

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2413204

基于分布式三维力传感器的装配接触力测量方法*

褚文敏¹, 周 崧¹, 滕利臣²

(1. 南京工业职业技术大学航空工程学院 南京 210023; 2. 北京机械工业自动化研究所有限公司 北京 100032)

摘要: 接触力精确测量是实现结构精准柔顺装配的基础和前提, 针对冗余驱动装配定位机构的柔顺控制需求提出了基于分布式三维力传感器的装配接触力测量方法。首先对装配定位机构进行运动学建模, 在此基础上提出了基于动力学模型的装配接触力计算方法; 接着, 针对结构柔顺装配过程中的重力补偿问题, 提出了基于多姿态的末端重心自标定方法并采用最小二乘法进行重心求解; 然后采用数值仿真方法分析了传感器测量误差、安装角度偏差以及重心校准策略对装配接触力测量精度的影响; 最后在实验环境下进行结构装配接触力动态测量实验。实验结果表明, 相比采用六维力传感器, 分布式三维力传感器测得的装配接触力的标准差降低了 41.6%, 装配力矩的标准差下降了 47.1%。

关键词: 大型结构装配; 重心校准; 柔顺装配; 力测量

中图分类号: TH166 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.50

Assembly contact force measurement method based on distributed threedimensional force sensor

Chu Wenmin¹, Zhou Kuai¹, Teng Lichen²

(1. School of Aeronautical Engineering, Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing 210023, China;

2. Beijing Research Institute of Automation for Machinery Industry Co., Ltd., Beijing 100032, China)

Abstract: Accurate measurement of contact force is the foundation and prerequisite for achieving active compliant assembly of components. This article proposes an assembly contact force measurement method of large components based on the distributed 3D force sensors for the precise and compliant control requirements of redundant drive parallel mechanisms. First, the kinematic model of assembly positioning mechanisms is formulated. An assembly contact force calculation method based on a dynamic model is proposed. Subsequently, to address the problem of gravity compensation during the compliant assembly process of components, a centroid self-calibration method of the terminal based on multi-attitude is proposed. The centroid parameter is solved using the least squares method. Then, numerical simulation methods are used to analyze the measurement errors and installation angle errors of the sensor, as well as the influence of the centroid calibration strategy on the measurement error of assembly contact force. Finally, dynamic assembly contact force measurement experiments of large components are implemented in the laboratory. Compared with the six-dimensional force sensor, the experimental results show that the assembly contact force standard deviation measured by the distributed three-dimensional force sensors is reduced by 41.6%, and the assembly contact torque standard deviation is reduced by 47.1%.

Keywords: large components assembly; centroid calibration; compliant assembly; force measurement

0 引 言

装配是将零件(或部件)按照设计要求进行组合成高一级部件或产品的过程。大型装备尺寸巨大、结构复

杂、组成零件数量多,装配工作量通常占到产品制造总工作量的 50% 以上^[1], 装配质量很大程度上决定了装备研制的最终性能。

当前航空航天等领域的大型结构装配广泛采用数字化几何量测量辅助的装配模式^[2]。主流技术是通过激光

收稿日期: 2024-08-23 Received Date: 2024-08-23

* 基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究项目(24KJB460020)、南京工业职业技术大学引进人才科研启动基金项目(YK23-03-02)资助

跟踪仪等大空间测量设备对结构的空位姿进行测量^[3-4],装配定位机构据此驱动大型结构调整至预定的位姿^[5]。随着大型装备更高性能要求的提出,大型结构的装配精度已经达到了数字化几何量测量设备(如激光跟踪仪)的精度极限。由于装配定位机构运动过程中对于装配界面处的接触力缺乏实时感知与在位控制方法,单纯几何量测量引导的大型结构装配方式往往会因低精度定位和过大接触力而发生强迫装配^[6],最终装备的整体性能和寿命都将受到影响。

柔顺装配技术是解决上述问题的有效手段^[7]。柔顺装配是指通过改变定位机构末端的结构或伺服系统的控制算法,使其对装配过程中的接触力做出被动或主动的位姿反应^[8],以帮助完成装配。柔顺装配可分为主动柔顺装配和被动柔顺装配两大类^[9]。被动柔顺装配是指待装结构在装配时通过柔性机构对接触力作出被动的反馈以完成装配。一种典型的被动柔顺装置是 RCC, RCC 在用于装配时能根据构件之间的力和力矩绕任意中心进行顺从运动以修正位置和角度偏差^[10]。被动柔顺装配在降低结构的装配接触力方面取得了良好的效果,但被动柔顺装置降低了装配定位机构末端的位置控制精度和力响应的性能,给定位机构控制带来了极大的困难;其次,被动柔顺装置专用性强,与柔性制造理念相悖;最后,被动柔顺装配无法消除机构高刚度与高柔顺性之间的矛盾,其装配过程是不可控的。

随着计算机技术、传感器技术和控制技术的发展和,主动柔顺装配技术开始被应用于精密结构的自动化装配。主动柔顺装配是指装配过程中使用力传感器采集待装结构之间的接触力,通过力控制算法产生控制信号调整结构位姿进行装配^[11]。因此精确感知装配接触力是实现结构主动柔顺装配的基础和前提^[12-13]。为了对机械臂进行柔顺控制,谢心如^[14]使用六维力传感器测量机械臂与环境的接触力,并使用卡尔曼滤波减小接触力测量的噪声。张立建等^[15]针对工业机器人主动柔顺控制过程中末端负载与外界环境接触力的感知需求,在机器人法兰与负载之间安装了六维力传感器,并研究了一套接触力标定与计算方法。喻洋等^[16]针对复杂接触环境下机器人柔顺装配难题,在对机器人末端力传感器进行零点补偿及负载重力补偿后,通过矩阵变换实时计算出装配接触点处机器人末端执行器的真实受力。

基于上述主动柔顺装配研究现状的分析可以发现目前主动柔顺装配主要用于工业机器人对小型结构的装配中^[17]。然而由于机械臂的承载能力不足,不能用于大型结构等的对接装配。在大型结构装配系统,通常采用由分布式三坐标数控定位器组成的冗余驱动并联机构作为装配定位机构^[18]。冗余驱动并联机构具有更高的刚度^[19]、更大的承载能力^[20],较小的奇异区域^[21]等特性。

其次,目前主动柔顺装配过程中接触力(矩)主要通过安装在机器人末端的六维力传感器获取,六维力传感器的维间耦合关系复杂、校准困难^[22],其精度等级难以满足大型结构的低应力柔顺装配需求。最后,由于力矩放大效应,大型结构装配时接触力矩与力比值远高于小型结构之间力矩与力的比值,因此需要选择量程更大的传感器,进一步降低了六维力传感器的绝对测量精度。

为此,本文针对冗余驱动装配定位机构的精准柔顺控制需求,提出了基于分布式三维力传感器的大型结构装配接触力测量方法。首先,通过构建冗余驱动装配定位机构的动力学建模进行装配接触力计算,针对结构柔顺装配过程中的重力补偿问题,基于刚体转动和力矩平衡原理进行末端重心位置校准。然后,采用数值仿真方法分析了传感器测量误差、安装角度误差和结构重心偏差对装配接触力测量精度的影响,并与六维力传感器的接触力测量精度进行对比。最后,以大型直升机自动倾斜器旋转环柔顺装配实验系统为例,进行大型结构装配接触力测量实验,验证了采用分布式三维力传感器能够获得更高的装配接触力测量精度。

1 装配接触力解算

1.1 冗余驱动装配定位机构运动学模型

用于大型结构装配定位的冗余驱动并联机构主要由三坐标定位器、托架、三维力传感器等组成,如图 1 所示。三坐标定位器是一种可以实现 $X/Y/Z$ 3 个相互垂直方向的平移运动的自动化执行机构,且每个方向都采用闭环伺服控制。定位器通过由球头和球窝组成的球铰与托架相连^[23],构成了冗余驱动并联机构。三维力传感器安装在球铰下方,用于测量定位器对托架的作用力。结构组件分别固定在托架和支撑底座上。由多个数控定位器组成的装配定位系统具自动化、模块化、数字化等特点,能适应不同类型的结构装配^[24]。

