

电  
力  
拖  
动  
基  
础

# 电力拖动基础

郭镇明 丛 望 编

921  
9

版  
社

哈尔滨工程大学出版社

TN921  
G99

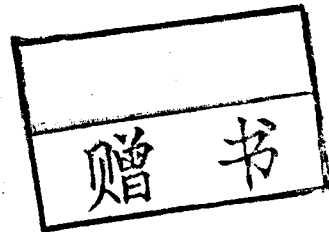
425997

# 电力拖动基础

郭镇明 丛 望 编



00425997



哈尔滨工程大学出版社

## 内 容 简 介

本书共分电力拖动系统动力学基础、直流电动机的电力拖动、三相异步电动机的电力拖动和电动机容量选择等4章。本书力求从实用角度出发,讲清基本观念,基本原理和基本方法,为进一步学习其它专业知识和正确使用电机打下良好基础。

本书可作为高等工科院校工业自动化、电气技术等专业的本科生教材,也适用于各类成人高校的相关专业,对从事电气工程技术的各类人员,也是一本较好的参考书。

## 电 力 拖 动 基 础

郭镇明 丛 望 编

责任编辑 李 英

哈尔滨工程大学出版社出版发行  
新 华 书 店 经 销  
哈尔滨毕升电脑排版有限公司排版  
绥 化 县 印 刷 厂 印 刷

开本 787×1092 1/16 印张 11.5 字数 270 千字  
1996年3月第1版 1997年10月第2次印刷  
印数:1001—3000册

ISBN 7-81007-660-4  
TM·8 定价:10.00元

# 前 言

本书是根据新修订的教学计划要求,参照 1989 年 7 月在武汉召开的全国工科院校电气技术教材编审委员会所制定的《电力拖动基础》大纲,并在总结多年教学实践经验的基础上编写的。

全书共分电力拖动系统的动力学基础、直流电动机的电力拖动、三相异步电动机的电力拖动和电动机的选择等 4 章。本书从使用角度出发,着重阐述各种电机的机械特性、运行状态分析及其计算;力图讲清基本概念、基本原理和基本方法,为进一步学好后续课程及今后正确、合理选用电机打下良好的理论基础。

在本书编写过程中,力求突出重点,精选内容,层次清楚,语言流畅。为解决内容要求与学时紧张的矛盾,增加了一些可供自学的内容,以使课堂教学与学生自学结合起来。每章后附有小结和一些思考题与习题,以帮助读者加深对基本内容的理解,提高分析、解决实际问题的能力。

本书可作为高等工科院校工业自动化、电气技术等专业的本科生教材,也适用于各类成人高校的相关专业,对从事电气工程技术的各类人员,也是一本较好的参考书。

本书由郭镇明副教授提出结构框架,编写了第 3、4 章;丛望副教授编写了绪论和第 1、2 章。郭镇明整理加工了全部书稿,并最后定稿。全书由唐嘉亨教授主审。

在本书编写过程中,得到了领导及教研室老师的大力支持,唐嘉亨教授、何敏哉副教授、倪桂馨高级实验师参加本书编写大纲的讨论,对本书结构、内容安排提出了许多宝贵意见。庞秀霞高级工程师为本书绘制了全部图稿。哈尔滨工程大学出版社的同志对本书的出版给予极大的帮助。在此,对本书出版给予鼓励、帮助及付出辛勤劳动的所有同志表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中错误与不当之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

1995 年 6 月

# 目 录

绪论 .....	1
1 电力拖动系统的动力学基础 .....	3
1.1 电力拖动系统的运动方程式 .....	3
1.1.1 电力拖动系统的组成 .....	3
1.1.2 电力拖动系统的运动方程式 .....	3
1.1.3 运动方程中各物理量正负号的标注规定 .....	5
1.2 工作机构的转矩和飞轮矩的折算 .....	6
1.2.1 旋转运动 .....	7
1.2.2 平移运动 .....	8
1.2.3 升降运动 .....	9
1.3 生产机械典型负载转矩特性 .....	13
1.3.1 恒转矩负载特性 .....	13
1.3.2 恒功率负载特性 .....	14
1.3.3 通风机型负载特性 .....	14
1.4 传动损耗和传动效率 .....	15
1.4.1 传动损耗功率和传动损耗转矩 .....	15
1.4.2 传动效率与输出转矩的关系 .....	16
1.4.3 提升装置传动效率的确定方法 .....	16
小结 .....	18
习题 .....	19
2 直流电动机的电力拖动 .....	21
2.1 他励直流电动机的机械特性 .....	21
2.1.1 他励直流电动机机械特性方程 .....	21
2.1.2 机械特性的硬度 .....	23
2.1.3 他励直流电动机固有机机械特性和人为机械特性 .....	23
2.1.4 机械特性的绘制 .....	25
2.2 电力拖动系统稳定运行的条件 .....	26
2.3 他励直流电动机的起动 .....	28
2.3.1 起动过程分析和起动方法 .....	28
2.3.2 串电阻分级起动的起动过程 .....	29
2.3.3 起动电阻的计算 .....	30

