

重型高精度惯性摩擦焊机移动夹具定位误差分析

孙宝玉¹ 李焕震¹ 张刚² 余卓成¹ 关英俊^{1*}

1. 长春工业大学机电工程学院, 长春, 130012

2. 长春数控机床有限公司, 长春, 130022

摘要: 针对航空发动机典型零件的高精度焊接质量需求, 设计了一种新型重型高精度惯性摩擦焊机移动夹具的夹紧机构, 对移动夹具进行定位误差分析。建立一种移动夹具定位元件公差与焊件位姿误差映射关系的理论模型, 在忽略其他影响因素(如机床误差、焊件的定位基准面误差、夹紧力和热变形引起的误差等)对焊件焊接精度影响的情况下, 利用该误差理论模型, 根据某型转子要求的焊接精度, 通过误差理论模型计算得到移动夹具夹紧机构定位元件的尺寸公差范围, 再根据该尺寸公差范围设计移动夹具夹紧机构并夹装焊件, 从而完成焊接试验。试验结果显示, 同轴度误差、平行度误差和轴向缩短量误差三项误差中的最大误差分别为 $\phi 0.04$ mm、0.02 mm 和 0.12 mm, 各项误差检测结果均达到所要求的焊接精度(同轴度误差: $\phi 0.06$ mm; 平行度误差: 0.04/300 mm; 轴向缩短量误差: ± 0.2 mm), 证明计算得到的各定位元件的公差范围合理, 所建立的误差理论模型对重型惯性摩擦焊机设计中移动夹具定位元件的公差分配具有重要的理论指导意义。

关键词: 移动夹具; 定位误差; 误差映射; 焊接精度; 公差

中图分类号: TH124

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.02.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of Positioning Errors of Heavy Duty High Precision Inertial Friction Welding Mobile Fixtures

SUN Baoyu¹ LI Huanzhen¹ ZHANG Gang² YU Zhuocheng¹ GUAN Yingjun^{1*}

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun, 130012

2. Changchun CNC Machine Tool Co., Ltd., Changchun, 130022

Abstract: A new type of heavy-duty high-precision inertial friction welding machine moving fixture clamping mechanisms was designed to meet the high-precision welding quality requirements of typical parts of aircraft engines. The positioning error analysis of the moving fixture clamping mechanisms was carried out. A theoretical model was established for the mapping relationship between the positioning component tolerance of a mobile fixture clamping mechanism and the positional error of the welded part, ignoring other influencing factors such as machine tool errors, positioning reference plane errors of welded parts, and errors caused by clamping forces and thermal deformation on the welding accuracy of welded parts, this error theoretical model was used to calculate the dimensional tolerance range of the positioning components of the mobile fixture clamping mechanism based on the required welding accuracy of a certain type of rotor, a mobile fixture clamping mechanism was designed based on the calculated tolerance range of positioning components and clamp the welded parts to complete the welding tests. The experimental results show that the maximum errors of coaxiality error, parallelism error, and axial shortening error are as $\phi 0.04$ mm, 0.02 mm and 0.12 mm respectively, all error detection results meet the required welding accuracy (coaxiality error: $\phi 0.06$ mm; parallelism error: 0.04/300 mm; axial shortening error: ± 0.2 mm). It indicates that the tolerance range of each positioning component obtained through analysis is reasonable, and the error theoretical model has important theoretical guidance significance for the tolerance allocation of moving fixture positioning components in the design of heavy-duty inertial friction welding machines.

Key words: mobile fixture; positioning error; error mapping; welding precision; tolerance

0 引言

转子组件、涡轮轴组件及风扇轴组件等典型零件是航空发动机压气机的核心部件, 其焊接精度直接影响整个航空发动机的性能。目前这些航

空发动机压气机典型零件多使用惯性摩擦焊技术进行焊接,惯性摩擦焊机的各部位加工误差对焊件的焊接精度和质量有直接影响,而移动夹具造成的加工误差大约占整个加工过程加工误差的20%~60%^[1],由此可见,移动夹具的定位精度对焊件的焊接精度有重要影响。一般由夹具外壳和一定数量的定位、夹紧元件构成移动夹具的夹紧机构^[2],定位元件通常会确定工件在机械加工中的位置^[3-4],由于定位元件在生产中的制造和装配误差会影响其定位精度,焊件在移动夹具夹紧机构中进行定位时会产生定位误差^[5],故有必要针对这一类型移动夹具的定位误差分析进行深入研究,确定定位元件的尺寸公差,这对提高航空发动机压气机典型零件的焊接精度具有重要作用。

近年来,在夹具的定位误差分析方面,学者们进行了大量研究。如王凯^[5]通过齐次坐标变换法建立了一种工件孔的位置度误差与移动夹具各个定位元件误差关系的理论模型,得到了由移动夹具定位元件公差而导致的工件的孔位置度误差。WANG^[6]建立了一种夹具的各个定位元件和工件定位表面几何误差与工件定位误差关系的理论模型,并使用 D-Optimal 优化方法使工件的定位误差达到最小,从而使得工件的加工误差控制在所要求的公差范围内。刘亚雄等^[7]建立了一种夹具定位误差与定位元件的制造和位置误差关系的理论模型,利用 MATLAB 蒙特卡罗模型对多个误差源进行随机取样,并对工件位姿误差进行多次模拟求解,得到了各误差源对工件位姿误差的敏感性分布。吴玉光等^[8]通过建立等价机构模型,采用机构学的各种精度分析方法实现了对定位误差的求解。上述研究对夹具定位误差分析的发展起到了很大的推动作用,但关于摩擦焊领域的夹具定位误差的研究报道较少,尤其对专门用于飞机发动机关键部件焊接的重型高精度惯性摩擦焊机移动夹具定位误差的研究报道更少,故有必要针对重型高精度惯性摩擦焊机移动夹具的定位误差进行更深入的分析,以提高发动机关键部件的焊接质量,解决航空发动机的关键技术难题。

