

目 录

第6篇 电力电子与电气传动技术

第1章 新一代电力电子器件及其

应用.....6-3

1.1 功率晶体管(GTR)及其模块.....6-4

1.1.1 GTR的工作原理.....6-4

1.1.2 GTR的基本特性与主要参数.....6-4

1.1.3 GTR驱动电路.....6-9

1.1.4 GTR的并联连接技术.....6-16

1.1.5 GTR的保护技术.....6-16

1.2 功率场效应晶体管(MOSFET).....6-20

1.2.1 概述.....6-20

1.2.2 MOSFET的结构与特点.....6-20

1.2.3 MOSFET的定额与特性.....6-21

1.2.4 驱动电路.....6-23

1.2.5 MOSFET的保护.....6-30

1.2.6 MOSFET的并联.....6-32

1.3 绝缘门极晶体管(IGBT).....6-34

1.3.1 IGBT的基本结构与工作原理.....6-34

1.3.2 IGBT的特性.....6-34

1.3.3 IGBT的门极驱动电路.....6-37

1.3.4 IGBT的保护技术.....6-39

1.3.5 IGBT的并联技术.....6-43

1.4 智能化功率集成电路.....6-44

1.4.1 智能化功率集成电路的特点.....6-44

1.4.2 单片功率集成电路的隔离技术.....6-45

1.4.3 智能的含义.....6-45

1.4.4 智能化功率集成电路的分类.....6-46

1.4.5 典型智能功率集成电路介绍.....6-46

第2章 晶闸管整流电路和逆变电路.....6-53

2.1 可控整流电路.....6-53

2.1.1 基本假设.....6-53

2.1.2 各种整流电路联结型式和选择.....6-53

2.1.3 单相可控整流电路.....6-53

2.1.4 三相可控整流电路.....6-58

2.1.5 重叠角及换相电压降.....6-66

2.1.6 可控整流电路的参数计算.....6-71

2.2 有源逆变电路.....6-79

2.2.1 有源逆变的概念.....6-79

2.2.2 三相零式逆变电路.....6-79

2.2.3 三相桥式逆变电路.....6-81

2.2.4 逆变状态的重叠角及电压降.....6-82

2.2.5 逆变电路的外特性.....6-83

2.2.6 逆变颠覆与最小 β 角的限制.....6-83

2.2.7 逆变状态电动机的机械特性.....6-84

2.3 变流装置的运行指标.....6-85

2.3.1 效率、变流因数及损耗.....6-85

2.3.2 直流电压调整率.....6-86

2.3.3 变流装置工作时的谐波、谐波

危害及其对策.....6-88

2.3.4 功率因数及其提高方法.....6-94

第3章 变频技术.....6-99

3.1 变频器的分类、换流和控制方式.....6-99

3.1.1 变频器的分类.....6-99

3.1.2 变频器的几种换流方法.....6-100

3.1.3 变频器的控制方式.....6-100

3.2 交-交变频器.....6-101

3.2.1 交-交变频器的基本结构.....6-101

3.2.2 交-交变频器的工作原理.....6-103

3.2.3 交-交变频器触发脉冲的控制

方法.....6-103

3.3 交-直-交变频器.....6-106

3.3.1 负载谐振式逆变器.....6-106

3.3.2 电压型变频器.....6-110

3.3.3 电流型变频器.....6-114

3.4 脉宽调制(PWM)型变频器.....6-117

3.4.1 PWM的调制方法与PWM控

制器方式.....6-117

3.4.2 SPWM.....6-117

3.4.3 准SPWM.....6-118

3.4.4 用大规模集成电路HEF4752V

产生SPWM波及其在调速系统

- 中的应用.....6-118
- 3.4.5 功率MOSFET-SPWM逆变器...6-121
- 3.4.6 由单板微机产生和控制 SPWM
波.....6-121
- 3.4.7 其他PWM调制方法6-129
- 3.5 高频多谐振变流技术及其应用.....6-125
- 3.5.1 谐振开关的电路结构.....6-125
- 3.5.2 谐振开关技术的应用.....6-125
- 第4章 直流调速系统.....6-126
- 4.1 直流电动机的调速方法与性能指标...6-126
- 4.1.1 直流电动机的调速性能与方法...6-126
- 4.1.2 调速系统的性能指标.....6-127
- 4.1.3 直流调速系统的应用.....6-128
- 4.2 晶闸管直流调速系统.....6-128
- 4.2.1 晶闸管变流器-直流电动机
(U-M)开环调速系统的
机械特性.....6-128
- 4.2.2 闭环调速系统的静特性.....6-129
- 4.2.3 测速发电机.....6-131
- 4.2.4 有静差和无静差调速系统.....6-131
- 4.2.5 闭环调速系统的动态特性.....6-134
- 4.2.6 单闭环调速系统的电流控制
——电流截止负反馈.....6-137
- 4.2.7 电动势负反馈和电枢电压负
反馈调速系统.....6-141
- 4.2.8 有从属电流环的调速系统——
转速、电流双闭环调速系统.....6-144
- 4.2.9 调速系统动态参数工程设计
方法.....6-145
- 4.2.10. 多环调速系统6-150
- 4.2.11 直流电动机速度的双域调节
系统6-151
- 4.2.12. 可逆直流调速系统6-152
- 4.3 晶体管直流脉宽调速系统.....6-163
- 4.3.1 脉宽调制变换器.....6-163
- 4.3.2 脉宽调速系统的控制回路.....6-168
- 4.3.3 晶体管直流脉宽调速系统.....6-172
- 4.4 数字式直流调速系统.....6-173
- 4.4.1. 采用16位8098单片微处理机
的数字调速系统.....6-174
- 4.4.2. 转速信号的数字检测.....6-176
- 第5章 交流调速系统.....6-178
- 5.1 异步电动机调速系统.....6-178
- 5.1.1 异步电动机调速的方法、特点...6-178
- 5.1.2 串级调速系统.....6-178
- 5.1.3 变频调速系统.....6-187
- 5.1.4 在电动机调速节能中各种调速
方法的比较.....6-194
- 5.1.5 交流电动机的矢量变换控制.....6-199
- 5.2 无换向器电动机及其调速系统.....6-208
- 5.2.1 无换向器电动机的基本工作
原理.....6-209
- 5.2.2 无换向器电动机的特性及调速
方法.....6-214
- 5.2.3 无换向器电动机调速系统的
构成和设计特点.....6-217
- 5.3 开关磁阻电机调速系统.....6-219
- 5.3.1 基本结构和工作原理.....6-219
- 5.3.2 主要参数和基本特性.....6-220
- 5.3.3 设计和计算要点.....6-222
- 5.3.4 功率变换器.....6-225
- 5.3.5 传感器.....6-226
- 5.3.6 应用.....6-227
- 第6章 电气伺服系统.....6-229
- 6.1 伺服电动机的种类、特点及选用
原则.....6-230
- 6.2 直流伺服系统及其应用.....6-231
- 6.2.1 永磁直流电动机伺服系统.....6-231
- 6.2.2 其他几种直流伺服电动机伺服
系统.....6-231
- 6.2.3 直流伺服电动机的常用计算
公式.....6-231
- 6.2.4 国内外生产厂生产的直流电动
机伺服系统的型号、系列及性
能.....6-232
- 6.2.5 直流伺服系统的典型应用.....6-235
- 6.3 交流伺服系统及其应用.....6-237
- 6.3.1 交流伺服系统.....6-237
- 6.3.2 永磁交流伺服系统.....6-237
- 6.3.3 永磁交流伺服系统中的传感器...6-239
- 6.3.4 永磁交流伺服电动机的性能
特点.....6-239
- 6.3.5 异步型交流伺服系统.....6-240
- 6.3.6 国内外永磁交流伺服系统的
系列及性能.....6-240
- 6.3.7 交流伺服系统的典型应用.....6-243

