



高等院校自动化新编系列教材

自动控制系统

ZIDONGKONGZHI XITONG

任彦硕 赵一丁 张家生 编著

罗云林 主审



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

自 动 控 制 系 统

编著 任彦硕 赵一丁 张家生
主审 罗云林

北 京 邮 电 大 学 出 版 社
·北 京·

内 容 简 介

本书是高等学校“自动控制系统”课程的教科书。全书共分13章,全面介绍了传动控制系统和过程控制系统的内容,主要包括:晶闸管—直流电动机调速系统、PWM脉宽调制直流调速控制系统、交流变频调速控制系统、随动控制系统、单回路和多回路过程控制系统、计算机过程控制系统和过程控制系统的应用。全书理论结合工程实际,叙述精练,通俗易懂。

本书可作为高等院校自动化专业、测控专业、电气工程专业、机电一体化专业及相关专业的本科生教材,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制系统/任彦硕,赵一丁,张家生编著. —北京:北京邮电大学出版社,2005
ISBN 7-5635-1126-1

I. 自... II. ①任...②赵...③张... III. 自动控制系统
IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 157113 号

出 版 者: 北京邮电大学出版社(北京市海淀区西土城路 10 号) 邮编:100876
发行部电话:(010)62282185 62283578(传真)

电子信箱: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京通州皇家印刷厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 19

字 数: 448 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-1126-1/TP·210

定价: 27.00 元

如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系

高等院校自动化新编系列教材

编委会

主 任 汪晋宽

副主任 金海明 罗云林 张美金 崔光照 王宏文

委 员 (按姓氏笔划排名)

于丁文 王凤文 王建国 马淑华 石云霞

齐世清 任彦硕 张家生 张 健 杨建忠

柳明丽 罗长杰 金 伟 赵洪才 赵一丁

顾德英 舒冬梅 臧小杰 郑安平

秘 书 顾德英(兼) 马淑华(兼)

编写说明

一本好的教材和一本好的书不同,一本好的书在于其内容的吸引力和情节的魅力,而一本好的教材不仅要对所介绍的科学知识表达清楚、准确,更重要的是在写作手法上能站在读者的立场上,帮助读者理解教材,形成知识链条,进而学会举一反三。基于这种考虑,在充分理解自动化专业培养目标和人才需求的前提下,我们规划了这套《高等院校自动化新编系列教材》。

本套系列教材共包括 21 册,在内容取舍划分上,认真分析了各门课程内容的相互关系和衔接,避免了不必要的重复,增加了一些新的内容。在知识结构设计上,在保证专业知识完整性的同时,考虑了学生综合能力的培养,并为学生继续学习留有空间。在课程体系规划上,注意了前后知识的贯通,尽可能做到先开的课程为后续的课程提供基础和帮助,后续的课程为先开的课程提供应用的案例,以便于学生对自动化专业的理解。

《高等院校自动化新编系列教材》编委会

2005 年 8 月

前 言

现代工业及国民经济其他各行业的自动化水平日益提高,自动化系统已网络化。针对被控对象的自动控制系统,包括传动控制系统和过程控制系统,均可能是自动化网络中的一个点。有的控制系统中,既有传动控制又有过程控制。例如,过程控制目标的实现有时需要由调速系统来完成,这里的调速控制是过程控制实现的一个手段。然而在传统的课程设置中,传动控制和过程控制被分设在两个不同的专业中。例如,自动化专业的学生只学习传动控制而不学习过程控制,测控专业的学生只学习过程控制而不学习传动控制,在解决实际问题时就会因专业面狭窄而无法满足要求。事实上,传动控制和过程控制均是基于“自动控制理论”下的控制系统,只是控制对象不相同。将相同控制理论下的传动控制系统和过程控制系统合编为一本教材,使控制类专业的学生既学习传动控制又学习过程控制,能够适应自动化快速发展的实际需要。