本文针对所设计的重型高精度惯性摩擦焊机移动夹具夹紧机构,建立一种夹具定位元件公差与焊件位姿误差映射关系的理论模型,对移动夹具夹紧机构的定位误差进行分析。根据某型压气机转子焊接精度要求,利用该误差理论模型计算得到移动夹具夹紧机构定位元件的合理公差范围,并通过试验验证定位误差分析的准确性,为移动夹具夹紧机构定位元件的设计提供参考。

1 惯性摩擦焊机移动夹具夹紧机构设计

航空发动机的典型零件在焊接中有很高的精度要求,某些典型零件焊接所需要的顶锻力可达1000 t 量级,故本文针对航空发动机典型零件的焊接,设计了一种新型的重型高精度惯性摩擦焊机移动夹具夹紧机构。

1.1 惯性摩擦焊机整体结构及工作原理

惯性摩擦焊机整体结构主要由电机、飞轮组、主轴、旋转夹具、移动夹具、尾座滑台、顶锻力液压缸、回转待焊件、非回转待焊件等组成,如图 1 所示。

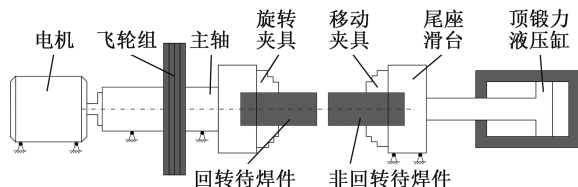


图 1 惯性摩擦焊机整体结构示意图

Fig.1 Overall structure diagram of inertial friction welding machine

惯性摩擦焊机主轴的转动由电机提供动力,主轴上装有不同大小的储能飞轮组,待焊件分别固定在旋转夹具和移动夹具上,旋转夹具上的待焊件可以转动但不能前后移动,移动夹具上的待焊件不能转动但可以连同移动夹具整体在尾座滑台上前后移动,移动的动力由顶锻力液压缸提供,同时液压缸在焊接过程中持续提供顶锻力。惯性摩擦焊的工作原理如图 2 所示。

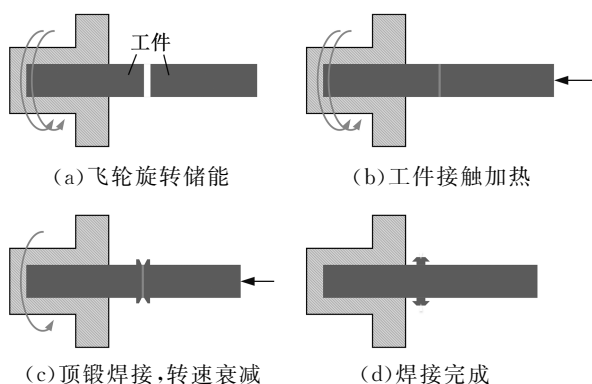


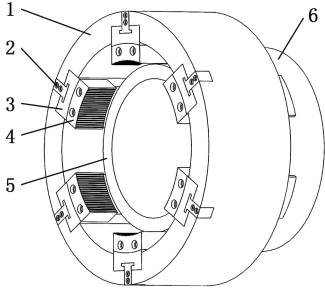
图 2 惯性摩擦焊工作原理

Fig.2 Working principle of inertia friction welding

1.2 移动夹具夹紧机构设计

移动夹具夹紧机构主要由轴套、L 形键、移动夹爪、平头键、夹爪头、挡杆和拉杆组成,其结构设计如图 3 所示。

轴套内部有一挡杆,焊件的轴向定位由该挡杆实现,由 6 个均匀分布在夹具轴套圆周方向的移动夹爪来实现焊件的定心和夹紧。夹爪头通过



1.轴套 2.L形键 3.移动夹爪 4.夹爪头 5.挡杆 6.拉杆

图 3 移动夹具夹紧机构结构

Fig.3 Mobile fixture clamping mechanism structure

螺栓固定在移动夹爪上,夹爪头和移动夹爪之间设计有平头键来限制两者之间的相互移动,夹爪头的外表面形状与工件圆周的外表面相匹配,为了减少焊件在装夹过程中的滑动,在夹爪头的外表面开有多条轴向的凹槽。轴套凹槽与 L 形键结合形成移动夹爪移动的导轨副,移动夹爪和拉杆通过凹槽连接,拉杆与液压缸的活塞杆连接。夹具开始装夹工件时,液压缸拉动移动夹爪在导轨中滑动,因为导轨与轴线成一定夹角,所以移动夹爪沿导轨滑动时,可将沿轴套轴向的往复运动转化为沿轴套径向的往复滑动,夹爪会向轴心位置滑动,实现移动夹具对焊件的定心和夹紧。当夹具开始松开工件时,液压缸拉动移动夹爪在导轨中滑动,夹爪会向远离轴心的位置滑动,实现移动夹具对焊件的松开操作。

