

基于零点状态跟踪法的小间隙轴孔装配策略

陈东生, 郭文婷, 张世玉

(中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 在小间隙轴孔精密装配过程中, 需要分析传感器检测的力与力矩信息, 判断轴孔相对的位置与姿态, 从而判断接触状态决定调整方向; 由于接触力和力矩与轴的位姿高度耦合, 因此装配过程中 5 个方向上的力与力矩存在耦合作用, 各个力之间会相互影响, 导致调控收敛慢; 为减少耦合造成的震荡, 提高调控效率, 提出一种基于零点状态跟踪法的柔顺装配策略; 该策略依据轴孔交互力信息实现轴与孔的对齐, 在装配阶段对轴孔交互模型进行分析, 绘制接触状态一受力关系图, 对调整过程中接触状态进行识别, 在该调整策略下, 在姿态角调整前预先进行位置调整, 使得径向接触力为 0 N, 跟踪两点接触状态中的水平力“零点”, 消除第一类力矩的影响, 让角度调整量只受角度偏差的影响, 在控制层面上将轴孔自动化装配的复杂多维力控制问题解耦; 实验结果表明, 采用所设计的装配策略, 调控时间减少了 40%; 即采用该策略能提高调控效率, 快速实现轴孔装配力和力矩调整。

关键词: 轴孔装配; 插孔策略; 接触状态; 工业机器人

Assembly Strategy of Small Clearance Shaft Hole Based on Zero-Point State Tracking Method

CHEN Dongsheng, GUO Wenting, ZHANG Shiyu

(Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, China)

Abstract: During the precise assembly process of small clearance shaft holes, it is necessary to analyze the force and torque information detected by the sensors and determine the relative position and attitude of the shaft holes, and then the contact status is clarified to determine the adjustment direction. Due to the high coupling of contact force and torque with the pose of the axis, there is a coupling effect between forces and torque in five directions during the assembly process. Each force will affect each other, leading to the slow convergence of regulation. To reduce the oscillation caused by coupling and improve the efficiency of regulation, a compliant assembly strategy based on zero-point state tracking method is proposed. This strategy achieves the alignment of the shaft and hole based on the interaction force information between the shaft and hole. During the assembly stage, the interaction model between the shaft and hole is analyzed, and a contact state force relationship diagram is drawn to identify the contact state during the adjustment process. Under this adjustment strategy, the position is adjusted in advance before adjusting the attitude angle, so that the radial contact force is 0 N. The horizontal force “zero point” in the two-point contact state is tracked to eliminate the influence of the first type of torque, and decouple the complex multi-dimensional force control problem of automated assembly of shaft holes at the control level by ensuring that the angle adjustment is only affected by the angle deviation. Experimental results show that by using the designed assembly strategy, the control time is reduced by 40%. The proposed strategy can improve regulation efficiency and quickly adjust assembly force and torque for shaft holes.

Keywords: shaft hole assembly; jack strategy; contact state; industrial robot

0 引言

某些航天器、高新技术装备中涉及小间隙轴孔的精

密自动化装配。轴孔自动化装配是一个复杂的多维力控制问题, 而装配任务必须根据末端力与力矩主动调整在

收稿日期:2024-01-31; 修回日期:2024-03-04。

作者简介:陈东生(1972-),男,博士,正高级工程师。

引用格式:陈东生,郭文婷,张世玉. 基于零点状态跟踪法的小间隙轴孔装配策略[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(4):171-177,185.

装配接触过程中的位置与姿态才能完成精密的装配任务,因此在装配过程中的柔顺控制至关重要^[1]。

传统的机器人柔顺控制方法包括主动柔顺控制和被动柔顺控制^[2],其中主动柔顺控制根据控制的间接和直接性又分为阻抗控制^[3]、导纳控制^[4]和力位混合控制。针对机器人的力位混合控制主要通过构建力和位姿之间关系,设计合理的调整策略从而实现精准调节。对于轴孔装配过程中的调整策略,需要通过分析接触状态,从而设计对应的调整方法。轴孔装配过程可分为搜索阶段、对准阶段和插入阶段。其中针对插入阶段的分析对柔顺控制的要求高,不少专家学者对其中涉及的接触状态分析和柔顺控制策略进行了分析。