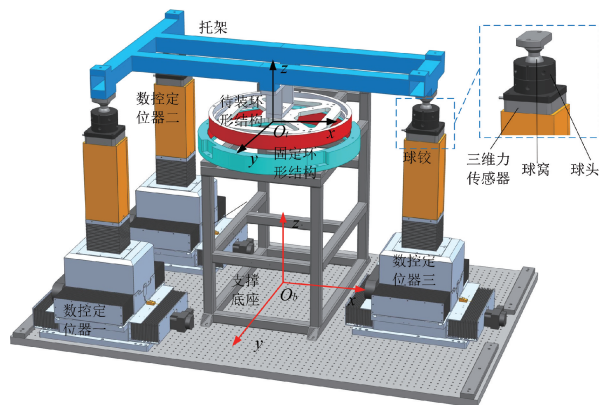


图 1 冗余驱动并联装配定位系统

Fig. 1 Redundant drive parallel assembly positioning system

为了表示装配定位机构的运动学模型,建立基坐标系 O_b-xyz 和末端坐标系 O_t-xyz ^[25] 两个坐标系。基坐标系是整个装配空间内的基准坐标系,定位器各轴的运动方向与基坐标系平行。末端坐标系与托架固连,用以表示待装结构的空間位置和姿态。设球铰中心在末端坐标系下的坐标为 $\mathbf{r}_i^t = [x_i^t \ y_i^t \ z_i^t]^T$,在基坐标系下的坐标为 $\mathbf{r}_i^b = [x_i^b \ y_i^b \ z_i^b]^T$ 。根据坐标系转换原理,球铰中心在末端坐标系下的坐标 $\mathbf{r}_i^t$ 和在全局坐标系下的坐标 $\mathbf{r}_i^b$ 满足如下关系^[26]:

$$\mathbf{r}_i^b = \mathbf{R}_i^b \mathbf{r}_i^t + \mathbf{T}_i^b \quad (1)$$

式中: $\mathbf{R}_i^b$ 为末端坐标系相对于基坐标系的姿态矩阵; $\mathbf{T}_i^b$ 为末端坐标系相对于基坐标系的位置向量。 $\mathbf{R}_i^b$ 和 $\mathbf{T}_i^b$ 的表达式分别为:

$$\mathbf{R}_i^b = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{T}_i^b = [x \ y \ z]^T \quad (3)$$

其中, (x, y, z) 为末端相对于基坐标系的位置; (α, β, γ) 是末端相对于全局坐标系的姿态角。因此末端相对于基坐标系的空间位姿可用六维向量表示为:

$$\mathbf{w}_i^b = [x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T \quad (4)$$

由于待装环形结构是与托架固连的,因此通过定位器运动改变球铰在基坐标系的坐标 $\mathbf{r}_i^b$ 即可调整待装结构的空間位姿,式(1)即为装配定位机构的运动学模型。

1.2 基于动力学模型的装配接触力解算

在大型结构柔顺装配系统中,机构末端或待装结构与外界环境的接触力需要被精确地感知,控制系统据此修正定位机构的运动轨迹,才能保证装配的柔顺性。装配定位系统的测力元件为三维力传感器,在大型结构柔顺装配过程中,三维力传感器测得的外力包括末端(包含托架和负载)的惯性力、末端的重力以及结构之间的接触力3部分。根据牛顿定律,对于3个定位器组成的装配定位机构,在基坐标系下末端的运动方程为:

$$\sum_{i=1}^3 \mathbf{F}_i^b + \mathbf{G}_m + \mathbf{f}_e = m \mathbf{a}_i^b \quad (5)$$

式中: $\mathbf{F}_i^b = [F_i^x \ F_i^y \ F_i^z]^T$ 为基坐标系下定位器对末端的作用力; $\mathbf{G}_m = [0 \ 0 \ -mg]^T$ 为末端的重力矩阵; $\mathbf{a}_i^b$ 为末端的加速度; $\mathbf{f}_e$ 为结构之间的接触力; m 为末端的质量。根据欧拉方程,末端坐标系下末端的动力学方程^[27]可以表示为:

$$\sum_{i=1}^3 \mathbf{r}_i^t \times \mathbf{F}_i^t + \mathbf{r}_m^t \times (\mathbf{R}_i^b)^T \mathbf{G}_m + \mathbf{M}_e = \mathbf{I}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}^t + \boldsymbol{\omega}^t \times (\mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}^t) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{F}_i^t = (\mathbf{R}_i^b)^T \mathbf{F}_i^b$ 为末端坐标系下定位器对末端的作用力; $\mathbf{r}_m^t = [x_m^t \ y_m^t \ z_m^t]^T$ 为末端重心在末端坐标系下的坐标; $\mathbf{M}_e$ 为结构之间的接触力偶; $\mathbf{I}_i$ 为末端的惯性张量矩阵; $\boldsymbol{\omega}^t = \dot{\mathbf{H}}\mathbf{L}$, 为末端相对于自身坐标系的角速度; $\dot{\boldsymbol{\omega}}^t = \dot{\mathbf{H}}\mathbf{L} + \mathbf{H}\ddot{\mathbf{L}}$, 为角加速度^[28]。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\varphi_t^b \\ 0 & c\theta_t^b & s\theta_t^b c\varphi_t^b \\ 0 & -s\theta_t^b & c\theta_t^b c\varphi_t^b \end{bmatrix}, \mathbf{L} = \begin{bmatrix} \theta_t^b \\ \varphi_t^b \\ \psi_t^b \end{bmatrix} \quad (7)$$

联立式(5)和(6)可得:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^3 \mathbf{F}_i^b + \mathbf{G}_m + \mathbf{f}_e = m \mathbf{a}_i^b \\ \sum_{i=1}^3 \hat{\mathbf{r}}_i^t (\mathbf{R}_i^b)^T \mathbf{F}_i^b + \hat{\mathbf{r}}_m^t (\mathbf{R}_i^b)^T \mathbf{G}_m + \mathbf{M}_e = \mathbf{I}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}^t + \boldsymbol{\omega}^t \times (\mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}^t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\hat{\mathbf{r}}_i^t$ 是 $\mathbf{r}_i^t$ 的反斜对称矩阵。 $\hat{\mathbf{r}}_i^t$ 可以表示为:

$$\hat{\mathbf{r}}_i^t = \begin{bmatrix} 0 & -z_i^t & y_i^t \\ z_i^t & 0 & -x_i^t \\ -y_i^t & x_i^t & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(8)改写成矩阵的形式:

$$\mathbf{I}_N - \mathbf{J}^T \mathbf{F}_B - \mathbf{R}_G \mathbf{G}_m = \mathbf{F}_e \quad (10)$$

式中: $\mathbf{I}_N$ 为末端的惯量矩阵,可由伺服系统反馈的定位器轨迹计算得到; $\mathbf{J}$ 为定位机构的雅可比矩阵; $\mathbf{F}_B$ 为定位器对末端的作用力矩阵; $\mathbf{R}_G$ 为重力方向矩阵; $\mathbf{F}_e = [\mathbf{f}_e \ \mathbf{M}_e]^T$ 为结构之间的六维接触力。

$$\mathbf{I}_N = \begin{bmatrix} m \mathbf{a}_i^b \\ \mathbf{I}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}^t + \boldsymbol{\omega}^t \times (\mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}^t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{3 \times 3} & \mathbf{E}_{3 \times 3} & \mathbf{E}_{3 \times 3} \\ \hat{\mathbf{r}}_1^t (\mathbf{R}_1^b)^T & \hat{\mathbf{r}}_2^t (\mathbf{R}_2^b)^T & \hat{\mathbf{r}}_3^t (\mathbf{R}_3^b)^T \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{F}_B = [\mathbf{F}_1^b \ \mathbf{F}_2^b \ \mathbf{F}_3^b]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{R}_G = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{3 \times 3} \\ \hat{\mathbf{r}}_m^t (\mathbf{R}_i^b)^T \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{F}_e = [\mathbf{f}_e \ \mathbf{M}_e]^T \quad (15)$$