直线运动式液压缸为移动夹爪的往复直线运动提供动力,实现移动夹具夹紧机构对焊件的反复装夹。

2 移动夹具误差映射模型的建立

为达到航空发动机压气机典型零件的焊接精度,需要分析移动夹具的定位误差。建立移动夹具定位元件公差与焊件位姿误差映射关系的理论模型,根据给定焊件的焊接精度要求,可直接计算出定位元件尺寸的公差范围,为设计提供参考^[9]。本文建立的移动夹具坐标系如图 4 所示,其中{GCS}表示全局坐标系;{WCS}和{L_j}分别表示固定在焊件上的焊件坐标系和固定在第 j 个定位元件的定位元件坐标系,也称为参考坐标系和局部坐标系。

假设在全局坐标系{GCS}中,焊件的位置和姿态分别用 X_w 和 θ_w 表示,且 X_w 和 θ_w 都属于矩阵 $R^{3 \times 1}$ 。在定位元件坐标系{L_j}中,用 $r_{w_j} \in R^{3 \times 1}$ 表示焊件与第 j 个定位元件接触点的位置,那么 r_{w_j} 在全局坐标系{GCS}中就可以表示为

$$H_j(X_w, \theta_w, r_{w_j}) = X_w + {}^G_w R r_{w_j} \quad (1)$$

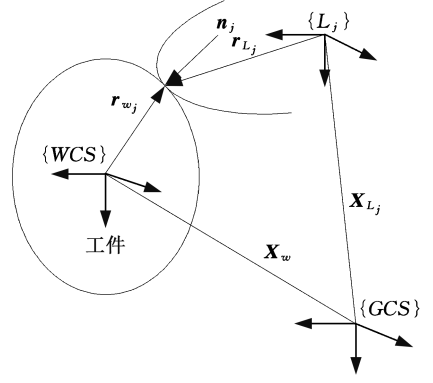


图 4 移动夹具坐标系示意图

Fig.4 Moving fixture coordinate system diagram

式中: ${}^G_w R$ 为焊件坐标系{WCS}相对于全局坐标系{GCS}的姿态矩阵, ${}^G_w R \in S(3)$, $S(3)$ 为向量空间 V 的子集合。

假设在全局坐标系{GCS}中,第 j 个定位元件的位置和姿态分别用 X_{L_j} 和 θ_{L_j} 表示,且 X_{L_j} 和 θ_{L_j} 都属于矩阵 $R^{3 \times 1}$ 。在焊件坐标系{WCS}中,用 $r_{L_j} \in R^{3 \times 1}$ 表示第 j 个定位元件与焊件接触点的位置,那么 r_{L_j} 在全局坐标系{GCS}中就可以表示为

$$h_j(X_{L_j}, \theta_{L_j}, r_{L_j}) = X_{L_j} + {}^G_{L_j} R r_{L_j} \quad (2)$$

式中: ${}^G_{L_j} R$ 为定位元件坐标系{L_j}相对于全局坐标系{GCS}的姿态矩阵, ${}^G_{L_j} R \in S(3)$ 。

由于在实际工作中,第 j 个定位元件与焊件在全局坐标系{GCS}中的重合点始终唯一,故有

$$H_j(X_w, \theta_w, r_{w_j}) = h_j(X_{L_j}, \theta_{L_j}, r_{L_j}) \quad (3)$$

移动夹具夹紧机构的定位元件在生产中会产生制造和装配误差,这在实际移动夹具装夹焊件的过程中会导致焊件与定位元件重合点的实际位置偏离理论位置。假设在全局坐标系{GCS}中,焊件的位置和姿态偏差分别用 $\Delta X_w \in R^{3 \times 1}$ 和 $\Delta \theta_w \in R^{3 \times 1}$ 表示,焊件与第 j 个定位元件重合点的位置偏差用 $\Delta r_{w_j} \in R^{3 \times 1}$ 表示,则在全局坐标系{GCS}中,焊件与第 j 个定位元件重合点的位置可以用 $H_j(X_w + \Delta X_w, \theta_w + \Delta \theta_w, r_{w_j} + \Delta r_{w_j})$ 来表示,忽略二次及以上高阶项对其进行泰勒展开,有

$$H_j(X_w + \Delta X_w, \theta_w + \Delta \theta_w, r_{w_j} + \Delta r_{w_j}) = H_j(X_w, \theta_w, r_{w_j}) + \frac{\partial H_j}{\partial X_w} \Delta X_w + \frac{\partial H_j}{\partial \theta_w} \Delta \theta_w + \frac{\partial H_j}{\partial r_{w_j}} \Delta r_{w_j} \quad (4)$$

同理,假设在全局坐标系{GCS}中,第 j 个定位元件位置和姿态的偏差分别用 $\Delta X_{L_j} \in R^{3 \times 1}$ 和 $\Delta \theta_{L_j} \in R^{3 \times 1}$ 表示,第 j 个定位元件与焊件重合点的位置偏差用 $\Delta r_{L_j} \in R^{3 \times 1}$ 表示,则在全局坐标系{GCS}中,第 j 个定位元件与焊件接触点的位置可以用 $h_j(X_{L_j} + \Delta X_{L_j}, \theta_{L_j} + \Delta \theta_{L_j}, r_{L_j} + \Delta r_{L_j})$ 表示,忽略二次及以上高阶项对其进行泰勒展开,有

$$\begin{aligned} & \mathbf{h}_j(\mathbf{X}_{l_j} + \Delta\mathbf{X}_{l_j}, \boldsymbol{\theta}_{l_j} + \Delta\boldsymbol{\theta}_{l_j}, \mathbf{r}_{l_j} + \Delta\mathbf{r}_{l_j}) = \\ & \mathbf{h}_j(\mathbf{X}_{l_j}, \boldsymbol{\theta}_{l_j}, \mathbf{r}_{l_j}) + \frac{\partial \mathbf{h}_j}{\partial \mathbf{X}_{l_j}} \Delta\mathbf{X}_{l_j} + \frac{\partial \mathbf{h}_j}{\partial \boldsymbol{\theta}_{l_j}} \Delta\boldsymbol{\theta}_{l_j} + \frac{\partial \mathbf{h}_j}{\partial \mathbf{r}_{l_j}} \Delta\mathbf{r}_{l_j} \end{aligned} \quad (5)$$