对于小间隙轴孔装配而言,其插入过程可抽象成解决卡阻和楔紧问题。文献[5]针对卡阻问题给出了卡阻动态图以及避免卡阻和楔紧的约束条件,设计了轴入孔的主动柔顺空间,但具体的装配策略需进一步分析。针对插入阶段的卡阻问题,文献[6]中将卡阻问题细化为径向卡阻状态和双向卡阻状态,径向卡阻状态包括孔外单点、孔外两点和孔内单点的接触状态,双向卡阻状态包括孔内两点和孔内三点的接触状态。为进一步探究卡阻过程中的受力问题,文献[7]通过对轴孔接触状态的分析,设计了轴孔装配4个阶段的调整策略,克服了装配过程中的位置不确定性,在不使用力传感器的条件下,完成间隙0.1 mm、直径50 mm的轴孔装配。文献[8]提出了一种状态无关的稳定性约束方法提升了接触调节的灵活性。文献[9]针对机器人接触不确定环境,提出了阻抗模型中参考轨迹的实时调节模糊逻辑,通过实时的力与位置的反馈调整,实现了精确的力控。文献[10]针对阻抗建模参数未知、接触环境模型不确定的系统,给出了基于阻抗学习的自适应模糊神经网络控制方案,该方法不需要获得关于不确定性的先验知识和足够的观测数据量,就能使机器人跟踪系统进行阻抗学习产生的调整目标进行阻抗自适应控制,文献[11]通过构建误差模型,设计补偿轨迹,实现了间隙0.04 mm、直径25.4 mm轴孔的偏差自主校正。上述研究为轴孔装配过程中的接触状态建模提供了基础。

为实现更高精度的柔顺控制,文献[12]对于高精度的轴孔装配任务设计了一种基于协调操作的力矩和位置混合控制算法,实验结果验证了该算法的有效性。文献[13]提出了一种螺旋运动的装配方法减少轴向摩擦力,降低卡死的可能性。文献[14]针对柔性轴孔装配问题,研究了接触状态分析、干扰分析和力控制策略,根据力和力矩的关系,推导了不同的接触状态和干扰状态,并通过实验验证了方法的有效性。除了传统的力位混合控制,不少智能控制方法也被使用到轴孔装配的控制中去,文献[15]将深化强化学习应用于轴孔装配,

使得机器人面对装配环境复杂,不确定程度高的情况下仍能实现较好的装配效果。文献[16]提出了一种基于强化学习的轴孔装配优化方法,通过对比模糊控制和强化学习效果,发现采用强化学习进行控制训练其柔顺性大大提高。文献[17]提出基于PPO(Proximal Policy Optimization,近端策略优化)的轴孔装配控制算法,通过环境交互学习装配技能保证了装配成功率和效率。文献[18]将装配任务描述为马尔可夫决策过程,提出了一种模型驱动的深度确定性策略梯度算法,通过学习策略完成装配任务,无需分析接触状态。然而,智能算法普适性较差,采用模糊控制或深度强化学习等方法对模糊规则的设定和学习样本数量要求高,需要依赖长久装配的经验和训练。

从上述的国内外研究现状来看,各种主动柔顺装配技术已经不断成功用于实现轴孔装配任务。尽管上述研究在机器人的柔顺装配控制领域取得了一定成果,但是仍然存在部分问题有待解决。小间隙轴孔装配过程中特别需要高精度传感器的力与力矩反馈,装配过程中5个方向上的力与力矩存在耦合作用,导致调整过程出现收敛慢或过冲的现象。本文结合部件的几何形状,对装配过程中的轴孔受力情况和接触状态进行分析讨论,基于接触状态模型设计轴孔接近过程中工件位姿的调整策略,在调整角度之前先跟踪到两点接触状态的零点,根据零点的力矩进行角度的调整,降低噪声敏感性,并将控制任务解耦。最后基于机器人装配平台进行轴孔装配实验,验证了上述策略的有效性。

1 接触状态建模

轴孔装配问题是一类典型的三维动力学问题。为简化三维空间中的位置和受力约束,将轴孔接触时的接触状态分为:倒角接触状态、一点接触状态和两点接触状态,分别建立三阶段的静力平衡方程和物理性质方程。

本文设定的柔顺轴孔装配模型一点接触状态下受力如图1所示。

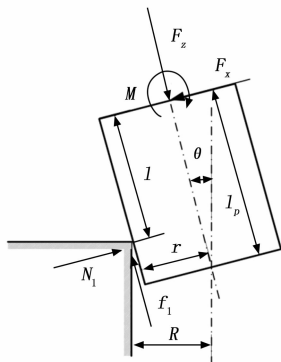


图1 轴孔一点接触状态

借助 Whitney^[19]提出的二维轴孔模型分析法, 选取轴孔的轴线相交面进行受力分析, 建立装配接触模型并提出以下假设:

1) 刚性假设: 在装配过程中轴孔之间的接触力较小, 轴孔的物理形状不发生改变, 只有夹具部分产生少量柔顺形变, 轴和孔零件都可视为刚性构件, 且存在着彼此独立的侧向刚度和扭转刚度;

2) 准静态假设: 机器人的运动速度较慢, 忽略加速度产生的惯性作用, 装配的任何过程均为准静态平衡状态;

3) 摩擦假设: 动摩擦系数等于静摩擦系数。

倒角阶段受力与一点接触类似, 主要分析一点和两点接触的力与位移的关系。

结合图 1 进行受力分析可知, 在轴孔一点接触状态阶段, 轴受法向力 N_1 和摩擦力 f_1 , 其中 $f_1 = \mu N_1$, μ 为摩擦系数。孔半径为 R , 轴半径为 r , l_p 为轴末端到传感器的距离, l 为力作用点到传感器的距离, θ 为轴孔角度偏差, L 为 l_p 与 l 的差值。根据受力, 得到力传感器上的作用力为:

$$\begin{cases} F_x = N_1 \\ F_z = f_1 = \mu N_1 \\ M = -f_1 r - N_1 L \end{cases} \quad (1)$$

为避免卡阻现象, 使得轴件顺利装配进孔, 需要对装配体施加装配力 $F = [F_x, F_z, M]^T$ 。其中, 以轴为研究对象, 装配力作用于轴末端, 设 F_x 正方向为平行于轴端面向左, F_z 正方向为垂直于轴端面向下, M 为绕轴末端中心顺时针为正。当轴与左侧边接触时, 轴中心相对于孔中轴线左偏时偏角 θ 小于 0。

对于该状态应该产生相应的柔顺性微调, 微调距离必须满足下面所示的物理性质方程:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K(U - U_0) \\ \mu F_x \\ K_\theta(\theta - \theta_0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: 轴相对于孔轴线的偏移量为 U , 相对于孔的角度偏差 θ , 横向刚度为 K , 扭转刚度为 K_θ 。

进入一点接触位置之后, 轴继续向下装配, 随着轴的进一步深入, 轴底面将越来越靠近并触及孔内壁, 会达到两点接触状态, 如图 2 所示。

同样地, 力传感器上的作用力为:

$$\begin{cases} F_x = N_1 - N_2 \cos\theta + f_2 \sin\theta \\ F_z = f_1 + N_2 \sin\theta + f_2 \cos\theta \\ M = -N_1 L + (N_2 \sin\theta + f_2 \cos\theta)r - f_1 r \end{cases} \quad (3)$$

几何关系为:

$$L = l_p - l \quad (4)$$

根据物理性质方程可以得出柔顺控制满足的受力条

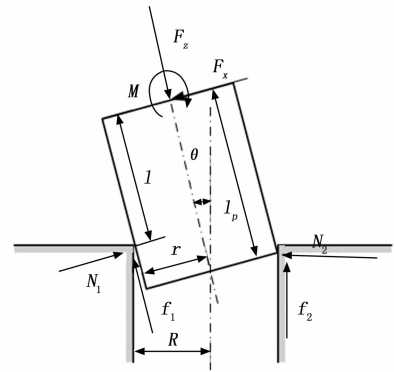


图 2 轴孔两点接触状态

件为:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K(U - U_0) \\ \mu N_1 + N_2 \sin\theta + \mu N_2 \cos\theta \\ K_\theta(\theta - \theta_0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

2 装配策略

2.1 接触状态图

经过粗定位步骤后, 轴孔中心之间已实现基本对齐, 但此时轴孔还存在微小的位姿误差。此时需要让轴根据接触力信息做出相应的位置和姿态的精确调整, 保证轴孔能顺利装配, 即需要进行插孔。

插孔过程根据力传感器检测的力与力矩信息, 判断轴孔相对的位置与姿态, 进而判断接触状态决定调整方向。

为了方便, 对力传感器信息进行归一化处理, 以 $\frac{F_x}{F_z}$ 为横坐标, $\frac{M}{rF_z}$ 为纵坐标。根据第 1 节接触状态模型, 由式 (1) 可得一点接触状态的状态轨迹, 如式 (6) 所示:

$$\begin{cases} \frac{F_x}{F_z} = \frac{1}{\mu} \\ \frac{M}{rF_z} = \frac{-L - \mu r}{\mu r} \end{cases} \quad (6)$$

令 $\lambda = \frac{L}{2r\mu}$, 则式 (6) 可简化为:

$$\begin{cases} \frac{F_x}{F_z} = \frac{1}{\mu} \\ \frac{M}{rF_z} = -2\lambda - 1 \end{cases} \quad (7)$$

