

# 一种面向运载火箭自动对接的三维测量场构建方法

付刚<sup>1</sup>, 秦伟<sup>2</sup>, 李亚军<sup>2</sup>, 岳义<sup>2</sup>, 刘明芳<sup>2</sup>, 党锦龙<sup>1</sup>, 刘志刚<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学机械工程学院设计科学与基础部件研究所, 陕西西安 710049;

2. 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245)

**摘要:** 旋转激光自动经纬仪系统(R-LATs)是一种基于前方角度交汇的分布式大尺寸测量系统。各激光扫描基站的布局位置直接影响着测量区域内的测量精度和应用性能。从测量区域的测量不确定度量化着手, 利用蒙特卡罗法获取各点的测量不确定度, 以测量区域的最大不确定度作为主要优化目标, 利用差分进化算法自动寻优, 更简单有效地实现了面向运载火箭自动对接的R-LATs系统布站优化。最后进行了运载火箭对接测量场的实际应用验证。应用结果表明: 该方法能有效优化激光扫描基站布局, 提高系统测量精度, 满足实际应用需求。

**关键词:** R-LATs; 布站优化; 测量精度; 不确定度; 差分进化

**中图分类号:** TN 247      **文献标志码:** A

**DOI:** 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.03.015

## Construction Method of Three-Dimensional Measurement Field for Automatic Docking of Launch Vehicles

FU Gang<sup>1</sup>, QIN Wei<sup>2</sup>, LI Yajun<sup>2</sup>, YUE Yi<sup>2</sup>, LIU Mingfang<sup>2</sup>, DANG Jinlong<sup>1</sup>, LIU Zhigang<sup>1</sup>

(1. Institute of Design Science and Basic Components, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China; 2. Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

**Abstract:** Rotary laser automatic theodolite system (R-LATs) is a distributed large-scale measurement system based on the intersection of front angles. The layout position of each laser scanning base station directly affects the measurement accuracy and application performance in the measurement area. In this paper, the measurement uncertainty of the measurement area is quantified. The Monte Carlo method is used to obtain the measurement uncertainty of each point, and the maximum uncertainty of the measurement area is taken as the main optimization objective. The differential evolution algorithm is used to automatically optimize, which makes the R-LATs system layout optimization for the automatic docking of launch vehicles be realized more simply and effectively. Finally, the practical application verification of the docking measurement field of launch vehicles is carried out, and the application result shows that the method can effectively optimize the layout of laser scanning base station, improve the measurement accuracy of the system, and meet the actual application requirements.

**Key words:** R-LATs; layout optimization; accuracy of measurement; uncertainty; differential evolution

## 0 引言

飞机、轮船、火箭等超大型设备的整体几何尺寸大、结构复杂, 装配过程对测量精度和测量范围要求高, 这对大尺寸空间测量技术提出了挑战。目

前, 大尺寸测量系统主要有基于单一测量设备和多个观测测量融合的组合式测量系统, 以及基于多个测站点位观测测量集成的分布式测量系统<sup>[1]</sup>。

当前应用比较成熟的大尺寸测量系统主要包

收稿日期: 2020-02-28; 修回日期: 2020-04-13

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2017ZX04005001-003)