本教材按传动控制系统和过程控制系统的内容系统编写。全书共 13 章,其中 1~7 章为传动控制;8~13 章为过程控制。传动控制又分为直流调速、交流调速和随动控制。各章的内容安排为:第 1 章电力传动基础;第 2 章电力传动系统常用的元器件;第 3 章晶闸管—电动机直流传动控制系统,介绍单闭环、双闭环直流调速控制系统的分析和设计;第 4 章直流脉宽调速控制系统,介绍可逆 PWM 脉宽调速控制系统的分析和设计;第 5 章交流调速系统概述;第 6 章异步电动机变压变频调速系统,介绍恒压频比控制变频调速系统、转差频率控制变频调速系统、矢量控制变频调速系统、直接转矩控制变频调速系统,并介绍基于 DSP 实现的矢量控制和基于单片机实现的直接转矩控制系统;第 7 章随动控制系统,介绍位置随动系统的构成、工作原理及稳态分析和动态校正;第 8 章过程控制系统的组成与特点;第 9 章生产过程的动态特性,介绍单容、多容过程的动态特性及过程模型辨识;第 10 章单回路过程控制系统,介绍系统的构成及工程设计方法;第 11 章多回路过程控制系统,介绍串级、前馈、比值、选择性控制系统及多变量解耦控制系统的分析和设计方法;第 12 章计算机过程控制系统,介绍分布

式计算机控制系统、可编程控制器在过程控制中的应用以及现场总线控制系统;第13章过程控制系统应用,介绍制冷与加热温度控制系统、火力发电厂单元机组锅炉水位控制系统以及泵和压缩机的自动控制。各章结尾均附有习题。

本教材内容结构按系统构成及工作原理分步安排,分析与论述均在“系统”的框架下展开,涉及到系统构成的各部分均有论述,使学生能够清楚地掌握自动控制系统的理论分析和理论设计。

本教材力求将先进的控制技术编入,例如,直流部分建立控制系统的分析与设计方法,交流部分侧重介绍先进的变频调速理论和技术,包括DSP实现的矢量控制和单片机实现的直接转矩控制;过程控制除了介绍常规的单回路和多回路过程控制技术外,还介绍了分布式、现场总线式计算机网络控制技术,并在最后一章介绍了过程控制系统的应用。

全书理论详实,密切联系工程实际,分析透彻、叙述精练、通俗易懂,适于教学和自学。本书第1~4、7章由任彦硕编写,第5、8章由张家生编写,第6章由高原编写,第9~11章由赵一丁编写,第12、13章由范立娜编写。全书由任彦硕统稿。

本书由中国民航大学罗云林教授主审。罗云林教授对书稿提出了许多宝贵意见和建议,在此谨表示衷心的感谢!

本教材参考学时为88学时,其中理论授课76学时,实验12学时。传动控制部分参考学时为50学时,其中实验6学时;过程控制部分参考学时为38学时,其中实验6学时。

编 者

于东北大学秦皇岛分校

目 录

第1章 电力传动基础

1.1 电力传动系统动力学	1
1.1.1 电力传动系统的运动方程	1
1.1.2 转矩和飞轮矩的折算	2
1.1.3 电力传动系统的负载特性	6
1.2 直流电动机的额定数据	7
1.3 直流电动机的机械特性	8
1.3.1 直流他励电动机的机械特性	8
1.3.2 串励电动机的机械特性	10
1.3.3 复励电动机的机械特性	11
习 题	11

第2章 电力传动系统常用的元器件

2.1 常用控制电动机	13
2.1.1 直流伺服电动机	13
2.1.2 永磁式直流力矩电动机	13
2.1.3 直线异步电动机	14
2.2 常用测控元件	15
2.2.1 控制式自整角机	15
2.2.2 直流测速发电机	17
2.2.3 光电编码器	17
2.2.4 电流检测元件	19
习 题	22