式中: $\mathbf{E}_{3 \times 3}$ 代表三阶单位矩阵。根据式(10),控制系统能实时解算出待装结构之间的六维接触力 $\mathbf{F}_e$ 。

1.3 基于多姿态的末端重心自校准

由式(8)可以发现,计算装配接触力时需要根据末端的重心位置 $\mathbf{r}_m^t$ 对重力矩进行补偿。根据力矩平衡原理,当末端处于静止状态时,末端绕基坐标系 $X/Y/Z$ 轴的力矩为0,如图2所示,因此有:

$$\sum_{i=1}^3 \mathbf{r}_i^b \times \mathbf{F}_i^b - \mathbf{r}_m^b \times \mathbf{G}_m = 0 \quad (16)$$

式中: $\mathbf{r}_m^b = [x_m^b \ y_m^b \ z_m^b]^T$ 为末端重心在基坐标系下的坐

标。根据坐标系变换原理,重心在基坐标系和在末端坐标系下的坐标满足式(17)。

$$\mathbf{r}_m^b = \mathbf{R}_t^b \mathbf{r}_m^t + \mathbf{T}_t^b \quad (17)$$

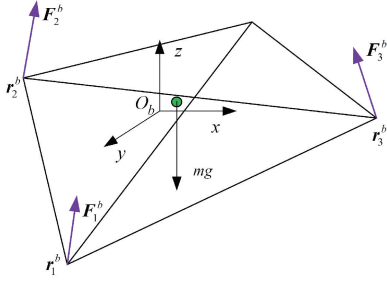


图 2 末端力矩平衡原理

Fig. 2 Schematic diagram of terminal torque balance

展开式(16)得:

$$\begin{cases} F_1^z y_1^b - F_1^y z_1^b + F_2^z y_2^b - F_2^y z_2^b + F_3^z y_3^b - F_3^y z_3^b = mgy_m^b \\ F_1^z x_1^b - F_1^x z_1^b + F_2^z x_2^b - F_2^x z_2^b + F_3^z x_3^b - F_3^x z_3^b = mgx_m^b \end{cases} \quad (18)$$

由于对末端进行平移不会影响定位器对末端作用力的大小,同时力矩平衡方程式(18)与 z_m^b 无关,可令 $\mathbf{T}_t^b = [0 \ 0 \ 0]^T$, 因此式(18)可以写成:

$$\mathbf{G}\mathbf{R}_2^b \cdot \begin{bmatrix} x_m^t \\ y_m^t \\ z_m^t \end{bmatrix} = [\hat{\mathbf{R}}_1^b \ \hat{\mathbf{R}}_2^b \ \hat{\mathbf{R}}_3^b] \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1^b \\ \mathbf{F}_2^b \\ \mathbf{F}_3^b \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{R}_2^b$ 代表取矩阵 $\mathbf{R}_t^b$ 的前两行作为新矩阵。 $\hat{\mathbf{R}}_i^b$ 的表达式为:

$$\hat{\mathbf{R}}_i^b = \begin{bmatrix} 0 & -z_i^b & y_i^b \\ -z_i^b & 0 & x_i^b \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\text{令 } \mathbf{H} = \mathbf{G}\mathbf{R}_2^b, \mathbf{P} = [\hat{\mathbf{R}}_1^b \ \hat{\mathbf{R}}_2^b \ \hat{\mathbf{R}}_3^b] \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1^b \\ \mathbf{F}_2^b \\ \mathbf{F}_3^b \end{bmatrix}, \text{ 将式(19)写成}$$

矩阵形式:

$$\mathbf{H}\mathbf{r}_m^t = \mathbf{P} \quad (21)$$

可以发现,式(18)中有 3 个未知量和两组方程,因此根据一种姿态下的定位器对末端的作用力值无法解算出末端的重心位置。称测量一种姿态下的定位器的对末端的作用力为一次称重,设第 j 次称重时末端的力矩平衡矩阵为:

$$\mathbf{H}_j \mathbf{r}_m^t = \mathbf{P}_j \quad (22)$$

经过 n 次称重后可以得到:

$$[\mathbf{H}_1 \ \mathbf{H}_2 \cdots \mathbf{H}_n]^T \mathbf{r}_m^t = [\mathbf{P}_1 \ \mathbf{P}_2 \cdots \mathbf{P}_n]^T \quad (23)$$

因此通过调整末端的姿态,根据式(23)可以计算出重心参数的最小二乘解 $\hat{\mathbf{r}}_m^t$ 为:

$$\hat{\mathbf{r}}_m^t = ([\mathbf{H}_1 \ \mathbf{H}_2 \cdots \mathbf{H}_n][\mathbf{H}_1 \ \mathbf{H}_2 \cdots \mathbf{H}_n]^T)^{-1} \cdot [\mathbf{H}_1 \ \mathbf{H}_2 \cdots \mathbf{H}_n][\mathbf{P}_1 \ \mathbf{P}_2 \cdots \mathbf{P}_n]^T \quad (24)$$

本章首先建立了由多个数控定位器驱动的装配定位机构的运动学模型,用于表达待装结构的空位姿与关节位移之间的映射关系。在此基础上采用牛顿欧拉法构建了基于动力学模型的接触力解算模型,将分布式三维力传感器检测到的力转化为了六维接触力。重心位置是装配定位机构动力学模型的重要参数,为了提高装配接触力测量的精度,根据刚体转动原理和力矩平衡原理提出了基于多姿态的末端重心位置自校准,从而减小重心位置偏差对装配接触力测量精度的影响。

2 装配接触力误差分析

2.1 基于分布式三维力传感器的装配接触力误差分析

由式(10)可以发现,影响接触力解算误差的主要因素包括结构的质量特性(质量、重心位置)、传感器的测量误差以及传感器的安装角度偏差。理论上定位器定位对末端的作用力 $\mathbf{F}_i^b$ 等于三维力传感器测量的球铰接触力 $\mathbf{F}_i^s$,但由于三维力传感器的安装存在微小的角度偏差,如图3所示,①表示基座坐标系,②表示传感器坐标系。 $\mathbf{F}_i^b$ 与 $\mathbf{F}_i^s$ 之间转换关系如式(25)所示。

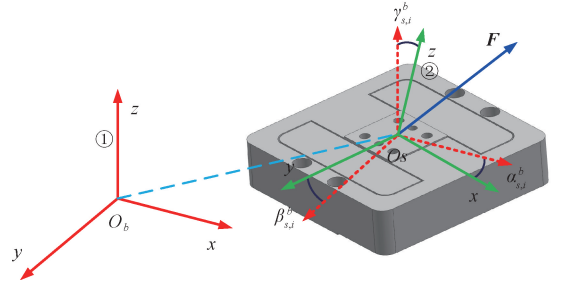


图 3 三维力传感器的安装角度偏差示意图

Fig. 3 Installation angle deviation of three-dimensional force sensor

$$\mathbf{F}_i^b = \mathbf{R}_{s,i}^b \mathbf{F}_i^s \quad (25)$$

$$\mathbf{R}_{s,i}^b = \begin{bmatrix} \cos \gamma_{s,i}^b & -\sin \gamma_{s,i}^b & 0 \\ \sin \gamma_{s,i}^b & \cos \gamma_{s,i}^b & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta_{s,i}^b & 0 & \sin \beta_{s,i}^b \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_{s,i}^b & 0 & \cos \beta_{s,i}^b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{s,i}^b & -\sin \alpha_{s,i}^b \\ 0 & \sin \alpha_{s,i}^b & \cos \alpha_{s,i}^b \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中: $\mathbf{R}_{s,i}^b$ 为三维力传感器坐标系相对于基座坐标系的姿态角矩阵; $\alpha_{s,i}^b$, $\beta_{s,i}^b$ 和 $\gamma_{s,i}^b$ 分别为三维力传感器坐标系相对于基座坐标系的角偏差。因此待装结构之间的实际六维接触力 $\mathbf{F}_e$ 可以表示为:

$$\mathbf{I}_N - \mathbf{J}^T \mathbf{F}_S - \mathbf{R}_G \mathbf{G}_m = \mathbf{F}_e \quad (27)$$

