

信息与电子学科百本精品教材工程

新编电气与电子信息类本科规划教材

# 电力拖动

戴文进 主编

章穗 舒志兵 副主编

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



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

中国工程教育认证协会 中国工程教育认证中心 中国工程教育认证委员会  
[ 2020年12月15日 第1版第1次印刷 ]

# 电力拖动

主编 王 强  
副主编 李 强 张 强

2021

机械工业出版社

新编电气与电子信息类本科规划教材

# 电力拖动

戴文进 主编

章穗 舒志兵 副主编

潘再平 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书主要讨论由各种交、直流电动机组成的电力拖动系统的基础知识。全书共分4章,分别介绍电力拖动系统动力学、直流电动机的电力拖动、三相异步电动机的电力拖动及其MATLAB仿真分析、电力拖动系统中电动机容量的选择等内容。

本书既注重电力拖动理论的分析,也注意工程实际的应用,既可作为高等学校相关专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

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

电力拖动/戴文进主编. —北京:电子工业出版社,2004.8

新编电气与电子信息类本科规划教材

ISBN 7-121-00292-2

I. 电… II. 戴… III. 电力传动—高等学校—教材 IV. TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第088196号

责任编辑:凌毅 特约编辑:卞昕

印刷:北京大中印刷厂

出版发行:电子工业出版社

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:787×1092 1/16 印张:12 字数:307千字

印次:2004年8月第1次印刷

印数:5000册 定价:15.80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,请与本社发行系联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件dbqq@phei.com.cn。

# 信息与电子学科百本精品教材工程

## 《新编电气与电子信息类本科规划教材》

电气信息类专业教材编委会

**主任委员：**王宏华（河海大学）

**副主任委员：**戴文进（南昌大学）

赵英凯（南京工业大学）

胡先福（电子工业出版社）

**委 员：**孔 峰 任庆昌 唐志平 王云亮

谢克明 徐科军 薛士龙 凌 毅

### 编辑出版组

**主 任：**胡先福

**成 员：**王 颖 凌 毅 韩同平 张孟玮

冉 哲 李 岩 李维荣 张 昱

# 《新编电气与电子信息类本科规划教材》参编院校

（按拼音排序）

- ▶ 安徽大学
- ▶ 北京联合大学
- ▶ 北华大学
- ▶ 常州工学院
- ▶ 成都理工大学
- ▶ 哈尔滨工程大学
- ▶ 杭州电子科技大学
- ▶ 合肥工业大学
- ▶ 合肥电子工程学院
- ▶ 湖北工业大学
- ▶ 湖南科技大学
- ▶ 河海大学
- ▶ 河北工业大学
- ▶ 华北电力大学
- ▶ 淮海工学院
- ▶ 桂林电子工业学院
- ▶ 桂林工学院
- ▶ 广西工学院
- ▶ 济南大学
- ▶ 南京邮电学院
- ▶ 南京工业大学
- ▶ 南昌大学
- ▶ 南华大学
- ▶ 南通大学
- ▶ 内蒙古科技大学
- ▶ 山东大学
- ▶ 山东理工大学
- ▶ 山东科技大学
- ▶ 青岛大学
- ▶ 上海第二工业学院
- ▶ 上海海运学院
- ▶ 太原理工大学
- ▶ 太原重型机械学院
- ▶ 天津理工大学
- ▶ 厦门大学
- ▶ 西南科技大学
- ▶ 西安建筑科技大学
- ▶ 武汉工业学院
- ▶ 云南大学

## 前 言

根据电子工业出版社“新编电气与电子信息类本科规划教材”编委会的总体要求精神,遵照“电力拖动”课程的教学大纲要求,依据编委会审定通过的“电力拖动”教材编写大纲,我们编写了本书。

本书共有 4 章,论述电力拖动系统运动学、直流电动机的拖动、三相异步电动机的电力拖动、电力拖动系统中电动机容量的选择等内容。本书不仅注重电力拖动的理论分析,而且注意工程实际的应用,为此在书中附有大量结合工程实际的例题和习题。此外,本书首次在同类教材中运用 MATLAB 仿真工具,对电力拖动系统的动态过程进行仿真分析。这样不仅提高了本书的理论分析深度,更重要的是,对仿真工具运用于电力拖动系统的运行分析进行了有益的尝试。