对轴孔受力状态进行分析可知, 对应于不同的单点接触受力状况可分为 A、B、C、D 四种, 其中, 单点接触时, 其轨迹为 AC 或 BD 直线上的一点, 此时轨迹横坐标不变, 纵坐标随系统状态发生改变, 径向力与轴向力之间关系呈线性, 比例不变。继续插入, 孔轴接触达到 AC 或 BD 临界状况时会发生卡阻, 从而需要进行调整才可完成装配。

两点接触状态时，由于式（4）中 l_p 、 l 关系未知，因此将装配力简化至轴末端，由于 θ 足够小，因此 $\sin\theta \rightarrow 0, \cos\theta \rightarrow 1$ ，则有：

$$\begin{cases} F_x = N_1 - N_2 \\ F_z = \mu N_1 + \mu N_2 \\ M = \mu r(N_2 - N_1) - N_1 L \end{cases} \quad (8)$$

解得：

$$\frac{M}{rF_z} = -\frac{l}{2r\mu} - \frac{F_x}{F_z} \left(\frac{L}{2r} + \mu \right) \quad (9)$$

令 $\lambda = \frac{L}{2r\mu}, y = \frac{M}{rF_z}, x = \frac{F_x}{F_z}, a = -\mu(1+\lambda), b = -\lambda$
代入式（9）得：

$$y = ax + b \quad (10)$$

即在两点接触状态下，力矩与径向力关系轨迹呈线性，对应于图 2 中的 AB 和 CD 线段。其余的方向的受力情况具有对称的性质，然后汇总可得所有的接触状态与受力关系如图 3 所示。插孔策略根据力信息在关系图的位置来判断接触状态，从而决定机器人的调整方向。

当两点接触状态对应于 AB 段时，装配力矩为逆时针方向，减小力矩可以使得系统脱出卡阻，根据这一结论可以对装配力进行相应的调整 使得装配进入 ABCD 围成的装配可行域从而实现装配柔顺调整。

2.2 零点状态跟踪插孔策略

插孔过程是根据力传感器检测的力与力矩信息，判

断轴孔相对的位置与姿态，进而判断接触状态决定调整方向。而接触力、力矩与轴的位置、姿态均有关，耦合性强。装配过程中 5 个方向上的力与力矩存在耦合作用，各个力之间会相互影响。最主要的影响还是在调整过程中，角度的调整量是通过力矩来判断的。该策略把力矩归为两类，第一类是由位置偏差产生接触力引起的力矩，这是干扰力矩，第二类是由角度偏差产生的力矩，这是希望要的力矩，这两类力矩会叠加耦合，影响判断。

为此，提出了“零点”状态追踪的插孔策略。该插孔策略在每个角度调整前都会进行位置调整，使得水平接触力为 0，跟踪两点接触状态中的水平力“零点”，消除第一类力矩的影响，让角度调整量只受角度偏差的影响，所以各个方向的调整量只受对应方向偏差的影响，完成了解耦，实现单方向力控制单方向位置。轴孔装配过程中插孔策略主要有 4 步，如图 4 所示。

其主体操作步骤如表 1 所示：

表 1 插孔控制操作步骤

步骤	操作
1	调整 F_z ，使得 $F_z \rightarrow F_d$
2	调整 $F_x、F_z$ ，使得 $F_x \rightarrow 0, F_z \rightarrow F_d$
3	调整 A，使得 $M \rightarrow 0$
4	调整 $F_x、F_z$ ，使得 $F_x \rightarrow 0, F_z \rightarrow F_d$

