

## 基于接触力-姿态模型的机器人非刚体轴孔装配偏角预测方法<sup>①</sup>

胥芳<sup>②</sup> 沈一丰 陈教科<sup>③</sup> 王佳才

(浙江工业大学机械工程学院 杭州 310014)

**摘要** 针对机器人非刚体轴孔装配过程中的偏差角识别问题,提出了一种基于接触力-姿态模型的装配偏角预测方法。对非刚体轴孔装配过程中不同的接触状态进行静力学理论推导和弹性形变计算,进而建立接触力-姿态模型。在此基础上,结合动态罚函数和灰狼算法对模型进行可行域内的寻优求解,得到装配偏角。通过机器人的非刚体轴孔装配实验,采集不同接触状态和装配偏角下的力觉数据,并将其代入接触力-姿态模型得到预测偏角。结果表明,装配偏角在 $0\sim 10^\circ$ 的情况下,本文所提方法的非刚体轴孔装配偏角预测误差在 $0.5^\circ$ 以内,可为后续的成功装配提供有效的工件装配姿态信息。

**关键词** 机器人装配;非刚体轴;弹性形变;接触力-姿态模型;动态罚函数

### 0 引言

近年来随着机器人技术的快速发展,工业机器人已逐渐成为智能制造领域不可或缺的装备和手段<sup>[1]</sup>。而机器人装配作为智能制造过程的重要环节,其装配质量的优劣直接影响产品最终的使用性能与品质。

在机器人装配任务中,轴孔类零部件的装配是其主要的工作形式。如轴承的装配、PCB板的装配以及汽车轮毂的装配等都是典型的不同形状的轴孔装配<sup>[2]</sup>。为了提高机器人装配质量和效率,很多学者以轴孔装配为对象对机器人装配过程进行了研究。刘文瑛和胡文锋<sup>[3]</sup>应用模式识别原理建立力-位置模型,结合模型控制机器人调整装配轴的位置并实现轴孔装配。文献[4,5]通过对带倒角轴孔装配过程进行几何和动态平衡的推导,建立了包括重力、惯性以及装配速度等多个因素的动力学模型,能够较好地了解动态装配的机理。胡建元等人<sup>[6]</sup>建立了考虑粘滑现象的通用动力学模型。Vartanov等

人<sup>[7]</sup>基于拉格朗日方程建立动态装配过程的数学模型,同时应用低频振动和自适应夹持器来扩展机器人的装配能力。Zhang等人<sup>[8]</sup>对柔性双轴装配过程的卡阻特性进行了研究,通过分析不同阶段的接触状态和干扰状态,建立了接触力和零件姿态的对应关系,提出了相应的装配策略。以上诸多研究均针对刚性装配件或者针对带有柔顺装置的装配过程展开,但是不同于刚性零件,非刚体零件在装配时由于接触力的作用会产生弹性形变,刚体装配模型无法体现非刚体装配特性,故上述方法对非刚体装配均不适用。

Zheng等人<sup>[9]</sup>以一维柔性梁为装配对象,通过研究柔性梁在自重作用下的形变曲线来调整夹持末端的运动轨迹,进而实现轴孔装配。但是当装配情况比较复杂时,该装配策略难以实现。Hirai等人<sup>[10]</sup>提出了一种基于人体演示的可变形管插入状态转换识别方法,但是该方法依赖于人体示教过程。Wakamatsu等人<sup>[11]</sup>提出了一种可变形线性物体的建模方法,能够根据相关约束计算物体的形变量,但是其运算量较大。夏妍春等人<sup>[12]</sup>对弹性轴孔装配

① 国家重点研发计划(2018YFB1309404)和浙江省公益技术研究计划(LGG18E050023)资助项目。

② 女,1964年生,博士,教授;研究方向:机器人与智能装备;E-mail:fangx@zjut.edu.cn。

③ 通信作者,E-mail:jlchen@zjut.edu.cn。

(收稿日期:2021-02-09)

任务进行了几何约束和运动约束的分析,解决了以弹性梁部分在装配孔内为前提的装配问题。但当弹性梁由于偏差问题而无法顺利进入装配孔内时该方法不可行。Jasim 等人<sup>[13]</sup>以柔性橡胶零件为装配对象,对其装配过程进行了接触状态划分,提出了基于分布式高斯混合方法的接触状态模型并实现了快速精准的状态识别。但是该模型只能识别当前轴孔装配状态,不能给出装配偏角等具体数值。Xing 等人<sup>[14]</sup>对于部分柔性的装配对象通过分阶段建立装配模型,提出了一种在精密装配中插入部分柔性对象的有效策略。然而该策略主要应用于刚柔性耦合的装配对象,对于柔性分布较为均匀的非刚体零件并不适用。

