

引文格式: 杨淑睿, 林嘉睿, 张辉, 等. 整体测量场精度评价方法研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(8): 121-129.

YANG Shurui, LIN Jiarui, ZHANG Hui, et al. Study on accuracy evaluation method for integral measurement field[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(8): 121-129.

整体测量场精度评价方法研究*

杨淑睿¹, 林嘉睿¹, 张辉², 史慎东¹, 滕明鑫¹, 杨凌辉¹

(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

2. 中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110034)

[摘要] 多基站整体测量场的构建是目前实现制造空间大尺寸三维测量最有效的手段,其精度评价对于保证测量结果的可靠性和测量任务规划的合理性都具有重要的意义。针对整体测量场精度评价过程中的多源观测数据融合问题,建立了以几何约束为核心的整体测量场数学模型,提出了以仪器观测测量不确定度、仪器位姿参数不确定度、目标点坐标不确定度为指标体系的整体测量场精度评价方法。根据测量结果的统计信息实现了仪器观测测量现场不确定度的快速准确评定;利用GUM法分析测量不确定度的传播过程,建立了仪器位姿参数不确定度和目标点坐标不确定度的评定方法;通过仿真试验和现场试验,验证了整体测量场精度评价方法的合理性。

关键词: 整体测量场; 精度评价; 测量不确定度; 误差分析; 大尺寸测量

Study on Accuracy Evaluation Method for Integral Measurement Field

YANG Shurui¹, LIN Jiarui¹, ZHANG Hui², SHI Shendong¹, TENG Mingxin¹, YANG Linghui¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. AVIC Shenyang Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Shenyang 110034, China)

[ABSTRACT] Multi-stations integral measurement field is currently the most effective method for large-scale 3D measurement in manufacturing plants. The accuracy evaluation of the method is of great significance for ensuring the reliability of measurement results and the rationality of measurement task planning. To fuse the multi-source observation data in the integral measurement field accuracy evaluation process, a model based on geometric constraints was established, and an accuracy evaluation method for integral measurement fields was proposed. Indicators such as instrument observation uncertainty, instrument pose parameter uncertainty, and point coordinate uncertainty were included in the accuracy evaluation method. Firstly, a rapid and accurate assessment of the instrument observation on-site uncertainty was implemented based on the statistical information of the measurement results. Then the uncertainty propagation process was analyzed using the method recommended in guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), and evaluation methods for the uncertainty of instrument pose parameters and target point coordinates were established. Finally, the rationality of the integral measurement field accuracy evaluation method was verified through simulation and on-site experiments.

Keywords: Integral measurement field; Accuracy evaluation; Measurement uncertainty; Error analysis;

Large-scale metrology

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.08.121

* 基金项目: 国家自然科学基金(52475567, 52127810); 天津市科技计划项目(22JCQNJC00900, 24ZXZSS00300)。

工业大尺寸精密测量是以航空航天产品为代表的大型装备数字化制造的基础技术手段,传统单站式测量已经无法满足其对精度和范围的要求^[1-4]。近年来,面向数模及任务的多源融合、多站分布、无缝高效的整体测量场方法发展迅速,以多类型测量仪器、不同测量对象空间分布的异构测量网络作为表现形式,通过仪器与目标点之间、不同仪器之间形成的几何约束关系,融合多源测量信息,统一解算出仪器的位姿参数及目标点的坐标,使测量系统具有更快的测量速度及更好的适应性^[5]。对整体测量场的精度评价可以保证测量结果的准确性与可靠性,同时还能对测量场的构建起到指导作用^[6-7]。

整体测量场中常见大尺寸测量仪器包括激光跟踪仪、室内空间测量定位系统(wMPS, iGPS)及摄影测量系统等。仪器的自身精度主要以仪器对目标点测量结果(即观测量)的不确定度体现,对测量场的整体精度具有重要影响,相关精度评价研究较为成熟。其中,美国机械工程师学会(ASME)、中国计量科学研究院等机构^[8-11]发布的标准或规范中包含了针对激光跟踪仪精度评价的内容。Hughes等^[12]利用测量网络的方法评价激光跟踪仪的性能,大幅提高了评价效率。Mueller^[13]、耿磊^[14]等工作空间测量定位系统的角度不确定度进行了评定。国家测绘局发布的近景摄影测量规范^[15]中包含了摄影测量系统的精度评价算法。但是这些评价方法多针对于仪器校准过程,无法在测量现场实现对仪器自身精度的快速验证。作为一个多观测量融合的测量系统,整体测量场精度评价不是单独仪器精度评价结果的简单组合,需要建立测量场观测量数据融合模型,研究全面客观的精度评价方法。

目前,已有研究者对特定类型仪器组合的测量系统进行了精度分析。Chen等^[16]在分析由iGPS和便携式扫描仪组合的测量系统时,分别对两种仪器的坐标测量结果进行了不确定度分析,但没有形成有效的组合系统精度评价方法。金涨军^[17]、葛成鹏^[18]、沈睿^[19]针对多站位激光跟踪仪形成的测量场,研究了目标点坐标不确定度、仪器位姿参数不确定度等指标的评价方法,较为全面地体现了测量场的整体精度性能。但这些测量系统仅使用单一类型的仪器,其测量模型及精度评价方法无法满足多类型测量仪器对于数据融合的需求。而对于基于异构网络的整体测量场构建研究多集中于测量数据处理算法^[20-21],缺乏适用于精度评价方法的多源观测数据融合模型。

本文基于空间几何约束关系,建立了以观测量为输入,仪器位姿参数及目标点坐标为输出的整体测量场数学模型。该模型根据坐标系转换约束和观测量约束建立输入输出映射关系,实现了多源观测量数据的融合。

针对建立的数学模型,提出了以仪器观测量不确定度、仪器位姿参数不确定度及目标点坐标不确定度为指标的整体测量场精度评价方法。一方面,研究基于测量结果统计信息的仪器观测量不确定度评价方法,将观测量不确定度评价过程与测量模型解算过程相结合,避免了大量的重复试验,实现了观测量现场精度的快速准确评价。另一方面,通过GUM法分析测量不确定度传播过程,建立了仪器位姿参数、目标点坐标不确定度的评定方法。综合仪器观测量不确定度、目标点坐标不确定度和仪器位姿参数不确定度的评定结果,基于现场测量数据全面评价了整体测量场的精度,丰富了整体测量场构建的理论体系。

