

变曲率构件转站测量热变形误差的补偿方法

李竺悦, 侯茂盛*, 刘智超, 李丽娟

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 温度变化引起的测量误差会严重影响飞行器、船舶等大型先进装备的尺寸, 为了保证大型变曲率构件的制造装配精度, 缩短大尺寸装备的测量周期, 提出了一种新的大尺寸转站测量热变形误差补偿方法。首先, 通过光纤布拉格光栅及激光跟踪仪获得温度和基准点的三维位置信息, 并建立了对应的数学模型, 以解算全局坐标系下的热变形系数矩阵。然后, 用 ANSYS 软件在相同温度载荷下对实验构件的物理模型进行热变形仿真, 并对比分析了基准点偏移量的实测数据与仿真数据。最后, 用本方法对大型变曲率构件转站测量过程中热变形引起的转站误差进行补偿。实验结果表明, 在均匀温度场和非均匀温度场环境下, 用本方法补偿后的大型变曲率构件转站测量精度比未补偿时分别提高了 81.28% 和 76.26%。

关键词 测量与计量; 热变形仿真; 温度补偿; 转站精度

中图分类号 V262.4+4

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1104003

1 引言

大尺寸测量任务一般通过多站位测量方式完成, 而仪器自身的精度、环境振动、温度变化等因素都会严重影响转站精度。为了提高大尺寸测量的转站精度, 人们对大尺寸测量转站误差进行了大量研究, 并提出了多种大尺寸转站测量误差补偿方法。如常晏宁^[1]以大尺寸测量场中常用的激光跟踪仪和全站仪作为研究对象, 对转站模型进行改进, 并采用雅克比矩阵迭代方法求解转站参数, 用混合智能优化算法对增强的资源子系统(ERS)点坐标进行优化。杨保旒等^[2]采用拉依达准则(3 σ 准则)对参与转站的公共点进行筛选, 剔除误差较大的异常点, 从而减小转站误差, 提高装配系统的测量精度。任瑜等^[3]提出了一种基于网格的布局优化方法, 以覆盖能力、测量精度及总成本作为多目标评价函数, 无需初始布局, 利用全局网格和局部网格划分布局区域, 并结合全局搜索和局部搜索进行全局寻优。张旭等^[4]针对由预应力和尺寸位置偏差等因素引起的装配变形问题, 基于光纤布拉格光栅(FBG)传感器研究了板壳结构的曲面重构算法, 通过波长偏移量与曲率的关系, 得到曲面重

构算法所需的曲率数据, 再通过分段拟合算法得到全部测量点的坐标增量, 从而实现曲面重构。

目前, 关于温度对测量结果影响的研究较少, 但对铝合金、结构钢等材料, 当构件长度超过 10 m 时, 不到 0.5 °C 的温度变化就能产生 50 μ m 的变形量, 而在航空航天、船舶和汽车工业的制造装配过程中, 相关装备的制造装配精度水平以及大尺寸测量任务通常在温度分布复杂的大型建筑中完成。随着测量技术的发展, 仪器自身的测量精度逐渐增高, 温度也成为影响测量精度的主要因素。李婷等^[5]在地下实验室进行了控温测量实验, 验证了在自然温度状态下进行测量能大大提高仪器的测量精度; Mian 等^[6]基于有限元分析建立了离线热误差模型, 减少了建立热响应所需的时间; Miao 等^[7]采用模糊聚类、关联度分析、线性回归分析并结合测量系数矩阵对测温点的位置进行优化; 罗涛^[8]通过热传导微分方程分别建立了矩形、桁架工装的热变形数学模型, 该模型可使转站测量精度提高 93%。

上述温度补偿方法能减小温度变化对测量结果的影响, 但存在实验步骤复杂、模型解算难度大等缺点。此外, 现有研究对象多为规则矩形、桁架工装结

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2020-12-15; 录用日期: 2020-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(61703056, 61805022)

*E-mail: houmsh@cust.edu.cn

构件,上述补偿方法的局限性较高。因此,本文以大尺寸变曲率工件为研究对象,通过仿真模拟与实际测量相结合的方式,提出了一种变曲率构件转站测量热变形误差补偿方法。

2 大尺寸转站测量热变形误差补偿方法

本研究提出了一种基于全局坐标系热变形系数的新型大尺寸转站测量热变形误差补偿方法(下文简称为热变形系数补偿法),具体实现过程如图 1 所示。图 1 的左侧部分为热变形系数补偿法的实现过程。首先,通过单站位实验测量得到不同温度下构件各基准点的坐标,建立温度变化与基准点坐标偏移量的数学关系,并根据建立的数学关系解算构件

的实测热变形系数矩阵 k_s 、 b_s (k_s 为拟合直线的斜率,表示基准点的单位温度热变形偏移量系数,体现了基准点热变形偏移量与温度变化量之间的线性关系; b_s 为拟合直线的纵截距)。然后,将不同温度条件下的基准点变形量与相同条件下有限元分析软件 ANSYS 仿真的变形量进行对比,并求解实测结果与仿真结果的相关系数。最后,根据转站实验测量的温度推算不同状态下基准点的偏移量,从而对基准点坐标的偏移量进行补偿,再将补偿后的坐标与实测坐标进行转站对齐。图 1 的中间部分为不补偿直接进行转站测量的过程,右侧为仿真补偿过程。通过对比热变形系数补偿法、不补偿(直接转站)以及仿真补偿后的转站测量结果,验证了热变形系数补偿法在实际应用中的可行性。