在非刚体轴孔装配的过程中,由于夹持不稳等因素使得非刚体轴在装配过程中通常存在一定的装配偏角。装配偏角的存在导致非刚体轴与装配孔边缘接触或者与孔外平面接触使得装配任务难以继续,故有必要对装配偏角进行预测和调整以保证后续装配的顺利进行。针对以上问题,本文提出了一种基于接触力-姿态模型的机器人非刚体轴孔装配偏角预测方法。针对现有的刚性接触力-姿态模型不能直接用于非刚体轴孔装配的问题,本文通过对装配过程的分析,在不同接触状态下结合静力学理论推导和形变计算,建立符合非刚体零件装配特性的接触力-姿态模型。针对非刚体零件接触力-姿态模型复杂、难求解且带有多个约束的问题,本文结合动态罚函数法<sup>[15-16]</sup>和灰狼算法<sup>[17]</sup>将约束寻优问题<sup>[18-19]</sup>转化为无约束寻优问题,并在可行域内寻得模型的最优解即最优装配偏角。最后,机器人装配实验证明本文所提的方法能够较好地预测装配偏角。

## 1 非刚体轴孔接触姿态分析与假设

在机器人非刚体轴孔装配的过程中,机器人末端夹持非刚体轴完成装配动作。由于机器人夹持不稳等因素使得非刚体轴存在一定的装配偏角。针对非刚体轴孔装配过程中存在装配偏角的问题,分析其可能发生的接触状态,发现主要可以分成 2 种接

触状态,分别是单点接触状态和双点接触状态,如图 1 所示。单点接触状态下,非刚体轴的下端面与孔外平面发生点接触;双点接触状态下,非刚体轴的下端面边缘与刚性装配孔边缘发生点接触。示意图中均未体现非刚体轴与刚性孔在接触过程中发生的形变。

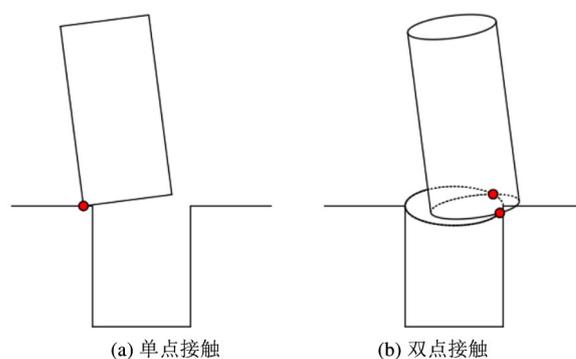


图 1 轴孔接触状态

为了方便后续建立接触力-姿态模型,根据非刚体轴孔材料特性和相关理论<sup>[20]</sup>,对装配过程做出以下假设。

- (1) 非刚体轴材料连续均匀,且不具可压缩性。
- (2) 非刚体轴在与刚性孔的接触过程中发生弹性小形变,即形变后可恢复。
- (3) 非刚体轴在形变过程中,任意截面始终与轴线垂直且形状不变。

## 2 接触力-姿态模型和动态罚函数灰狼算法

针对非刚体轴孔装配的单点接触状态和双点接触状态,需要建立接触力-姿态模型,进而通过力反馈信息来实现对非刚体轴姿态偏角的预测。由于非刚体轴在与刚体孔装配接触的过程中易发生弹性形变,故仅通过静力学理论推导和几何计算无法实现对非刚体轴姿态偏角的预测。

针对非刚体轴在装配过程中发生弹性形变的问题,本文通过对非刚体轴进行静力学理论推导和形变计算来建立接触力-姿态模型。

### 2.1 单点接触状态建模

当非刚体轴孔处于单点接触状态时,非刚体轴

的下端面与孔外平面发生点接触,过接触点存在非刚体轴的对称平面,故可以将三维问题转换为二维问题并在二维平面内对其进行分析。

如图 2 所示,在  $Y-Z$  二维平面对单点接触状态下的非刚体轴孔进行静力学分析。图中  $P_1$  表示非刚体轴与孔外平面的接触点,  $P_g$  表示非刚体轴的重心,  $P_o$  表示非刚体轴上端面的中心。此时,非刚体轴处于受力平衡状态,具体表达式为

$$\begin{aligned} F_1 \cos\theta - F_2 \sin\theta - G + F_n &= 0 \\ F_1 \sin\theta + F_2 \cos\theta + F_f &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $F_1$ 、 $F_2$  是夹持器对非刚体轴的夹持力,  $G$  表示非刚体轴的重力,  $F_n$ 、 $F_f$  是轴在接触点  $P_1$  处受到的支持力和摩擦力, 偏角  $\theta$  是非刚体轴的姿态偏角, 即上端面法线与  $Z$  轴的夹角。