1 整体测量场数学模型

如图1所示,整体测量场是由多类型的大尺寸测量仪器、布设在测量现场的目标点以及多类型的几何约束组成的多源融合测量系统。其中几何约束包括仪器与目标点之间形成的长度、角度及坐标等观测量约束,以及仪器与仪器之间的坐标系转换约束。常见仪器及其提供的观测量约束类型如表1所示。

以多类型几何约束为基础建立了整体测量场的数学模型,该模型可以用式(1)与图2描述。

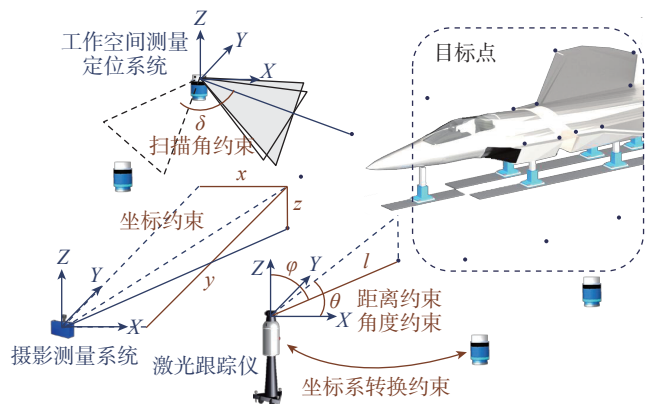


图1 整体测量场示意图

Fig.1 Schematic diagram of the integral measurement field

表1 常见测量仪器/系统及其观测量

Table 1 Common measuring instruments or systems and their observations and measurement

测量仪器及系统	观测量约束
激光跟踪仪 ^[22]	长度、水平角、垂直角
工作空间测量定位系统 ^[23-24]	扫描角
经纬仪 ^[25]	水平角、垂直角
摄影测量系统 ^[26]	X/Y/Z 坐标

$$h(C, P, O) = 0 \quad (1)$$

式中, h 为由各约束函数组成的向量; C 为仪器观测量向量, 属于模型的输入; P 和 O 分别为目标点坐标向量及仪器位姿参数向量, 属于模型的输出。

模型的输入 $c_{i,j,k}$ 是第 j 台仪器对第 i 个目标点的第 k 个观测量。常见的观测量包括水平角 θ 、垂直角 φ 、距离 l 、扫描角 δ , 以及坐标 x 、 y 、 z 。模型的输出包括目标点在全局坐标系下的坐标 $p_i(x_i, y_i, z_i)$ 以及不同仪器站位的位姿参数 $o_j(\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, t_{xj}, t_{yj}, t_{zj})$ 。

模型的映射关系为多类型的几何约束, 针对各类型仪器提供的观测量可分别构建以下观测量约束。

$$\begin{cases} h_1 = \theta - a \cos \frac{x_{j,i}}{\sqrt{x_{j,i}^2 + y_{j,i}^2}} \approx 0 \\ h_2 = \varphi - a \cos \frac{z}{\sqrt{x_{j,i}^2 + y_{j,i}^2 + z_{j,i}^2}} \approx 0 \\ h_3 = l - \sqrt{x_{j,i}^2 + y_{j,i}^2 + z_{j,i}^2} \approx 0 \\ h_4 = x - x_{j,i} \approx 0 \\ h_5 = y - y_{j,i} \approx 0 \\ h_6 = z - z_{j,i} \approx 0 \\ h_7 = [a \quad b \quad c \quad d] \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta & 0 & 0 \\ \sin \delta & \cos \delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{j,i} \\ y_{j,i} \\ z_{j,i} \\ 1 \end{bmatrix} \approx 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $(x_{j,i}, y_{j,i}, z_{j,i})$ 为第 i 个目标点在第 j 台仪器的局部坐标系下的坐标; a 、 b 、 c 、 d 为工作空间测量定位系统光平面的参数, 该参数属于仪器内参, 且在实际测量过程中数值保持稳定, 被视作常数。

根据目标点在不同仪器坐标系下的坐标及仪器的位姿参数形成了坐标系转换约束。

$$h = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R(\alpha_j, \beta_j, \gamma_j) & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{j,i} \\ y_{j,i} \\ z_{j,i} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

式中, (x_i, y_i, z_i) 为目标点在全局坐标系下的坐标; R 、 T 代表了仪器坐标系与全局坐标系之间的相对位姿关系, 由仪器位姿参数 $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, t_{xj}, t_{yj}, t_{zj}$ 根据式 (4) 和 (5) 计算得出。

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha_j \cos \beta_j & \cos \alpha_j \sin \beta_j \sin \gamma_j - \sin \alpha_j \cos \gamma_j & \cos \alpha_j \sin \beta_j \cos \gamma_j + \sin \alpha_j \sin \gamma_j \\ \sin \alpha_j \cos \beta_j & \sin \alpha_j \sin \beta_j \sin \gamma_j + \cos \alpha_j \cos \gamma_j & \sin \alpha_j \sin \beta_j \cos \gamma_j - \cos \alpha_j \sin \gamma_j \\ -\sin \beta_j & \cos \beta_j \sin \gamma_j & \cos \beta_j \cos \gamma_j \end{bmatrix} \quad (4)$$

