



高等学校
电子信息类

规划教材

机械电子工程设计

杨平 廉仲 编著

国防工业出版社

机械电子工程设计

杨平 廉仲 编著

图书在版编目(CIP)数据

机械电子工程设计/杨平,廉仲编著. —北京:国防工业出版社,2001.1

ISBN 7-118-02333-7

I. 机... II. ①杨... ②廉... III. 机电系统-工业设计 IV. TH12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 38313 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 $\frac{1}{4}$ 397 千字

2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1-4000 册 定价:24.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

出 版 说 明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作,根据原国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》,我们组织各有关高等学校、中等专业、出版社、各专业教学指导委员会,在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上,根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求,编制了《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报,经各学校、出版社推荐,由各专业教学指导委员会评选,并由我部教材办协商各专指委、出版社后,审核确定的。本轮规划教材的编制,注意了将教学改革力度较大、有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需,尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时,选择了一批对学科发展具有重要意义,反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划,以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足,希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议,以不断提高教材的编写、出版质量,共同为电子信息类专业教材建设服务。

原电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按原电子工业部的《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由机械电子工程专业教学指导委员会编审、推荐出版。本教材由电子科技大学杨平、廉仲编写，主审张家裕，责任编委熊世和。

本教材的参考学时数 68 学时，其主要内容涉及机械设计、电子技术、计算机控制和机械量测试等知识体系。本教材分为三大知识模块，前三章结合具体的、典型的机电系统，从设计任务出发，为达到相应的技术、经济指标，进行机电总体设计、系统分析与综合，使之能在机械执行机构工作原理、传动原理、测控原理和精度分析等方面进行总体方案的设计和分析论证，为机电系统设计能力打下基础；第四、五、六章主要针对电气传动控制系统、伺服机械传动系统、常见机构和部件及机电一体化典型装置，使学生具备部件子系统设计的能力；后三章着重从机电系统 CAD、优化设计方法和可靠性设计等方面铺垫计算机化的现代设计方法知识体系，使学生在机电系统设计能力方面达到 21 世纪人才培养的高起点要求。

使用本教材时应注意从机电结合的系统角度去学习和掌握总体设计与分析、部件子系统设计和机电系统现代设计方法等内容。由于机械电子工程是一个跨学科的综合性专业，一方面要求学生应具备机、电、计算机应用和非电量测试等基础知识体系，另一方面又要使学生在专业课学习阶段将各相关知识体系在机电系统能高度融汇贯通，使之具有机电总体和部件子系统的设计和分析能力，本教材的编写目的，正是为了适应这一需求。教材每章附有习题，供教学时参考。

本教材由杨平编写第一、二、三、七、八、九章，廉仲编写第四、五、六章。参加审阅工作的朱钟淦、王海东同志，对本书提出了许多宝贵意见，在此向他们表示诚挚的感谢。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 典型机电系统介绍	1
§ 1.1 传送式电子元件耐压自动测试机	1
§ 1.2 弧焊机器人	4
§ 1.3 超声波工业自动清洗机	8
§ 1.4 柔性制造系统(FMS)简介	12
习题与思考题	16
第二章 总体设计	17
§ 2.1 总体设计步骤	17
一、设计任务分析	18
二、机电系统主要技术参数和指标的确定	23
三、总体设计步骤	26
§ 2.2 总体方案设计的基本原则	27
一、满足精度的设计原则	28
二、满足强度的设计原则	31
§ 2.3 精度分析与计算	31
一、误差综合与分配	32
二、机械传动精度分析与计算	40
三、提高传动精度的措施	42
习题与思考题	42
第三章 机电系统分析与评估	44
§ 3.1 机电系统理想元件方程和动态特性	44
一、元件方程	45
二、机电系统的元件连接规律	47
三、动态特性	49
§ 3.2 力学分析法	52
一、振动方程的建立	52
二、常用的计算方法	59
§ 3.3 机电模拟法	63
一、机电系统相似性	63