2.4	他励直流电动机的制动	33
2.4.1	制动的一般概念	33
2.4.2	他励直流电动机的能耗制动	34
2.4.3	他励直流电动机的反接制动	36
2.4.4	他励直流电动机的回馈制动	39
2.5	他励直流电动机的调速	40
2.5.1	调速指标	41
2.5.2	调速方法	44
2.5.3	调速方法与负载的配合	48
2.5.4	他励直流电动机运行状态分析实例	50
2.6	直流拖动系统的过渡过程	54
2.6.1	机械过渡过程	55
2.6.2	考虑电磁惯性时的过渡过程	64
2.6.3	他励直流电动机励磁回路的过渡过程	68
2.6.4	时间常数的确定	69
2.7	他励直流电动机过渡过程中的能量损耗	71
2.7.1	理想空载下恒压起动的能量损耗	72
2.7.2	理想空载下电压分级起动的能量损耗	73
2.7.3	理想空载下能耗制动的能量损耗	73
2.7.4	理想空载下反接制动的能量损耗	74
2.7.5	理想空载下反转的能量损耗	74
2.7.6	减小过渡过程能量损耗的方法	74
2.8	串励直流电动机的机械特性和运行特点	75
2.8.1	串励直流电动机的机械特性	75
2.8.2	串励直流电动机作电动运行时的特点	77
2.8.3	串励直流电动机作制动运行时的特点	77
2.8.4	串励直流电动机机械特性的绘制和起动电阻的计算	79
2.9	复励直流电动机的机械特性	82
	小结	84
	习题	87
3	三相异步电动机的电力拖动	90
3.1	三相异步电动机的机械特性	90
3.1.1	机械特性的三种表达式	90
3.1.2	固有机械特性	93
3.1.3	人为机械特性	94
3.1.4	三相异步电动机机械特性的绘制	96

3.2	三相异步电动机的起动	98
3.2.1	鼠笼式异步电动机的起动	99
3.2.2	绕线式异步电动机的起动	105
3.2.3	改善起动性能的三相异步电动机	108
3.3	三相异步电动机的制动	109
3.3.1	能耗制动	110
3.3.2	反接制动	114
3.3.3	回馈制动	116
3.3.4	三种制动方法的比较	117
3.4	三相异步电动机的调速	120
3.4.1	变极调速	120
3.4.2	变频调速	124
3.4.3	改变转差率调速	126
3.5	异步电动机拖动系统过渡过程	136
3.5.1	绕线式异步电动机拖动恒转矩负载时的过渡过程	137
3.5.2	鼠笼式异步电动机拖动系统的过渡过程	138
3.5.3	三相异步电动机过渡过程的能量损耗	142
3.5.4	减少异步电动机过渡过程能量损耗的方法	143
	小结	144
	习题	145
4	电动机的选择	147
4.1	选择电动机的一般原则	147
4.1.1	电动机种类、型式、电压和转速的选择	147
4.1.2	电动机容量的选择	148
4.2	电动机的发热与冷却	150
4.2.1	电动机的发热过程	150
4.2.2	电动机的冷却过程	152
4.2.3	电动机的工作制	152
4.3	连续工作制电动机容量的选择	155
4.3.1	常值负载下电动机容量的选择	155
4.3.2	变化负载下电动机容量的选择	157
4.4	短时工作制电动机容量的选择	164
4.4.1	选择连续工作制电动机	164
4.4.2	选择短时工作制电动机	166
4.4.3	选择断续周期工作制电动机	167
4.5	断续周期工作制电动机容量的选择	167

4.6 选择电动机容量的工程方法 .....	170
4.6.1 统计分析法 .....	170
4.6.2 类比法 .....	171
小结 .....	171
习题 .....	172
参考文献 .....	173



