

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.012

微小强磁组件精密装配的夹持定位结构设计

李孔政, 王晓东, 闫治宇, 徐征

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 尺寸小、磁性强、夹持难的微小强磁组件给智能化设备的夹具设计带来严峻挑战, 考虑到夹持稳定性和精度的双重要求, 针对微小强磁组件设计一种夹持定位结构。基于有限元仿真得到零件间磁力分布规律, 据此设计真空辅助的磁钢夹具, 实现磁钢的可靠夹持与固定; 设计力矩器底座的夹持结构, 对磁力引起的夹爪和机械臂弹性变形进行分析, 改善其夹持结构。将设计成果集成于自动化装配系统中, 通过装配实验进行夹持结构可行性分析。结果表明: 设计的夹持结构可实现微小强磁组件的可靠夹持与精确定位, 在受到 15 N 的横向磁力作用时所产生的最大变形量为 15.2 μm 。批量装配的同轴度标准差为 $\phi 5.06 \mu\text{m}$, 具备较高的一致性, 且装配精度满足设计要求。

关键词: 微装配; 夹持器; 组合夹具; 磁钢; 电磁平衡传感器

中图分类号: TG75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)04-0060-07

Design of Gripping and Positioning Structure for Precision Assembly of Tiny Strong Magnetic Components

Li Kongzheng, Wang Xiaodong, Yan Zhiyu, Xu Zheng

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: Tiny strong magnetic components, characterized by small size, strong magnetism, and difficult gripping, pose severe challenges for the fixture design of intelligent equipment. Considering the dual requirements of gripping stability and precision, this paper presents a gripping and positioning structure designed for tiny strong magnetic components. Based on the magnetic force distribution obtained from finite element simulation, a vacuum-assisted magnetic steel fixture is designed to achieve reliable gripping and fixation of the magnetic steel. The gripping structure for the torqueer base is designed, and the elastic deformation of the gripper and robotic arm caused by magnetic force is analyzed to improve the gripping structure. The designed components are integrated into an automated assembly system, and the feasibility of the gripping structure is verified through assembly experiments. The results show that the designed gripping structure can achieve reliable gripping and precise positioning of tiny strong magnetic components. Under a transverse magnetic force of 15 N, the maximum deformation is 15.2 μm . The coaxiality standard deviation for batch assembly is $\phi 5.06 \mu\text{m}$, demonstrating high consistency, and the assembly precision meets the design requirements.

Keywords: micro-assembly; gripper; modular fixture; magnetic steel; electromagnetic balance sensor

0 引言

微小强磁零件是指本身磁场强度在数百毫特斯拉(mT)以上、特征尺寸在毫米量级的磁钢零件,它是超高精度天平、微力传感器等电磁平衡传感器的核心组成,与其他零件连接配合形成力矩器建立内磁场,其装配精度对力矩器的性能影响显著。目前,在实际生产中通常由熟练工人利用专门的组合夹具来完成强磁组件装配,因此存在效率低和重复性差等问题,亟待发展面向强磁微

小组件的智能装配设备。磁钢与其他组件和夹具间可能存在 1~10 N 强磁力作用,这会引发零件位姿的改变和夹具的弹性变形,进而影响装配精度。然而,受限于观测需求和组件整体结构,此类装配大多在微小的作业空间完成,这就决定了不能通过大幅度提高尺寸来增加强度和刚度。当前,微小零件装配领域中零件夹持的主要方式有电/磁夹持、气压/真空驱动夹持、静电吸附等。

电/磁夹持。孙媛等^[1]研制了一种通过刚性-柔性夹爪以及运动平台驱动实现夹持动作的微夹持

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC2002020)