二、传动系统的机电模拟	68
§ 3.4 传递函数法	72
一、机电系统的传递函数表示方法	72
二、数控机床进给伺服系统传递函数分析	77
习题与思考题	81
第四章 伺服机械及控制系统	84
§ 4.1 伺服机械传动系统	84
一、伺服机械传动系统设计	84
二、伺服电机的选择	89
三、伺服机械系统的机械参数	91
§ 4.2 伺服机械传动的检测装置	94
一、位移检测装置	94
二、速度检测传感器	103
§ 4.3 电机的调速及控制	105
一、直流电机的自动调速及控制	105
二、交流电机调速及控制	109
三、步进电机驱动及控制	112
习题与思考题	115
第五章 常用机构及部件设计	116
§ 5.1 精密主轴系统	116
一、轴系设计要求及其结构设计	116
二、滚动摩擦轴系	119
三、静压轴系	121
§ 5.2 精密导轨	126
一、导轨的组成、分类和要求	126
二、普通滑动导轨	127
三、滚动摩擦导轨	128
四、静压导轨	132
§ 5.3 步进运动机构	133
一、步进运动机构的种类和要求	133
二、槽轮机构	133
三、空间凸轮转位机构	139
四、精密转位定位机构应用	141
§ 5.4 自动上料机构	143
一、自动化上料机构的分类及其简介	143
二、电磁振动料斗	145
习题与思考题	154

第六章 机电一体化设备中的典型装置	156
§ 6.1 计算机外部设备及录像机中的典型装置	156
一、硬磁盘机	156
二、光盘机	160
三、录像机	161
§ 6.2 工业机器人	167
一、工业机器人组成和主要特性参数	167
二、工业机器人操作机的机械结构	167
三、工业机器人的运动分析	172
§ 6.3 新型电动执行器	184
一、压电式驱动执行器	184
二、磁致伸缩微位移执行器	188
三、超声波电机	191
习题与思考题	193
第七章 机电系统 CAD	195
§ 7.1 CAD 概况	196
一、CAD 技术发展简史	196
二、CAD 技术的应用	197
三、CAD 系统的组成和分类	198
四、CAD 系统的功能和特点	199
五、CAD 技术的发展趋势	200
§ 7.2 CAD 硬件和软件组成	200
一、CAD 系统的硬件	200
二、CAD 系统的软件	203
§ 7.3 CAD 数据结构与数据库	205
一、数据结构	206
二、数据库与数据库系统	208
三、FOXBASE+ 关系型数据库系统简介	209
四、数据库应用举例	213
§ 7.4 交互式图形软件——AutoCAD 简介	215
一、AutoCAD 概述	216
二、AutoCAD 交互式图形设计	217
三、AutoLISP 语言简介	217
§ 7.5 CAD 的内部接口	220
一、FOXBASE+ 数据库与高级语言的接口	220
二、AutoCAD 与高级语言的接口	221
三、AutoCAD 与 FOXBASE+ 的接口	222

四、数据库与图形库的接口	222
习题与思考题	223
第八章 优化设计方法	224
§ 8.1 优化设计概述	224
一、优化方法的发展概况	224
二、优化问题的分类	225
三、机电系统优化设计的内容和目的	225
四、优化设计的发展方向	225
§ 8.2 优化建模	226
一、设计变量	226
二、约束条件	226
三、目标函数	227
四、优化模型的表示	227
五、优化建模举例	228
§ 8.3 约束优化问题的解法	231
一、基本思路	231
二、罚函数法	231
习题与思考题	243
第九章 可靠性设计方法	244
§ 9.1 可靠性概述	244
一、基本概念	244
二、可靠性研究的发展历史、目的和特点	245
§ 9.2 系统的可靠性设计	246
一、可靠性设计的流程和内容	246
二、系统模型的建立	248
三、可靠性预测和分配	254
§ 9.3 失效分析方法简介	260
一、FMECA 分析法	260
二、FTA 分析法	262
习题与思考题	265
附录	266
参考文献	267

第一章 典型机电系统介绍

随着机械电子学的发展和机电一体化技术的推广,机械电子工程已成为机械设计、微电子技术、计算机控制及信息技术相互交叉、渗透的学科,其应用已遍及国民经济的各行各业。从发展趋势来看,必须用系统的观点走机电结合的道路,才能满足各种机电系统愈来愈高的性能要求。机械电子工程设计正是从机电系统的观点出发,突出总体和各子系统的设计和分析,以及常见的计算机化现代设计方法,从而研究和总结机械电子工程设计的规律和方法。

§ 1.1 传送式电子元件耐压自动测试机

电子工业中生产装备的种类很多,许多元器件的生产要经过成形、插片、焊接、清洗、装配、测试、老化和筛选等工艺过程,因此生产装备中有各种元器件的自动生产线、自动装配线和测试设备。随着科学技术的发展,这些设备都高度集成了机械技术、电子技术、信息处理和计算机应用技术,构成了各种各样的机电系统总体。