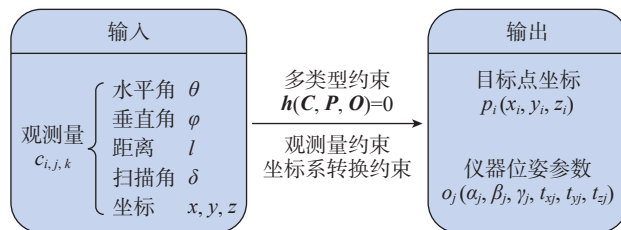


图2 整体测量场数学模型

Fig.2 Mathematical model of integral measurement field

$$T = [t_{xj} \quad t_{yj} \quad t_{zj}]^T \quad (5)$$

综上, 整体测量场的数学模型是一个以仪器对目标点的观测量为输入, 目标点坐标及仪器位姿参数为输出, 通过几何约束建立输入输出间映射关系的测量模型。

2 整体测量场精度评价方法

整体测量场的数学模型反映了精度评价问题中的多源观测数据融合过程。其中, 仪器观测量作为模型的输入, 目标点坐标及仪器位姿参数作为模型的输出, 其不确定度均能反应整体测量场的精度。在建立测量模型的基础上, 通过对测量结果进行统计分析, 结合模型解算过程, 可以实现仪器观测量现场不确定度的评定。根据数据融合过程中测量不确定度传播过程, 可以对仪器位姿参数、目标点坐标不确定度进行分析与评定。

2.1 仪器观测量不确定度评定方法

仪器对目标点的观测量作为测量模型的输入, 其不确定度的精确评定对整个测量系统的精度评价至关重要。将测量结果的统计分析 with 测量模型的解算相结合, 实现仪器观测量现场不确定度的评定算法。

式 (1) 所述测量模型的求解属于多约束优化问题, 求解过程需要选取合适的约束构建单目标优化方程。

在多类型的几何约束中, 观测量约束方程具有误差, 而坐标系转换约束方程不具有误差, 故仅将观测量约束作为优化目标的组成部分。同时, 由于部分目标点 (称作非公共点) 仅被单站位仪器测得, 形成的约束与其他约束不存在耦合关系, 解算结果不受其影响, 所以该类约束不参与单目标优化方程的构建。因此, 非线性优化的结果仅包含了公共点的坐标与仪器的位姿参数。

不同的仪器观测量具有不同的不确定度, 形成的约束强度也不相同, 需要为各约束赋予合适的权重。针对选取的约束构建的单目标优化方程可以用式 (6) 表示。

$$H = h^T W h \quad (6)$$

式中, W 为权矩阵, 体现了各约束函数的强度以及约束函数之间的相关性。

式(6)中选取的约束与观测量一一对应, 且仪器的各类观测量之间相互独立, 所以约束函数之间不存在相关性。根据最小二乘无偏估计原则, 每一个约束方程的权重应与该约束函数的不确定度成反比, 故式(6)可转换为

$$H = \sum_{i=1}^n \frac{h_i^2}{u_i} \quad (7)$$

式中, n 为约束函数的个数; h_i 为第 i 个约束函数; u_i 为约束函数的不确定度。该过程本质上属于归一化操作, 将角度、长度等不同量纲的函数值转化为无量纲的表达式。

经优化过程可得到式(2)中所包含的观测量约束函数残差。由于各个观测量以及对应的约束函数之间均相互独立, 所以可以根据残差和约束方程, 通过式(8)反解出观测量的偏差, 即

$$\delta c_{i,j,k} = \left[\frac{\partial h_{i,j,k}}{\partial c_{i,j,k}} \right]^{-1} \delta h_{i,j,k} = \left[\frac{\partial h_{i,j,k}}{\partial c_{i,j,k}} \right]^{-1} v_{i,j,k} \quad (8)$$

式中, $v_{i,j,k}$ 表示编号为 j 的仪器与编号为 i 的点构建的第 k 个约束函数经过非线性优化后的残差; $\delta c_{i,j,k}$ 表示编号为 j 的仪器与编号为 i 的点形成的第 k 个观测量的偏差; $h_{i,j,k}$ 表示编号为 j 的仪器与编号为 i 的点形成的第 k 个观测量的约束函数。

将观测量的偏差按照所属仪器及类型进行分类统计, 按式(9)即可求得仪器观测量不确定度。

$$u_{i,j,k}' = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\delta c_{i,j,k} - \overline{\delta c_{i,j,k}})^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\delta c_{i,j,k} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta c_{i,j,k})^2 \quad (9)$$

在构建单目标优化方程中, 约束方程的权重取决于观测量不确定度, 计算出新的观测量不确定度之后需要重新构建单目标优化方程并进行非线性优化求解。基于现场数据的仪器观测量不确定度评定算法流程如图3所示。

2.2 目标点坐标及仪器位姿参数不确定度评定方法

目标点坐标及仪器位姿参数作为测量模型的输出, 其不确定度主要来源于模型的输入, 即仪器观测量的不确定度。2.1节所述的观测量不确定度评定方法基于现场测量数据, 已经将现场环境等因素考虑在内, 故本节只研究观测量不确定度对目标点坐标及仪器位姿参数不确定度的影响。

公共点与非公共点坐标求解算法不同, 不确定度传

播过程也不同。其中, 公共点坐标与仪器位姿参数同为2.1节所述非线性优化过程的结果, 其不确定度及相关系数可以根据仪器观测量不确定度及参与非线性优化过程的约束方程(式(10))计算得到。

$$u_{[P,O]} = \frac{\partial [P,O]}{\partial C} u_c \left(\frac{\partial [P,O]}{\partial C} \right)^T \quad (10)$$

式中, $u_{[P,O]}$ 为公共点坐标与仪器位姿参数组成的向量的协方差矩阵; u_c 为仪器观测量不确定度向量。

值得注意的是, 基于约束形成的整体测量场数学模型属于隐函数测量模型, 同时为了避免非方阵在求伪逆时带来的计算问题, 不确定度传播系数需要根据式(11)进行计算。

$$\frac{\partial [P,O]}{\partial C} = - \left(\frac{\partial h}{\partial [P,O] \partial [P,O]} \right)^+ \frac{\partial h}{\partial [P,O] \partial C} \quad (11)$$

因为非公共点不参与单目标优化问题的构建, 所以在非线性求解中无法得到非公共点坐标。非公共点坐标需要基于坐标系转换原理根据式(12)进行计算。

$$p_i = R_j p_{i,j} + T_j \quad (12)$$

式中, p_i 为非公共点在全局坐标系下的坐标; $p_{i,j}$ 为非公共点在仪器局部坐标系下的坐标, 第 i 台仪器坐标系与全局坐标系之间旋转矩阵 R_i 与平移向量 T_i 可以根据式(4)和(5)计算。

