



普通高等工科教育 机电类规划教材

# 机电传动与运动控制

● 范国伟 主 编

● 桑建明 副主编

Jidian Chuandong Yu  
Yundong Kongzhi



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



免费电子课件

普通高等工科教育机电类规划教材

# 机电传动与运动控制

主 编 范国伟

副主编 桑建明

参 编 豆勤勤 史彦 盛娜 范翀 方华超



机械工业出版社

本书是针对工程应用型院校教学改革和就业的需要,对现有的课程进行有机整合编写而成的。主要内容有机电传动系统的动力学基础,直流电动机的工作原理及拖动,机电传动系统的过渡过程,交流电动机的工作原理及拖动,控制电机及其他用途电动机,机电传动系统中电动机的选择,低压电器及基本控制电路,可编程序控制器,电力电子技术,直流调速系统,交流调速系统。本书的编写采取实用的方式,内容以必需、够用为度,减少了原有课程教学中内容重复的部分。本书的特点是,讲述透彻,深入浅出,通俗易懂,便于教学。

本书可作为高等院校的数控应用技术、机械设计制造及其自动化、材料成型及控制工程、机电一体化等专业相关课程的教材,也可作为电工技师和职工岗位培训教材,或供有关工程技术人员参考使用。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师发邮件到 [jinaemp@163.com](mailto:jinaemp@163.com) 索取,或登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 注册下载。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

机电传动与运动控制/范国伟主编. —北京:机械工业出版社, 2013. 4  
普通高等工科教育机电类规划教材  
ISBN 978-7-111-40888-8

I. ①机… II. ①范… III. ①电力传动控制设备—运动控制—高等学校—教材 IV. ①TM921.5②TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 047684 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:吉玲 责任编辑:吉玲

版式设计:霍永明 责任校对:张媛

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17.5 印张 · 427 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-40888-8

定价: 36.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

# 前 言

机电传动系统（也称电力传动或电力拖动系统）是指由电动机作为动力，带动生产机械运行的系统，以实现电动机拖动生产机械的起动、制动和速度调节的生产过程自动化。进入 21 世纪以来，机电传动系统的设计和应用已经成为实现工业电气自动化的主要技术手段和方法。目前，我国最新的信息分类已将“电气传动”更名为“运动控制”，这是因为，随着计算机技术的发展，用计算机对特定生产工艺进行优化决策，需利用运动控制去将这种决策变为机械动作执行控制。

机电传动与运动控制技术是综合了计算机技术、自动控制技术和机电方面其他技术的一种工业应用的新技术，通过编制软件来改变控制过程，是微机技术与常规的继电器—接触器控制技术的有机结合。

对于机电专业，学科的方向是要研究各种类型的电机的优化运行，对生产过程进行最优控制，以达到高效生产的目的。为了使高等工科院校的学生能够尽快地学习和掌握机电传动与运动控制技术，培养他们就业和创业需要的技能，我们在多年积累的机电传动与运动控制的教学和实践应用经验的基础上，编写了这本教材。

“机电传动与运动控制”课程是一门实用性极强的机电专业课程，是不少高校相关专业增开的专业基础课。本课程的教学任务是，使学生在了解电机结构和运用、掌握继电器—接触器控制电路知识的基础上，初步具备机电传动系统的工程设计和应用调试能力。具体要求如下：

- 1) 了解常用交、直流电动机的结构、工作原理和具体用途；学习和掌握正确选择、熟练使用常用电动机的能力。
- 2) 熟练掌握常用继电器—接触器控制电路的各个基本环节，培养阅读和分析继电器—接触器控制电路原理图的能力，并且培养初步的设计能力。
- 3) 熟悉 PLC 的工作原理，熟悉和掌握 PLC 的基本编程指令，应用编程器编辑指令语句程序，熟练助记符编程方法，然后进一步掌握应用计算机进行梯形图编程及调试。
- 4) 学习典型的机电传动系统，培养对系统及基本设备模块的初步安装、编程、调试和维护的能力。

本书分为如下 11 个章节：机电传动系统的动力学基础，直流电动机的工作原理及拖动，机电传动系统的过渡过程，交流电动机的工作原理及拖动，控制电机及其他用途电动机，机电传动系统中电动机的选择，低压电器及基本控制电路，可编程序控制器，电力电子技术，直流调速系统，交流调速系统。

