

机电一体化系统设计及应用

本章将分别介绍机电一体化的设计思路、机电一体化中的作用、成熟的机电一体化系统,以及机电一体化的基础知识、未来展望等内容,主要介绍一些相关知识、应用实例、简单例题等。



知识目标

- 了解机电一体化系统的设计方法。
- 了解机电技术在工业产品中的用途。
- 了解机电技术在生活中的用途。

3.1 机电一体化系统设计

本节将从机电一体化的驱动方式与传感器、执行机构与驱动元件、计算机与控制方式、系统与工作环境四个方面对机电一体化系统设计进行综合阐述。

3.1.1 驱动方式与传感器

传感器的选择不仅要考虑对其静态特性、动态特性的要求,还要考虑驱动元件的类型、驱动元件与执行机构的传动方式等。

例如,对于小功率位置控制系统而言,采用步进电动机或直流电动机都能满足驱动要求,但两者对传感器的要求是不同的。如果采用步进电动机,可以不使用任何位置传感器,通过开环控制执行机构的位置即可;如果采用直流电动机控制,传感器将有不同的安装方案,可以直接与电动机轴耦合,也可以将传感器直接与负载相连接,不同的测量方案对传动元件和传感器的要求也是不同的。为获得良好的控制性能和较高的性价比,需要对驱动方式和传感器的选择做一个综合考虑。

【例 3-1】 机器人某关节的角度范围为 $\theta = -90^\circ \sim +90^\circ$, 采用直流电机伺服驱动, 要

求角度测量精度为 $\Delta\theta=0.2^\circ$, 试选择传感器。

解: 依题意, 传感器分辨率为:

$$S_e = \frac{\Delta\theta}{Q_{\max}} \times 100\% = 0.11\%$$

因为 $S_e=0.11\%>0.1\%$, 角度范围 $Q_{\max}=180^\circ<340^\circ$ (角度传感器角度范围为 $0^\circ\sim 340^\circ$), 则选择电位计和光电编码器都能满足测量要求。

选用光电编码器, 设光电编码器的每转脉冲数为 n , 则其角度测量精度为:

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{n}$$

$$n = \frac{360^\circ}{\Delta\theta} = 1800$$

考虑到计算误差、控制误差等因素, 选择 $n=2000$ 的光电编码器, 具体选用增量式光电编码器, 其性能指标如下所示。

- ① 脉冲数: 2000 个。
- ② 信号形式: A、B 两相正交信号。
- ③ 最高允许转速: 5000rpm。
- ④ 使用寿命: 100 000 小时。

测量方案如图 3-1 和图 3-2 所示。

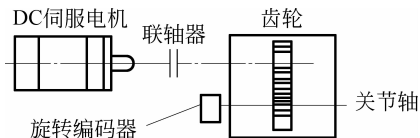


图 3-1 低速轴测量方案

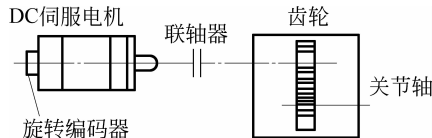


图 3-2 高速轴测量方案

当传感器安装在电机轴上时, 在同样测量精度下, 传感器的脉冲数为 $n' = \frac{360^\circ}{i \times \Delta\theta}$, 当减速器的传动比 $i=200$ 时, $n'=9$ 。选择 $n'=10$ 即可满足测量要求。由于每转脉冲数很少, 自行设计加工一个简单的光电编码器就能满足使用要求。也可选用市场上的光电码盘产品, 如 Maxon 公司生产的专门与直流电机配套的光电编码器, 脉冲数有 100 个、200 个和 500 个三种。选用 $n=100$ 的光电编码器, 测量角度测量精度为 $\Delta\theta=0.018^\circ$ 。Maxon Encoder 的性能指标如下所示。

- 型号: HDES100。
- 脉冲数: 100 个。
- 信号形式: A、B 两相正交信号。
- 最高允许转速: 5000rpm。
- 使用寿命: 100 000 小时。