第一作者简介: 李孔政(1998—),男,河南安阳人,硕士研究生,研究方向为微小零件精密自动化装配技术, lkz15524115765@163.com。

通信作者简介: 徐征(1973—),男,河南郑州人,副研究员,博士,研究方向为微纳集成制造, xuzheng@dlut.edu.cn。

器,可产生小于 1 N 的微夹持力。匡立生^[2]通过电机驱动同步轮正反转实现微小电子元器件夹持与释放,可输出最大 15 N 的夹持力。Chen 等^[3]设计了柔性指关节夹持器,通过检测柔性梁的角挠度控制夹持力,适用于不同刚度和形状的微小零件夹持,可提供最大 5 N 的夹持力。Diller 等^[4]利用磁场驱动微型夹具,通过控制夹持臂磁化方向实现零件的夹持运动,实现宽度约 250 μm 物体的抓取。Li 等^[5]设计了集成压力传感器和电动夹指的末端执行器,可用于压装力在 300 N 以下的压装实验零件的夹持,定位精度可达 0.2 mm。

气压/真空驱动。Antonelli 等^[6]研发了可变刚度气动驱动抓取器,通过弹性膜驱动器作用于执行杆实现夹指的开闭运动,最高夹持力 2.5 N,用于 10 mm 零件的夹持。Rosati 等^[7]设计了一种 2 自由度可变孔径气动夹持器,在 0.6 MPa 的压力下,可提供最大 120 N 的夹持力,其开闭行程约 60 mm。受八爪鱼吸盘启发,Arzanpour 等^[8]设计了集成多吸盘的柔性夹具,可提供最大 20 N 的吸附力。Sun 等^[9]集成吸附、夹持、力检测建立微小吸附夹持结构,最大吸附力可达 12 N。Yi 等^[10]通过使用气动旋转器和压力阀设计了一种并联夹持机构,该机构可用于抓取形状不规则的物体,能提供几个牛级的夹持力。李响等^[11]设计了一种用于轮毂内外圈自动取送料的气动机械手,该机构具备平稳送料功能。

静电吸附驱动。Guan 等^[12]将柔性静电吸附膜、刚性支撑结构与柔性吸盘相结合,设计了曲面柔性静电吸附吸盘,可产生约 40 N 的吸附力。Jiang 等^[13]采用碳涂层作为导体层、硅胶作为吸附层的静电吸附电极,产生了不低于 26 N 的静电吸附力。为了缩小吸附电极与壁面间空气层距离从而提高吸附力,黄之峰等^[14]将 BOPP 镀铝薄膜应用于爬壁机器人的静电吸附电极中,垂直吸附力可达到 0.57 N。

综上,电/磁夹持和气压/真空驱动夹持均可以产生足够的夹持力。但考虑到额外的电磁可能会对装配对象的磁特性产生不可逆的影响,我们拟选择后者作为夹持和辅助定位方式,以某电磁平衡力矩器装配为对象,对其夹持定位结构进行优化设计,使其满足自动化装配的要求。其主要工作包括:

1) 考虑夹持稳定性和夹持精度的双重要求,设计真空辅助的磁钢夹具;

2) 利用有限元计算,对磁力引起的夹爪和机械臂等弹性变形进行分析,设计了机械夹持机构;

3) 将上述结果集成在某精密装配系统中,实现某磁钢力矩器的装配,验证其研究的正确性。

本研究对类似的强磁组件装配具有参考价值。

1 装配任务及难点

本文选择某力矩器的磁钢和磁钢底座(简称底座)装配为研究对象,如图 1 所示。(本图为黑白印刷,如有疑问请咨询作者。)底座开有能与磁钢相配合的阶梯孔槽,通过图中贴合面进行配合,然后胶粘固接,形成力矩器主体结构。要求磁钢和底座接触面完全贴合,同时磁钢轴线与底座内孔轴线的同轴度达到一定的精度要求。考虑到零件尺寸和形状特点,我们采用夹持和移动底座实现对准装配,磁钢则固定在夹具上。

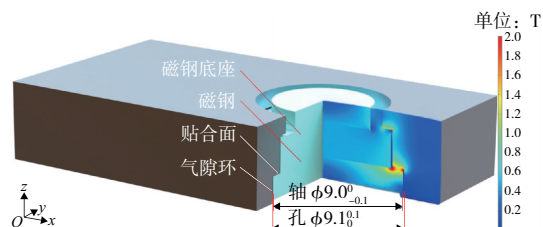


图1 强磁组件及磁通密度分布

微小强磁组件间的强磁力作用会引起零件夹持姿态的变化和夹具的弹性变形,这不仅会对装配精度造成影响,还会导致装配过程中零件间的微小划痕和碰撞,进而诱发硬脆的磁钢零件出现掉渣和退磁等现象。因此,如何让所设计的夹持定位结构同时实现强磁组件的可靠夹持和精确定位,是完成该装配任务的一个难点。

