。

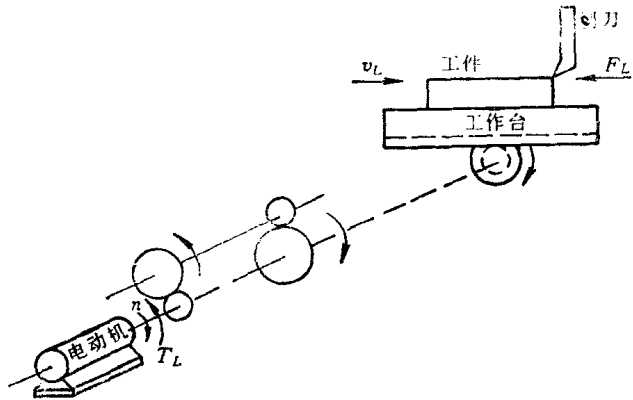


图1-4 工作机构作平面运动的示意图

(一) 转矩的折算

设切削时工件与工作台的速度为 v_L (m/s)，刨刀作用在工件上的力（切削力）为 F_L (N)，则切削功率 P_L (W)为

$$P_L = F_L v_L$$

切削力 F_L 反映到电动机轴上表现为转矩 T_L ，切削功率 P_L 反映到电动机轴上为 $T_L \Omega_e = T_L 2\pi n_e / 60$ 。

如果不考虑传动系统的传动损耗，根据传递功率的原理，

$$\therefore F_L v_L = T_L \frac{2\pi n_e}{60}$$

$$\therefore T_L = \frac{F_L v_L}{2\pi n_e / 60} = 9.55 \frac{F_L v_L}{n_e}$$

如果考虑传动损耗，传动损耗同样由电动机负担，则

$$T_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n_e \eta_o} \quad (1-6)$$

(二) 飞轮矩的折算

设直线运动部分的重力 $G_L = m_L g$ ，则直线运动部分的动能为

$$\frac{1}{2} m_L v_L^2 = \frac{1}{2} \frac{G_L}{g} v_L^2$$

直线运动部分折算到电动机轴的飞轮矩 GD_L^2 应满足折算前后动能不变的原则，即

$$\frac{1}{2} J_L \Omega_i^2 = \frac{1}{2} \frac{GD_L^2}{4g} \left(\frac{2\pi n_d}{60} \right)^2 = \frac{GD_L^2 n_i^2}{7150} = \frac{1}{2} \frac{G_L}{g} v_L^2$$

$$\therefore GD_L^2 = 365 \frac{G_L v_L^2}{n_i^2} \quad (1-7)$$

式(1-7)为直线运动部分折算到电动机轴上的飞轮矩。其传动机构中转动部分 GD^2 的折算，与前述相同，这两部分之和才是系统的总飞轮矩。

三、升降运动

有些生产机械的工作机构是作升降运动的，如电梯、起重机等。升降运动也是直线运动，但又有其自己的特点。现以起重机的提升机构为例进行讨论，其示意图如图1-5所示。电动机通过传动机构拖动一个卷筒，缠在卷筒上的钢绳悬挂一重物，其重力为 G ，钢绳以力 F 等速提升或下降重物，线速度为 v_L 。

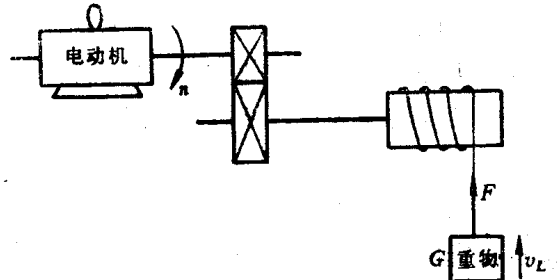


图1-5 起重机示意图

(一) 转矩的折算

升降运动的转矩折算与功率传递的方向有关，有以下两种情况：

1. 提升重物

设卷筒半径为 R （单位为 m ），则卷筒的提升转矩为

$$T = FR = GR$$

如不计传动机构损耗时，折算到电动机轴上的负载转矩为

$$T = \frac{GR}{j} \quad (1-18)$$

如考虑传动机构有损耗，在提升重物时，这个损耗显然由电动机来承担，因此折算到电动机轴上的负载转矩应为

$$T_L = \frac{GR}{j\eta_i} = 9.55 \frac{Gv_L}{n\eta_i} \quad (1-9)$$

式(1-9)中， T_L 为提升重物时转矩折算值， η_i 提升重物时的传动效率。由式(1-8)和式(1-9)可知，提升时传动机构的损耗转矩 $\Delta T = GR/(j\eta_i) - GR/j$ 。