通过结合式(1)可以得到非刚体轴相对于轴上端面中心  $P_o$  力矩平衡, 具体表达式为

$$\begin{aligned} M_x = & -G(0.5 \sin\theta l - d_g) \\ & - F_f(\cos\theta l + \sin\theta r - d_z + \delta_1) \\ & + F_n(\sin\theta l - \cos\theta r + d_y + \delta_2) \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $l$  为非刚体轴的长度,  $r$  为非刚体轴的半径,  $d_g$  为非刚体轴重心  $P_g$  相对于夹持端在  $Y$  轴方向上的偏移量,  $d_z$  为接触点  $P_1$  相对于非刚体轴夹持端在  $Z$  轴方向上的偏移量,  $d_y$  为接触点  $P_1$  相对于非刚体轴夹持端在  $Y$  轴方向上的偏移量。  $d_g$ 、 $d_z$ 、 $d_y$  均是由于非刚体轴发生整体形变而导致的偏移量, 而  $\delta_1$  和  $\delta_2$  则是由于接触点发生局部形变而添加的补偿量。

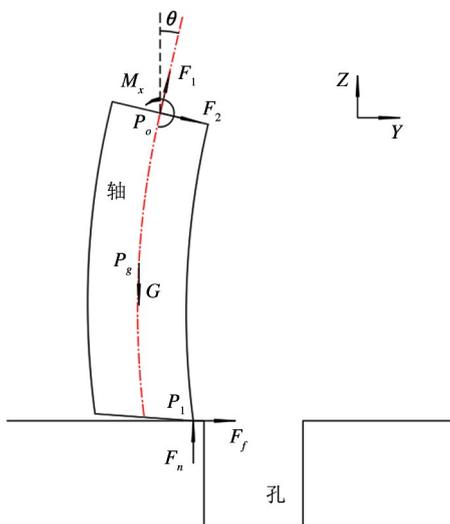


图 2 单点接触状态示意图

由于非刚体轴在装配时发生了弹性形变, 产生了  $d_g$ 、 $d_z$  和  $d_y$  等多个偏移量, 为了求解非刚体轴的姿态偏角  $\theta$ , 需要对非刚体轴进行形变分析。在装配过程中非刚体轴的一端受到机器人末端夹持器的夹持固定, 另一端与刚性孔接触且在接触点  $P_1$  处受到外力作用, 故可将此形变过程简化为简易梁的弯曲变形过程。如图 3 所示, 基于上述简化可以将接触点  $P_1$  处的支持力  $F_n$  和摩擦力  $F_f$  等效到非刚体轴轴线末端处, 分别为等效力矩  $M$ 、轴向力  $F_l$  以及径向力  $F_r$ 。等效力矩和力的具体表达式为

$$\begin{aligned} M &= F_f \sin\theta r + F_n \cos\theta r \\ F_l &= F_f \sin\theta + F_n \cos\theta \\ F_r &= F_f \cos\theta - F_n \sin\theta \end{aligned} \quad (3)$$

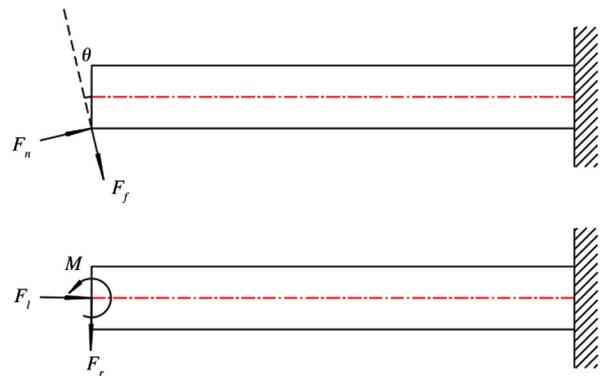


图 3 单点接触状态的等效分析

结合上述等效分析和弯曲变形的基本理论, 梁的弯曲变形通常由梁轴线发生的位移来表示, 而梁的轴线弯曲后变成一条曲线即挠度曲线, 如图 4 所示。基于小变形理论和非刚体弹性变形特性, 可以通过载荷叠加的方式对形变量进行求解, 具体表达式为

$$\begin{aligned} W_e &= \frac{F_l l^3}{3EI} + \frac{Ml^2}{2EI} & W_g &= \frac{5F_l l^3}{48EI} + \frac{Ml^2}{8EI} \\ \theta_e &= \frac{F_r l^2}{2EI} + \frac{Ml}{EI} & I &= 1/4 \pi r^4 \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $W_e$  为轴自由端挠度,  $W_g$  为轴中点挠度,  $\theta_e$  为轴自由端端面转角,  $E$  为非刚体轴的弹性模量,  $I$  为非刚体轴圆形截面的转动惯量。

