

机器人柔顺装配机理研究[†]

彭商贤 金佐中

(天津大学智能机械研究所, 300072)

摘要 本文对柔顺装配中轴、孔位姿偏差和装配力变化规律进行了分析,对装配中一些非正常情况提出了解释;提出了装配作业的可行域,指出了改善装配作业的可能途径.本文所提出的数学模型和约束条件不仅是研究各类外部柔顺技术的理论基础,而且也是研究力-运动轨迹控制策略的理论依据.

关键词 装配, 机器人, 柔顺技术

1 前言

现代生产中,经常要求机器人完成间隙值为微米级的精密插装作业.在完全结构化的环境中,机器人采用位置控制运动轨迹规划,可顺利完成装配作业.实际上,由于工件、机器人等自身存在误差,使插装综合装配误差远大于机器人系统精度,这时若单纯采用位置控制,将使插装作业不能正常进行.采用柔顺技术^[1-5]可主动或被动地调整轴、孔相对位姿,顺应以至消除装配误差,最终实现插装作业.

对插装过程的几何和力学分析是各类柔顺装配技术的理论基础.本文在建立轴孔位姿偏差和装配力关系式时,采用孔口统一坐标系,认为轴心和孔心在装配中并不平行,以使分析更切合实际.最后还讨论了实用的插装可行域.

2 柔顺装配模型和装配过程

任何一种手腕都可简化成图 1 所示的二维模型.图中 K_x 为模型等效弹簧支承的横向刚度; K_θ 为倾转刚度.

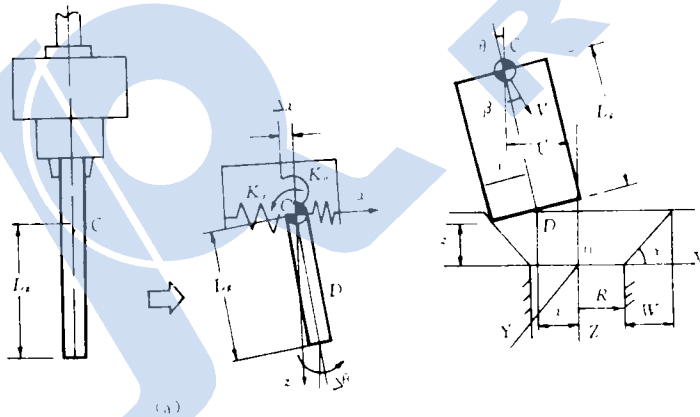


图 1 插装模型

[†] 本研究工作得到 863 高技术 512 主题的支持. 收稿时间: 1993-04-16

在建模时设:

- 1) 柔顺手腕绕其轴线的外部弹性特性具有各向同性.
- 2) 柔顺手腕轴向两相互垂直平面中,柔顺性相互间无耦合.
- 3) 轴、孔、手腕系统在插装时,只有手腕弹性元件发生变形,其余都视作刚体.
- 4) 插装过程均视作准静态平衡过程.

根据以上假设,销在图示平面内受外力作用时,销轴将在平面内发生柔顺运动,柔顺运动将绕瞬心 C (即手腕的柔顺中心)作微转动和微平移.由于系统轴向刚度很大,所以 C 点的微平移只发生在图示 X 方向.

轴插入孔从开始接触到全面插入,根据接触特征可分为通过倒角区、一点接触和两点接触三个阶段.

相对于图1(b)所示的孔口坐标系 $O-XYZ$,销、孔插装初始位姿误差包括:(1)轴端中心点 D 沿 X 方向的平移误差 x_0 ;(2)销轴相对于 Z 轴的倾转误差 θ_0 ;(3)销轴插入方向 V 对 Z 轴偏转误差 β_0 .

上述误差设 β_0 为定值外,其他将随柔顺装配过程而逐渐补偿和消除.图中 $W \times \alpha$ 为孔口倒角; L_g 为柔顺中心 C 到销端 D 点的距离,称柔顺中心偏距.