P88-8/HM 型传送式电子元件耐压自动测试机是原电子工业部某厂 20 世纪 90 年代研制成功的测试设备,该机供热敏电阻及其它圆形电子元件测试耐压用,是耐压测试和筛选的关键设备。图 1-1 给出了该机外形及其组成部分。

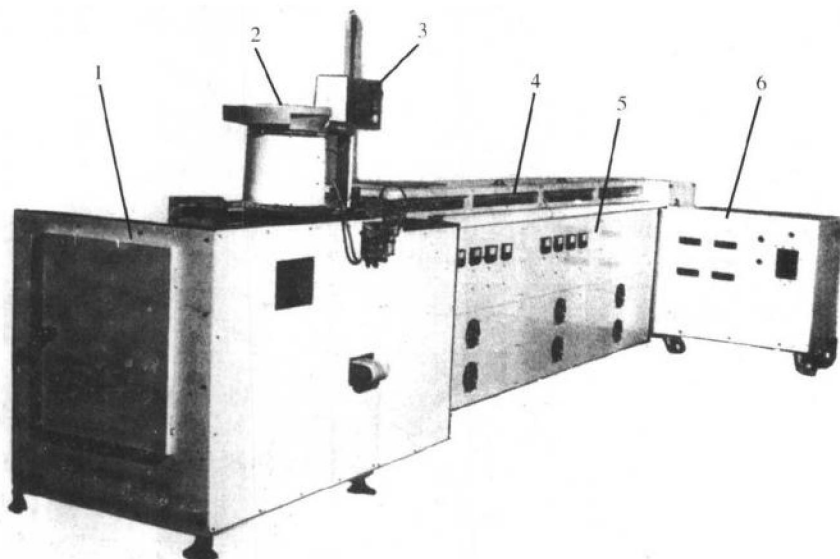


图 1-1 传送式电子元件耐压自动测试机外形及组成部分

1—传送电源及传动装置;2—振动料斗;3—控制箱;4—传送带;5—耐压测试区;6—耐压电源。

该机主要技术参数如下:

生产率:	3 万支/班
元件尺寸:	直径 9 ~ 18mm; 厚度 2 ~ 3mm
传送速度:	0.5 ~ 1.7m/min(可调)
耐压时间:	共 4min
测试电压:	低压段 1 ~ 7 回路 0 ~ 300V ± 10V, 施压时间 60s 高压段 8 ~ 9 回路 250 ~ 700V ± 10V, 施压时间 180s
夹具数量:	372 个
传送电源:	三相 380V AC 50Hz
耐压电源:	单相 220V AC 50Hz
气源压力:	0.5MPa
总功率:	25kW
外形尺寸:	主机 5000mm × 860mm × 1500mm 电源柜 860mm × 600mm × 920mm
重量:	1.24t

下面叙述一下该机的测试工艺流程,以便了解各组成部分的作用及整机工作原理,其测试工作原理如图 1-2 所示。

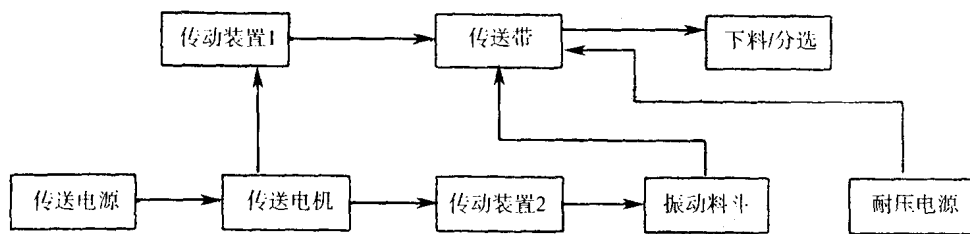


图 1-2 传送式电子元件耐压自动测试机原理图

图 1-2 中传送电源是供动力传送用,三相交流 380V、50Hz。传送电机经无级调速器使转速在 $n = 104 \sim 519\text{r/min}$ 范围内连续可调,传动装置 1 由两级带式传动、一级蜗轮蜗杆传动组成,最后推动传送带变成匀速直线传动,传送速度在 0.5 ~ 1.7m/min 范围内可调,在传送带上安装有 372 个夹具,夹持被测试电子元件。

传动装置 2 也由传送电机驱动,由两级带式传动、两级齿轮传动组成,最后通过振动料斗产生振动给料,将被测元件依次输送到夹具上,夹具夹持被测元件依次进入耐压测试区测试。