【例 3-2】 已知某绳驱动式并联机器人, 负载由多根张紧的绳来驱动, 要求对每根绳的位置做精确控制, 试选择驱动方案和传感器。

解: 选择驱动方案。

实现绳的位移控制主要有三种方案。

方案一是电机通过控制绳在滚筒上转过的角度来实现对绳位移的控制,如图 3-3 所示。

方案二是电机经过丝杠螺母机构或齿形带传动机构将电机的转角转换成绳的直线位移,通过对电机的转角控制实现绳的位移控制,如图 3-4 所示。

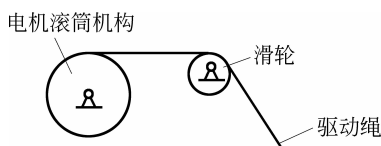


图 3-3 方案一原理图

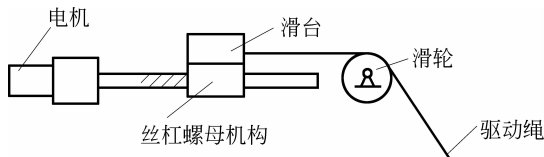


图 3-4 方案二原理图

方案三是采用直线电机直接控制绳的位移,如图 3-5 所示。

直线电机的成本较高,体积较大,重量也较大。把方案三和方案二相比较,一般优先选择方案二。

方案一与方案二相差不多,控制方法、控制性能也很相近,两种驱动方案各有优缺点,都可以作为候选方案。

绳位移的测量及传感器的选择。

由于电机驱动丝杠螺母传动机构技术已很成熟,滚珠丝杠具有较高的传动精度,直接测量电机转角的方法较为常用。如果使用齿形带传动,则应考虑采用其他测量方案。由于绳在滚筒上的轴向位移以及绳缠绕半径的变化对测量精度的影响等问题,直接测量电机轴的转角或滚筒的转角都很难获得高的测量精度,只能采用增加过轮来测量绳的位移,其测量原理如图 3-6 所示。

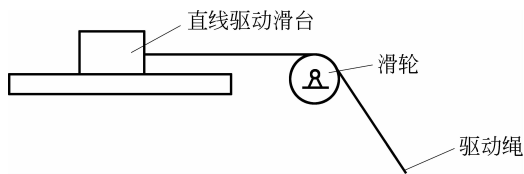


图 3-5 方案三原理图

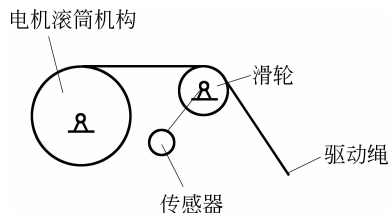


图 3-6 滚筒式驱动系统绳位移的测量原理

3.1.2 执行机构与驱动元件

同一运动功能可由多种执行机构来实现。在确定系统结构时,除了要满足主要性能指标要求外,还要考虑执行机构与其他结构要素之间的关系。合理地匹配执行机构与驱动元件可以提高系统的综合性能,降低系统的成本。

常用的执行机构按运动形式的不同可以划分为直线输出型和转动输出型两大类。与每一类执行机构相匹配的驱动元件既可以是转动输出型,又可以是直线输出型。

1. 直线输出型执行机构的驱动

(1) 由直线驱动元件直接驱动

由直线型驱动元件直接驱动负载以实现直线驱动。直线步进电机、阀控油缸、气压缸可以直接驱动负载,产生直线运动。直接驱动的优点是负载与驱动元件直接连接,不需要中间转换机构,负载的运动精度不受中间机构的影响,直接反映驱动元件的精度,执行机构结构简单。缺点是直线驱动元件的种类较少,尺寸较大。气压缸和阀控油缸结构比较简单,但需要控制阀、动力源等辅件,占地空间较大,液压源的噪声较大,也有环境污染问题。表 3-1 中列出了三种常用直线驱动元件的主要特点及适用场合。

表 3-1 常用直线驱动元件的主要特点及适用场合

种 类	直线步进电动机	阀 控 油 缸	气 压 缸
结构	复杂	较简单	简单
传感器	磁电式或直接开环控制	直线型位移传感器,行程受限制	直线型位移传感器,受制造工艺限制,行程不能太大
控制	使用专用控制器,开环控制;位置精度高,低速振动较大,有一定的负载	使用电液伺服阀控制,快速性好,负载能力强,可实现较高的定位精度	使用气压控制阀控制,快速性好,负载能力差,定位精度不高
适用场合	并联机器人等	并联机器人,包装机械、水下机器人等	包装机械等轻工机械,多用于开关控制
成本	较高		较低