在本书编写过程中，从高等教育培养应用型技术人才这一目标出发，以“机电传动与运动控制”课程教学基本要求为依据，以应用为目的，以必需、够用为度，以突出实际应

用、培养技能为重点，尽量降低专业理论的重心，由浅入深、循序渐进地介绍了有关机电传动与运动控制以及应用方面的基础知识，着眼于学生在应用能力方面的培养，突出重点、分散难点，力求一看就懂、一学就会。本书每章前都配有学习目标，每章后也都安排了适量的习题。同时，书中还增加了技能训练的实例，突出了应用性、实践性、针对性和有效性。

本书可作为高等院校的数控应用技术、机械设计制造及其自动化、材料成型及控制工程、机电一体化等专业相关课程的教材，也可作为电工技师和职工岗位培训教材，或供有关工程技术人员参考使用。

本书由安徽工业大学范国伟任主编，桑建明任副主编，方华超工程师、安徽工业大学工商学院豆勤勤、史彦、盛娜，中冶华天马鞍山钢铁设计院范种技师参加了编写。安徽职业技术学院程周教授审阅了全书，做了很多重要的修改与补充。在本书编写的过程中，得到安徽工业大学电气信息学院和工商学院、安徽职业技术学院、安徽冶金科技职业学院的大力支持，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，加上时间仓促，书中疏漏之处在所难免，恳请使用本书的老师和同学批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

第 1 章 机电传动系统的动力学基础 .....	1
1.1 机电传动系统的运动方程 .....	1
1.2 多轴系统负载转矩和转动惯量的折算 .....	2
1.2.1 旋转运动负载转矩和转动惯量的折算 .....	3
1.2.2 平移运动负载转矩和转动惯量的折算 .....	5
1.2.3 升降运动负载转矩的折算 .....	6
1.3 生产机械的负载转矩特性 .....	8
1.3.1 恒转矩负载特性 .....	8
1.3.2 恒功率负载特性 .....	9
1.3.3 风机类负载特性 .....	9
1.4 机电传动系统稳定运行的条件 .....	9
本章小结 .....	12
习题 .....	12
第 2 章 直流电动机的工作原理及拖动 .....	15
2.1 直流电机的基本结构 .....	15
2.1.1 直流电机的构造 .....	15
2.1.2 直流电动机的分类 .....	18
2.1.3 直流电机的额定值 .....	19
2.2 直流电机的工作原理 .....	19
2.2.1 直流电动机的工作原理 .....	19
2.2.2 直流发电机的工作原理 .....	20
2.2.3 电机的可逆原理 .....	21
2.3 直流电动机的感应电动势和电磁转矩 .....	21
2.3.1 直流电动机的感应电动势 .....	21
2.3.2 直流电动机的电磁转矩 .....	22
2.4 直流电动机的运行 .....	22
2.4.1 他励直流电动机 .....	22
2.4.2 并励直流电动机 .....	25
2.4.3 串励直流电动机 .....	25
2.4.4 复励直流电动机 .....	26
2.5 直流发电机的运行 .....	27
2.5.1 他励直流发电机 .....	27
2.5.2 并励直流发电机 .....	28
2.6 他励直流电动机的机械特性 .....	30

