

一种新型的用于空间作业的 模块机器人*

许忠信 陈 丰

(郑州工学院)

摘 要: 本文引入了模块机器人的概念, 并介绍了多自由度手臂、自动对中手腕及柔性手的设计要点。

关键词: 机器人, 模块化

目前, 多数机器人是根据用户要求进行整机设计和制造的。近年来, 国外开始发展模块机器人 (Modular Robots)。模块机器人是由标准的相互独立的制造模块组成, 通常每个模块有驱动部分、动力源等。将不同的模块组合在一起, 根据工作要求设计出整机控制系统, 则构成具有特殊功能的机器人。采用这种方式构成的机器人经济性好, 功能灵活, 适应性强。此外, 还可减少整机设计的复杂性, 避免重复性劳动, 使机器人保养、维修标准化。

将“模块化原理”引入机器人设计, 设计了一种用于空间作业的模块机器人, 该设计已通过技术鉴定。模块机器人中设计了多自由度手臂、自动对中手腕和三指柔性手指等子模块。这些子模块可组合成多种功能要求的模块机器人, 图1是其中一种组合方式。本文将分别对手臂模块、自动对中手腕、三指柔性手爪的设计要点作一介绍。

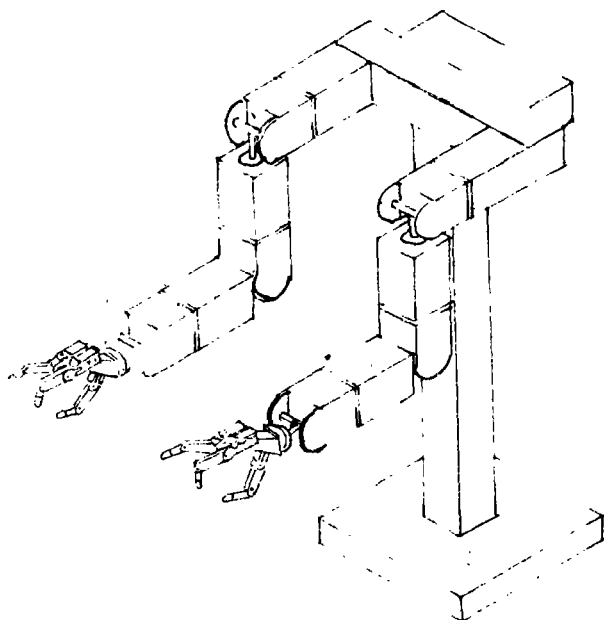


图1 模块机器人组合形式之一

1 手臂模块

1.1 方案选择

手臂是机器人的主要执行部

* 收稿日期: 1989.04

件,其作用是支承手部和腕部,并改变手部在空间的位置。因此手臂模块设计方案的优劣将直接影响模块机器人的工作性能。在美国 Mack 公司模块机器人系统中,关于手臂的基本部件有①X 坐标、Y 坐标、Z 坐标传送器;②俯仰回转器、翻滚回转器等。前者可用于组成直角坐标型机器人,后者可用于组成关节型机器人。考虑到关节型机器人具有工作空间大,运动灵活,能完成多姿态作业等特点,本文设计选择了后者。为使手臂结构紧凑,减小偏重力矩,现将俯仰、翻滚回转器合二为一,设计能同时实现摆动、转动两种运动的手臂模块。

