基于虚拟力场的激光跟踪仪可测性 量化判定



白增柱¹,朱永国¹,胡烽²,胡元帆¹ 1.南昌航空大学,江西南昌 330063 2.国营芜湖机械厂,安徽 芜湖 241007

摘 要:为精确规划激光跟踪仪的测量站位,提高飞机装配效率,本文提出基于虚拟力场的激光跟踪仪可测性量化判定方法。首先,根据测量中的距离约束、垂直测量角约束和障碍物可视性约束,构建激光跟踪仪可测性约束表达式。然后,引入 虚拟力场,改进虚拟斥力公式,并定义阈值公式,构建障碍物可视性判定模型。最后,构建可测性矩阵,以实现激光跟踪仪的 可测性量化判定。试验结果表明,与势能场法对比,基于虚拟力场的激光跟踪仪可测性量化判定方法具有较强的可行性和 较高的准确率。

关键词:激光跟踪仪;站位;虚拟力场;可测性;飞机装配

中图分类号:V262.1

文献标识码:A

随着航空航天产品的制造与装配精度要求越来越高, 激光跟踪仪等高精度数字化测量设备已被初步引入到航空 航天产品研制过程中,并取得了较好的工程应用效果^[1-2]。 但由于采用的是光学测量原理,激光跟踪仪站位布设不合 理易出现遮挡现象,导致测量任务无法顺利完成。因此,激 光跟踪仪站位是否合理将直接影响到激光跟踪仪的测量效 率^[3-7]。激光跟踪仪站位是否合理可用激光跟踪仪的可测 性进行判定。

激光跟踪仪可测性受激光跟踪仪与测量点之间的距离、垂直测量角和测量场障碍物等约束,其中,测量场障碍物用可视性分析方法进行量化描述。当前,可视性分析方法主要有^[8-10]:(1)线面相交法,将多面体障碍物的各组成面进行分解,利用各组成面与测量光线是否相交来判定是否可视。(2)基于三维模型的体干涉判断法。将测量光线视为细长圆柱体,通过判断细长圆柱体与障碍物是否存在实体相交,进行可视性分析。这两种方法具有计算简单、流程清晰等特点,但两者均难以处理复杂的障碍物模型。姜瑞蒙等^[11]提出了基于势能场的测量中仪器位置可行域求解方法。该方法将障碍物进行包络处理,再基于障碍物包络体

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.04.012

的最大截面投影面积、障碍物距离和测量点处视角计算势 能,以求解出测量中仪器位置可行域。但该方法存在计算 阈值和可视性判断不准确的缺点。

虚拟力场法是机器人避障的有效算法,其基本思想是 基于目标的引力和障碍物的斥力共同作用,使机器人避开 障碍物运动。该方法避障准确率高,通用性强^[12]。为此,将 虚拟力场引入到激光跟踪仪可测性量化判定中,提出基于 虚拟力场的可测性量化判定方法。

1 站位布设可测性量化判定

图1为基于虚拟力场的激光跟踪仪可测性量化判定流 程。首先,构建可测性约束表达式。基于距离约束、垂直测 量角约束和障碍物可视性约束,构建激光跟踪仪可测性约 束模型。其次,改进虚拟力场中的斥力公式,构建基于改进 虚拟力场的障碍物可视性模型。然后,在定义距离约束矩 阵、垂直测量角约束矩阵和可视性约束矩阵的基础上,定义 可测性矩阵运算法则。最后,依据可测性矩阵的运算结果, 实现激光跟踪仪的可测性量化判定。

收稿日期: 2021-12-15; 退修日期: 2022-01-15; 录用日期: 2022-02-22 基金项目: 国家自然科学基金(51865037);航空科学基金(2019ZE056004)

引用格式: Bai Zengzhu, Zhu Yongguo, Hu Feng, et al. Quantitative judgment of laser tracker measurability based on virtual force field[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(04):94-101. 白增柱,朱永国, 胡烽,等. 基于虚拟力场的激光跟踪仪可测性量化判定 [J]. 航空科学技术, 2022, 33(04):94-101.