2.6.1	他励直流电动机的机械特性方程	30
2.6.2	他励直流电动机的自然机械特性	31
2.6.3	他励直流电动机的人为机械特性	31
2.7	直流电动机的起动	32
2.7.1	直流电动机的直接起动	32
2.7.2	直流电动机的串电阻起动	32
2.7.3	直流电动机的降低电枢电压起动	33
2.8	直流电动机的制动	34
2.8.1	直流电动机的能耗制动	34
2.8.2	直流电动机的反接制动	35
2.8.3	直流电动机的回馈制动	35
2.9	直流电动机的转速调节	36
2.9.1	调速的指标	36
2.9.2	直流电动机的调速方法	38
	本章小结	40
	习题	40
<b>第3章</b>	<b>机电传动系统的过渡过程</b>	<b>42</b>
3.1	直流电动机拖动系统的过渡过程	43
3.1.1	直流电动机电枢电压突变的过渡过程	43
3.1.2	直流电动机起动的过渡过程	45
3.1.3	直流电动机电压反接制动的过渡过程	46
3.1.4	直流电动机能耗制动的过渡过程	47
3.2	加快机电传动系统过渡过程	48
3.2.1	机电时间常数	48
3.2.2	加快机电传动系统过渡过程的方法	48
	本章小结	49
	习题	50
<b>第4章</b>	<b>交流电动机的工作原理及拖动</b>	<b>52</b>
4.1	三相异步电动机的结构和工作原理	52
4.1.1	三相异步电动机的基本结构	52
4.1.2	三相异步电动机的铭牌数据	53
4.1.3	三相异步电动机的工作原理	54
4.1.4	三相异步电动机的转差率和表示的运行状态	56
4.2	三相异步电动机的机械特性	57
4.3	三相异步电动机的起动	58
4.3.1	笼型异步电动机的直接起动	59
4.3.2	笼型异步电动机的减压起动	59
4.3.3	绕线转子异步电动机的起动	60
4.4	三相异步电动机的制动	61
4.4.1	三相异步电动机的反接制动	61

4.4.2 三相异步电动机的能耗制动 .....	61
4.4.3 三相异步电动机的回馈制动 .....	62
4.5 三相异步电动机的转速调节 .....	62
4.5.1 三相异步电动机的变极调速 .....	62
4.5.2 三相异步电动机的变转差率调速 .....	63
4.5.3 三相异步电动机的变频调速 .....	65
本章小结 .....	68
习题 .....	69
<b>第5章 控制电机及其他用途电动机 .....</b>	<b>70</b>
5.1 测速发电机 .....	70
5.1.1 交流测速发电机 .....	70
5.1.2 直流测速发电机 .....	71
5.2 伺服电动机 .....	72
5.2.1 交流伺服电动机 .....	72
5.2.2 直流伺服电动机 .....	73
5.3 步进电动机 .....	73
5.4 自整角机 .....	75
5.4.1 力矩式自整角机 .....	75
5.4.2 控制式自整角机 .....	76
5.5 旋转变压器 .....	77
5.5.1 正余弦旋转变压器 .....	77
5.5.2 线性旋转变压器 .....	80
5.5.3 比例式旋转变压器 .....	80
5.5.4 数据传输用旋转变压器 .....	81
5.6 单相异步电动机 .....	81
5.7 无刷直流电动机 .....	83
5.8 直流力矩电动机 .....	85
5.9 直线电动机 .....	86
本章小结 .....	89
习题 .....	90
<b>第6章 机电传动系统中电动机的选择 .....</b>	<b>92</b>
6.1 电动机的发热与工作方式 .....	92
6.2 电动机容量选择的基本知识 .....	97
6.3 选择电动机容量的基本校验方法 .....	101
本章小结 .....	105
习题 .....	105
<b>第7章 低压电器及基本控制电路 .....</b>	<b>107</b>
7.1 电器的作用与分类 .....	107
7.2 电磁机构及触点系统 .....	108



7.2.1	电磁机构	108
7.2.2	触点系统	109
7.3	接触器	110
7.3.1	接触器的结构及工作原理	110
7.3.2	接触器的型号及主要技术数据	112
7.3.3	接触器的图形符号和文字符号	112
7.3.4	接触器的选择与使用	113
7.4	继电器	113
7.4.1	继电器的继电特性	114
7.4.2	电磁式继电器	114
7.4.3	时间继电器	117
7.4.4	热继电器	120
7.4.5	速度继电器	122
7.4.6	其他功能继电器	123
7.5	熔断器	124
7.5.1	熔断器的结构类型	124
7.5.2	熔断器的安秒特性	125
7.5.3	熔断器的技术数据	127
7.5.4	熔断器的选择	127
7.6	低压开关和低压断路器	127
7.6.1	低压开关	128
7.6.2	低压断路器	129
7.7	主令电器	131
7.7.1	按钮	131
7.7.2	万能转换开关	132
7.7.3	凸轮控制器与主令控制器	134
7.7.4	行程开关	135
7.8	基本控制电路	137
7.8.1	三相异步电动机的正反转控制电路	137
7.8.2	三相笼型异步电动机的起动控制电路	137
7.8.3	三相绕线转子异步电动机的起动控制电路	138
7.8.4	三相异步电动机的制动控制电路	140
7.8.5	电气控制系统的保护环节	143
7.9	常用机床电气控制电路	143
7.9.1	识读电气控制电路原理图的方法	143
7.9.2	Z3040型摇臂钻床的电气控制电路	147
本章小结		150
习题		151
<b>第8章</b>	<b>可编程序控制器</b>	<b>153</b>
8.1	PLC的发展	153
8.1.1	PLC的产生和定义	153
8.1.2	PLC的分类	154