- 6.4 专用集成电路组成的电气伺服系统···6-243
 - 6.4.1 小功率直流电动机的控制·····6-243
 - 6.4.2 采用L 292实现直流电动机的速度控制系统·····6-244
 - 6.4.3 采用L 290/L 291/L 292实现直流电动机的速度/位置控制系统·····6-245
 - 6.4.4 由LM628运动控制处理器构成的伺服系统·····6-251
 - 6.5 步进电动机的驱动和控制·····6-252
 - 6.5.1 步进电动机的分类及主要技术指标·····6-253
 - 6.5.2 步进电动机的结构及特点·····6-254
 - 6.5.3 步进电动机的绕组及励磁方式···6-258
 - 6.5.4 步进电动机的驱动电源·····6-265
 - 6.5.5 环形分配器·····6-269
 - 6.5.6 步进电动机的微机控制·····6-271
 - 6.5.7 步进电动机的闭环控制·····6-272
 - 6.5.8 步进电动机驱动系统在数控立式铣床中的应用·····6-272
 - 6.6 直接驱动伺服系统·····6-274
 - 6.6.1 直接驱动伺服系统的构成·····6-274
 - 6.6.2 直接驱动系统的特殊问题·····6-274
 - 6.6.3 直接驱动电动机及其功率放大器应具有的特性·····6-275
 - 6.6.4 直接驱动电动机的工作原理及特性比较·····6-276
 - 6.6.5 变磁阻型直接驱动电动机及其伺服系统·····6-276
 - 6.6.6 变磁阻混合型直接驱动电动机及其伺服系统·····6-277
 - 6.6.7 交流永磁无刷直接驱动电动机及其伺服系统·····6-279
 - 6.6.8 直接驱动系统中的位置传感器···6-280
 - 6.6.9 国外几种直接驱动系统产品简介·····6-281
 - 6.10 直接驱动系统在精密装配机器人中的应用·····6-285
- 参考文献·····6-286

第7篇 机电一体化中的传动与执行装置

第1章 机电一体化机械系统分析·····7-3

- 1.1 机械传动系统分析·····7-3
 - 1.1.1 机电一体化机械系统的定义·····7-3
 - 1.1.2 机电一体化对机械传动的要求·····7-3
 - 1.1.3 机械传动元件的选用·····7-3
 - 1.1.4 齿轮传动系统中总传动比的确定及其分配·····7-4
 - 1.1.5 机械传动系统方案的选择·····7-7
- 1.2 动力与执行元件的选用·····7-8
 - 1.2.1 电动机的选用·····7-8
 - 1.2.2 电动机调速方式概述·····7-11
 - 1.2.3 交流变频调速器·····7-13
 - 1.2.4 伺服执行元件·····7-17
- 1.3 控制系统的选用·····7-24
 - 1.3.1 单板和单片微机控制系统·····7-24
 - 1.3.2 普通PC机组成的控制系统·····7-24
 - 1.3.3 STD总线微机控制系统·····7-24
 - 1.3.4 工业PC机·····7-25
 - 1.3.5 可编程序控制器·····7-26
 - 1.3.6 几种控制装置的性能比较·····7-26

第2章 机电一体化传动与导向装置···7-27

- 2.1 机电一体化传动系统的特性·····7-27
 - 2.1.1 转动惯量·····7-27
 - 2.1.2 摩擦·····7-29
 - 2.1.3 阻尼·····7-30
 - 2.1.4 刚度·····7-30
 - 2.1.5 谐振频率·····7-30
 - 2.1.6 间隙·····7-30

2.2 传动装置·····7-33

- 2.2.1 滚珠丝杠·····7-33
- 2.2.2 滚珠花键·····7-41
- 2.2.3 谐波齿轮减速器·····7-41

2.3 导轨·····7-53

- 2.3.1 滚动直线导轨·····7-53
- 2.3.2 塑料导轨·····7-56

第3章 机电一体化系统的执行装置···7-68

- 3.1 机电一体化系统执行装置分析·····7-68
 - 3.1.1 执行装置的技术特点·····7-68
 - 3.1.2 对执行装置的技术要求·····7-68
 - 3.1.3 系统的品质·····7-70
 - 3.1.4 能量转换接口·····7-74
- 3.2 常用执行装置·····7-75

3·2·1 电动执行装置	7-75	第5章 计算机外部设备中的精密	
3·2·2 微动装置	7-91	传动与控制	7-181
3·2·3 误差补偿装置	7-95	5·1 概述	7-181
3·2·4 定位装置	7-97	5·1·1 计算机外部设备的机电一体化	7-181
3·2·5 CNC机床动力卡盘与回转刀架	7-98	5·1·2 计算机外部设备的传动与控制	
第4章 液压伺服、比例、数字控制		系统分析	7-183
元件	7-102	5·2 几种常用外部设备的传动、控制	
4·1 电液伺服阀	7-102	系统	7-185
4·1·1 概述	7-102	5·2·1 打印机	7-185
4·1·2 电液伺服阀的组成	7-102	5·2·2 发光二极管(LED)印字机	7-186
4·1·3 电液伺服阀的类型	7-102	5·2·3 绘图机	7-187
4·1·4 电液伺服阀的技术性能指标		5·2·4 磁带机	7-190
和有关技术术语	7-105	5·2·5 硬磁盘机	7-190
4·1·5 国内外主要电液伺服阀产品	7-110	5·2·6 软磁盘机	7-191
4·2 电液比例阀	7-147	5·2·7 光盘机	7-192
4·2·1 概述	7-147	5·3 定位系统	7-194
4·2·2 电液比例阀的组成	7-148	5·3·1 概述	7-194
4·2·3 电液比例阀的技术性能指标		5·3·2 直接转动驱动定位	7-198
和有关的技术术语	7-149	5·3·3 直线运动直接驱动定位	7-199
4·2·4 国内外主要电液比例阀性能		5·3·4 刚性传动定位机构	7-200
参数比较	7-151	5·3·5 挠性传动定位机构	7-202
4·2·5 国产电液比例阀简介	7-151	5·4 跟踪系统	7-206
4·3 电液数字阀	7-172	5·4·1 气浮式跟踪系统	7-207
4·3·1 概述	7-172	5·4·2 单一执行机构的跟踪系统	7-210
4·3·2 数字式电液控制阀	7-172	5·4·3 双模式寻道跟踪机构	7-213
4·3·3 增量式数字控制阀的性能指标	7-174	5·4·4 双模式跟踪伺服系统	7-215
4·4 电液步进元件	7-176	5·5 光盘伺服系统	7-218
4·4·1 概述	7-176	5·5·1 三维空间的光束跟踪	7-218
4·4·2 电液步进马达	7-176	5·5·2 激光束跟踪伺服	7-221
4·4·3 电液步进缸	7-178	参考文献	7-228

