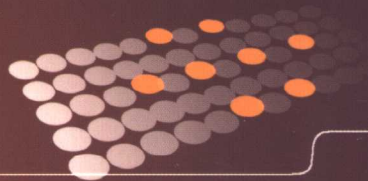
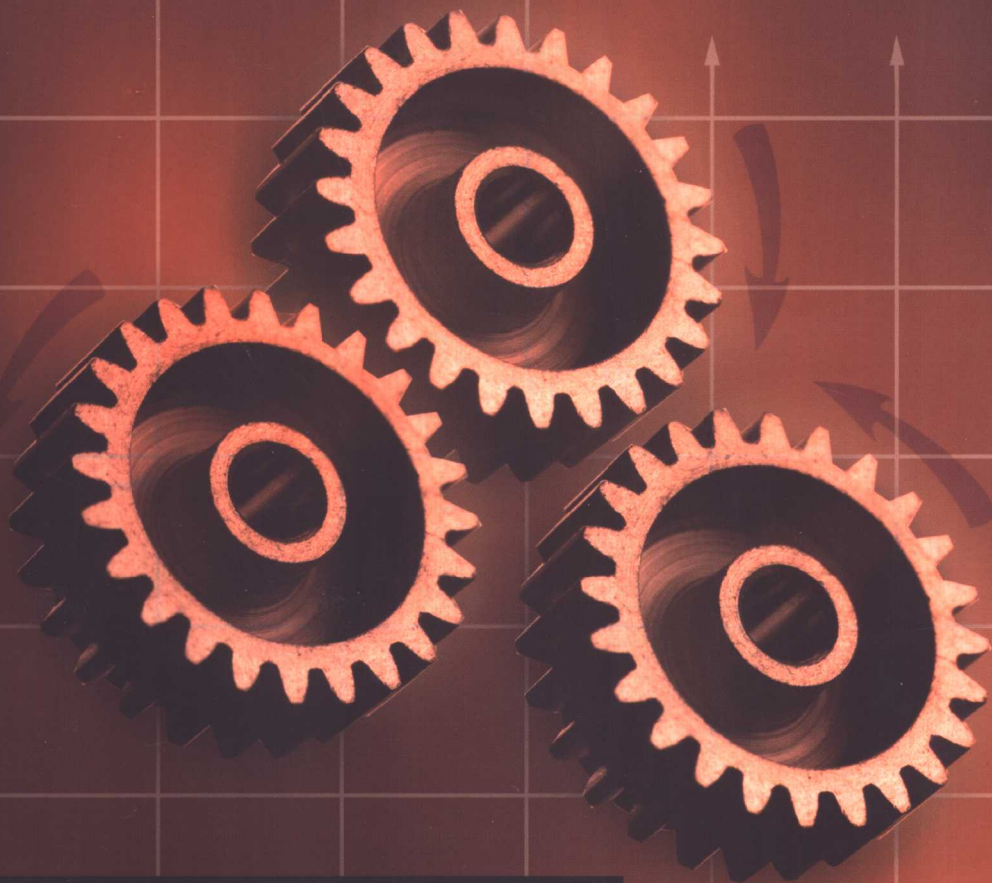


高等学校电气工程与自动化专业教材



电机与电力拖动

邱阿瑞 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等学校电气工程与自动化专业教材

电机与电力拖动

邱阿瑞 主编

13114P/11

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

电动机拖动生产机械运转称为电力拖动。在现代化生产中,大多数生产机械都采用电力拖动,如各种风机、水泵与油泵、各种机床、起重机、轧钢机、运输机械、化工机械、纺织机械、印刷机械等。按照电动机的种类不同,电力拖动分为直流电力拖动和交流电力拖动。

本书主要介绍交直流电动机原理和交直流电力拖动方面的内容。全书共分9章,分别介绍电力拖动系统运动方程式;直流电机的磁路、运行原理、工作特性和机械特性;直流电动机的起动、制动和调速;变压器的运行原理、运行特性、联结组标号等;交流电机的绕组、电动势和磁通势;异步电动机的原理、工作特性和机械特性;异步电动机的起动、制动和调速;同步电动机的稳态运行、起动和调速,永磁同步电动机;电力拖动系统电动机的选择等。每章后面附有思考题与习题,供复习与练习用。