非公共点坐标不确定度主要来源于仪器观测量不确定度和仪器位姿参数不确定度两部分, 且针对非公共点的仪器观测量与仪器位姿参数相互独立。根据不确定度传播原理, 得到非公共点的坐标不确定度计算公式, 并根据坐标系转换过程与测量过程的独立性进行化简, 得到式(13)。

$$u_{p_i} = \frac{\partial (R_i p_{i,j} + T_i)}{\partial C_{i,j}} u_{c_{i,j}} \left(\frac{\partial (R_i p_{i,j} + T_i)}{\partial C_{i,j}} \right)^T +$$

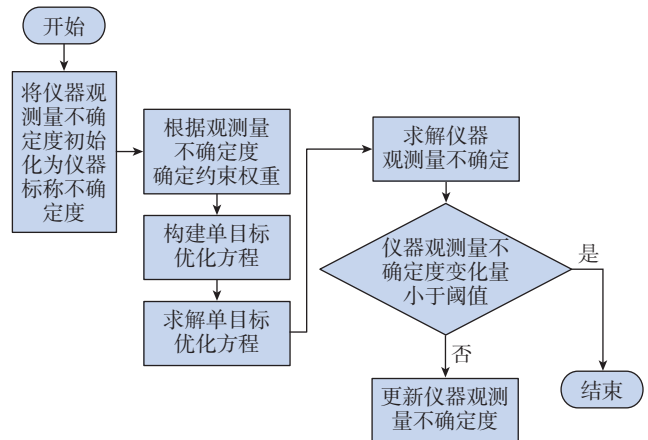


图3 仪器观测量不确定度评定算法

Fig.3 Algorithm for evaluating the uncertainty of instrument observation and measurement

$$\frac{\partial(\mathbf{R}_i p_{i,j} + \mathbf{T}_i)}{\partial \mathbf{O}_i} \mathbf{u}_{O_i} \left(\frac{\partial(\mathbf{R}_i p_{i,j} + \mathbf{T}_i)}{\partial \mathbf{O}_i} \right)^T = \left(\mathbf{R}_i \frac{\partial(p_{i,j}^T)}{d\mathbf{C}_{i,j}} \right) \mathbf{u}_{C_{i,j}} \left(\mathbf{R}_i \frac{\partial(p_{i,j}^T)}{d\mathbf{C}_{i,j}} \right)^T + \frac{\partial(\mathbf{R}_i p_{i,j} + \mathbf{T}_i)}{\partial \mathbf{O}_i} \mathbf{u}_{O_i} \left(\frac{\partial(\mathbf{R}_i p_{i,j} + \mathbf{T}_i)}{\partial \mathbf{O}_i} \right)^T \quad (13)$$

式中, \mathbf{u}_{p_j} 为第 j 个点(非公共点)的坐标不确定度; $\mathbf{u}_{C_{i,j}}$ 为第 i 台仪器与第 j 个点之间的观测量不确定度向量; \mathbf{u}_{O_i} 为第 i 台仪器的位姿参数不确定度向量。

3 仿真验证及现场测量场评价结果

针对由激光跟踪仪和 wMPS 组成的测量场设计了仿真试验,采用蒙特卡洛模拟的方式对仿真测量场的精度评价结果进行了验证,以证明整体测量场精度方法的合理性;并将该评价方法应用于包括激光跟踪仪、wMPS、摄影测量系统的实际测量场中。

3.1 仿真验证

针对所提出的精度评价方法,设计了仿真验证过程。建立了图 4 所示的整体测量场,在 $8\text{ m} \times 6\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 的范围内布置了 29 个目标点,并在周围放置 2 台激光跟踪仪与 4 台 wMPS 发射站,仪器观测量的标称不确定度见表 2 中评价指标的预设值。每台仪器测量 10~15 个目标点,其中,1~5 号点仅由 1 台激光跟踪仪测量,6~10 号点由两台激光跟踪仪测量,11~20 号点由 1 台激光跟踪仪与 wMPS 系统测量,21~29 号点仅由

wMPS 系统测量。

根据仪器测量原理对测量过程进行仿真并按 2.1 节中所述方法对仪器观测量不确定度进行评定,仿真结果如表 2 所示。

表 2 中,预设值为该类仪器的标称不确定度;实际值为仿真过程中采用的实际不确定度,与标称不确定度之间具有微小的误差;评定结果为根据本文所提出的算法对不确定度进行评价的计算结果。将评定结果与仪器实际观测量不确定度进行对比,评定结果相对误差小于 6%。

按 2.2 节所述方法对仪器位姿参数不确定度及目标点坐标不确定度进行评定,结果分别如表 3 和图 5 所示。

表 3 中, $\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_\gamma, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为仪器的 6 个位姿参数的不确定度仿真结果。

为了对不确定度评定方法进行验证,对测量过程进

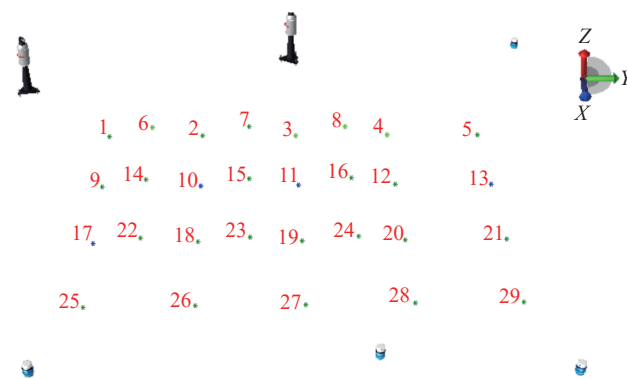


图 4 整体测量场仿真示意图

Fig.4 Diagram of integral measurement field simulation

表 2 仪器观测量不确定度仿真结果

Table 2 Simulation results of uncertainty in instrument observations and measurement