- 图1 基于虚拟力场的激光跟踪仪可测性量化判定流程图
- Fig.1 Flow chart of the laser tracker measurability quantitative judgment based on virtual force field

2 激光跟踪仪可测性量化判定模型构建

2.1 激光跟踪仪可测性约束

激光跟踪仪可测性约束包括距离约束、垂直测量角约 束和障碍物可视性约束。

2.1.1 距离约束

激光跟踪仪精度与测量距离密切相关,测量距离越远,测量不确定度越大^[13]。为保证测量精度,将测量最远距离约束记为D_{max}。此外,激光跟踪仪测量时,又要求测量距离大于最小距离D_{min}。综上,将激光跟踪仪与测量点距离约束函数定义为

$$D \in \left[D_{\min}, D_{\max} \right] \tag{1}$$

2.1.2 垂直测量角约束

激光跟踪仪由于自身结构限制,如图2所示,其垂直测 量角度处于一定范围内。将激光跟踪仪垂直测量角β约束 函数记为

$$\beta \in \left[\beta_{\min}, \beta_{\max}\right] \tag{2}$$





2.1.3 障碍物可视性约束

如图3所示,测量中激光跟踪仪与测量点之间可能会存在障碍物,激光跟踪仪与测量点的可视性检测转化成判断测量点是否位于站位P_{si}的可视区域内。将可视性约束函数定义为

 $V(P_{si}, P_{mj}) = 1 或 0$ (3) 式中:当 $V(P_{si}, P_{mj}) = 0$ 时,表示激光跟踪仪位于站位 P_{si} ,测 量点 P_{mj} 不可视;当 $V(P_{si}, P_{mj}) = 1$ 时,表示激光跟踪仪位于 站位 P_{si} ,测量点 P_{mj} 可视。





2.2 基于虚拟力场的障碍物可视性模型构建

利用虚拟力场中的虚拟斥力表示障碍物对激光跟踪仪的排斥,判断障碍物是否对激光跟踪仪产生干涉,即测量点是否可视。障碍物可视性判断流程如图4所示,虚拟力场中激光跟踪仪站位与测量点及障碍物几何关系通过透视投影法构建,根据激光跟踪仪与测量点及障碍物几何关系计算虚拟斥力并进行可视性判断。步骤如下。

2.2.1 投影平面构建

如图5所示,连接测量点Pmi和障碍物上任一点Pai,构造





线段 $P_{m_i}P_{oi}$,并将其延长,在延长线上选定任一点 P'_{oi} ,过 P'_{oi} 构造垂直于 $P_{m_i}P'_{oi}$ 的法平面,该平面即为 $P_{m_i}P_{oi}$ 的投影平面。



2.2.2 障碍物各组成面朝向判断

如图6所示,首先,计算障碍物各组成面的法矢量 N_i ,然后,定义 $P_{oi}P_{mj}$ 为视矢量V,定义 N_i 和V的夹角为 α , cos $\alpha = \frac{N_i \cdot V}{|N_i||V|}$ 。则有:(1) $N_i \cdot V > 0$ 时,0° < α < 90°,则此平面朝

向测量点 P_{mj} ;(2) $N_i \cdot V = 0$ 时, $\alpha = 90^\circ$,则此平面与视矢量 \vec{V} 平行;(3) $N_i \cdot V < 0$ 时, $\alpha > 90^\circ$,则此平面背向测量点 P_{mj°



图6 障碍物各平面法矢量

Fig.6 Normal vector of each obstacle plane

2.2.3 透视投影

如图7所示,以测量点*P_{mj}*为投影中心,对朝向*P_{mj}*的各 平面轮廓顶点进行透视投影。





2.2.4 障碍物可视性判断

如图 8 所示,利用测量点 P_{mj} 、站位 P_{si} 和 P_{oi} 三点构成一个平面 $P_{si}P_{mj}P_{oi}$, Q为投影轮廓上一点,线段 $P'_{oi}Q$ 为平面 $P_{si}P_{mj}P_{oi}$ 与障碍物投影轮廓的相交线上的一线段, η_q 为 QP_{mj} 与 $P_{mj}P'_{oi}$ 的夹角。