本书可作为普通高等学校和成人高等学校自动化专业、电气工程专业,以及机电一体化专业的教材或参考书,亦可供有关科技人员学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电机与电力拖动/邱阿瑞主编. —北京:电子工业出版社,2002.7
高等学校电气工程与自动化专业教材
ISBN 7-5053-7806-6

I. 电... II. 邱... III. ①电机—高等学校—教材②电力传动—高等学校—教材 IV. ①TM3②TM921
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 050163 号

责任编辑:陈晓莉

印刷者:北京四季青印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:22.5 字数:504 千字

版 次:2002 年 7 月第 1 版 2002 年 7 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定 价:29.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话 (010)68279077

前 言

面向 21 世纪的全球变革趋势,为适应全球经济一体化对人才的知识、能力和素质的要求,教育教学改革势在必行。随着人才培养模式的改革与发展,整个课程体系与结构发生了较大的变化。“电机与电力拖动”课程的学时比原来大为压缩。为适应这一教学改革的变化,这次重新编写本课程教材。

本课程是自动化、电气工程,以及机电一体化等专业的主要专业基础课之一,是过去电机学和电力拖动基础两门课程的有机结合。在课程学时大为削减的情况下,本书编写时力求做到内容精选,重点突出,物理概念清楚。既保留经典理论体系,又吸收新的科技成果。

电力拖动是指利用电动机来拖动生产机械使其运转。按照电动机的种类不同,电力拖动分为直流电力拖动和交流电力拖动。本书紧紧围绕交直流电力拖动来安排课程内容。

本书共分 9 章,主要阐明了电力拖动系统运动方程式;直流电机的磁路、运行原理、工作特性和机械特性;直流电动机的起动、制动和调速;变压器的运行原理、运行特性、联结组标号等;交流电机的绕组、电动势和磁通势;异步电动机的运行原理、工作特性和机械特性;异步电动机的起动、制动和调速;同步电动机的稳态运行、起动和调速,永磁同步电动机;电力拖动系统电动机的选择等。每一章后面附有思考题与习题,供复习与练习用。

由于作者水平有限,书中难免存在缺点和错误,欢迎读者批评指正。

编者

2001 年 12 月

目 录

前言	I
第 1 章 电力拖动系统动力学	1
1.1 电力拖动系统的运动方程式	1
1.2 负载转矩和飞轮矩的折算	2
1.2.1 旋转运动	3
1.2.2 平移运动	5
1.2.3 升降运动	6
1.3 电力拖动系统的负载特性	8
1.3.1 恒转矩负载特性	8
1.3.2 通风机、泵类负载特性	9
1.3.3 恒功率负载特性	9
1.4 电力拖动系统稳定运行条件	10
思考题	12
习题一	12
第 2 章 直流电机原理	14
2.1 直流电机的工作原理和基本结构	14
2.1.1 直流电机的基本工作原理	14
2.1.2 直流电机的基本结构	16
2.1.3 励磁方式	19
2.1.4 直流电机的额定数据	20
2.2 直流电机的电枢绕组	21
2.2.1 电枢绕组的元件	21
2.2.2 电枢绕组的节距	22
2.2.3 单叠绕组	23
2.2.4 单波绕组	27
2.2.5 各种绕组及应用范围	29
2.3 直流电机空载和负载时的磁场	30
2.3.1 直流电机的空载磁场	30