3 通过倒角区阶段的几何和力学分析

3.1 几何协调方程

由于初始误差的随机性,因此销、孔初始接触状态有六种,代表性的一种如图2所示.由于偏转角 θ 很小,取 $\cos\theta=1$, $\sin\theta=0$.由图1,2关系,求得协调方式

$$x - x_0 = (z - z_0) / \tan \alpha \quad (1)$$

$$u - u_0 = x - x_0 - L_g(\theta - \theta_0) \quad (2)$$

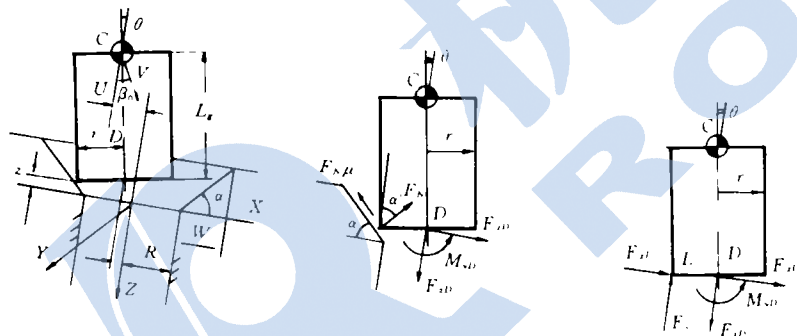


图2 倒角区接触状态

3.2 插装力及装配反力

设 $\Delta x'_c$ 为柔顺中心 C 在 X 方向的平移量; $\Delta x''_c$ 为插入运动与 Z 轴不一致而引起的附加平移量,则由图示关系可求得 C 点的总平移量为

$$\Delta x_c = \Delta x'_c + \Delta x''_c = (u - u_0) + (z_0 - z) \tan \beta_0 \doteq u - u_0 + (z_0 - z) \beta_0 \quad (3)$$

此时的手腕倾转变形为

$$\Delta \theta_c = \theta - \theta_0 \quad (4)$$

设手腕对销轴的插装力为 $F_c = [F_{xc}, F_{yc}, M_{zc}]^T$,将 F_c 等效到轴端 D ,得

$$\begin{aligned}
 F_D = \begin{bmatrix} F_{xD} \\ F_{zD} \\ M_{yD} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\Delta x_c K_x \\ F_{zD} \\ -\Delta \theta_0 K_\theta + \Delta x_c K_x L_g \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -(u - u_0 - (z - z_0)\beta_0)K_x \\ F_{zD} \\ -(\theta - \theta_0)K_\theta + (u - u_0 - z - z_0)\beta_0 K_x L_g \end{bmatrix} \quad (5)
 \end{aligned}$$

将装配反力也等效到 D 点,得

$$F'_D = [F'_{zD}, F'_{yD}, M'_{yD}]^T = [F_N A, -F_N B, -F_N B \cdot r]^T \quad (6)$$

式中 F_N 为接触点法向反力; μ 为接触件间摩擦系数; $A = \sin\alpha - \mu\cos\alpha, B = \cos\alpha + \mu\sin\alpha$.

3.3 几何参数、力参数与插入深度 z 的关系

根据几何协调和销轴受力平衡方程,求得

$$\begin{bmatrix} \theta \\ x \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ x_0 \\ u_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_x \alpha_1 (L_g \cdot A - r \cdot B) / K_{01} \\ 1 / \tan\alpha \\ ((K_\theta A / \tan\alpha) + \beta_0 K_0) / K_{01} \end{bmatrix} (z - z_0) \quad (7)$$

$$F_N = K_x K_\theta \alpha_1 (z - z_0) / K_{01} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} F_{xD} \\ F_{zD} \\ M_{yD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ B \\ Br \end{bmatrix} K_x K_\theta \alpha_1 (z - z_0) / K_{01} \quad (9)$$

式中 $\alpha_1 = (1/\tan\alpha) - \beta_0; K_0 = K_x L_g (A L_g - r \cdot B); K_{01} = K_0 + K_\theta A$.