耐压电源为单相交流 220V、50Hz,可依被测元件耐压范围要求调节,在耐压测试区对元件施压,施压时间是 4min。测试电压在低压段分 1 ~ 7 回路,耐压范围 0 ~ 300V ± 10V,施压时间 60s;高压段 8 ~ 9 回路,耐压范围 250 ~ 700V ± 10V,施压时间 180s,因此总共施压 240s。被测元件依次在低、高压段测试后,耐压值不合格的元件经分选落入废料槽中。

传送式电子元件耐压自动测试机的系统组成如图 1-3 所示。控制箱可控制整个系统的测试工作,启动传动装置,元件经振动料斗供料,并由滑板进入传送带上的夹具,通过传送带输送至耐压测试区测试。

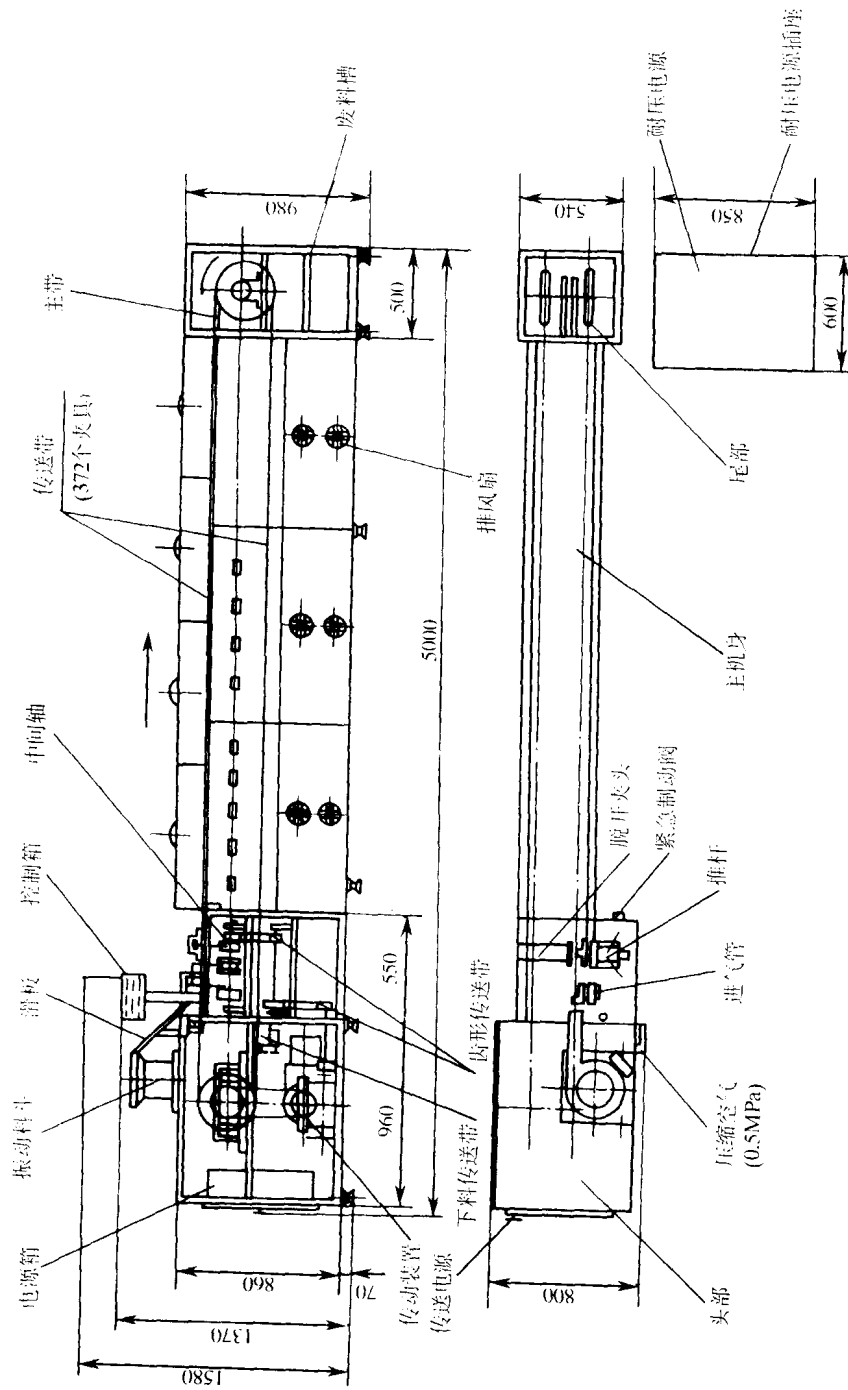


图1-3 传送式元件耐压自动测试系统组成

利用图 1-4 所示的传送式电子元件耐压自动测试机的传动系统,来实现传送带和振动料斗的驱动。由电机、无级调速器作为驱动装置,经一级带式传动,蜗轮蜗杆传动,此时蜗轮蜗杆传动再分二路,一路经一级带式传动供给传送带,将转动变为匀速直线运动,另一路经一级带式传动和两级齿轮传动及摆杆,驱动振动料斗输料。上述传动装置由控制系统控制,使输料与传送速度匹配,保证依次供料和匀速传送被测元件。图 1-4 中 Z 后面的数字为带轮直径或齿轮齿数, t 为夹具间距。