2 静磁力计算分析

2.1 有限元模型

为了准确模拟零件磁场分布和受力,本文采用近似的三维模型,磁钢为钕铁硼合金材质,导磁帽和底座为软磁材料,材料参数如表 1 所示。

表1 各部件主要参数

研究对象	相对磁导率	剩磁/T
磁钢	1.05	1.2
导磁帽	4 000	0
底座	4 000	0
空气	1	0

求解静磁场问题的控制方程如下

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + \vec{B}_r \quad (2)$$

式中: ∇ 为散度算子; $\vec{B}$ 为磁感应强度; μ_0 是真空磁导率,其值为 $4\pi\times 10^{-7}\text{ N/A}^2$; μ_r 为相对磁导率; $\vec{H}$ 为磁场强度,单位 A/m ; $\vec{B}_r$ 为剩余磁化强度。

模型内边界的边界条件设为磁通量守恒,为磁钢添加磁通量守恒的边界条件,其剩余磁通密度的值设为 1.2 T ,方向沿轴向。

磁钢与底座在装配时存在狭小的气隙环,对于极其狭长的气隙环部分,使用扫掠方式划分网格;对其余部分采取自由四面体网格。在狭隙处将网格尺寸设置为其宽度的 $1/5$,网格总数为935万,如图2所示。

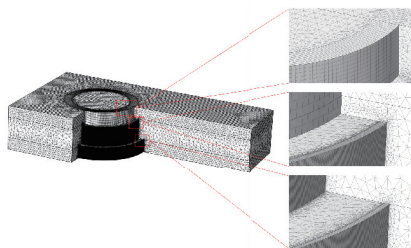


图2 网格划分示意图

2.2 计算结果分析

由图1可直观看出磁钢和底座的磁通密度分布情况。磁钢边缘的磁通密度较大,与底座接触区域磁场最为密集,在该区域磁场呈现出两边强中部弱的分布规律。

为了进一步探究磁钢与底座在不同偏移位置对磁力大小的影响,对两者间贴合面竖直距离 $D_{is,z}$ 和水平方向偏移量进行参数化求解。图3为底座所受 x 轴方向磁力分量 $F_{m,x}$ 在不同 $D_{is,z}$ 和水平偏移量下的分布规律。

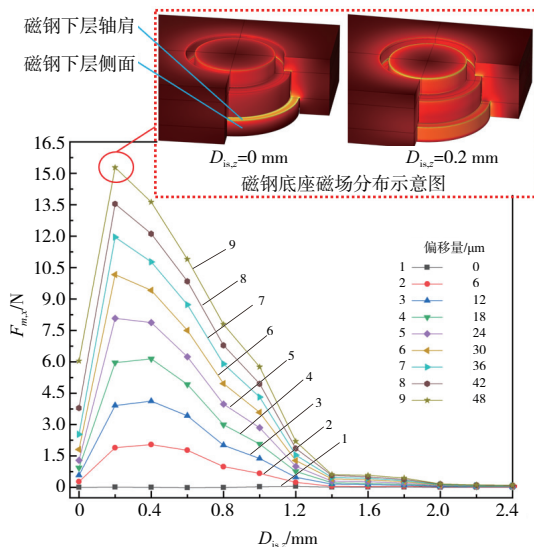


图3 不同位置下的水平磁力

由图可知,在各偏移量下 $F_{m,x}$ 的极大值几乎都出现在 $D_{is,z}$ 为 0.2 mm 处。偏移量为 $48\text{ }\mu\text{m}$ 时达到最大值 15 N 。在 $D_{is,z}$ 位于 $0\sim 1.2\text{ mm}$ 范围内时,底座沿水平方向上所受磁力影响显著,在大于 1.2 mm 之后影响较小,在大于 2.0 mm 之后底座水平方向磁力分量值接近于0。