(2) 由转动型驱动元件实现的直线运动驱动

转动型驱动元件经过一定的传动装置将其转动变换成直线运动以实现直线驱动。常用的驱动方式有:电机丝杠螺母机构(见图 3-7)、电机齿轮齿条(齿形带)机构(见图 3-8)和电机驱动的连杆机构(见图 3-9)。

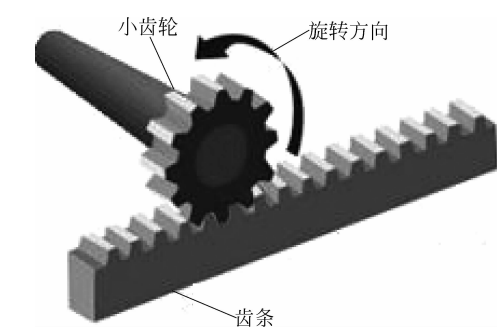


图 3-7 电机丝杠螺母机构

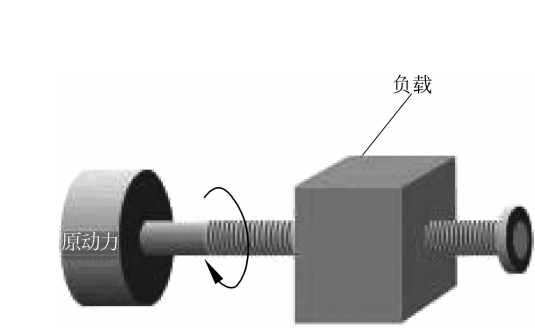


图 3-8 电机齿轮齿条(齿形带)机构

2. 转动输出型驱动机构

由转动输出型驱动元件直接驱动负载,或者通过减速器驱动负载,实现负载的转动运动。驱动元件既可以使用回转驱动元件,也可以使用直线型驱动元件。回转型驱动元件

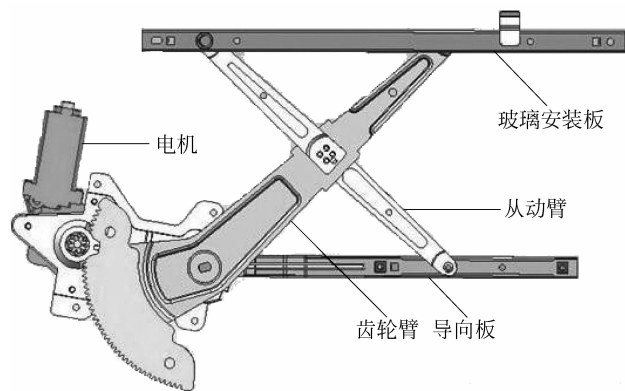


图 3-9 电机驱动的连杆机构

主要有电机、气压或液压马达等。使用电动机驱动时一般要使用较大传动比的减速器,以获得合适的运动速度和负载能力。在相同的负载条件下,液压电机比电动机齿轮机构的尺寸小、负载刚度大、快速性好。使用马达驱动时需要使用电液伺服阀和专用的液压动力源,但它对环境有污染,成本也比较高。使用液压缸通过杠杆机构也可以实现转动驱动。由于液压油缸比液压电机的结构简单、成本低,在实际中也被普遍应用。表 3-2 中列出了电动机、油缸和液压电机实现转动输出型驱动的特点。