尽管移动夹具夹紧机构对焊件夹紧定位过程中会存在各种误差,但移动夹具夹紧机构的定位元件始终与焊件保持重合,故有

$$\begin{aligned} & \mathbf{H}_j(\mathbf{X}_w + \Delta\mathbf{X}_w, \boldsymbol{\theta}_w + \Delta\boldsymbol{\theta}_w, \mathbf{r}_{w_j} + \Delta\mathbf{r}_{w_j}) = \\ & \mathbf{h}_j(\mathbf{X}_{l_j} + \Delta\mathbf{X}_{l_j}, \boldsymbol{\theta}_{l_j} + \Delta\boldsymbol{\theta}_{l_j}, \mathbf{r}_{l_j} + \Delta\mathbf{r}_{l_j}) \end{aligned} \quad (6)$$

若只研究 $\Delta\mathbf{X}_{l_j}$ 的影响,而忽视 $\Delta\boldsymbol{\theta}_{l_j}$ 的影响,则式(6)可以转换为

$$(\mathbf{I}_{3 \times 3} \vdots -\frac{g}{w} \mathbf{R} \mathbf{r}_{w_j}^*) (\Delta\mathbf{X}_w + \Delta\boldsymbol{\theta}_w)^T + \Delta\mathbf{r}_{s_j} = \Delta\mathbf{X}_{l_j} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ 为单位矩阵。

运算符 $*$ 的含义为

$$\begin{aligned} & \mathbf{r}_{w_j}^* = [r_x \quad r_y \quad r_z]^T * = \\ & \begin{bmatrix} 0 & -r_z & r_y \\ r_z & 0 & -r_x \\ -r_y & r_x & 0 \end{bmatrix} \in \mathbf{S} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\Delta\mathbf{r}_{s_j} = \frac{g}{w} \mathbf{R} \Delta\mathbf{r}_{w_j} - \frac{g}{l_j} \mathbf{R} \Delta\mathbf{r}_{l_j}$ 表示第 j 个重合点在全局坐标系 $\{GCS\}$ 中第 j 个定位元件和焊件表面产生的滑动误差,其大小与移动夹具夹紧机构的定位元件分布情况有关,在大多数情况下其值非常小,故可忽略其影响^[10]。则式(7)可以转换为

$$\begin{aligned} & (\mathbf{I}_{3 \times 3} \vdots -\mathbf{r}_{w_j}^*) (\Delta\mathbf{X}_w + \Delta\boldsymbol{\theta}_w)^T = \Delta\mathbf{X}_{l_j} \quad (8) \\ & \mathbf{r}_{w_j}^* = \frac{g}{w} \mathbf{R} \mathbf{r}_{w_j} \in \mathbf{R}^{3 \times 1} \end{aligned}$$

假设移动夹具夹紧机构所有定位元件的位置误差 $\Delta\mathbf{r}_{n_j}$ 只存在于法矢量 \mathbf{n}_j 的方向上 (\mathbf{n}_j 的方向为定位元件坐标系 $\{L_j\}$ 的 Z 轴方向),即 $\Delta\mathbf{X}_{l_j} = \Delta\mathbf{r}_{n_j} \cdot \mathbf{n}_j$,则式(8)可以转换为

$$(\mathbf{I}_{3 \times 3} \vdots -\mathbf{r}_{w_j}^*) (\Delta\mathbf{X}_w + \Delta\boldsymbol{\theta}_w)^T = \Delta\mathbf{r}_{n_j} \cdot \mathbf{n}_j \quad (9)$$

假设当移动夹具装夹焊件完成定位需要用到 m 个定位元件时,式(9)可以转换为

$$\mathbf{E}_L^T \Delta\mathbf{X} = \mathbf{M} \Delta\mathbf{r} \quad (10)$$

$$\mathbf{E}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \cdots & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{r}_{w_1}^* & \cdots & \mathbf{r}_{w_m}^* \end{bmatrix}$$

$$\Delta\mathbf{X} = (\Delta\mathbf{X}_w + \Delta\boldsymbol{\theta}_w)^T$$

$$\mathbf{M} = \text{diag}(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \cdots, \mathbf{n}_m) \in \mathbf{R}^{3m \times m}$$

$$\Delta\mathbf{r} = (\Delta\mathbf{r}_{n_1}, \Delta\mathbf{r}_{n_2}, \cdots, \Delta\mathbf{r}_{n_m})^T \in \mathbf{R}^{m \times 1}$$