8.2 PLC 的基本组成和工作原理 .....	155
8.2.1 PLC 的硬件结构 .....	155
8.2.2 PLC 的工作原理 .....	158
8.2.3 PLC 的软件系统 .....	159
8.3 三菱 PLC 的编程元件 .....	161
8.3.1 输入继电器 X 与输出继电器 Y .....	162
8.3.2 辅助继电器 M .....	162
8.3.3 状态继电器 S .....	163
8.3.4 定时器 T .....	164
8.3.5 计数器 C .....	164
8.3.6 数据寄存器 D .....	167
8.3.7 指针 P/I .....	168
8.4 三菱 PLC 的基本指令 .....	169
8.4.1 输入/输出指令和结束指令 LD/LDI/OUT/END .....	169
8.4.2 触点串联指令和触点并联指令 AND/ANI/OR/ORI .....	171
8.4.3 电路块并联指令和串联指令 ORB/ ANB .....	172
8.4.4 栈操作指令 MPS/MRD/MPP .....	173
8.4.5 主控指令和主控复位指令 MC/MCR .....	174
8.4.6 脉冲输出指令 PLS/PLF .....	175
8.4.7 置位与复位指令 SET/RST .....	175
8.4.8 脉冲沿应用指令 LDP/LDF/ANP/ANF/ORP/ORF .....	176
8.4.9 取反指令和空操作指令 INV/NOP .....	176
8.4.10 PLC 的编程方法与步骤 .....	178
8.5 步进顺序控制指令及编程 .....	182
8.5.1 步进顺序控制指令 .....	182
8.5.2 步进顺序控制指令使用说明 .....	182
8.6 PLC 控制编程实例 .....	184
8.6.1 送料小车工作的 PLC 控制 .....	184
8.6.2 剪板机动作的 PLC 控制 .....	184
8.6.3 液体混合装置的 PLC 控制 .....	186
本章小结 .....	186
习题 .....	187
<b>第 9 章 电力电子技术</b> .....	<b>190</b>
9.1 电力半导体器件 .....	190
9.1.1 晶闸管 .....	191
9.1.2 其他电力半导体器件 .....	195
9.2 电力半导体器件的驱动电路 .....	199
9.2.1 半控型电力半导体器件的驱动电路 .....	200
9.2.2 全控型电力半导体器件的驱动电路 .....	201
9.3 晶闸管调压电路 .....	202
9.3.1 直流斩波电路 .....	202
9.3.2 交流调压电路 .....	204

9.4 逆变电路	206
9.4.1 有源逆变电路	206
9.4.2 无源逆变电路	207
9.5 脉宽调制控制	209
9.5.1 SPWM 控制的基本原理	209
9.5.2 三相桥式 SPWM 逆变电路	210
9.5.3 SPWM 逆变电路的控制方式	210
本章小结	211
习题	213
<b>第 10 章 直流调速系统</b>	<b>214</b>
10.1 直流调速系统的性能指标	214
10.2 有静差调速系统	216
10.2.1 闭环调速系统的组成及其静特性	216
10.2.2 闭环控制系统的优势	217
10.2.3 闭环调速系统的特征	218
10.2.4 比例调节器突加负载的动态过程	219
10.2.5 电流截止负反馈	219
10.3 无静差调速系统	220
10.3.1 积分调节器	220
10.3.2 比例积分调节器	221
10.3.3 无静差直流调速系统	224
10.4 转速电流双闭环直流调速系统	225
10.4.1 双闭环直流调速系统的组成	225
10.4.2 双闭环直流调速系统的静特性和稳态参数计算	225
10.4.3 双闭环直流调速系统的动态分析	227
10.5 脉宽调制直流调速系统	229
10.5.1 脉宽调制变换器	229
10.5.2 脉宽调制直流调速系统的控制电路	230
10.5.3 脉宽调制直流调速系统的特殊问题	231
10.6 数字控制直流调速系统	232
10.6.1 数字控制双闭环直流调速系统的硬件结构	233
10.6.2 数字比例积分调节器	236
10.6.3 产品化的数字直流调速装置简介	237
本章小结	237
习题	238
<b>第 11 章 交流调速系统</b>	<b>239</b>
11.1 异步电动机闭环变压调速系统	240
11.1.1 闭环变压调速系统的组成	240
11.1.2 闭环变压调速系统的静特性	241
11.2 异步电动机变压变频调速的原理	242