测量仪器	评定指标	预设值	实际值	仿真结果	仿真结果相对误差/%
激光跟踪仪1	绝对测距不确定度/ μm	10.0	9.6382	9.9749	3.49
	相对测距不确定度/ $\times 10^{-6}$	0.5	0.4842	0.4987	3.00
	垂直角不确定度/arcsec	1.3	1.2659	1.2816	1.24
	水平角不确定度/arcsec	1.3	1.2536	1.2967	3.44
激光跟踪仪2	绝对测距不确定度/ μm	10.0	10.3851	10.9185	5.14
	相对测距不确定度/ $\times 10^{-6}$	0.5	0.5179	0.5459	5.41
	垂直角不确定度/arcsec	1.3	1.3548	1.3443	0.77
	水平角不确定度/arcsec	1.3	1.3507	1.3774	1.98
wMPS1	扫描角不确定度/arcsec	3.0	3.2330	3.2206	0.38
wMPS2	扫描角不确定度/arcsec	3.0	2.9390	2.8364	3.49
wMPS3	扫描角不确定度/arcsec	3.0	3.3091	3.2612	1.45
wMPS4	扫描角不确定度/arcsec	3.0	3.0708	3.0185	1.70

行仿真试验,本文将仿真验证次数设定为 300。Calkins 等^[27]证明了采用蒙特卡洛法进行不确定度评定,当样本量为 300 时,误差在 5% 以内。

针对仪器的位姿参数,统计 300 次仿真过程中解算误差小于 3 倍评定出的不确定度概率,计算公式如式(14)所示。

$$G = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} f_i}{N} \times 100\%, f_i = \begin{cases} 1, & |t_i - t_0| \leq 3\sigma_i \\ 0, & |t_i - t_0| > 3\sigma_i \end{cases} \quad (14)$$

式中, N 为仿真过程的样本量,在本试验中 N 为 300; t 表示任意仪器的任意一项位姿参数; t_i 为在第 i 次仿真过程中该位姿参数的计算结果; t_0 为该参数的真值; σ_i 为该参数不确定度评定结果。

式(14)计算结果如表 4 所示,其中 α 、 β 、 γ 、 t_x 、 t_y 、 t_z 代表了仪器的位姿参数。

根据 3σ 原则, G 的期望为 99.74%。从表 4 可知,根据仿真结果计算的 G 在 97.23%~99.21% 之间,与期望值较为接近,可以认为仪器位姿参数不确定度评定结果较为合理。

将坐标不确定度的蒙特卡洛仿真结果与本文所提出方法的评价结果对比,如图 6 所示。

从图 6 中可以观察到,仿真试验得到的坐标试验标准差与评定的坐标不确定度具有相似的变化趋势,对坐

标不确定度评定方法起到验证作用。

以上仿真试验过程证明了整体测量场精度评价方法的合理性。

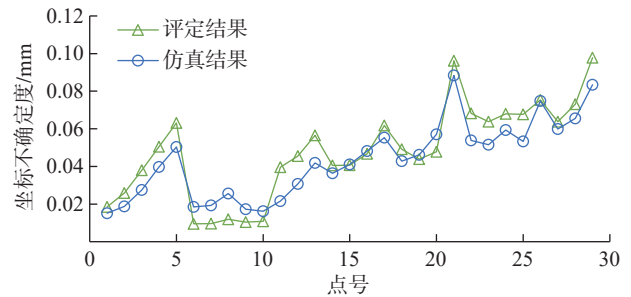
3.2 现场测量场精度评价结果

采用本文所提出的精度评价方法对现场的测量场

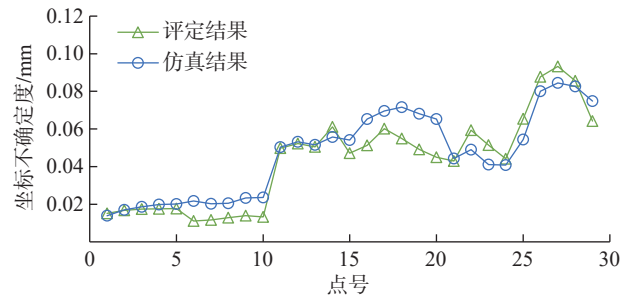
表 4 仪器位姿参数不确定度验证结果

Table 4 Verification results of uncertainty in instrument pose parameters %

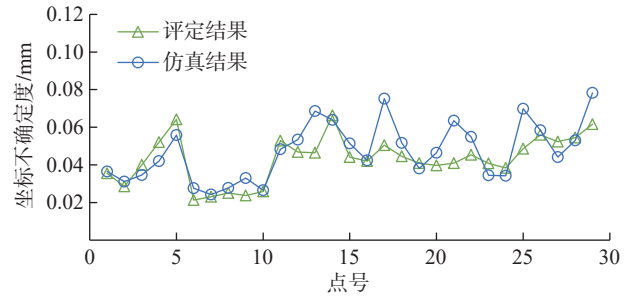
测量仪器	α	β	γ	t_x	t_y	t_z
激光跟踪仪1	98.51	98.61	98.42	98.71	98.22	98.42
激光跟踪仪2	98.32	99.01	98.22	98.51	98.71	98.51
wMPS1	98.51	98.02	99.01	98.71	99.21	98.02
wMPS2	98.42	97.92	98.32	98.12	98.61	98.02
wMPS3	98.22	97.62	99.21	98.71	99.01	97.82
wMPS4	98.42	97.92	98.02	97.82	98.91	97.23



(a) X坐标不确定度



(b) Y坐标不确定度



(c) Z坐标不确定度

图 6 坐标不确定度评定结果与仿真结果对比

Fig.6 Comparison between evaluation results and simulation results of coordinate uncertainty

表 3 仪器位姿参数不确定度仿真结果

Table 3 Evaluation results of uncertainty in instrument pose parameters

测量仪器	$\sigma_\alpha / \text{arcsec}$	$\sigma_\beta / \text{arcsec}$	$\sigma_\gamma / \text{arcsec}$	$\sigma_{t_x} / \mu\text{m}$	$\sigma_{t_y} / \mu\text{m}$	$\sigma_{t_z} / \mu\text{m}$
激光跟踪仪1	2.2	2.4	1.1	9.8	6.6	17.0
激光跟踪仪2	1.7	2.0	1.1	8.0	7.7	25.9
wMPS1	4.0	3.1	2.9	151.2	76.6	122.4
wMPS2	3.3	3.3	3.1	148.8	70.3	120.1
wMPS3	1.6	3.3	2.7	52.4	89.6	95.4
wMPS4	3.4	3.5	3.3	154.1	77.0	133.9