Fig.8 Position relationship between station and measuring point

虚拟力场中障碍物对机器人产生一个虚拟斥力 $F_r = \frac{F_c}{d_i^2} \left[\frac{x_i - x_r}{d_i} x + \frac{y_i - y_r}{d_i} y \right]$,以使机器人避开障碍物。在测量 过程中,激光跟踪仪保持静止不动,不同于机器人基于虚拟 斥力,可通过运动避开障碍物。因此,计算障碍物对激光跟 踪仪的虚拟斥力时,不需要计算虚拟斥力的方向,而需要考 虑测量点的视角。为此,改进虚拟力场中的斥力公式,构建 基于障碍物距离和测量点处视角的激光跟踪仪虚拟斥力公 式和阈值公式。

将激光跟踪仪受到的虚拟斥力定义为

$$F_r = \frac{F_c}{d_i^2} \cot \eta \tag{4}$$

式中: F_c 为斥力常量 10 e^{-3} N/m; d_i 为 P_{si} 与 P_{oi} 的距离; η 为 $P_{si}P_{mi}$ 和 $P_{mi}P_{oi}$ 的夹角,即测量点的视角。

将虚拟斥力阈值公式定义为

$$F_{t} = \frac{F_{c}}{d_{i}^{2}} \cot \eta_{q}$$
(5)

当 $F_r < F_i$ 时,激光跟踪仪与测量点可视,则式(3)中 $V(P_{si}, P_{mj}) = 1;反之,激光跟踪仪与测量点不可视,则式(3)$ 中 $V(P_{si}, P_{mj}) = 0$ 。

3 可测性矩阵的建立

将距离、垂直测量角和障碍物可视性约束分别用约束

矩阵进行量化表示,将距离约束矩阵、垂直测量角约束矩阵 和障碍物可视性约束矩阵分别定义为**R**^a_t,**R**^a_t,

3.1 距离约束矩阵R^d

根据距离约束函数式(1),构建所有测量点距离约束 矩阵**R**^d

$$\mathbf{R}_{t}^{d} = \begin{vmatrix} r_{11}^{d} & r_{12}^{d} & \cdots & r_{1j}^{d} & \cdots & r_{1n}^{d} \\ r_{21}^{d} & r_{22}^{d} & r_{2j}^{d} & \cdots & r_{2n}^{d} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{i1}^{d} & r_{i2}^{d} & \cdots & r_{ij}^{d} & \cdots & r_{in}^{d} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{i1}^{d} & r_{i2}^{d} & \cdots & r_{ij}^{d} & \cdots & r_{in}^{d} \end{vmatrix}$$
(6)

式中:当距离约束矩阵 \mathbf{R}_{t}^{d} 中元素 $r_{ij}^{d}=1$ 时,表示激光跟踪仪测量站位 P_{si} 与测量点 P_{mj} 之间距离满足测量精度;当元素 $r_{ij}^{d}=0$ 时,表示站位 P_{si} 与测量点 P_{mj} 之间的距离不满足测量精度 要求。

3.2 垂直测量角约束矩阵R^a

根据垂直测量角约束函数式(2),构建所有测量点的垂 直测量角约束矩阵**R**^a

$$\boldsymbol{R}_{t}^{a} = \begin{bmatrix} r_{11}^{a} & r_{12}^{a} & \cdots & r_{1j}^{a} & \cdots & r_{1n}^{a} \\ r_{21}^{a} & r_{22}^{a} & r_{2j}^{a} & \cdots & r_{2n}^{a} \\ \vdots & & & \vdots \\ r_{i1}^{a} & r_{i2}^{a} & \cdots & r_{ij}^{a} & \cdots & r_{in}^{a} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{i1}^{a} & r_{i2}^{a} & \cdots & r_{ij}^{a} & \cdots & r_{in}^{a} \end{bmatrix}$$
(7)