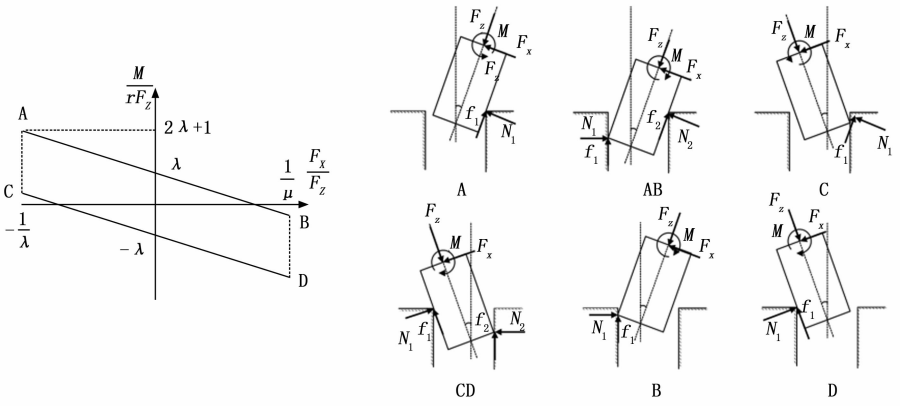


图 3 接触状态—受力分析图

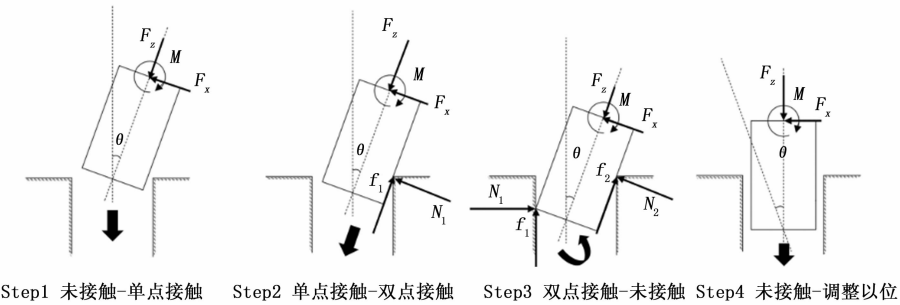


图 4 插孔策略示意图

1) 首先对任意状态的轴孔, 设定 Z 轴方向的期望力, 使轴沿 Z 方向向下运动, 直到 Z 方向接触力达到设定值, 同时也达到一点接触状态。

2) 设定 X 、 Z 轴方向的期望力从而同时调整 X 、 Z 位置, 使轴沿着轴向运动达到两点接触状态, 并让接触状态追踪到水平接触力的“零点”。此时轴运动受到孔内壁两点约束, 接触点产生约束力, 两处力同时作用下产生一个力矩。水平接触力的“零点”能消除干扰力矩的影响, 让角度调整量只受角度偏差产生的力矩的影响。

3) 设置绕 A 方向的期望力矩为 0, 再根据力矩旋转姿态角, 减小角度偏差, 解除两点接触的限制。然后轴孔处于一个不受限的状态。

4) 在解除两点限制后继续深入插孔。不断重复上述控制步骤, 直到 X 、 Z 、 A 方向的受力/力矩均达到设定值, 最终完成装配过程。

一个完整的插孔过程如图 5 所示, 轴会在孔中先根据接触力进行位置调整, 由接近阶段逐渐达到一点接触阶段, 即线段 AC 或 BD 上一点, 经轴向力增大再达到两点接触阶段, 即图中 AB 或线段 CD 阶段。然后在“零点”状态的两点接触阶段检测力矩信息, 根据接触力矩调整机器人末端的姿态角, 从而脱离两点接触状态, 对应于图中 $ABCD$ 围成的四边形内, 至此为一次循环。下一个循环继续进行位置调整, 进入下一个姿态角对应的两点接触阶段。随着轴孔装配的深入, 姿态角迭代减小至 0, 最后经接触力调整完成装配。

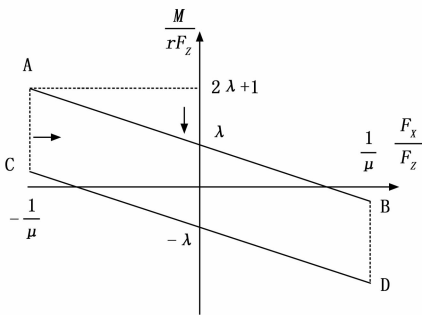


图 5 插孔策略图

2.3 装配过程

该插孔策略在每个角度调整步骤前会进行位置调整, 使水平接触力为 0, 跟踪两点接触状态中的水平力“零点”, 消除干扰力矩的影响, 让角度调整量只受角度偏差的影响, 所以各个方向的调整量只受对应方向偏差的影响, 完成了解耦, 实现单方向力控制单方向位置。

在单点接触状态下, M 与 θ 的关系由式 (2) 可知, 在两点接触状态下, M 与 θ 的关系如由 (5) 可知, 控制 X 、 Y 方向力为 0, Z 方向的期望力为设定值 (以 100 N

为例), 轴孔装配过程的理论力矩与姿态角的关系可通过其物理参数计算。

根据轴孔物理参数可得装配过程力矩与姿态角的关系曲线, 如图 6 所示, 图中力矩数值随姿态角大小降低而降低, 装配过程力矩与姿态角同正负。在姿态角恒负时, 理论力矩恒负, 在姿态角恒正时, 理论力矩恒正, 理论力矩的正负切换点是姿态角为 0° 的地方。