作者简介: 付刚(1994—), 男, 硕士生, 主要研究方向为面向高端制造的光学GPS系统。

通信作者: 刘志刚(1970—), 男, 教授, 主要研究方向为面向高端制造的光学GPS系统、测量与控制, 三维光场成像与光学感知。

括关节测量臂系统、激光跟踪仪系统、全站仪、摄影测量以及 iGPS 等。全站仪测量系统测角精度较高,但测距精度低,需人为对准,实时性较差;激光跟踪仪测量精度高,范围大,但难以实现多目标并行测量;工业近景摄影是一种离线测量方式,实现在线测量能力偏弱<sup>[2]</sup>。iGPS 是 Nikon 公司的一种分布式大尺寸测量系统,具备多目标并行测量能力,已应用于飞机水平测量<sup>[3]</sup>,然而如何根据应用场景,优化测量基站空间布局,未见实际应用报道。旋转激光自动经纬仪系统(R-LATs)是一种结合光电经纬仪空间角度交会坐标测量与 GPS 全局定位原理的新型高精度光学 GPS 系统,系统由激光扫描基站与光电传感器网络组成,激光扫描基站如同“太空中的卫星”,对整个测量空间进行扫描,光电传感器如同 GPS 接收机,用来接收激光扫描信号,将空间角度的测量转换为光脉冲时间间隔的高精度测量,进而计算出光电传感器在整个测量空间的高精度三维空间坐标。R-LATs 能够通过多基站组网实现测量空间的扩展,并且具备稳定的多目标并行测量能力,在飞机、航天器对接装配,机器人导航等领域得到应用<sup>[4-5]</sup>。

针对运载火箭自动对接测量这一具体测量任务,因受到测量现场复杂环境的影响,以及受到激光扫描基站激光器张角和激光面可达距离的限制,如何优化多台激光扫描基站空间布局,提高整个三维测量场的测量精度,是亟待解决的问题,对实现运载火箭自动对接位姿测量具有重要的意义<sup>[6-7]</sup>。

本文构建了 R-LATs 系统的数学模型,设计了基于蒙特卡罗法的 R-LATs 系统测量不确定度求解方法。在此基础上,以 R-LATs 覆盖整个目标空间和降低整个目标空间的最大测量不确定度为优化目标,基于差分进化算法搜索得到构建三维测量场的可行方式,从而很好地解决了 R-LATs 建场时搜索范围大、计算复杂度高的问题,保证了整个目标空间内的测量精度,实现了运载火箭对接测量场的激光扫描基站布局方案设计。实际应用结果表明:该方法能有效优化激光扫描基站布局,满足工业现场的测量精度和覆盖范围需求。

## 1 R-LATs 问题建模

作业空间的测量不确定度是对 R-LATs 的基本性能要求,基于 R-LATs 系统的基本工作原理,对

R-LATs 系统进行数学建模,并构建其测量不确定度模型,这是开展 R-LATs 系统构建三维测量场工作的基础。

### 1.1 R-LATs 测量原理

R-LATs 是一种基于空间角度前方交会原理的分布式大尺寸测量系统。单台 R-LAT 由空间平面交汇模型确定目标点所在的一条空间直线,多台 R-LAT 通过组网测量,由空间直线交汇模型解算目标点空间坐标。其系统组成及工作原理如图 1 所示,包括多台激光扫描基站、同步光源发射站、基准光电传感器、多个待测传感器、嵌入式信号处理器、路由器和工控机。

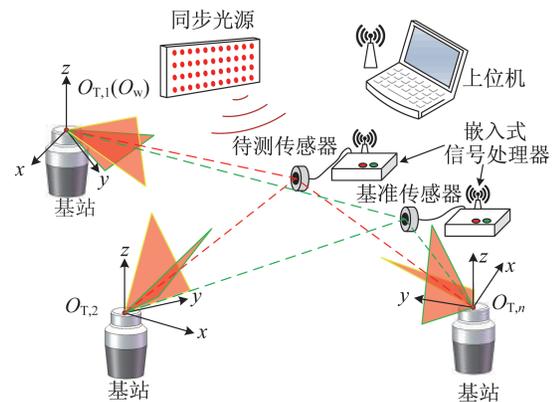


图 1 R-LATs 测量原理

Fig.1 Measurement principle of the R-LATs

每台基站从回转轴线上一点发出两束扇形激光平面,且激光平面绕回转轴线匀速旋转,基准传感器为基站提供零位信息。记基站第一个激光平面扫过基准传感器的时刻为  $t_0$ ,两激光平面先后扫过待测传感器的时刻为  $t_1, t_2$ ,同时同步光源按照设定好的时间间隔闪烁,将  $t_0, t_1, t_2$  同步到同一时钟序列下。接收器将每台基站的这 3 个时刻值发送到计算终端即可解算待测传感器的空间坐标。