# 绪 论

## 0.1 电力拖动系统在国民经济中的应用

在现代化工业生产、交通运输、科学研究等诸多领域,绝大部分生产机械都是采用电动机作为原动机来拖动的,例如,各类机床设备、起重设备、电动车和纺织机械等。

由电动机拖动生产机械运动的系统称为电力拖动系统,也称为电气传动系统。

凡是在生产过程中完成加工、搬运等各项工作的机械,统称为生产机械,例如,机床、泵、起重机、轧钢机和电机车等。由电动机及其控制设备以及生产机械组成的成套装置,称为电力拖动装置,或电力拖动系统。在电力拖动系统中,电动机的作用是把电能转换成机械能,然后带动生产机械运动,因而,电动机是生产机械的原动机。然而,在某些情况下,电动机也起制动作用,把机械能转换成电能,此时,我们称电动机运行在电磁制动状态。

## 0.2 电力拖动系统的发展

在19世纪末、20世纪初,随着电能的广泛应用,电动机逐步取代了蒸汽机,成为拖动系统中最常用的一种原动机。电力拖动的发展,大体上经历了成组拖动、单机拖动和多机拖动三个阶段。成组拖动是用一台电动机拖动一根天轴,再由传动带或绳索分别拖动几台生产机械。由于这种拖动方式结构不尽合理,电动机性能不能充分发挥,所以效率很低,目前已不采用。

从本世纪20年代开始,逐步采用单机拖动,即由一台电动机拖动一台生产机械,从而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。

随着现代化工业生产水平的不断提高和生产机械的不断现代化,在一台生产机械上往往同时具有多套运动机构,如果仍采用一台电动机来拖动,显然是不适宜的。于是,对于现代化的生产机械,大都采用多电动机拖动运动机构这种较复杂的拖动方式,即用一台电动机来拖动生产机械中的某一个部件。由于采用多机拖动方式易于实现自动化生产,因此,在现代化的电力拖动系统中大都采用多电动机拖动方式。值得一提的是,近几十年来,随着电力电子技术的迅速发展和微计算机的广泛应用,使得多电动机拖动系统进入了一个新的阶段,尤其对交流电动机拖动系统,更是如此。

## 0.3 电力拖动系统的分类和特点

对于拖动系统,可根据拖动生产机械的电动机类型将其分为直流电力拖动系统和交流电力拖动系统。凡是以直流电动机作为原动机的拖动系统,我们称其为直流电力拖动系统;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。直流电力拖动系统具有起动转矩大、可在较大范围内实现速度的平滑调节和易于控制等优点。同时,由于直流电动机具有换向器和电刷装置,限制了电动机向高速和大容量方面发展,并且也不能直接用于易燃、易爆等工业场合。而对于交流电力拖动系统,由于交流异步电动机具有结构简单、维修方便,且能在环境条件较恶劣的场合下运行,所以交流电力拖动系统在工农业生产中

得到广泛的应用。但是,由于交流电力拖动在调速性能等指标上还不能完全赶上直流电力拖动,所以,在要求很高的调速系统中,交流电力拖动仍受到一定的限制。

#### **0.4 本课程的性质和任务**

本课程是工业自动化专业的一门专业基础课。学生应在掌握力学、电磁理论、电路和电机学等基础知识后,进行本课程的学习。通过该课程的学习,学生将获得由各种电动机所组成的电力拖动系统的基本理论和系统运行在各种状态时的静、动态特性的计算方法,以及如何选择电动机容量等基本技能。从而为进一步学习本专业的有关后续课程,如《交流技术》、《电力拖动控制系统》等提供必备的基础知识。