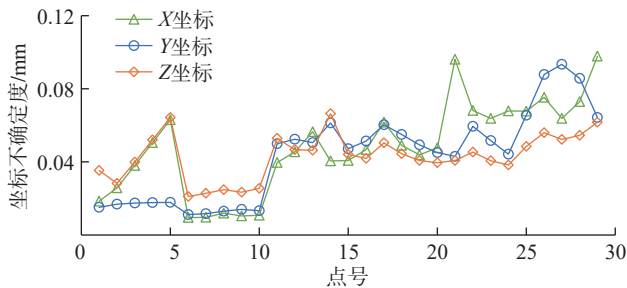


图 5 目标点坐标不确定度评定结果

Fig.5 Evaluation results of uncertainty in target point coordinates

精度进行了评价。将 $9\text{ m} \times 6\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的测量空间根据目标点的位置分为 3 个区域,各个区域内布置的目标点数目分别为 28,5 和 10。使用 1 台激光跟踪仪 (Leica AT960, LT) 在 4 个站位对目标点进行测量;同时,通过由 4 台 wMPS 发射站组成的工作空间测量定位系统以及摄影测量系统 (V-STARS/N-Gold) 获取多源观测结果。所采用的激光跟踪仪的测距不确定度为 $10\text{ }\mu\text{m}$,测角不确定度为 $\pm 15\text{ }\mu\text{m} + 6\text{ }\mu\text{m}/\text{m}$; wMPS 的坐标测量不确定度为 $0.2\text{ mm} + 0.01\text{ mm}/\text{m}^{[28-29]}$;摄影测量系统的坐标测量不确定度为 $7\text{ }\mu\text{m} + 7\text{ }\mu\text{m}/\text{m}$ 。测量场各区域分布、目标点位置及仪器位姿如图 7 所示。其中,激光跟踪仪在站位 2~4 及摄影测量系统仅对区域 1 内的目标点进行测量。

将所有的测量数据进行选择,构建了 3 个不同的测量场。其中,测量场 1 包含了所有的仪器站位与区域 1~3,测量场 2 仅包含了激光跟踪仪-站位 1 与 wMPS1~4 发射站对区域 1~3 的测量结果,测量场 3 仅包含了所有仪器站位对区域 1 的测量结果。

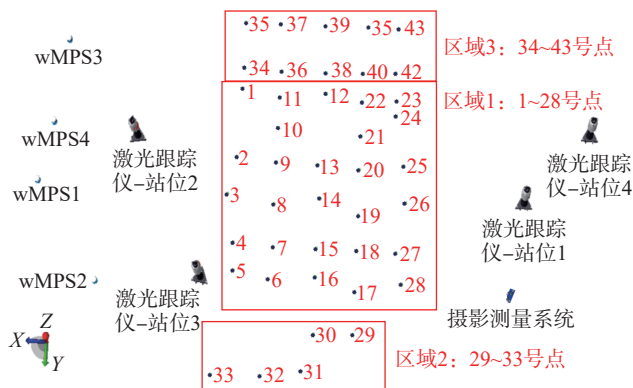


图 7 整体测量场精度评价试验
Fig.7 Experiment on evaluating the accuracy of the integral measurement field

对 3 个测量场的仪器观测量不确定度进行了评定,结果如表 5 所示。

从表 5 中可以得到各仪器 (系统) 的观测量不确定度在不同的测量场中相对一致,但多数指标与标称不确定度有一定的差距,证明了评定方法的合理性以及现场不确定评定的必要性。

对测量场 1 中仪器位姿参数不确定度的评价结果如表 6 所示。

在 3 个不同的测量场中对目标点的坐标不确定度进行了评定,结果分别如图 8 (a)~(c)所示。为了方便对比,将 3 个测量场中目标点在 3 个方向的坐标不确定度进行了合成,结果如图 8 (d)所示。

根据图 8 (b)可知,在测量场 2 中,区域 1 中的目标点坐标不确定度最大为 0.17 mm 。通过使用更多的测量

表 5 仪器观测量不确定度评定结果
Table 5 Evaluation results of uncertainty in instrument observations and measurement

测量仪器	观测量	测量场 1	测量场 2	测量场 3
激光跟踪仪	距离/ μm	10.9	11.0	10.7
	垂直角/arcsec	1.3	1.6	1.6
	水平角/arcsec	1.2	1.5	1.4
wMPS1	扫描角/arcsec	3.3	3.3	2.8
wMPS2	扫描角/arcsec	4.3	4.5	4.0
wMPS3	扫描角/arcsec	3.6	3.6	3.3
wMPS4	扫描角/arcsec	5.4	5.4	5.1
摄影测量系统	X坐标/ μm	52.1	—	53.2
	Y坐标/ μm	63.5	—	63.5
	Z坐标/ μm	10.5	—	10.6

表 6 测量场 1 中仪器位姿参数不确定度评定结果

Table 6 Verification results of uncertainty of instrument pose parameters in measurement field 1

测量仪器	σ_d/arcsec	$\sigma_\beta/\text{arcsec}$	$\sigma_\gamma/\text{arcsec}$	$\sigma_x/\mu\text{m}$	$\sigma_y/\mu\text{m}$	$\sigma_z/\mu\text{m}$
激光跟踪仪-站位 1	2.9	2.9	1.3	3.3	3.6	18.7
激光跟踪仪-站位 2	2.2	2.6	4.1	6.2	4.5	19.5
激光跟踪仪-站位 3	2.9	1.8	2.3	4.1	4.9	11.8
激光跟踪仪-站位 4	2.2	3.2	3.4	5.7	5.5	34.7
wMPS1	3.8	3.1	3.4	85.9	87.3	161.5
wMPS2	2.9	4.2	3.1	62.4	113.8	133.6
wMPS3	2.9	2.6	4.1	187.1	102.4	139.5
wMPS4	3.6	3.6	4.1	149.5	128.8	100.6
摄影测量系统	0.8	0.8	0.4	10.8	8.2	20.5