分别对 $D_{is,z}$ 等于0和 0.2 mm 时磁钢下层(如图3所示)的 $1/4$ 侧面和轴肩的磁通密度进行积分,获得总磁通量(如表2所示)。

表2 磁钢各部位磁通量分布

$D_{is,z}/\text{mm}$	磁通量/ μWb	
	磁钢下层轴肩	磁钢下层侧面
0	13.883	6.088
0.2	4.238	9.828

由表可知,在 $D_{is,z}$ 值分别为0和 0.2 mm 情况下,磁钢下层轴肩和侧面的磁通量有很大区别。随着 $D_{is,z}$ 从0变化至 0.2 mm ,磁钢底座二者贴合面逐渐脱离,磁钢表面附近的磁场分布也在逐渐发生改变,部分轴肩处沿轴线分布的磁感线逐渐转移至侧边的径向分布,而在此过程中底座沿 x 轴方向的受力面积变化很小,这使得底座 x 轴方向磁力积分变大。随着 $D_{is,z}$ 逐渐增大磁钢底座进一步分离,底座 x 轴方向的受力面积减小, $F_{m,x}$ 也随之减小。

图4显示了底座在不同位置所受到的磁力 z 轴方向分量(记为 $F_{m,z}$)变化。

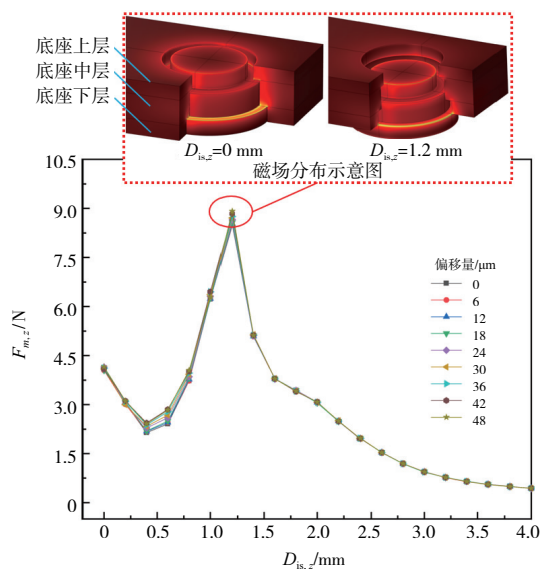


图4 不同位置下的竖直磁力

随着 $D_{is,z}$ 从0逐渐增加至 4 mm , $F_{m,z}$ 呈现出

先减小后增大,最终再逐渐减小趋近于零的趋势。 $F_{m,z}$ 在 $D_{is,z}=1.2\text{ mm}$ 时达到最大值 8.9 N 。 $D_{is,z}$ 在 $0\sim 2.5\text{ mm}$ 范围内,底座在竖直方向上所受磁力作用显著。

$D_{is,z}$ 在 $0\sim 0.4\text{ mm}$ 阶段,随着磁钢底座二者贴合面的脱离 $F_{m,z}$ 逐渐减小;在 $0.4\sim 1.2\text{ mm}$ 阶段,底座下表面开始受到磁钢磁力作用,使得真正参与到 z 轴方向磁力积分的面积大大增加,磁钢下层对底座下层的磁力作用逐渐增强,使得 $F_{m,z}$ 增大;在 $1.2\sim 4\text{ mm}$,随着磁钢与底座的进一步分离磁力作用减弱, $F_{m,z}$ 迅速减小至接近于0。