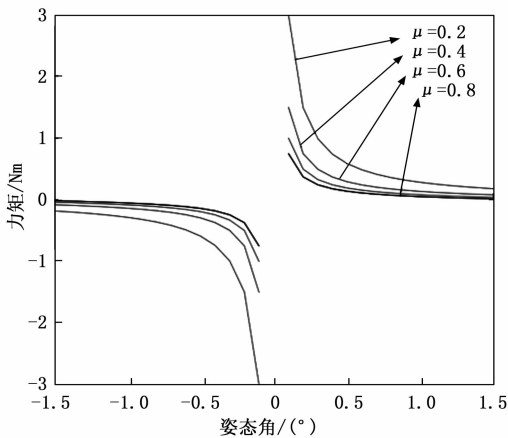


图 6 力矩-姿态角关系

3 实验验证

3.1 实验系统简介

本实验的实验对象为大尺寸高精度六轴工业机器人, 在长距离重复定位 (2.5 m 范围) 中, 重复定位精度在 0.2 mm。

装配对象为一对配合间隙为 $\Delta=0.07$ mm 的高精度轴孔, 轴孔直径 $D=206$ mm, 无量纲间隙 $c=\Delta/D=0.00034$, 该间隙非常小, 表明了装配任务较为困难。配合长度 13 mm, 自动化夹具+孔的总重为 550 N, 被动件轴倒圆 R_4 。选用高精度六维力传感器, 其量程和精度指标见表 2。

表 2 六维力传感器技术参数

力分量	力/N			力矩/Nm		
	F_x	F_y	F_z	T_x	T_y	T_z
量程	1 000	1 000	2 500	120	120	120
分辨率	0.5	0.5	0.5	0.05	0.05	0.05

3.2 力矩与姿态角关系验证

结合调控策略可知, 插孔过程由位置调整和力矩调整循环完成, 为实现精准调控, 需要对力矩和角度的关系进行分析。根据图 6 中分析可知, 外加调整力矩的大小应随角度的增大而减小。为验证该关系, 根据插孔策略步骤, 在完成初步位置调控后, 对不同初始角度状态下的轴孔关系进行姿态调整, 直至相对姿态对齐, 观察过程中所受力矩与角度的关系, 其结果如图 7 所示。

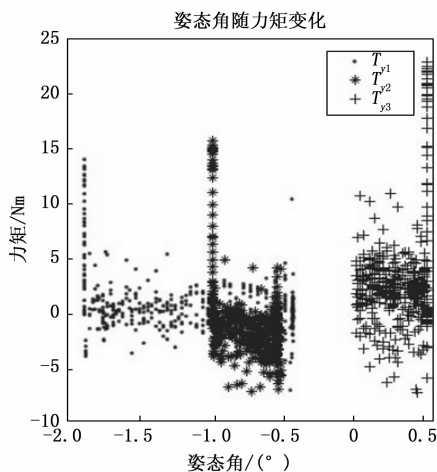


图 7 姿态角随力矩变化

分析图 7 中的 3 组姿态调控实验可知, 3 次调整角度的过程中, 力矩均先增大后减小, 增大时进行姿态角调整, 其中, 对应于每一次姿态角调整, 最开始力矩大后面姿态角减小后力矩也减小。但对应于不同的姿态角, 其需要调整的角度越大, 期望力矩反而越小。图 7 中的 T_{y3} 对应于 0.5° , 其调整力矩最大, 为 22.786 Nm, 图 7 所示 T_{y2} 对应于 0.99° , 其调整力矩居中, 为 15.618 Nm, 图 7 所示, T_{y1} 对应于 1.88° , 其调整力矩最小, 为 13.964 Nm, 经拟合可得:

$$T_y = 16.92\theta^{-0.37} \quad (11)$$

该关系与 2.3 节调控力矩大小与姿态角的关系相吻合, 即该调控模型构建的力矩与姿态角关系实测值与仿真值结果一致。

3.3 零点状态跟踪调控

为了验证提出的装配策略的有效性, 在此平台上分别进行插孔实验, 第一组实验中按照本文提出的调控策略进行调控, 第二组插孔过程中对位置和姿态不进行解耦。对插孔过程各方向力和力矩进行监控, 根据接触状态变化直接调控至轴向力达到期望值, 径向受力为 0, 力矩降为 0。

在第一组实验中, 插孔策略采用零点状态跟踪方法, 设定轴向方向期望力大小 $F_d = -100$ N, 径向方向期望力大小 $F_a = 0$, 在实验过程中, 以上述 4 步插孔策略法对机器人进行如下调控:

1) 增加轴向方向力, 此时插孔状态由无接触状态变为单点接触状

态, 此时完成搜孔阶段, 开始进入插孔阶段。

2) 同时调整轴向方向力和径向方向力, 使得此时插孔状态由单点接触状态转变为两点接触状态。此时完成位置调整, 角度调整量只受角度偏差影响。

3) 调整力矩, 使得姿态角偏差逐渐减小。当姿态角调整迭代至 0 时, 力矩值降为 0。由于减少了位置偏差造成的干扰, 调控过程中力矩快速完成收敛。

4) 调整轴向力和径向力, 使得当径向力变为 0, 轴向力增大至期望力大小时, 装配完成。由于姿态偏差降为 0, 调控过程径向力只在小范围内波动。

5) 经上述步骤循环调整, 可以实现位置与姿态解耦的高效调控。

在第二组实验中, 插孔策略采用传统调控方法, 设定轴向方向期望力大小 $F_d = -100$ N, 径向方向期望力大小 $F_a = 0$, 在实验过程中, 位置和姿态角均联合调控。

调控过程中记录对应各方向轴力数据。实验结果如图 8 所示。

分析图 8 可知, 第一组数据中, 先进行位置调控, 在进行位置调控时, x, y 各方向迅速受力, 经外加径向力和轴向力调控后, 各方向力逐渐降为 0, 接触状态变为无接触, 再继续调整 z 方向, 此时随着插孔动作的完成, F_z 突变至 100 N, 达到期望零点。然后进行姿态

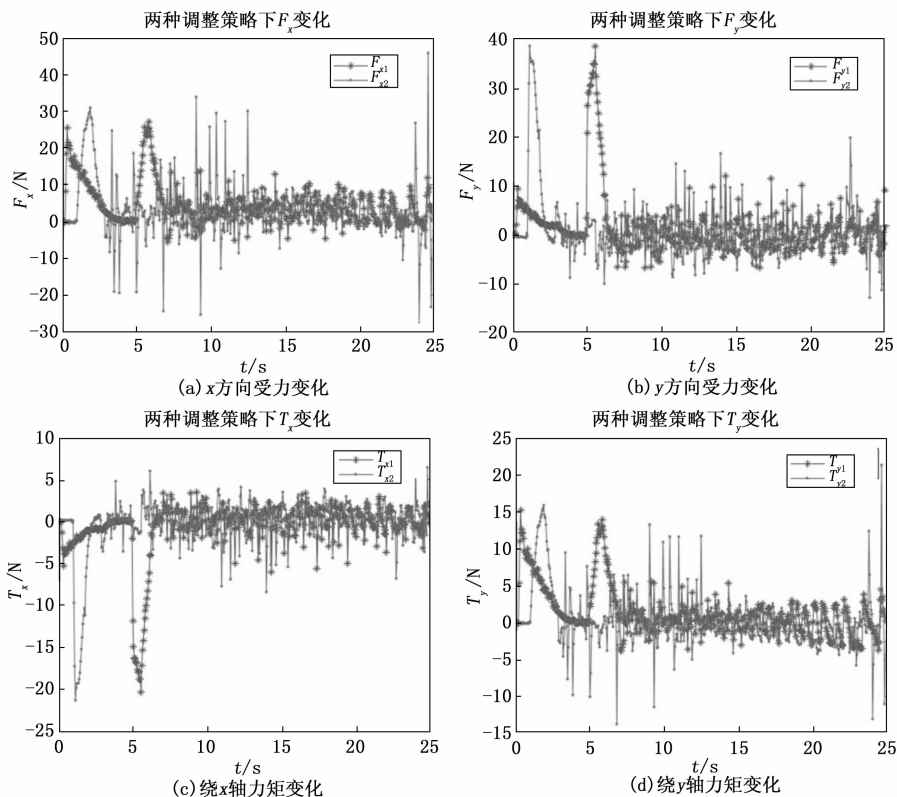


图 8 两种调控策略下各方向力(力矩变化)

角调控,在进行姿态角调控时,各方向受力达峰值,此时位于两点接触状态,经力矩调控使得姿态角减小,再进行位置微调,循环以上过程实现插孔。

分析对比图8中各方向力和力矩的调控变化可以看出,第一组中先进行位置调整再进行姿态调整,径向力和力矩在调整完成后只产生小范围波动,整体上收敛效率较高,波动较小。而第二组中未对位置和姿态进行解耦,调控过程中位置偏差产生的干扰力矩与角度偏差产生的力矩产生耦合,调控过程中 x 方向受力和绕 y 轴力矩震荡较大。总体上,采用本文提出的方法进行调控,在15 s左右完成调控,而解耦直接进行联调,在25 s左右完成调控,过程中间歇性出现力或力矩波动,调控过程不稳定。