式中:当垂直测量角约束矩阵 R_i^{α} 中元素 $r_{ij}^{\alpha=1}$ 时,表示激光 跟踪仪的垂直测量角 β 在垂直测量角约束范围内;当 $r_{ij}^{\alpha=0}$ 时,表示激光跟踪仪的垂直测量角 β 不在垂直测量角约束 范围内。

3.3 障碍物可视性约束矩阵 Rⁱ

根据障碍物可视性约束函数式(3),构建所有测量点的 可视性约束矩阵**R**^{*v*}

$$\boldsymbol{R}_{t}^{v} = \begin{bmatrix} r_{11}^{v} & r_{12}^{v} & \cdots & r_{1j}^{v} \cdots & r_{1n}^{v} \\ r_{21}^{v} & r_{22}^{v} & r_{2j}^{v} \cdots & r_{2n}^{v} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{i1}^{v} & r_{i2}^{v} & \cdots & r_{ij}^{v} \cdots & r_{in}^{v} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{i1}^{v} & r_{i2}^{v} & \cdots & r_{ij}^{v} \cdots & r_{in}^{v} \end{bmatrix}$$
(8)

式中:当障碍物可视性约束矩阵 \mathbf{R}_{i}^{v} 中元素 $r_{ij}^{v}=1$ 时,表示激光 跟踪仪测量站位 P_{si} 对测量点 P_{mj} 可视;当 $r_{ij}^{v}=0$ 时,表示测量 站位 P_{si} 对测量点 P_{mj} 不可视。 3.4 可测性矩阵定义

综合式(6)~式(8),构建激光跟踪仪可测性矩阵 R_i^m

$$\boldsymbol{R}_{t}^{m} = \boldsymbol{R}_{t}^{d} \& \boldsymbol{R}_{t}^{a} \& \boldsymbol{R}_{t}^{v} = \begin{vmatrix} r_{11}^{m} & r_{12}^{m} \cdots r_{1j}^{m} \cdots r_{1j}^{m} \cdots r_{1n}^{m} \\ r_{21}^{m} & r_{22}^{m} \cdots r_{2j}^{m} \cdots r_{2n}^{m} \\ \vdots & \vdots \\ r_{i1}^{m} & r_{i2}^{m} \cdots r_{ij}^{m} \cdots r_{in}^{m} \\ \vdots & \vdots \\ r_{i1}^{m} & r_{i2}^{m} \cdots r_{ij}^{m} \cdots r_{in}^{m} \end{vmatrix} = \\ \begin{bmatrix} r_{11}^{d} \& r_{11}^{a} \& r_{11}^{v} & r_{12}^{d} \& r_{12}^{a} \& r_{12}^{v} \cdots r_{ij}^{d} \& r_{ij}^{a} \& r_{1j}^{v} \cdots r_{1n}^{d} \& r_{1n}^{a} \& r_{1n}^{v} \\ r_{21}^{d} \& r_{21}^{a} \& r_{21}^{v} & r_{22}^{a} \& r_{22}^{v} \& r_{22}^{v} \cdots r_{2j}^{d} \& r_{2j}^{a} \& r_{2j}^{v} \cdots r_{2n}^{d} \& r_{2n}^{a} \& r_{2n}^{v} \\ \vdots & \vdots \\ r_{i1}^{d} \& r_{i1}^{a} \& r_{i1}^{v} & r_{i2}^{d} \& r_{i2}^{a} \& r_{i2}^{v} \cdots r_{ij}^{d} \& r_{ij}^{a} \& r_{ij}^{v} \cdots r_{in}^{d} \& r_{in}^{a} \& r_{in}^{v} \\ \vdots & \vdots \\ r_{i1}^{d} \& r_{i1}^{a} \& r_{i1}^{v} & r_{i2}^{d} \& r_{i2}^{a} \& r_{i2}^{v} \cdots r_{ij}^{d} \& r_{ij}^{a} \& r_{ij}^{v} \cdots r_{in}^{d} \& r_{in}^{a} \& r_{in}^{v} \end{bmatrix}$$