综上,利用有限元计算了零件间磁力变化规律,在水平和竖直方向上的最大磁力为 15 N 和 8.9 N ,用于后续夹具的结构设计与可靠性验证。

3 磁钢零件夹持结构设计

为了确保磁钢夹持结构具备较强抗磁干扰能力和较高的夹持精度,设计了如图5所示的结构。

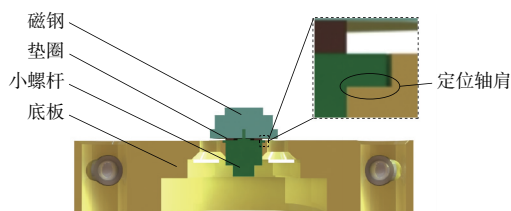


图5 底板夹持磁钢示意图

进行下压装配时,磁钢轴线与底板上表面垂直度较差会使得磁钢组件间贴合面不平行,引起零件位置变化。因此,采用轴肩定位的方式实现磁钢精确定位:由一次装夹加工出小螺杆的各段轴及轴肩,从而约束轴肩与轴线间的垂直度。此外,底板上的沉头孔和内螺纹也由一次装夹加工而成,螺纹孔轴线与沉头孔轴肩具有较高的垂直度精度。这样间接减小了磁钢轴线与底板上表面之间的垂直度误差。

为了确保在强磁力作用下磁钢的可靠夹持和便捷拆卸,采用螺纹连接和垫圈紧固防松相结合的夹持方式将磁钢固定于小螺杆上表面,并将小螺杆通过螺纹连接固定于底板上。相较于过盈配合,小螺杆与底座间的螺纹连接方式更利于保证小螺杆与底板在轴肩处的精确定位。

磁钢与底座产生磁力作用时,小螺杆上端螺纹连接处为整体刚度较差的部分。因此,需要分析该部分在磁力作用下产生的变形,据此判断该设计刚度是否满足设计要求。

对该部分进行有限元模型的构建,各部分材料属性定义如表3所示。

表3 各部分主要参数

研究对象	弹性模量/GPa	泊松比
磁钢	20.0	0.30
垫圈	11.5	0.34
小螺杆	19.0	0.28

在小螺杆下侧圆柱侧面施加固定端约束,并沿磁钢 x 轴方向施加静载荷,大小为该方向上磁钢所受最大磁力 15 N ,如图6所示:变形主要集中在第一圈螺纹连接处,整体沿 x 轴方向上的最大变形不超过 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。因此这种夹持方式在磁力干扰严重时仍能保证磁钢的可靠夹持和较高的精度。

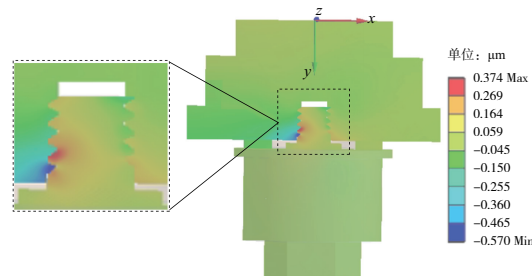


图6 水平 x 轴方向的变形结果

为了将上述设计的底板结构可靠地夹持于作业工作台表面,设计了如图7所示的作业工作台模块。该模块表面两侧对称分布有两个夹具限位挡块,挡块中对称设有4个弹簧柱塞,用于与底板上的4个V型槽配合,实现底板水平方向的限位与固定,同时结合转台工作平面实现底板的完全定位。

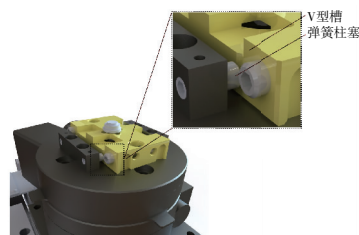


图7 零件吸附状态示意图

此外,工作转台中设有真空吸附结构。通过真空发生器在转台表面的吸盘区域形成负压,从而实现对转台上零件的吸附功能。在 0.6 MPa 的真空负压下,转台表面的多个橡胶吸盘能提供约 15 N 左右的吸附力,这使得转台上的底板被牢

牢地吸附在转台表面,防止装配时受到磁力作用引起零件位置的扰动,从而给零件的定位精度带来影响。

4 力矩器底座的夹持结构设计

4.1 夹爪结构与关键尺寸选择

由于受到各方向磁力作用,底座可能因夹持不牢而发生滑移,其夹持结构也会产生弹性变形从而影响底座位置精度。为此,设计了如图 8 所示的底座夹持结构,依靠夹爪内侧 4 个侧面以及夹钳安装板的下表面实现零件的可靠夹持。为了使夹爪满足刚度设计要求,对较为薄弱的夹爪厚度(记为 X_1)进行参数化求解,以获得符合刚度要求的尺寸。