2. 下放重物

下放重物时，重物对卷筒轴的负载转矩大小仍为 GR ，不计传动损耗时，折算到电动机轴上的负载转矩也仍为 GR/j 。但是在下放重物时，是负载（重物）带动电动机，重力作用拉着整个系统反向运动，电动机的电磁转矩反而起着制动作用，即反对运动。这样，如果考虑传动损耗，显然这损耗应由负载来承担。如果还要用效率来表示的话，它应该乘在负载转矩上，以便折算后的转矩相当于扣掉传动损耗后的数值。因此在下放重物时，折算到电动机轴的负载转矩应为

$$T_L^{\downarrow} = \frac{GR}{j} \eta_c^{\downarrow} = 9.55 \frac{Gv_L}{n} \eta_c^{\downarrow} \quad (1-10)$$

式(1-10)中, T_L^{\downarrow} 为下放重物时转矩折算值, η_c^{\downarrow} 为下放重物时的传动效率。同样可得下放重物时传动机构的损耗转矩 $\Delta T = GR/j - (GR/j)\eta_c^{\downarrow}$ 。

一般对于同一重物的提升和下放, 可以认为传动机构的损耗转矩 ΔT 不变, 由此可求得提升效率 η_c^{\uparrow} 与下放效率 η_c^{\downarrow} 两者的关系:

$$\begin{aligned} \therefore \Delta T &= \frac{GR}{j\eta_c^{\uparrow}} - \frac{GR}{j} = \frac{GR}{j} - \frac{GR}{j} \eta_c^{\downarrow} \\ \therefore \eta_c^{\downarrow} &= 2 - \frac{1}{\eta_c^{\uparrow}} \end{aligned} \quad (1-11)$$

由式(1-11)可以看出, 提升效率 η_c^{\uparrow} 与下放效率 η_c^{\downarrow} 在数值上并不相等。当 $\eta_c^{\uparrow} = 0.8$ 时, $\eta_c^{\downarrow} = 0.75$; 当 $\eta_c^{\uparrow} = 0.5$ 时, $\eta_c^{\downarrow} = 0$; 当 $\eta_c^{\uparrow} < 0.5$ 时, 则 $\eta_c^{\downarrow} < 0$ 。这说明, 当 $\eta_c^{\uparrow} = 0.5$ 时, 意味着电动机的提升转矩只有一半去克服重力, 另一半则消耗在传动机构中了。因此在下放时, 重力作用刚好和损耗平衡, 电动机不用再承担任何转矩, 因此折算到电动机轴上的等效转矩 T_L^{\downarrow} 为零。如果 $\eta_c^{\uparrow} < 0.5$, 说明损耗更大, 下放时重力产生的转矩不足以克服传动机构的损耗转矩, 因此电动机必须产生与转速方向相同的转矩, 以帮助重物下放, 此时称为“强迫下放”。由于下放时电动机转速为负, 所以 T_L^{\downarrow} 也应为负值。这就是 η_c^{\downarrow} 为负值的道理。起重机在空钩下放时, 就会出现这种情况。

在生产实践中, η_c^{\downarrow} 为负值是有益的。因为只要电动机不产生推动重物下放的转矩, 重物就停在空中, 是掉不下来的。这叫做传动机械的自锁作用。为使 η_c^{\downarrow} 为负值, 必须采用低提升效率(即高损耗)的传动机构, 例如蜗轮蜗杆传动, 其提升效率 $\eta_c^{\uparrow} = 0.3 \sim 0.5$ 。

(二) 飞轮矩的折算

升降运动与平移运动都是直线运动, 飞轮矩的折算方法相同。

例1-1 龙门刨床的传动系统如图1-6所示。已知切削力 $F = 19620\text{N}$, 切削速度 $v_L = 10\text{m/min}$, 工作台重力 $G_1 = 29430\text{N}$, 工件重力 $G_L = 19620\text{N}$, 电动机飞轮矩为 $60\text{N}\cdot\text{m}^2$, 工作台与导轨间的摩擦系数 $\mu = 0.1$ 。齿轮8的直径 $D_8 = 0.5\text{m}$, 各齿轮的齿数和飞轮矩见表1-1, 设每对齿轮的传动效率 $\eta_c = 0.95$ 。