第3章 晶闸管—电动机直流调速控制系统

3.1 V-M 直流调速控制系统的构成	23
3.1.1 晶闸管整流	23
3.1.2 电动机容量的选择	29
3.1.3 直流电动机额定电压与整流变压器二次绕组电压	31
3.1.4 抑制脉动电流	31
3.2 V-M 单闭环直流调速控制系统	32
3.2.1 单闭环系统的稳态分析和设计	32

3.2.2 单闭环系统的电流截止负反馈·····	37
3.2.3 单闭环系统的动态分析和设计·····	39
3.3 V-M 双闭环直流调速控制系统 ·····	44
3.3.1 V-M 双闭环系统的工作原理 ·····	44
3.3.2 双闭环系统的稳态设计·····	46
3.3.3 按工程设计方法校正双闭环控制系统·····	47
习 题 ·····	52
第 4 章 直流脉宽调速控制系统	
4.1 直流脉宽调速控制系统的构成 ·····	54
4.1.1 PWM 脉冲宽度变换器 ·····	54
4.1.2 PWM 变换器的控制电路 ·····	60
4.2 直流脉宽调速控制系统的特殊问题·····	65
习 题 ·····	66
第 5 章 交流调速系统概述	
5.1 交流调速的技术难点和突破·····	67
5.1.1 变频调速的技术难点·····	67
5.1.2 变频调速的技术突破·····	68
5.2 交流调速的方法·····	68
5.2.1 异步电动机调速的方法·····	68
5.2.2 同步电动机调速的方法·····	75
5.3 交流调速的主要应用领域·····	75
习 题 ·····	76
第 6 章 异步电动机变压变频调速系统	
6.1 变频调速的基本控制方式·····	77
6.2 变频调速中的 PWM 控制技术·····	78
6.2.1 电压 SPWM 控制 ·····	78
6.2.2 电流 SPWM 控制 ·····	83
6.2.3 电压空间矢量 PWM 控制·····	84
6.3 恒压频比控制变频调速系统·····	92
6.3.1 电压频率协调控制时的机械特性·····	92
6.3.2 恒压频比控制变频调速系统·····	97
6.4 转差频率控制变频调速系统 ·····	105
6.5 异步电动机的数学模型 ·····	108
6.5.1 三相异步电动机在三相静止坐标系上的数学模型 ·····	109
6.5.2 坐标变换 ·····	113

6.5.3 三相异步电动机在两相坐标系上的数学模型	117
6.6 矢量控制变频调速系统	124
6.6.1 矢量控制的基本思想	124
6.6.2 矢量控制的基本方程式	126
6.6.3 矢量控制变频调速系统	126
6.6.4 转子磁链观测模型	127
6.6.5 基于 DSP 实现的矢量控制调速系统	130
6.7 直接转矩控制变频调速系统	134
6.7.1 电压空间矢量对电磁转矩的影响	135
6.7.2 直接转矩控制的基本结构	136
6.7.3 圆形磁链轨迹直接转矩控制变频调速系统	138
6.7.4 定子磁链观测模型	140
6.7.5 基于单片机实现的直接转矩控制系统	143
习 题	147
第 7 章 随动控制系统	
7.1 位置随动系统的构成及工作原理	148
7.2 自整角机位置随动系统的数学模型	151
7.3 位置随动系统的稳态分析	152
7.4 位置随动控制系统的动态校正	153
习 题	156
第 8 章 过程控制系统的组成与特点	
8.1 过程控制的特点	157
8.2 过程控制系统的组成	158
8.3 过程控制系统的性能指标	160
习 题	162
第 9 章 生产过程的动态特性	
9.1 单容过程的动态特性	163
9.1.1 无纯延迟单容过程	163
9.1.2 容量、阻力与纯延迟	165
9.2 多容过程的动态特性	168
9.3 过程数学模型的辨识	171
9.3.1 由阶跃响应确定传递函数	171
9.3.2 由脉冲响应计算阶跃响应	175
9.3.3 相关统计法获得脉冲响应	177
习 题	178