表 3-2 电动机、油缸和液压电机实现转动输出型驱动的特点

种 类	直流电动机	液压摆动电机	直 线 油 缸
结 构	需要大传动比减速器,结构较复杂	直接驱动负载,电机的结构复杂	通过连杆机构驱动负载,油缸的结构简单
控制性能	负载能力较大,快速性较好,可实现较高的位置精度,回转角度无限制	负载能力大,快速性好,可实现较高位置精度,回转角度小于 270°	负载能力大,快速性好,非线性,控制精度较高,回转角度小于 180°
传感器	在高速端使用增量式编码器;在低速端使用绝对式编码器	使用编码器或电位计	使用直线传感器或角度传感器,直线传感器可置于液压缸内,具有良好的防水防爆功能
工作环境	较好的工作环境	可在需要防水、防爆的条件下工作	可在需要防水、防爆的条件下工作
控制方式	PWM 脉宽调制,大功率驱动电路	与电液伺服阀配套,小功率直流放大器电路	与电液伺服阀配套,小功率直流放大器电路
成本	与液压驱动成本相当	比液压缸成本高	比液压马达成本低
应用	工业机器人和数控机床	应用较少	并联机器人、喷漆机器人和水下机器人

【例 3-3】 要将一台 C20 型普通车床改造成经济型数控车床,要求纵向进给重复定位精度为 $\Delta l=2\mu\text{m}$,最大进给力为 $F_1=4000\text{N}$ 。试选择驱动方式。

解：在普通机床的数控改造中，多采用图 3-10 所示的电机、齿轮、滚珠丝杠传动机构。设齿轮的齿数分别为 z_1 和 z_2 ，丝杠的导程为 t ，丝杠直径为 d 。

(1) 计算折算到电机轴的扭矩。

$$T = \frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{d}{2} \cdot \frac{\pi d}{t} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot F_L = \frac{\pi d^2 z_1}{2 t z_2} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot F_L$$

式中： η ——传动机构的效率。

(2) 计算电机的转角精度。

$$\Delta\theta = \frac{z_2}{z_1} \cdot \frac{\Delta l}{t} \cdot 360^\circ$$

选 $\frac{z_2}{z_1} = 2$, $t = 4\text{mm}$, 则 $\Delta\theta = 0.36^\circ$ 。

选丝杠的公称直径 $d = 30\text{mm}$, $\eta = 0.7$, 则 $T = 10\text{N} \cdot \text{m}$ 。

从定位精度和驱动力矩来看，选用步进电机和直流伺服电机驱动都能满足要求。直流电机要采用闭环伺服控制，需要位置反馈传感器，成本要比采用步进电机高得多。在经济型数控车床满足指标要求的前提下，应优先选择成本低的驱动方案，因此应选择步进电机控制更合理。

【例 3-4】 已知一多关节式喷漆机器人，决定其位置空间的三个自由度分布如图 3-11 所示(具有腰回转、垂直臂俯仰和水平臂俯仰三个自由度)，要求确定执行机构方案和驱动方案。

解：这种结构的机器人有两种常用执行机构。一种是转动输出型执行机构，电机通过齿轮减速器驱动机器人的关节。另一种是直线输出型执行机构，由直线液压缸驱动关节转动，两种执行机构的结构原理如图 3-12 所示。

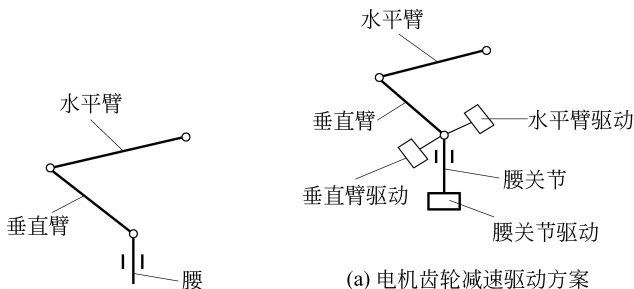


图 3-11 多关节式喷漆机器人

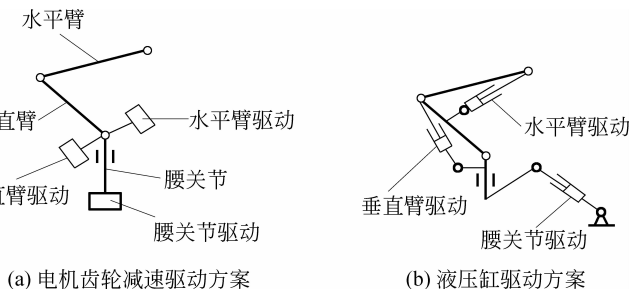


图 3-12 两种执行机构的结构原理图

转动型执行机构被称为方案(a)，腰关节直接与驱动器输出轴耦合，水平臂和垂直臂的驱动器以对称形式分别安装在肩关节的两侧，通过齿形带分别与肩关节和肘关节耦合。这种结构方案的优点是三个电机都安装在基座上，可以减小机器人的负荷及负载惯量，快速性好；缺点是结构较复杂，成本较高。

