

工业机器人的一种性能测试系统

罗志增 叶振忠

(杭州电子工业学院机器人研究所)

摘要 工业机器人性能测试系统是对工业机器人的各项性能指标进行综合测试的全套装置。机器人的性能指标包括最大工作空间、局部位置精度和重复精度,单轴速度与合成速度,单向加速度和合成加速度,手爪姿态(方位、俯仰、旋转)等。本文系统地阐述了一种机械接触式测试系统的组成、结构特点、测试参量的设置、输出、姿态角的实现与换算,并对测试范围、测试性能指标做出了具体规定。另外,对系统数据处理及软件的组成也作了较详细的论述。

关键词: 机器人, 性能, 综合测试, 姿态, 坐标变换。

1 引言

机器人性能测试方法基本上可分为: 测量头法、机械测量方法和光学测量方法。前两种是属于接触式的, 后一种是非接触式的。下面分别对这三种测试方法作一简单介绍。

对工业机器人的单项性能指标进行测试, 测量头法是一种既简单又有效的方法。它测试过程简单、造价低, 但测试性能单一。若要对一台工业机器人进行综合性能测试, 必须同时具备各种功能的测量头, 并且测试过程要经过多次装卸, 既费力又费时, 此外它还受机器人外形结构的限制, 象手爪姿态这样一些性能指标很难用测量头法来实现。

机械测试装置是利用机械多杆机构跟随机器人作编程运动, 将机构运动副上的信息传感器采样, 经数据处理后来描述机器人运动性能的一种测试装置。首先, 测试机的工作空间必须包容机器人的工作空间。其次, 测试机的分辨率必须比机器人在精度上高一个等级。由于机械测试装置的机械传动部分必然存在误差, 这要求在数据处理上对误差进行一定的补偿。要得到一台高精度的测试装置, 还必须选择较优越的机械结构, 较高的零件加工精度。

光学测量仪器具有较大的测量范围和多种应用的可能性。迄今为止提出的光学测量仪器的不足之处是绝大多数价格昂贵, 较难应用于实际作业场合。

本文叙述的测试系统是一种机械测试系统, 只要将测试机的机械接口与工业机器人相联结, 就可根据要求自动测出工业机器人的各种性能参数。

2 测试系统的测试项目与测量范围

- 1) 测试空间: $800 \times 1000 \times 150^\circ$
- 2) 测试速度范围: $0 \sim 1200 \text{ mm/s}$
- 3) 测试加速度范围: $0 \sim 20 \text{ g}$
- 4) 测试精度等级: 位置精度及重复精度均在 0.05 mm 以内。

3 测试机的构成

本测试机由手爪姿态测量头, 位姿保持机构, 平衡机构, 测量机体, 升降机构和机械接口等部分组成。

3.1 机构的选定

多关节机构具有结构紧凑, 活动空间大的优点, 但坐标变换相对复杂, 还因机器人的工作点的某一坐标与所有角参量有关, 那么任何一角参量的误差均导致工作点坐标的误差。

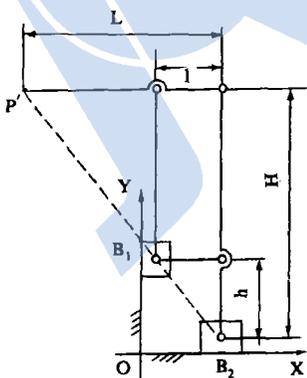


图1 测试机构原理

观察图 1 的机构, 当 $\frac{L}{l} = \frac{H}{h} = m$ 时, $P'B_1B_2$ 成一直线, 它具有下列特点, 即固定 B_1 移动 B_2 时, 目标点 P' 作平行于 X 轴的移动:

$$\Delta x_{P'} = -m \cdot \Delta x_{B_2} \quad (1)$$

同理, 固定 B_2 移动 B_1 时有:

$$\Delta y_{P'} = m \cdot \Delta y_{B_1} \quad (2)$$

根据这个原理, 可以很容易将目标点 P' 的运动分解成两个垂直的分量, 分别对应于 B_1B_2 的坐标, 其坐标变换仅差一个常数比。假设 P 点是机器人的工具中心点(TCP 点), 它与 P' 点相差一个水平位移坐标, 那么很容易将机器人工具中心点的坐标测出, 并经过一定的转换最终成为固定坐标系上的坐标。