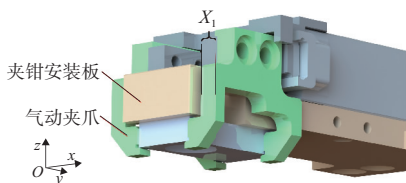


图 8 夹爪夹持底座示意图

设定夹爪厚度 X_1 的参数化范围为 3.5~8 mm,弹性模量为 11.5 GPa,泊松比为 0.34。对夹指上侧两个通孔内表面添加固定端约束,沿 x 轴方向对夹持面施加静载荷,大小为底座沿该方向上受到的最大磁力 15 N,计算在该载荷下不同夹指厚度所对应夹指最大变形,求解结果如图 9 所示。

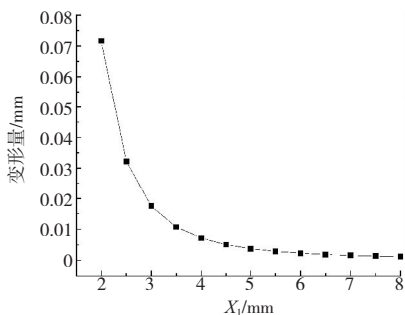


图 9 夹指厚度对变形量的影响

由结果可知, X_1 小于 3 mm 时,夹指厚度的增加对夹指形变量影响较大, X_1 在 3~4 mm 内影响放缓, X_1 大于 4 mm 后随着夹指壁厚的增加,形变量变化小于 $2 \mu\text{m}$ 。因此,最终选择夹指壁厚为 4 mm。

4.2 夹爪夹持稳定性分析

在水平面内,记磁钢对底座的磁力为 $F_{m,x}$ 、

$F_{m,y}$,夹指对底座的夹持力为 F_{N1} 、 F_{N2} 、 F_{N3} 、 F_{N4} ,以及两者间摩擦力为 f ,受力如图 10 所示。

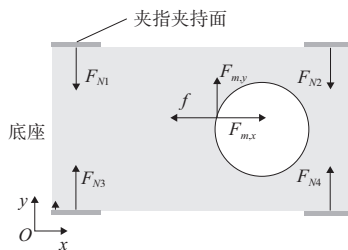


图 10 底座受力示意图

由前述磁力仿真结果可知,底座沿 x 轴方向、 y 轴方向所受最大磁力均为 15 N。因此,若能保证夹指沿 y 轴方向的夹持力、沿 x 轴方向与底座间最大静摩擦力均大于 15 N 即可保证底座的可靠夹持。

所选择的平行开闭型气爪在 0.5 MPa 的气压下可提供约 40 N 的有效夹持力。

因此,夹爪与底座沿 x 轴方向上的最大静摩擦力 f 为

$$f = 2\mu F_N = 16 \text{ N} \quad (3)$$

式中 μ 为摩擦因数,值为 0.2。

因此,沿 x 轴方向所产生的最大静摩擦力和 y 轴方向上气缸提供的夹持力均大于 15 N,可实现底座的稳定夹持。

4.3 作业机械臂结构设计

设计用于实现装配的作业机械臂,并将所设计的夹爪集成于机械臂上完成底座夹持结构的整体设计。装配作业机械臂结构如图 11 所示。

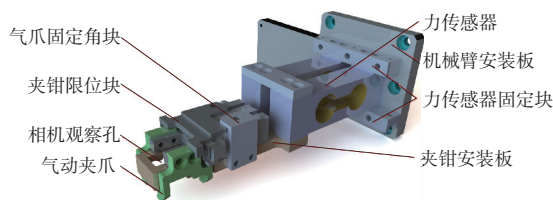


图 11 作业机械臂结构示意图

在作业机械臂中,气动夹爪指用于拾取具有特定结构的底座零件;作业机械臂前端设计有相机观察孔,用于装配过程中视觉相机对观察孔下侧零件进行特征识别;夹钳限位块用于限制气动夹爪开启行程,避免开启行程过大导致结构碰撞等意外情况的发生;气爪固定角块用于提高连接处的机械臂刚度;力传感器用于实现实时力检测,是实现装配过程中力-位控制的必要前提条件。