第8篇 工业机器人

第1章 工业机器人及其分类	8-3	1·5·2 工业机器人特性表示	8-11
1·1 工业机器人的发展现状	8-3	1·5·3 工业机器人通用技术条件	8-12
1·1·1 工业机器人	8-3	第2章 工业机器人的机械系统	8-13
1·1·2 工业机器人技术的进展	8-3	2·1 工业机器人的运动学及力学分析	8-13
1·2 工业机器人的构成	8-3	2·1·1 各类坐标系及坐标变换	8-13
1·2·1 机器人的构成	8-3	2·1·2 工业机器人运动学	8-16
1·2·2 操作机的构成	8-3	2·1·3 工业机器人力学分析	8-17
1·3 工业机器人的分类	8-5	2·2 工业机器人操作机的机械结构	8-18
1·4 工业机器人主要特性参数	8-5	2·2·1 手臂	8-18
1·5 工业机器人的标准	8-6	2·2·2 手腕	8-21
1·5·1 工业机器人性能规范	8-6	2·3 工业机器人末端执行器	8-21

2.3.1 机械夹持器	8-21	4.2.3 对离线编程系统的要求	8-63
2.3.2 特种末端执行器	8-25	4.2.4 离线编程的主要问题	8-68
2.3.3 灵巧手	8-30	4.2.5 一种商品化的图形编程系统	8-69
2.4 工业机器人的传动机构	8-30	4.3 工业机器人编程语言	8-70
2.4.1 齿轮传动	8-30	4.3.1 V+语言的由来和特点	8-70
2.4.2 螺旋传动	8-32	4.3.2 V+语言的数据处理功能	8-70
2.4.3 带及链传动	8-34	4.3.3 V+语言的运动控制功能	8-72
2.5 工业机器人的驱动系统	8-35	4.3.4 V+语言的应用实例	8-73
2.5.1 工业机器人驱动系统的分类	8-35	4.3.5 各国机器人语言概要	8-74
2.5.2 各种驱动方式的特点及比较	8-35	第5章 工业机器人的应用	8-76
第3章 工业机器人的控制系统	8-38	5.1 机器人在工业中的应用	8-76
3.1 工业机器人控制系统的构成	8-38	5.1.1 应用范围	8-76
3.1.1 机器人控制系统的特点	8-38	5.1.2 机器人作业系统	8-76
3.1.2 机器人控制系统的基本要求	8-38	5.1.3 外围设备	8-78
3.1.3 机器人控制系统的分类	8-38	5.2 工业机器人作业系统的配置	8-79
3.1.4 机器人控制系统的构成	8-39	5.2.1 使用机器人的目的	8-79
3.2 机器人控制系统的设计	8-40	5.2.2 引入机器人时必须考虑的问题	8-79
3.2.1 单关节的位置控制	8-40	5.2.3 引入机器人的方法	8-79
3.2.2 多关节的位置控制	8-43	5.3 工业机器人安全使用的基本措施	8-81
3.3 机器人的高性能控制系统	8-44	5.3.1 不安全因素	8-81
3.3.1 机器人的自适应控制	8-44	5.3.2 机器人安全工作的基本要求	8-82
3.3.2 机器人的力控制	8-46	5.3.3 用户安全措施	8-82
3.3.3 机器人的视觉	8-47	5.3.4 安装的安全要求	8-83
3.4 工业机器人的传感器	8-51	5.3.5 试运转安全措施	8-83
3.4.1 概述	8-51	5.3.6 操作说明书	8-83
3.4.2 机器人内部传感器	8-52	5.3.7 机器人及机器人系统设计的安全 要求与措施	8-83
3.4.3 机器人外部传感器	8-55	5.4 工业机器人产品介绍	8-85
第4章 工业机器人的示教、编程 及语言	8-64	第6章 工业机器人的发展	8-94
4.1 工业机器人的示教再现技术	8-64	6.1 当代工业机器人的发展趋势	8-94
4.1.1 概述	8-64	6.2 工业机器人应用领域的扩展	8-94
4.1.2 示教盒示教	8-64	6.3 向智能化方向发展的机器人技术	8-101
4.1.3 手把手示教	8-67	6.3.1 工业机器人机械系统性能 的提高	8-101
4.2 工业机器人的离线编程技术	8-67	6.3.2 机器人智能控制系统的发展	8-103
4.2.1 离线编程及其应用	8-67	参考文献	8-107
4.2.2 机器人编程的等级	8-68		

第9篇 CAD/CAM与FMS

第1章 CAD/CAM硬件系统	9-3
1.1 CAD/CAM硬件系统的结构	9-3
1.1.1 硬件系统的类型	9-3
1.1.2 硬件系统的构成	9-5
1.2 硬件系统的选型原则	9-10
附录1 工作站性能比较表	9-11

附录2 用于CAD系统微机性能比 较表	9-75
------------------------------	------

第2章 支持软件系统	9-86
2.1 操作系统	9-86
2.1.1 操作系统的功能	9-86
2.1.2 选择操作系统应考虑的因素	9-86

2.1.3 常用操作系统简介	9-87	3.4.2 交互型	9-150
2.2 数据库管理系统(DBMS)	9-88	3.4.3 自动型	9-150
2.2.1 CAD/CAM数据管理的特点 和要求	9-88	3.4.4 智能型	9-151
2.2.2 数据库管理系统类型介绍及 比较	9-89	3.5 应用软件开发技术	9-151
2.2.3 系统选择的原则	9-90	3.5.1 开发步骤	9-151
2.3 图形软件系统	9-90	3.5.2 开发技术与方法	9-152
2.3.1 图形模型	9-90	3.5.3 人-机界面处理	9-156
2.3.2 图形标准	9-95	3.5.4 软件测试与维护	9-158
2.3.3 图形软件简介	9-97	3.6 CAD与CAM的结合	9-160
2.4 网络通信	9-98	3.6.1 CAD与CAM之间的信息联系	9-160
2.4.1 基本方法和技术	9-98	3.6.2 CAD与CAM结合的必要性	9-160
2.4.2 网络操作系统(NOS)	9-99	3.6.3 CAD与CAM的一体化技术	9-160
2.4.3 网络的主要性能指标	9-100	3.7 工业设计	9-161
2.4.4 网络与CAD/CAM	9-101	附录 典型的结构有限元分析程序	9-163
2.4.5 几种网络介绍	9-101	第4章 CAPP技术	9-169
2.5 产品数据定义模型	9-103	4.1 成组技术	9-169
2.5.1 CIM环境下对产品数据定义模 型的要求	9-103	4.1.1 概述	9-169
2.5.2 初始图形交换规范(IGES)	9-104	4.1.2 零件分类编码系统	9-169
2.5.3 数据交换与传输标准(SET)	9-104	4.1.3 零件分类编码实例	9-169
2.5.4 产品数据定义接口(PDDI)	9-108	4.2 工艺过程设计的优化	9-176
2.5.5 产品数据交换规范(PDES)	9-109	4.2.1 概述	9-176
2.5.6 标准(STEP)	9-110	4.2.2 单工序工艺设计的优化	9-177
附录1 大型CAD系统分类表	9-110	4.2.3 多工序切削加工系统的优化	9-180
附录2 大型CAD系统软件概况	9-112	4.2.4 工艺方案最佳化	9-182
第3章 CAD技术	9-126	4.3 CAPP的功能、类型与基本原理	9-183
3.1 有限元分析	9-126	4.3.1 CAPP的基本概念、结构组成 及功能	9-184
3.1.1 功能和技术方法	9-126	4.3.2 CAPP的类型及基本工作原理	9-185
3.1.2 常用商品化软件包简介	9-129	4.4 广义CAPP系统	9-188
3.1.3 集成分析系统	9-131	4.4.1 概述	9-188
3.2 优化设计	9-132	4.4.2 广义CAPP的组成及其功能 简介	9-190
3.2.1 优化设计的数学模型	9-132	附录1 JLBM-1分类系统	9-194
3.2.2 常用优化方法	9-134	附录2 国外CAPP一览表	9-201
3.2.3 优化应用例——弹簧的优化 设计	9-136	第5章 自动编程	9-207
3.3 CAGD技术	9-138	5.1 原理与实现	9-207
3.3.1 曲线、曲面生成方法	9-138	5.1.1 概述	9-207
3.3.2 基本图形生成算法	9-146	5.1.2 前置处理	9-208
3.3.3 特征造型	9-147	5.1.3 后置处理	9-208
3.4 应用软件的类型	9-149	5.2 语言编程	9-209
3.4.1 检索型	9-150	5.2.1 自动编程语言介绍	9-209
		5.2.2 数控程序的构成和工作过程	9-217
		5.2.3 应用实例	9-218