3.2 机构运动副的坐标变换

上述是平面机构, 要实现对机器人空间运动的检测, 还必须将 B_1B_2 的基座设置在一旋转副 θ 上, 构成一柱坐标, 这样本机构就能在指定的空间内实施检测。

以 B_1B_2 移动副的交点 O' 为基点, 建立基准坐标 $O'-X'Y'Z'$, 机构的柱运动坐标是 $O-XY\theta$, 那么, 机器人工具中心点 P 由圆柱坐标参量 $P(x, y, \theta)$ 向基准坐标 $O'-X'Y'Z'$ 转换的关系式是:

$$x' = x \cos \theta \quad (3)$$

$$y' = x \sin \theta \quad (4)$$

$$z' = y \quad (5)$$

对(3)、(4)、(5)式微分一次可得 P 点的速度表达式:

$$\dot{x}' = \dot{x} \cos \theta - x \sin \theta \cdot \dot{\theta} \quad (6)$$

$$\dot{y}' = \dot{x} \sin \theta + x \cos \theta \cdot \dot{\theta} \quad (7)$$

$$\dot{z}' = \dot{y} \quad (8)$$

对速度表达式再微分一次可得加速度表达式。

3.3 机构尺寸和姿态保持机构

在保证工作空间 $800 \times 1000 \times 150^\circ$ 的前提下, 为使机构尽量紧凑, 进行了机构可行优选, 考虑到机构运动时不发生干涉, 即两杆的最大夹角不超过 150° , 最小夹角不小于 30° 的前提下, 得出下列尺寸:

$H=L=924$; $h=l=154$; B_1 在 $O-XY\theta$ 坐标里的移动范围 $87.4 < y_{B_1} < 212.4$; B_2 在 $O-XY\theta$ 坐标里的移动范围 $54 < x_{B_2} < 254$ 。

(计算程序略。)

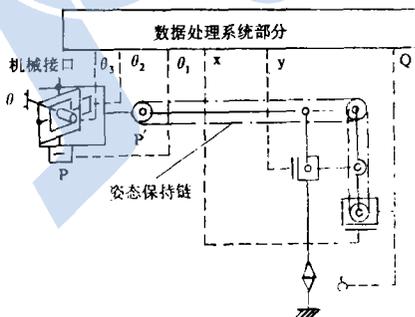


图 2 测量系统示意图

柱坐标。

测量时将本测试机的机械接口与工业机器人的机械接口相联接, 当工业机器人作编程运动时, 带动测试机作相应的空间运动, 此时对机器人的位姿采样:

由于本测试机设置了机器人手爪姿态的测试内容, 故增加了测量头的位姿保持机构, 其基本原理是基于平行四边形机构在运动过程中能保持其姿态不变的特性。此处则利用等直径带轮通过钢带的连接来实现这种性能的(图 2 所示)。

4 测量方法

测量系统示意图如图 2 所示, 选用高精度的电位器作姿态角测量的传感器, 所测参数分别是:

θ_3 : 旋转角; θ_2 : 俯仰角; θ_1 : 方位角。其他三参数 x 、 y 、 θ 是机器人工具中心点的

- 1) 机器人手爪姿态参数 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 ，从三个高精度电位器上得到。
- 2) 两个直线感应同步器和基座转角传感器测出滑块 B_1 、 B_2 的移动量和整个基座的角位移，可根据前述关系求得工具中心点的基准坐标。
- 3) 在机器人连续运动过程中(在线编程运动)，对信号 (x, y, θ) ； $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 进行逐点连续采样，就可以得出其在指令状态下的运动轨迹，与机器人的编程轨迹相比较可得轨迹精度和重复精度。

