

# 圆轴孔机器人主动装配方法的研究\*

李小兵\*\*

(电子科技大学电子机械系 成都 610054)

【摘要】对圆轴孔主动装配过程中的几何关系和力学关系进行了分析，导出了装配侧向误差与装配作用力及力矩间的关系。提出了一种搜索找孔和补偿轴孔角度误差的主动装配方法，有效地防止了楔紧、卡阻，并利用腕力传感器在 AdeptOne 机器人上进行了相应装配实验，实现了直径20 mm、间隙3 μm、侧向误差4.0 mm的轴孔装配作业。

关键词 装配；机器人；腕力传感器；柔顺技术

中图分类号 TP273.2

精密装配要求装配对象准确定位，极小的错位常造成过大的装配接触力，从而导致装配零件卡滞、楔紧、擦伤，甚至损坏零件或设备。机器人虽然通过提高机器人及周边装置的精度可使系统定位精度有所改善<sup>[1]</sup>，但提高的精度毕竟有限。与周边装置组成装配系统时，采用柔顺装配技术，让机器人在装配过程中具有补偿和校正定位误差的能力才是较为实际的解决办法。

目前，利用机器人实现圆轴孔装配有主动法、被动法和主被动法等装配方法<sup>[2,3]</sup>。主动法基于传感技术，传感器提供一定的自适应性，能补偿零件的定位误差，并对机器人的运动进行控制和修正。它允许无倒角、大定位误差、变柔顺操作，与被动方法相比，接触力急剧减小。本文在分析圆轴孔装配中力的关系基础上，提出了利用力传感器的装配方法，并做了相应的实验。

## 1 圆轴孔装配时的力学分析

### 1.1 假设

本文在装配过程的力学分析中，采用 S.N.Simunovic 提出的轴孔二维模型及相应假设：轴孔刚性，即忽略变形；准静态，即忽略惯性力；动静摩擦系数相等<sup>[4]</sup>。另外，假设在找孔阶段角度误差很小，可忽略不计，此时轴孔间只存在侧向误差，轴孔接触情况如图1所示。同时假设孔对轴的作用力沿接触面均匀分布，作用力的合力通过接触面的几何中心(形心 D)

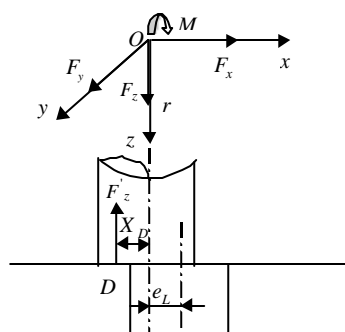


图1 找孔阶段轴孔接触情况

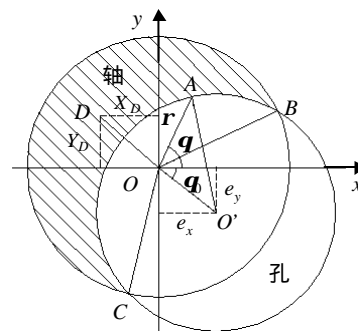


图2 轴孔几何关系

2000年9月26日收稿

\* 国家科委863高科技项目

\*\* 男 32岁 硕士 讲师

## 1.2 找孔阶段的力学分析

令侧向误差  $e_L$  在测试坐标系  $x$  轴、 $y$  轴上的分量为  $e_x$ 、 $e_y$ ； $X_D$ 、 $Y_D$  为形心的坐标值。轴孔的几何关系如图2所示，形心坐标的极坐标公式为

$$X_D = \frac{\iint_D r^2 \cos q \, dr \, dq}{\iint_D r \, dr \, dq} \quad Y_D = \frac{\iint_D r^2 \sin q \, dr \, dq}{\iint_D r \, dr \, dq} \quad (1)$$

在三角形  $\triangle AOO'$  中，由余弦定理可得

$$|AO|^2 + |OO'|^2 + 2|AO| \cdot |OO'| \cos(q - q_0) = |AO'|^2 \quad (2)$$

将  $|AO| = r$ ， $|OO'| = e_L$ ， $|AO'| = R$  代入式(2)得孔圆周曲线的极坐标方程为

$$\begin{cases} r = e_L \cos(q - q_0) + \sqrt{R^2 + e_L^2 [\cos^2(q - q_0) - 1]} \\ 0 \leq q \leq 2\delta \end{cases} \quad (3)$$