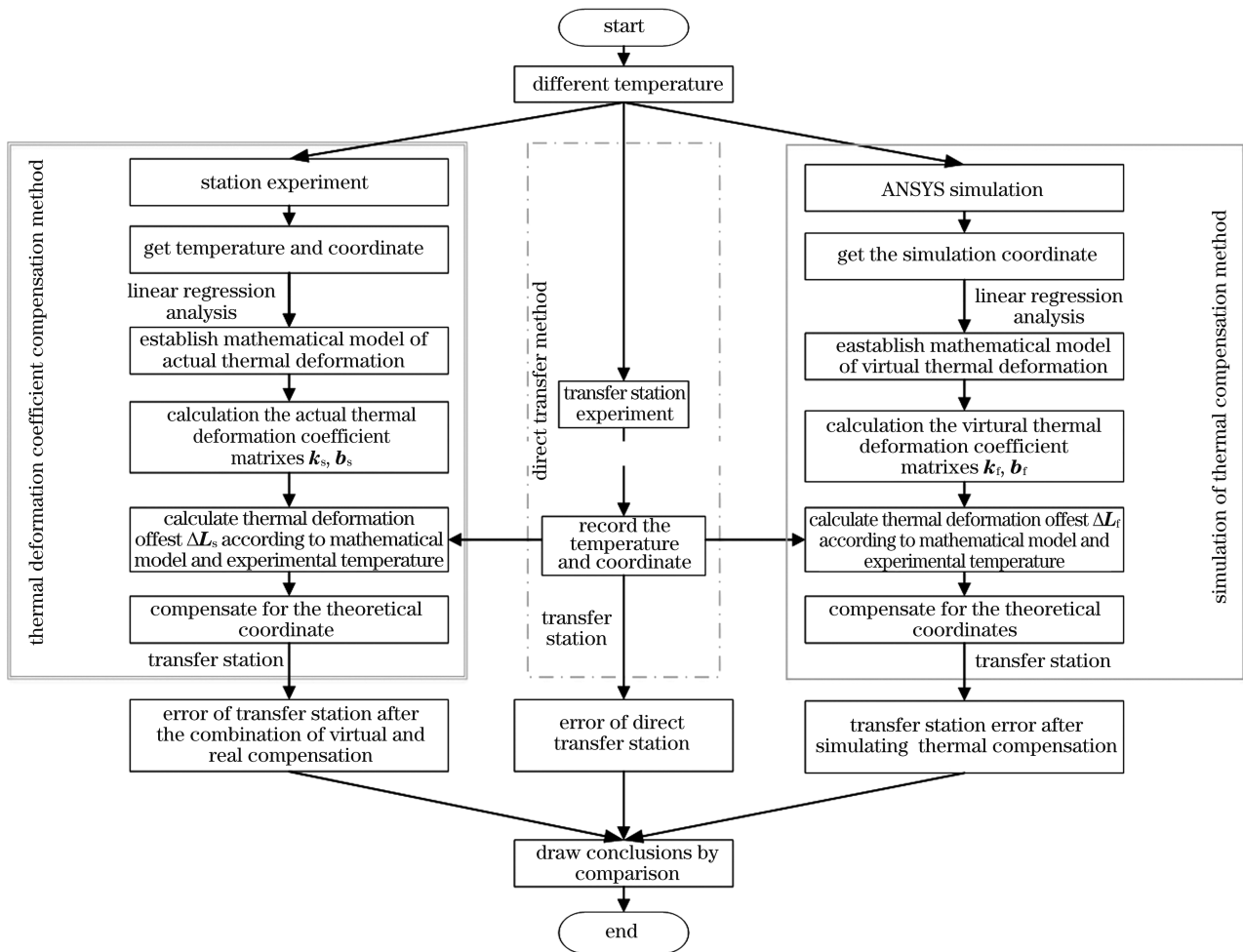


图 1 本方法的实验流程

Fig. 1 Experimental process of our method

3 数学模型的建立

3.1 转站误差

在大尺寸测量过程中,仪器测量不确定度、温

度、湿度等因素会引起公共点之间的相对位置发生变化,导致转站时前后两站位的公共点无法对齐,产生转站误差。其中,温度变化对转站精度的影响最大,占转站总误差的 50% 以上^[8]。图 2 为热变形示

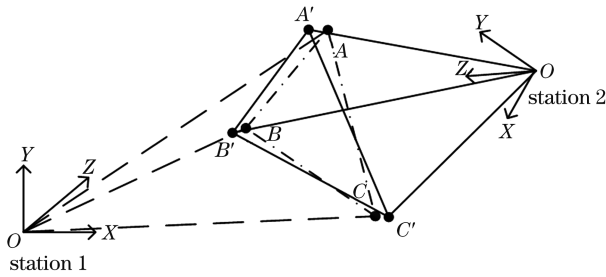


图 2 热变形示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the thermal deformation

意图,假设构件上有 3 个待测基准点,在站点 1 中,温度为 t_1 时,各点位置用 A, B, C 表示,对应坐标分别为 P_A, P_B, P_C ;在站点 2 中,温度为 t_2 时,各点位置用 A', B', C' 表示,对应坐标分别为 $P_{A'}, P_{B'}, P_{C'}$;点 A', B', C' 在站点 1 下的理论坐标为 $P'_{A'}, P'_{B'}, P'_{C'}$,可看作 P_A, P_B, P_C 偏移后的坐标值。以 $P'_{A'}$ 为例,可知

$$P'_{A'} = P_A + \Delta L, \quad (1)$$

式中, $\Delta L = (\Delta x_A, \Delta y_A, \Delta z_A)^T$ 为基准点在三个方向上的偏移量。若 $P'_{A'}, P'_{B'}, P'_{C'}$ 和 P_A, P_B, P_C 能实现完美对齐,则转站误差为 0。由于 ΔL 是未知量,无法获得 $P'_{A'}, P'_{B'}, P'_{C'}$ 的值,若直接将 $P_{A'}, P_{B'}, P_{C'}$ 与 P_A, P_B, P_C 对齐,会存在较大的转站误差。因此,求解 ΔL 是提高转站精度的关键。

站点 1 与站点 2 之间,构件沿径向方向的热变形偏移量 Δl 与温度变化量的关系可表示为

$$\Delta l / R_0 = \alpha (t_2 - t_1), \quad (2)$$

$$\Delta l = \alpha R_0 \Delta t, \quad (3)$$

式中, α 为被测件的热膨胀率, R_0 为标准环境 (20°C) 下试样的标定尺寸, Δt 为站点 1 和站点 2 间的温度变化量。由于大尺寸测量实验过程中温度的变化范围较小 ($18 \sim 41^\circ\text{C}$),热膨胀率 α 保持不变,则可将 (3) 式写为

$$\Delta l = k \Delta t, \quad k = \alpha R_0, \quad (4)$$

式中, k 为常数,表示热变形系数。显然,对于大曲率构件,沿径向方向的热变形偏移量与温度变化呈

线性关系。

综上所述,在三维测量坐标系下,构件上基准点的热变形偏移量 ΔL 可分解为沿 X, Y, Z 三方向的基准点热变形偏移量,即 $\Delta L = (\Delta x_A, \Delta y_A, \Delta z_A)^T$,而三维测量坐标系下的热变形系数 $k = (k_x, k_y, k_z)^T$,则

$$(\Delta x_A, \Delta y_A, \Delta z_A)^T = (k_x, k_y, k_z)^T \Delta t. \quad (5)$$