3.4 零点状态跟踪末端位姿变化

插孔策略采用零点状态跟踪方法,实验时,让工件轴与工件孔有一个初始位置偏差13 mm,姿态偏差 1.2° ,对 X 、 Y 、 Z 、 A (绕 X 轴的旋转轴)、 B (绕 Y 轴的旋转轴)5个方向上分别进行力控,其中 Z 方向上设置接触力为 -100 N, X 、 Y 方向上接触力为 0 N, A 、 B 方向上接触力矩为 0 Nm。

采用零点状态跟踪插孔策略,对应机器人末端孔相对于轴的位置和姿态曲线如图9所示。

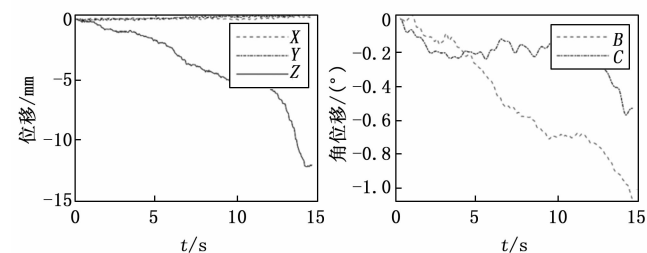


图9 插孔实验过程机器人末端位姿曲线

分析图9可知,机器人能在位置姿态存在偏差的情况下实现插孔到位,验证了所提出装配策略在柔顺装配平台下的有效性,并且在15 s内完成插孔,插孔过程的调整效率较好,验证了柔顺装配系统下插孔策略的高效性。

4 结束语

本文针对工业六自由度机器人的小间隙轴孔装配任务,提出一种基于接触状态跟踪法的装配策略。在装配阶段通过分析轴孔接触力模型,绘制接触状态一受力关系图,在此基础上设计零点状态跟踪的插孔策略。该策略通过解耦避免力矩之间的相互影响,从而提高了调整收敛效率。在轴孔装配调整过程中,各个轴的调整量都由对应的力控制,实现多维度控制任务的解耦。调控过程中姿态角越大,所需调整力矩越小,采用零点状态跟

踪法进行调控时,在15 s左右完成调控,相比传统调控方式其调控时间缩短40%,且过程中力矩波动小,调控过程稳定。实验结果证明了上述装配策略的有效性。

参考文献:

- [1] 薛亚东,陈庆盈,尹建平,等.基于力反馈的轴孔柔顺装配策略[J].自动化与仪器仪表,2021(4):152-155.
- [2] 黄婷,孙立宁,王振华,等.基于被动柔顺的机器人抛磨力/位混合控制方法[J].机器人,2017,39(6):776-785.
- [3] 芦俊,颜景平,陈俊杰,等.基于自适应阻抗控制的轴孔装配方法[J].控制理论与应用,2003(1):85-88.
- [4] 赵英杰,刘正海,赵经济,等.基于导纳控制的薄壁变形套筒柔顺装配方法[J].组合机床与自动化加工技术,2023(6):141-144.
- [5] 夏妍春,殷跃红,盛鑫军,等.动态卡阻及主动柔顺装配策略研究[J].高技术通讯,2004,14(7):63-68.
- [6] 潘柏松,颜天野,胡鑫达,等.基于几何约束与隐马尔可夫链模型的轴孔装配策略[J].计算机集成制造系统,2022,28(12):3768-3778.
- [7] PARK H, PARK J, LEE D H, et al. Compliance-based robotic peg-in-hole assembly strategy without force feedback[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 8: 1.
- [8] KRONANDER K, BILLARD A. Stability considerations for variable impedance control[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 32(5):1298-1305.
- [9] WANG F, LUO Z, LIU H, et al. Impedance model based fuzzy force control for robot manipulator contacting with a constrained surface with uncertain errors[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2010, 1: 1555-1558.
- [10] HE W, DONG Y. Adaptive fuzzy neural network control for a constrained robot using impedance learning[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018, 29(4):1-13.
- [11] TANG T, LIN H C, YU Z, et al. Autonomous alignment of peg and hole by force/torque measurement for robotic assembly[C]//IEEE International Conference on Automation Science & Engineering, IEEE, 2016, 16: 162-167.
- [12] 陈钢,王玉琦,贾庆轩,等.机器航天员轴孔装配过程中的力位混合控制方法[J].宇航学报,2017,38(4):410-419.
- [13] LIU Z, SONG L B, HOU Z M, et al. Screw insertion method in peg-in-hole assembly for axial friction reduction[J]. IEEE Access, 2019, 7(1):48313-48325.

(下转第185页)