为便于统一描述,构建如图 2 所示基站坐标系  $O_T-X_T Y_T Z_T$ :以基站的激光发出点为原点  $O_T$ ,以回转轴为  $Z_T$  轴构建,并令  $X_T O_T Y_T$  面与第一个激光面  $f_1$  的交线为  $X_T$  轴,  $Y_T$  轴通过右手准则确定。令  $X_T O_T Z_T$  面绕  $X_T$  轴旋转  $\varphi_1$  与激光面  $f_1$  重合,令  $X_T O_T Z_T$  面绕  $X_T$  轴旋转  $\varphi_2$  并进一步绕  $Z_T$  旋转  $\varphi_c$  与激光面  $f_2$  重合,如此确定两激光平面的外法线  $N_1$  和  $N_2$  如下:

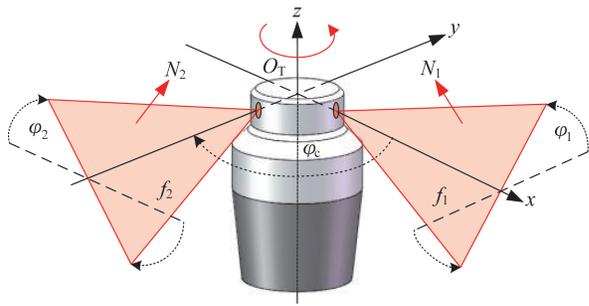


图 2 激光扫描基站结构

Fig.2 Structure of the laser scanning base station

$$\begin{cases} N_1 = [0, \sin(\varphi_1), \cos(\varphi_1), 0]^T \\ N_2 = [-\sin(\varphi_c)\sin(\varphi_2), \cos(\varphi_c)\sin(\varphi_2), \\ \cos(\varphi_2), 0]^T \end{cases} \quad (1)$$

光电接收器得到统一到同一时钟序列下的 R-LAT 激光平面触发的时刻  $t_0$ 、 $t_1$  和  $t_2$ , 如此有激光平面  $f_1$  和  $f_2$  与光电接收器共面时与  $t_0$  时刻初始位置的夹角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ :

$$\theta_1 = \frac{n\pi(t_1 - t_0)}{30}, \theta_2 = \frac{n\pi(t_2 - t_0)}{30} \quad (2)$$

由此可得与光电接收器共面时激光平面  $f_1$  和  $f_2$  的空间方程如下:

$$\begin{cases} R_z(\theta_1) \cdot N_1 \cdot [x, y, z]^T = 0 \\ R_z(\theta_2) \cdot N_2 \cdot [x, y, z]^T = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $R_z(\theta_1)$  为激光平面  $f_1$  绕旋转轴旋转  $\theta_1$  对应的旋转矩阵;  $R_z(\theta_2)$  为激光平面  $f_2$  绕旋转轴旋转  $\theta_2$  对应的旋转矩阵;  $[x, y, z]^T$  为待测传感器所在的空间坐标。

在测量网络中, 由于每台 R-LAT 所处的坐标系不同, 进行坐标计算之前, 需将每台 R-LAT 的坐标系转换到世界坐标系下。记  $R_i$  为第  $i$  台 R-LAT 相对世界坐标系的旋转矩阵,  $T_i$  为第  $i$  台 R-LAT 坐标系相对世界坐标系的平移矩阵, 如此, 将所有  $n$  台基站与接收器交汇的激光平面转换到全局坐标系中, 可得

$$\begin{cases} R_1 \cdot R_z(\theta_{1,1}) \cdot N_{1,1} \cdot ([x, y, z]^T - T_1) = 0 \\ R_1 \cdot R_z(\theta_{1,2}) \cdot N_{1,2} \cdot ([x, y, z]^T - T_1) = 0 \\ R_2 \cdot R_z(\theta_{2,1}) \cdot N_{2,1} \cdot ([x, y, z]^T - T_2) = 0 \\ R_2 \cdot R_z(\theta_{2,2}) \cdot N_{2,2} \cdot ([x, y, z]^T - T_2) = 0 \\ \vdots \\ R_n \cdot R_z(\theta_{n,1}) \cdot N_{n,1} \cdot ([x, y, z]^T - T_n) = 0 \\ R_n \cdot R_z(\theta_{n,2}) \cdot N_{n,2} \cdot ([x, y, z]^T - T_n) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