可以发现,变曲率工件上基准点沿 X, Y, Z 三方向的热变形偏移量与温度变化量 Δt 存在线性关系。

3.2 热变形系数补偿法的数学模型

热变形系数 k 为包含 X, Y, Z 三方向的向量,且 k 随测量坐标系的变化而变化,而求解每个站位的 k 显然是不合理的。由于物理模型的全局坐标系不变,其 k 也是固定的,因此,可通过求解全局坐标系下的 k 进行基准点坐标偏移量补偿。为了避免多站位导致的转站误差,在单个站位、多个温度下测量构件,获取温度和基准点坐标数据。如在图 2 中,设站点 1 为全局坐标系,站点 2 为单站位实验的测量坐标系。单站位实验共记录 $n+1$ 组温度和坐标数据,将最接近室温 (20°C) 的 1 组数据记为初始温度 t_0 和初始坐标 $M_{0i} = (x_{0i}, y_{0i}, z_{0i})^T$ 。将其他数据的温度由低到高依次记为 t_1, t_2, \dots, t_n ;与温度对应的坐标点分别为 $M_{1i}, M_{2i}, \dots, M_{ni}$ 。通过 ANSYS 软件仿真时,设置初始温度为 t_0 ,确保模型所处温度与初始温度相同,仿真得到的各点坐标为 $P_i = (x_{pi}, y_{pi}, z_{pi})^T$ 。将初始坐标 M_{0i} 与物理模型上各基准点的坐标 P_i 代入转站对齐最小二乘公式中^[5],得到

$$\min(E) = \min \sum_{i=1}^N \| R_0 M_{0i} + T_0 - P_i \|^2, \quad (6)$$

式中, R_0 为旋转矩阵, T_0 为平移矩阵,转站误差为转站后两坐标系下对应点之间的距离, E 为转站误差的平方和。假设站点 2 先绕 X 轴转动角度 α ,然后绕 Y 轴转动角度 β ,最后绕 Z 轴转动角度 γ ,再分别沿 X, Y, Z 方向平移一定距离 t_x, t_y, t_z 后,使 E 最小,则 R_0, T_0 可表示为

$$R_0 = R(\gamma)R(\beta)R(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \cos \alpha & \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha \\ \sin \gamma \cos \beta & \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha & \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha - \cos \gamma \sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$T_0 = [t_x \quad t_y \quad t_z]^T, \quad (8)$$

式中, $R(\alpha), R(\beta), R(\gamma)$ 分别为绕 X, Y, Z 轴的旋转矩阵。采用奇异值分解法,解得转站参数 R_0, T_0 ,

然后依次将各温度下的点坐标代入 (6) 式^[2],从而将测量坐标系的点坐标转换到全局坐标系下,可表示为

$$\mathbf{M}'_{ni} = \mathbf{R}_0 \mathbf{M}_{ni} + \mathbf{T}_0, \quad (9)$$

式中, \mathbf{M}'_{ni} 为基准点由测量坐标系转换到全局坐标系下的坐标。全局坐标系下不同温度的基准点偏移量可表示为

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{L}_{ni} = \mathbf{M}'_{ni} - \mathbf{M}'_{0i} \\ \Delta t_n = t_n - t_0 \\ \Delta \mathbf{L}_i = [\Delta \mathbf{L}_{1i}, \Delta \mathbf{L}_{2i}, \dots, \Delta \mathbf{L}_{ni}] \\ \Delta \mathbf{t} = [\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n] \end{cases}, \quad (10)$$

式中, $\Delta \mathbf{L}_{ni}$ 为第 n 个温度下第 i 个基准点的坐标偏移量, Δt_n 为第 n 个温度变化量, $\Delta \mathbf{L}_i$ 为第 i 个基准点 n 个温度下变形量 $\Delta \mathbf{L}_{ni}$ 的集合, $\Delta \mathbf{t}$ 为温度变化量 Δt_n 的集合。采用线性回归分析建立温度变化量与基准点坐标偏移量的数学模型, 可表示为

$$\Delta \mathbf{L}_i = \mathbf{k}_{si} \Delta \mathbf{t} + \mathbf{b}_{si}, \quad (11)$$

式中, 下标 s 为实际测量结果, $\mathbf{k}_{si} = (k_{xi}, k_{yi}, k_{zi})^T$ 为第 i 个基准点的全局坐标系热变形系数, $\mathbf{b}_{si} = (b_{xi}, b_{yi}, b_{zi})^T$ 为常数向量。由各点热变形系数组成的集合记为 \mathbf{k}_s 和 \mathbf{b}_s , 可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_s &= [\mathbf{k}_{s1}, \mathbf{k}_{s2}, \dots, \mathbf{k}_{sn}] \\ \mathbf{b}_s &= [\mathbf{b}_{s1}, \mathbf{b}_{s2}, \dots, \mathbf{b}_{sn}] \end{aligned} \quad (12)$$

基于解算的 \mathbf{k}_s 、 \mathbf{b}_s 可对后续实验进行转站误差补偿, 假设转站实验测量温度与全局坐标系下测量

温度之间的变化量为 Δt , 则基准点的热变形偏移量可表示为

$$\Delta \mathbf{L}_s = \mathbf{k}_s \Delta \mathbf{t} + \mathbf{b}_s, \quad (13)$$

式中, $\Delta \mathbf{L}_s$ 为由基准点偏移量组成的矩阵。设全局坐标系下基准点的坐标为 \mathbf{F}_i , 各点坐标的集合为矩阵 \mathbf{F} , 转站测量时测得的基准点坐标为 \mathbf{M}_i , 其集合为矩阵 \mathbf{M} , 则

$$\mathbf{F}' = \mathbf{F} + \Delta \mathbf{L}_s, \quad (14)$$

式中, \mathbf{F}' 为 \mathbf{F} 经过热变形偏移补偿后的坐标矩阵, 将补偿后基准点的坐标记为 \mathbf{F}'_i 。将 \mathbf{M} 和 \mathbf{F}' 代入 (6) 式, 得到补偿后的转站参数 \mathbf{R}_s 、 \mathbf{T}_s , 则各基准点的转站误差 e_{si} 可表示为

$$e_{si} = \|\mathbf{R}_s \mathbf{M}_i + \mathbf{T}_s - \mathbf{F}'_i\|. \quad (15)$$