因为矩阵 \mathbf{M} 为正交矩阵,所以式(10)可以转换为

$$\mathbf{M}^T \mathbf{E}_L^T \Delta\mathbf{X} = \Delta\mathbf{r} \quad (11)$$

令 $\mathbf{U}_L = \mathbf{M}^T \mathbf{E}_L^T \in \mathbf{R}^{m \times 6}$,则式(11)可以转换为

$$\mathbf{U}_L \Delta\mathbf{X} = \Delta\mathbf{r} \quad (12)$$

$$\mathbf{X} = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)^T$$

式中: x, y, z 为焊件的位置误差; α, β, γ 为焊件的姿态误差,即焊件绕 $\{WCS\}$ 的 X, Y 和 Z 轴所旋转的角度。

当给定焊件的焊接精度要求时,代入式(12)

即可得到移动夹具夹紧机构每个定位元件的公差范围。

3 坐标系的建立

本文设计的移动夹具夹紧机构,内部的挡杆限制三个方向的自由度,分别是工件绕 X 轴和 Y 轴的转动以及沿 Z 轴的移动,三个沿圆周方向分布的移动夹爪也限制三个方向的自由度,分别是焊件沿 X 轴和 Y 轴的移动以及绕 Z 轴的转动。由此焊件被限制 6 个自由度,实现了完全定位。

基于移动夹具夹紧机构定位元件公差与焊件位姿误差关系的理论模型,分别建立焊件坐标系和移动夹具夹紧机构定位元件坐标系。

3.1 焊件坐标系

以航空发动机的压气机转子为例,在转子左端面外圆周的圆心点为原点建立焊件坐标系 $\{WCS\}$,方向如图 5 所示。

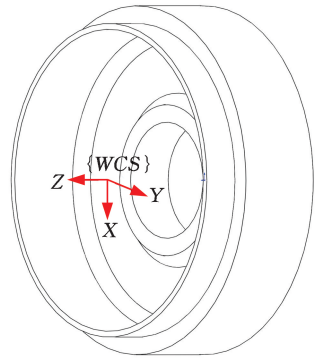


图 5 焊件坐标系

Fig.5 Weldment coordinate system

3.2 移动夹具定位元件坐标系

上文对移动夹具的定位方式进行了分析,焊件的 6 个自由度被移动夹具的挡杆和移动夹爪所限制,在移动夹具的定位元件上分别建立 6 个定位元件坐标系。

1) 移动夹爪。移动夹具在夹紧焊件时,焊件沿 X 和 Y 轴的移动以及绕 Z 轴的转动三个方向的自由度被 3 个移动夹爪共同限制,分别在 3 个移动夹爪与焊件外圆面重合的 3 个理论重合点 c_1, c_2, c_3 建立移动夹爪坐标系,方向如图 6 所示。经测量,三个坐标系原点 c_1, c_2, c_3 在焊件坐标系 $\{WCS\}$ 中的坐标分别为 $(150.1280, -260.0293, -127.6330)\text{mm}, (-300.2580, 0, -127.9330)\text{mm}, (150.1280, 260.0293, -127.6330)\text{mm}$ 。坐标原点 c_1 和 c_2 所在的坐标系分别限制焊件沿 X 和 Y 轴的移动,对应的法向量 \mathbf{n}_1 和 \mathbf{n}_2 分别为 $(1, 0, 0)^T$ 和 $(0, 1, 0)^T$; 坐标原点 c_3 所在的坐标系限制焊件绕 Z 轴的转动,则对应的法向量 \mathbf{n}_3 为 $(1, 0, 0)^T$ 。

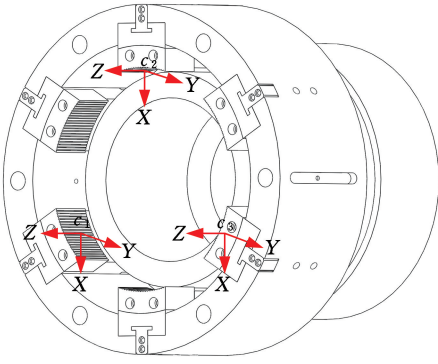


图 6 移动夹爪坐标系

Fig.6 Move gripper coordinate system

2) 挡杆。在挡杆与焊件右端面重合的 3 个在圆周方向上间隔 120° 的理论接触点 c_4 、 c_5 、 c_6 建立挡杆坐标系,方向如图 7 所示。经测量,坐标原点 c_4 、 c_5 、 c_6 在焊件坐标系 {WCS} 中的坐标分别为 $(127.3705, -220.6122, -177.6330)$ mm, $(-254.7410, 0, -177.6330)$ mm, $(127.3705,$

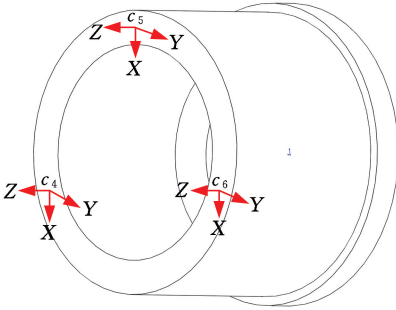


图 7 挡杆坐标系

Fig.7 Stopper coordinate system

$$E_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 127.633 & -260.0293 & 0 & 127.633 & 0 & 0 & 127.633 & 260.0293 \\ -127.633 & 0 & -150.128 & -127.633 & 0 & 300.258 & -127.633 & 0 & -150.128 \\ 260.0293 & 150.128 & 0 & 0 & -300.258 & 0 & -260.0293 & 150.128 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 177.633 & -220.6122 & 0 & 177.633 & 0 & 0 & 177.633 & 220.6122 \\ -177.633 & 0 & -127.3705 & -177.633 & 0 & 254.741 & -177.633 & 0 & -127.3705 \\ 220.6122 & 127.3705 & 0 & 0 & -254.741 & 0 & -220.6122 & 127.3705 & 0 \end{bmatrix}$$