---

11.2.1 变压变频调速的基本控制方式 .....	243
11.2.2 电力电子变压变频器的主要类型 .....	244
11.2.3 电压源型和电流源型逆变器 .....	247
11.2.4 180°导通型和120°导通型逆变器 .....	248
11.3 异步电动机变压变频调速系统 .....	249
11.3.1 转速开环-恒压频比控制的变频调速系统 .....	249
11.3.2 转速闭环-转差频率控制的变频调速系统 .....	251
11.3.3 基于动态模型的变压变频调速系统 .....	254
本章小结 .....	264
习题 .....	264
参考文献 .....	265

# 第1章 机电传动系统的动力学基础

## 【本章学习目标】

- 1) 了解机电传动系统的动力学方程的意义。
- 2) 了解机电传动系统的单轴和多轴系统的特点。
- 3) 熟悉机电传动系统的负载机械特性。
- 4) 了解机电传动系统的稳定条件和判断方法。

## 【教学目标】

1) 知识目标：了解机电传动系统的动力学原理，了解机电传动系统的负载特点，了解机电传动系统的稳定原理。

2) 能力目标：通过对机电传动系统的组合演示，初步形成对机电传动系统的感性认识，培养学生的学习兴趣。

## 【教学重点】

机电传动系统的等效折算原理。

## 【教学难点】

机电传动系统的稳定问题。

## 【教学方法】

参观机电传动系统，简单演示机电传动系统的组成装置。

机电传动系统是由电动机拖动，并通过传动机构带动生产机械运行的一个动力学整体。虽然电动机有不同的种类和特性，生产机械的负载性质也各种各样，但从动力学的角度分析，它们都服从动力学的统一规律。本章主要介绍机电传动系统的运动方程和机电传动系统处于稳定运行及过渡过程的条件，介绍生产机械的转矩及系统惯量(飞轮力矩)的折算方法，以及各种生产机械的机械特性。

## 1.1 机电传动系统的运动方程

在生产实际中，最简单的机电传动系统就是电动机直接与生产机械的工作机构(负载)相连接的单轴拖动系统，如图 1-1 所示。在这种系统中，负载的转速与电动机的转速相同。在图 1-1 中，作用在电动机轴上的转矩有电动机的电磁转矩  $T_M$ 、负载转矩  $T_L$  和电动机空载转矩  $T_0$ 。

规定电磁转矩的正方向与转速正方向相同，负载转矩的正方向与转速方向相反，由牛顿第二定律可得，图 1-1 所示系统的运动方程为

$$T_M - T_0 - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-1)$$

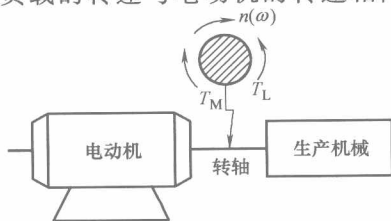


图 1-1 单轴拖动系统

式中  $T_M$ ——电动机的电磁转矩( $N \cdot m$ )；  
 $T_L$ ——电动机的总负载转矩( $N \cdot m$ )；  
 $T_0$ ——电动机的空载转矩( $N \cdot m$ )；  
 $J$ ——机电传动系统轴上的转动惯量( $kg \cdot m^2$ )；  
 $\omega$ ——电动机旋转角速度( $rad/s$ )。