4 一点接触阶段的几何和力学分析

一点接触阶段有六种状态,本文分析图 3 所示的状态. 设 θ_1 是销轴由倒角区进入一点接触的倾转角. 该角 θ_1 值过大,销轴将不能插入孔中, θ_1 的临界值可由图示几何关系求得

$$|\theta_1| < \sqrt{C} \quad (10)$$

式中 $C = (R-r)/R$, 为配合间隙率.

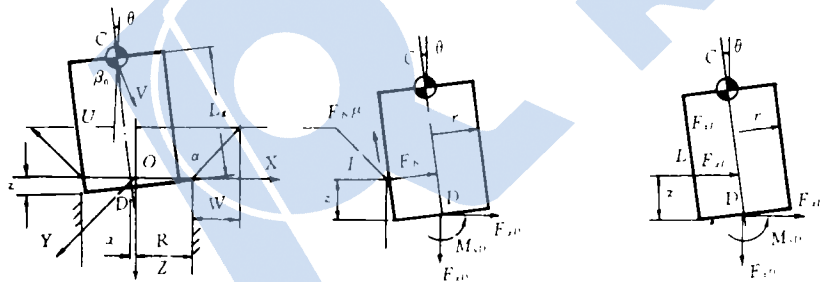


图 3 一点接触区

由图 3 可求得几何协调方程

$$x - x_0 = \theta z - (z_0 / \tan\alpha) \quad (11)$$

$$u - u_0 = x - x_0 - (\theta - \theta_0) L_g \quad (12)$$

插装力 F_D 同式(5), 装配反力

$$\mathbf{F}'_D = [F_N, -F_N\mu, -F_N(\mu r + z)]^T \quad (13)$$

根据几何协调方程和销轴受力平衡方程,求得表 1 所示的各参数与插入深度 z 关系式。

表 1 各参数与插入深度 z 关系式

参数	关 系 式
θ	$(K_{16}(H_1 + \theta_0 L_g - z\beta_0) + K_0\theta_0)/K_{26} \quad (14)$
x	$x_0 + (z(z_0 - z)K_{16}\beta_0 + (z\theta_0 - z_0/\tan\alpha)(K_{16}L_g + K_0))/K_{26} \quad (15)$
u	$u_0 + (K_0(z\theta_0 - z_0/\tan\alpha) + (z - z_0)(L_g - z)K_{16}\beta_0)/K_{26} \quad (16)$
F_N	$K_0K_x(H_1 + z(\theta_0 - \beta_0))/K_{26} \quad (17)$
F_{xD}	$-K_0K_x(H_1 + z(\theta_0 - \beta_0))/K_{26} \quad (18)$
F_{zD}	$\mu K_0K_x(H_1 + z(\theta_0 - \beta_0))/K_{26} \quad (19)$
M_{yD}	$K_0K_x(\mu r + z)(H_1 + z(\theta_0 - \beta_0))/K_{26} \quad (20)$

式中: $H_1 = z_0\beta_0 - z_0/\tan\alpha$; $K_{16} = K_x(L_g - \mu r - z)$;
 $K_{26} = K_{16}(L_g - z) + K_0$