本书由南昌大学戴文进教授主编,参与编写的人员有:戴文进(绪论、第 2 章、第 4 章)、湖北工业大学章穗(第 1 章)和南京工业大学舒志兵(第 3 章)。最后全书由戴文进统稿。

本书由浙江大学潘再平教授主审。潘老师对全书进行了认真审阅,提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

在本书编写过程中,戴文进教授的在校研究生刘保彬和周伟两位同学参与了资料整理、文字录入、插图绘制及书稿的校对工作,南昌大学电气与自动化工程系的青年教师陈瑛、肖倩华和杨莉对本书编写提出了不少宝贵意见,对他们的辛劳和付出,在此也一并致谢。

由于编者水平所限,加之时间仓促,书中定有不少疏漏和不当,敬请读者鉴谅并不吝指正。

编 者  
2004 年 8 月

# 目 录

绪论	1
第 1 章 电力拖动系统动力学	3
1.1 电力拖动系统的运动方程	4
1.1.1 电力拖动系统的组成	4
1.1.2 电力拖动系统的运动方程	4
1.2 多轴电力拖动系统	5
1.2.1 多轴电力拖动系统分析方法	5
1.2.2 工作机构的转矩和飞轮矩的折算	5
1.3 典型负载转矩特性与拖动系统的稳定运行条件	11
1.3.1 生产机械的典型负载转矩特性	11
1.3.2 电力拖动系统稳定运行条件	13
小结	14
思考题	16
习题	17
第 2 章 直流电动机的拖动	19
2.1 他励直流电动机的机械特性	20
2.1.1 固有机械特性	21
2.1.2 人为机械特性	21
2.1.3 他励直流电动机机械特性的工程计算与曲线绘制	23
2.2 他励直流电动机的起动	27
2.2.1 直接起动	27
2.2.2 降压起动	28
2.2.3 电枢回路串联电阻起动	28
2.3 他励直流电动机的制动	32
2.3.1 能耗制动	33
2.3.2 反接制动	35
2.3.3 回馈制动	38
2.4 他励直流电动机的调速	41
2.4.1 调速指标	41
2.4.2 他励直流电动机的各种调速方法	44
2.4.3 调速方式与负载的合理配合	49
2.4.4 主要直流调速系统简介	52
2.5 他励直流电动机的过渡过程及其能量损耗	54
2.5.1 机械过渡过程的一般规律	54
2.5.2 他励直流电动机起动的过渡过程	58



2.5.3	他励直流电动机制动的过渡过程	60
2.5.4	他励直流电动机过渡过程中的能量损耗	66
2.6	串励、复励直流拖动系统的运行	70
2.6.1	串励直流电动机的机械特性	70
2.6.2	串励直流电动机拖动系统的各种运行状态	71
2.6.3	复励直流电动机拖动系统的运行	73
2.7	他励直流电动机稳态运行的工程计算方法	73
	小结	77
	思考题	77
	习题	78
<b>第3章</b>	<b>三相异步电动机的电力拖动</b>	<b>81</b>
3.1	三相异步电动机的机械特性	82
3.1.1	三相异步电动机机械特性的3种表达式	82
3.1.2	固有机械特性	85
3.1.3	人为机械特性	86
3.1.4	机械特性曲线的绘制	88
3.2	三相异步电动机的起动	90
3.2.1	鼠笼式异步电动机的起动	91
3.2.2	绕线式异步电动机的起动	97
3.2.3	改善三相异步电动机的起动性能	99
3.3	三相异步电动机的制动	101
3.3.1	能耗制动	101
3.3.2	反接制动	105
3.3.3	回馈制动	107
3.3.4	3种制动方法的比较	108
3.4	三相异步电动机的调速	109
3.4.1	变极调速	110
3.4.2	变频调速	114
3.4.3	改变转差率调速	116
3.5	三相异步电动机拖动系统过渡过程	128
3.5.1	绕线式异步电动机拖动恒转矩负载时的过渡过程	128
3.5.2	鼠笼式异步电动机拖动系统的过渡过程	130
3.5.3	过渡过程的能量损耗	134
3.5.4	减少过渡过程能量损耗的方法	135
3.6	三相异步电动机的MATLAB仿真分析	135
3.6.1	MATLAB基础入门	135
3.6.2	常用模块及菜单简介	138
3.6.3	同步电动机及电流环的仿真	141
3.6.4	伺服系统位置环仿真	142
3.6.5	速度环、位置环对负载扰动的响应	144