式中:&的运算法则为 $\begin{cases} 1 \& 1 = 1 \\ 1 \& 0 = 0 \\ 0 \& 0 = 0 \end{cases}$ 可测性矩阵 $\mathbf{R}_{i}^{m} + r_{ij}^{m} = 0$

1,表示激光跟踪仪测量站位 P_{si} 对测量点 P_{mj} 可测;当 $r_{ij}^{m}=0$ 时,表示测量站位 P_{si} 对测量点 P_{mi} 不可测。

4 试验

4.1 搭建试验平台

飞机翼身对接装配是飞机典型的大部件对接装配,飞 机翼身对接装配过程中需采用激光跟踪仪测量装配基准点 的坐标,以解算出对接部件的位姿。利用激光跟踪仪测量 装配基准点坐标时,由于装配件、装配工装等阻挡,易出现 装配基准点不可测的现象。为此,以飞机翼身对接装配为 试验对象,搭建激光跟踪仪可测性量化判定试验系统。如 图9所示,该试验系统由机身模拟件、机身柔性调姿工装、 激光跟踪仪和靶球等组成。激光跟踪仪型号为 LeicaAT402, LeicaAT402 垂直测量角范围为[-55°, 90°], 激 光跟踪仪的测量不确定度为 $U = 15\mu m + 6\mu m/m_{\odot}$ 此外,测 量时该激光跟踪仪要求距离大于1m。机身调姿装配基准 点为P1,~P14,各基准点坐标允许偏差为0.5mm。P1~P14在 机身坐标系 $O_f - x_t y_t z_f$ 的坐标分别为(428.774, 151.901, 769.948), (366.823, 772.738, 774.846), (1016.319, 767.927, 758.819),(1346.598, 146.173, 761.551)。为测量P_{b1}~P_{b4}的坐 标,在Ph~Ph4上各摆放直径为1.5inch的靶球。以下未注单 位均为毫米。

4.2 试验验证

基准点的主要误差来源为激光跟踪仪测量误差,模拟



图 9 激光跟踪仪可测性量化判定试验系统 Fig.9 Experimental system for quantitative judgment of laser tracker measurability

件制造误差、调姿工装驱动误差等,激光跟踪仪测量误差应 约占总偏差的1/4~1/3。为此,激光跟踪仪允许测量误差 可设定为0.125mm。利用激光跟踪仪的测量不确定度计算 式和激光跟踪仪测量距离约束,可求得激光跟踪仪的测量 距离约束范围[1m,18.3m]。试验中,在机身模拟件前方布 置6个站位,分别分析6个站位与4个基准点之间的可测 性。各站位在 $O_f = x_f y_f z_f$ 的坐标见表1。利用表1计算激光 跟踪仪的测量距离及垂直测量角度,并基于式(1)、式(2)、式 (6)和式(7)可得6个激光跟踪仪站位的距离约束矩阵 R_a^a 和 垂直测量角约束矩阵 R_a^a 。

	[1]	1	1	1]	
	1	1	1	1	
	1	1	1	1	
\mathbf{n}_6 –	1	1	1	1	
	1	1	1	1	
	1	1	1	1	
	[1]	1	1	1]	
	1	1	1	1	
Da _	1	1	1	1	
\mathbf{n}_6 –	1	1	1	1	
	1	1	1	1	
	1	1	1	1	
	L 1	1	1	1 1	

表1 激光跟踪仪各站位在 $O_f - x_f y_f z_f$ 中的坐标

Table 1 The coordinates of each station of the laser tracker in $O_f - x_f y_f z_f$