4 实验结果及分析

4.1 仿真模拟

通过 ANSYS 软件对大型变曲率构件进行热变形仿真分析, 首先在 ANSYS 软件中导入被测大曲率变形构件的物理模型及物理参数, 如表 1 所示。再导入实际测量的温度, 对工件进行热稳态分析, 仿真坐标系及变曲率构件上各基准点的编号如图 3(a) 所示, 图 3(b) 为仿真分析的结果。

表 1 被测件的物理参数

Table 1 Physical parameters of the tested part

Material	Mass density / (kg · m ⁻³)	Poisson's ratio	Expansion coefficient	Elastic modulus / GPa
Al alloy	2770	0.33	2.3	71

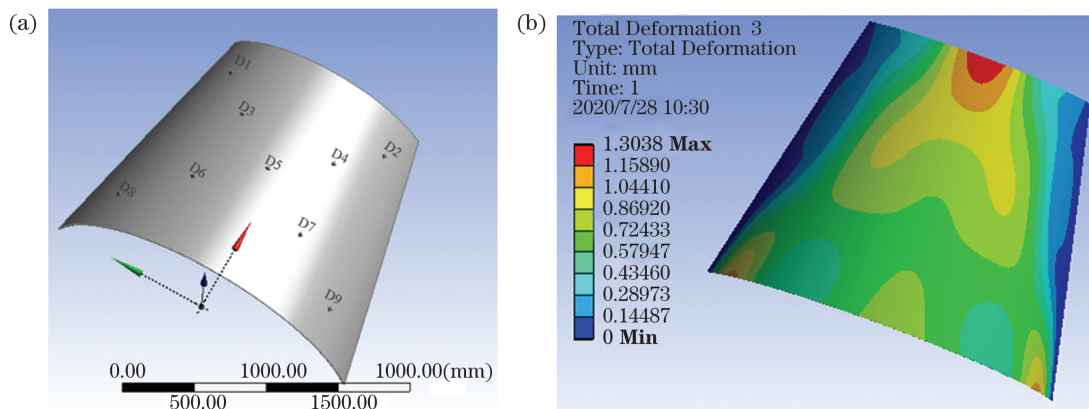


图 3 仿真模型。(a) 基准点的编号; (b) 仿真分析的结果

Fig. 3 Simulation model. (a) Number of reference point; (b) result of the simulation analysis

变曲率构件关于 XZ 面对称, 即 XZ 面左侧点与右侧点在 X 轴、Z 轴方向仿真的偏移量大小相等、方向相同、正负同号, 但在 Y 轴方向大小相

等、方向相反、正负异号。为方便数据处理, 只给出了 XZ 面左侧的点, 即 D1、D3、D5、D6、D8 的仿真偏差量。以 19.5 °C 的仿真数据作为初始温

度和初始坐标,用其他各点的温度、坐标减去初始温度和初始坐标,得到温度变化量和仿真偏移

量(沿 X、Y、Z 方向的分量 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ)如图 4 所示。

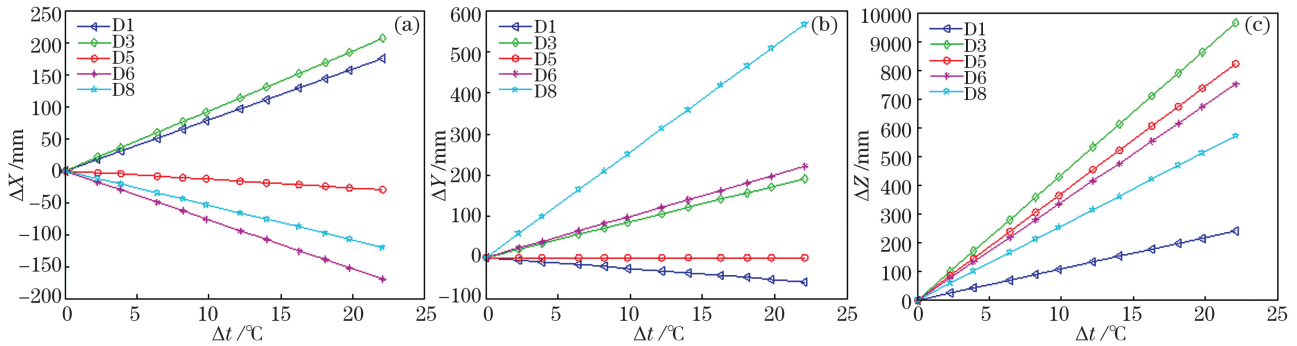


图 4 基准点在不同方向的热变形偏移量。(a) X 轴;(b) Y 轴;(c) Z 轴

Fig. 4 Thermal deformation offsets of the reference point in different directions. (a) X-axis; (b) Y-axis; (c) Z-axis

图 4 中基准点不同方向的热变形偏移量与温度变化量 Δt 满足线性关系,可表示为

$$\Delta L_f = k_f \Delta t$$

$$k_f = (k_x, k_y, k_z)^T, \quad (16)$$

式中, ΔL_f 为各点仿真偏移量矩阵, k_x 、 k_y 、 k_z 分别为仿真热变形系数 k_f 在 X、Y、Z 方向的分量, k_f 为基准点仿真热变形系数矩阵,可表示为

$$k_f = \begin{bmatrix} 7.948 & 7.948 & 9.343 & 9.343 & -1.354 & -7.657 & -7.657 & -5.409 & -5.409 \\ -2.693 & 2.693 & 8.683 & -8.683 & 0 & 10.027 & -10.027 & 25.712 & -25.712 \\ 10.905 & 10.905 & 43.707 & 43.707 & 37.275 & 34.034 & 34.034 & 25.877 & 25.877 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