小结	145
思考题	146
习题	146
<b>第4章 电力拖动系统中电动机容量的选择</b>	<b>148</b>
4.1 电动机的发热与冷却	149
4.1.1 电动机的温升及温升限值	149
4.1.2 电动机的发热和冷却过程	149
4.2 决定电动机容量的主要因素	151
4.2.1 概述	151
4.2.2 过载能力及起动能力的校验	152
4.2.3 电动机的工作方式	153
4.3 连续工作方式下的电动机容量选择	154
4.3.1 连续常值负载下的电动机容量选择	154
4.3.2 连续周期性变化负载下的电动机容量选择	158
4.4 短时工作方式下的电动机容量选择	167
4.4.1 短时工作方式下连续工作制电动机的容量选择	168
4.4.2 短时工作方式下短时工作制电动机容量的选择	169
4.5 周期性断续工作方式下的电动机容量选择	171
4.6 确定电动机容量的统计法与类比法	174
4.6.1 统计法	174
4.6.2 类比法	175
4.7 由特殊电源供电的电动机选择问题	175
4.7.1 由可控晶闸管供电的直流电动机容量的选择	175
4.7.2 由变频电源供电的三相异步电动机选择问题	176
小结	177
思考题	177
习题	178
<b>参考文献</b>	<b>181</b>

## 绪 论

众所周知,在现代化工业生产中,需要采用各种生产机械,而这些生产机械又必须有原动机来拖动。拖动生产机械的原动力及原动机可以是各种各样的,历史上就曾采用过人力、蒸汽、液压等拖动方式。尽管这些方式至今或多或少仍然还在沿用,但目前应用得最广泛的还是电力拖动。这是因为:①电能的传输和分配非常方便;②电动机的种类规格很多,它们具有各种各样的特性,能在很大程度上满足大多数生产机械的不同要求;③电力拖动系统的操作和控制比较简便,便于实现自动控制和远程操作,等等。因此,电力拖动在现代工业中得到最广泛的应用。可以这样说,没有电力拖动,就没有现代工业。

所谓电力拖动,就是用电动机使生产机械的工作机构产生运动。

由电动机、生产机械及它们之间的拖动机构、必要的电气控制设备等组成的整体,就称为电力拖动系统,其结构如图 0-1 所示。图中的电源和控制设备部分将由有关专门课程讲述,本书主要讲述的“电力拖动系统”如虚线框内部分所示。

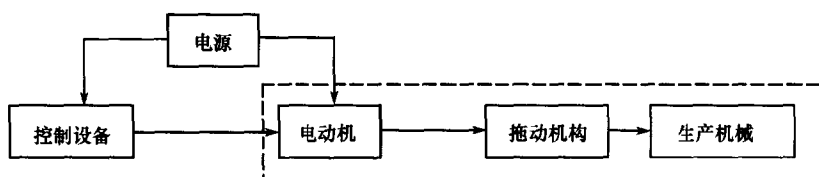


图 0-1 电动机传动系统示意图

电力拖动就是要研究上述拖动系统,分析它们的运行特性、能量关系及工程运用等问题。而要分析和研究这类问题,首先就必须掌握系统内动力学规律、典型负载的机械特性、复杂系统的简化计算以及系统稳定运行的分析和判断等。这一切就是所谓电力拖动物理学。

其次,还必须分析交直流电动机的机械特性,并结合负载的机械特性,全面分析分别由直流电动机和三相交流电动机组成的直、交流拖动系统的运行。其中,既有电动、制动等各种稳定运行,又有包括起动和制动过程在内的各种过渡过程。此外,还要对起动、制动及调速的设备,如起动、制动和调速电阻,进行设置和计算。

此外还应指出的是,所谓电力拖动,其根本问题就是根据各种生产机械的需要,如何正确选择和使用电动机的问题。因此,电动机的选择也是电力拖动的一个重要内容。

一般来说,电动机的选择应包括很多内容,如电动机种类的选择、容量的选择、电压等级的选择、转速选择及防护形式的选择等,其中尤以容量的选择与组成系统的负载关系密切。而各种负载又是千变万化的,这就使容量的选择更为复杂和重要,因而成为电力拖动这门课的重要内容。