5.3 图象编制程序.....	9-219	6.5.1 基本概念.....	9-241
5.3.1 原理及方法.....	9-219	6.5.2 专家系统开发工具类型.....	9-242
5.3.2 应用特点.....	9-220	6.5.3 MPPEST-2 专家系统开发	
5.3.3 应用实例.....	9-220	工具.....	9-242
5.4 实物编程.....	9-221	附录 国外专家系统开发工具软件表	9-244
5.4.1 原理与方法.....	9-221	第 7 章 FMS.....	9-245
5.4.2 应用特点.....	9-221	7.1 FMS的结构与功能.....	9-245
5.4.3 应用实例.....	9-222	7.1.1 FMS技术概况	9-245
5.5 自动编程的发展方向.....	9-222	7.1.2 物流与信息流.....	9-249
5.5.1 概述.....	9-222	7.1.3 刀具流与刀具管理.....	9-251
5.5.2 自动编程的发展.....	9-225	7.1.4 FMS的导入.....	9-252
第 6 章 CAD/CAM专家系统.....	9-229	7.2 FMS的规划和仿真.....	9-255
6.1 概述.....	9-229	7.2.1 FMS规划原则与方法	9-255
6.2 CAD/CAM专家系统的特点.....	9-229	7.2.2 FMC的选择	9-255
6.3 人工智能语言.....	9-230	7.2.3 FMS仿真	9-257
6.4 CAD/CAM专家系统.....	9-232	7.3 FMS监控	9-258
6.4.1 CAD/CAM专家系统的基本		7.3.1 工件的识别.....	9-258
结构.....	9-232	7.3.2 刀具的监控.....	9-259
6.4.2 专家系统的开发方法及研制		7.4 FMS评价	9-262
步骤.....	9-232	7.4.1 FMS评价矩阵	9-262
6.4.3 CAD/CAM专家系统结构模式		7.4.2 FMS评价标准	9-262
的改进.....	9-233	7.5 FMS与CAD/CAM的集成	9-262
6.4.4 知识的采集和提取.....	9-233	7.5.1 FMS与CAD/CAM的关系	9-262
6.4.5 知识表示方法.....	9-233	7.5.2 CIMS	9-262
6.4.6 推理机制.....	9-237	7.6 应用举例.....	9-264
6.4.7 系统的开发设计技巧.....	9-240	7.6.1 SCAMP FMS	9-264
6.4.8 CAD/CAM专家系统的评价.....	9-240	7.6.2 Vought航空产品FMS	9-265
6.4.9 CAD/CAM专家系统的发展		7.6.3 FANUC FMS	9-265
动向.....	9-241	参考文献	9-265
6.5 专家系统开发工具.....	9-241	英中名词对照.....	1

第7篇 机电一体化中的传动与执行装置

主 编 赵松年

副 主 编 杨 俊

主 审 张建民

编写人员

第一章 赵松年 郭本龙

第二章 赵松年 陈孝富 邓建国

第三章 赵培炎

第四章 黄恭斌

第五章 牛林富 杨 俊

第1章 机电一体化机械系统分析

1.1 机械传动系统分析

1.1.1 机电一体化机械系统的定义

传统机械一般认为由动力件、传动件、执行件三部分加上电气和机械控制部分组成。1984年美国机械工程师协会(ASME)提出,现代机械的定义为:“由计算机信息网络协调与控制的、用于完成包括机械力、运动和能量流等动力学任务的机械和(或)机电部件相互联系的系统”。由此可见,现代机械应是一个机电一体化的机械系统,其核心应是由计算机控制的、包括机、电、液、光等技术的伺服系统。

由于计算机的强大功能,使传统的作为动力源的电机转换为具有动力、变速与执行等多重功能的伺服电机。伺服电机的伺服变速功能在很大程度上代替了机械传动中对传动比有严格要求的“内联系”传动链中调整速比的“换置机构”,缩短了每条传动链和取代了几个执行件之间的传动联系,大大减少了传动件的数量,简化了结构,使动力件、传动件与执行件朝着合为一体的最小系统前进。

1.1.2 机电一体化对机械传动的要求

机械的主功能是完成机械运动。一部机器必须完成相互协调的若干机械运动。每个机械运动可由单独的由控制电机、传动件和执行机构组成的子系统来完成,若干个机械运动由计算机来协调与控制。这就使设计机械时的总体布局、机构选型和结构造型更加合理和多样化。

由于受当前技术发展水平的限制,机电一体化的各种元器件目前还不能完全满足需要,机械传动链还不能完全取消。但是,机电一体化机械系统中的机械传动装置,已不仅仅是变换转速和转矩的变换器,而成为伺服系统的组成部分,要根据伺服控制的要求来进行选择设计。近年来,由控制电机不通过机械传动装置直接驱动负载的“直接驱动”(D. D.)技术得到发展,但一般都需要低转速大转矩的伺服电机,并要考虑负载的非线性和耦合性等因素对执行电机的影响,从而增加了控制系统的复杂性。所以,在一般情况下,尽可能缩短传动链,而

还不能取消传动链。

传动链的性能主要取决于传动类型及其传动方式、传动精度、动态特性及可靠性等。在伺服控制中,还要考虑其对伺服系统的精度、稳定性和快速性的影响。开环伺服系统中的传动链的传动精度,不仅取决于组成系统的各单个传动件的精度,还取决于传动链的系统精度。闭环伺服系统中的传动链,虽然对各单个传动件的精度要求可以稍低,但对系统精度仍有相当高的要求,以免在控制时因误差随机性太大不能补偿。此外,机电一体化系统中的传动链还需满足小型、轻量、高速、低冲击振动、低噪声和高可靠性等要求。