站位	坐标					
	x	У	Z			
P _{s1}	-2445.005	207.468	826.578			
P _{s2}	-2060.109	398.853	848.707			
P _{s3}	-2571.568	742.275	826.640			
P _{s4}	-2476.034	11.178	825.828			
P _{s5}	-2330.441	-422.619	824.148			
P _{s6}	-2292.190	-544.844	823.637			

利用式(4)和式(5),计算激光跟踪仪各站位虚拟斥力和 阈值,见表2。

表2 激光跟踪仪各站位虚拟斥力和阈值(单位:N)

 Table 2
 Virtual repulsive force and thresholds of each station of laser tracker

	基准点P _{b1}		基准点P _{b2}		基准点P _{b3}		基准点P _{b4}	
站位	虚拟	阈值	虚拟	阈值	虚拟	阈值	虚拟	阈值
	斥力		斥力		斥力		斥力	
P_{s1}	0.763	0.872	0.575	0.614	1.107	1.591	2.409	2.659
P_{s2}	0.754	1.105	0.690	0.679	1.555	4.302	1.973	10.014
P_{s3}	0.475	2.118	0.534	0.918	1.439	1.623	0.976	6.182
P_{s4}	0.616	0.415	0.484	0.983	0.835	3.230	1.962	2.186
P_{s5}	0.670	1.903	0.374	1.317	0.514	4.378	1.271	7.514
P_{s6}	0.618	2.073	0.349	1.310	0.485	3.632	0.631	2.548

结合式(3)、式(5)、式(8)和表2,可得障碍物可视性约束 矩阵

Γ	1	1	1	1	1
	1	0	1	1	
_	1	1	1	1	
_	0	1	1	1	
	1	1	1	1	
L	1	1	1	1	
=	1 0 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1 1	

基于式(9),利用求得的*R*^a、*R*^a和*R*^b可求得各激光跟踪 仪站位点可测性矩阵

	[1]	1	1	1]
	1	0	1	1
D ^m -	1	1	1	1
\mathbf{n}_6 –	0	1	1	1
	1	1	1	1
	1	1	1	1

由 R^m 可看出:在站位 P_{s2}时,基准点 P_{b2}不可测;在站位 P_{s4}时,基准点 P_{b1}不可测;在站位 P_{s1}、站位 P_{s3}、站位 P_{s5}、站位 P_{s6}可全部测到4个基准点,可满足大部件对接装配测量要 求。基于虚拟力场的激光跟踪仪可视性判定如图10所示。 在图10中,红色实线表示基准点被障碍物遮挡,即不可视。 黑色实线表示基准点没有被障碍物遮挡,即可视。

基于势能场的可测性判断方法计算激光跟踪仪各站位 势能和阈值见表3。

由表3可看出,激光跟踪仪位于站位 P_{s1} 时,基准点 P_{b1} 、 P_{b4} 不可测;激光跟踪仪位于站位 P_{s2} 时,基准点 P_{b2} 不可测; 激光跟踪仪位于站位 P_{s3} 时,基准点 P_{b3} 不可测;激光跟踪仪 位于站位 P_{s4} 、站位 P_{s5} 、站位 P_{s6} 可全部测到4个基准点。

4.3 试验结果分析

由 R_{6}^{m} 和表3可看出,站位 P_{s1} , P_{s3} 和 P_{s4} 基于势能场的可



图 10 基于虚拟力场的激光跟踪仪可测性量化判定 Fig.10 Quantitative judgment of laser tracker measurability based on virtual force field

表3 激光跟踪仪各站位势能和阈值(单位:J)