考虑到目前各种特殊电源对电力拖动系统中电动机供电的情况日益增多,如可控晶闸管整流装置对直流电动机供电,以及变频电源对三相异步电动机供电等,在这些情况下,电动机的选择应有一些特殊考虑。为此,本书加入了这些新内容。

最后要特别指出的是,随着计算机仿真技术的发展,特别是像 MATLAB 这样一些仿真软件的不不断推出,为电力拖动系统的动态分析和稳态分析提供了新颖的技术工具。为此,本书在

第3章介绍了电力拖动系统的 MATLAB 仿真分析的内容。

电力拖动是一门综合性很强的课程,它将用到电工原理、电动机学、机械原理与机械零件、电子技术、电力电子学及物理学等多门课程的知识。在学习本课程之前,应对以上课程有较好的掌握和理解。同时,在学习中必须注意理论联系实际,既要注意理论分析,又要掌握工程实际计算方法。

# 第 1 章

## 电力拖动系统动力学

本章介绍电力拖动系统的组成、电力拖动系统的运动方程、多轴电力拖动系统的分析方法、多轴电力拖动系统等效为单轴系统的折算原则、不同运动形式的工作机构转矩及系统飞轮矩的折算方法、传动机构的效率问题、生产机械的负载转矩特性和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系统,也适用于交流电力拖动系统,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。

## 1.1 电力拖动系统的运动方程

### 1.1.1 电力拖动系统的组成

凡是由电动机作为动力,拖动各类生产机械完成一定的生产工艺要求的系统,都称为电力拖动系统。电力拖动系统一般由电动机、传动机构、生产机械、电源和控制设备 5 部分组成。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执行某一任务的机械部分。控制设备由各种电气元件和装置组成,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。传动机构能够把电动机的旋转运动经过中间变速或变换运动方式后,再驱动生产机械的工作机构。电源用来向控制设备和电动机供电。

### 1.1.2 电力拖动系统的运动方程

实际电力拖动系统的种类很多,在此不可能逐一进行研究,因此要找到它们共同的运动规律加以综合分析。电力拖动系统的运动规律可以用动力学中的运动方程来描述。下面首先对简单的单轴电力拖动系统进行分析。所谓单轴电力拖动系统,就是电动机转子轴直接拖动生产机械运转的系统,如图 1-1 所示。

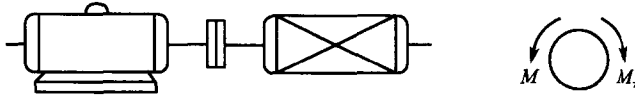


图 1-1 单轴电力拖动系统

作用在电动机轴上的转矩有电动机的电磁转矩  $M$  和负载转矩  $M_z$ 。一般来说,电动机是推动运动的,负载是反抗运动的。根据刚体转动定律,有

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

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

工程上,常常不用转动惯量  $J$  而用飞轮惯量或飞轮矩  $GD^2$  来表示系统的惯性,不用角速度而用转速  $n(\text{r/min})$  表示系统的速度。 $GD^2$  与  $J$  之间的关系为

$$J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{4g}$$

式中, $m$  与  $G$  分别为旋转部分的质量 ( $\text{kg}$ ) 和重量 ( $\text{N}$ );  $\rho$  与  $D$  分别为旋转部分的惯性半径与直径 ( $\text{m}$ );  $g = 9.81\text{m/s}^2$  为重力加速度。

角速度  $\Omega$  与转速  $n$  的关系为

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

将上面两式代入式(1-1)中,化简后即得实用的电力拖动系统的运动方程为

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

式中, 375 是一个具有加速度量纲的系数, 其单位为  $\text{m}/(\text{min} \cdot \text{s})$ ; 转矩单位为  $\text{N} \cdot \text{m}$ ; 转速单位为  $\text{r}/\text{min}$ ;  $M - M_z$  称为动态转矩。