4.2 实验测量

实验测量的对象为变曲率曲面构件,构件实物如图 5 所示。测量仪器主要包括 FARO 公司生产的激光跟踪仪(型号为 Vantage Laser Trackers)和深圳中科传感科技有限公司生产的 FBG 温度传感器(型号为 Acrylate SMF-28e)。由于 FBG 温度传感器需要粘贴在被测件表面,且实验温度变化范围较小(20 °C 左右),因此用 20 °C 室温下,中心波长为 1.54 μm 、灵敏度为 11.4 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ 以及中心波长为 1.33 μm 、灵敏度为 9.4 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ 的两根裸 FBG 作为温度测量仪器,裸光纤光栅如图 6 所示。

相比常用的套管结构 FBG 温度传感器,裸



图 5 变曲率构件的实物图

Fig. 5 Physical image of the variable curvature workpiece



图 6 FBG 的实物图

Fig. 6 Physical image of the FBG

FBG 具有易粘贴、常温下线性度高等优点。实验用双分子胶将两根 FBG 粘贴在构件前后两端,两根 FBG 通过耦合器串联在一起。光栅的一端通过光纤与解调仪连接,解调仪内置解调算法可将光栅的反射中心波长变化量转为温度变化量 Δt ^[9-10]。实验结果显示,两光栅测量结果的差不超过 0.1 °C,这表明同一时刻构件处于均匀温度场中。通过重复测量(10 次)并取平均值的方法减小测量时随机误差的影响,第 n 个测量温度下、第 i 个测量点的坐标平均值可表示为

$$M_{ni} = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} M_{nik}, \quad (18)$$

式中, M_{nik} 为第 n 个测量温度下、第 i 个点第 k 次的测量坐标。实验共记录了 12 组坐标及温度,记为数

据集 A。以 19.5 °C 作为初始温度 t_0 ，得到初始坐标 M_{0i} 并解算温度变化量 Δt 和基准点偏移量 ΔL_s ，图 7(a) 为 X 轴方向热变形偏移量随温度变化的曲线，计算得到 $\Delta t = 2.3, 3.9, 6.4, 8.2, 9.8, 12.2, 14, 16.3, 18.1, 19.8, 22.1$ °C。

图 7(b) 为 D1 点各轴向偏移量的仿真及实测对

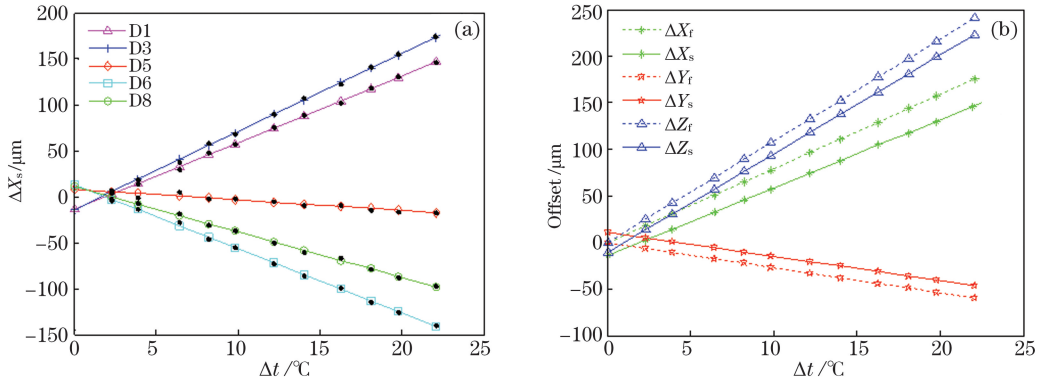


图 7 基准点的偏移量。(a) X 轴方向的偏移量；(b) D1 点的仿真及实测偏移量

Fig. 7 Offset of the reference point. (a) Offset in the X-axis direction; (b) simulation and measured offsets of the point D1

可以发现，实际测量过程中，变曲率构件的热变形出现了滞后性，拟合的直线不过原点。当温度变化较小时，其变形量几乎为 0；随着温度变化量的增大，温度与基准点偏移量的线性关系越来越明显。

比结果，结合(10)式、(11)式，解算出 D1 在 X、Y、Z 轴的线性拟合方程为

$$\begin{cases} \Delta X_{s1} = 7.0\Delta t - 9.6 \\ \Delta Y_{s1} = -2.37\Delta t + 7.6 \\ \Delta Z_{s1} = 10.3767\Delta t - 7.4 \end{cases} \quad (19)$$

实验结果表明，变曲率构件上各基准点实际偏移量 ΔL_s 均满足

$$\Delta L_s = k_s \Delta t + b_s, \quad (20)$$

对数据集 A 处理后得到的 k_s 、 b_s 可表示为

$$k_s = \begin{bmatrix} 7.00 & 7.00 & 8.23 & 8.23 & -1.00 & -6.75 & -6.75 & -4.72 & -4.72 \\ -2.37 & 2.37 & 7.80 & -7.80 & 0 & 9.00 & -9.00 & 23.29 & -23.29 \\ 10.38 & 10.38 & 41.83 & 41.83 & 35.66 & 32.55 & 32.55 & 24.72 & 24.72 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$b_s = \begin{bmatrix} -9.6 & -9.6 & -9.7 & -9.7 & 5.7 & 9.4 & 9.4 & 7.7 & 7.7 \\ 7.6 & -7.6 & -10.2 & 10.2 & 0.5 & -10.3 & 10.3 & -14.5 & 14.5 \\ -7.4 & -7.4 & -13.8 & -13.8 & -12.9 & -12.4 & -12.4 & -11.2 & -11.2 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

4.3 仿真与实测结果对比

对比分析仿真与实际测量结果可知， ΔL_s 与 ΔL_f 之间满足

$$\Delta L_s = k \Delta L_f + b_s, \quad (23)$$

式中， $k = k_s / k_f$ ，即各基准点实际偏移量与热变形仿真偏移量满足线性关系。因此，可将实际偏移量看作仿真偏移量的线性变换。相关系数 r 可以反映变量之间的相关性，可表示为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (24)$$

式中， X_i, Y_i 为两组变量中的第 i 个值， \bar{X}, \bar{Y} 为两组变量的平均值。将 D1、D3、D5、D6、D8 点的实际

偏移量 ΔL_s 与仿真偏移量 ΔL_f 作为两组变量代入 (23) 式中，计算得到 D1、D3、D5、D6、D8 点 ΔL_s 与 ΔL_f 的相关系数 $r = 0.965, 0.980, 0.982, 0.971, 0.959$ ，均接近 1，这表明实际测量结果与仿真结果的相关性较好，且变化趋势几乎相同。