参考有关资料,设计时拟定了两种方案。第一个方案是模块的两个自由度在一端输出(图 2);第二个方案是两端各输出一个自由度(图 3)。

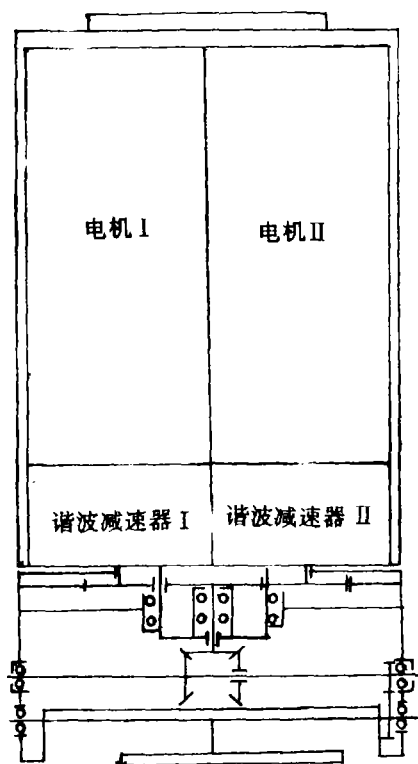


图 2 一端输出型

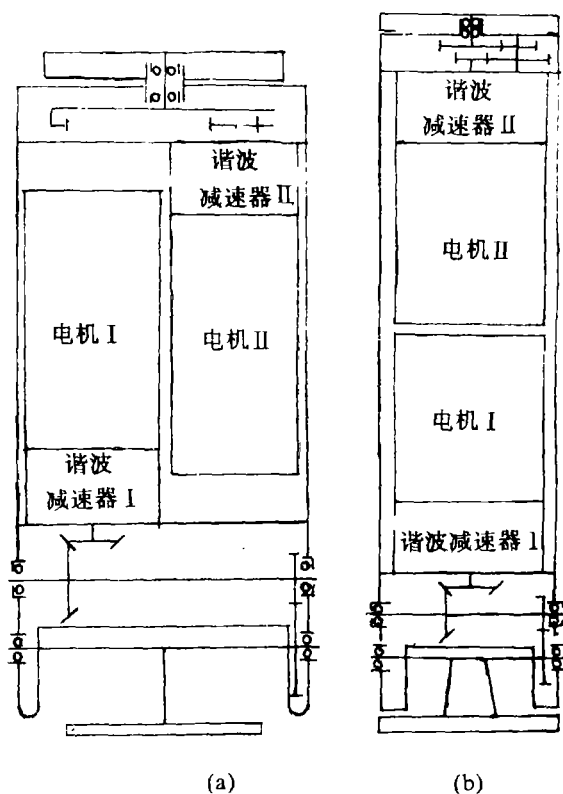


图 3 两端输出型

模块的组合方式可以是多样的。如图 1 所示。按方案一的模块组合,将具有两个自由度的一端布置在腕部,显然腕部的灵活性好,但与腰身相结合的一端由于不具有运动自由度,使手臂的活动区域缩小。如果按方案二的模块组合,则腕部只有一个自由度,灵活性不够。因此,比较理想的组合应该是,机器人的小臂选用方案一的结构形式,以保证腕部的灵活性。而大臂采用方案二的结构形式,使肩关节得以摆动,以保证机器人有足够的工作空间。

在方案二中,又可以将电机在结构上布置成串联和并联两种形式。串联布置(图

3a) 使手臂轴向尺寸加长, 活动范围增大, 适合于舱外作业机器人。并联布置 (图 3b) 可以缩短手臂的轴向尺寸, 增强运动的灵活性, 减少偏重力矩的影响, 适合于舱内作业。

1.2 设计特点

对于空间机器人, 重量轻、体积小、结构紧凑极为重要, 为此, 我们采取了如下措施 (1) 在传动系统中, 采用能获得大传动比的谐波减速器 ($i=238$) 作为减速机构; (2) 采用“电机—谐波减速器—光学码盘”一体化组合体; (3) 选用轻质材料。手臂模块的壳体选用碳纤维/环氧树脂 M40/618, 其它附件选用锻铝 LD10。碳纤维/环氧树脂是目前国外航天飞行器中应用最广泛的新型复合材料。LD10 构件在真空中工作, 经过辐射及高温交变实验, 证明适用于空间环境。从表 1 可以看出, 与一般钢材 (如 45[#]钢) 相比, 这两种材料具有比重小、比强度高、比模量大的优点。

表 1 M40/618, LD10 与 45[#]钢性能比较

材料型号	比重 γ	抗拉强度 σ_b (kg/mm^2)	比强度 σ_b/γ	弹性模量 E (kg/mm^2)	比模量 E/γ
M40/618	1.61	84.6	52.5	22900	14223.6
LD10	2.80	46	16.42	6955	2464.3
45 [#]	7.85	70	8.9	20000	2547.8

空间机器人处于高真空的工作环境。通常真空环境摩擦系数比地面情况高得多。另一方面, 一般润滑油在真空中易挥发, 难以胜任。为此, 我们选用固体润滑剂。固体润滑剂有四种使用方式: ①整体使用; ②以各种覆盖膜的形式使用; ③以复合材料或组合材料的形式使用; ④直接使用粉末固体润滑。根据不同情况, 我们分别采用第②、③、④种润滑方式: 对轴承和齿轮机构进行 MoS_2 溅射膜润滑; 轴承保持架采用复合润滑材料—聚四氟乙烯+玻璃纤维+ MoS_2 制造; 对谐波减速器采用 PFPE 润滑脂进行润滑。PFPE 润滑脂是以全聚醚润滑油为基油, 以聚四氟乙烯 (PTFE) 粉末为增稠剂的润滑脂。国外对这种润滑材料的试验结果表明, PFPE 润滑脂能充分满足机械部件长寿命的设计要求。