仪器对该区域进行测量,得到测量场1(图8(a)),使得区域1中目标点的坐标不确定度均小于0.15 mm,引入额外的测量系统可有效提高特定区域的测量精度。测量场1与测量场3相比,测量场1将更多的测量区域纳入了测量场,根据图8(d)可知,公共测量区域的精度基本不受影响。同时,测量场1中wMPS发射站仪器姿态参数不确定度较大,但激光跟踪仪与摄影测量系统的引入降低了其对目标点的坐标不确定度产生的影响(图8(a)),从侧面证明了整体测量场的优越性。

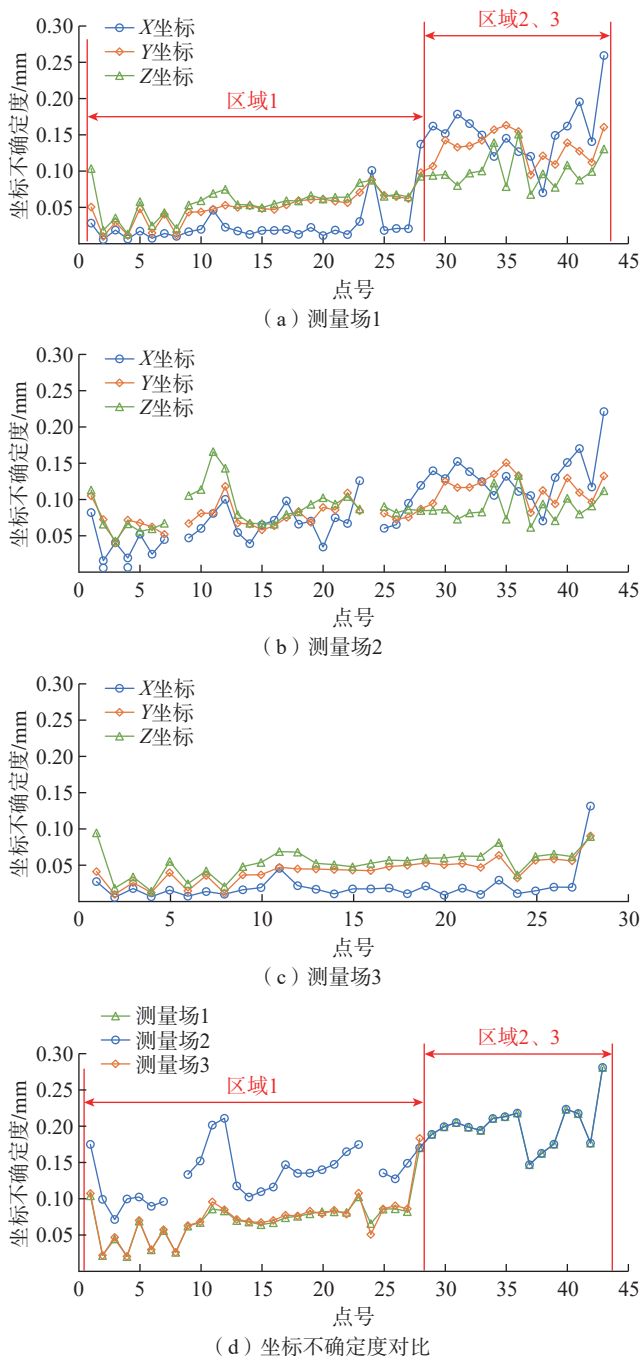


图8 目标点坐标不确定度评定结果

Fig.8 Evaluation results of uncertainty in target point coordinates

4 结论

本文建立了以仪器观测量不确定度、目标点坐标不确定度及仪器姿态参数不确定度为指标的整体测量场精度全面评价方法。通过仿真验证了不确定度评价方法,进行了测量场现场精度评价试验,得出以下结论。

(1) 以多类型几何约束为核心的整体测量场数学模型能够实现多源观测数据融合,为整体测量场的精度评价提供理论模型。

(2) 基于测量数据统计信息的仪器观测量不确定度评定反映了仪器的现场精度,仪器姿态参数及目标点坐标不确定度评定反映了不确定度的传播结果。

(3) 本文所提出的评价指标能够全面地体现整体测量场的精度性能,且评价方法合理、准确。

参考文献

[1] SCHMITT R H, PETEREK M, MORSE E, et al. Advances in large-scale metrology—review and future trends[J]. CIRP Annals, 2016, 65(2): 643–665.

[2] 郑联语, 朱绪胜, 姜丽萍. 大尺寸测量技术在航空制造业中的应用及关键技术[J]. 航空制造技术, 2013, 56(7): 38–41.

ZHENG Lianyu, ZHU Xusheng, JIANG Liping. Application of large-scale measurement in aviation manufacturing and its key technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(7): 38–41.

[3] MAROPOULOS P G, MUELNER J E, SUMMERS M D, et al. A new paradigm in large-scale assembly—research priorities in measurement assisted assembly[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(1): 621–633.

[4] JAMSHIDI J, KAYANI A, IRAVANI P, et al. Manufacturing and assembly automation by integrated metrology systems for aircraft wing fabrication[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2010, 224(1): 25–36.

[5] FRANCESCHINI F, GALETTO M, MAISANO D, et al. Distributed Large-Scale Dimensional Metrology: New Insights[M]. London: Springer London, 2011.

[6] SHENG Y, WANG Y K, LIU S W, et al. Large-scale measurement layout optimization method based on laser multilateration[J]. Machines, 2022, 10(11): 988.

[7] 马慧宇, 林嘉睿, 张饶, 等. 大尺寸分布式测量网络重构关键技术研究[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1112001.

MA Huiyu, LIN Jiarui, ZHANG Rao, et al. Research on key technologies for large-scale distributed measurement network reconstruction[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1112001.