影响机电一体化系统中传动链的动力学性能的因素,一般有以下几个:

(1) 负载的变化 负载包括工作负载、摩擦负载等。要合理选择驱动电机和传动链,使之与负载变化相匹配。

(2) 传动链惯性的大小 惯性不但影响传动链的启停特性,也影响控制的快速性、位移偏差和速度偏差的大小等。

(3) 传动链固有频率的大小 固有频率影响系统谐振和传动精度。

(4) 间隙、摩擦、润滑和温升 影响传动精度和运动平稳性。

1.1.3 机械传动元件的选用

常用机械传动元件有齿轮、蜗杆、同步带、链等。

机电一体化机械系统中目前使用最多的是齿轮传动,主要原因是齿轮传动的瞬时传动比为常数,传动精确,可做到零侧隙无回差,强度大能承受重载,结构紧凑,摩擦力小,效率高。蜗杆传动与齿轮传动比较,主要缺点是摩擦系数较大,效率较低。新型蜗杆效率较高,但技术要求高,成本高。同步带传动可做到传动比准确,效率高,工作平稳,能吸收振动,噪声小,维护保养方便,不需润滑。缺点是安装带轮中心距要求严格,在传递同样功率转速的条件下,结构不如齿轮传动紧凑,常用于轻载工作条件。链传动由于其瞬时传动比不为常

数,金属链易产生冲击噪声,惯性较大,使用较少。

1.1.4 齿轮传动系统中总传动比的确定及其分配

1. 使伺服电机驱动负载的加速度最大的总传动比选择方法

用于伺服系统的齿轮传动一般是减速系统,其输入是高速、小转矩,输出是低速、大转矩,用以使负载加速。要求齿轮系统不但有足够的强度,还要有尽可能小的转动惯量。在同样的驱动功率下,其加速度响应为最大。此外,齿轮副的啮合间隙会造成不明显的传动死区。在闭环系统中,传动死区能使系统以1~5倍的间隙角产生低频振荡。为此,要调小齿侧间隙,或采用消除装置。在上述条件下,要使伺服电机驱动负载产生的加速度最大,可按下述方法选择总传动比。

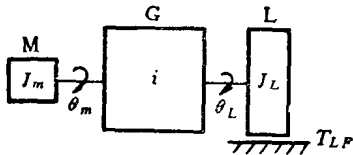


图7-1-1 电机驱动齿轮系和负载的计算模型

图7-1-1是惯量为 J_m 的直流伺服电机通过传动比为 i 的齿轮系 G 克服摩擦阻力矩 T_{LF} 带动惯性负载 J_L 的计算模型。

$$i = \theta_m / \theta_L = \dot{\theta}_m / \dot{\theta}_L = \ddot{\theta}_m / \ddot{\theta}_L > 1$$

式中 θ_m 、 $\dot{\theta}_m$ 、 $\ddot{\theta}_m$ ——电机的角位移、角速度、角加速度;

θ_L 、 $\dot{\theta}_L$ 、 $\ddot{\theta}_L$ ——负载的角位移、角速度、角加速度。

换算到电机轴上的阻抗力矩为 T_{LF}/i 。换算到电机轴上的转动惯量为 J_L/i^2 。电机轴上的加速转矩 T_a 为:

$$T_a = T_m - \frac{T_{LF}}{i} = \left(J_m + \frac{J_L}{i^2} \right) \ddot{\theta}_m = \left(J_m + \frac{J_L}{i^2} \right) i \ddot{\theta}_L$$

或
$$\ddot{\theta}_L = \frac{T_m i - T_{LF}}{J_m i^2 + J_L} = \frac{i T_a}{J_m i^2 + J_L}$$

令 $\partial \ddot{\theta}_L / \partial i = 0$,
$$i = \frac{T_{LF}}{T_m} + \sqrt{\left(\frac{T_{LF}}{T_m} \right)^2 + \frac{J_L}{J_m}}$$

若 $T_{LF} = 0$,
$$i = \sqrt{J_L / J_m}$$

图7-1-2是上述计算模型的物理意义。处于电机曲线以下的阴影面积所代表的齿轮系传动比均可选择,而 T_a 最大的是最佳值。但当作用于负载的干

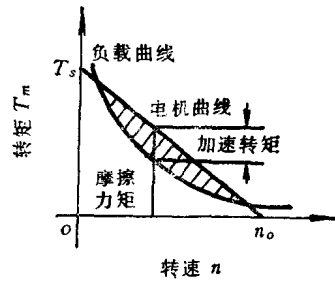


图7-1-2 用于齿轮系传动比选择的转矩-转速曲线

扰力矩很大时,为减小其影响,可能选用较大的传动比。

2. 齿轮传动链的级数和各级传动比的分配

虽然各种周转轮系可以满足总传动比的要求且结构紧凑,但由于效率等原因,常用多级圆柱齿轮传动副串联组成齿轮系。确定齿轮副的级数和分配各级传动比,按不同原则有三种方法。

(1) 最小等效转动惯量原则

1) 小功率传动装置 以图7-1-3所示两级传动齿轮系为例。假定各主动小齿轮具有相同的转动惯量 J_1 ;轴与轴承转动惯量不计;各齿轮均为实心圆柱体,且齿宽和材料均相同;效率不计。则

$$i_2 \approx i_1^2 / \sqrt{2}$$

或

$$i_1 = (\sqrt{2} i)^{1/3}$$

式中 i_1 、 i_2 ——齿轮系中第一、二级齿轮副的传动比;

i ——齿轮系总传动比, $i = i_1 i_2$ 。

同理,对于 n 级齿轮系:

$$i_1 = 2^{\frac{2^n - n - 1}{2(2^n - 1)}} i^{\frac{1}{2^n - 1}}$$

$$i_k = \sqrt{2} \left(\frac{i}{2^{n/k}} \right)^{\frac{2^{(k-1)}}{2^n - 1}}$$

各级传动比分配的结果应为“前大后小”。

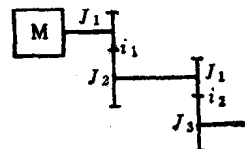


图7-1-3 电机驱动的两级齿轮系

例1 设 $i = 80$ ，传动级数 $n = 4$ 的小功率传动，试按等效转动惯量最小的原则分配传动比。

$$\text{解 } i_1 = 2 \frac{2^4 - 4 - 1}{2(2^4 - 1)} \frac{1}{80} \frac{1}{2^4 - 1} = 1.7268$$

$$i_2 = \sqrt[2]{2 \left(\frac{80}{2^4} \right)^{\frac{2(2-1)}{2^4 - 1}}} = 2.1085$$

$$i_3 = \sqrt[2]{2 \left(\frac{80}{2^2} \right)^{4/15}} = 3.1438$$

$$i_4 = \sqrt[2]{2 \left(\frac{80}{2^2} \right)^{8/15}} = 6.9887$$

验算 $i = i_1 i_2 i_3 i_4 \approx 80$

若以传动级数为参变量，则齿轮系中所有齿轮的转动惯量全部换算到电机轴上的等效转动惯量 J_e 与第一级齿轮副的转动惯量 J_1 之比 J_e/J_1 的变化与总传动比 i 的关系如图7-1-4所示。