直线液压缸驱动方案被称为方案(b)。三个驱动器都为直线输出型，通过连杆机构将驱动器的直线位移转换为关节的转角。这种方案的优点是结构比较简单，缺点是驱动

机构把直线位移转换到转角的过程存在非线性。

通常在设计工业机器人时,工作性能应作为主要因素来考虑。方案(a)的结构比较紧凑,快速性好,手臂的外形也比较规整,比较适合于各种装配、焊接等作业。由于工业机器人都有一定的负载能力,尺寸也比较大。方案(b)系统中要使用专用的液压站和一些液压附件,系统比较复杂,单从这点来考虑,方案(a)更合理。

3.1.3 计算机与控制方式

1. 基本原则

对于一个机电一体化系统,可能有多种控制方案来实现同一个控制功能。在选择控制计算机时,除了要考虑保证实现系统的基本控制功能、满足性能指标要求,还要综合考虑其他一些因素,应综合多种因素做出最佳选择,这些因素包括:

- ① 单件小批量还是大批量生产;
- ② 一般工业产品还是满足特殊要求的产品;
- ③ 产品开发还是科研样机;
- ④ 工业产品还是民用产品。

2. 实例分析

【例 3-5】 已知 5 关节水下作业机械手,采用液压缸伺服控制,关节角度反馈传感器为电位器,控制方式为主从控制,要求各个关节的频率响应带宽为 $\omega_c=10\text{Hz}$,试确定控制方案。

解: 题目提出了响应带宽的要求,因此必须考虑计算机的运算速度问题。在实际工程中,考虑到采样周期的对系统延迟的影响,一般采样频率 ω_s 应为系统带宽的 10~15 倍。选择 $\omega_s=15\omega_c=150\text{Hz}$,所以采样周期为 $T_s=\frac{1}{\omega_s}=6.7\text{ms}$ 。

(1) PC 集中控制方案

已知机械手有 5 个关节,5 个关节都需要实时控制,若采用一台计算机对 5 个关节进行控制,则每个关节的数据处理时间应少于 $\frac{T_s}{5}=1.34\text{ms}$ 。也就是说要在 1.34ms 的时间内完成对两路传感器信号的 A/D 采样、控制算法和一路 D/A 输出。对 PC 的运算速度有一定要求。PC 集中控制系统方框图如图 3-13 所示。

(2) PC 单片机主从控制方案

在主从控制方案中,PC 的主要任务是采样主手和从手的关节位置信号,显示作业机械手的工作状态,管理工具库,处理故障和保障安全,向从手发送控制命令。关节控制单片机的任务是完成对某一个关节的伺服控制。控制系统方框图如图 3-14 所示。

因为每个关节都有自己的控制单片机,5 个关节同时工作,因此每个单片机要有约 6.7ms 的采样时间。在 6.7ms 的时间里每个单片机都要完成一路 A/D 采样,伺服控制算法,D/A 输出,与 PC 做一次串行通信。一般单片机的指令周期都不小于 $2\mu\text{s}$,在