2.3.2	负载时直流电机的磁场	32
2.4	感应电动势和电磁转矩	35
2.4.1	电枢绕组的感应电动势	36
2.4.2	电磁转矩	37
2.5	直流发电机及其运行特性	38
2.5.1	直流发电机稳态运行时的基本方程式	38
2.5.2	功率关系	39
2.5.3	他励直流发电机的运行特性	41
2.5.4	并励直流发电机的自励与外特性	44
2.5.5	复励直流发电机及外特性	46
2.6	直流电动机及其运行特性	46
2.6.1	直流电机可逆原理	46
2.6.2	直流电动机稳态运行时的基本方程式	47
2.6.3	功率关系	48
2.6.4	直流电动机的机械特性	49
2.6.5	直流电动机的工作特性	51
2.7	直流电动机的固有机械特性和人为机械特性	53
2.7.1	固有机械特性	53
2.7.2	人为机械特性	55
2.7.3	根据铭牌数据估算机械特性	57
2.8	换向	58
2.8.1	换向元件中的电动势	59
2.8.2	换向元件中电流变化的规律	60
2.8.3	改善换向的方法	61
	思考题	62
	习题二	63
第3章	直流电动机的起动、调速和制动	65
3.1	直流电动机的起动	65
3.1.1	直接起动	65
3.1.2	电枢回路串电阻起动	65
3.1.3	降电压起动	66
3.2	直流电动机的调速	66
3.2.1	电枢串电阻调速	67
3.2.2	改变电枢电源电压调速	67

3.2.3	弱磁调速	69
3.2.4	调速的性能指标	71
3.3	直流电动机的制动	75
3.3.1	能耗制动	75
3.3.2	反接制动	77
3.3.3	倒拉反转制动运行	79
3.3.4	回馈制动	80
3.4	直流电动机的各种运行状态	84
3.4.1	电动运行状态	84
3.4.2	制动运行状态	84
3.5	电力拖动系统的过渡过程	85
3.5.1	电力拖动系统过渡过程的分析	85
3.5.2	他励直流电动机起动的过渡过程	89
3.5.3	他励直流电动机反接制动的过渡过程	90
3.5.4	缩短拖动系统过渡过程时间的措施	92
	思考题	94
	习题三	95
第4章	变压器	97
4.1	概述	97
4.1.1	变压器的结构	98
4.1.2	变压器的额定数据	100
4.2	变压器的空载运行	102
4.2.1	忽略绕组电阻及漏磁通时的电压与电动势的关系	103
4.2.2	励磁电流	104
4.2.3	原绕组的电阻和漏磁通的影响	105
4.2.4	空载运行相量图	106
4.2.5	空载运行时的等值电路	106
4.3	变压器的负载运行	109
4.3.1	负载运行时的磁通势关系及原、副边电流的关系	110
4.3.2	负载运行时副边电压与电流的关系	112
4.3.3	变压器的基本方程式	112
4.3.4	折合算法	113
4.3.5	等值电路	116
4.3.6	相量图	118

4.3.7	功率关系	119
4.4	标么值	122
4.5	变压器参数的测定	124
4.5.1	变压器的空载试验	124
4.5.2	变压器的短路试验	125
4.6	变压器的运行性能	128
4.6.1	变压器的电压变化率与外特性	128
4.6.2	变压器的效率	130
4.7	变压器的联结组标号	132
4.7.1	单相变压器绕组的标志方式	132
4.7.2	三相变压器绕组的联结	133
4.7.3	三相变压器的联结组标号	135
4.7.4	标准联结组标号	138
4.8	变压器的并联运行	139
4.8.1	并联运行的理想情况和条件	139
4.8.2	短路阻抗不相等时的并联运行	142
4.8.3	变比不等时的并联运行	143
4.8.4	联结组标号对并联运行的影响	143
4.9	自耦变压器与电压电流互感器	143
4.9.1	自耦变压器	143
4.9.2	电压互感器与电流互感器	146
	思考题	147
	习题四	148
第 5 章	交流电机的绕组、电动势和磁通势	151
5.1	概述	151
5.2	电枢绕组基波感应电动势	152
5.2.1	导体的感应电动势	152
5.2.2	整距线匝的感应电动势	155
5.2.3	整距线圈的感应电动势	156
5.2.4	短距线圈的感应电动势	157
5.2.5	整距分布线圈组的感应电动势	158
5.2.6	短距分布线圈组的感应电动势	159
5.3	三相单层绕组与双层绕组	160
5.3.1	三相单层集中整距绕组	160