根据上述假设和挠度分析可以对  $d_g$ 、 $d_z$ 、 $d_y$  等多个偏移量进行求解, 具体表达式为

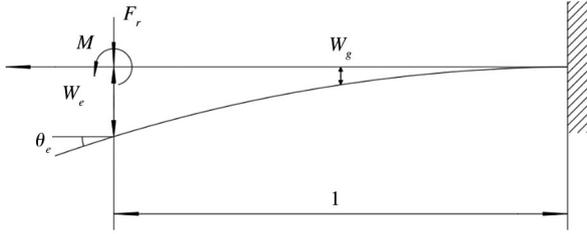


图4 梁的弯曲变形分析

$$d_g = \cos\theta W_g$$

$$d_z = -\sin\theta(\cos\theta_e r + W_e - r) + \cos\theta\sin\theta_e r \quad (5)$$

$$d_y = \cos\theta(\cos\theta_e r + W_e - r) + \sin\theta\sin\theta_e r$$

与此同时,为保证模型的准确性,结合实际需对部分形变量添加约束,具体表达式为

$$G_1: |\tan\theta_e - \theta_e| \leq \sigma_1$$

$$G_2: \theta_e - \theta \leq 0 \quad (6)$$

$$G_3: |d_y| \leq \sigma_2$$

其中,  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$  均表示单点接触状态下的约束条件,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  为约束常量。其中,  $G_1$  表示非刚体轴发生弹性小形变,  $G_2$  表示非刚体轴端面转角小于轴线转角,  $G_3$  表示非刚体轴在装配过程中未发生滑移。

结合式(1)~(6)得到单点接触状态下的非刚体接触力-姿态模型。

## 2.2 双点接触状态建模

针对非刚体轴孔的双点接触状态,建模过程与单点接触状态类似。如图5所示,在双点接触状态下对非刚体轴进行静力学分析。图中,  $P_o$ 、 $P_o'$  和

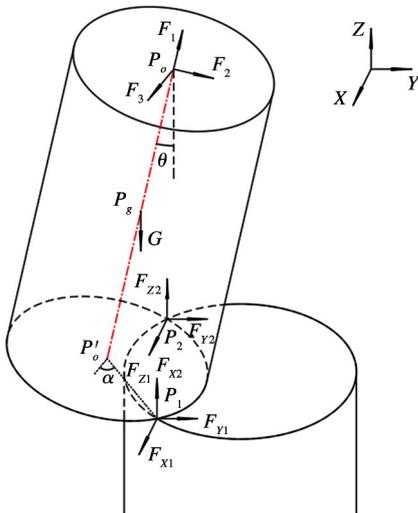


图5 双点接触状态示意图

$P_g$  分别表示非刚体轴上下端面的中心和重心,  $P_1$  和  $P_2$  表示轴下端边缘与装配孔边缘的接触点。

在接触点  $P_1$  和  $P_2$  处,由于点点接触会造成接触点附近产生难以确定的形变,无法确定接触点处受力的具体方向,故参照坐标系  $X$ - $Y$ - $Z$  假设接触点的受力分别为  $F_{x1}$ 、 $F_{y1}$ 、 $F_{z1}$  和  $F_{x2}$ 、 $F_{y2}$ 、 $F_{z2}$ 。另外,接触点  $P_1$  与非刚体轴下端面中心  $P_o'$  连线  $P_o'P_1$  与  $X$  轴方向的夹角用  $\alpha$  表示,轴线  $P_oP_o'$  与  $Z$  轴方向的夹角用  $\theta$  表示,即非刚体轴的姿态偏角。

此时,非刚体轴受力平衡,具体表达式为

$$F_1 \cos\theta - F_2 \sin\theta - G + F_{z1} + F_{z2} = 0$$

$$F_1 \sin\theta + F_2 \cos\theta + F_{y1} + F_{y2} = 0 \quad (7)$$

$$F_3 + F_{x1} + F_{x2} = 0$$

与单点接触状态类似,在接触点  $P_1$  和  $P_2$  之间存在非刚体轴的对称平面。结合图5,假设接触点  $P_1$  和  $P_2$  对称于  $Y$ - $Z$  二维平面内对非刚体轴进行分析。此时,即  $F_z = F_{z1} = F_{z2}$ ,  $F_y = F_{y1} = F_{y2}$ ,  $F_{x1} = -F_{x2}$ ,  $F_3 = 0$ , 故式(7)可进一步简化为

$$F_1 \cos\theta - F_2 \sin\theta - G + 2F_z = 0 \quad (8)$$

$$F_1 \sin\theta + F_2 \cos\theta + 2F_y = 0$$

结合式(8)可以得到非刚体轴在上端面中心  $P_o$  处力矩平衡,具体表达式为

$$\begin{aligned} M_x = & -G(0.5\sin\theta l - d_g) \\ & -F_y(\cos\theta l + \sin\theta\sin\alpha r - d_z + \delta_1) \\ & + F_z(\sin\theta l - \cos\theta\sin\alpha r + d_y + \delta_2) \end{aligned} \quad (9)$$