5 坐标转换

设 P 为工业机器人的工具中心点， Q 为手爪中心点，并记 $\overline{PQ} = a$ 为机械接口链长度，规定 θ_1 ：逆时针为正； θ_2 ：逆时针为正； θ_3 ： θ_3 转动矢量沿 \overline{QP} 为正。则空间变换是：

$$\begin{bmatrix} x_Q \\ y_Q \\ z_Q \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & ac_{1+\theta}c_2 \\ 0 & 1 & 0 & as_{1+\theta}c_2 \\ 0 & 0 & 1 & as_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

考虑到工业机器人有其自身的坐标，假定它是 $o-uvw$ ，并且由 $O'-X'Y'Z'$ 向 $o-uvw$ 转换的矩阵是 C ，则：

$$\begin{aligned} \vec{R}_p &= C(\vec{R}_{p'}) \\ \vec{R}_{p'} &= C^{-1}(\vec{R}_p) \end{aligned} \quad (10)$$

其中： \vec{R}_p 是 P 点在 $o-uvw$ 上对应的向量； $\vec{R}_{p'}$ 是 P 点在 $O'-X'Y'Z'$ 上对应的向量。

6 参数的检测

为了较准确地检测出直线位移分量的情况，我们采用了直线式感应同步器作为传感器元件，并配上数显表 ST2 作为二次仪表，从而使直线位移检测的分辨精度达 $1.5\mu\text{m}$ 。

同样，在对角位移情况进行检测时，采用的是分辨率可达 2 角秒的旋转式感应同步器及配套的数显仪表 ST1。

经检测元件和二次仪表之后，各运动分量的位移量即可成为 BCD 码或相应的脉冲信号量输出。考虑到机器人测试系统除了要对机器人的各静态指标进行测试外，尚需对其速度和加速度变化情况作全面衡量和考核，因此，二种位移分量的输出形式中，究竟以哪种和计算机相连为宜，需要作一些具体分析。

由(6)、(7)、(8)式得知，机器人腕部关节在 X 、 Y 、 Z 三个方向的速度分量是和二个直线位移分量 x 、 y 及其一阶导数 \dot{x} 、 \dot{y} 以及一个旋转位移分量 θ 及其一阶导数 $\dot{\theta}$ 有关。因 x 、 y 和 θ 可从二次仪表输出的 BCD 码或通过计算机对位移脉冲信号量的计数接收中得到，而 \dot{x} 、 \dot{y} 和 $\dot{\theta}$ 却只能以差分逼近的方式来获取，即：

$$\dot{x}(t_n) \approx \frac{x(t_{n+1}) - x(t_n)}{t_{n+1} - t_n} \quad (11)$$

$$\dot{y}(t_n) \approx \frac{y(t_{n+1}) - y(t_n)}{t_{n+1} - t_n} \quad (12)$$

$$\dot{\theta}(t_n) \approx \frac{\theta(t_{n+1}) - \theta(t_n)}{t_{n+1} - t_n} \quad (13)$$

其中 $x(t_n)$ 、 $y(t_n)$ 和 $\theta(t_n)$ 为时刻 t_n 的位移采样值； $x(t_{n+1})$ 、 $y(t_{n+1})$ 、 $\theta(t_{n+1})$ 为时刻 t_{n+1} 位移采样值； $\dot{x}(t_n)$ 、 $\dot{y}(t_n)$ 、 $\dot{\theta}(t_n)$ 为时刻 t_n 时各位移分量的一阶导数。

从上面三式不难发现，只有在时间间隔 $(t_{n+1} - t_n)$ 取得足够小，并且，时间间隔内的位移差值也很准确的情况下，右边的差分才有可能逼近时刻 t_n 时各位移分量的导数值。