5 转站验证

5.1 均匀温度场转站实验

为了验证新型热变形系数补偿方法的有效性，设计了多站位转站实验，通过实验获取多组温度和基准点坐标，并对每个站位下的基准点坐标分别进行直接转站、仿真热补偿后转站、热变形系数补偿后转站，再对比分析三种方法的转站误差。实验共包括 M1、M2、M3、M4、M5 五个站位，每个站位均记

录图 3 中 9 个转站点的坐标,实验数据记为数据集 B。将 M1 站位设为全局坐标系,分别让 M2、M3、M4、M5 与 M1 站位进行直接转站、仿真热变形补偿转站、热变形系数法补偿转站。进行仿真热变形补偿转站、热变形系数法补偿转站前,需先将 M1 站位的点坐标转换到全局坐标系下,得到全局坐标系下 M1 站位各点的坐标。实验测得各站位下的温度: $t_1 = 19.7\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $t_2 = 23.5\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $t_3 = 26.1\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $t_4 =$

$28.8\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $t_5 = 33.2\text{ }^\circ\text{C}$ 。根据(9)式~(13)式可解算出各站位基准点,图 8 为 M5 转 M1 站位时各点的转站误差。其中, e_i 为转站误差, e_{ix} 、 e_{iy} 、 e_{iz} 分别为 e_i 在 X、Y 和 Z 轴的偏移量分量, e_{fi} 为仿真热补偿法的转站误差, e_{si} 为热变形系数法的转站误差。可以发现, M1、M5 两站位之间存在数百微米的转站误差,且温度变化量相同的情况下, Z 轴上各点的偏移量最大。

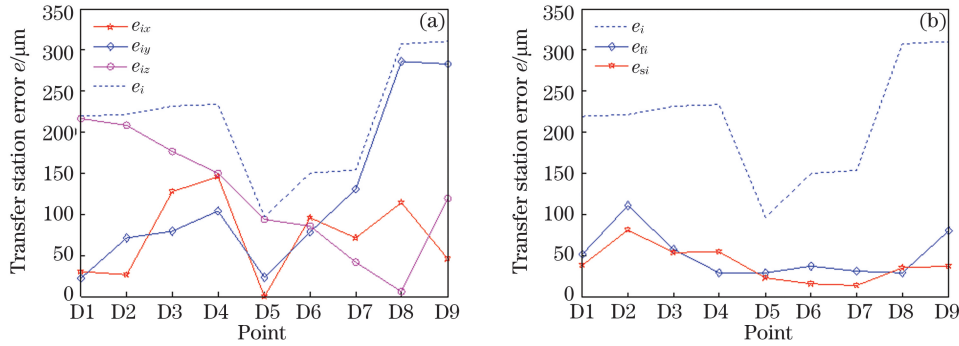


图 8 不同站点的转站误差。(a)直接转站误差;(b)不同转站方式的误差

Fig. 8 Transfer errors of different stations. (a) Error of the direct transfer; (b) errors of different transfer methods

图 8(b)为 M5 转 M1 站位时三种不同转站方式下的转站误差,可以发现,直接转站过程中, D5 点处在构件中心位置,转站误差约为 $100\text{ }\mu\text{m}$;通过仿真补偿和热变形系数补偿后,所有转站点的转站误差均有大幅减小。以 D5 为例,经过两种方式补偿后, D5 的转站误差减小到 $50\text{ }\mu\text{m}$ 以下。表 2 为实验得到的 4 次转站误差,其中, $\text{Max}(e)$ 、 $\text{Max}(e_f)$ 和 $\text{Max}(e_s)$ 、 $\text{Sum}(e)$ 、 $\text{Sum}(e_f)$ 和 $\text{Sum}(e_s)$ 分别为多个站位经直接转站、仿真补偿转站和热变形系数补偿转站时的最大误差、总误差; R_{fa} 、 R_{sa} 分别为仿真补偿最大点误差、热变形系数补偿最大点误差与直接转站最大点误差的相对减少比值; R_f 、 R_s 分别为仿真补偿总误差、热变形系数补偿总误差与直接转站总误差的相对减少比值,可表示为

$$\begin{aligned}
 R_{fa} &= \frac{\text{Max}(e) - \text{Max}(e_f)}{\text{Max}(e)} \times 100\% \\
 R_{sa} &= \frac{\text{Max}(e) - \text{Max}(e_s)}{\text{Max}(e)} \times 100\% \\
 R_f &= \frac{\text{Sum}(e) - \text{Sum}(e_f)}{\text{Sum}(e)} \times 100\% \\
 R_s &= \frac{\text{Sum}(e) - \text{Sum}(e_s)}{\text{Sum}(e)} \times 100\%
 \end{aligned} \quad (25)$$

可以发现,随着温度变化量的增大,直接转站和仿真补偿后转站的误差都在不断增加, Δt 从 $3.8\text{ }^\circ\text{C}$ 变化到 $13.5\text{ }^\circ\text{C}$ 时,直接转站的总误差由 $491\text{ }\mu\text{m}$ 增

表 2 不同方法补偿后的转站结果

Table 2 Transfer results after compensation by different methods

Station	M2→M1	M3→M1	M4→M1	M5→M1
$\Delta t / ^\circ\text{C}$	3.8	6.4	9.1	13.5
$\text{Max}(e) / \mu\text{m}$	80.0	137.5	209.8	310.4
$\text{Max}(e_f) / \mu\text{m}$	38.8	61.0	77.6	111.3
$\text{Max}(e_s) / \mu\text{m}$	22.7	38.2	52.3	81.2
$R_{fa} / \%$	51.5	55.6	63.0	64.1
$R_{sa} / \%$	71.6	72.2	75.1	73.8
$\text{Sum}(e) / \mu\text{m}$	491.4	852.8	1274.7	1924.9
$\text{Sum}(e_f) / \mu\text{m}$	178.8	278.2	309.7	458.8
$\text{Sum}(e_s) / \mu\text{m}$	95.7	170.3	218.0	352.7
$R_f / \%$	63.6	67.4	75.7	76.2
$R_s / \%$	80.5	80.0	82.9	81.7