同理,将接触点  $P_1$  和  $P_2$  处所受的力  $F_y$  和  $F_z$  等效到非刚体轴轴线末端处,分别为等效力矩  $M$ , 轴向力  $F_l$  以及径向力  $F_r$ 。等效力矩和力的具体表达式为

$$M = 2F_y \cos\alpha \sin\theta r + 2F_z \cos\alpha \cos\theta r$$

$$F_l = 2F_y \sin\theta + 2F_z \cos\theta \quad (10)$$

$$F_r = 2F_y \cos\theta - 2F_z \sin\theta$$

结合根据上述假设和挠度分析可以对偏移量  $d_z$  和  $d_y$  进行求解,具体表达式为

$$d_z = -\sin\theta(\sin\alpha \cos\theta_e r + W_e - \sin\alpha r) + \cos\theta \sin\alpha \sin\theta_e r$$

$$d_y = \cos\theta(\sin\alpha \cos\theta_e r + W_e - \sin\alpha r) + \sin\theta \sin\alpha \sin\theta_e r$$

$$(11)$$

同样,在此基础上对模型添加部分约束  $G_1$ 、 $G_2$

和  $G_3$ , 约束表达式与单点接触状态的约束表达式一致, 这里不再赘述。

结合式(7)~(11)及式(6)得到双点接触状态下的非刚体接触力-姿态模型。

### 2.3 动态罚函数灰狼算法

不难发现, 上述接触力-姿态模型比较复杂, 同时具有多个约束条件, 所以很难求得模型的解析解。针对接触力-姿态模型复杂且难以求解的问题, 可以采用进化算法对模型进行求解。本文采用搜索能力较强的灰狼算法对接触力-姿态模型进行寻优求解。针对多个约束条件, 可以采用罚函数法将约束与目标函数结合起来, 进而将约束优化问题转化为无约束优化问题。其中, 罚函数方法中较为常用的就是静态罚函数<sup>[21-22]</sup>和动态罚函数。由于静态罚函数其惩罚系数在整个进化寻优过程中为定值不依赖于迭代, 故其结合算法寻优效果较差。而动态惩罚函数其惩罚系数随迭代变化, 结合算法效果较好。综上分析, 本文采取动态罚函数灰狼算法对接触力-姿态模型进行可行域内的寻优求解, 进而求得最优可行解。

以单点接触状态下的接触力-姿态模型为对象, 对其进行可行域内的寻优求解。此时目标函数的表达式为

$$\begin{aligned} objective = & M_x + G(0.5\sin\theta l - d_g) \\ & + F_f(\cos\theta l + \sin\theta r - d_z + \delta_1) \\ & - F_n(\sin\theta l - \cos\theta r + d_y + \delta_2) \end{aligned} \quad (12)$$

结合式(6), 约束条件可以表达为

$$\begin{aligned} G_1 = & \max(|\tan\theta_e - \theta_e| - \sigma_1, 0) \\ G_2 = & \max(\theta_e - \theta, 0) \end{aligned} \quad (13)$$

$$G_3 = \max(|d_y - \sigma_2|)$$

动态罚函数的表达式为

$$\begin{aligned} G = & (a \times it)^b \sum_{i=1}^3 \gamma_i G_i^c \\ \gamma_i = & \frac{3G_i^c}{\sum_{i=1}^3 G_i^c} \end{aligned} \quad (14)$$

式中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为常系数,  $it$  为当前迭代次数,  $\gamma_i$  为每个约束的分配系数。此类罚函数在迭代之初对于不可行解的惩罚力度较小, 那么算法可以在可行域之

外的部分区域进行搜索; 随着迭代次数的增加, 罚函数对于不可行解的惩罚力度不断加大, 限制算法在可行域内寻得最优解。分配系数  $\gamma_i$  的作用在于根据当前个体违反约束条件的现状来分配惩罚力度, 优先对违反程度较高的约束条件进行限制, 增加罚函数的自适应能力。