当以 BCD 码输出形式和计算机相联，并以定时采样方式来获取各位移分量时，尽管电路的

设计较为简单,但由于每次位移的采样值中都不可避免会有最大为 ± 1 个基本位移单位的误差,因而,为确保时间段内位移差值的准确性,须将采样时间间隔取长些。这样的话,时间段内的差分计算精度可望提高,但结果却已无法真正逼近时刻 t_n 各位移分量的导数值。若将采样时间间隔取少些,那么因位移增量误差相对较大,就难免导致 $\dot{x}(t_n)$ 、 $\dot{y}(t_n)$ 和 $\theta(t_n)$ 值的不准确。况且,由于机器人运动较复杂,通常难以事先确定合适的采样时间。

若考虑以若干个精确的位移脉冲作为触发信号,用时标脉冲当量对时间段进行测量,那么,即使在测试时间的过程中有可能产生最大为 ± 1 个时标脉冲当量的误差,也因一个时标当量值远小于一个位移基本单位内的时间,从而,可在充分保证差分值计算精度的前提下,使结果能更真实地反映出时刻 t_n 时各位移分量的导数值。为此我们把数显表内的位移脉冲触发信号取出来,通过计算机控制可编程计数器电路对其精确计数和同步定时,以获取较短时间段内的位移增量。设计的这部分电路参见图3。

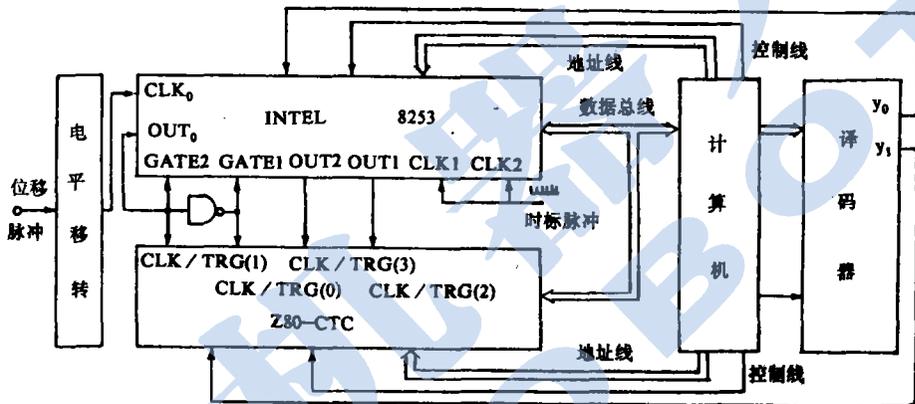


图3 位移脉冲定时、计数电路

在获取各位移分量的离散序列之后,通过恰当的数据处理,即可得到位置移动精度,重复定位精度,两点位置精度,轨迹精度及轨迹重复精度等各量。

通过计算机自动拟合各位移分量的离散序列为连续的光滑曲线,并由上述差分逼近的原理可得 \dot{x} 、 \dot{y} 和 θ 各量,从而根据式(6)、(7)、(8)即可获取各向速度分量,合成后即合速度值。运动过程中加速度的测量完全可仿照速度的测量方法,通过对速度曲线进行数值微分的方法来求取。

7 姿态位置和三向加速度信号的采集

机器人的手爪姿态角是从三个精密电位器上得到的,因而,精确地采集电位器上输出的模拟信号是获得准确姿态角的关键。同时,考虑到系统设计时还采用了三向加速度计作为另一种测量机器人运动加速度的途径,这也同样需要有一套高精度的数据采集电路才能将传感信号送入计算机内,以供数据的分析、处理所用。鉴于这些模拟信号量数值较小,若有不慎将导致数据采集过程中的较大误差,因此,采用图4所示的电路设计方案。现以姿态传感信号的采集为例,将其工作原理简述如下:对设计的测试系统而言,由于有多个模拟信号量需采集,因而,它们一概被送到模拟电子开关的输入端,需要时,由计算机控制,最多三路信号被送去同时采集。