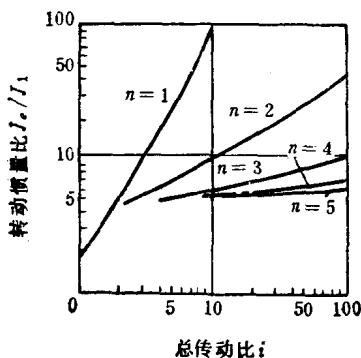


图7-1-4 用于小功率传动装置确定传动级数的曲线

2) 大功率传动装置 大功率传动装置传递的转矩大，各级齿轮副的模数、齿宽、直径等参数逐级增加。这时，小功率传动的假定不适用。可用图7-1-5、图7-1-6、图7-1-7来确定传动级数及各级传动比。分配结果应为“前小后大”。

例2 设有 $i = 256$ 的大功率传动装置，试按等效转动惯量最小原则分配传动比。

解2 查图7-1-5，得： $n = 3$ ， $J_e/J_1 = 70$ ； $n = 4$ ， $J_e/J_1 = 35$ ； $n = 5$ ， $J_e/J_1 = 26$ 。为兼顾 J_e/J_1 值的大小和传动装置结构紧凑，选 $n = 4$ 。再查图7-1-6，得 $i_1 = 3.3$ 。再查图7-1-7，在水平坐标 i_{k-1} 上3.3处作垂直线与A线交于第一点，在垂直坐标 i_k 轴上查得 $i_2 = 3.7$ 。通过该点作水平线与B曲线相交得第二点 $i_3 = 4.24$ 。由第二点作垂线与A曲线相交得第三点 $i_4 = 4.95$ 。验算 $i = i_1 i_2 i_3 i_4 =$

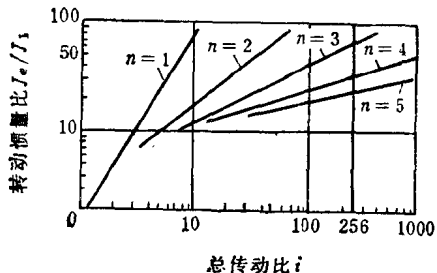


图7-1-5 用于大功率传动确定传动级数的曲线

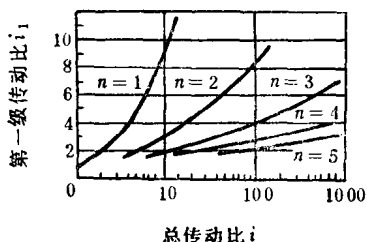


图7-1-6 用于大功率传动确定第一级传动比的曲线

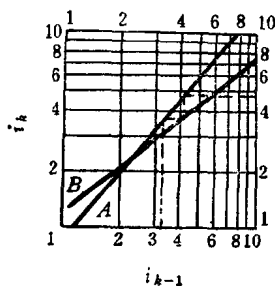


图7-1-7 用于大功率传动确定第一级齿轮副以后各级传动比的曲线

256.26。可用。

(2) 重量最轻原则

1) 小功率传动装置 仍以图7-1-3所示两级传动齿轮系为例。假定各主动小齿轮的模数、齿数、齿宽均相同；轴与轴承转动惯量不计；各齿轮均为实心圆柱体，且齿宽与材料均相同；效率不计。则

$$i_1 = i_2$$

同理，对 n 级传动可得：

$$i_1 = i_2 = \dots = i_n$$

例如，图7-1-8所示为一小功率传动装置(回曲式齿轮传动链)，各级齿轮副的模数均相等，各级齿

轮齿数分别为： $z_1 = 9, z_2 = 63, z_3 = 14, z_4 = 48,$
 $z_5 = z_7 = z_9 = z_{11} = z_{13} = z_{15} = z_{17} = 16, z_6 = z_8 =$
 $z_{10} = z_{12} = z_{14} = z_{16} = z_{18} = 46$ 。总传动比 $i \approx$
 39000。

2) 大功率传动装置 仍以图7·1-3所示两级
 齿轮系为例。假设所有主动小齿轮的模数 $m_1、m_3、$
 分度圆直径 $d_1、d_3、$ 齿宽 $b_1、b_3、$ 都与所在轴上的
 转矩 $T_1、T_3$ 的三次方根成正比。即

$$m_3/m_1 = d_3/d_1 = b_3/b_1 = \sqrt[3]{T_3/T_1} = \sqrt[3]{i_1}$$

另设每个齿轮副中齿宽相等，即 $b_1 = b_2, b_3 = b_4$ 。可得

$$i = i_1 \sqrt{2i_1 + 1}$$

$$i_2 = \sqrt{2i_1 + 1}$$

根据上二式可得图7·1-9。所得各级传动比应
 “前大后小”。

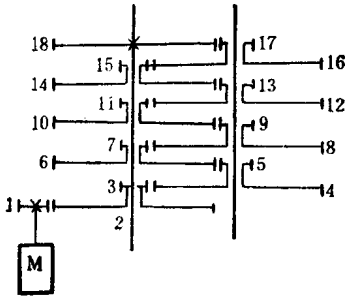


图7·1-8 回曲式齿轮传动链

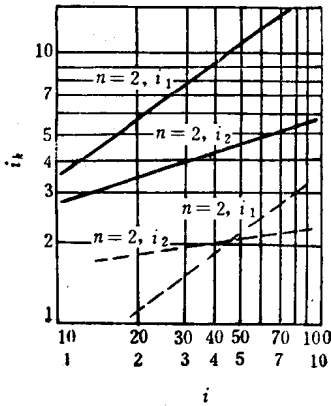


图7·1-9 二级传动比分配线图

($i < 10$ 时，查图中的虚线)

例3 设 $n = 2, i = 40$ ，求各级传动比。

解 查图7·1-9得： $i_1 \approx 9.1, i_2 \approx 4.4$ 。

同理，若 $n = 3$ ，假定 $b_1 = b_2, b_3 = b_4, b_5 =$
 b_6 ，可得：

$$i = i_1 \sqrt{2i_1 + 1} \quad (2\sqrt{2i_1 + 1} + 1)^{\frac{1}{2}}$$

$$i_2 = \sqrt{2i_1 + 1}$$

$$i_3 = (2\sqrt{2i_1 + 1} + 1)^{\frac{1}{2}}$$

根据上三式可得图7·1-10。所得各级传动比应
 “前大后小”。

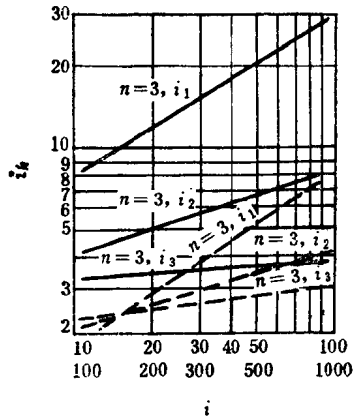


图7·1-10 三级传动比分配线图

($i < 100$ 时，查图中的虚线)