表1-1 传动齿轮的齿数与飞轮矩

齿轮号	1	2	3	4	5	6	7	8
齿数 z	15	47	22	58	18	58	14	46
$GD^2(\text{N}\cdot\text{m}^2)$	3.04	14.91	7.84	23.54	13.73	37.28	25.51	41.20

试计算:

① 折算到电动机轴上总的飞轮矩 GD^2 。

② 折算到电动机轴的负载转矩 T_L 。

解 本例为一降速系统, 它既有旋转部分, 又有平移运动部分。传动机构用齿轮变速时, 其转速与齿轮的齿数成反比。

① 总飞轮矩 GD^2 。根据式(1-5)和式(1-7):

$$GD^2 = \left(GD_1^2 + \frac{GD_1^2}{\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2} \right) + \frac{GD_2^2}{\left(\frac{z_4}{z_3}\right)^2 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2} + \frac{GD_3^2}{\left(\frac{z_6}{z_5}\right)^2 \left(\frac{z_4}{z_3}\right)^2 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2} + \frac{365(G_1 + G_2)v_L^2}{n_1^2} + \frac{GD_4^2}{\left(\frac{z_8}{z_7}\right)^2 \left(\frac{z_6}{z_5}\right)^2 \left(\frac{z_4}{z_3}\right)^2 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2}$$

$$\text{工件切削速度 } v_L = \frac{10}{60} \text{ m/s} = \frac{1}{6} \text{ m/s}$$

$$\text{齿轮 8 的转速 } n_8 = \frac{v_L}{\pi D_8} = \frac{10}{\pi \times 0.5} \text{ r/min} = 6.366 \text{ r/min}$$

$$\text{电动机的转速 } n_d = \frac{z_8}{z_7} \frac{z_6}{z_5} \frac{z_4}{z_3} \frac{z_2}{z_1} n_8 = \frac{46}{14} \frac{58}{18} \frac{58}{22} \frac{47}{15} 6.366 \text{ r/min} = 557 \text{ r/min}$$

将有关数据代入:

$$\begin{aligned} GD^2 &= \left[(60+3.04) + \frac{(14.91+7.84)}{\left(\frac{47}{15}\right)^2} + \frac{(23.54+13.74)}{\left(\frac{47}{15}\right)^2 \left(\frac{58}{22}\right)^2} + \frac{(37.28+25.51)}{\left(\frac{47}{15}\right)^2 \left(\frac{58}{22}\right)^2 \left(\frac{58}{18}\right)^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{41.20}{\left(\frac{47}{15}\right)^2 \left(\frac{58}{22}\right)^2 \left(\frac{58}{18}\right)^2 \left(\frac{46}{14}\right)^2} + 365 \frac{(29430+19620) \left(\frac{1}{6}\right)^2}{557^2} \right] \text{N}\cdot\text{m}^2 \\ &= [63.040 + 2.320 + 0.546 + 0.089 + 0.005 + 1.603] \text{N}\cdot\text{m}^2 = 67.6 \text{N}\cdot\text{m}^2 \end{aligned}$$

从本例可见,电动机转子本身的飞轮矩占整个系统飞轮矩的比例很大。

② 负载转矩 T_L 。根据式 (1-6):

$$T_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n_d \eta_c}$$

在此, F_L 应为工件在切削时,工作台所受到的总的阻力,也就是切削时电动机给予工作台的驱动力,所以 $F_L = [F + (G_1 + G_2)\mu]$;

η_c 为传动机构总的传动效率,即 $\eta_c = (\eta'_c)^4$ 。将有关数据代入上式得:

$$\begin{aligned} T_L &= 9.55 \frac{F_L v_L}{n_d \eta_c} = 9.55 \frac{[F + (G_1 + G_2)\mu] \times v_L}{n_d \times (\eta'_c)^4} \\ &= 9.55 \frac{[(19620 + (29430 + 19620) \times 0.1)] \times \frac{1}{6}}{557 \times (0.95)^4} \text{N}\cdot\text{m} = 86.04 \text{N}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

另外,求折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 也可以从齿轮 8 上的实际负载转矩,经转速比折算并考虑到传动机构的传动效率而求得:

$$T_L = \frac{[F + (G_1 + G_2)\mu] \frac{D_8}{2}}{\left(\frac{z_2}{z_1}\right) \left(\frac{z_4}{z_3}\right) \left(\frac{z_6}{z_5}\right) \left(\frac{z_8}{z_7}\right) (\eta'_c)^4}$$