5 两点接触阶段的几何和力学分析

两点接触有两种状态,本文分析图 4 所示状态。

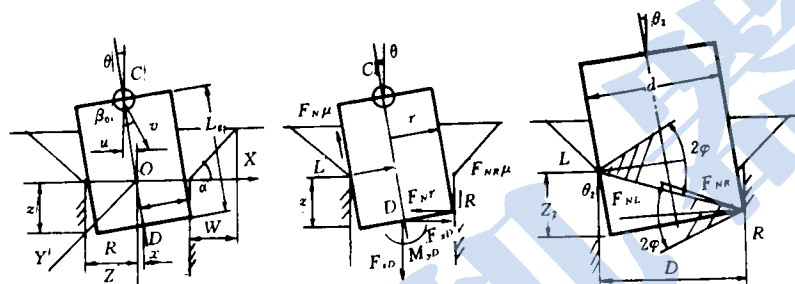


图 4 两点接触区

根据图示关系,本阶段的前两个几何协调方程同式(11),(12),另一协调方程即保证两点接触

$$z\theta = 2CR \quad (21)$$

插装力 F_D 同式(5),装配反力

$$\mathbf{F}'_D = [F_{NL} - F_{NR}, -\mu(F_{NL} + F_{NR}), -F_{NL}z + \mu r(F_{NR} - F_{NL})]^T \quad (22)$$

同样,利用几何协调方程和销轴受力平衡方程,求得表 2 所示各参数与插入深度 z 的关系。

表 2 各参数与插入深度 z 关系式

参数	关 系 式
θ	$2CR/z \quad (23)$
x	$CR \quad (24)$
u	$u_0 + \theta_0 L_g + H_2 - (2CRL_g/z) \quad (25)$
F_{NL}	$(H_{36}(K_4 - K_x L_g \mu r) + (L_g - \mu r)K_{36})/z \quad (26)$
F_{NR}	$(H_{36}(K_4 - K_x L_g(z + \mu r)) + K_{36}(L_g - (z + \mu r)))/z \quad (27)$
F_{xD}	$-K_x(L_g H_{36} + H_2 - (z - z_0)\beta_0) \quad (28)$
F_{zD}	$(2\mu(H_{36}K_4 + L_g K_{36}) + \mu(z + 2r\mu)(-K_x L_g H_{36} - K_{36}))/z \quad (29)$
M_{yD}	$H_{36}K_4 + L_g K_{36} \quad (30)$

式中: $H_2 = 2CR - z_0/\tan\alpha$ $H_{36} = \theta_0 - 2CR/z$;
 $K_4 = K_x L_g^2 + K_0$ $K_{36} = K_x(H_2 - (z - z_0)\beta_0)$

6 计算实例

现设定一组参数： $K_x=8\text{N/mm}$ ； $K_\theta=1\times 10^5\text{N}\cdot\text{mm/rad}$ ； $\theta_0=0$ ； $\beta_0=0$ ； $x_0=1.988\text{mm}$ ； $L_g=40\text{mm}$ ； $r=6\text{mm}$ ； $C=0.002$ ； $\mu=0.15$ ，试分别变化单项参数，求 $F_{zD}-z$ 的变化规律。利用式(9)，(19)和(29)计算并绘图得图 5 一组 $F_{zD}-z$ 曲线。