结合式(12)和式(14)可以得到动态罚函数灰狼算法的适应度函数为

$$fitness = objective + (a \times it)^b \sum_{i=1}^3 \gamma_i G_i^c \quad (15)$$

结合单点接触状态和双点接触状态的接触力-姿态模型, 得到其目标函数式(12)。将模型目标函数结合动态罚函数得到适应度函数式(15), 将其作为动态罚函数灰狼算法中衡量种群质量的重要标准。在种群的迭代过程中, 通过计算个体的适应性值来剔除种群中表现较差的个体, 进而保证种群的优越性, 最终找到最优个体。即通过动态罚函数灰狼算法迭代求解接触力-姿态模型中的最优装配偏角。

## 3 实验验证与分析

### 3.1 实验设计

为验证本文所提出的非刚体轴孔装配偏角预测方法的有效性, 搭建了相应的机器人装配实验平台, 如图6所示。实验平台主要由机器人、力传感器、夹持器、非刚体轴及刚性孔组成。实验所使用的机器

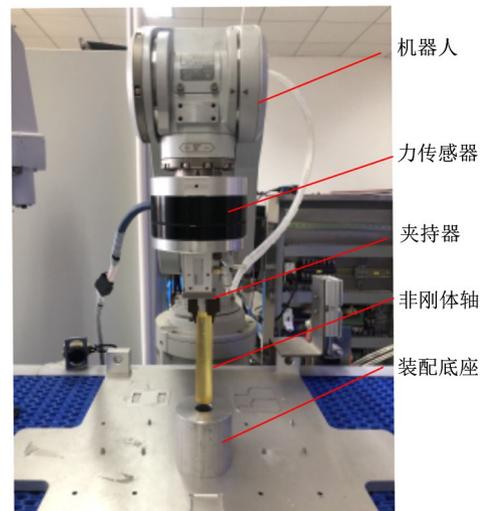


图6 实验平台

人是三菱公司制造的 RV-2F 六轴机器人,机身占地面积少、动作区域大,可实现压、卡、推、旋、嵌等复杂的装配动作。力传感器选择与 RV-2F 六轴机器人配套的 1F-FS001-W200 六维力传感器,该型号传感器的力/力矩额定负载为 200 N/4 N·m,分辨率为 0.03 N/0.0006 N·m,采样频率为 141 Hz,能够实时监测和精准采集装配过程中产生的接触力和力矩。夹持器由型号为 MHZ2-10D 的气缸驱动,能够提供 1.7 kg 左右的夹持力。非刚体轴采用聚氨酯棒,接触受力时易发生弹性形变,装配底座为铝制底座。

实验过程中,控制机器人末端偏转特定角度来代替非刚体轴在装配过程中因夹持不当等原因而产生的姿态偏角。控制机器人末端竖直向下运动使得非刚体轴与刚性底座发生接触,如图 7 所示。图 7(a)和图 7(b)分别表示单点接触状态和双点接触状态,图左侧均表示刚接触未发生形变状态,图右侧均表示受力形变状态。

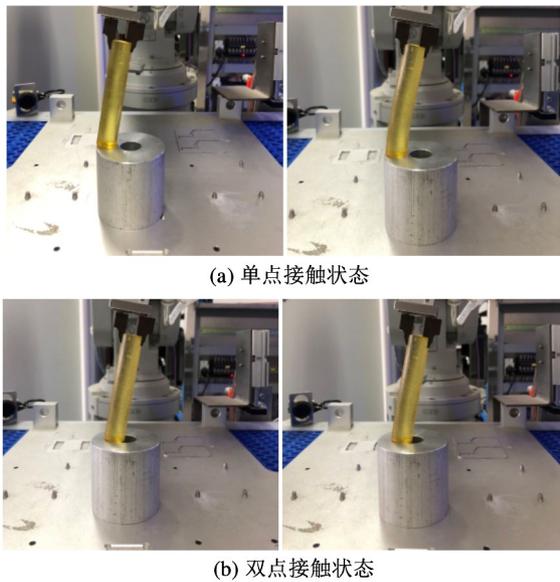


图 7 轴孔装配状态

在非刚体轴孔装配的过程中,由于夹持不稳等因素使得非刚体轴在装配过程中通常存在 0 ~ 10° 的装配偏角。故在实验中对非刚体轴装配偏角为 0 ~ 10° 的 2 种接触状态进行接触力/力矩信息的采集,共计 20 组实验数据用于非刚体轴孔装配偏角预测方法的验证。