例4 设 $n = 3, i = 202$ ，求各级传动比。

解 查图7·1-10得： $i_1 \approx 12, i_2 \approx 5, i_3 \approx 3.4$ 。

(3) 输出轴的转角误差最小原则 在减速传
 动链中，从输入端到输出端的各级传动比应“先小
 后大”，且最末两级传动比应尽可能大，齿轮制
 造精度应提高。这样可减小齿轮的固有误差、安
 装误差、回转误差对输出轴运动精度的影响。

以图7·1-11所示四级齿轮减速传动链为例。四
 级传动比分别为 $i_1、i_2、i_3、i_4$ ，齿轮1~8的角
 误差依次为 $\Delta\phi_1 \sim \Delta\phi_8$ 。该传动链输出轴的总
 转角误差 $\Delta\phi_{max}$ 为：

$$\Delta\phi_{max} = \frac{\Delta\phi_1}{i_1 i_2 i_3 i_4} + \frac{\Delta\phi_2 + \Delta\phi_3}{i_2 i_3 i_4} + \frac{\Delta\phi_4 + \Delta\phi_5}{i_3 i_4}$$

$$+ \frac{\Delta\phi_6 + \Delta\phi_7}{i_4} + \Delta\phi_8$$

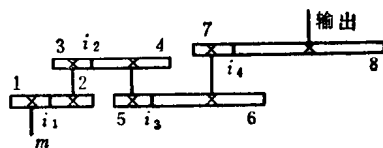


图7·1-11 四级降速齿轮传动链

同理, 若为 n 级降速齿轮传动链, 则:

$$\Delta\phi_{max} = \sum_1^n (\Delta\phi_k / i_{kn})$$

式中 $\Delta\phi_k$ ——第 k 个齿轮的转角误差;

i_{kn} ——第 k 个齿轮的转轴至第 n 级输出轴的传动比。

(4) 原则的选择 上述三项原则的选择, 应根据具体工作条件。

1) 对于以提高传动精度和减小回程误差为主的降速齿轮传动链, 可按输出轴转角误差最小原则设计。对于升速传动链, 则应在开始几级就增速。

2) 对于要求运转平稳、启停频繁和动态性能好的伺服降速传动链, 可按最小等效转动惯量原则和输出轴转角误差最小原则设计。对于负载变化的齿轮传动装置, 各级传动比最好采用不可约的比数, 避免同时啮合。

3) 对于要求重量尽可能轻的降速传动链, 可按重量最轻原则进行设计。

4) 对于传动比很大的齿轮传动链, 应把定轴轮系和行星轮系结合使用。若同时要求传动精度高、功率大、效率高、传动平稳、体积小、重量轻等, 就要综合运用上述原则进行设计。

1-1-5 机械传动系统方案的选择

机电一体化机械系统要求高精度、运行平稳、工作可靠。这不仅是机械传动和结构本身的问题, 而是要通过控制装置, 使机械传动部分与伺服电机的动态性能相匹配, 要在设计过程中综合考虑这三部分的相互影响。

对于伺服机械传动系统, 一般来说, 应达到高的机械固有频率、高刚度、合适的阻尼、线性的传递性能、小惯量等。这些都是保证伺服系统具有良好的伺服特性(精度、快速响应和稳定性)所必须的。应考虑多种设计方案, 进行优化评价决策, 反复比较, 选出最佳方案。

以数控机床进给系统为例, 可以有三种选择: 丝杠传动、齿条传动和蜗杆传动(蜗轮: 旋转工作台), 如图7-1-12所示。若丝杠行程大于4m, 由于刚度原因, 可选择齿条传动。

当选择丝杠传动后, 丝杠与伺服电机的联接关系有两种: 直接传动; 中间用齿轮或同步带传动。在同样的工作条件下, 选择不同类型的电机, 相应的丝杠尺寸和齿轮传动比也不同。例如, 要求进给力 $F_v = 12.5\text{kN}$, 快速行程速度 $v = 12\text{m/min}$, 采用不同类型的直流伺服电机的传动方案比较见表7-1-1。表中 T_R 为额定转矩, n_R 为额定转速, E 为能量, e_m 为线加速度, F_v 为进给力, v 为快速速度, ω_n 为固有频率。成本比较只是三相全波与三相半波无环流反并联式线路成本, 不包括齿轮传动装置。

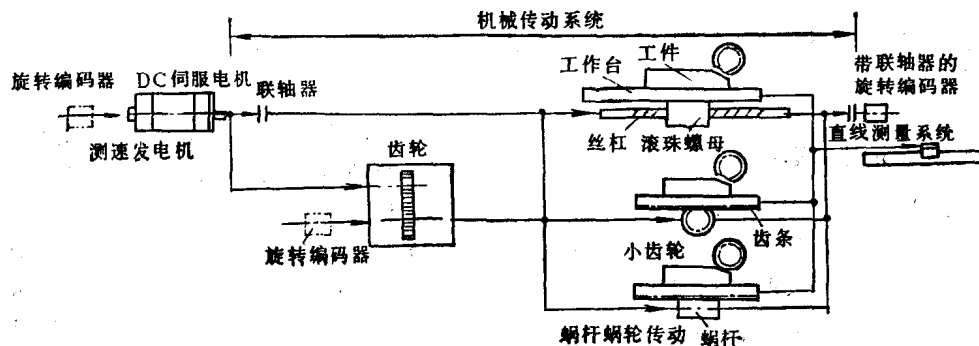
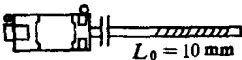
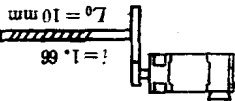
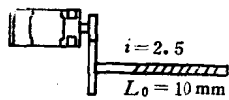
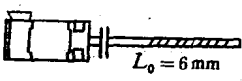

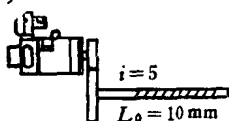


图7-1-12 机床进给系统方案示例

表7-1-1 不同传动方案的比较

传 动	电 机	T_R (N·m)	n_R (r/min)	E (J)	ϵ_m (m/s ²)	F_v (kN)	v (m/min)	ω_{nm} (rad/s)	成本比较(%)	
									6脉冲	3脉冲
(1) 	1HU 3104	25	1200	364	3.5	12.5	12	137	100	112
(2) 	1HU 3078	14	2000	250	4.7	11.6	12	244	88	98
(3) 	1HU 3076	10	3000	510	2.5	12.5	12	308	85	98
(4) 	1HU 3078	14	2000	290	4	11.6	12	232	88	98
(5) 	1HU 3108	38	800	210	6.1	12.5	18	107	121	138
(6) 	1GS 3107	6.8	6000	590	2.9	17	12	143	106	114

注：1.1HU型为永磁式DC伺服电机；1GS型为电磁式DC伺服电机，均为德国电机型号。

2.工作台与工件质量为3000kg。

1.2 动力与执行元件的选用

1.2.1 电动机的选用

电动机的类型有多种，各有不同的电气特性和结构形式，以满足各种机械负载和不同工作环境的传动要求。作一般传动用的电动机功率范围很广，从几分之一千瓦直至几千千瓦，但用于一般生产机械或辅助传动装置，大多数为中小功率的电动机。