4.4 整体机械臂受力变形分析

通过研究磁力影响下夹爪末端的变形情况,进而判断出底座夹持状态下受机械臂弹性变形影响而与预定位置的偏离程度,据此判定机械臂的刚度是否符合设计要求。

首先定义各部分的材料属性,如表4所示。

表4 机械臂各结构主要参数

研究对象	弹性模量/GPa	泊松比
气爪固定块	7.0	0.33
力传感器	20.0	0.30
传感器固定块	21.0	0.29
夹爪	11.5	0.34
夹钳安装板	19.3	0.29

在机械臂后端安装板处施加固定端约束,沿 x 轴方向和 z 轴方向分别施加15.0 N与8.9 N的静载荷,以模拟受到的最大磁力值。受力后机械臂变形如图12和图13所示。

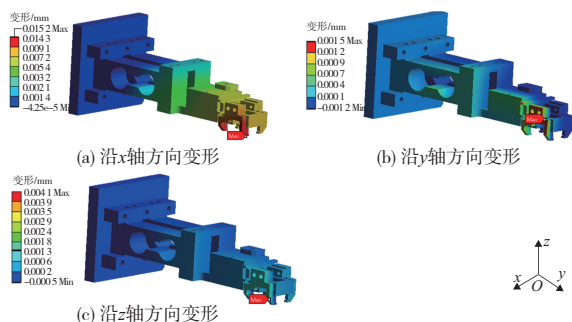


图12 沿 x 轴方向加载后机械臂变形

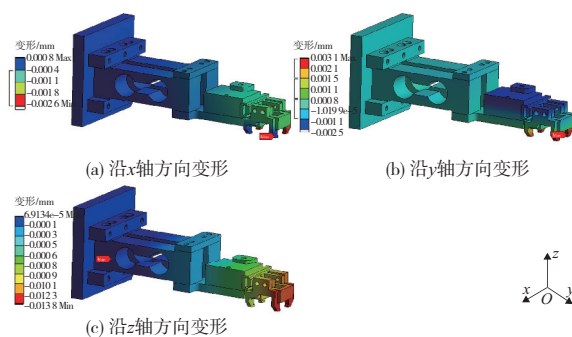


图13 沿 z 轴方向加载后机械臂变形

从结果可知,当底座受到沿 x 轴方向与 z 轴方向的最大磁力影响时,沿该方向产生的最大形变量分别为 $15.2\ \mu\text{m}$ 和 $13.8\ \mu\text{m}$ 。本文所设计的夹持定位结构满足强磁组件夹持和定位的设计

要求。

5 实验验证

将本文中所设计的面向强磁组件的夹持定位结构集成到自动化微装配系统中,通过装配实验进行夹具结构可行性分析与验证。图14展示了系统集成后夹持部分的示意图,气动夹爪夹持底座与固定在作业转台上的磁钢对准后进行下压装配。

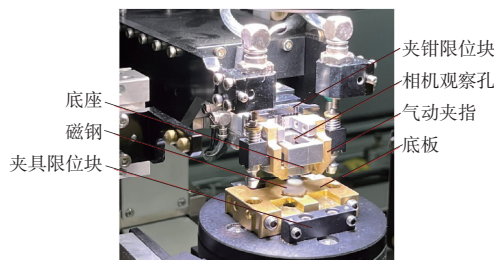


图14 下压装配示意图

选取100套磁钢底座零件用该微装配系统进行批量装配,图15展示了这100个样本同轴度的分布情况。由前文可知:装配过程中的强磁力作用会使得底座零件的夹持位置与预期位置相比出现微米级的偏移,因此样本的同轴度近似地服从一个均值为 $14.61\ \mu\text{m}$,标准差为 $5.06\ \mu\text{m}$ 的正态分布,记为 $X \sim N(14.61, 5.06^2)$ 。大部分样本点的同轴度集中在 $[10\ \mu\text{m}, 20\ \mu\text{m}]$ 区间范围内。这表明数据的离散程度较低,具有良好的一致性。因此本文所设计的夹持定位结构能够很好地应用于微小强磁组件的智能装配设备。