# 1. 电力拖动系统的动力学基础

## 1.1 电力拖动系统的运动方程式

### 1.1.1 电力拖动系统的组成

通常,电力拖动系统是由电动机、生产机械、传动机构、控制设备和电源等五大部分组成,其系统组成示意图如图 1-1 所示。

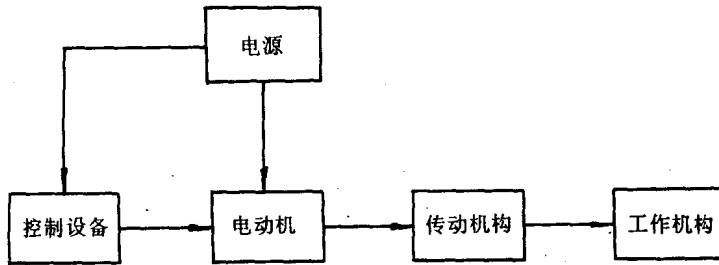


图 1-1 电力拖动系统组成示意图

在电力拖动系统中,电动机的作用是把电能转换为机械动力,用以拖动生产机械的某一工作机构。而工作机构是生产机械为执行某一任务的机械部分。控制设备是由各种控制电器、控制元件和工业可编程控制器或其它工业控制机组成,用以控制电动机的运行,从而对工作机械的运动实现自动控制。应指出的是,除某些生产机械(如鼓风机和泵)外,在多数情况下,电动机与工作机械并不同轴,而是在二者之间设有传动机构。传动机构的作用是把电动机的运动经中间变速或变换运动方式后,再传给生产机械的工作机构。为了向电动机和其它电气设备供电,在电力拖动系统中还必须设有电源部分。

### 1.1.2 电力拖动系统的运动方程式

1.1.2.1 直线运动方程 根据牛顿第二定律,质点的运动方程式为

$$f = ma \quad (1-1)$$

式中, $f$ ——作用在质点上的所有外力的合力;

$m$ ——质点的质量;

$a$ ——质点的加速度。

质量与加速度的乘积可以理解为,由于质点具有惯性而表现出的阻碍速度变化的力,通常称其为动态负载力。于是,式(1-1)表示是在动态条件下(即加速度不等于零的状态下)力的平衡关系,也就是所有外力的合力与动态负载力相平衡的关系。如果这时质点做匀速运动或静止不动,则加速度为零,这种状态称为稳态,或静态。如果我们根据已知条件对式(1-1)进行求解,则可得出质点的速度与时间的关系,因此,我们称式(1-1)为质点

的运动方程式。

在电力拖动装置中,有很多部件是做直线运动的,例如起重机的吊钩、机床的工作台、电梯的升降室以及直线电动机等。这些部件的直线运动可以看作是刚体的直线运动,而刚体的直线运动方程式与质点的运动方程式(1-1)具有相同的形式。为了分析问题方便,从电力拖动过程考虑,可把作用在直线运动部件上的外力分为拖动力和静负载力两部分。于是,可得出直线运动方程式

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

式中, $F$ ——由旋转电动机通过传动机构(或直线电动机)产生的,作用在拖动系统直线运动部件上的拖动力;

$F_L$ ——静负载力,如摩擦力、起重机的重物和吊钩的重力以及风阻力等;

$m$ ——直线运动部件的质量;

$v$ ——直线运动部件的速度;

$\frac{dv}{dt}$ ——直线运动部件的加速度。

1.1.2.2 单轴旋转系统的运动方程式 在电力拖动系统中,存在着大量的绕固定轴旋转的部件,例如旋转电动机、齿轮和各种做旋转运动的工作机构等。我们可以根据物理学中的刚体转动定律来分析和描述这些旋转部件的运动规律。

为了分析问题方便,我们首先来分析典型的单轴旋转系统。所谓的单轴旋转系统是指,在电力拖动装置中没有传动机构,其运动系统只有同一种转速的旋转系统,通常简称为单轴系统,其系统结构和各物理量的方向分别如图1-2,a和图1-2,b所示。

根据刚体转动定律,可得单轴旋转系统的运动方程式

$$M - M_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-3)$$

式中, $M$ ——电动机的电磁转矩;

$M_L$ ——静负载转矩;

$J$ ——运动系统的转动惯量;

$\Omega$ ——角速度;