2 自动对中手腕

腕部是机器人的重要部件之一。根据要求, 所设计的腕部应能顺利完成嵌套作业, 即插棒入孔。为满足这一要求, 通常有两种方法, 一是通过力和力矩的测定来实现反馈控制, 完成插入动作。另一种方法是不利用传感器而靠机构本身完成正确的插入。在这方面, 国外已研究了几种机构, 如美国麻省理工学院 CSD 实验室的 RCC (Remote Centre Compliance) 等。参考有关文献⁽²⁾, 采用 RCC 原理, 设计了一种自动对中装置, 即自动对中手腕, 它是机器人与操作工具间的一个接口。自动对中装置使机器人能够顺利完成嵌套作业。

进行嵌套作业时可能遇到两类偏差: 棒与孔不对中时有水平误差, 棒与孔不平行时有倾角误差。自动对中装置包括两套四连杆机构—矩形连杆机构和梯形连杆机构, 它们可分别消除水平误差与倾角误差。棒的插入过程可用图 4 表示: 设需插入的圆棒在孔口倒角

处与孔有倾斜接触 (图 4a), 在接触反力的作用下, 装置的矩形连杆机构使棒得以产生平动, 消除水平误差 (图 4b), 在反力的进一步作用下, 装置的梯形连杆机构使圆棒产生一个微小的转角, 消除倾角误差 (图 4c)。显然, 分析的顺序是可以互换的。实际上, 上述调整过程是由许多连续的微小运动的积累完成的, 其中每一步微小运动都包含平动和转动两种运动。

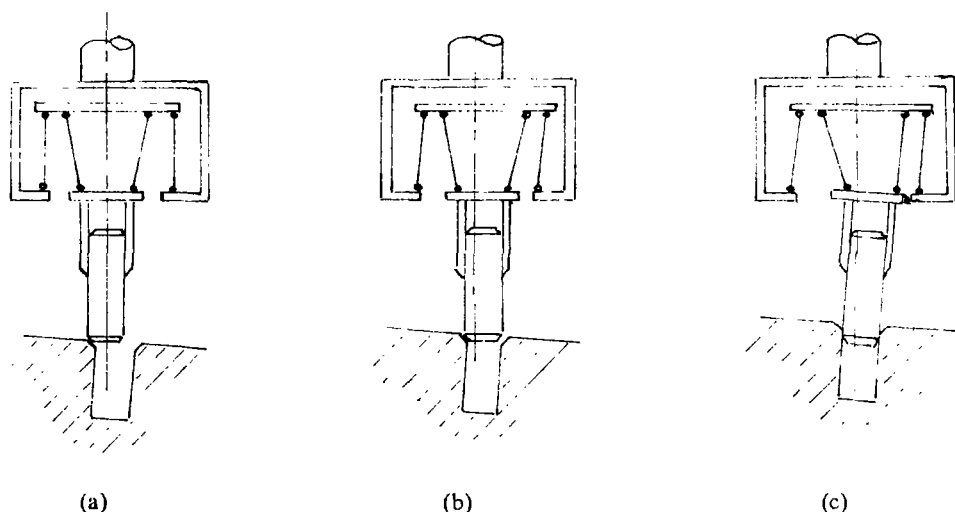


图 4 自动对中装置工作原理图

整个对中装置是三维空间装置, 因此装置每两盘之间的连杆实际为三根。连杆与盘的连接应具有球铰链性质, 为使装置结构紧凑, 采用了钢丝代替球铰, 即圆盘之间的六根连杆均用钢丝代替。钢丝是柔性的, 因此在钢丝上套有压缩弹簧以保证钢丝都处于受拉状态。

3 柔性手

传统的两指单自由度手部不能适应物体外形的变化, 以致不能对不同物体进行抓取及操作。为了使机器人模拟人手功能, 能对操作物施加任意方向的力和力矩, 进行位移和姿势的调整, 设计了具有力反馈的多关节三指柔性手。

3.1 动力传递分析

驱动装置选用直流伺服电机。为了简化手部结构, 减少机器人偏重力矩, 把电机放在机器人臂后, 通过软索将力传到各指关节。

对于 n 个双向旋转的单自由度转动副, 驱动软索的最小数目为 $n+1$, 每根软索均为独立驱动源, 因此, 多了一个附加自由度, 控制这个附加的驱动自由度, 可以使所有软索的内部张力为非

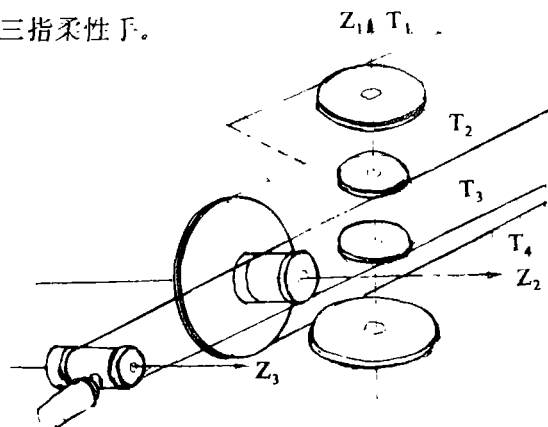


图 5 单个手指传动原理图

负,且绝对值为最小。虽然该柔性手的9个关节可以用10根软索驱动,但是这样一来,形成了各手指驱动系统间的相互耦合,从而导致控制系统的软硬件不能按模块化设计。因此,共采用了12根软索,即以每4根软索驱动每个手指的三个关节,使得手指之间的驱动相互独立。图5为单个手指的传动原理图。