5.3.2	三相单层分布绕组	161
5.3.3	三相双层短距分布绕组	164
5.4	电枢绕组的谐波电动势	167
5.5	单相绕组产生的磁通势	169
5.5.1	整距线圈产生的磁通势	170
5.5.2	整距分布线圈组产生的磁通势	176
5.5.3	短距线圈产生的磁通势	177
5.5.4	短距分布线圈组产生的磁通势	179
5.5.5	单相绕组产生的磁通势	180
5.6	三相绕组产生的磁通势	181
5.6.1	三相合成基波磁通势	182
5.6.2	三相合成谐波磁通势	185
5.7	两相绕组产生的磁通势	188
5.7.1	圆形旋转磁通势	188
5.7.2	椭圆旋转磁通势	190
	思考题	192
	习题五	193
第6章	三相异步电动机原理	195
6.1	概述	195
6.1.1	基本特点及用途	195
6.1.2	主要分类	195
6.1.3	三相异步电动机的主要结构	196
6.1.4	异步电动机的额定数据	198
6.1.5	异步电动机的主要系列	200
6.2	异步电动机的基本方程式和等值电路	201
6.2.1	转子不转时的异步电动机	202
6.2.2	转子旋转的异步电动机	215
6.2.3	鼠笼转子的极数、相数和参数的折合	219
6.2.4	简化等值电路	222
6.3	异步电动机的功率和转矩	223
6.3.1	三相异步电动机的功率	223
6.3.2	三相异步电动机的转矩	226
6.4	异步电动机的机械特性	227
6.4.1	机械特性的参数表达式	227

6.4.2	机械特性的实用公式	232
6.4.3	固有机械特性和人为机械特性	234
6.5	异步电动机的运行性能	239
6.5.1	异步电动机的性能	239
6.5.2	异步电动机的工作特性	240
6.6	异步电动机的参数测定	242
6.6.1	空载试验	242
6.6.2	堵转试验	243
	思考题	245
	习题六	247
第7章	三相异步电动机的起动、调速和制动	249
7.1	鼠笼式异步电动机的起动	249
7.1.1	在额定电压下直接起动	250
7.1.2	星-三角(Y- Δ)降压起动	251
7.1.3	自耦变压器降压起动	252
7.1.4	定子回路串接电抗器降压起动	254
7.1.5	延边三角形起动	256
7.1.6	高起动转矩的异步电动机	257
7.2	绕线式异步电动机的起动	259
7.2.1	转子回路串电阻起动	260
7.2.2	转子串接频敏变阻器起动	263
7.3	异步电动机的软起动	264
7.3.1	软起动器的主电路	265
7.3.2	软起动方式	265
7.4	异步电动机的调速	267
7.4.1	变频调速	268
7.4.2	变极调速	270
7.4.3	转子串电阻调速	275
7.4.4	串级调速	277
7.4.5	调压调速	280
7.4.6	电磁调速电动机	281
7.5	异步电动机的制动	283
7.5.1	回馈制动	283
7.5.2	反接制动	286

7.5.3 倒拉反转运行	289
7.5.4 能耗制动	290
7.5.5 软停车与软制动	292
7.6 异步电动机的各种运行状态	293
思考题	296
习题七	298
第 8 章 三相同步电动机	300
8.1 概述	300
8.2 同步电动机的稳态运行	302
8.2.1 同步电动机的旋转磁通势和感应电动势	302
8.2.2 功率关系和转矩关系	307
8.2.3 功角特性	308
8.2.4 同步电动机的功率因数调节	310
8.3 同步电动机的起动	312
8.3.1 辅助电动机起动法	312
8.3.2 异步起动法	313
8.3.3 变频起动法	313
8.4 同步电动机的变频调速	314
8.5 永磁同步电动机	314
8.5.1 永磁同步电动机的结构	315
8.5.2 永磁同步电动机的速度控制	316
思考题	316
习题八	316
第 9 章 电动机的选择	318
9.1 电动机类型、电压和转速的选择	318
9.1.1 电动机种类的选择	318
9.1.2 电动机形式的选择	320
9.1.3 电动机额定电压的选择	320
9.1.4 电动机额定转速的选择	321
9.2 电动机额定功率的选择	321
9.2.1 电动机绝缘材料等级和温升	322
9.2.2 电动机的发热与冷却过程	323
9.2.3 电动机的工作制	325
9.2.4 负载图	327