$\frac{d\Omega}{dt}$ ——角加速度。

由式(1-2)和式(1-3)可见,直线运动方程和旋转运动方程极为相似,其各物理量之间存在着对应关系。

为分析问题方便,可将旋转工作机械等效为一实圆柱体,于是,式(1-

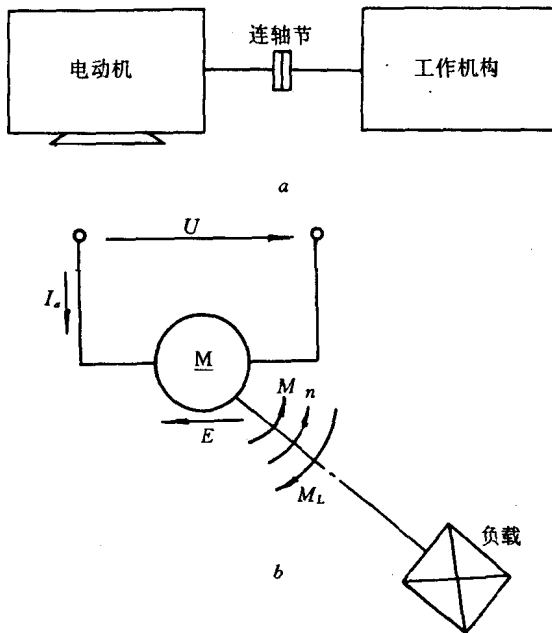


图1-2 单轴旋转系统  
a. 系统示意图; b. 各物理量的方向

3)中的转动惯量  $J$  可用下式表示

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

式中,  $m$  ——圆柱体的质量;

$\rho$  ——圆柱体的回转半径;

$G$  ——圆柱体的重力;

$D$  ——圆柱体的直径;

$g$  ——重力加速度。

在式(1-4)中,  $GD^2$  称为飞轮矩 ( $N \cdot m^2$ )。它是实际工程中用来描述旋转物体惯性的物理量。值得注意的是,虽然在数值上  $GD^2$  等于重力  $G$  与圆柱体直径  $D$  平方的乘积,但是,由于把  $GD^2$  写在一起表示飞轮矩,所以应把  $GD^2$  看成是一个不可分的整体符号。

由于在实际工程上是用转速  $n$  而不是用角速度  $\Omega$  来描述电机转速的,所以,还需把式(1-4)化成工程上的实用形式。现将  $\Omega = 2\pi n/60$  代入式(1-4),可得实用的电力拖动系统的运动方程式

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

式中,常数 375 具有加速度量纲;转矩的单位是  $N \cdot m$ 。

应注意的是,有时在产品目录中查到的电动机和其它旋转部件的飞轮矩可能仍是采用工程上沿用的单位公斤·米<sup>2</sup> ( $kgf \cdot m^2$ )。由于这里的公斤 ( $kgf$ ) 不是我国法定计量单位的质量单位千克(公斤),而是工程单位制的重力单位千克力,所以,还需将工程单位制以  $kgf \cdot m^2$  为单位的数值乘以 9.81,才换算成我国法定计量单位以  $N \cdot m^2$  为单位的数值。

由式(1-5)可见,电动机的工作状态可由运动方程表示出来。当  $M = M_L$  时,  $n = 0$  或  $n = \text{常值}$ ,即电动机静止或等速旋转,拖动系统处于稳定运行状态,简称稳态;当  $M > M_L$  时,  $\frac{dn}{dt} > 0$ ,电动机加速;当  $M < M_L$  时,  $\frac{dn}{dt} < 0$ ,电动机减速。不论加速还是减速,由于拖动系统的运动均处于过渡过程之中,所以称之为动态。

应指出,式(1-3)和式(1-5)只适用于转动惯量是常量的旋转系统,而不能用于转动惯量为非常量的运动系统,如曲柄-连杆机构等。

### 1.1.3 运动方程中各物理量正负号的标注规定

由图 1-2,  $b$  和运动方程式可见,作用在拖动系统上的各物理量是具有方向性的变量,并且各物理量的方向之间存在着明显的物理意义。为了能正确地反映各物理量之间的动力学关系,且便于分析和讨论问题以及数值计算,必须对各物理量正方向的标注作明确的规定。

通常,在确定运动方程中各量的正方向时,往往以电动机的转速  $n$  为参考。首先确定  $n$  的正方向。转速正方向的选取是任意的,顺时针方向或逆时针方向均可定义为正方向。但是,在实际工程上,习惯于把提升装置提升重物时的转速方向定义为正方向;把机床对应于进给切削方向的转速定义为正方向。一旦转速的正方向确定下来,转矩的正方向可按下列规则确定:

- (1) 电动机(电磁)转矩  $M$  的正方向与转速的正方向相同;
- (2) 静负载转矩  $M_L$  的正方向与转速的正方向相反。

加速转矩(动负载转矩)  $\frac{GD^2 dn}{375 dt}$  的大小和正负由转  $M$  和  $M_L$  的代数和来决定。于是,当转速、电动机转矩和静负载转矩的实际方向与各自的正方向一致时,其取值均为正值,即  $n > 0, M > 0, M_L > 0$ 。这时,如果  $M > M_L$ ,则动负载转矩  $\frac{GD^2 dn}{375 dt} > 0$ ;系统作加速运动,动负载转矩具有阻碍系统加速的作用;如果  $M < M_L$ ,电动机转矩不足以克服静负载转矩,  $\frac{GD^2 dn}{375 dt} < 0$ ,系统作减速运动,动负载转矩阻碍减速,具有驱动转矩的性质。