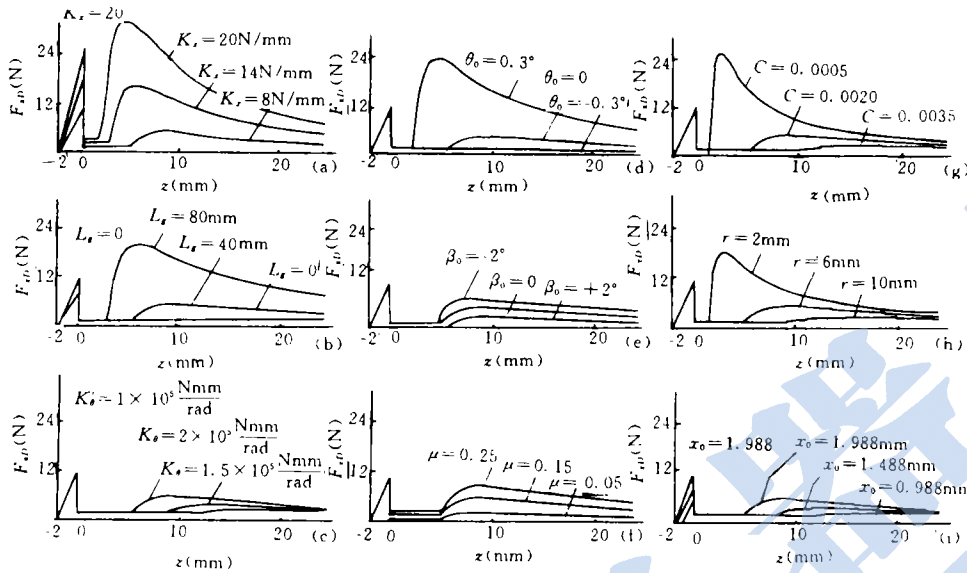


图 5 单项参数对 F_{zD} 的影响曲线

分析图 5 知，大的 F_{zD} 出现在倒角区阶段和两点接触阶段，而在一点接触阶段却变化不大； β_0 较大时，它对两点接触区的 F_{zD} 的影响不可忽视。

7 最大装配力

在衡量装配效果和确定装配可行域时，都要计算最大装配力。

由图 5 知在倒角区装配力为单调增值函数，因此最大装配力出现在

$$z = 0 \tag{31}$$

对应销轴的倾转角

$$\theta = \theta_0 - K_x z_0 \alpha_1 (L_g A - r B) / K_{\theta 01} \tag{32}$$

两点接触区出现最大装配力的位置可将式(29)对 z 求导求得

$$z' = 4CRK_5 / K_6 \tag{33}$$

$$\theta^* = K_6 / 2K_5 \tag{34}$$

式中

$$K_5 = K_x L_g (L_g - \mu r) + K_\theta$$

$$K_6 = K_x L_g (\theta_0 L_g + (H_2 + z_0 \beta_0) (1 - \mu r / L_g) - (\mu r \theta_0 - CR)) + \theta_0 K_\theta$$

根据以上位姿点，可求得表 3 所示的最大装配力

表3 各接触区最大装配力

参数	倒角区 ($i=0$)	二点接触区 ($i=2$)
$F_{N,M}$	$-z_0 K_x K_\theta \alpha_1 / K_{01}$ (35)	$M_{ax} \{ F_{NLM} , F_{NRM} \}$ (38)
		$F_{NLM} = (H_3(K_4 - K_x L_g \mu r) + L_g K_3 - \mu r K_3) / z^*$ (39)
		$F_{NRM} = (H_3(K_4 - K_x L_g(z^* + \mu r)) + K_3(L_g - (z^* + \mu r))) / z^*$ (40)
$F_{z,M}$	$z_0 K_x K_\theta \alpha_1 A / K_{01}$ (36)	$-K_x(L_g H_3 + H_2(z^* - z_0)\beta_0)$ (41)
$F_{z,M}$	$-z_0 K_x K_\theta \alpha_1 B / K_{01}$ (37)	$(2\mu(H_3 K_4 + L_g K_3) + \mu(z^* + 2r\mu)(-K_x L_g H_3 - K_3)) / z^*$ (42)
式中 $H_3 = \theta_0 - (2CR/z^*)$;		$K_3 = K_x(H_2 - (z^* - z_0)\beta_0)$

8 装配可行域

它由诸多保证装配正常进行的约束条件组成,这些约束条件有

1) 几何约束条件 它包括倒角宽约束和防楔紧约束。

(1) 倒角宽约束 为满足销轴能落到倒角区内,必须满足以下约束条件

$$W > \sqrt{2} |x_{0m}| \quad (43)$$

式中 x_{0m} 为销轴相对孔口坐标系在 X 方向的最大平移误差。

(2) 防楔紧约束 当两点接触初,若 θ_2 角过大,致使左右接触反力落在摩擦锥内,而出现楔紧现象(图4(b)). 临界几何关系

$$\theta_2 = 2CR/z_2; \quad z_2 = d\mu$$

近似取 $2R=d$, 因此防楔紧约束条件是

$$|\theta_2| < C/\mu \quad (44)$$

$$\theta_2 = (K_1(H_1 + \theta_0 L_g - z_2 \beta_0) + K_\theta \theta_0) / K_2 \quad (45)$$