根据图5所示的软索传递方式,软索张力与关节力矩关系为:

$$\mathbf{m} = \mathbf{R} \mathbf{T}, \quad \bar{\mathbf{T}} = \mathbf{R}^{-1} \bar{\mathbf{m}} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{m} = (m_1, m_2, m_3, m_4)^T$

m_1, m_2, m_3 为关节力矩, m_4 为张力因子。

$\mathbf{T} = (T_1, T_2, T_3, T_4)^T$, 为软索张力。

\mathbf{R} 为手指各关节的导轮半径所决定的常数矩阵。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -R_1 & R_2 & R_2 & -R_1 \\ R_3 & R_4 & -R_4 & -R_3 \\ 0 & R_5 & -R_5 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

关节力矩 \mathbf{m} 的第四个元素 m_4 是一个特殊元素,由式(1)、(2)可以得到:

$$m_4 = \sum_{i=1}^4 T_i$$

所以, m_4 的值是作用于 Z_1 轴的软索合力。 m_4 的作用是使所有软索的内部张力为非负,且绝对值最小,这需要在控制中对 m_4 加以选择。

$$\text{令: } \mathbf{R}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1(1 \times 3) & c_1 \\ \mathbf{E}_2(1 \times 3) & c_2 \\ \mathbf{E}_3(1 \times 3) & c_3 \\ \mathbf{E}_4(1 \times 3) & c_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由(3)式,得软索张力:

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{E}_i \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} + c_i m_4, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

式中: \mathbf{E}_i, c_i 均为 \mathbf{R}^{-1} 的元素。

$$\text{取: } m_4 = \max_i \left(-\frac{1}{c_i} \cdot \mathbf{E}_i \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} \right)$$

可以使: $T_i \geq 0$, $i = 1, 2, 3, 4$

将导轮有关结构尺寸代入以上矩阵, 可以求出软索张力与各关节力矩的关系^{〔1〕}。

通过力学分析, 找出了手指机构的力学与运动条件, 列出了驱动软索的力与位移真值表^{〔1〕}。

3.2 传感器

在当前初步研究阶段, 只设计了力觉传感。力传感是机器人柔性手所必须具有的, 这是因为手指的力必须受到控制, 否则, 当手指和物体之间的状态和力发生细微而迅速的变化时, 手指就适应不了。

传感器的结构如图 6 所示, 用弹性材料 30W₄Cr2VA 制造的悬臂梁安装于手指根部, 通过贴在悬臂梁上的应变片来检测软索的张力。由于传感器的位置在手指根部, 使得在力的检测值中, 电机电刷间的摩擦、软索与索套之间的摩擦等造成的误差被排除在外。同时, 因为检测的是驱动器输出的力, 而不是手指关节上的输出力, 这样可以得到较高的力伺服频率。

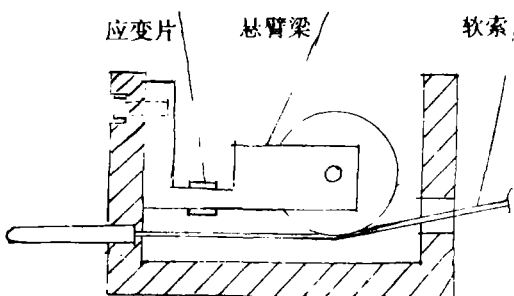


图 6 传感器示意图

在设计过程中, 机械系夏恒青老师给予了热情指导; 马浩、陈亮、纪会明等同学参加了设计工作, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- (1) 航天部502所、郑州工学院. 简易空间机器人机械部件结构设计. 1989.9
- (2) Francois Lhote. Robot Components and Systems. Volume 4. 1984
- (3) J.N.Herndon. Telerobotic Technology for Nuclear and Space Application
- (4) 张启先. 空间机构的分析与综合. 机械工业出版社. 1984.3
- (5) 航天部501设计院. 航天飞行器材料汇编. 1984

A New Type of Modular Robot for Space Operation

Xu Zhongxin Chen Feng
(ZhengZhou Institute of Technology)

Abstract: The article introduces the modular robot and design of some modules including multiple degree of freedom arm, automatic centering wrist and flexible hand.

Keywords: robot, modularity