事实上,上式可从式 (1-6) 推得。

例1-2 某起重机的拖动系统如图1-7所示。已知提升重物的重力 $G = 19600 \text{N}$, 提升速度 $v = 0.5 \text{m/s}$, 传动齿轮的效率 $\eta_1 = \eta_2 = 0.96$, 卷筒的效率 $\eta_3 = 0.95$, 卷筒直径 $D = 0.4 \text{m}$, 传

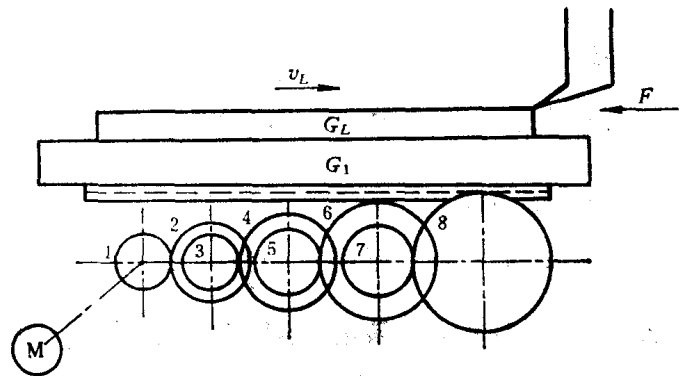


图1-6 龙门刨床传动系统图

动机构的转速比 $j_1=6$, $j_2=10$, 各转轴上的飞轮矩, $GD_1^2=10.78\text{N}\cdot\text{m}^2$, $GD_2^2=24.5\text{N}\cdot\text{m}^2$, $GD_3^2=14.7\text{N}\cdot\text{m}^2$ 。忽略钢绳重力和滑轮传动装置的损耗。试求:

①折算到电动机轴上的总飞轮矩;

②以 $v=0.5\text{m/s}$ 提升重物时, 电动机所输出的转矩和效率;

③以 $v=0.5\text{m/s}$ 下放重物时, 电动机所输出的转矩和效率;

④以加速度 $a=0.1\text{m/s}^2$ 提升重物时, 电动机所输出的转矩。

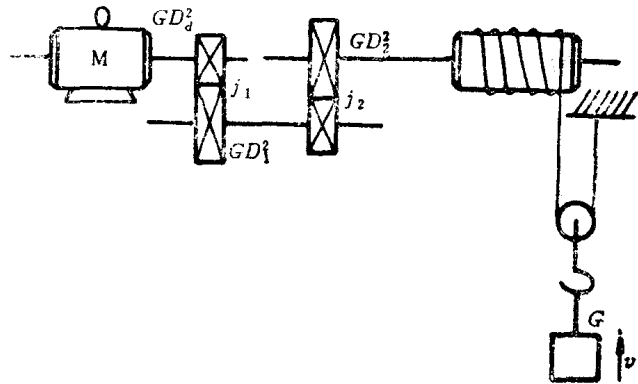


图1-7 起重机提升机构拖动系统

解

①系统总的飞轮矩

$$GD^2 = GD_4^2 + \frac{GD_1^2}{j_1^2} + \frac{GD_2^2}{j_1 j_2^2} + 365 \frac{Gv^2}{n_d^2}$$

式中 n_d 为电动机在提升重物时的转速。

$$\text{卷筒转速 } n = 60 \frac{2v}{\pi D} = \frac{60 \times 2 \times 0.5}{\pi \times 0.4} \text{r/min} = 47.75 \text{r/min}$$

$$\begin{aligned} \text{电动机转速 } n_d &= nj = nj_1 j_2 = 47.75 \times 6 \times 10 \text{r/min} \\ &= 2865 \text{r/min} \end{aligned}$$

将有关数据代入:

$$GD^2 = \left(10.78 + \frac{24.5}{6^2} + \frac{14.7}{6^2 \times 10^2} + 365 \frac{19600 \times 0.5^2}{2865^2} \right) \text{N}\cdot\text{m}^2 = 11.68 \text{N}\cdot\text{m}^2$$

②提升重物时的负载转矩。卷筒上的负载转矩 T'_L 为

$$T'_L = \frac{G}{2} \cdot \frac{D}{2} = \left(\frac{19600}{2} \times \frac{0.4}{2} \right) \text{N}\cdot\text{m} = 1960 \text{N}\cdot\text{m}$$