9.2.5 连续工作制下电动机额定功率的选择	327
9.2.6 短时工作制下电动机额定功率的选择	335
9.2.7 断续周期工作制下电动机额定功率的选择	337
9.2.8 电动机过载能力和起动能力的校验	340
思考题	341
习题九	342
附录 Y2 系列三相异步电动机的技术数据	343
参考文献	347

第 1 章 电力拖动系统动力学

在工农业生产中,各种生产机械一般都以电动机为动力,来完成对物体的加工、输送、压缩与分离等各项工作。例如:各种切削机床、风机、水泵、油泵、轧钢机、起重机、提升机、皮带输送机、搅拌机、空气压缩机、分离机和钻机等。这种以电动机为动力来拖动各种生产机械的工作方式,称为电力拖动(或电气传动)。

电力拖动系统一般由电动机、控制设备、传动机构、生产机械和电源组成,如图 1-1 所示。

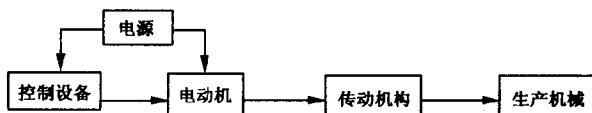


图 1-1 电力拖动系统框图

电动机通常是根据生产机械的工作要求来选用,主要有直流电动机、异步电动机和同步电动机三大类,因后两种电动机的电源为交流电源,故统称为交流电动机。以直流电动机为动力的拖动系统称为直流电力拖动系统,简称直流拖动系统;以交流电动机为动力的拖动系统称为交流电力拖动系统,简称交流拖动系统。

1.1 电力拖动系统的运动方程式

最简单的单轴电力拖动系统如图 1-2 所示。拖动系统的负载与电动机转轴直接相连,负载的转速与电动机的转速相同。图中作用在电动机转轴上的转矩有电动机的电磁转矩 T ($N\cdot m$) 和负载转矩 T_L ($N\cdot m$), 电磁转矩 T 的正方向与转速 n (r/min) 的正方向相同, 而负载转矩 T_L 的正方向与转速 n 的正方向相反。

根据旋转运动系统的牛顿第二定律, 可得

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

式中, J 为旋转系统的转动惯量 ($N\cdot m\cdot s^2$); Ω 为转子旋转机械角速度 (rad/s); $\frac{d\Omega}{dt}$ 为转子旋转机械角加速度 (rad/s^2)。

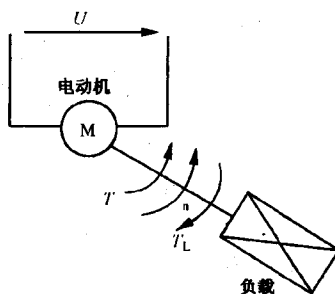


图 1-2 单轴电力拖动系统

由于转动惯量 J 是物理学中常用的物理量,工程上则常用飞轮矩 $GD^2(\text{N}\cdot\text{m}^2)$ 来表示系统的机械惯性。它们之间的关系为

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

式中, m 为系统转动部分的质量(kg); ρ 为系统转动部分的转动惯性半径(m); g 为重力加速度(9.8 m/s^2)。

转速 n 与旋转机械角速度 Ω 的关系为

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

将式(1-2)和(1-3)代入式(1-1)得

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

式(1-4)通常称为电力拖动系统的运动方程式。

从式(1-4)可以看出,电力拖动系统的运动状态是由电动机轴上的两个转矩 T 和 T_L 来决定的。

- (1) 当 $T > T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} > 0$, 系统加速;
- (2) 当 $T < T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} < 0$, 系统减速;
- (3) 当 $T = T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} = 0$, 系统稳速运转($n = \text{常值}$)或处于静止状态($n = 0$)。