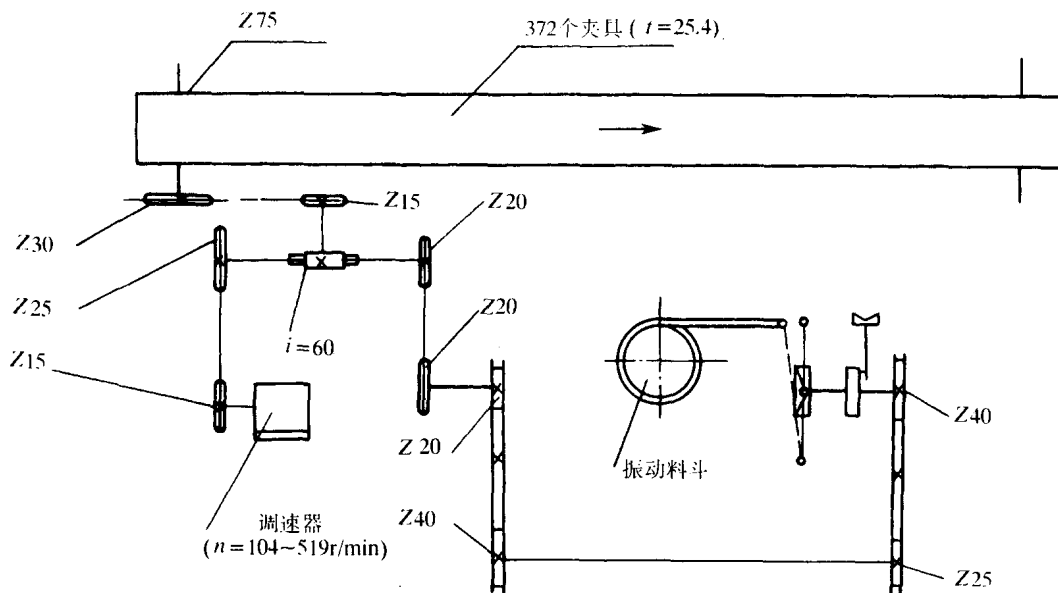


图 1-4 传送式电子元件耐压自动测试机传动系统

§ 1.2 弧焊机器人

机器人是典型的机电系统,是机构学、仿生学、电子学、控制技术、计算机技术高度发展的综合成果。机器人能部分地替代人的操作,按照一定的生产工艺要求,遵循一定的程序、时间和位置来完成工件的传送和装卸,或夹持一定的工具,进行焊接和装配,从而大大降低了工人的劳动强度,提高了生产效率,开创了生产过程自动化的崭新局面。

目前国外已形成了一门新的学科——机器人工程,世界各国拥有各类机器人数十万台,并以每年 20%~30% 的增长率迅速发展,其中日本是机器人发展最快、拥有量最多的国家,每年以 50% 左右的速度增长。我国机器人研究从 1958 年开始起步,1984 年第一台喷漆机器人问世,1985 年第一台弧焊机器人诞生。随着我国“863”计划智能机器人研究的顺利开展,促使我国的机器人技术走向了实用化阶段,特别是我国第一个大型机器人机构仿真软件的研制成功和水下机器人潜入水下 6000m 成功作业,标志着我国机器人技术的研究已接近或达到国际先进行列。

目前关于机器人的定义尚未统一,但公认的是按需要能在三维空间中完成多种动作功能的自动化机器,它具有类似于人的多自由度运动功能,具有感觉和识别功能的自动控制装置。机器人是一种独立的,不附属于某一主机的装置,可以根据任务要求编制程序,