利用最小二乘原理对式(4)进行求解, 即可得到待测传感器的三维坐标  $[x, y, z]^T$ 。

## 1.2 基于蒙特卡罗法的 R-LATs 测量场不确定度评估

在实际测量中, 由于基站旋转速度的波动与基站的振动、光电传感器的延迟以及环境因素干扰等, 必然引发测量误差。其中, 基站旋转速度的波动直接造成激光面对光电传感器触发时间的变化, 即引发基站的测角误差, 其经过交汇测量模型直接导致光电传感器的测量误差<sup>[8-9]</sup>。简化后, 以基站转速波动带来的测角误差作为 R-LATs 的主要测量误差来源, 将其看作关于测角  $\theta$  的正态分布  $N(0, \sigma^2)$ , 忽略其他因素导致的测量误差。

为对测量空间预先进行有效的测量不确定度评估, 可对测量空间中每一点按照蒙特卡罗法施加测角误差进行数值仿真计算。在给定基站布站参数和空间一点  $Q$  后, 可通过数值搜索方法求解下式, 计算得第  $i$  台基站的两个激光平面与点  $Q$  共面时的理论转角  $\theta_{i,1}$  和  $\theta_{i,2}$ :

$$\begin{cases} R_i \cdot R_z(\theta_{i,1}) \cdot N_{i,1} \cdot (Q - T_i) = 0 \\ R_i \cdot R_z(\theta_{i,2}) \cdot N_{i,2} \cdot (Q - T_i) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

在得到所有基站的激光平面对点  $Q$  的触发转角后, 对其按照正态分布  $N(0, \sigma^2)$  施加测角误差, 带入式(3)计算出  $Q$  点的空间坐标。如此, 进行多组仿真计算后, 对所有的空间坐标进行统计分析, 得各坐标分量的标准差  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  和  $\sigma_z$ 。以其误差作为该空间点的测量不确定度, 有

$$\text{GDOP} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (6)$$

式中: GDOP 为该点的测量不确定度。

## 2 基于差分进化算法的 R-LATs 优化布站

由前述分析可知, R-LATs 测量网络中基站的位置分布, 决定了测量场的不确定度形态。为确保测量任务的可靠性, 需要依据测量任务的具体需求合理地设计基站布局。

### 2.1 基站布局建模

受制于作业环境的物理边界条件和基站的测量作业限制, 在进行基站的布局优化建模时, 必须

充分地考虑基站的可布局空间、基站的测量可达空间以及作业空间的精度要求等<sup>[10-13]</sup>。

### 2.1.1 基站布局参数

基于一般性,在测量作业空间中构建全域的笛卡尔测量坐标系。考虑到基站绕 Z 轴的回转工作,每一基站仪器坐标系相对全局坐标系的位姿矩阵  $R$  由分别绕 X 轴和绕 Y 轴的变量  $\alpha$  和  $\beta$  决定,而基站仪器坐标系到全局坐标系的位姿向量  $T$  由  $x, y, z$  构成。如此,第  $i$  台基站的安装位姿由  $\{\alpha_i, \beta_i, x_i, y_i, z_i\}$  5 个变量唯一确定。

然而,考虑到具体的作业环境状态,基站的安装位置和姿态必然受到一定的限制,如基站的安装位置不能干涉到机器的正常作业空间,并限制于场地的局部可支配区域等。同时,基站应优先选择地基平稳区域,通常在作业场地的外围通过三脚架安装,或安装在作业环境的外围立柱与顶部桁架结构上。为确保基站的安装位姿位于合理的可行区域,对每一基站的 5 个外参数变量设定其对应可行取值区间  $\{[\alpha_{i,\min}, \alpha_{i,\max}], [\beta_{i,\min}, \beta_{i,\max}], [x_{i,\min}, x_{i,\max}], [y_{i,\min}, y_{i,\max}], [z_{i,\min}, z_{i,\max}]\}$ , 其中每一区间可由多个子区间的并集组成。同时,如要求固定某一变量,则设定其可行范围为目标值即可。如此,可准确地构建每一基站的布站约束条件,确保在后续的优化算法中基站的外参数合理。