式中 $K_1 = K_x(L_g - \mu r - z_2)$; $K_2 = K_1(L_g - z_2)K_\theta$

2) 力约束条件 它包括防阻塞约束和工件压伤约束。

(1) 防阻塞约束 文献[4]认为装配中 $F_{z,D}$, $F_{z,D}$ 和 $M_{y,D}$ 间比例失当,发生阻塞,并给出了一个平行四边形的约束条件区. 对于被动柔顺来说,只要机器人实时给出的装配力与反力平衡,插装运动就能匀速进行,反之将出现阻塞. 因此防阻塞的约束条件是

$$F_{za} \geq \max\{F_{z0M}, F_{z1M}, F_{z2M}\} \quad (46)$$

式中 F_{za} 为机器人沿插孔方向(即 Z 向)的最大承载。

(2) 防工件表面压伤的约束 为防止轴、孔在接触点处压伤,应对 F_N 加以限制,即

$$F_{Na} \geq \max\{F_{N0M}, G_{N M}, F_{N2M}\} \quad (47)$$

式中 F_{Na} 为材料的许用接触力。

9 结论

1) 插装时,工件位姿误差和装配力是插深 z 的分段函数. 对 $F_{z,D}$ 说在三个插装阶段中,两点接触区对参数的变化最敏感。

2) 销轴插入方向对孔轴的偏差角 β_0 , 对 $F_{z,D}$ 都有一定的影响,尤以两点接触区为甚,不应忽视。

3) 当以 $F_{z,D}$ 为衡量装配效果指标时,在一定范围内 C, r, x, β_0 达下限, θ_0, μ 达上限时,对装

配不利。

4) 减小 K_x , L_g 和加大 K_v 可使最大装配力降低, 两点接触阶段后移. 当 $L_g=0$ 时, 将不出现两点接触区, 从而明显地改善装配条件. 对上述三参数同时变化时, 应考虑采用优化方法进行设计.

参 考 文 献

- 1 Simunovic S N. Force information in assembly process. 5th ISIR, 1977.
- 2 Nevins J L, Whitney D E. Assembly research industrial robot. March 1980.
- 3 Mason M T. Compliance and force control for computer controlled manipulators. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1981, 11(6).
- 4 Whitney D E. Quasi-static assembly of compliantly supported rigid parts. J. Dyn. Syst. Meas Control, ASME, 1982, 104.
- 5 Bourrieres J P, Jeannier P, Lhote F. Intrinsic compliance of position-controlled robots. 5th Int. Conf. Assembly Automation, May 1984, Paris France.
- 6 Whitney D E, Rourke J M. Mechanical behavior and design equations for elastomer shear pad remote centre compliances. J. Dyn. Syst. Meas Control Trans ASME, 1986, 108(3).
- 7 Jrtard A. Geometric model of the DCR-LAI compliance device. Robotics, 1989, 7(1).

MECHANISM ANALYSIS OF ROBOTIC COMPLIANCE ASSEMBLY

PENG Shangxian, JIN Zuozhong

(Intelligent Machine Institute of Tianjin University)

Abstract In this paper the variation of rigid part's pose errors and assembly forces during the compliant assembly process are analysed. The paper explains the unnormal situation of peg-in hole assembly and discusses the feasible region to perform assembly. The practical way to improve the assembly effects are suggested.

The mathematic models and constraints given in the paper not only are the theoretical basis of force-motion planning in robotic assembly task, but also serve as the foundation of the research of all kinds of external compliance technology.

Key work Robot, assembly, compliance technology

(彭商贤,男,60岁,教授.研究领域:机电自动化,机器人,机器人柔性装配系统及技术.)