[8] American Society of Mechanical Engineers. Performance evaluation of laser-based spherical coordinate measurement systems: ASME B89.4.19—2006[S]. New York: HIS, 2006.

[9] Verein Deutscher Ingenieure. Accuracy of coordinate measuring machines—characteristics and their checking—acceptance and reverification tests of laser trackers: VDI/VDE 2617—10: 2011[S]. Berlin: Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, 2013.

[10] Geometrical Product Specifications (GPS)—Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS)—Part 10: Laser trackers for measuring point-to-point distances: ISO 10360—10: 2016[S].

Switzerland: HIS, 2016.

[11] 国家质量监督检验检疫总局. 激光跟踪三维坐标测量系统校准规范: JJF 1242—2010[S]. 北京: 中国计量出版社, 2010.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. Calibration specification for laser tracking three-dimensional coordinate measurement system: JJF 1242—2010[S]. Beijing: China Metrology Press, 2010.

[12] HUGHES B, FORBES A, LEWIS A, et al. Laser tracker error determination using a network measurement[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(4): 045103.

[13] MUELANER J E, WANG Z, JAMSHIDI J, et al. Study of the uncertainty of angle measurement for a rotary-laser automatic theodolite (R-LAT)[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(3): 217–229.

[14] 耿磊, 郝继贵, 熊芝, 等. wMPS测角不确定度研究[J]. 光电工程, 2011, 38(10): 6–12.

GENG Lei, ZHU Jigui, XIONG Zhi, et al. Research on angle measurement uncertainty of wMPS[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(10): 6–12.

[15] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 近景摄影测量规范: GB/T 12979—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. National standardization administration specification for close up photogrammetry: GB/T 12979—2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.

[16] CHEN Z H, DU F Z. Measuring principle and uncertainty analysis of a large volume measurement network based on the combination of iGPS and portable scanner[J]. Measurement, 2017, 104: 263–277.

[17] 金涨军. 飞机装配中大尺寸测量场的建立与优化技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

JIN Zhangjun. Establishment and optimization technology of large-scale measurement field in aircraft assembly[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

[18] 葛成鹏. 飞机装配中坐标转换不确定度分析[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(1): 15–18, 48.

GE Chengpeng. Uncertainty analysis of coordinate transformation in aircraft assembly[J]. Machine Building & Automation, 2019, 48(1): 15–18, 48.

[19] 沈睿. 激光跟踪仪多站测量的精度提升方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.

SHEN Rui. Research on improving the accuracy of multi-station measurement of laser tracker[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.

[20] MAISANO D A, MASTROGIACOMO L. Determining the extrinsic parameters of a network of Large-Volume Metrology sensors of different types[J]. Precision Engineering, 2022, 74: 316–333.

[21] 赵建国, 台春雷, 刘哲, 等. 飞机装配大尺寸多系统测量场构建及应用[J]. 航空制造技术, 2022, 65(5): 63–67, 74.

ZHAO Jianguo, TAI Chunlei, LIU Zhe, et al. Establishment and application of large-volume multi-system measurement field for aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(5): 63–67, 74.

[22] MURALIKRISHNAN B, PHILLIPS S, SAWYER D. Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review[J]. Precision Engineering, 2016, 44: 13–28.

[23] YANG L H. Novel method for spatial angle measurement based on rotating planar laser beams[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(6): 758.

[24] MAISANO D A, JAMSHIDI J, FRANCESCHINI F, et al. Indoor GPS: System functionality and initial performance evaluation[J].

International Journal of Manufacturing Research, 2008, 3(3): 335.

[25] ALLAN A L. The principles of theodolite intersection systems[J]. Survey Review, 1988, 29(227): 226–234.

[26] LUHMANN T, FRASER C, MAAS H G. Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 115: 37–46.

[27] WECKENMANN A, JIANG X, SOMMER K D, et al. Multisensor data fusion in dimensional metrology[J]. CIRP Annals, 2009, 58(2): 701–721.

[28] 林嘉睿, 荆伟杰, 任永杰, 等. 基于合作靶标的分布式测量系统定向方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 10–16.

LIN Jiarui, JING Weijie, REN Yongjie, et al. Orientation method for distributed measurement system based on cooperative target[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 10–16.

[29] 林嘉睿, 程东源, 刘思仁, 等. 工业机器人绝对定位误差补偿方法[J]. 航空制造技术, 2022, 65(5): 46–54.

LIN Jiarui, CHENG Dongyuan, LIU Siren, et al. Absolute positioning error compensation method for industrial robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(5): 46–54.

通信作者: 林嘉睿, 副教授, 博士, 研究方向为激光及光电测试、视觉测量及大尺寸测量。

(责编 阳光)

(上接第 112 页)

BI Qingzhen, DING Han, WANG Yuhan. Theory and technique for five-axis NC machining of complex surface part[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2016: 15–51.

[19] GENG C, WU Y H, QIU J. Analysis of nonlinear error caused by motions of rotation axes for five-axis machine tools with orthogonal configuration[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018(1): 6123596.

[20] CHEN L J, TANG J M, WU W Y, et al. Nonlinear error compensation based on the optimization of swing cutter trajectory for five-axis machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 124: 4193–4208.

[21] 章绍昆, 毕庆贞, 王宇晗. 镜像铣削加工奇异区域刀具路径优化[J]. 航空学报, 2021, 42(10): 524591.

ZHANG Shaokun, BI Qingzhen, WANG Yuhan. Toolpath optimization for mirror milling in singular area[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(10): 524591.

[22] 王玮琪. 基于运动学约束的五轴加工复杂曲面刀矢优化[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2021.

WANG Weiqi. Tool vector optimization of five-axis machining complex surfaces based on kinematic constraints[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2021.

[23] 耿聪, 于东, 张函. 五轴联动刀轴矢量平滑插补算法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(3): 180–185.

GENG Cong, YU Dong, ZHANG Han. Tool orientation smooth interpolation algorithm for five-axis CNC machining[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(3): 180–185.

通信作者: 刘钢, 教授, 博士, 研究方向为航空航天高端自动化装备和工艺核心技术。

(责编 阳光)