第 10 章 单回路过程控制系统

10.1 被控量与控制量的选择	181
10.1.1 被控量的选择	181
10.1.2 控制量的选择	182
10.2 检测变送器	188
10.3 调节阀	189
10.3.1 气动调节阀的结构	189
10.3.2 调节阀的流量系数	192
10.3.3 调节阀的流量特性	196
10.4 PID 调节器	201
10.4.1 比例控制作用对控制品质的影响	201
10.4.2 积分控制作用对控制品质的影响	203
10.4.3 微分控制作用对控制品质的影响	204
10.4.4 调节器的选型	205
10.4.5 调节器正、反作用的选择	206
10.4.6 积分饱和与防止	206
10.5 调节器的参数整定	208
10.5.1 调节器参数整定的基本要求	208
10.5.2 参数整定的理论方法——衰减频率特性法	209
10.5.3 参数整定的工程整定法	213
习 题	217

第 11 章 多回路过程控制系统

11.1 串级控制系统	219
11.1.1 串级控制系统的组成	219
11.1.2 串级控制系统的特性分析	221
11.1.3 串级控制系统的设计	225
11.1.4 调节器的选型和整定方法	228
11.2 前馈控制系统	229
11.2.1 前馈控制的原理	229
11.2.2 静态前馈控制器	231
11.2.3 动态前馈控制器	233
11.2.4 前馈-反馈控制	234
11.3 比值控制系统	236
11.3.1 比值系统的基本概念	236
11.3.2 比值系数的计算	237
11.3.3 比值系统的参数整定	238

11.3.4 常见比值控制系统·····	239
11.4 选择性控制系统·····	240
11.4.1 选择性控制系统的基本概念·····	240
11.4.2 选择性控制系统的类型·····	241
11.5 多变量解耦控制系统·····	243
11.5.1 多变量过程及其耦合·····	243
11.5.2 相对增益·····	243
11.5.3 耦合系统的变量匹配·····	247
11.5.4 解耦控制系统的设计·····	249
习 题·····	253

第 12 章 计算机过程控制系统

12.1 分布式计算机控制系统·····	256
12.1.1 DCS 的组成及特点 ·····	257
12.1.2 DCS 的分层体系结构 ·····	259
12.1.3 DCS 的系统组态 ·····	259
12.1.4 DCS 的数据通信网络 ·····	260
12.1.5 DCS 的数据通信 ·····	262
12.2 可编程控制器在过程控制中的应用·····	263
12.2.1 PLC 的特点 ·····	263
12.2.2 PLC 在过程控制中的应用实例 ·····	264
12.3 现场总线控制系统·····	269
12.3.1 现场总线的概念·····	269
12.3.2 现场总线的通信模型·····	270
12.3.3 几种典型现场总线协议标准·····	272
12.3.4 现场总线控制系统的结构与特点·····	277
习 题·····	278

第 13 章 过程控制系统应用

13.1 制冷与加热温度控制系统·····	279
13.1.1 制冷与加热原理·····	279
13.1.2 温度控制系统组成·····	280
13.1.3 温度控制方案·····	280
13.2 火力发电厂单元机组锅炉水位控制系统·····	281
13.2.1 单元机组的生产过程·····	281
13.2.2 锅炉汽包水位的控制要求·····	282
13.2.3 锅炉汽包的动态特性·····	283
13.2.4 给水串级三冲量控制系统·····	284

13.3 泵和压缩机的自动控制.....	285
13.3.1 泵的控制.....	285
13.3.2 压缩机的控制.....	287
习 题.....	289
参考文献.....	290