加至 $1952\text{ }\mu\text{m}$,相比直接转站,仿真补偿和热变形系数补偿后的转站误差有大幅度减小,但随着温度变化量的增大,其转站误差也在不断增加。经过仿真补偿后, M2 转 M1 站位的总误差减少了 63.6% , M3 转 M1 的总误差减少了 67.4% , M4 转 M1 的总误差减少了 75.7% ;对于温差最大的 M5 与 M1 站位,直接转站时的总误差达到 $1925\text{ }\mu\text{m}$,仿真补偿可将总误差缩小至 $459\text{ }\mu\text{m}$,减少了 76.2% 。相比仿真补偿方法,热变形系数补偿后的转站精度更高,在 M5 转 M1 站位时,总误差仅为 $352.7\text{ }\mu\text{m}$ 。对于

M2 转 M1 站位,热变形系数补偿后总误差减少了 80.5%,M3 转 M1 时的总误差减少了 80%,M4 转 M1 时的总误差减少了 82.9%,M5 转 M1 时的总误差减少了 81.7%。仿真热补偿后,4 次转站的最大点误差比未补偿时减少 50%~65%,总体转站精度提高了 63%~76%。经热变形系数补偿后,4 次转站的点误差比未补偿时均减少 70%以上,总体转站精度平均提高 81.28%。

5.2 非均匀温度场的转站实验

为了模拟大尺寸空间装配现场的非均匀温度场分布情况,通过人为加温操作改变实验场内的温度分布状态,模拟局部范围内温度场分布不均的情况,并在上述 9 个基准点附近粘贴 FBG 温度传感器,以

监测基准点处的实时温度。用激光跟踪仪测量 9 个点的坐标及其温度,各点坐标集合记为 M6,各点温度集合记为 T6。以 M1 站位作为对齐目标,M1 站位的温度 $t_1=19.7\text{ }^\circ\text{C}$,M1、M6 各点坐标及 t_6 的温度数据如表 3 所示,根据表 3 的数据可进行转站误差的计算。首先,将 M1 与 M6 直接进行转站对齐,获得直接转站误差,记为 e_i ;然后,将 M1 转换到全局坐标系下,分别根据仿真热变形系数和实验热变形系数计算温度从 t_1 升至 t_6 时各点的热变形偏移量,并对全局坐标系下的 M1 进行补偿。将仿真补偿和热变形系数补偿后的结果分别与 M6 进行对齐,得到仿真补偿转站误差 e_{fi} 和热变形系数补偿转站误差 e_{si} ,如表 4 所示。

表 3 实验测量数据

Table 3 Date of the experimental measurement

Point	M1			$t_1/^\circ\text{C}$	M6			$t_6/^\circ\text{C}$
	X/mm	Y/mm	Z/mm		X/mm	Y/mm	Z/mm	
D1	3514.374	-834.94	-722.189	19.7	1829.876	1500.231	-728.182	23.5
D2	2351.999	-492.782	-724.254		2961.833	1932.464	-727.186	25.5
D3	3361.72	-476.897	-486.847		2167.471	1308.338	-491.105	27.4
D4	2673.413	-274.29	-488.175		2837.833	1564.298	-490.580	29.7
D5	3102.173	-87.686	-352.824		2609.409	1156.213	-355.169	34.2
D6	3593.193	80.431	-376.340		2320.699	724.836	-379.065	29.8
D7	2780.36	319.77	-377.812		3112.419	1027.007	-378.565	27.7
D8	4072.565	251.791	-592.493		2043.82	297.658	-595.569	25.8
D9	2471.164	723.275	-595.400		3603.658	893.059	-594.389	24.0

表 4 非均匀温度场的转站误差

Table 4 Transition error of the non-uniform temperature field

unit: μm

Point	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
e	214	155	82	172	265	106	84	166	163
e_{fi}	23	56	55	71	38	64	62	33	36
e_{si}	18	60	30	41	31	39	53	24	38

可以发现,直接转站时的转站误差极大,总误差为 $1409\text{ }\mu\text{m}$;经仿真热补偿和热变形系数法补偿后,各点的转站误差均有大幅降低,总误差分别降为 $438\text{ }\mu\text{m}$ 和 $334\text{ }\mu\text{m}$ 。这表明在非均匀温度场下经热变形系数补偿后能明显提高转站精度,且效率远高于仿真补偿法。

6 结 论

提出了一种新的大尺寸转站测量热变形误差补偿方法,首先,根据实验测量的温度与基准点坐标,建立了温度变化与基准点偏移量之间的数学关系。然

后,用 ANSYS 软件建立了仿真热变形误差补偿数学模型。通过对比实验测量数据与仿真数据,验证了仿真基准点变形量和实验基准点变形量的一致性。最后,根据热补偿数学模型,反推温度变化时基准点的偏移量,并对不同温度下的基准点坐标误差进行补偿。实际转站实验结果表明,相比未补偿情况,热变形系数补偿法可使均匀温度场和非均匀温度场下的转站精度分别提高 81.28%和 76.26%,远高于仿真补偿的结果,进一步证明了热变形系数补偿法对转站精度的提升作用。

参 考 文 献

- [1] Chang Y N. Research of registration parameter calibration and data fusion technology for large scale measurement field[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018.
常晏宁. 大尺寸测量场转站参数标定及数据融合技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [2] Yang B L, Yu C J, Jin Z J, et al. Thermal deformation error modeling and compensation approach for laser tracker orientation [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(9): 3155-3164.
杨宝旒, 俞慈君, 金涨军, 等. 激光跟踪仪转站热变形误差建模与补偿方法[J]. *航空学报*, 2015, 36(9): 3155-3164.
- [3] Ren Y, Liu F F, Fu Y X, et al. Placement optimization of laser multilateration network [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011201.
任瑜, 刘芳芳, 傅云霞, 等. 激光多边测量网布局优化研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 011201.
- [4] Zhang X, Hou M S, Liu Z C, et al. Surface reconstruction algorithm of plate-shell structure based on fiber Bragg grating sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 090603.
张旭, 侯茂盛, 刘智超, 等. 基于光纤布拉格光栅传感器的板壳结构曲面重构算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(9): 090603.
- [5] Li T, Li J S, Miao D J, et al. Study of temperature states influence on the accuracy of large size measuring devices [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2019, 40(6): 975-979.
李婷, 李建双, 缪东晶, 等. 温度条件对大尺寸测量装置精度影响的研究[J]. *计量学报*, 2019, 40(6): 975-979.
- [6] Mian N S, Fletcher S, Longstaff A P, et al. Efficient estimation by FEA of machine tool distortion due to environmental temperature perturbations [J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(2): 372-379.
- [7] Miao E M, Gong Y Y, Dang L C, et al. Temperature-sensitive point selection of thermal error model of CNC machining center[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 74(5/6/7/8): 681-691.
- [8] Luo T. Research on thermal deformation error compensation technology of laser tracker orientation in non-uniform temperature field [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
罗涛. 非均匀温度场中激光跟踪仪转站热变形误差补偿技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [9] Chen Y, An W Y, Liu H L, et al. Detection method using FBG sensing signal to diagnose rolling bearing fault[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1104004.
陈勇, 安汪悦, 刘焕淋, 等. 利用 FBG 传感信号诊断滚动轴承故障的检测方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1104004.
- [10] Lin H T, Zhang L, Liu X, et al. Research on dynamic characteristics of temperature sensing based on loop ring-down cavity with FBG[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1006003.
林洪太, 张丽, 刘欣, 等. FBG 环形衰荡腔的温度传感动态特性研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1006003.