其中:

$$\mathbf{J}' = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{s,1}^b & \mathbf{R}_{s,2}^b & \mathbf{R}_{s,3}^b \\ \hat{\mathbf{r}}_1^t(\mathbf{R}_t^b)^T \mathbf{R}_{s,1}^b & \hat{\mathbf{r}}_2^t(\mathbf{R}_t^b)^T \mathbf{R}_{s,2}^b & \hat{\mathbf{r}}_3^t(\mathbf{R}_t^b)^T \mathbf{R}_{s,3}^b \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\mathbf{F}_s = [\mathbf{F}_1^s \ \mathbf{F}_2^s \ \mathbf{F}_3^s]^T \quad (29)$$

影响接触力解算误差的随机因素主要是力传感器的随机测量误差,而力传感器的随机测量误差和安装角度偏差又会影响末端所受重力和重心位置的测量。因此,接触力误差是3组传感器测量误差相互耦合的结果,很难得到接触力误差的具体解析式。为了综合分析传感器的测量误差、安装角度偏差和重心校准时的称重策略对装配力测量误差的影响,采用数值仿真方法研究装配接触力测量误差^[29]。所选用的力传感器的精度等级为0.5% FS,传感器的安装角度偏差不高于0.01 rad,重心校准时末端的姿态角在(-0.3 rad, 0.3 rad)随机选取。

由于结构之间的实际接触力无法直接获得,因此对待装结构发生接触前的状态进行仿真,此时结构之间的接触力 $\mathbf{F}_e = 0$ 。由于待装结构在装配前姿态已经大致对准,因此仿真时令末端的姿态矩阵 $\mathbf{R}_t^b$ 为单位矩阵。进行接触力仿真时需要计算传感器坐标系下定位器对托架的实际作用力 $\mathbf{F}_s$ 。由式(10)可以发现,接触力误差与 $\mathbf{I}_N$ 无关,可令 $\mathbf{I}_N = 0$,因此有:

$$\mathbf{J}^T \mathbf{F}_B - \mathbf{R}_G \mathbf{G}_m = 0 \quad (30)$$

式(30)为不定方程, $\mathbf{F}_B$ 有无数组解。当使用多个定位器驱动部件调姿时一般控制驱动力为最小驱动力,可以计算出 $\mathbf{F}_B$ 的最小二范数解为:

$$\hat{\mathbf{F}}_B = (\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1} \mathbf{J}\mathbf{R}_G \mathbf{G}_m \quad (31)$$

因此传感器坐标系下定位器对托架的作用力为:

$$\mathbf{F}_s = [\mathbf{R}_{s,1}^b \ \mathbf{R}_{s,2}^b \ \mathbf{R}_{s,3}^b]^{-1} \mathbf{F}_B \quad (32)$$

接触力误差数值仿真中的其他参数如表1所示,仿真分析的流程如下。

表1 接触力误差仿真参数

Table 1 Simulation parameters for contact force error

参数	参数值
末端质量 m/kg	35
重心坐标/mm	(60, 5, -180)
球头1坐标/mm	(-520, 0, 120)
球头2坐标/mm	(420, 310, 120)
球头3坐标/mm	(420, -310, 120)

1) 在(-0.01 rad, 0.01 rad)随机生产三维力传感器的安装角度偏差,并计算出三维力传感器坐标系相对于基座坐标的姿态角矩阵 $\mathbf{R}_{s,i}^b$ 。

2) 在(-0.3 rad, 0.3 rad)随机产生6组末端的姿态角。

3) 根据式(31)计算各姿态下定位器对托架的作用力 $\mathbf{F}_{B,j} = [\mathbf{F}_{1,j}^b \ \mathbf{F}_{2,j}^b \ \mathbf{F}_{3,j}^b]^T$,其中, $1 \leq j \leq 6$ 。

4) 根据式(32)计算出三维力传感器坐标系下,定位器对托架的作用力 $\mathbf{F}_{s,j} = [\mathbf{F}_{1,j}^s \ \mathbf{F}_{2,j}^s \ \mathbf{F}_{3,j}^s]^T$ 。

5) 根据三维力传感器精度等级随机生产三维力传感器的测量值 $\tilde{\mathbf{F}}_{s,j} = [\tilde{\mathbf{F}}_{1,j}^s \ \tilde{\mathbf{F}}_{2,j}^s \ \tilde{\mathbf{F}}_{3,j}^s]^T$ 。

6) 根据式(24)计算末端的重心位置 $\tilde{\mathbf{r}}_m^t$ 。

7) 根据式(31)计算当末端的姿态矩阵为单位矩阵时定位器对末端的作用力 $\mathbf{F}_B$ 。

8) 根据式(10)计算结构之间的接触力 $\tilde{\mathbf{F}}_e$,由于待装结构之间的实际接触力为0,因此 $\tilde{\mathbf{F}}_e$ 即为结构之间的接触力误差。

9) 重复上述实验1 000次,并统计结构之间的接触力(矩)误差,基于分布式三维力传感器仿真结果如图4和5所示。

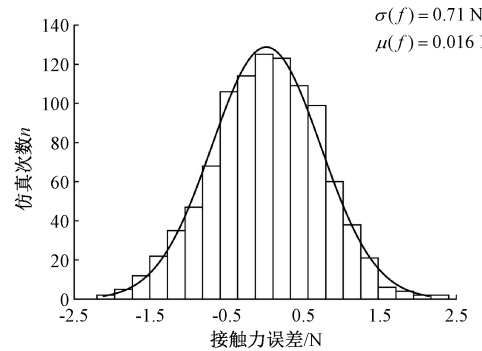


图4 接触力误差分布

Fig. 4 Distribution of contact force error

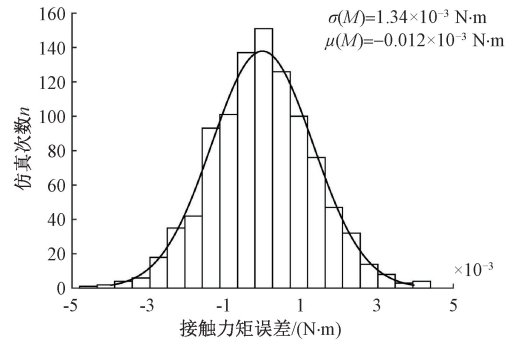


图5 接触力矩误差分布

Fig. 5 Distribution of contact torque error

图4中, $\sigma(f)$ $\mu(f)$ 分别代表接触力误差的标准差和均值;图5中, $\sigma(M)$ $\mu(M)$ 分别代表接触力矩误差的标准差和均值。可以发现接触力(矩)误差的平均值远

小于其标准差,且接近 0,因此本文所提出的装配接触力解算方法获得是接触力的无偏估计。

根据式(22)可以发现,末端重心校准时末端的姿态调整角度和称重次数会影响重心校准的精度,进而影响装配接触力解算的精度。通过仿真研究姿态调整角度对接触力解算精度的影响。设重心校准时末端最大的姿态调整角度 $\omega_{\max}$ 分别为 0.05、0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 rad,末端称重的次数为 5,令第 j 次称重时末端的姿态角为 $(j-3)\omega_{\max}/2$ rad,仿真结果如图 6 所示。