第1章 电力传动基础

1.1 电力传动系统动力学

1.1.1 电力传动系统的运动方程

电动机拖动的单轴传动系统如图 1-1 所示。图中电动机 M 在电枢电压 U (交流电动机为定子电压) 的作用下产生电磁转矩 T_m , 经传动轴拖动负载以角速度 ω 旋转。旋转过程中的运动学方程满足牛顿第二运动定律, 即

$$T_m - T_C = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-1)$$

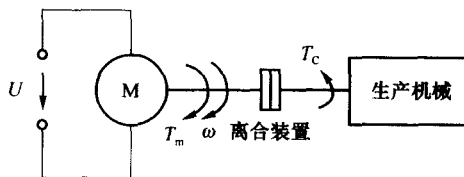


图 1-1 单轴传动系统

式中, T_m 为电动机的电磁转矩, 单位为 $N \cdot m$; T_C 为单轴传动系统的负载转矩, 单位为 $N \cdot m$; J 为单轴传动系统的转动惯量, 单位为 $kg \cdot m^2$; ω 为电动机轴的旋转角速度, 单位为 rad/s ; $\frac{d\omega}{dt}$ 为电动机轴的旋转角加速度, 单位为 rad/s^2 ; $J \frac{d\omega}{dt}$ 为单轴传动系统的惯性转矩 (动态转矩), 单位为 $N \cdot m$ 。

将转动惯量 J 转换成工程上常用的飞轮惯量 GD^2 , 单位为 $N \cdot m^2$, 则有如下关系式

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

式中, m 为旋转部分的质量, 单位为 kg ; ρ 为旋转部分的惯性半径, 单位为 m ; D 为旋转部分的惯性直径, 单位为 m ; g 为重力加速度, $g = 9.8 m/s^2$; G 为旋转部分的重量, 单位为 N , 满足 $G = mg$ 。

将角速度用转速 n 表示为

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} = \frac{\pi n}{30}$$

则动态转矩可表示为

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi}{30} J \frac{dn}{dt} = \frac{\pi}{30} \frac{GD^2}{4g} \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

式中, 常数 375 具有 $m/(min \cdot s)$ 的量纲。将上式代入式 (1-1) 得到传动系统的运动方程

$$T_m - T_C = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 知, $T_m - T_C = 0$ 时, 速度的变化率为 0, 系统处于稳定运行状态, 称为“稳态”; $T_m - T_C \neq 0$ 时, 速度的变化率不为 0, 系统处于变速运行状态, 称为“动态 (或暂态)”;

$T_m - T_C > 0$ 时,系统加速运行; $T_m - T_C < 0$ 时,系统减速运行。

1.1.2 转矩和飞轮矩的折算

传动系统中负载装置的运动方式是不同的,有旋转运动、平移运动、升降运动等,负载装置的运行速度也不同。将电动机的额定转速与负载装置要求的额定运行速度匹配起来,需要用到变速装置。常用的变速装置有齿轮变速箱、蜗轮蜗杆变速机构、皮带传动变速等。其中,蜗轮蜗杆将电动机的旋转运动变换成平移的直线运动。多数的变速机构是减速机构,减速机构将高速旋转的电动机与低速运行的负载装置衔接起来。由于速度的差别,电动机轴上的输出转矩传递到负载装置上时发生了改变,飞轮矩也不同。在列写式(1-3)的运动方程时需将转矩和飞轮矩折算到同一轴上,一般是折算到电动机轴上。

1. 旋转运动

图 1-2 为三轴二级减速传动系统示意图。图中, ω 是电动机轴输出的角速度; ω/i_1 是二级变速装置中间轴的角速度; $\omega/i_1 i_2$ 是负载轴的角速度。第一级变速比 i_1 为齿轮 2 (从动齿轮) 与齿轮 1 (主动齿轮) 的齿数(齿轮直径)比,第二级变速比 i_2 为齿轮 4 与齿轮 3 的齿数比。传动机构总的变速比 $i = i_1 i_2$ 。对减速机构而言,变速比 $i > 1$ 。