Table 3 Potential energy and thresholds of each station of the laser tracker

-								
站位	基准点P _{b1}		基准点P _{b2}		基准点P _{b3}		基准点P _{b4}	
	势能	阈值	势能	阈值	势能	阈值	势能	阈值
P_{s1}	0.915	0.912	0.690	0.815	1.328	1.561	2.891	2.452
P_{s2}	0.904	0.912	0.828	0.815	1.465	1.561	2.368	2.452
P_{s3}	0.570	0.912	0.6403	0.815	1.726	1.561	1.171	2.452
P_{s4}	0.739	0.912	0.580	0.815	1.002	1.561	2.354	2.452
P_{s5}	0.804	0.912	0.448	0.815	0.617	1.561	1.525	2.452
P_{s6}	0.741	0.912	0.419	0.815	0.582	1.561	0.757	2.452

测性判断方法计算结果与基于虚拟力场的可测性量化判定 方法存在差异。存在差异的站位 P_{s1}、P_{s3}和P_{s4}和对应基准 点的现场试验结果如图 11~图 14 所示,其他站位对所有基 准点的可测性判定计算结果与试验结果一致。



图 11 站位 P_{s1} 对基准点 P_{b1} 测量 Fig.11 Measuring benchmark point P_{b1} at station P_{s1}

由图 11~图 14 可看出,激光跟踪仪位于站位 P_{s1}时,基 准点 P_{b1}、P_{b4}可测;激光跟踪仪位于站位 P_{s3}时,基准点 P_{b3}可 测;激光跟踪仪位于站位 P_{s4}时,基准点 P_{b1}不可测。基于以



图 12 站位 P_{s1} 对基准点 P_{b4} 测量 Fig.12 Measuring benchmark point P_{b4} at station P_{s1}



图 13 站位 P_{s3} 对基准点 P_{b3} 测量 Fig.13 Measuring benchmark point P_{b3} at station P_{s3}



图 14 站位 P_{s4} 对基准点 P_{b1} 测量 Fig.14 Measuring benchmark point P_{b1} at station P_{s4}

上分析可得,试验结果与基于虚拟力场的可测性量化判定 方法计算结果一致,基于势能场的可测性判断方法产生了 判断错误。产生判断错误的原因是该方法基于障碍物包络 体最大截面投影面积计算势能,导致计算势能大于实际值。

基于虚拟力场的可测性量化判定方法可以准确判定激 光跟踪仪的可测性,能够减少激光跟踪仪的转站次数,提高 航空航天产品的装配效率和测量精度,缩短装配周期。当 测量目标处于运动状态时,激光跟踪仪所受到的虚拟斥力 会不断变化,本文所提方法的动态性存在一定的局限性。

5 结论

通过研究,可以得出以下结论:

(1)针对激光跟踪仪站位布设中可测性判断不准确问题,将虚拟力场引入到激光跟踪仪可测性量化判定中,改进 虚拟力场中的斥力公式,提出基于虚拟力场的可测性量化 判定方法。

(2)以飞机翼身对接装配试验为例,进行激光跟踪仪的 可测性量化判定,并与势能场法进行比较。试验结果表明, 在激光跟踪仪可测性量化判定中,基于虚拟力场的可测性 量化判定方法具有较高的可行性和准确率。

参考文献

[1] 闫宝强,杨文举,张程.飞机外翼总装型架数字化设计技术研究与应用[J].航空科学技术,2018,29(10):11-15.

Yan Baoqiang, Yang Wenju, Zhang Cheng. Research and application of digital design technology for aircraft outer wing final assembly frame[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(10): 11-15. (in Chinese)

[2] 冯志刚,李泷杲,熊天辰,等.工业机器人视觉定位系统的实现[J].航空科学技术,2018,29(6):48-53.

Feng Zhigang, Li Shuanggao, Xiong Tianchen, et al. Implementation of visual location system for industrial robot [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(6): 48-53. (in Chinese)

- [3] Zheng L Y, Yang F L, Ni A J. A general framework of measurement system configuration for large and complex components[C]//Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010: 983-997.
- [4] 王金栋,孙荣康,曾晓涛,等.激光跟踪多站分时测量基站布局研究[J].中国激光,2018,45(4):231-238.