### 2.1.2 基站可达性

由 R-LATs 的工作性能和测量原理可知,仅当接收器满足如下两个条件时才可实现测量:1) 接收器位于基站的激光面有效扫描空间内;2) 接收器接收到两台以上基站的激光信号。对给定测量空间点  $P=[x_p, y_p, z_p]^T$ , 其在基站仪器坐标系  $O_i$ -XYZ 的坐标为  $P'=[x_{p,i}, y_{p,i}, z_{p,i}]^T$ ,  $P'$  点与  $O_i$  点构成的等效射线在基站仪器坐标系的俯仰角  $E_i$  确定如下:

$$E_i = \arctan\left(\frac{z_{p,i}}{\sqrt{x_{p,i}^2 + y_{p,i}^2}}\right) \quad (7)$$

受制于基站激光的张角范围,以及激光的强度限制与固定焦距造成的近距离激光质量品质差作用,当点  $P'$  同时满足如下的俯仰角范围和距离范围时确保  $P'$  点位于第  $i$  台基站的有效扫描空间内,即条件:

$$\begin{cases} |E_i| \leq E_{\max} \\ L_{\min} \leq |O_i P'| \leq L_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $E_{\max}$  为基站激光面的最大俯仰角范围;  $L_{\min}$  和  $L_{\max}$  分别为可工作的激光面距离。对点  $P$  进行所有  $N$  台基站的工作空间判定,当有 2 台以上基站满足式(8),则表明点  $P$  可完成测量,否则基站的布局参数无法形成对  $P$  点的测量。

### 2.1.3 测量目标场精度要求

由于作业任务的差异化,作业场景中不同空间区域对于 R-LATs 的测量不确定度要求不同,如一些区域要求完成精准的点位坐标采集,而一些区域则要求较为粗略的位置运动轨迹即可。为建模统一,按照空间区域的测量精度要求,对整个测量空间进行分割表达,将其表达为  $M$  个要求测量精度为  $\epsilon_m$  的空间包围盒  $[S_m, E_m]$ 。其中,包围盒之间可相交、包含等以简化建模。

因每一测量子空间为连续体,对其空间每一点进行 R-LATs 测量不确定的评估计算量难以接受。因此,设定空间密度对每一测量子空间进行一系列离散点的采样进行离散表达,以所有离散点的不确定度来近似评估该子空间的空间测量不确定度。

## 2.2 基于差分进化算法的布站优化实施

上述面向测量任务空间的 R-LATs 基站布站分析建模表明,基站的布局优化是一个多变量的约束优化问题,且其解空间巨大,难以挖掘出内在的解析关系。因此,采用进化算法能较好地对可行解空间进行概率性探索,以获取优化解。差分进化算法是一种种群迭代进化算法,采用实数编码,设计参数少易于实施<sup>[14]</sup>。借助差分进化算法良好地完成基站布站问题的求解,需要针对布站问题模型依据差分进化算法进行合理的组织。

### 2.2.1 个体设计与控制

基于 2.1.1 节的基站外参数分析,可以直接利用每一基站的 5 个外参数变量作为个体元素进行编码。如此,每一个个体  $X$  由  $N$  台基站的  $5N$  个变量构成,为一个长度为  $5N$  的向量:

$$X = [x_1, y_1, z_1, \alpha_1, \beta_1, \dots, x_N, y_N, z_N, \alpha_N, \beta_N]^T \quad (9)$$