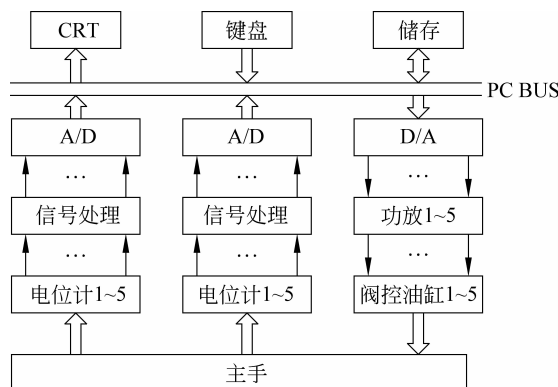


图 3-13 PC 集中控制方案

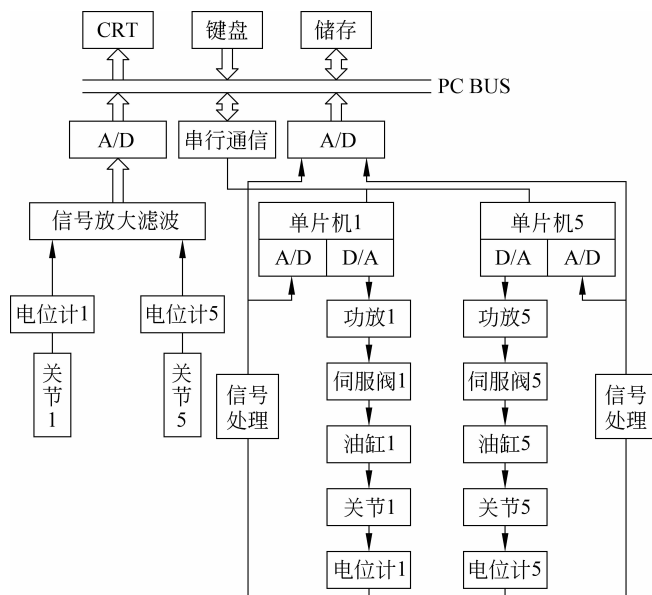


图 3-14 PC 单片机主从控制方案

6.7ms 内完成上述操作,时间是很充分的。

对于本例中的水下机械手,采用PC单片机主从控制方案更合理。

【例 3-6】 已知 5 关节教学机器人,采用直流电机伺服控制,关节传感器为增量式光电编码器。要求具有手动示教盒功能、PC 控制功能。试设计系统的控制方案。

解: 由于机器人具有多个控制回路,其关节采用直流电机伺服控制,完成示教再现功能需要较大的数据存储空间,采用分级式控方案比较合理。根据要求,控制系统方框图如图 3-15 所示。

当转接插座与 A 接通时,系统工作于 PC 控制方式;当转接插座与 B 接通时,系统工作于手动示教再现控制方式。

(1) PC

通过键盘和人机对话界面对机械手实现关节点位示教、运动轨迹规划示教和数据自

动再现、程控方式,使机械手按指定轨迹运动。

(2) 手动示教盒

通过按键完成机器人的关节示教,具有数据存储、工作状态显示等功能,通过串口与关节控制单片机进行一对多通信,其硬件方框图如图 3-16 所示。其中键盘用来输入示教、再现等命令;EPROM 用来固化控制程序;FLASH RAM 用来保存示教数据,它具有掉电数据保护功能;LED 显示器用来显示命令状态或关节角度值。串口符合 RS-232C 串行通信接口电平标准。

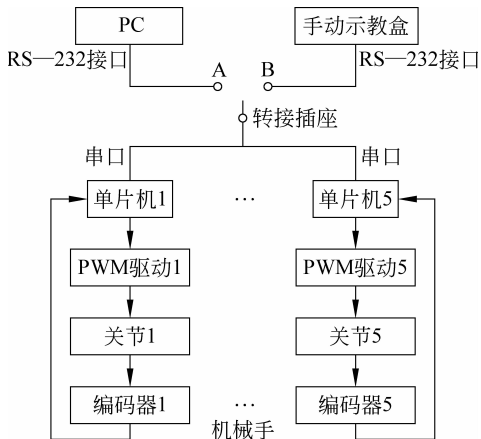


图 3-15 控制系统方框图

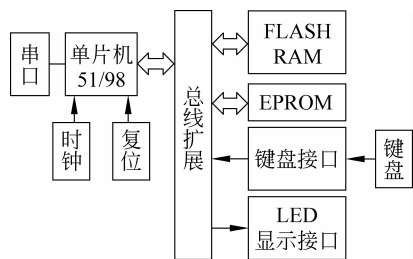


图 3-16 机器人手动示教盒硬件方框图

(3) 关节控制单片机

关节控制单片机的主要作用是实现单一关节的 PWM 伺服控制,接受主机的动作命令并向主机反馈关节状态。其硬件方框图如图 3-17 所示,关节控制单片机选用 Atmel 公司的 AVR 单片机,它自带 FLASH RAM 和 EEPROM,不需外部扩展存储器,自带 PWM 接口,通过 H 桥功率放大器,控制直流电机工作。通过高速事件处理端口采集编码器的信号。