由公式 $U_L = M^T E_L^T$ 代入相关数据后计算得到的定位矩阵 U_L 为

$$U_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -127.633 & 260.0293 \\ 0 & 1 & 0 & 127.633 & 0 & -300.258 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -127.633 & -260.0293 \\ 0 & 0 & 1 & -220.6122 & -127.3705 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 254.741 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 220.6122 & -127.3705 & 0 \end{bmatrix}$$

显然 U_L 为满秩矩阵,即定位方式为完全定位。

$220.6122, -177.6330$)mm。三个坐标系对应的法向量 n_4 、 n_5 、 n_6 均为 $(0,0,1)^T$ 。

4 误差分析

由于法向量 n_1, n_2, \dots, n_6 已知,故根据 $M = \text{diag}(n_1, n_2, \dots, n_6)$ 得到矩阵 M :

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在实际误差计算中,为了更快地得到结果,假设焊件坐标系 {WCS} 与全局坐标系 {GCS} 方向是一致的^[11],则有 $r_{w_j}^g = r_{w_j} \in R^{3 \times 1}$,代入相关数据后,矩阵 E_L 为

由式(12)及 $\Delta r = (r_1, r_2, \dots, r_6)^T$ 得到移动夹具定位元件公差与焊件位姿误差 ΔX 之间的关系:

$$\Delta r = \begin{bmatrix} x - 127.633\beta + 260.0293\gamma \\ y + 127.633\alpha - 300.258\gamma \\ x - 127.633\beta - 260.0293\gamma \\ z - 220.6122\alpha - 127.3705\beta \\ z + 254.741\beta \\ z + 220.6122\alpha - 127.3705\beta \end{bmatrix} \quad (13)$$

由于夹紧力、热变形等造成的误差相对于整个焊件的尺寸来说较小,可以忽略不计,而机床误差能够通过移动夹具夹紧机构外圈的精密调整机构来消除,故在忽略其他影响因素(如机床误差、焊件的定位基准面误差、夹紧力和热变形引起的误差等)对焊件焊接精度影响的情况下^[12],可以得到在移动夹具中影响焊件焊接精度的唯一因素是移动夹具定位误差导致的焊件位置和姿态误差 ΔX ^[13],由焊件的焊接精度要求计算得到 ΔX 中的 x 、 y 、 z 、 α 、 β 和 γ 。根据实际焊接中焊件所要求的焊接精度,以某型航空发动机压气机转子为例,对其焊接精度进行分析。

根据某型航空发动机压气机转子焊接精度要求(同轴度误差: $\phi 0.06$ mm;端面平行度误差:0.04/300 mm,即每 300 mm 长度最大为 0.04 mm;轴向缩短量误差: ± 0.2 mm),可以得到该转子的位置和姿态误差 ΔX 中各分量的取值范围:

$$x \in (-0.06, 0.06) \text{mm}$$

$$y \in (-0.06, 0.06) \text{mm}$$

$$z \in (-0.2, 0.2) \text{mm}$$

$$\alpha \in (-0.000\ 133, 0.000\ 133) \text{rad}$$

$$\beta \in (-0.000\ 133, 0.000\ 133) \text{rad}$$

$$\gamma \in (-0.000\ 133, 0.000\ 133) \text{rad}$$

将以上取值范围代入式(13),得到移动夹具各定位元件的公差 Δr 中各分量的取值范围:

$$\Delta r_1 \in (-0.111\ 559, 0.111\ 559) \text{mm}$$

$$\Delta r_2 \in (-0.116\ 910, 0.116\ 910) \text{mm}$$

$$\Delta r_3 \in (-0.111\ 559, 0.111\ 559) \text{mm}$$

$$\Delta r_4 \in (-0.246\ 282, 0.246\ 282) \text{rad}$$

$$\Delta r_5 \in (-0.233\ 881, 0.233\ 881) \text{rad}$$

$$\Delta r_6 \in (-0.246\ 282, 0.246\ 282) \text{rad}$$

显然,当给出转子所要求的焊接精度后,由式(13)可以计算出移动夹具各定位元件所对应的公差范围。

5 焊件焊接试验与分析

为了验证误差分析的有效性,使用计算得到的定位元件公差范围的移动夹具对焊件进行焊接试验,通过焊件精度的测量验证误差分析的准确性。

5.1 焊件试验

根据实际加工情况的需要,选定焊件材料为高温合金,牌号为 GH-4169,工艺参数为 $\phi 380$ mm \times 60 mm,焊件在惯性摩擦焊旋转夹具和移动夹具的装夹情况如图 8、图 9 所示,焊件焊接后的成品如图 10 所示。