忽略电动机空载转矩  $T_0$ ，式(1-1)可简化为

$$T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-2)$$

实际工程中，经常用转速  $n$  代替角速度  $\Omega$ ，用飞轮力矩  $GD^2$  来表示转动惯量  $J$ ，即

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{n}{9.55} \quad (1-3)$$

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

式中  $n$ ——电动机的转速( $r/min$ )；  
 $\rho$ ——回转半径；  
 $D$ ——回转直径；  
 $GD^2$ ——飞轮力矩( $N \cdot m^2$ )；  
 $g$ ——重力加速度， $g = 9.81 m/s^2$ 。

则式(1-2)可分别表达为

$$T_M - T_L = \frac{J}{9.55} \frac{dn}{dt} \quad (1-5)$$

$$T_M - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-6)$$

应当注意：

1) 系数 375 是个有量纲的系数，单位为  $m/(min \cdot s)$ 。

2)  $GD^2$  是代表物体旋转惯量的一个整体物理量，在实际应用中，不论计算还是书写， $GD^2$  都应写在一起。

3) 国家标准规定采用国际单位制(SI)，只使用转动惯量  $J$ 。对于工程上沿用的  $GD^2$ ，可用式(1-4)核算为  $J$ 。

电动机和负载的  $GD^2$  通常可从产品样本和有关设计资料中查找。

式(1-5)或式(1-6)中， $T_M - T_L$  称为动态转矩或加速转矩。当  $T_M - T_L > 0$  时，系统处于加速运行的过渡过程；当  $T_M - T_L = 0$  时，系统处于恒速运动状态；当  $T_M - T_L < 0$  时，系统处于减速运行的过渡过程。电动机的运行状态不同，以及负载类型不同，作用在转轴上的电磁转矩  $T_M$  和负载转矩  $T_L$  不仅大小会变化，方向也会变化。当  $T_M$  的方向与旋转方向一致时取正，反之取负；当  $T_L$  的方向与旋转方向一致时取负，反之取正。

## 1.2 多轴系统负载转矩和转动惯量的折算

实际的机电传动系统，仅采用单轴拖动方式是不能满足生产要求的。生产机械设备的转速往往要求很低，而生产电动机的厂商为了减小体积降低成本，一般制造的电动机转速都很

高,在工作机构和电动机之间必须装设减速机构,如齿轮减速器,蜗杆减速器等。还有的工作机构需要做直线运动,必须将电动机的旋转运动变为工作机构的直线运动。因此,大多数的场合电动机并不直接和工作机构相连,而是通过一套传动机构,将电动机的运动形式转变成符合生产所需的运动形式,这种拖动系统称为多轴机电传动系统。图1-2a所示就是一个三轴的机电传动系统。

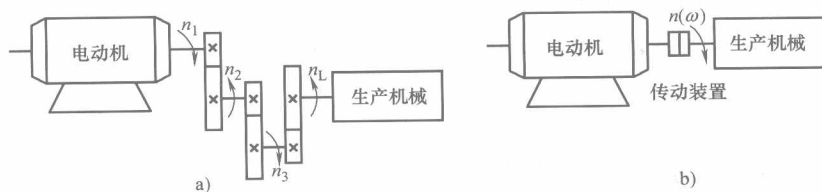


图1-2 多轴机电传动系统的简化

多轴机电传动系统的分析比单轴拖动系统复杂。但就电机拖动而言,一般不需要研究每根轴上的情况,而是把传动机构和负载等效成为电动机轴上的单一负载,从而把实际的多轴系统折算成为一个等效的单轴系统,如图1-2b所示。其运动方程为

$$T - T'_L = J \frac{dn}{dt}$$

式中  $T'_L$ ——折算到电动机轴上的等效负载转矩;

$J$ ——折算到电动机轴上总的转动惯量。

可见,要将实际的多轴系统等效成单轴系统,就必须进行负载转矩和转动惯量的折算。原则是保持机电传动系统在折算前后的功率和储存的动能不变,下面作具体讨论。

### 1.2.1 旋转运动负载转矩和转动惯量的折算

#### 1. 转矩的折算

图1-2所示机电传动系统中,若不考虑传动机构的损耗,根据折算前后功率不变的原则,有

$$T'_L \omega = T \omega_L \quad (1-7)$$

式中  $\omega_L$ ——负载的角速度;