以完成各项规定的操作,是具有物理、机械和记忆智能的三元机械。

工业机器人一般由执行系统、驱动系统、控制系统和人工智能系统组成,可分为四种基本形式,即直角坐标式、圆柱坐标式、球坐标式和关节式机器人。

电弧焊是生产效率很低的作业,由于操作人员的熟练程度不一,经常不能按要求的焊接状态进行操作,如时快时慢就会造成凹陷、堆积等焊接缺陷。近年来国内纷纷发展并引进了机器人的电弧焊系统,其中多采用占地面积小、动作范围大的关节型机器人,这种方式能以最佳状态决定焊枪的位置,是最适合于电弧焊操作的机器人。

机器人关节驱动分伺服和非伺服两种,前者是闭环控制,后者则是开环控制。开环控制通常采用步进电机或行程开关实现位置控制,闭环控制则要求将各关节实际位置(实测值)与计算机给定值比较,经运算后变换为模拟量,再由驱动系统移动关节,其控制规律常有 P/D、前馈补偿、自适应控制、变结构控制和最优控制等,而驱动系统也可以是电动、液压或气动的。近年来为实现宽调速、平稳无冲击,发展了新型的交流、直流调速系统和电机直接驱动系统,伺服控制器则常由计算机实现。

图 1-5 是瑞典 ASEA 公司的 5 自由度关节型弧焊机器人系统,该机器人具有 5 个自由度的旋转关节和一个工作台。包括腰部旋转(S 轴)、下臂摆动(L 轴)、上臂俯仰(U 轴)、腕部摆动(B 轴)和手部旋转(法兰旋转,T 轴),如图 1-6 所示。

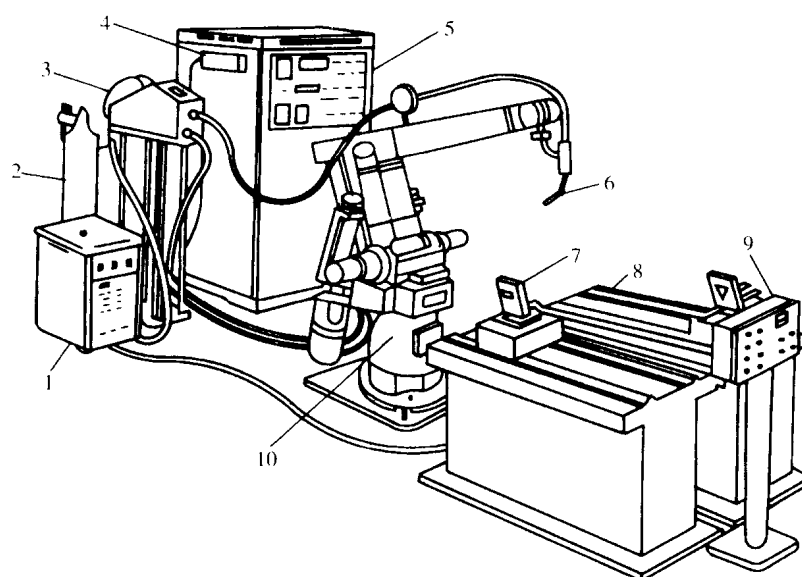


图 1-5 弧焊机器人系统

1—焊接电源;2—气瓶;3—焊丝送进装置;4—示教盒;5—控制柜;
6—焊枪;7—工件;8—夹具;9—操作台;10—机器人。

图 1-7 给出了弧焊机器人各关节的传动图。该机器人可以同时 5 个自由度进行控制,实现 5 轴联动。下面叙述 5 个旋转关节的传动关系。

腰部旋转(S 轴旋转)是由 0.4kW 直流伺服电机 3 驱动谐波减速器 4 后,带动回转壳 5 绕 S 轴旋转的,这是定位精度要求最高的环节。下臂摆动(L 轴旋转)是由 0.4kW 直流伺服电机 1 带动滚珠丝杠 12,再通过丝杠带动下臂杆 10 上的凸耳 11 驱动下臂杆前后摆动。