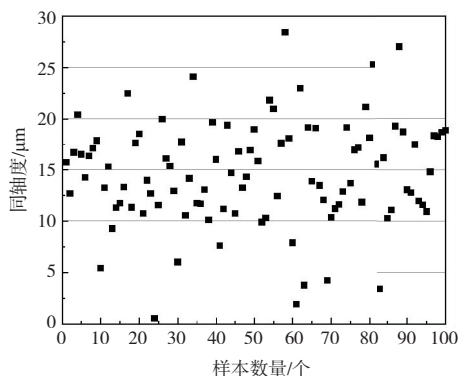


图15 各同轴度区间样本分布

6 结语

本文针对微小强磁组件的精密装配设计了一种夹持定位结构,通过真空辅助的夹具定位方式

解决了磁钢尺寸小、磁性强和难夹持的问题;基于有限元分析优化设计了夹爪和机械臂的整体结构;将所设计的夹具集成于自研的精密装配系统中进行微小强磁组件的装配实验以验证研究的可行性。实验结果表明:批量装配样本的同轴度数据近似服从正态分布 $N(14.61, 5.06^2)$, 具有良好的-一致性,该结构具备足够的刚度以抵抗强磁力引起的夹具弹性变形,在强磁力作用的情况下仍能保证零件的可靠夹持和精确定位。本文研究思路 and 结果对类似强磁组件的装配任务具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] 孙媛,金鑫,叶鑫,等. 面向中间尺度零件精密装配的微夹持器[J]. 兵工学报,2014,35(12):2078-2086.
- [2] 匡立生. 集成式机器人智能手爪研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [3] Chen C H, Chong W D. Force controlled robot gripper with flexible joint for delicate assembly task[C]//2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2013). Gwangju, Korea: IEEE, 2013: 935-939.
- [4] Diller E, Sitti M. Three - dimensional programmable assembly by untethered magnetic robotic micro - grippers[J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(28):4397-4404.
- [5] Li M, Wu K Z. Research on the automatic assembly for a precision TR module[C]//International Conference on Mechanical Design and Simulation (MDS 2022). Wuhan, China: SPIE, 2022:92.
- [6] Antonelli M G, Beomonte Zobel P, Durante F, et al. Development and testing of a grasper for NOTES powered by variable stiffness pneumatic actuation [J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2017, 13(3):e1796.
- [7] Rosati G, Minto S, Oscari F. Design and construction of a variable - aperture gripper for flexible automated assembly[J]. Robotics and Computer - Integrated Manufacturing, 2017, 48:157-166.
- [8] Arzanpour S, Fung J, Mills J K, et al. Flexible fixture design with applications to assembly of sheet metal automotive body parts[J]. Assembly Automation, 2006, 26(2):143-153.
- [9] Sun S S, Luo Y, Qiao X X, et al. An exchangeable end effector for multi - part - assembly system [C]//Tenth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation. Kunming, China: SPIE, 2019:18.
- [10] Yi B J, Ra H Y, Lee J H, et al. Design of a parallel - type gripper powered by pneumatic actuators [C]//Proceedings of 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000). Takamatsu, Japan: IEEE, 2000:689-695.
- [11] 李响,张金男,王承宝. 汽车轮毂轴承内、外圈自动送料装置的研制[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(1):82-86.
- [12] Guan H T, Du S L, Zhang Y W, et al. A flexible electrostatic adsorption suction cup for curved surface[M]// Intelligent Robotics and Applications. ChamSpringer International Publishing2022:160-170.
- [13] Jiang J, Niu C X. Research on soft electrostatic adsorption unit driven by SMA [C]//Volume 7B: Dynamics, Vibration, and Control. Virtual, Online. American Society of Mechanical Engineers, 2021: V07BT07A058.
- [14] 黄之峰,王鹏飞,李满天,等. 基于柔性静电吸附技术的爬壁机器人研究[J]. 机械设计与制造, 2011(6): 166-168.

收稿日期:2024-03-29