$\omega$ ——电动机转子的角速度;

$T_L$ ——实际负载转矩;

$T'_L$ ——负载转矩折算到电动机轴上的折算值。

若考虑到传动机构的损耗,则

$$\begin{aligned} T'_L \omega \eta &= T \omega_L \\ T'_L &= \frac{\omega_L}{\omega} \frac{T_L}{\eta} = \frac{T_L}{j \eta} \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中  $j$ ——传动机构的总速比,等于各相邻传动轴速比的乘积,即  $j = j_1 j_2 j_3 = \frac{\omega}{\omega_L}$ ,其中, $j_1$

$= \frac{\omega}{\omega_L}$ ,  $j_2 = \frac{\omega_1}{\omega_2}$ ,  $j_3 = \frac{\omega_2}{\omega_L}$ ,分别为第一、二、三级速比,若有多根中间轴,则可写

成  $j = j_1 j_2 j_3 j_4 \cdots$ ;

$\eta$ ——传动机构的总效率，等于各级传动机构效率的乘积，即  $\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3$ ，若有很多根中间轴，则  $\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \cdots$ 。

## 2. 转动惯量的折算

根据折算前后系统储存动能不变的原则，对图 1-2 有

$$\frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} J_m \omega_m^2 + \frac{1}{2} J_1 \omega_1^2 + \frac{1}{2} J_L \omega_L^2$$

式中  $J_m$ 、 $J_1$ 、 $J_L$ ——电动机、传动机构、负载的转动惯量。

又因

$$\omega = \omega_m$$

于是折算到电动机轴上的等效转动惯量为

$$J = J_m + \frac{J_1}{j_1^2} + \frac{J_L}{(j_1 j_2 j_3)^2} = J_m + \frac{J_1}{j_1^2} + \frac{J_L}{j^2} \quad (1-9)$$

如果传动系统有多根中间轴，则可将式(1-9)写成

$$J = J_m + J_1 \frac{1}{j_1^2} + J_2 \frac{1}{(j_1 j_2)^2} + \cdots + J_L \frac{1}{j^2} \quad (1-10)$$

式(1-10)表明，各机构的转动惯量除以速比的二次方后，就是折算到电动机轴上的转动惯量。可见，将低速轴上的转动惯量折算到高速轴后，其值减少较多。通常，折算后电动机的转动惯量  $J_m$  占总转动惯量  $J$  的比重最大，负载转动惯量次之，传动机构的转动惯量所占比重最小。因此，在工程计算中，常有以下近似公式：

$$J = (1.1 \sim 1.2) J_m \quad (1-11)$$

如果在传动轴上还有其他大惯量部件，则需专门考虑。

特别指出，转矩的折算遵循折算前后功率相等的原则，与传动效率有关；转动惯量的折算是根据不同轴上储存的动能相等的原则，与传动效率无关。

**例 1-1** 图 1-2a 所示的机电传动系统中，已知飞轮力矩  $GD_m^2 = 14.7 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ， $GD_1^2 = 18.8 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ， $GD_2^2 = 19.7 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ， $GD_L^2 = 120 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ，传动机构效率  $\eta_1 = 0.91$ ， $\eta_2 = 0.93$ ， $\eta_3 = 0.94$ ，负载转矩  $T_L = 85 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，转速  $n = 2450 \text{ r/min}$ ，转速  $n_1 = 1225 \text{ r/min}$ ，转速  $n_2 = 810 \text{ r/min}$ ，转速  $n_L = 150 \text{ r/min}$ ，忽略电动机的空载转矩，求：