当动态转矩为零时, 系统处于恒转速运行的稳态; 动态转矩大于零时, 系统处于加速运动的过渡状态; 动态转矩小于零时, 系统处于减速运动的过渡状态。

必须注意,  $M$  与  $M_z$  都是有方向性的变量。对其正方向做如下规定: 以转轴转速  $n$  的方向为参考方向, 电磁转矩  $M$  的正方向与  $n$  相同, 负载转矩  $M_z$  的正方向与  $n$  相反。在应用电力拖动系统的运动方程时, 如果转矩的实际方向与规定的正方向相同, 就用正数, 否则就用负数。

## 1.2 多轴电力拖动系统

### 1.2.1 多轴电力拖动系统分析方法

实际的电力拖动系统常常是多轴系统, 如图 1-2(a) 所示, 工作机构的转速  $n_z$  与电动机转速  $n$  不同, 在电动机与工作机构之间通过传动机构相连, 如齿轮减速箱、皮带轮变速装置等。对于多轴电力拖动系统, 如果用单轴系统运动方程来研究其运行状态, 则需对每根轴分别写出运动方程, 再写出各轴间相互关系的方程, 消去中间变量, 联立求解。这显然非常烦琐。就电力拖动系统而言, 一般不研究每根轴上的问题, 而主要是把电动机作为研究对象。为此, 下面引入折算的概念, 采用折算的办法将一个实际的多轴系统等效为一个单轴系统, 即把传动机构和工作机械等效为电动机轴上的一个负载, 如图 1-2(b) 所示。

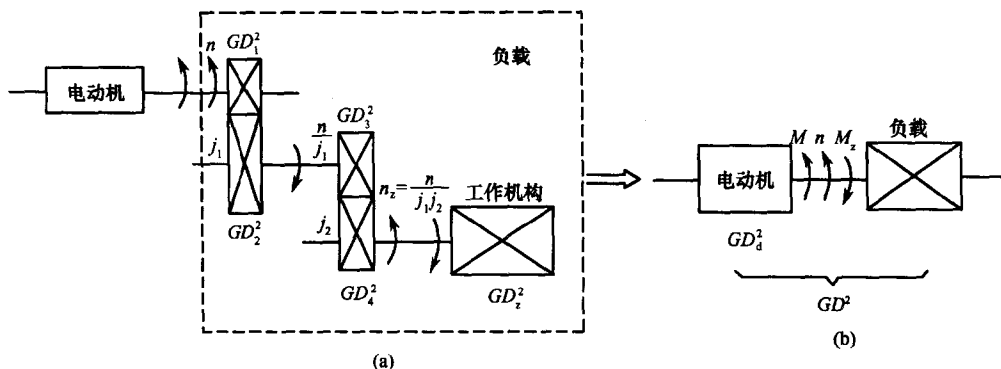


图 1-2 多轴电力拖动系统

折算的原则是, 折算前后系统传递的功率及系统所存储的动能不变。在分析计算该系统时, 从已知的实际负载转矩  $M_z$  求出折算到电动机轴上的等效负载转矩  $M_z$ , 称为负载转矩的折算; 从已知的各转轴上的飞轮矩: 电动机的飞轮矩  $GD_d^2$ 、中间传动机构的飞轮矩  $GD_1^2, GD_2^2 \dots$  和工作机构的飞轮矩  $GD_z^2$ , 求出系统总的飞轮矩  $GD^2$ , 称为飞轮矩的折算。

### 1.2.2 工作机构的转矩和飞轮矩的折算

转矩和飞轮矩的折算随工作机构运动形式的不同而不同。

### 1. 旋转运动

在实际生产中,很多生产机械工作机构的运动都属于旋转运动。下面以图 1-2 所示的多轴电力拖动系统为例来说明旋转运动转矩和飞轮矩的折算。

#### (1) 转矩的折算

工作机构的负载转矩为  $M'_z$ , 转速为  $n_z$ , 对应的角速度为  $\Omega_z$ , 工作机构的功率为

$$P'_z = M'_z \Omega_z$$

折算到电动机轴上的转矩为  $M_z$ , 转速为  $n$ , 角速度为  $\Omega$ , 折算后的功率为

$$P_z = M_z \Omega$$

根据折算前后功率不变的原则, 应有

$$M'_z \Omega_z = M_z \Omega$$

所以

$$M_z = M'_z \frac{\Omega_z}{\Omega} = M'_z \frac{n_z}{n} = \frac{M'_z}{j} \quad (1-3)$$