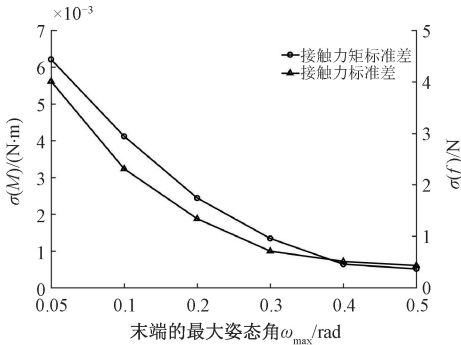


图 6 姿态角对接触力(矩)标准差的影响

Fig. 6 Influence of attitude angle on the standard deviation of contact force (torque)

可以发现,重心校准时末端最大的姿态调整角对装配接触力的测量精度影响很大。研究表明,当末端的最大姿态角为 0.05 rad 时,重心的 Z 向误差高达 5 mm^[30],如此大的重心校准误差甚至可能高于通过 CAD 仿真得到的重心偏差,会严重影响装配力的测量精度。这主要是由于当姿态角变化量较小时,会导致重心解算矩阵病态,此时微小的力测量误差也可能导致较大的重心解算偏差。因此在进行重心校准时末端的最大姿态角越大越好。但在实际校准过程中,由于装配定位机构的行程的限制,末端的最大姿态角不可能无限增加。

针对称重次数对装配接触力测量精度的影响进行研究。末端重心校准至少需进行两次称重,因此设称重次数为 2~8 次,称重时末端的最大姿态角 $\omega_{\max} = 0.3$ rad。每组实验重复 1 000 次,实验完成后统计装配接触力的标准差,实验结果如图 7 所示。

可以发现,随着重心校准时称重的次数增加,接触力的标准差不断降低,当姿态调整次数从 3 次增加到 7 次时,接触力标准差下降了约 80.1%,接触力矩标准差下降了约 74.6%。这主要是由于增加称重次数可以降低单次力测量误差对重心校准精度的影响,从而提高重心位置校准的精度,而重心位置偏差是影响接触力解算精度的重要因素。当继续增加姿态调整的次数

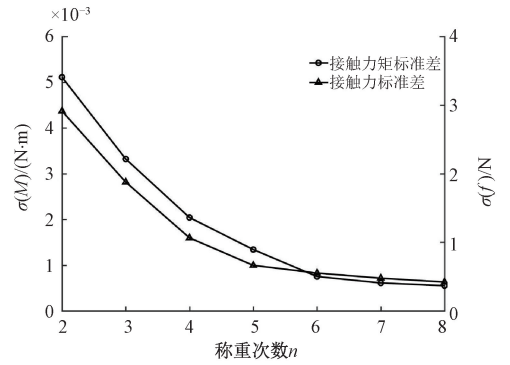


图 7 称重次数对接触力(矩)标准差的影响

Fig. 7 Influence of weighing times on the standard deviation of contact force (torque)

时,边际收益递减规律也相当明显,这主要是由于影响装配力测量精度的因素还包括传感器的测量误差和安装偏差,这两种误差是无法通过末端重心校准进行补偿的。同时,增加称重次数会增加重心校准的时间,影响结构装配的效率。

2.2 基于六维力传感器的装配接触力误差分析

柔顺装配系统中传统的装配接触力测量是通过在装配定位机构末端和待装结构之间安装六维力传感器实现的,如图 8 所示。

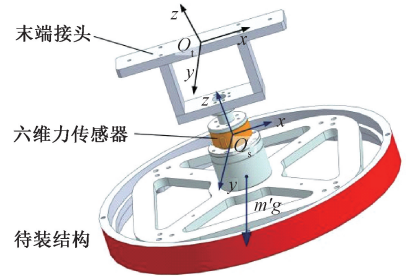


图 8 六维力传感器测力

Fig. 8 Diagram of contact force measurement based on the six-dimensional force sensor

设待装结构的质量为 m' ,待装结构重心在六维力传感器坐标系下的坐标为 $\mathbf{r}_m^s = [x_m^s \ y_m^s \ z_m^s]^T$,六维力传感器坐标系相对于末端坐标系的姿态矩阵为 $\mathbf{R}_s^t$,测得的力为 $\mathbf{F}_s = [F^x \ F^y \ F^z]^T$,根据坐标系转换原理有:

$$\begin{bmatrix} F^x \\ F^y \\ F^z \end{bmatrix} = (\mathbf{R}_s^t)^T (\mathbf{R}_t^b)^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -m'g \end{bmatrix} \quad (33)$$

在末端当前姿态下六维力传感器测得的力矩为 $\mathbf{M}_s = [M^x \ M^y \ M^z]^T$,因此有:

$$\begin{bmatrix} M^x \\ M^y \\ M^z \end{bmatrix} = \mathbf{r}_m^s \times \begin{bmatrix} F^x \\ F^y \\ F^z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -z_m^s & y_m^s \\ z_m^s & 0 & -x_m^s \\ -y_m^s & x_m^s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F^x \\ F^y \\ F^z \end{bmatrix} \quad (34)$$

将式(33)代入式(34)可得:

$$\begin{bmatrix} F^x \\ F^y \\ F^z \\ M^x \\ M^y \\ M^z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\mathbf{R}_s^t)^T \\ \begin{bmatrix} 0 & -z_m^s & y_m^s \\ z_m^s & 0 & -x_m^s \\ -y_m^s & x_m^s & 0 \end{bmatrix} (\mathbf{R}_s^t)^T \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} (\mathbf{R}_t^b)^T \\ 0 \\ -m'g \\ (\mathbf{R}_t^b)^T \\ 0 \\ -m'g \end{bmatrix} \quad (35)$$

因此通过调整装配定位机构末端的姿态,根据 $n(n \geq 6)$ 组末端的姿态矩阵 $\mathbf{R}_t^b$ 和六维传感器的读数 (F_s, M_s) 即可计算出传感器坐标系相对于末端坐标系的姿态矩阵 $\mathbf{R}_s^t$ 以及待装结构重心在传感器坐标系中的坐标 $\mathbf{r}_m^s$ 。六维力传感器测得的力主要包括待装结构的重力、惯性力以及待装结构与环境之间的接触力。当待装结构处于运动状态时,根据牛顿欧拉方程有:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_t^b \mathbf{R}_s^t \mathbf{F}_s + \mathbf{G}_m + \mathbf{f}_e = m' \mathbf{a}_t^b \\ \mathbf{R}_t^b \mathbf{M}_s + \hat{\mathbf{r}}_m^s (\mathbf{R}_t^b \mathbf{R}_s^t)^T \mathbf{G}_m + \mathbf{M}_e = \mathbf{I}_t \dot{\boldsymbol{\omega}}^t + \boldsymbol{\omega}^t \times (\mathbf{I}_t \boldsymbol{\omega}^t) \end{cases} \quad (36)$$

根据式(36)控制系统就能实时计算出待装结构之间的接触力。同样采用数值仿真方法进行装配接触力误差仿真,六维力传感器的精度等级相比三维力传感器较低,通常为 1% FS。重心校准时末端的姿态角在 $(-0.3 \text{ rad}, 0.3 \text{ rad})$ 随机选取。设待装结构的质量设为 25 kg,重心在六维力传感器坐标系下的坐标设为 $(12 \text{ mm}, 13 \text{ mm}, -135 \text{ mm})$,六维力传感器坐标系相对于末端坐标系的姿态角在 $(-0.1 \text{ rad}, 0.1 \text{ rad})$ 随机选取,仿真流程如下。

1) 在 $(-0.1 \text{ rad}, 0.1 \text{ rad})$ 随机生产六维力传感器相对于末端坐标系的姿态角,并计算出六维力传感器坐标系相对于末端坐标系的姿态角矩阵 $\mathbf{R}_s^t$ 。