电动机轴上的输出转矩 T_2 即为折算到该轴上的负载转矩 T_L

$$T_2 = T_L = \frac{T'_L}{j_1 j_2 \eta_1 \eta_2 \eta_3} = \left(\frac{1960}{6 \times 10 \times 0.96^2 \times 0.95} \right) \text{N}\cdot\text{m} = 37.31 \text{N}\cdot\text{m}$$

电动机轴上的输出转矩 T_L 与等速提升重物的速度大小有无关系, 读者自行分析。

提升重物时电动机轴上输出的功率为

$$P_2 = P_L = \frac{T_2 n_d}{9550} = \left(\frac{37.31 \times 2865}{9550} \right) \text{kW} = 11.20 \text{kW}$$

③设题中所给的传动效率为提升重物时的, 即 $\eta_d^{\uparrow} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 = 0.876$, 则下放重物时的传动效率 $\eta_d^{\downarrow} = 2 - 1/\eta_d^{\uparrow} = 2 - 1/0.876 = 0.858$, 当等速下放重物时, 电动机轴上输出的转矩为 T_2^{\downarrow}

$$T_2^{\downarrow} = \frac{T'_L}{j_1 j_2} \eta_d^{\downarrow} = \left(\frac{1960}{6 \times 10} \times 0.858 \right) \text{N}\cdot\text{m} = 28 \text{N}\cdot\text{m}$$

下放重物时电动机轴上输出的功率

$$P_2 = -\frac{T_2^{\downarrow} n_d}{9550} = -\left(\frac{28 \times 2865}{9550} \right) \text{kW} = -8.4 \text{kW}$$

④以加速度 $a=0.1\text{m/s}^2$ 提升该重物时电动机转矩的计算。电动机转速与重物提升速度的关系为

$$n_d = n j_1 j_2 = \left(60 \frac{2v}{\pi D} \right) j_1 j_2$$

电动机加速度与重物提升加速度的关系为

$$\frac{dn_d}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{120v}{\pi D} j_1 j_2 \right) = \frac{120}{\pi D} j_1 j_2 a$$

代入数据即得

$$\frac{dn_d}{dt} = \left(\frac{120}{\pi \times 0.4} \times 6 \times 10 \times 0.1 \right) \text{r}/(\text{s} \cdot \text{min}) = 573 \text{r}/(\text{s} \cdot \text{min})$$

具有加速情况下的电动机输出转矩应为等速提升重物时轴上输出转矩与加速转矩之和，即

$$T = T_L + \frac{GD^2}{375} \frac{dn_d}{dt} = \left(37.31 + \frac{11.68}{375} \times 573 \right) \text{N} \cdot \text{m} = 55.16 \text{N} \cdot \text{m}$$

如果忽略电动机的空载转矩 T_0 ，则 $T = 55.16 \text{N} \cdot \text{m}$ 即为电动机此时产生的电磁转矩。

第三节 生产机械的典型负载转矩特性

由电力拖动系统的运动方程式可知，系统的运动状态取决于电动机及其负载的双方。因此，我们既要知道电动机的电磁转矩 T 与转速 n 的关系，即电动机的机械特性 $n = f(T)$ ，也要知道生产机械负载转矩 T_L 与转速 n 的关系，即生产机械负载转矩特性 $n = f(T_L)$ 。典型的负载转矩特性有恒转矩特性、恒功率特性和通风机型特性三种。

一、恒转矩负载特性

凡负载转矩 T_L 的大小为一定值，而与转速 n 无关的称为恒转矩负载。根据负载转矩的方向是否与转向有关，又分为两类。

(一) 反抗性恒转矩负载

这类负载的特点是：无论朝哪个方向运动，负载转矩 T_L 总是反抗运动的。例如，机床刀架的平移、电车在平道上行驶，等等。

对于反抗性恒转矩负载，当 n 为正向时， T_L 也为正向（按前述规定，以反对正向运动的方向作为 T_L 的正方向）；当 n 为负方向， T_L 也改变方向，变为负值。因此反抗性恒转矩负载特性曲线应在第一和第三象限内，如图1-8所示。

反抗性负载又叫反作用负载。

(二) 位能性恒转矩负载

像起重机提升与下放重物这类负载，不论其运动方向如何，重力作用总是向下的。如果以提升作为运动的正方向，则 n 为正向时， T_L 反对运动，也为正值；当下放重物， n 为负向时， T_L 的方向不变，仍为正值，表明这时负载是帮助运动的，这就是位能性负载的特点，其特性曲线应在第一和第四象限