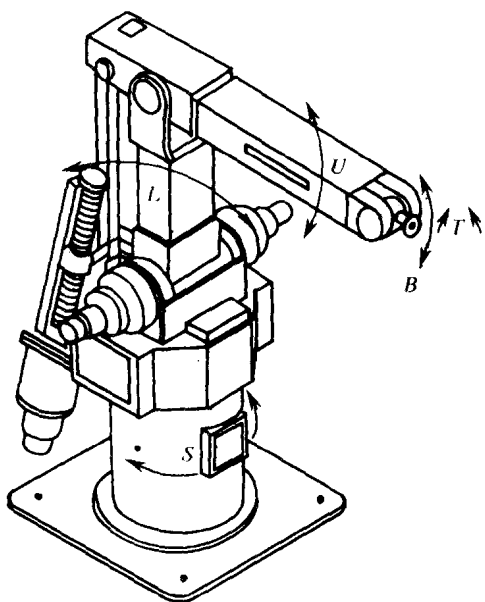


图 1-6 弧焊机器人 5 个自由度

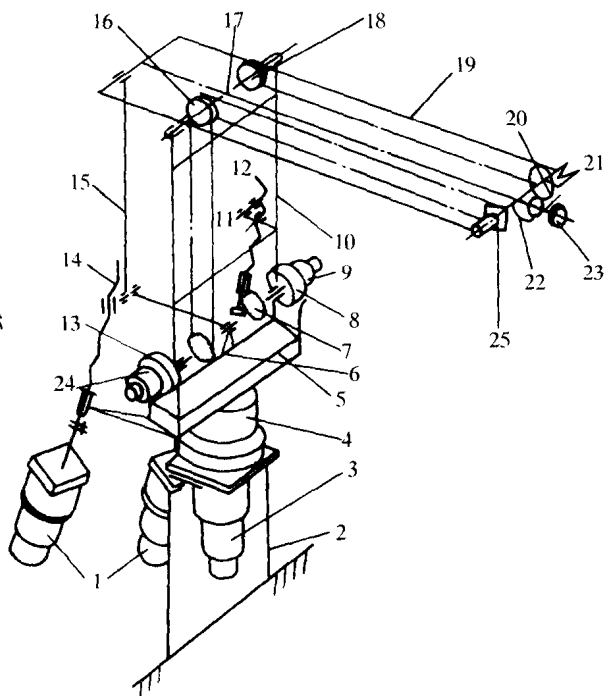


图 1-7 弧焊机器人各关节传动图

- 1,3,9,24—直流伺服电机;2—机座;4,8,13—谐波减速器;
5—回转壳;6—链轮 I;7—链轮 II;10—下臂杆;11—凸耳;
12,14—滚珠丝杠;15—拉杆;16,18—双联链轮;
17—销轴;19—上臂杆;20,25—链轮;21—锥齿轮;
22—腕壳;23—手部法兰。

上臂俯仰(U轴旋转)是由另一台 0.4kW 直流伺服电机 1 带动另一个滚珠丝杠 14,再由滚珠丝杠带动平行四边形机构的主动杆摆动,借助于该四边形机构的拉杆 15 迫使上臂杆 19 以下臂杆 10 上端的销轴 17 为支点作俯仰转动。腕部摆动(B轴旋转)是由 0.2kW 直流伺服电机 24 带动谐波减速器 13,驱动下臂杆 10 内的链条转动,经下臂杆 10 上面销轴 17 上的双联链轮 I 16 带动下臂杆 19 内的链条转动,从而带动与手腕壳体固联的链轮 25,使手腕作上下摆动。手部旋转(T轴旋转)也是由另一个 0.2kW 的直流伺服电机 9 通过谐波减速器 8,带动下臂杆 10 内的另一链条转动,再通过下臂杆上面销轴 17 上的另一双联链轮 II 18 带动下臂杆内的另一链条,并带动腕壳内的链轮 20(该链轮与锥齿轮 21 同轴固联),再带动小锥齿轮轴,最后带动手部法兰 23 旋转。

该弧焊机器人的 5 个自由度运动,即 5 轴联动,采用数字伺服控制方式,如图 1-8 所示。

由图 1-8 可见,由伺服装置和位置检测装置构成闭环伺服系统,其重复定位精度可达 $\pm 0.2\text{mm}$ 。闭环伺服方式采用三种反馈调节,其中以位置反馈作为主反馈,力矩反馈和速度反馈作为局部反馈。下面分别阐述这三种反馈。

(1)位置反馈 以光电编码器作为位置检测元件与伺服电机同轴相联,当伺服电机转动时,光电编码器将测得的关节轴角位移转换成脉冲数字信号,脉冲频率与电机转速成正

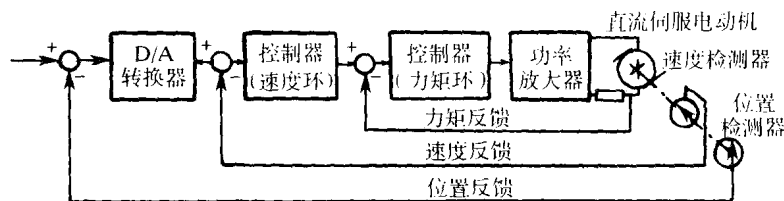


图 1-8 弧焊机器人单关节伺服原理图

比,这样送入比较器与计算机的控制脉冲数字序列相减,差值经 D/A 转换器转换为模拟量,即电压信号,经校正、放大后,驱动直流伺服电机带动关节旋转,以满足旋转精度要求。