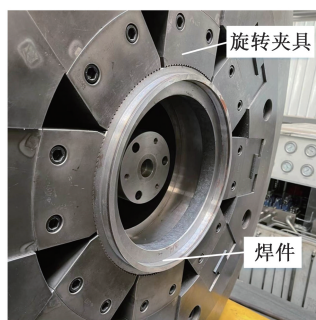


图 8 旋转夹具装夹焊件

Fig.8 Rotating fixture mounting weldment

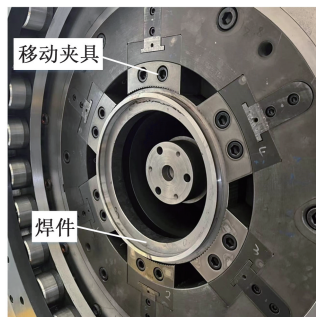


图 9 移动夹具装夹焊件

Fig.9 Moving fixture clamping weldment drawing

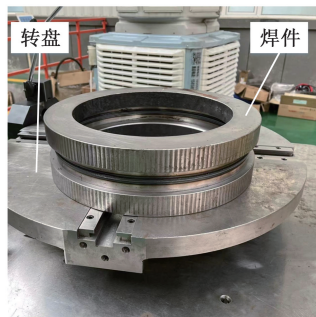


图 10 焊件焊接后成品

Fig.10 The finished product of weldment after welding

5.2 焊件分析

1)同轴度误差测量。将焊件平放在转盘的中央,在焊件靠近焊缝外圆面的竖直方向上选择多个点进行测量,指示器测头触及靠近焊件焊缝的外圆面处,旋转转盘,焊件随转盘旋转,读取指示器读数,指示器读数的最大差值即焊件的同轴度数值^[14],测量现场如图 11 所示。

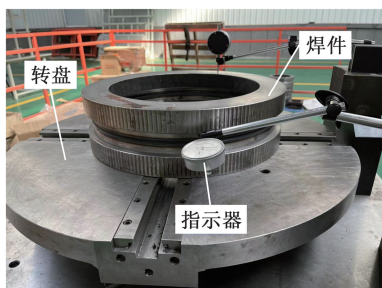


图 11 同轴度测量现场

Fig.11 Coaxiality measurement field

2)端面平行度误差测量。将焊件平放在转盘的中央,在焊件上端面内径到直径的直线方向上选择多个点进行测量,指示器测头触及焊件上端面处,旋转转盘,焊件随转盘旋转,读取指示器读数,指示器读数的最大差值即焊件的端面平行度数值,测量现场如图12所示。

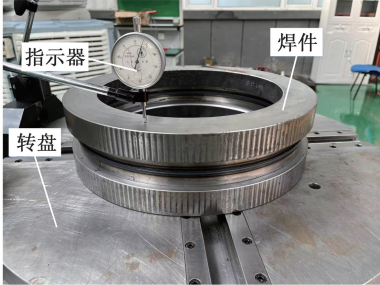


图12 上下端面平行度测量现场

Fig.12 Upper and lower face parallelism measurement field

3)轴向缩短量误差测量。将焊件平放在转盘外侧,在上端面的外圆侧选择两处进行测量,使用游标卡尺的外测量爪分别接触焊件上下端面,测量后得到的值减去理论缩短数值即焊件轴向缩短量误差值。

焊件焊接精度检测结果见表1。由表1可知,3项误差的多个点检测结果均达到所要求的焊接精度,证明上述分析得到的移动夹具各定位元件的公差范围合理,建立的误差理论模型计算结果准确。

表1 焊件焊接精度检测结果

Tab.1 Test result of welding precision

检测项目	精度要求/mm	检测结果/mm
同轴度误差	$\phi 0.06$	最小误差: $\phi 0.02$
		最大误差: $\phi 0.04$
端面平行度误差	0.04/300(每300mm长度最大为0.04mm)	最小误差:0.01
		最大误差:0.02
轴向缩短量误差	± 0.2	最大误差:0.12
		最小误差:-0.04

6 结语

1)在忽略其他影响因素(如机床误差、焊件的定位基准面误差、夹紧力和热变形引起的误差等)对焊件焊接精度影响的情况下,建立了一种移动夹具夹紧机构定位元件公差与焊件位姿误差映射关系的理论模型,通过相关数据计算得到移动夹具夹紧机构定位元件公差与焊件位姿误差的定量关系。通过给定的焊件焊接精度要求,可计算出移动夹具夹紧机构各定位元件的公差范围。

2)根据计算得到的移动夹具夹紧机构各定位元件公差范围设计的移动夹具夹紧机构夹装焊

件,焊件焊接完成后的各项误差检测结果均达到所要求的焊接精度,充分证明了所建立的误差理论模型计算结果的准确性。研究结果在实际设计中可以为设计人员提供重要参考,对定位元件的设计具有理论指导意义。通过为定位元件分配合理的公差范围,可以提高焊件的焊接精度。

参考文献:

- [1] QIN Guohua, ZHANG Weihong, WAN Min. A Machining-dimension-based Approach to Locating Scheme Design[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2008, 130(5):1-7.
- [2] 陈建刚,陈杰峰,张昌明,等.定位误差分析与计算在机床夹具设计中的应用与研究[J].煤矿机械, 2015, 36(5):229-231.
- CHEN Jianguang, CHEN Jiefeng, ZHANG Changming, et al. Application and Research of Positioning Error Analysis and Calculation in Machine Tool Fixture Design[J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(5):229-231.
- [3] 朱成龙,吴玉光.夹具定位误差计算自动化方法[J].制造技术与机床, 2021(3):143-148.
- ZHU Chenglong, WU Yuguang. An Automatic Calculation Method of the Fixture Location Error[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021(3):143-148.
- [4] 彭涛.夹具系统综合误差分析与夹紧顺序优化研究[D].上海:上海交通大学, 2024.
- PENG Tao. Research on Comprehensive Error Analysis and Clamping Sequence Optimization of Fixture Systems[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2024.
- [5] 王凯.工件-夹具系统综合误差建模及夹具优化设计方法研究[D].天津:天津大学, 2014.
- WANG Kai. Research on Integrated Error Modeling of Workpiece-fixture System and Optimal Design Method of Fixture[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [6] WANG M Y. An Optimum Design for 3-D Fixture Synthesis in a Point Set Domain[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16(6): 839-846.
- [7] 刘亚雄,梁庆华,罗磊.基于蒙特卡洛模拟的夹具定位误差分析与预测[J].机械设计与研究, 2019, 35(3):104-109.
- LIU Yaxiong, LIANG Qinghua, LUO Lei. Prediction and Analysis of Fixture Positioning Error Based on Monte Carlo Simulation[J]. Machine Design & Research, 2019, 35(3):104-109.