### 3.2 实验结果与讨论

为验证本文所提的基于接触力-姿态模型的机器人非刚体轴孔装配偏角预测方法的有效性,将实验所得数据代入非刚体接触力-姿态模型进行验证,得到的预测结果如表 1 和表 2 所示。表 1 表示单点接触状态下的预测结果,其结果包含基于经典刚体接触力-姿态模型<sup>[4-5]</sup>的预测结果、基于非刚体接触力-姿态模型和静态罚函数灰狼算法的预测结果以及基于非刚体接触力-姿态模型和动态罚函数灰狼算法的预测结果。表 2 表示双点接触状态下的预测结果,其结果包含基于非刚体接触力-姿态模型和静态罚函数灰狼算法的预测结果以及基于非刚体接触力-姿态模型和动态罚函数灰狼算法的预测结果。

表 1 单点接触状态预测结果

实际偏角/°	经典刚体模型/°	非刚体模型/°	
		静态罚函数	动态罚函数
1	6.6348	2.1975	1.3227
2	7.3857	3.0451	2.4819
3	8.1658	4.1823	3.4533
4	9.5956	5.2408	4.4840
5	10.1596	6.0213	5.4079
6	11.4349	7.1132	6.4334
7	12.3072	8.0513	7.3493
8	13.2190	9.0662	8.2905
9	14.1937	10.2224	9.1571
10	15.3295	11.1741	10.0898

表 2 双点接触状态预测结果

实际偏角/°	非刚体模型/°	
	静态罚函数	动态罚函数
1	2.2213	1.4963
2	3.3450	2.2361
3	4.1290	3.3624
4	5.3170	4.4703
5	6.1864	5.4271
6	7.3944	6.3837
7	8.2815	7.4563
8	9.3124	8.3832
9	10.3715	9.4653
10	11.2830	10.3781

表1中加入经典刚体接触力-姿态模型和非刚体接触力-姿态模型的对比是为了体现本文所提非刚体接触力-姿态模型的准确性和合理性,在表2中没有重复对比。

分析表1中的数据可以发现,采用经典刚体接触力-姿态模型时,预测结果误差较大,各个偏角的误差均在 $5^\circ$ 以上;而采用非刚体接触力-姿态模型时,预测结果误差相对较小,各个偏角的误差均在 $1.5^\circ$ 以下。这是因为非刚体轴在接触过程中发生了不可忽略的形变,而刚体模型未考虑形变问题,无法体现非刚体装配的装配特性,所以其预测结果误差较大。

对比分析表1和表2中分别采用静态罚函数灰狼算法和动态罚函数灰狼算法得到的预测结果可以发现,采用动态罚函数灰狼算法的预测结果误差相对较小。因为相比于静态罚函数中惩罚系数的固定不变,动态罚函数中惩罚系数会随着迭代次数的增加而增大惩罚力度,使得算法的搜索区域集中在可行域内,便于算法找到最优的可行解,所以采用动态罚函数灰狼算法的预测结果误差较小。

分析表1和表2中采用非刚体接触力-姿态模型和动态罚函数灰狼算法得到的预测结果可以发现,本文所提的基于接触力-姿态模型的机器人非刚体轴孔装配偏角预测方法能够较好地预测装配偏角,且误差均在 $0.5^\circ$ 以内。针对 $0.5^\circ$ 的误差,根据非刚体轴材料的弹性特性,可以认为其在成功装配的合理偏差范围内。故本文所提的方法预测结果较为精准,能为后续装配工作的完成提供有效的工件装配姿态信息。

## 4 结论

本文针对机器人非刚体轴孔装配过程中存在装配偏角的问题,进行了如下研究。

(1)对机器人非刚体轴孔装配过程进行了接触状态分析,结合静力学分析和形变分析,建立了符合非刚体轴孔装配特性的机器人装配接触力-姿态模型。

(2)根据接触力-姿态模型特性,采用动态惩罚

函数灰狼算法进行可行域内的寻优求解。设计了机器人非刚体轴孔装配实验,采集不同接触状态和不同装配偏角情况下的力觉数据,对本文所提的偏角预测方法进行验证。结果表明,两种接触状态的预测值和实际值的误差均在 $0.5^\circ$ 以内,故本文提出的基于接触力-姿态模型的机器人非刚体轴孔装配偏角预测方法能够有效地预测机器人非刚体轴孔装配过程中存在的装配偏角。