Method for Compensating Thermal Deformation Error in Transfer Station of Variable Curvature Workpiece

Li Zhuyue, Hou Maosheng*, Liu Zhichao, Li Lijuan

School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract

Objective Large-size measurements are usually accomplished through multistation measurements. The accuracy of the instrument, environmental vibration, temperature change, and other factors severely affect the accuracy of the transfer station. To improve the accuracy of large-size measurements, many scholars have conducted extensive research on large-size measurement errors and proposed numerous compensation methods to achieve the accuracy of large-size measurements. However, most compensation methods compensate for the measurement errors by reducing the measurement errors. Moreover, research on the effect of temperature on the measurement results is relatively rare. In fact, the error caused by changes in temperature has severe impacts on the measurement accuracy. Additionally, the experimental steps of most temperature compensation methods are complicated, the

model is difficult to solve, and the research object is a regular rectangular or wedge-shaped tooling structure; these disadvantages limit the application of such methods. No study has discussed the characteristics of the variable curvature workpiece, owing to which these compensations exhibit strong limitations in improving the accuracy of large-size transfer stations. To ensure the manufacturing and assembly accuracy of large-size variable curvature components on the actual site and decrease the large-scale measurement cycle, a new method for compensating thermal deformation errors of large-scale transfer stations is proposed and numerous related experiments are designed. Experimental results show that the proposed method can effectively improve the transfer accuracy of large-scale measurements.

Methods The new method for compensating thermal deformation errors of large-size transfer stations is a universal method. First, several temperature values and reference point coordinates are obtained using the fiber Bragg grating temperature sensor and laser tracker. Then, all the measured coordinates are converted into the global coordinate system using the station alignment method and the changes in temperature at different stations are calculated. Next, the linear regression analysis method is used to establish a mathematical model between the thermal deformation of the reference point and the change in temperature using these recorded experimental data. The linear regression analysis method is also used to calculate the thermal deformation coefficient matrix in the global coordinate system. Then, ANSYS is used to simulate the thermal deformation. The comparison and analysis of the simulated thermal deformation offset data of the reference point with the offset obtained using the measurement confirm the consistency of the two trends. Finally, the coordinates of the reference point in the subsequent measurements are obtained using the mathematical model of thermal deformation offset established using the following compensation method: the compensated theoretical coordinates are aligned with the actual measured values for the transfer station and the transfer station error caused by thermal deformation is compensated during the measurement of the large-size variable curvature transfer station.

Results and Discussions To verify that the proposed method for compensating thermal deformation errors of the large-size transfer station can improve the accuracy of the transfer station, multiple sets of uniform temperature field transfer station experiments are designed. According to the transfer results (Table 2), after the simulation thermal compensation, the maximum point error of the four transfers is reduced by 50%–65% compared with the uncompensated one. Moreover, the overall transfer accuracy is improved by 63%–76%. After the thermal deformation coefficient compensation, the maximum point error of the four transfers is reduced by more than 70% compared with the uncompensated one. Additionally, the overall transfer accuracy is increased by more than 80%. Subsequently, a nonuniform temperature field experiment is designed. According to the error table of the nonuniform temperature field transfer station (Table 4), the transfer station error formed when directly transferred to the station is extremely large, with a total error of 1409 μm . After the compensation, the transfer station error is reduced by 68.87%. After the thermal deformation coefficient compensation, the transfer station error is reduced by 76.26%. These results can be observed more intuitively using the error map of the nonuniform temperature field transfer station (Fig. 9). After the compensation, the transfer error of each point is considerably reduced. The above experimental results show that after the thermal deformation coefficient compensation, the accuracy of the transfer station is considerably improved and the efficiency is significantly higher than that of the simulation compensation method.

Conclusions This work proposes a new method for compensating thermal deformation errors of large-size transfer stations. Based on the experimentally measured temperature and reference point coordinates, the mathematical relationship between changes in temperature and reference point offsets is established; then, ANSYS is applied to component physics. The model is simulated, and a mathematical model for thermal deformation error compensation is established. By comparing the experimental measurement data with the finite element simulation data, the consistency between the deformation of the simulation and experimental reference points is confirmed. Finally, according to the thermal compensation mathematical model, the reference point offset when the temperature changes is reversed and the difference between the reference point coordinates under the influence of temperature is compensated. Furthermore, the actual transfer station experiment is designed and the proposed method is used to compensate the offset of the reference point coordinates measured in the uniform temperature field, improving the accuracy of the transfer station by 81.28%. This proves that the proposed method affects the temperature. The effectiveness and superiority of compensation are verified. Finally, the temperature of the experimental site is changed, large-size space assembly site is simulated, nonuniform temperature field measurement experiment is

conducted, and thermal deformation offset of the the reference point coordinates is compensated at different temperatures using the proposed method. The accuracy of the transfer station is improved by 76.26%, which is considerably higher than that of the simulation compensation. These findings confirm that the proposed method is beneficial for improving the accuracy of the transfer station and has important engineering practical significance for transfer station measurements of large-size variable curvature components.

Key words measurement and metrology; thermal deformation simulation; temperature compensation; transfer accuracy

OCIS codes 120.1880;120.3930;120.4630