2) 在 $(-0.3 \text{ rad}, 0.3 \text{ rad})$ 范围内随机产生 6 组末端的姿态角。

3) 根据式(33)和(34)计算各姿态下待装结构作用在六维力传感器的力和力矩。

4) 根据六维力传感器的精度等级随机生成六维力传感器的力读数值和力矩读数值。

5) 根据式(35)计算待装结构重心在六维力传感器坐标系下的坐标为 $\tilde{\mathbf{r}}_m^s$ 以及六维力传感器坐标系相对于末端坐标系的姿态矩阵为 $\tilde{\mathbf{R}}_s^t$ 。

6) 根据式(36)待装结构与环境的接触力(矩)。

7) 重复上述实验 1 000 次,并统计接触力(矩)误差,基于六维力传感器的仿真结果如图 9 和 10 所示。

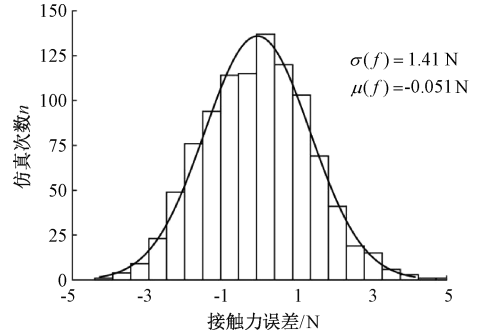


图 9 接触力误差分布

Fig. 9 Distribution of contact force error

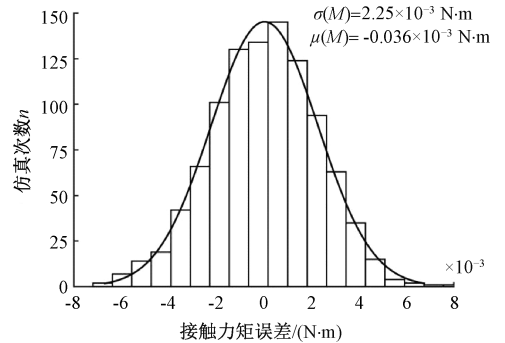


图 10 接触力矩误差分布

Fig. 10 Distribution of contact torque error

可以发现,采用六维力传感器作为传感元件测得接触力的标准差明显高于采用三维力传感器测得的,这主要是由于六维力传感器内部耦合关系复杂,其精度等级本身低于三维力传感器。其次,由于进行重心校准时需要至少进行 6 次称重,而采用三维力传感器进行重心校准至少只要进行 2 次称重,当称重次数相同的情况下,采用三维力传感器进行重心校准有足够的冗余数据来减小较大的随机误差对测量精度的影响。

3 环形结构件柔顺调姿实验

为了验证本文提出的基于分布式三维力传感器装配接触力解算方法能否有效提高装配力的测量精度,搭建大型直升机自动倾斜器旋转环柔顺装配实验系统,进行装配接触力解算实验,如图 11 所示。实验系统主要由

三坐标数控定位器、托架、环形结构组件、环形结构基座、三维力传感器、六维力传感器以及激光跟踪仪组成。其中,三维力传感器用于测量定位器对末端的作用力,从而计算出环形结构之间的接触力;六维力传感器作为对照组,用于直接测量环形结构之间的接触力;激光跟踪仪用于测量末端调整后的实际位姿。

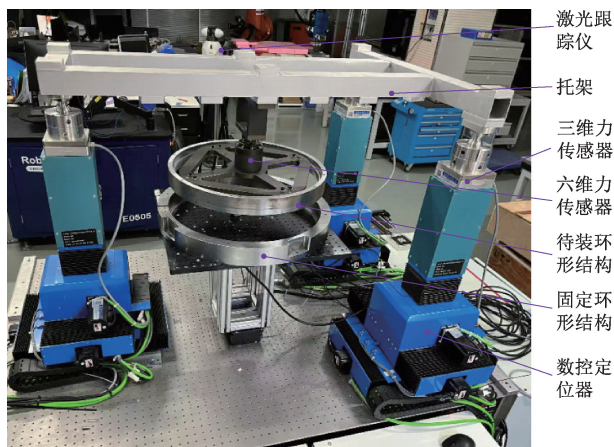


图 11 大型结构柔顺装配实验系统

Fig. 11 Compliant assembly experimental platform for large components

由于环形结构组件之间的接触力无法直接测量,通过采集待装环形结构在自由空间的接触力数据来验证接触力的解算精度和稳定性。所谓自由空间是指将待装结构从当前位姿调整到对接前状态这段空间。在自由空间,待装环形结构没有和外部环境发生接触,因此实际接触力为 0,此时控制系统计算得到的接触力为接触力的测量误差。当检测的接触力存在误差时,柔顺控制系统会误以为环形结构已经发生接触,会对末端的运动轨迹进行修正,造成环形结构定位偏差。

3.1 重心校准策略对接触力测量精度的影响

计算结构之间接触力需获得末端的重心位置,为了分析重心校准策略对本文所提出的接触力测量方法的测量精度的影响,进行如下实验。首先研究重心校准时末端的最大姿态角对接触力解算精度的影响。实验时末端最大的旋转角 $\omega_{\max}$ 分别为 0.05、0.2、0.3、0.4 和 0.5 rad,称重次数均为 6 次。调姿时末端的初始位姿为 $[(-50 \text{ mm}, 50 \text{ mm}, 100 \text{ mm}); (0.15 \text{ rad}, -0.2 \text{ rad}, 0.18 \text{ rad})]$,目标位姿为 $[(0 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, -120 \text{ mm}); (0 \text{ rad}, 0 \text{ rad}, 0 \text{ rad})]$,调姿过程中控制系统每隔 0.5 s 记录一次六维接触力数据,实验结束后统计调姿过程中采集的接触力(矩)的均值和标准差,实验结果如图 12 所示。

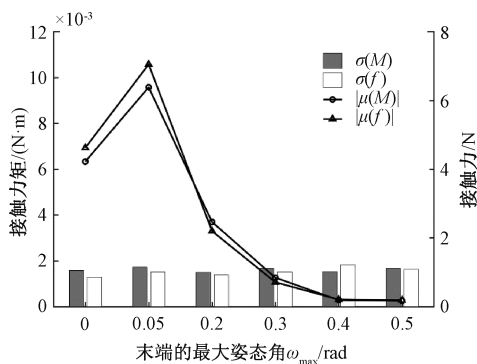


图 12 末端的最大姿态角对接触力(矩)的影响

Fig. 12 Influence of the maximum attitude angle on the contact force (torque)

图 12 中末端姿态角为 0 代表使用 CAD 模型中的理论重心参数进行接触力解算。可以发现重心校准时末端最大的姿态角越大,接触力(矩)的误差越小。当重心校准时末端的最大姿态角为 0.05 rad 时,接触力(矩)的误差的均值最大,甚至超过了根据理论重心参数计算得到的接触力误差均值。当末端的最大姿态角为 0.4 rad 时,相比采用理论重心参数,接触力误差的均值降低了 97.0%,接触力矩误差的均值降低了 95.4%;当末端的最大姿态角继续增加到 0.5 rad 时,接触力(矩)的误差下降均不足 2%。还可以发现,当重心校准时末端的最大姿态角较小时,接触力(矩)误差的均值远高于其标准差,因此可以认为当重心校准时末端的最大姿态角较小时,接触力(矩)误差主要是由重心参数偏差造成的。当增加重心校准时末端的最大姿态角后,接触力(矩)的标准差高于其误差的均值,此时接触力(矩)误差主要是由随机因素造成的。