## 1.2 工作机构的转矩和飞轮矩的折算

1.1.2 中讨论的拖动系统,其电动机与工作机构是直接连接的。这时,工作机构的转速就是电动机的转速,工作机构的负载就等于作用在电动机轴上的阻转矩(忽略电动机空载转矩  $M_0$ ),因此称其为单轴拖动系统。

在实际的拖动系统中,电动机的轴往往不与工作机构轴直接连接,而是通过传动机构与工作机构轴连接,以便实现电动机转速与工作机构转速的匹配。由于这类拖动系统具有两根或两根以上不同转速的轴,所以称为多轴旋转系统,简称多轴系统。图 1-3 给出了一种三轴拖动系统及其等效的单轴拖动系统。由图可见,该拖动系统的传动机构为两级齿轮减速机构,其减速比分别为  $j_1, j_2$ ,传动效率分别为  $\eta_1, \eta_2$ ,三根转轴的转速分别为  $n, n_1 = n/j_1, n_m = n/(j_1 j_2)$ ,三根轴上的转矩和飞轮矩也不相同。

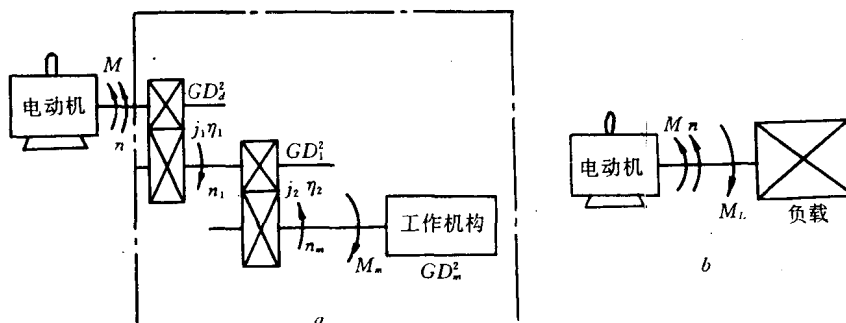


图 1-3 多轴拖动系统及其等效单轴系统

a. 多轴系统; b. 等效单轴系统

由图 1-3 可见,要全面地研究这样一个多轴拖动系统,就必须对每一根轴列出其相应的运动方程式,然后再列出各轴之间相互关联的方程式,最后把这些方程式联立起来,方能对拖动系统进行全面的研究。显然,采用这种方法是十分复杂的,而且对于电力拖动系统而言也没有这个必要,因为对于电力拖动系统,我们主要把电动机的轴作为研究对象,并不需要详细研究每个轴的问题。于是,在实际工程中,我们通常采用折算的办法,即把实际的多轴拖动系统等效为单轴拖动系统,然后,采用 1.1.2 介绍的研究单轴电力拖动

系统的方法来研究实际的多轴拖动系统。当然,这种两个不同系统的等效必须遵循保持系统传递的功率和系统贮存的动能不变的原则。在具体折算时,首先从已知的实际静负载转矩  $M_m$  计算出折算到电动机轴上的等效静负载转矩  $M_L$ ;然后,从已知的各转轴的飞轮矩  $GD_2^2$ 、 $GD_1^2$  和  $GD_m^2$ ,计算出系统的总飞轮矩  $GD^2$ 。我们把前面的折算称为静负载转矩的折算,后面的折算称为系统飞轮矩的折算。这两种折算都随拖动系统工作机构的不同而有所不同,下面分别进行讨论。