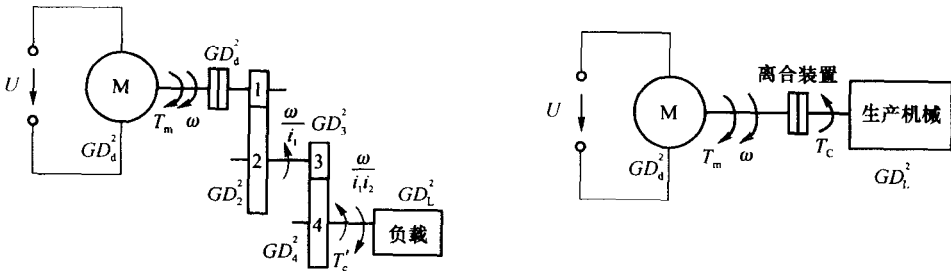


图 1-2 多轴旋转传动系统等效成单轴传动系统

(1) 转矩折算

由于各级变速两齿轮啮合处的线速度相等,且作用力沿切线方向大小相等方向相反,说明两齿轮轴上传输的功率相等。对整个变速装置而言,在不考虑传输机构的功率损失时,电动机轴上输出的功率应等于负载轴上获得的功率,即

$$T_m \omega = T_C \frac{\omega}{i}$$

得到

$$T_m = \frac{T_C}{i}$$

说明负载轴上得到的转矩是电动机轴上输出转矩的 i 倍。将传输效率定义为

$$\eta = \frac{\text{负载获得的功率}}{\text{电动机输出的功率}}$$

则计算传输效率时的转矩折算关系满足

$$T_m = \frac{T_C}{\eta i} \quad (1-4)$$

(2) 飞轮矩折算

飞轮矩的折算应满足折算前后的动能不变。设图 1-2 所示二级变速系统总转动惯量为 J (含负载的转动惯量), 总飞轮矩为 GD^2 , 电动机轴以 ω 角速度旋转时, 总的动能应为各转速下惯性元件和负载的动能之和

$$\frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} \frac{GD^2}{4g} \omega^2 = \frac{GD_d^2 + GD_1^2}{8g} \omega^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2 \omega^2}{8g i_1^2} + \frac{GD_4^2 + GD_L^2 \omega^2}{8g i_1^2 i_2^2}$$

在电动机轴上转速为 ω 时的参量关系满足

$$GD^2 \omega^2 = GD_d^2 \omega^2 + GD_1^2 \omega^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{i_1^2} \omega^2 + \frac{GD_4^2 + GD_L^2}{i_1^2 i_2^2} \omega^2$$

于是, 得到不同速度轴上惯性元件和负载的飞轮矩折算到电动机轴上的飞轮矩表达式为

$$GD^2 = GD_d^2 + GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{i_1^2} + \frac{GD_4^2 + GD_L^2}{(i_1 i_2)^2} = GD_d^2 + GD_c^2 \quad (1-5)$$

式中, GD_d^2 为电动机转子的飞轮矩; $GD_c^2 = GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{i_1^2} + \frac{GD_4^2 + GD_L^2}{(i_1 i_2)^2}$ 为传动机构和负载折算到电动机轴上的等效飞轮矩。式(1-5)表明, 被折算轴上的飞轮矩折算到折算轴上时应除以它们变速比的平方。由于转动惯量与飞轮矩成比例, 转动惯量的折算也满足相同的规则。

一般情况下, 在总的 GD^2 中, 电动机的 GD_d^2 所占比重较大, 传动机构和负载的飞轮矩折算值较小。实际设计系统时, 有时为了方便可将电动机的飞轮矩加大一个比例值作为总的飞轮矩的估值, 即

$$GD^2 = (1 + \delta) GD_d^2 \quad (1-6)$$

式中 δ 可取 0.2~0.3。

2. 平移运动

(1) 转矩折算

设平移运动的负载所需动力为 F , 单位为牛顿(N); 平移速度为 v_L (m/s), 则负载所需功率

$$P_L = F \cdot v_L$$

考虑传动效率 η 时, 该负载功率可由电动机轴上等效的负载转矩表示为

$$T_C \cdot \omega = \frac{F \cdot v_L}{\eta}$$

即

$$T_C = \frac{F \cdot v_L}{\eta \cdot \omega} = \frac{F \cdot v_L}{\eta \cdot \frac{2\pi n}{60}} = 9.55 \frac{F \cdot v_L}{\eta \cdot n} \quad (1-7)$$