考虑到系统的放大电路,采样/保持电路,模拟开关切换电路和模/数转换器中存在一定的零点漂移和温度漂移量,若不予以消除,必将导致采集结果的误差。并且,由于温度变化引起的系统增益系数的微变也是产生误差的原因之一。因而,在模拟开关的输入端还有一多级校正源,以配合系统测量前的对地自校准,以消除上述电路的误差。

校准测量分三步进行:

- 1) 系统对地自校准,获得一输出量

$$D_0 = K \cdot V_0 \quad (14)$$

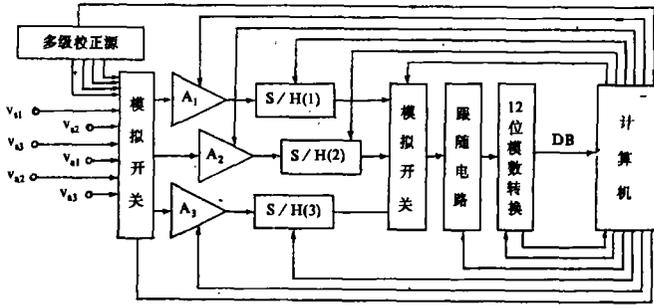


图4 模拟量数据采集电路框图

K 为系统增益系数; V_0 为总漂移量。

2) 系统对校正源 V_r 测量, 得一转换后的数字量

$$D_r = K \cdot (V_r - V_0) \quad (15)$$

3) 系统对模拟信号量 V_i 测试, 得一数字量

$$D_i = K \cdot (V_i - V_0) \quad (16)$$

最后, 得到模拟信号量

$$V_i = \frac{D_i + D_0}{D_r + D_0} \cdot V_r \quad (17)$$

因此, 通过校正源, 并供助于计算机对数据的存储和运算功能, 可消除系统电路中固有误差, 确保数据采集的准确。

经模拟电子开关后输出的待测信号由于其电平不一定在模/数转换器的最佳转换区内, 因而, 要有一信号调理, 放大电路。我们采用的是研制的程控放大电路, 它具有高输入阻抗, 高共模抑制比的特点, 且配上相应的控制系统元件后可根据输入信号的大小自动切换放大器量程。事实上也证明, 这套电路能对信号进行合适的调理。

程控放大器输出后的信号即可进入采样/保持器(S/H)予以离散化, S/H器的控制命令由计算机来协调完成。为了在模/数转换过程中确保离散信号有一定的保持精度, 必须选择性能优良的保持电容。

对姿态位置角的三个输出量来说, 应该在同一时刻进行数据采集。考虑到选用的逐次逼近式模/数转换器 AD574 有较高的转换速度, 因而, 为降低成本, 我们采用了三片采样/保持器同时离散信号量, 但分时进行模/数转换的方案。于是在 S/H 器和模/数转换器之间必须增加一级模拟电子开关, 用来协调各路信号的转换次序。注意到模拟电子开关有一定的导通电阻, 而 AD574 的输入阻抗相对来说不是太大, 若直接对模拟开关的输出量进行转换就会引起负载效应, 从而影响采集精度, 因此, 在两者之间增设了一级跟随电路, 以确保转换精度不受影响。经转换后的 12 位数字量暂存在内部的缓冲器内, 并由计算机在合适的时候将其存入数据缓冲区, 待所有数据采集完毕, 计算机就可转入处理、运算程序段。

三向加速度的检测过程基本同上, 顺便指出, 有了三向加速度量, 还可通过数值积分的方法来校核前述通过数据微分所得的速度分量。所有的数据处理, 加工过程都已编为子程序, 可由微机来自动完成。

8 结束语

本文叙述的仅仅是一种机械接触式工业机器人运动特性测试系统。由于选用了较为合理的机械结构、高分辨率的传感器和独特的电路设计, 从而, 与同类测试装置相比, 本系统具有测试简便可靠, 测试范围广和测试精度高的特点, 有较大的实用价值。

本文在撰写过程中, 得到了何发昌老师、蔡宗耀老师的热心帮助, 在此表示感谢。