### 1.2.1 旋转运动

在实际生产中,有许多生产机械的工作机构的运动属于旋转运动。现在我们以图 1-3 中所示的系统为例,分别介绍旋转运动时转矩和飞轮矩的折算。

1.2.1.1 静负载转矩的折算 设图示系统中工作机构的静负载转矩为  $M_m$ ,转速为  $n_m$ ,相应的角速度  $\Omega_m = 2\pi n_m / 60$ ,于是,工作机构的功率为

$$P_m = M_m \Omega_m$$

现以  $M_L$  代表折算到电动机轴上的静负载转矩; $\Omega$  为电动机轴的角速度, $\Omega = 2\pi n / 60$ ,则折算到电动机轴上的机械功率  $P_d$  为

$$P_d = M_L \Omega$$

如果忽略传动机构的功率损耗,则根据折算前后功率不变的原则,有

$$M_m \Omega_m = P_m = P_d = M_L \Omega$$

$$M_L = M_m \frac{\Omega_m}{\Omega} = M_m \frac{n_m}{n} = \frac{1}{j} M_m \quad (1-6)$$

式中, $j = \Omega / \Omega_m = n / n_m$ ——电动机与工作机构的转速比。由于多数传动机构是减速的,所以,通常  $j > 1$ 。

由式(1-6)可以看出,在工作机构的低速轴上,转矩  $M_m$  较大,而折算到电动机的高速轴上时,等效转矩  $M_L$  的数值较小。这说明从功率不变的观点看,低速轴的转矩大,高速轴的转矩小。

实际上,在多轴拖动系统的机械功率传递过程中,传动机构存在功率损耗,即传动损耗。这部分损耗是由电动机承担的,因此,电动机输出的机械功率比生产机械消耗的功率大。这部分损耗可以用传动机构的效率  $\eta_c$  来描述。于是,有

$$P_d = P_m \frac{1}{\eta_c}$$

$$M_L \Omega = M_m \Omega_m \frac{1}{\eta_c}$$

$$M_L = M_m \frac{1}{j \eta_c} \quad (1-7)$$

应注意的是,在式(1-7)中,电动机轴与工作机构轴的转速比  $j$  为总转速比,在多级传动机构中应为各级转速比之积,即  $j = j_1 \cdot j_2 \cdots$ ;传动效率  $\eta_c$  也同样是传动机构的总效率,为各级传动效率之积,即  $\eta_c = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdots$ 。

通常,不同种类的传动机构,其传动效率是不一样的,并且,负载大小不同时,同一传动机构的效率也不尽相同。在工程计算中,一般采用满载效率进行计算。传动机构的效率可在相应的机械工程手册上查得,例如,每对齿轮(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。

1.2.1.2 飞轮矩的折算 飞轮矩的大小是旋转工作机构机械惯性的体现。由于旋转体的动能为  $\frac{1}{2}J\Omega^2$ , 如令  $J$  代表多轴系统折算成单轴系统后的等效转动惯量, 则对于图 1-3 所示的系统, 根据折算前后系统贮存动能不变的原则, 有

$$\frac{1}{2}J\Omega^2 = \frac{1}{2}J_d\Omega^2 + \frac{1}{2}J_1\Omega_1^2 + \frac{1}{2}J_m\Omega_m^2$$

将上式两边同乘以  $4g$ , 除以  $\Omega^2$ , 则可得与  $J$  相对应的等效飞轮矩  $GD^2$  的折算公式

$$GD^2 = GD_d^2 + GD_1^2 \frac{1}{j_1^2} + GD_m^2 \frac{1}{j_1^2 \cdot j_2^2} \quad (1-8)$$

在式(1-8)中,  $GD_d^2$  是电动机转子的飞轮矩与装在该轴上的齿轮飞轮矩之和;  $GD_1^2$  是第二根轴上两个齿轮飞轮矩之和;  $GD_m^2$  为第三根轴上工作机构飞轮矩与该轴齿轮飞轮矩之和。

通常, 在总的飞轮矩  $GD^2$  中, 电动机转子本身的飞轮矩  $GD_d^2$  占的比重最大, 工作机构上的飞轮矩折算值占的比重次之, 而传动机构飞轮矩的折算值所占的比重最小。因此, 在实际工程中, 为了避免折算带来的麻烦, 往往采用式(1-9)来估算系统的总飞轮矩。

$$GD^2 = (1 + \delta)GD_d^2 \quad (1-9)$$

式中,  $\delta$  为小于 1 的数, 通常取 0.2~0.3;  $GD_d^2$  是电动机转子本身的飞轮矩, 其值可由产品目录中查得。

### 1.2.2 平移运动

在实际生产中, 有相当一部分生产机械的工作机构作平移运动, 例如龙门刨床的工作台。由于平移运动属于直线运动, 因此, 其转矩和飞轮矩的折算公式与上述旋转运动有所不同。图 1-4 给出了刨床的传动示意图。由图可见, 电动机通过多级齿轮减速后, 再由齿轮与齿条啮合, 将旋转运动变成直线运动。下面就以图 1-4 所示系统为例, 介绍平移运动的转矩折算和飞轮矩折算。