(2)力矩反馈 由于直流伺服电机转矩与电枢电流成正比,因此在直流伺服电机电枢电路中串接一只电阻 R 来实现力矩检测,电阻 R 上的信号电压又与电枢电流成正比,将此信号电压反馈至放大器的输入端,就实现了力矩反馈,力矩反馈的目的在于减小伺服电机的时间常数,缩短过渡过程,提高系统的响应速度。

(3)速度反馈 这种反馈以交流测速发电机作为速度检测,它与直流伺服电机同轴相联,测速发电机电枢输出的电压信号与直流伺服电机转速成正比,将此电压信号反馈至输入端,与速度控制信号相减,经校正、放大后供给直流伺服电机。

下面再以日本安川电机制作所的电弧焊机器人为例,给出该机器人的技术参数如表 1-1 所示。

表 1-1 机器人驱动部规格参数

项 目		规 格
动作范围	S	最大:240°
	L	最大:前 40°、后 40°
	U	最大:上 20°、下 40°
	T	最大:360°
	B	最大:180°
瞬时最大速度	S	90°/s
	L	800(mm/s)
	U	1100(mm/s)
	T	150°/s
	B	100°/s
驱动电机	S	与 L、U 同
	L	腕型电机 750(W)
	U	UGCMEM-08FB ₂ XF
	T	印刷电路电机 200(W)
	B	PMES-12A2FX
重复定位精度		±0.2mm
可搬重量		100N

其驱动电机采用了整流特性好的无铁芯可动线圈型直流伺服电机,其中一种是防尘的腕型电机,一种是印刷电路电机。

§ 1.3 超声波工业自动清洗机

在机械加工行业中,零件需要经过清洗才能进入装配,许多场合对清洁度的要求较高,而诸如煤油手工清洗、高温高压水冲洗等传统清洗方式,不但劳动强度大,清洗环境恶劣,污染大而且往往不能达到要求。金属零件在加工过程中都带有切屑、油污、锈斑、粉尘等,以零件构造来看,很多又是半封闭、有沟槽的场合,要保证清洁度要求,就必须采用先进的清洗方式。

随着大功率超声波器件和电源技术的发展和日益成熟,使超声波清洗从体积、质量较小的电子元件清洗开始进入更大、更重、更脏的机械零件清洗,其清洗零件的原理即:由超声波发生器产生的高于 20kHz 的超音频电信号,通过换能器的压电逆效应转换成同频率的机械振动,并以超音频纵波的形式在清洗液中辐射,由于超音频纵波传播的负压区和正压区交替作用,产生无数超过 101.325MPa (1000 个大气压)的微小气泡并随即瞬时爆破,形成对清洗物件表面的细微局部高压轰击,使物件表面及缝隙之中的污垢迅速剥落,这即是超声波所特有的“空化效应”。

由清洗介质的“空化效应”可知,超声波清洗具有以下特点:

- (1)超声波清洗对高质要求、不规则大面积、夹缝、细孔、沟槽之类的表面特别有效。
- (2)清洗效率高,一般清洗时间为数十秒。

为保证清洁效果,还必须正确选择清洗剂 and 制定合理的清洗工艺。清洗剂作为超声波清洗介质,对超声波的起振和效果有十分重要的作用,目前主要有三氯乙烯(烷)有机溶剂、煤油和金属零件清洗剂,考虑到有机溶剂存在大气污染,煤油作为超声波介质效果不理想,而以水剂性的金属零件清洗剂为中性偏碱,可以中和零件(酸液)pH 值,在超声波中作为清洗介质,对零件去污、去油、除锈效果特佳,因此选择金属零件清洗剂作为超声波清洗介质,且国内已有不少厂家生产。

针对大多数机械零件的加工情况来看,清洗工艺流程可制定为四个单元,如图 1-9 所示。



图 1-9 金属零件超声波清洗工艺流程

该清洗工艺流程适用于大多数场合,因为经过两次超声波清洗,零件的污质已基本去除,再通过清水漂洗除掉清洗介质的化学成分,使零件完全呈中性,再进入防锈液处理,可保证装配时零件不重新生锈。

要实现超声波自动清洗,就必须首先明确清洗系统的要求,根据超声波的特点,应确定如下要求:

- (1)超声波清洗环境应由底部主超声波和侧面辅助超声波组成,尽量覆盖零件内外表