Wang Jindong, Sun Rongkang, Zeng Xiaotao, et al. Research on base station layout of multi-station and time-sharing measurement by laser tracking[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 231-238. (in Chinese)

- [5] Skibicki J D, Judek S. Influence of vision measurement system spatial configuration on measurement uncertainty, based on the example of electric traction application[J]. Measurement, 2018 (116): 281-298.
- [6] 朱绪胜, 刘蕾, 陈雪梅. 基于蒙特卡洛仿真的车间现场激光跟 踪仪测量站位优化[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(11): 3001-3010.

Zhu Xusheng, Liu Lei, Chen Xuemei. Measurement station optimization for laser tracker in-situ based on monte-carlo simulation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems 2020, 26(11): 3001-3010. (in Chinese)

- [7] 张海荣,程擎.基于可视性算法的布站选址优化及仿真实现
 [J]. 工业控制计算机, 2021, 34(3): 53-55.
 Zhang Hairong, Cheng Qing. Simulation on optimized site based on visual field analysis algorithm[J]. Industrial Control Computer, 2021, 34(3): 53-55. (in Chinese)
- [8] Suthunyatanakit K, Bohez E L J, Annanon K. A new global accessibility algorithm for a polyhedral model with convex polygonal facets[J]. Computer-Aided Design, 2009, 41(12): 1020-1033.
- [9] Liu M, Liu Y S, Ramani K. Computing global visibility maps for regions on the boundaries of polyhedra using Minkowski sums[J]. Computer-Aided Design, 2009, 41(9): 668-680.
- [10]朱绪胜,蔡志为,郑联语,等.基于屏幕空间变换的大型装配
 型架测量可视性分析[J].计算机集成制造系统,2013,19(6):
 1321-1328.

Zhu Xusheng, Cai Zhiwei, Zheng Lianyu, et al. Visibility analysis of large assembly fixture measurement based on screen space transformation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(6): 1321-1328. (in Chinese)

[11] 姜瑞蒙,郑联语,朱绪胜.基于势能场的大尺寸测量中仪器位 置的可行域求解方法[J]. 航空精密制造技术, 2014, 50(1): 12-15.

Jiang Ruimeng, Zheng Lianyu, Zhu Xusheng. Novel approach to solving feasible domain of large-scale measurement instruments based on potential rnergy field[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2014, 50(1): 12-15. (in Chinese)

[12] 金英连, 王斌锐, 吴善强. 机器人二维环境下仿人虚拟力场避

障研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(34): 215-218, 231. Jin Yinglian, Wang Binrui, Wu Shanqiang. Avoiding obstacles using virtual force field with humanoid strategy for autonomous robot in 2D environment[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(34): 215-218, 231. (in Chinese) [13] 甘霖,李晓星.激光跟踪仪现场测量精度检测[J].北京航空 航天大学学报, 2009, 35(5): 612-614.
Gan Lin, Li Xiaoxing. Site measuring accuracy testing of laser tracker[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(5): 612-614. (in Chinese)

Quantitative Judgment of Laser Tracker Measurability Based on Virtual Force Field

Bai Zengzhu¹, Zhu Yongguo¹, Hu Feng², Hu Yuanfan¹

1. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

2. State Owned Wuhu Machinery Factory, Wuhu 241007, China

Abstract: In order to plan the laser tracker measuring station accurately and improve aircraft assembly efficiency, a method is proposed to judge the laser tracker measurability quantitatively based on the virtual force field. Firstly, the constraint expressions of the laser tracker measurability are constructed according to the constraints of distance, vertical measurement angle and obstacle visibility of measurement. Secondly, an obstacle visibility judgment model is constructed by introducing a virtual force field, improving the virtual repulsion formula and defining a threshold formula. Finally, the measurability matrix is constructed to realize the quantitative judgment of the laser tracker measurability. The experiment results show that the proposed method has better feasibility and higher accuracy than potential energy field method.

Key Words: laser tracker; station; virtual force field; measurability; aircraft assembly

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (51865037); Aviation Science Foundation of China (2019ZE056004)