因此, $(T - T_L)$ 称为动态转矩或加速转矩。

1.2 负载转矩和飞轮矩的折算

在生产实际中,许多生产机械为了满足工作的需要,工作机构的速度往往与电动机的转速不同,因此在电动机与工作机构之间需装设变速机构,如皮带变速、齿轮变速和蜗轮蜗杆变速等。这时的电力拖动系统就称为多轴的拖动系统,如图 1-3 所示。

对于多轴电力拖动系统,一般不用详细研究每一根轴上的问题,而只需以电动机轴为研究对象,这时要把工作机构与传动机构合起来等效为一个负载,这样,一个实际的多轴拖动系统就可简化等效成如图 1-2 所示的单轴拖动系统。

等效单轴拖动系统的运动方程式为

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

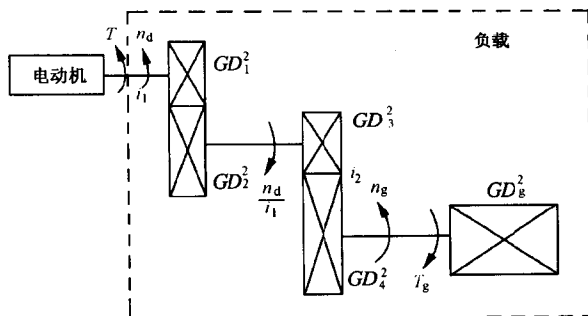


图 1-3 多轴电力拖动系统

式中 T 为电动机的电磁转矩; T_L 为折算到电动机轴上的负载转矩; GD^2 为电动机轴上的总飞轮矩, 它包括电动机转子本身的飞轮矩 GD_0^2 和折算到电动机轴上的负载飞轮矩 GD_L^2 。

转矩和飞轮矩的折算将随工作机构运动形式的不同而不同, 下面分别加以讨论。

1.2.1 旋转运动

1. 转矩的折算

工作机构为旋转运动的例子如图 1-3 所示。若不考虑传动机构的损耗, 工作机构折算到电动机轴上的功率(W)应等于工作机构的功率, 即

$$T_L \Omega = T_g \Omega_g$$

$$T_L = \frac{T_g \Omega_g}{\Omega} = \frac{T_g n_g}{n_d} = \frac{T_g}{i} \quad (1-6)$$

式中, T_L 为工作机构折算到电动机轴上的转矩; T_g 为工作机构的实际负载转矩; Ω 为电动机转轴的角速度; Ω_g 为工作机构转轴的角速度; n_d 为电动机转轴的转速; n_g 为工作机构转轴的转速。

$i = i_1 \cdot i_2 = \frac{n_d}{n_g}$ 为传动机构的总速比, 其中 i_1 、 i_2 分别为第一、二级速比。通常传动机构是减速的, 即 $n_g < n_d$, 故 $i > 1$; 若传动机构是增速的, 则 $n_g > n_d$, $i < 1$ 。

若考虑传动机构的传动效率, 则

$$T_L \Omega = \frac{T_g \Omega_g}{\eta_c}$$

$$T_L = \frac{T_g \Omega_g}{\eta_c \cdot \Omega} = \frac{T_g n_g}{\eta_c \cdot n_d} = \frac{T_g}{\eta_c \cdot i} \quad (1-7)$$

式中, η_c 为传动机构的传动效率,它是各级传动效率的乘积。

负载转矩折算的原则是折算前后的功率不变。

2. 飞轮矩的折算

在多轴拖动系统中,传动机构为电动机负载的一部分。因此,负载飞轮矩折算到电动机轴上的飞轮矩包括有工作机构部分的飞轮矩和传动机构部分的飞轮矩,然后再与电动机转子的飞轮矩相加就为等效单轴系统的总飞轮矩。负载飞轮矩折算的原则是折算前后的动能不变。

因为旋转物体的动能(J)表示式为

$$\frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} \frac{GD^2}{4g} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 = \frac{GD^2 n^2}{7149} \quad (1-8)$$