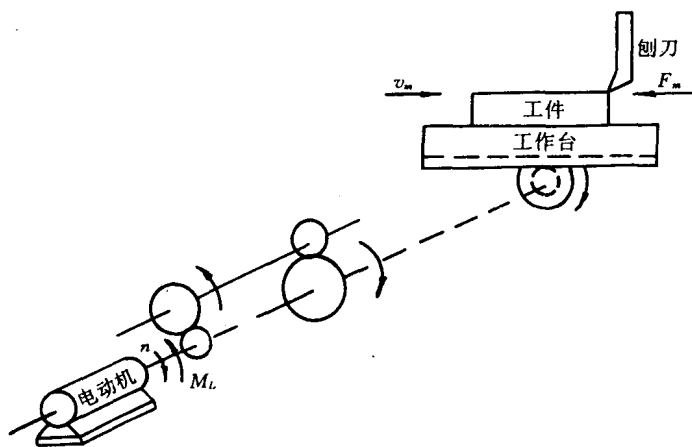


图 1-4 刨床工作机构示意图



1.2.2.1 转矩的折算 设进给切削时工件与工作台的速度为  $v_m$  (m/s), 刀具作用在工件上的切削力为  $F_m$  (N), 于是, 切削功率  $P_m$  (W) 为

$$P_m = F_m v_m$$

切削力  $F_m$  反映到电动机轴上表现为转矩  $M_L$ , 切削功率  $P_L$  反映到电动机轴上为  $M_L \Omega = \frac{2\pi n}{60} M_L$ , 如果不考虑传动机构的损耗, 则根据传递功率不变的原则, 有

$$F_m v_m = M_L \frac{2\pi n}{60}$$

$$M_L = \frac{F_m v_m}{2\pi n / 60} = 9.55 \frac{F_m v_m}{n} \quad (1-10)$$

当考虑传动机构的损耗时, 由于传动机构的损耗是由电动机承担的, 所以有

$$M_L = 9.55 \frac{F_m v_m}{n \eta_c} \quad (1-11)$$

1.2.2.2 飞轮矩的折算 设平移运动部分的重力  $G_m = m_m g$ , 则平移运动部分的动能为

$$\frac{1}{2} m_m v_m^2 = \frac{1}{2} \frac{G_m v_m^2}{g}$$

根据折算前后动能不变的原则, 有

$$\frac{1}{2} J_L \Omega^2 = \frac{1}{2} \frac{GD_L^2}{4g} \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2 = \frac{GD_L^2 n^2}{7150} = \frac{1}{2} \frac{G_m v_m^2}{g}$$

因此, 平移运动部分折算到电动机轴上的飞轮矩  $GD_L^2$  为

$$GD_L^2 = 365 \frac{G_m v_m^2}{n^2} \quad (1-12)$$

需要指出的是, 图 1-4 所示系统传动机构中转动部分的  $GD^2$  的折算与前述相同, 而这部分飞轮矩与式 (1-12) 中的飞轮矩之和为系统的总飞轮矩。

### 1.2.3 升降运动

有些生产机械的工作机构是作升降运动的, 如起重机和电梯等。虽然升降运动和平移运动同属于直线运动, 但它具有不同于平移运动的特点。现以图 1-5 所示的起重机提升机构为例来进行讨论。由图可见, 电动机通过一个传动机构拖动一个卷筒, 缠绕在卷筒上

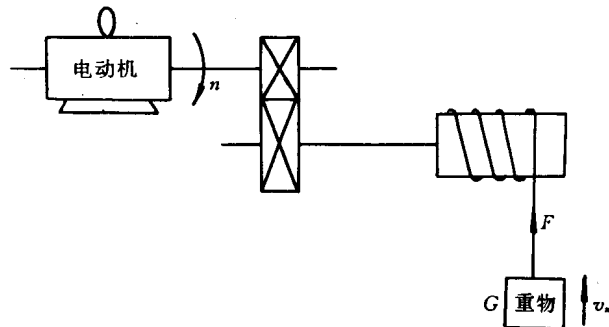


图 1-5 起重机示意图