- (1) 折算到电动机轴上的系统总惯量  $J$ ；
- (2) 折算到电动机轴上的负载转矩  $T'_L$ 。

**解：**系统总转动惯量

$$\begin{aligned} J &= J_m + J_1 \frac{1}{j_1^2} + J_2 \frac{1}{(j_1 j_2)^2} + J_L \frac{1}{j^2} = \frac{GD_m^2}{4g} + \frac{GD_1^2}{4g} \left( \frac{n_1}{n} \right)^2 + \frac{GD_2^2}{4g} \left( \frac{n_2}{n} \right)^2 + \frac{GD_L^2}{4g} \left( \frac{n_L}{n} \right)^2 \\ &= \left[ \frac{14.7}{4 \times 9.81} + \frac{18.8}{4 \times 9.81} \left( \frac{1225}{2450} \right)^2 + \frac{19.7}{4 \times 9.81} \left( \frac{810}{2450} \right)^2 + \frac{120}{4 \times 9.81} \left( \frac{150}{2450} \right)^2 \right] \text{ N} \cdot \text{m} \\ &= 0.56 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

负载转矩

$$T'_L = T_L \frac{1}{j} \frac{1}{\eta} = 85 \times \frac{150}{2450} \times \frac{1}{0.91 \times 0.93 \times 0.94} \text{ N} \cdot \text{m} = 6.54 \text{ N} \cdot \text{m}$$



### 1.2.2 平移运动负载转矩和转动惯量的折算

#### 1. 平移运动负载转矩的折算

某些生产机械除了有旋转运动部件外，还有做直线运动的工作机构，例如刨床的工作平台传动机构，如图 1-3 所示。直线运动机构的工作力  $F$  与工作机构运动速度  $v$  的乘积为负载功率，即

$$P_L = Fv$$

设传动机构效率为  $\eta$ ，根据折算前后电机拖动功率不变的原则，得出折算到电动机轴上的功率为

$$T_L' \omega \eta = Fv \quad (1-12)$$

进而将负载所需的工作力  $F$  折算成电动机轴上的负载转矩

$$T_L' = \frac{Fv}{\eta \omega} = 9.55 \frac{Fv}{\eta n} \quad (1-13)$$

式中  $F$ ——直线运动机构的工作力或摩擦阻力(N)；

$v$ ——直线运动机构的速度(m/s)；

$n$ ——电动机转速(r/min)。

#### 2. 平移运动负载转动惯量的折算

根据折算前后动能不变的原则，平移运动部件质量为  $m$ ， $m = m_1 + m_2$ ，折算成电动机轴上的转动惯量应满足

$$\frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} m v^2$$

则

$$J = \left( \frac{v}{\omega} \right)^2 m = 9.12 \left( \frac{v}{n} \right)^2 m \quad (1-14)$$

传动机构中其他轴对  $J$  的折算，与旋转运动机构部分所述一致。

**例 1-2** 某刨床的工作平台传动机构如图 1-3 所示。已知切削力  $F = 10000\text{N}$ ，工作平台与工作运动速度  $v = 0.7\text{m/s}$ ，传动机构总效率  $\eta = 0.81$ ，电动机转速  $n = 1450\text{r/min}$ ，电动机的转动惯量  $J_m = 2.55\text{N} \cdot \text{m}^2$ ，求：

(1) 切削时折算到电动机轴上的负载转矩；

(2) 估算系统的总转动惯量；

(3) 不切削时，工作平台及工件反向加速，电动机以  $500\text{r/min}$  的高速度运行，计算此时系统的动态转矩绝对值。

**解：**(1) 折算到电动机轴上的负载转矩

$$T_L' = 9.55 \frac{Fv}{\eta n} = 9.55 \times \frac{10^4 \times 0.7}{1450 \times 0.81} \text{N} \cdot \text{m} = 56.92 \text{N} \cdot \text{m}$$

(2) 估算系统的总转动惯量

$$J \approx 1.2 J_m = 1.2 \times 2.55 \text{N} \cdot \text{m}^2 = 3.06 \text{N} \cdot \text{m}^2$$

(3) 不切削时，工作平台及工件反向加速，系统动态转矩绝对值的计算

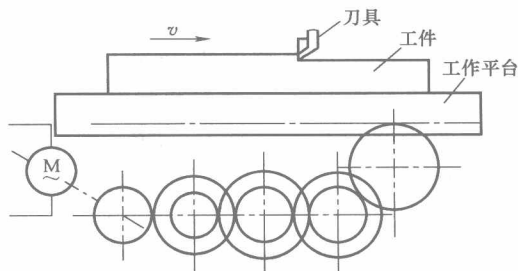


图 1-3 刨床的工作平台传动机构