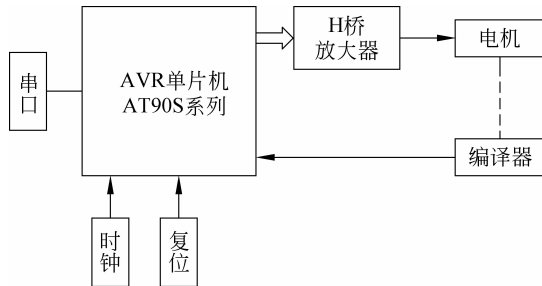


图 3-17 关节控制单片机系统硬件方框图

3.1.4 系统与工作环境

机电一体化产品以其性能优势和技术上的优势被广泛地应用于各种场合。由于使用

环境的不同,对机电一体化产品的性能也提出了不同的要求。在机电一体化产品的开发研制过程中必须充分地考虑这些要求,这样才能获得良好的工作效果。环境对机电一体化产品的要求可以从以下几个方面来考虑。

1. 工作环境与构件的材料

机械结构是机电一体化系统的重要组成部分。在选择机械传动件、结构件的材料时,除了必须考虑对结构的强度要求、刚度要求和重量要求外,还必须考虑使用环境的要求。如图 3-18(a)所示为用于海洋开发的机电一体化产品,我们必须考虑材料的耐腐蚀性和耐腐蚀性问题;如图 3-18(b)所示为用于航天的产品,必须考虑环境的温度变化对材料性能的影响和宇宙射线对材料理化特性的影响;如图 3-18(c)所示为医疗产品,必须考虑材料是否对人体有害、是否防锈等指标。

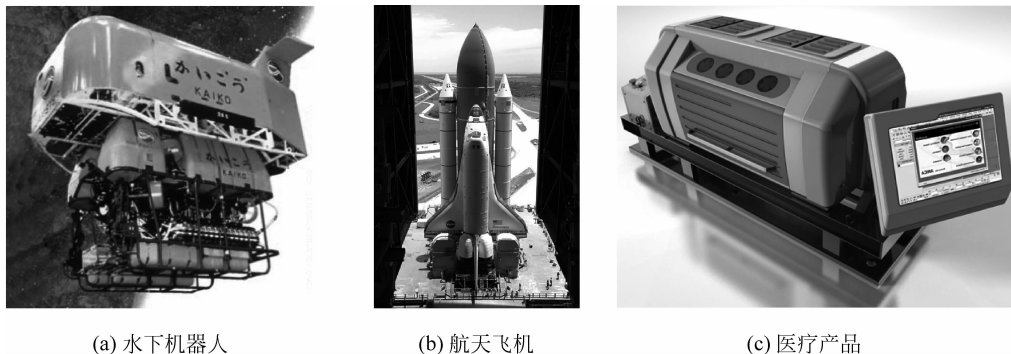


图 3-18 机电一体化产品

2. 工作环境与控制系统

由于许多环境都存在各种电辐射、电网干扰、振动等干扰因素,这些对控制系统是非常有害的。如果处理不当,会直接威胁系统的工作安全。因此,在选择机电一体化系统的控制方法时,必须考虑工作环境的特点,采取必要的措施,这样才能保证机电一体化系统安全可靠地工作。

(1) 家用电器

家用电器的工作环境相对较好,短时的停止或失控一般不会造成太严重的后果。提高家电的抗干扰能力会增加其成本,因此一般不需对其进行抗干扰设计。但是,对于一些涉及家电安全和人身安全的问题,在开发家电产品时必须加以考虑。如图 3-19 所示的热水器的缺水保护、断电保护和漏电保护;如图 3-20 所示的电冰箱突然停电,对压缩机的保护等。

(2) 办公设备

办公设备的工作环境相对较好,办公室内一般不会有大功率的设备,各种干扰相对较小,一般不需要对控制系统提出特殊的要求。在选择控制系统时主要考虑使其体积小、移动方便、操作简便、功耗小、噪声低、通用性好等问题。