针对称重次数对装配接触力测量精度的影响进行研究。实验过程中称重次数为 2~8 次,称重时末端的最大姿态角为 0.4 rad,实验结果如图 13 所示。

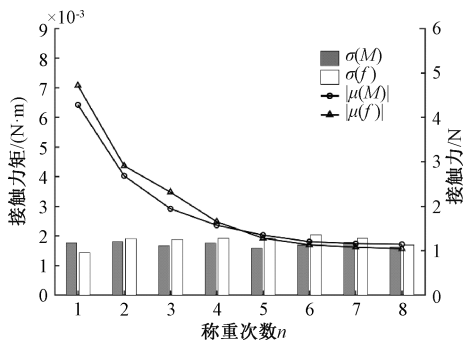


图 13 称重次数对接触力(矩)的影响

Fig. 13 Influence of weighing times on contact force (torque)

图 13 中称重次数为 0 代表使用 CAD 模型中的理论重心参数进行接触力解算。可以发现随着重心校准时称

重的次数增加,接触力误差的均值不断降低。相比采用末端的理论重心参数进行接触力解算,当称重的次数仅为两次时,接触力误差均值下降了约 60.3%,接触力矩误差均值下降了约 48.5%;当称重的次数超过 6 次时,继续增加称重的次数,接触力(矩)误差下降的幅度很小。通过以上试验还可以发现,改变重心校准策略对接触力(矩)的标准差影响较小,因此重心校准策略对接触力的随机误差没有影响。

3.2 接触力测量方案对比

通过实验进行两种装配力测量方案的精度对比。两种装配测量方案中,末端重心自校准时的称重次数均为 6 次,称重时末端的最大姿态角为 0.4 rad。重心校准完成后分别采用三维力传感器和六维力传感器进行接触力解算并根据解算得到的接触力进行自由空间末端姿态调整实验。共进行 8 组实验,实验时末端的初始位姿如表 2 所示,每组实验的目标位姿均[(0 mm,0 mm,-120 mm); (0 rad,0 rad,0 rad)]。调姿结束后统计各组实验中接触力误差的均值和标准差,并使用激光跟踪仪对托架上的测量点进行测量从而计算末端的实际位姿,实验结果如图 12~15 所示。

表 2 末端的初始空间位姿

Table 2 Initial spatial pose of the terminal						
序号	x/mm	y/mm	z/mm	α/rad	β/rad	γ/rad
1	-46.553	-28.255	21.844	0.194 82	-0.182 90	0.150 22
2	10.235	54.413	24.631	0.265 51	0.295 12	-0.313 12
3	27.97	65.509	-3.738	0.209 36	0.125 46	-0.223 97
4	35.961	35.267	-27.618	-0.381 00	-0.001 63	0.259 74
5	19.907	39.09	35.929	0.251 26	-0.244 90	0.005 95
6	38.249	-34.071	28.571	0.047 21	-0.361 37	-0.350 70
7	-37.616	-36.34	38.896 9	0.214 28	-0.256 47	0.329 26
8	33.082	12.085	49.723	0.116 04	-0.226 71	-0.148 34

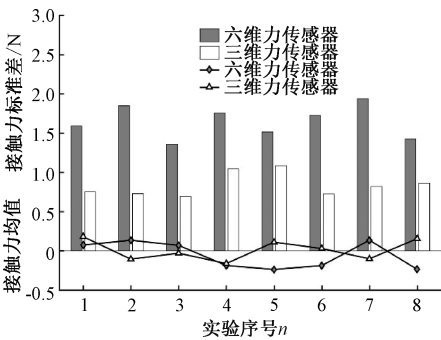


图 14 大型结构的接触力均值与标准差

Fig. 14 Mean and standard deviation of contact force of large components

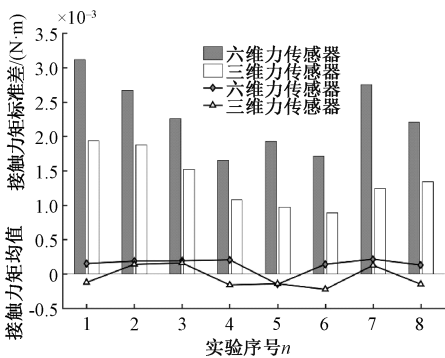


图 15 大型结构的接触力矩均值与标准差

Fig. 15 Mean and standard deviation of contact torque of large components

由图 14 和 15 可以发现,每组实验中装配接触力(矩)误差的均值远小于其标准差,因此可以认为在当前重心校准策略下,这两种接触力测量方法的误差主要是随机因素造成的。当使用六维力传感器进行装配测量时,平均接触力标准差为 2.34 N,平均接触力矩标准差为 $1.630\times10^{-3}\text{ N}\cdot\text{m}$ 。当使用分布式三维力传感器进行装配测量时,接触力标准差平均降低到 1.42 N,装配力矩标准差平均降低到 $0.862\times10^{-3}\text{ N}\cdot\text{m}$ 。因此本文所提出的基于分布式三维力传感器的接触力测量方法能显著提高柔顺控制系统的接触力测量精度。

由图 16 和 17 可以发现,根据六维力传感器测得的装配力进行柔顺调姿时,装配定位机构末端的平均位置偏差为 0.553 mm,平均姿态角偏差为 $3.42\times10^{-3}\text{ rad}$ 。待装结构的位置度偏差有很大概率超过了固定结构的倒角 (0.5 mm),待装结构可能无法完成插合。当采用分布式三维力传感器进行装配接触力测量并进行柔顺调姿时,装配定位机构末端的平均位置偏差为 0.355 mm,平均角度偏差为 $2.36\times10^{-3}\text{ rad}$,定位机构末端的位置偏差全部小于固定结构的倒角。并且在自由空间,待装结构之间的位置偏差越小,对接时的冲击也越小,越有利于减小装配时的结构损伤。

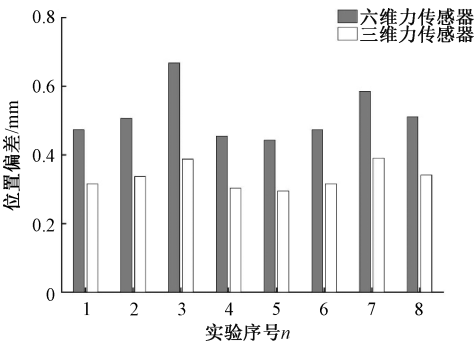


图 16 定位机构末端的位置偏差

Fig. 16 Terminal position deviation of positioning mechanism

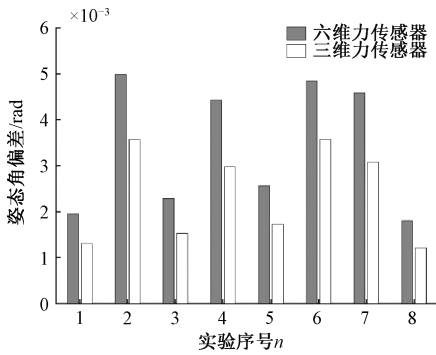


图 17 定位机构末端的姿态角偏差

Fig. 17 Terminal attitude angle deviation of positioning mechanism

4 结 论

大型结构在进行柔顺装配时需要精确感知结构之间的接触力,针对冗余驱动装配定位机构的精准柔顺控制需求,本文提出了基于分布式三维力传感器的装配接触力测量方法。首先,通过构建装配定位机构的动力学模型将三维力传感器传感器检测到力信号转换为六维接触力,针对接触力测量过程中的重力和惯性力补偿问题,提出了基于多姿态的末端重心自校准方法。接着,通过数值仿真方法研究了随机误差、传感器安装角度误差以及称重策略对接触力测量精度的影响。仿真结果表明,在相同的称重策略下,采用六维力传感器作为传感元件测得的接触力的标准差明显高于采用三维力传感器测得的,进步研究表明提高重心校准时末端的最大姿态角和称重的次数可以显著提高接触力测量的精度。最后,在实验环境下进行装配接触力测量精度对比实验,实验结果表明,本文提出的基于分布式三维力传感器接触力测量方法中,通过对定位机构的末端进行重心校准能显著提高接触力的测量精度;相比六维力传感器,采用分布式三维力传感器测得的接触力标准差下降了 41.6%,接触力矩标准差下降了 47.1%。调姿结束后对末端的实际位姿进行测量,结果表明本文所提出的接触力测量方法能大幅降低待装结构在自由空间的位置偏差,位置偏差下降了 35.8%,姿态角偏差降低了 30.9%。