式中,  $j = \Omega/\Omega_z = n/n_z$ , 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  $M'_z$  比较大, 而折算到电动机的高速轴上时, 等效转矩  $M_z$  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  $\eta$  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, 即

$$M_z \Omega \eta = M'_z \Omega_z$$

所以

$$M_z = \frac{M'_z \Omega_z}{\Omega \eta} = \frac{M'_z}{j \eta} \quad (1-4)$$

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  $\eta$  是传动机构的总效率, 同样为各级传动效率之积, 即  $\eta = \eta_1 \eta_2 \dots$ 。

#### (2) 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

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

在类似图 1-2(a) 所示的多轴系统中, 将各级传动轴作为电动机负载的一部分, 在等效为图 1-2(b) 所示的单轴系统时, 必须将各级传动轴的飞轮矩  $GD_1^2, GD_2^2, GD_3^2$  和负载的飞轮矩  $GD_z^2$  折算到电动机轴上, 用一个等效的飞轮矩  $GD^2$  来表示实际的多轴电力拖动系统各个传动轴的飞轮矩对实际电动机轴的影响。各级飞轮矩的大小反映出运动中的各传动机构所存储动能的大小。因此, 对如图 1-2 所示的多轴电力拖动系统而言, 飞轮矩折算的关系应为

$$GD^2 = GD_1^2 + GD_z^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{j_1^2} + \frac{GD_4^2 + GD_z^2}{j_1^2 j_2^2} \quad (1-5)$$

式中,  $GD_1^2$  为电动机本身的飞轮矩;  $GD_1^2 \sim GD_4^2$  为各个齿轮的飞轮矩;  $GD_z^2$  为负载的飞轮矩。由式



(1-5) 可知, 各级飞轮矩在折算到电动机轴上时, 应除以电动机与该级之间转速比的平方。

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  $GD_1^2$  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, 往往可以采用下式来估算系统的总飞轮矩

$$GD^2 = (1 + \delta)GD_1^2$$

式中,  $GD_1^2$  是电动机转子本身的飞轮矩, 其值可从产品目录中查得;  $\delta$  为小于 1 的数, 一般取  $\delta = 0.2 \sim 0.3$ 。如果电动机轴上还有其他大飞轮矩的部件, 如制动器闸轮等, 则  $\delta$  值需加大。

## 2. 平移运动

有些生产机械的工作机构做平面运动, 例如龙门刨床的工作台。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 1-3 为刨床电力拖动示意图, 经多级齿轮减速后, 通过齿轮与齿条的啮合, 电动机的旋转运动变成直线运动。

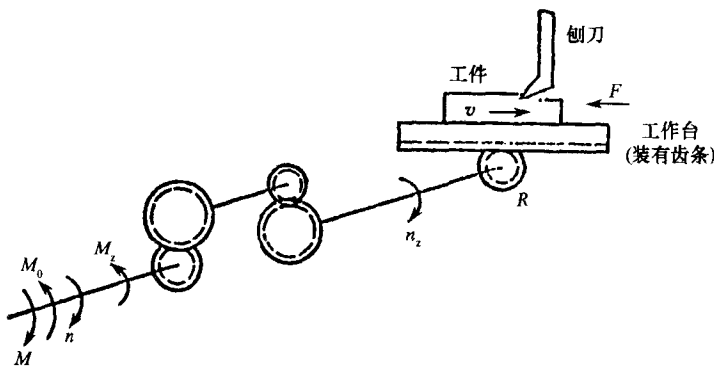


图 1-3 刨床电力拖动示意图

### (1) 转矩的折算

在图 1-3 中,  $F$  为工作机构做平移运动时受到的阻力, 即切削力;  $v$  为工作机构的平移速度。则工作机构的功率(即切削功率)为

$$P = Fv$$

切削力反映到电动机轴上表现为负载转矩  $M_z$ ,  $M_z$  应满足折算前后功率不变的原则。若不计传动机构损耗, 则有

$$Fv = M_z \Omega$$

将  $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$  代入上式, 则

$$Fv = M_z \cdot \frac{2\pi n}{60}$$

所以

$$M_z = \frac{Fv}{\frac{2\pi n}{60}} = 9.55 \frac{Fv}{n}$$

若考虑传动机构损耗由电动机负担, 则有