式中, 负载的平移运动速度 v_L 和电动机轴的转速 n (r/min) 两个物理量的比值包含了变速比的信息。

(2) 飞轮矩折算

设平移运动负载的质量为 m_L , 重量为 G_L , 在以 v_L 的速度运动时动能为 $\frac{1}{2} m_L v_L^2$, 该

动能需由拖动电动机来提供。假设拖动电动机为一连接在电动机轴上飞轮矩为 GD_c^2 的旋转体提供等量的动能,则旋转体的动能应与平移负载的动能相等,即

$$\frac{1}{2} J_c \omega^2 = \frac{1}{2} \frac{GD_c^2}{4g} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 = \frac{1}{2} m_L v_L^2$$

得到

$$GD_c^2 = 365 \frac{G_L v_L^2}{n^2} \quad (1-8)$$

同样, v_L^2 和 n^2 的比值包含了变速比平方的信息。

例1.1 刨床传动系统如图1-3所示。电动机经4级齿轮减速后由齿轮齿条机构将旋转运动变换为水平方向的直线运动,工作

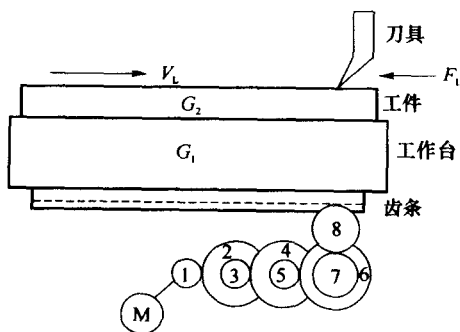


图 1-3 刨床传动系统

平台与齿条刚性连接,其上固定的工件与位置不动的刀具形成相对运动,将其表面刨平。电动机的额定转速为 $n = 960 \text{ r/min}$,电机转子的飞轮矩 $GD_d^2 = 60 \text{ N} \cdot \text{m}^2$,5 轴传动系统中各齿轮的齿数和飞轮矩如表 1-1 所示,其中齿轮 8 的齿距为 $l = 22 \text{ mm}$ 。设工作台的重量为 $G_1 = 12\,000 \text{ N}$,工件的重量为 $G_2 = 9\,000 \text{ N}$,工作台与床身(图中未画出)的摩擦系数为 $\mu = 0.06$,刀具的切削力为

$F_L = 10\,000 \text{ N}$,传输效率为 $\eta = 0.85$ 。试计算折算到电机轴上的负载转矩和总的飞轮矩。

表 1-1 各齿轮的齿数和飞轮矩

齿轮号	1	2	3	4	5	6	7	8
$GD^2(\text{N} \cdot \text{m}^2)$	20	55	30	60	30	70	30	66
齿数	4	20	10	25	20	30	25	60

解 (1) 负载转矩的折算

负载转矩的折算应满足式(1-7)。电动机拖动负载的力应包括刀具切削工件的力和平移运动中的摩擦力,即

$$F = F_L + (G_1 + G_2) \times \mu = 10\,000 + (12\,000 + 9\,000) \times 0.06 = 11\,260 \text{ N}$$

工作台的运动速度(工件的切削速度)等于齿轮 8 齿牙运动的线速度。电机的转速 n 经 4 级齿轮减速后变换为齿轮 8 的转速

$$\begin{aligned} n_8 &= \frac{n}{i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 \cdot i_4} = \frac{n}{(Z_2/Z_1)(Z_4/Z_3)(Z_6/Z_5)(Z_8/Z_7)} \\ &= \frac{960}{(20 \div 4) \times (25 \div 10) \times (30 \div 20) \times (60 \div 25)} \approx 20.3 \text{ r/min} \end{aligned}$$

其中,4 级减速比分别为 $i_1 = Z_2/Z_1$, $i_2 = Z_4/Z_3$, $i_3 = Z_6/Z_5$, $i_4 = Z_8/Z_7$ 。工作台的平移速度为