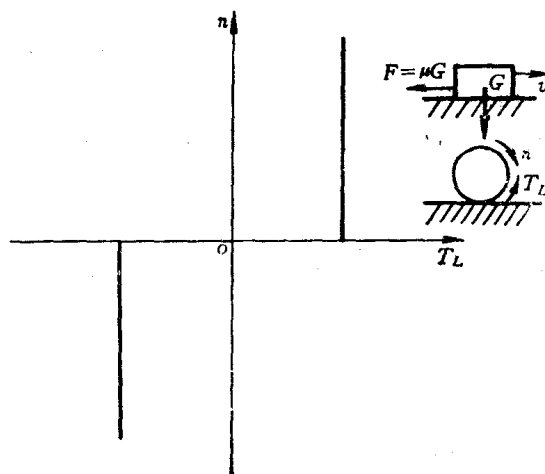


图1-8 反抗性恒转矩负载特性

内，如图1-9所示。

二、恒功率负载特性

负载功率 P_L 为一定值，负载转矩 T_L 则与转速 n 成反比。如某些机床，在粗加工时，切削量大，切削阻力也大，用低速；精加工时，切削量小，阻力也小，往往开高速。这样在不同转速下， T_L 与 n 基本上成反比关系，即 $T_L=K/n$ ，其切削功率 P_L

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

T_L 与 n 成双曲线关系，如图1-10所示。

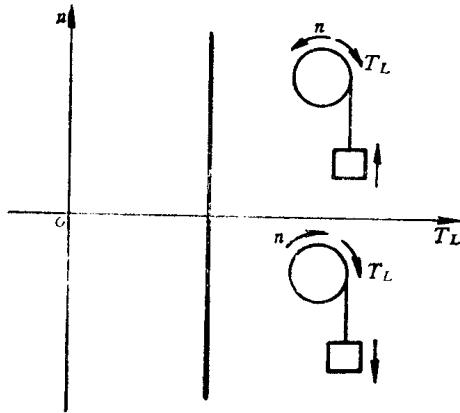


图1-9 位能性恒转矩负载特性

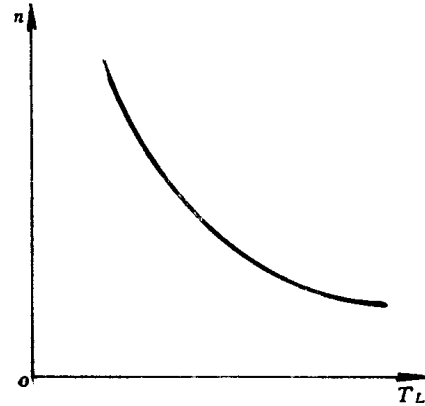


图1-10 恒功率负载特性

三、通风机型负载特性

属于通风机负载的生产机械有：鼓风机、水泵和油泵等。其中空气、水和油等介质对机器叶片的阻力基本上和转速的平方成正比，即 $T_L=Kn^2$ ，式中 K 为比例常数。因此通风机型负载特性是一条抛物线，如图1-11曲线1所示。

必须指出，上述介绍的是三种典型的负载转矩特性，而实际上负载转矩往往是几种典型特性的综合。例如实际的鼓风机除了主要是通风机负载特性外，由于轴上还有一定的摩擦转矩 T_0 ，因此实际鼓风机的负载转矩特性应为

$$T_L = T_0 + Kn^2$$

与此相应的特性为图1-11曲线2所示。

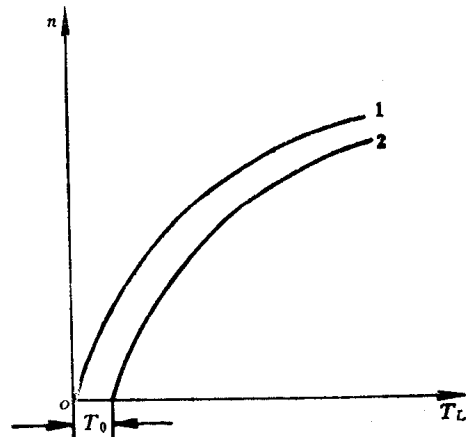


图1-11 通风机型负载特性

第四节 电力拖动系统稳定运行的条件

电力拖动系统的运行情况，即电动机能否稳定运行，决定于电动机的机械特性与生产机械的负载转矩特性的配合。电动机的机械特性随电动机类型的不同而不同。这里先介绍他励直流电动机的机械特性，然后讨论系统稳定运行的条件。