(下转第254页)

- sign, Analysis and Manufacturing, 2016, 30(4): 353-366.
- [13] GUI Fajun, CHEN Yong, LI Haomin, et al. A Structured Approach for Functional Analysis of Context-aware Systems[J]. Concurrent Engineering, 2023, 31(1/2):21-35.
- [14] TOMIZUKA M. Mechatronics: From the 20th to 21st Century [J]. Control Engineering Practice, 2002, 10(8):877-886.
- [15] PENAS O, PLATEAUX R, PATALANO S, et al. Multi-scale Approach from Mechatronic to Cyber-physical Systems for the Design of Manufacturing Systems[J]. Computers in Industry, 2017, 86:52-69.
- [16] GROOVER M P. Automation, Production Systems, and Computer-integrated Manufacturing [M]. 3rd ed. Delhi:Pearson, 2007.
- [17] KAVI, BUCKLES, BHAT. A Formal Definition of Data Flow Graph Models [J]. IEEE Transactions on Computers, 1986, C-35(11):940-948.
- [18] GULWANI S, POLOZOV O, SINGH R. Program Synthesis [J]. Foundations and Trends in Programming Languages, 2017, 4(1/2):1-119.
- [19] DEBBABI M, HASSAÏNE F, JARRAYA Y, et al. Verification and Validation in Systems Engineering: Assessing UML/SysML Design Models [M]. Berlin:Springer, 2010.
- [20] LJUNGKRANTZ O, AKESSON K, FABIAN M, et al. Formal Specification and Verification of Industrial Control Logic Components [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2010, 7(3):538-548.
- [21] GIESE H, HENKLER S. A Survey of Approaches for the Visual Model-driven Development of Next Generation Software-intensive Systems[J]. Journal of Visual Languages & Computing, 2006, 17(6): 528-550.
- [22] BRÄUNL T. Embedded Robotics: Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems [M]. 2nd ed. Berlin:Springer, 2014
- (编辑 张 洋)
-
- 作者简介:**曹悦*,女,1986年生,讲师。研究方向为模型驱动系统设计。发表论文10余篇。E-mail:ycao@zjut.edu.cn.
- 本文引用格式:**
曹悦,刘玉生,秦绪佳,等.复杂机电系统的软件与物理统一的形式化功能分析[J].中国机械工程,2025,36(2):245-254.
CAO Yue, LIU Yusheng, QIN Xujia, et al. Software-physical Unified Formal Functional Analysis for Complex Mechatronic Systems[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(2):245-254.
-
- (上接第 244 页)
- [8] 吴玉光,李春光.夹具定位误差分析的机构学建模方法[J].中国机械工程,2011,22(13):1513-1518.
WU Yuguang, LI Chunguang. Approach to Mechanism Modeling of Fixture Location Error Analyses [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(13): 1513-1518.
- [9] 毛护国.发动机缸体加工定位误差分析[D].武汉:华中科技大学,2014.
MAO Huguo. Analysis of Positioning Error in Engine Cylinder Block Processing [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [10] 吴拓.现代机床夹具设计[M].北京:化学工业出版社,2009:20-35.
WU Tuo. Design of Modern Machine Tool Fixture [M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2009:20-35.
- [11] 郑伟.一种汽车轮毂柔性夹具的设计与研究[D].南京:南京林业大学,2020.
ZHENG Wei. Design and Research of a Flexible Fixture for Automotive Wheel Hubs [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2020.
- [12] 郑伟,孙见君,马晨波,等.汽车轮毂柔性加工夹具的定位误差分析[J].机械设计,2021,38(3): 46-52.
ZHENG Wei, SUN Jianjun, MA Chenbo, et al. Positioning Error Analysis of Flexible Machining Fixtures for Automotive Wheel Hubs [J]. Mechanical Design, 2021, 38(3):46-52.
- [13] WANG Hui, RONG Y K, LI Hua, et al. Computer Aided Fixture Design: Recent Research and Trends [J]. Computer-Aided Design, 2010, 42 (12):1085-1094.
- [14] 陈强. C-25D 连续驱动摩擦焊机结构分析及优化设计[D].长春:长春工业大学,2021.
CHEN Qiang. Structural Analysis and Optimization Design of C-25D Continuous Drive Friction Welding Machine [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2021.
- (编辑 陈 勇)
-
- 作者简介:**孙宝玉,女,1971年生,教授。研究方向为精密机械驱动技术等。关英俊*(通信作者),男,1978年生,教授、博士研究生导师。研究方向为大型数控机床数字化设计与制造技术等。E-mail:guanyingjun@ccut.edu.cn.
- 本文引用格式:**
孙宝玉,李焕震,张刚,等.重型高精度惯性摩擦焊机移动夹具定位误差分析[J].中国机械工程,2025,36(2):238-244.
SUN Baoyu, LI Huanzhen, ZHANG Gang, et al. Analysis of Positioning Errors of Heavy Duty High Precision Inertial Friction Welding Mobile Fixtures [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(2):238-244.