由式(1)和式(3)可得形心坐标为

$$\begin{cases} X_D = \left( \frac{4}{9} e_L - \frac{\delta}{6} R \right) \cos q_0 \\ Y_D = \left( \frac{4}{9} e_L - \frac{\delta}{6} R \right) \sin q_0 \end{cases} \quad (4)$$

如图1所示，测试坐标系为  $OXYZ$ ，孔对轴作用于形心  $D$  上的作用力  $F$  的三个分量分别为  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ ，作用在原点  $O$  上的力矩  $M$  的分量为  $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ ，由力平衡可得

$$\mathbf{M} = \mathbf{OD}' \times \mathbf{F} \quad (5)$$

其各分量为

$$\begin{cases} M_x = Y_D F_z - Z_D F_y \\ M_y = Z_D F_x - X_D F_z \\ M_z = X_D F_y - Y_D F_x \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)简化整理后可得

$$\begin{cases} X_D = (F_x Z_D - M_y) / F_z \\ Y_D = (M_x + F_y Z_D) / F_z \end{cases} \quad (7)$$

式中  $Z_D$  值由被装配件(此处为轴)、传感器及手爪的几何尺寸决定，其大小为测试坐标系原点与被装配件顶端间的垂直距离。

由式(4)和式(7)可得侧向误差为

$$e_L = \frac{9 F_x Z_D - M_y}{4 F_z \cos q_0} + \frac{3}{8} \delta R \quad (8)$$

或

$$e_L = \frac{9 F_y Z_D + M_x}{4 F_z \sin q_0} + \frac{3}{8} \delta R \quad (9)$$

## 2 基于力传感器的圆轴孔装配方法

### 2.1 孔搜索方法

在搜索找孔时，对垂直方向的装配力  $F_z$  进行监测。设装配所需最大装配力为  $F_{z2}$ ，最小装配力为  $F_{z1}$ ，其值通过实验确定。

1) 接近阶段：此时  $F_z < F_{z1}$ ，轴将继续向下，如图3a所示。

2) 找孔阶段：此时  $F_{z1} \leq F_z \leq F_{z2}$ ，根据测试力/力矩值，由式(8)和式(9)计算出初始角度偏差  $q_0$  和装配侧向误差，然后校正位置，如图3b 所示，其中

$$q_0 = \delta + \arctan[(F_y Z_D + m_x)/(F_x Z_D - m_y)] \quad (10)$$

3) 搜索成功：此时  $F_z < F_{z1}$ ，轴已进入倒角，如图3c 所示。

4) 搜索过程中，若  $F_z > F_{z2}$ ，将轴抬起至装配力  $F_z$ ，介于  $F_{z1}$  和  $F_{z2}$  间。

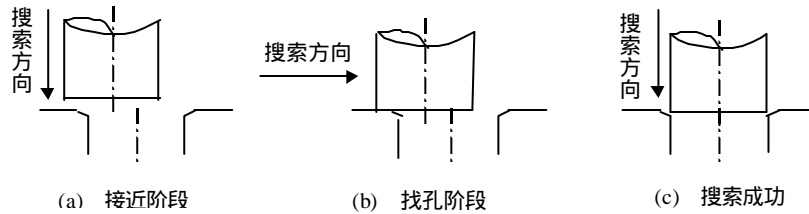


图3 孔搜索方法

## 2.2 插孔阶段角度误差的补偿

1) 倒角阶段：倒角和一点接触阶段，最大允许的初始角度误差为

$$q_w = \frac{D-d}{mD} \quad (11)$$

式中  $D$  为孔直径； $d$  为轴直径； $m$  为摩擦系数。

当角度误差  $q < q_w$  时，无须对角度误差进行补偿；当角度误差  $q \geq q_w$  时，对于关节型机器人可沿力矩  $M_0$  的反方向补偿一角度  $q$ 。对于 SCARA 型机器人，位置调整值为

$$\ddot{A}_{xy} = Z_D \sin q \quad (12)$$

补偿方向是沿  $F_{xy}$  的反方向。

2) 一点接触阶段：补偿方法与倒角阶段相同，但位置调整值为

$$\ddot{A}_{xy} = (Z_D - h) \sin q \quad (13)$$

式中  $h$  为轴插孔深度。

3) 两点接触阶段：当装配力  $F_z > F_{z2}$  时，停止装配动作，进行规律搜索，其搜索步长为

$$S_j \leq 2(L_g / \mu D - 0.5) \Delta d \quad (14)$$

搜索方向沿  $F_{xy}$  的反方向，式中  $L_g$  为轴顶端到柔顺中心的距离， $\mu$  为摩擦系数， $D$  为孔直径， $d$  为轴直径， $\Delta d = D - d$ 。