参考文献

[1] MEI ZH Y, MAROPOULOS P G. Review of the application of flexible, measurement-assisted assembly technology in aircraft manufacturing[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228 (10) : 1185-

1197.
[2] 李笑宇, 林虎, 薛梓, 等. 激光跟踪多边测量自标定优化方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2):10-17.
LI X Y, LIN H, XUE Z, et al. Self-calibration optimization method for laser tracking multilateral measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 10-17.
[3] ZENG Q, HUANG X, LI SH G, et al. High-efficiency posture prealignment method for large component assembly via iGPS and laser ranging[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(8): 5497-5510.
[4] HUANG L L, HUANG X. Research on registration error prediction of large size measurement field based on finite element and artificial neural network[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 129(9/10): 4589-4603.
[5] ZHANG B, YAO B G, KE Y L. A novel posture alignment system for aircraft wing assembly[J]. Journal of Zhejiang University-Science A. Applied Physics & Engineering, 2009, 10(11): 1624-1630.
[6] 郝正阳, 张帆, 张帆扬. 自动装配的导纳控制系统中关键影响机制研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(7): 292-300.
HAO ZH Y, ZHANG F, ZHANG F Y, Research on key influencing mechanisms in admittance control systems for automated assembly[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(7): 292-300.
[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, 64(8): 6299-6309.
[8] WANG Z R, YIP H M, NAVARRO-ALARCON D, et al. Design of a novel compliant safe robot joint with multiple working states[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(2): 1193-1198.
[9] 丁雨, 舒亮, 周浩, 等. 基于力柔顺控制的断路器轴孔零件装配算法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(7): 69-79.
DING Y, SHU L, ZHOU H, et al. Assembly algorithm for circuit breaker shaft hole parts based on force compliance control[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(7): 69-79.

- [10] WHITNEY D E, ROURKE J M. Mechanical behavior and design equations for elastomer shear pad remote center compliances [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1986, 108(3): 223-232.
- [11] CHENG H T, LIU T ZH, ZHANG W, et al. Robotic assembly for tight tolerant cascaded peg-in-hole process with incomplete constraints [J]. *Assembly Automation*, 2020, 40(5): 769-778.
- [12] ZHANG K G, SHI M H, XU J, et al. Force control for a rigid dual peg-in-hole assembly [J]. *Assembly Automation*, 2017, 37(2): 200-207.
- [13] 于昌新, 何彦霖, 祝连庆, 等. 光纤传感微创手术探针末端三维力测量方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(1): 38-45.
- YU CH X, HE Y L, ZHU L Q, et al. Three-dimensional end-force measurement method of optic fiber sensing minimally invasive surgical probe [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(1): 38-45.
- [14] 谢心如. 六自由度机械臂阻抗控制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- XIE X R. Research on impedance control of 6-DOF manipulator [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [15] 张立建, 胡瑞钦, 易旺民. 基于六维力传感器的工业机器人末端负载受力感知研究 [J]. *自动化学报*, 2017, 43(3): 439-447.
- ZHANG L J, HU R Q, YI W M. Research on force sensing for the end-load of industrial robot based on a 6-axis force/torque sensor [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(3): 439-447.
- [16] 喻洋, 王耀兵, 魏世民, 等. 基于柔顺控制的机器人装配技术 [J]. *北京邮电大学学报*, 2020, 43(4): 1-6.
- YU Y, WANG Y B, WEI SH M, et al. Robot assembly technology based on compliance control [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2020, 43(4): 1-6.
- [17] ZHANG K G, SHI M H, XU J, et al. Force control for a rigid dual peg-in-hole assembly [J]. *Assembly Automation*, 2017, 37(2): 200-207.
- [18] LIU H, ZHU W D, DONG H Y, et al. An adaptive ball-head positioning visual servoing method for aircraft digital assembly [J]. *Assembly Automation*, 2019, 39(2): 287-296.
- [19] CHAKAROV D. Study of the antagonistic stiffness of parallel manipulators with actuation redundancy [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2004, 39(6): 583-601.
- [20] LI F, ZENG Q, EHMANN K F. A calibration method for over constrained spatial translational parallel manipulators [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 57: 241-254.
- [21] WU J, WANG J S, LI T M, et al. Performance analysis and application of a redundantly actuated parallel manipulator for milling [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2007, 50: 163-180.
- [22] 韩康, 王智, 李昂, 等. 大量程六维力传感器设计与标定研究 [J]. *传感器与微系统*, 2016, 35(5): 87-90.
- HAN K, WANG ZH, LI ANG, et al. Design of big-scale six-axis force sensor and study on calibration test [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2016, 35(5): 87-90.
- [23] LIU Y, HUANG X, LI SH G, et al. Adaptive positioning method for ball head based on impedance control [J]. *Robotic Intelligence and Automation*, 2024, 44(2): 242-257.
- [24] ZHU Y G, HUANG X, LI SH G. A novel six degrees-of-freedom parallel manipulator for aircraft fuselage assemble and its trajectory planning [J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2015, 38(7): 928-937.
- [25] CHU W M, HUANG X. Posture adjustment method for large components of aircraft based on hybrid force-position control [J]. *Industrial Robot*, 2020, 47(3): 381-393.
- [26] LI SH G, CHU W M, HUANG X, et al. Trajectory planning method for docking of large aircraft components [J]. *Robotic Intelligence and Automation*, 2023, 43(3): 235-253.
- [27] YU H, DU F ZH. A heuristic cabin-type component alignment method based on multi-source data fusion [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(8): 2242-2256.
- [28] 郭志敏, 蒋君侠, 柯映林. 基于三坐标定位器支撑的飞机大部件调姿内力 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(8): 1508-1513, 1552.

GUO ZH M, JANG J X, KE Y L. Posture alignment internal force in three axis actuators based assembly system for large aircraft parts [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering science) 2010, 44(8): 1508-1513,1552.

[29] DENG ZH P, HUANG X, LI SH G, et al. On-line calibration and uncertainties evaluation of spherical joint positions on large aircraft component for zero-clearance posture alignment[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 56: 38-54.

[30] CHU W M, LI G, LI SH G, et al. A centroid measurement method of large components for active compliant asse-mbly[J]. Measurement, 2024, 234: 114888.

作者简介



Chu Wenmin (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2022. He is currently a lecturer in the School of Aeronautical Engineering at Nanjing Vocational University of Industry Technology. His main research interests include aircraft digital

褚文敏(通信作者),2022 年于南京航空航天大学获得博士学位,现为南京工业职业技术大学讲师,主要研究方向为飞机数字化装配、数字化测量、机器人控制。

E-mail: chuwenmin@live.com

assembly, digital measurement, and robot control.



E-mail: 2024101500@niit.edu.cn

Zhou Kui received his B.Sc. degree from China University of Petroleum in 2018, and received his Ph.D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2024. He is currently a lecturer in the School of Aeronautical Engineering at Nanjing Vocational University of Industry Technology. His main research interests include aircraft digital assembly, machine vision, and deep learning.

周蒯,2018 年于中国石油大学(北京)获得学士学位,2024 年于南京航空航天大学获得博士学位,现为南京工业职业技术大学讲师,主要研究方向为飞机数字化装配、机器视觉、深度学习。



E-mail: lichen.teng@buaa.edu.cn

Teng Lichen received his Ph. D. degree from Beihang University in 2024. He is currently an engineer at Beijing Research Institute of Automation for Machinery Industry Co. Ltd. His main research interests include humanoid robots, industrial robots, automated detection, and image processing.

滕利臣,2024 年于北京航空航天大学获得博士学位,现任北京机械工业自动化研究所有限公司工程师,主要研究方向包括人形机器人、工业机器人、自动化检测和图像处理。