因此,负载飞轮矩折算的计算式为

$$\frac{GD_L^2 n_d^2}{7149} = \frac{GD_1^2 n_d^2}{7149} + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{7149} \cdot \frac{n_d^2}{i_1^2} + \frac{GD_4^2 + GD_g^2}{7149} \cdot \frac{n_d^2}{i_1^2 \cdot i_2^2}$$

化简得

$$GD_L^2 = GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{i_1^2} + \frac{GD_4^2 + GD_g^2}{i_1^2 \cdot i_2^2} \quad (1-9)$$

式中 GD_L^2 为折算到电动机轴上的负载飞轮矩; GD_1^2 、 GD_2^2 、 GD_3^2 、 GD_4^2 分别为传动机构各个齿轮的飞轮矩; GD_g^2 为工作机构部分的飞轮矩。

由式(1-9)可知,传动机构各轴折算到电动机轴上的飞轮矩应为各轴上的飞轮矩除以电动机与该轴的速比平方。

于是,折算后拖动系统总飞轮矩为

$$GD^2 = GD_d^2 + GD_L^2 \quad (1-10)$$

式中 GD_d^2 为电动机转子本身的飞轮矩。

通常,传动机构各轴及工作机构的转速要比电动机的转速低,而飞轮矩的折算与速比平方成反比,因此各轴折算到电动机轴上的飞轮矩的数值并不大,故在系统总飞轮矩中占主要成分的是电动机转子本身的飞轮矩。因此,在实际工作中,为了减少折算的麻烦,可采用下式来估算系统的总飞轮矩:

$$GD^2 = (1 + \delta) GD_d^2 \quad (1-11)$$

一般 $\delta = 0.2 \sim 0.3$,如果电动机轴上还有其他大飞轮矩部件,如机械抱闸的闸轮等, δ 的数值需要加大。

1.2.2 平移运动

1. 转矩的折算

某些生产机械的工作机构作平移运动,如刨床的工作台。刨床拖动系统示意图见图 1-4。这种运动的折算方法与旋转运动有所不同。

设 F_g 为工作机构作平移运动时所克服的阻力(N), v_g 为工作机构移动的速度(m/s),则工作机构所需功率为

$$P_g = F_g v_g \quad (1-12)$$

根据折算前后的功率不变的原则,并考虑到传动系统的损耗,折算到电动机轴上的负载转矩的计算式推导如下:

因为

$$T_L \Omega = \frac{F_g v_g}{\eta_c}$$

所以

$$T_L = \frac{F_g v_g}{\eta_c \Omega} = \frac{F_g v_g}{\eta_c \frac{2\pi n_d}{60}} = 9.55 \frac{F_g v_g}{\eta_c n_d} \quad (1-13)$$

式中 T_L 为工作机构折算到电动机轴上的转矩; Ω 为电动机转轴的角速度; n_d 为电动机转轴的转速; η_c 为传动机构的传动效率。

2. 飞轮矩的折算

设 m_g 、 $G_g (= G_1 + G_2)$ 分别为平移运动部分的质量(kg)和重量(N),其动能为

$$\frac{1}{2} m_g v_g^2 = \frac{1}{2} \frac{G_g v_g^2}{g} \quad (1-14)$$

平移运动部分折算到电动机轴上的飞轮矩应满足折算前后的动能不变的原则,即

$$\frac{1}{2} \frac{G_g v_g^2}{g} = \frac{GD_{Lg}^2 n_d^2}{7149}$$

于是

$$GD_{Lg}^2 = \frac{7149 G_g v_g^2}{2g n_d^2} = 365 \frac{G_g v_g^2}{n_d^2} \quad (1-15)$$

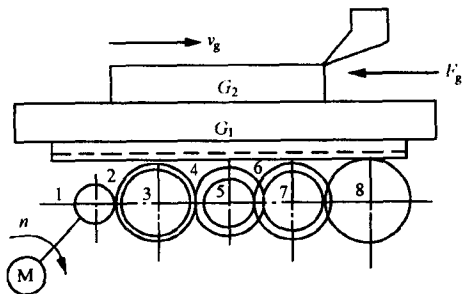


图 1-4 刨床拖动系统示意图