1. 电动机的主要类型

(1) 交流电动机 交流电动机是价格较便宜

的一类电动机，尤其是其中的笼型异步电动机，因结构简单、机械特性好、体积小、价格又最低，所以应用最广泛。

笼型异步电动机的连续运行特性很好，其转速受负载波动的影响较小，起动转矩也较大，适用于不调速的连续运转负载。该类电动机的主要缺点为起动电流很大，约为额定电流的5~7倍，如果电动机的容量较大，将对电网产生瞬间的冲击。为此，常采用各种降压起动方式，把起动电流限制在较小的范围内，但随之它的起动转矩作相应的较大

幅度降低,所以只能用于轻载起动的设备,如风机、水泵之类的机械设备。

绕线式交流异步电动机常用于不调速连续运行的大功率设备,如空气压缩机、气泵等。为解决起动问题,一般采用在电动机的转子回路中串接频敏电阻以限制起动电流,并获得较大的起动转矩。绕线式异步电动机的另一类用途为起重机械,只需利用控制电器切换转子回路外接电阻的数值,便可获取不同的机械特性,满足有级调速的要求,还可以作四象限运行。

(2) 直流电动机 直流电动机的主要特点是调速性能好。在一般应用场合,大多数采用他励式直流电动机,只需改变电枢的电压,便可实现恒转矩调速,而且机械特性又较硬,调速范围较广,如果组成闭环调速系统,可应用于高精度的调速装置。如果降低直流电动机的励磁电流,电动机的转速即随之升高,但转矩要减小,这种调速方式称为恒功率调速,其特点是可实现比电动机额定转速更

高范围内的调速。

串励式直流电动机的机械特性很软,低速时转矩很大,故常用于电车、牵引机械之类的应用领域。

直流电动机的主要缺点是结构较复杂,维护工作量较大,而且价格较高。

2. 各类型号电动机的性能及应用范围

电动机的型号很多,其性能均有一些差别,以满足不同应用的需要。

(1) 交流电动机的分类型号 常用的交流电动机分类型号及其性能特点如表7·1-2所示。

(2) 直流电动机的分类型号 常用直流电动机的分类及其性能特点如表7·1-3所示。

3. 电动机容量的计算

(1) 连续恒负载运行的电动机容量计算 当电动机的恒负载运行期间使电动机的温升达到稳定值便作为连续负载考虑。

电动机功率的计算公式为:

表7·1-2 三相交流异步电动机的系列分类

系列型号	名称	容量范围 (kW)	同步转速 (r/min)	电压 (V)	性能	应用范围
Y	三相异步电动机	2极: 0.75~160 4极: 0.55~160 6极: 0.75~132 8极: 45~75	3000 1500 1000 750	380	全封闭自扇冷 起动特性好 效率高 噪声低	各种机械设备,如机床、运输机械、轻工机械、风机、水泵等
YX	高效率三相异步电动机	2极: 3~90 4极: 2.2~90 6极: 1.5~55	3000 1500 1000	380	为Y系列派生产品,平均效率提高3%左右,但价较贵	用于节能设备,如风机、水泵、压缩机等
YH	高转差率三相异步电动机	2极: 0.75~18.5 4极: 0.55~90 6极: 0.75~55 8极: 2.2~45	3000 1500 1000 750	380	机械特性软,起动转矩高,起动电流较小。转差率: 7%~13%。负载持续率有15%、25%、40%、60%四种	用于冲击性负载的大惯性机械设备,如锤击机、剪切机、冲压机、锻冶机等
YD	变极多速三相异步电动机	0.35~72	500 至 3000	380	为Y系列派生产品,有双速、三速、四速共九种速比	用于万能、组合专用切削机床及一般需要分级调速的设备
YTD	电梯用三相异步电动机	4~22	1000/250	380	为开启式双速电动机,起动转矩高、噪声低、运行平稳。短时工作制(6极30min、24极3min)	用于一般要求的交流客、货电梯及其他各类升降机
JLJ	力矩三相异步电动机	2极: 16~100N·m 4极: 6~200N·m 6极: 16~200N·m	3000 1500 1000	380 (可调)	机械特性很软,当负载增加时,转速自动降低,在很大的运行速度范围内,保持转矩的基本恒定	用于造纸、线材、橡胶、塑料等行业的卷绕设备

(续)

系列型号	名称	容量范围 (kW)	同步转速 (r/min)	电压 (V)	性能	应用范围
YR	绕线式三相异步电动机	4极: 4~75 6极: 3~55 8极: 4~45	1500 1000 750	380	电机的机械特性与转子回路的外接电阻有关	用于简单的调速, 或改善电机的起动
YZR	冶金及起重用三相异步电动机	6极: 1.5~75 8极: 7.5~90 10极: 37~200 (负载持续率为40%时)	1000 750 600	380	具有较大的过载能力、较高的机械强度。在转子回路串电阻实现分级调速	用于断续工作, 起动频繁的起重设备

表7-1-3 直流电动机的系列分类

系列型号	名称	容量 (kW)	额定转速 (r/min)	额定电压(V)		性能	应用范围
				电枢	励磁		
Z3	直流电动机	0.25~200	3000	110	110	体积小、重量轻、转动惯量小, 适用于整流电源供电、保护式自风冷	一般调速传动用
			1500	160	160		
			750	220	220		
			600	440	440		
Z4	小型直流电动机	2.2~450	3000	400	180	多角形结构, 体积小, 空间利用率高; 能承受脉动电流; 换向性能好, 效率高; 密封他冷或自冷式。适应三相全桥无电抗器长期工作	用于调速要求较高的设备, 如机床、轧机、造纸、印刷和印染等机械
			1500				
			1000				
			750				
			600				
ZT2	宽调速直流电动机	0.3~55	300~1000	110	110	防护式自风冷, 可实现弱磁调速, 其调速范围为1:3和1:4两种	用于需要恒功率调速的生产机械
				220	220		
ZZY	起重冶金用直流电动机	3~30 (FC=25%)	1500	220	220	具有快速起动和较大的过载能力, 能承受频繁的起动、反转、制动以及机械振动	用于各种起重设备, 如吊车、桥式起重机等
			1000				
			750				
			600				

$$P = \frac{Tn}{9565}$$

式中 P ——电动机的计算功率 (kW);

T ——折算到电机轴的负载转矩 (N·m);

n ——电动机的额定转速 (r/min)。

选用的电动机额定功率必须等于或稍大于计算功率 P 值。

当电动机的使用环境温度与标准的40°C相差较大, 电动机额定功率要计入温度修正系数, 如当使用环境为45°C时, 电动机的额定功率约下降5%; 50°C时, 将下降12.5%左右。

如果电动机需作重载起动, 尚需校验电动机的起动转矩。

(2) 连续周期性变化负载的电动机功率计算 连续变化负载的电动机功率的计算方法很多, 其中较常用的为等效转矩法, 其步骤如下:

1) 计算并绘制折算到电动机轴的负载转矩图, 即

$$T = f(t)$$

2) 计算变化负载的等效转矩

$$T_e = \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + T_2^2 t_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots}}$$