在后续的研究工作中将继续修正接触力-姿态模型同时改进约束优化算法以提高预测精度。

## 参考文献

- [1] 刘超. 智能制造中的工业机器人技术[J]. 中国新通信, 2017, 19(14): 154
- [2] 王森. 基于主被动柔顺的机器人轴孔精密装配技术研究[D]. 苏州: 苏州大学机电工程学院, 2020: 1-8
- [3] 刘文瑛, 胡文锋. 机器人插入装配的一种主动柔顺策略研究——模式识别法[J]. 高技术通讯, 1994, 4(1): 16-20
- [4] NGUYEN T D, BETEMPS M, JUTARD A. Analysis of dynamic assembly using passive compliance[C] // Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nagoya, Japan, 1995: 1997-2002
- [5] HASKIYA W, MAYCOCK K, KNIGHT J. Robotic assembly: chamferless peg-hole assembly[J]. *Robotica*, 1999, 17(6): 621-634
- [6] 胡建元, 杜克林, 黄心汉. 机器人装配过程动力学分析[J]. 高技术通讯, 1998, 8(2): 31-35
- [7] VARTANOV M V, BOJKOVA L V, ZININA I N. Mathematical model of robotic assembly by means of adaptation and low-frequency vibration[J]. *Assembly Automation*, 2017, 37(1): 130-134
- [8] ZHANG K G, XU J, CHEN H P, et al. Jamming analysis and force control for flexible dual peg-in-hole assembly[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(3): 1930-1939
- [9] ZHENG Y F, PEI R, CHEN C. Strategies for automatic assembly of deformable objects[C] // Proceeding of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, USA, 1991: 2598-2603
- [10] HIRAI S, NOGUCHI H, IWATA K. Human-demonstration based approach to the recognition of process state transitions in insertion of deformable tubes[C] // Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, USA, 1996: 2006-

- 2011
- [11] WAKAMATSU H, HIRAI S, IWATA K. Modeling of linear objects considering bend, twist, and extensional deformation[C] // Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nagoya, Japan, 1995: 433-438
- [12] 夏妍春, 白跃伟, 蔡池兰. 柔性轴孔装配策略研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(18): 2164-2169
- [13] JASIM I F, PLAPPER P W, VOOS H. Contact-state modelling in force-controlled robotic peg-in-hole assembly processes of flexible objects using optimised Gaussian mixtures[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, 2017, 231(8): 1448-1463
- [14] XING D P, LIU F F, LIU S, et al. Efficient insertion of partially flexible objects in precision assembly[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019, 16(2): 706-715
- [15] SHIRAZI M, AASHTIANI H Z, QUADRIFOGLIO L. Estimating the minimal revenue tolls in large-scale roadway networks using the dynamic penalty function method[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2017, 107: 120-127
- [16] 郭天奇, 夏益美, 王福花, 等. 基于混合动态罚函数改进协同优化算法的船舶结构静动力学优化设计[J]. 振动与冲击, 2019, 38(20): 70-76
- [17] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. *Advances in Engineering Software*, 2014, 69(3): 46-61
- [18] 李智勇, 黄滔, 陈少森, 等. 约束优化进化算法综述[J]. 软件学报, 2017, 28(6): 1529-1546
- [19] 李笠, 李广鹏, 常亮, 等. 约束进化算法及其应用研究综述[J]. 计算机科学, 2021, 48(4): 1-13
- [20] 郭日修. 弹性力学与张量分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 157-160
- [21] HOMAIFAR A, QI C X, LAI S H. Constrained optimization via genetic algorithms[J]. *Simulation Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 1994, 62(4): 242-253
- [22] HSIEH Y C, LEE Y C, YOU P S. Solving nonlinear constrained optimization problems: an immune evolutionary based two-phase approach [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 39(19): 5759-5768

## Deflection angle prediction method based on contact force attitude model for robot non-rigid body shaft hole assembly

XU Fang, SHEN Yifeng, CHEN Jiaoliao, WANG Jiakai

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

### Abstract

Aiming at the identification of deviation angle in the robotic assembly of non-rigid shaft and hole, an assembly deviation prediction method based on contact force attitude model is proposed. According to derivation of statics theory and calculation of elastic deformation, a contact force attitude model is developed in case of the different contact states during the assembly of non-rigid shaft and hole. A grey wolf algorithm with dynamic penalty function is proposed to solve the model in the feasibility domain to obtain the deviation angle using the force-attitude model. Robotic assembly experiments of non-rigid shaft and hole with various deviation angle and different contact state are carried out to collect the force sensor data, and the deviation angles of the non-rigid shaft-hole robotic assemblies can be obtained via contact force attitude model and the grey wolf algorithm with dynamic penalty function. The results show that the error of the predicted deviation angle is less than  $0.5^\circ$  in case of the actual deviation angle in the range of  $0^\circ$  to  $10^\circ$  in the assembly, which proves the proposed method can effectively predict assembly posture of the workpiece for subsequent successful assembly.

**Key words:** robotic assembly, non-rigid shaft, elastic deformation, contact force attitude model, dynamic penalty function