## 3 机器人装配系统

实验所用的机器人装配系统由 Adept One 机器人、SAFMS-130六维腕力传感器、专用工装板和自动传输线组成。其中，AdeptOne 机器人是4轴、直接驱动、SCARA 型装配机器人。最大插入力18 kg，最大负载9 kg，最大速度9 m/s，分辨率0.013 mm，重复精度0.025 mm。AdeptOne 机器人在  $x$ 、 $y$  方向上(水平面内)具有一定的柔顺性，可补偿一定的侧向位置误差。SAFMS-130六维腕力传感器采用了悬浮式十字梁结构，通过测试十字梁的挠性应变来间接测量机械手末端构件与手爪间的三个分力和三个分力矩。在此装配系统中，轴孔定位在专用工装板上，由流水作业的传输线送至装配工位。通过将装配工作台与机器人主轴轴线的垂直度控制在很小的范围内，可使初始角度误差很小。

## 4 实验及结果分析

采用一对圆轴孔进行初始侧向误差的装配实验，圆轴孔零件装配作业的实验参数如下：

轴的直径尺寸：20.005 6 mm 轴倒角：1×45°

孔的直径尺寸: 20.008 4 mm    孔倒角: 无  
 轴孔配合间隙: 0.002 8 mm    插孔深度: 35 mm  
 规律搜索步长:  $S_j=0.15$  mm    轴孔长度: 80 mm  
 机器人搜索速度: 10 mm/s

表1 装配时间  $t$  与测向误差  $e$  之间的关系

$e/\text{mm}$	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	3.5	4.0	5.0
$t/\text{s}$   $a = 45^\circ$	1.79	3.20	4.88	4.93	5.05	5.18	5.45	6.32
$a = 90^\circ$	1.83	3.45	4.32	4.41	4.48	4.51	5.38	5.72

实验所得装配时间  $t$  与装配侧向误差  $e$  的关系如表1所示, 表中  $a$  为侧向误差  $e$  与  $x$  轴的夹角。从表1可知, 当  $e \leq 1.0$  mm 时, 装配误差可依靠 AdeptOne 机器人自身柔顺性来补偿, 此时装配时间通常只稍大于插孔所需的时间(约0.8 s)。当  $a = 90^\circ$ ,  $e > 4.0$  mm 时, 由于此时力调整算法的误差较大, 有时需进行两次找孔, 装配时间较长。当  $a \neq 0^\circ$  和  $90^\circ$  时, 搜索找孔有时沿  $x$ 、 $y$  方向中装配误差较大者进行搜索, 时间也较长。当  $e \leq 4.0$  mm 时, 装配时间  $t < 5.2$  s。

## 5 结束语

本文提出一种利用六维腕力传感器进行机器人轴孔装配的方法, 并应用 AdeptOne 装配机器人和力传感器组成装配实验系统, 完成了相关装配实验。实验结果表明, 该装配方法能有效地完成侧向误差小于4.0 mm 的圆轴孔装配作业, 装配时间小于5.2 s。

## 参 考 文 献

- 1 李迅波. 一种快速自动精密定位系统的研究. 电子科技大学学报, 1998, 27(1): 51~56
- 2 华为实. Stewart 机器人用作天线支撑的分析. 电子科技大学学报, 1999, 28(4): 443~446
- 3 Lee Jay. Apply force/torque sensors to robotic applications. Robotics, 1987, 3: 189~194
- 4 Simunovic Sergio. Part mating theory for robot assembly. Proc 9 th ISIR, 1979: 183~193

## Study of Robot Active Assembly Method for Round Peg-hole

Li Xiaobing

(Dept. of Electromechanical Eng., UEST of China    Chengdu    610054)

**Abstract** On the basis of analysis of geometric and mechanics relations, this paper derives the relation between the lateral and the action/torque, and gives a different strategy for searching hole and preventing wedging and jamming. With the wrist force sensor, the experiments are processed on the AdeptOne robot. The peg-hole assembly task with the diameter of 20 mm, the clearance of 3  $\mu\text{m}$  and the start lateral of 4.0 mm is realized.

**Key words** assembly; robot; wrist force sensor; compliance technology