在优化计算中,个体的初值生成以及种群迭代中的个体更新,都需要遵循设定的基站物理外参数限制  $\{[\alpha_{i,\min}, \alpha_{i,\max}], [\beta_{i,\min}, \beta_{i,\max}], [x_{i,\min}, x_{i,\max}], [y_{i,\min}, y_{i,\max}], [z_{i,\min}, z_{i,\max}]\}$ , 按照个体每一元素对应的物理边界条件进行生成,或进行调整。

### 2.2.2 适应度函数

每一个体的属性,即对应基站的布站状态,由适应度函数表达,是评价其性能的关键<sup>[15]</sup>。一般地,要求 R-LATs 测量场的工作能力满足测量空间要求的精度分布。在 2.1.2 节中对测量空间的精度要求按照不同精度等级划分为  $M$  个子空间表达,因此,以这  $M$  个测量子空间的测量不确定度最大值为基础设计适应度函数。这里,对于目标测量空间不可完全覆盖个体必须施加大的惩罚力度加以排除,对于布站参数超出可行物理边界的个体也施加大的惩罚力度进行排除,同时对于可行个体依据其对每一子空间的测量不确定度进行适当的处理,以保证所有子空间的测量精度都达到根本准则,鉴于此设计适应度函数  $F(X)$  如下:

$$F(X) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left( \frac{\epsilon'_m(X)}{\epsilon_m} M^{\text{floor}\left(\frac{\epsilon'_m(X)}{\epsilon_m}\right)} \right) \quad (10)$$

式中:  $\epsilon'_m$  为第  $m$  个测量空间的最大不确定度;  $\epsilon_m$  为第  $m$  个测量空间的不确定度设定值; floor 为向下取整函数。

式(10)可保证,当  $M$  个子空间的测量不确定度都满足要求不确定度时,  $F(X)$  小于 1; 任何一个子空间的测量不确定度不满足要求时,  $F(X)$  大于 1; 同时规定,当个体使得基站布局位于有效安装区域之外时,直接令该个体适应度  $F(X) = 1 \times 10^6$ , 当基站的布站未能保证目标测量空间的覆盖时,则设定对应测量子空间的测量精度  $\epsilon'_m = 1 \times 10^6$ 。

### 2.2.3 种群更新

种群更新的过程包含了变异、交叉、选择 3 种操作,更新种群内所有个体的布局参数<sup>[16-18]</sup>。首先是变异,在第  $g$  次迭代中,对个体  $X_i(g)$ , 从种群中随机选择 3 个个体  $X_{p_1}(g)$ 、 $X_{p_2}(g)$ 、 $X_{p_3}(g)$ , 且  $p_1 \neq p_2 \neq p_3 \neq i$ , 则变异后的个体  $H_i(g)$  为

$$H_i(g) = X_{p_1}(g) + F \cdot (X_{p_2}(g) - X_{p_3}(g)) \quad (11)$$

式中:  $F$  为缩放因子,用于控制差分向量的影响力。

交叉操作可以增加种群的多样性,得到交叉后的个体  $V_i(g)$  的方法如下:

$$v_{ij}(g) = \begin{cases} h_{ij}(g), & \text{rand}(0, 1) \leq cr \\ x_{ij}(g), & \text{rand}(0, 1) > cr \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $cr \in [0, 1]$ , 为交叉概率; rand(0, 1) 为 [0, 1] 上服从均匀分布的随机数。

后续的选择操作,根据评价函数选择个体

$V_i(g)$  或  $X_i(g)$  作为下一代的个体  $X_i(g+1)$ 。

### 2.2.4 停止准则

在种群迭代中基于解的收敛情形停止搜索以获取最优解,这里设置两种停止准则:1) 满足最大迭代次数  $K_{\max}$  时停止,如果当前最优个体不满足测量空间的精度要求,则可重新进行迭代优化,或增加基站的数量进行重新求解;2) 当最优个体适应度值  $F \leq 1$  且连续  $K$  代不变时停止搜索,该个体保证了全部测量子空间的测量精度都满足要求,该个体即为优化后的基站布站解。

### 2.2.5 计算流程

基于上述布站问题建模与差分进化算法设计,组织完整的全局布站优化问题求解流程如图 3 所示。

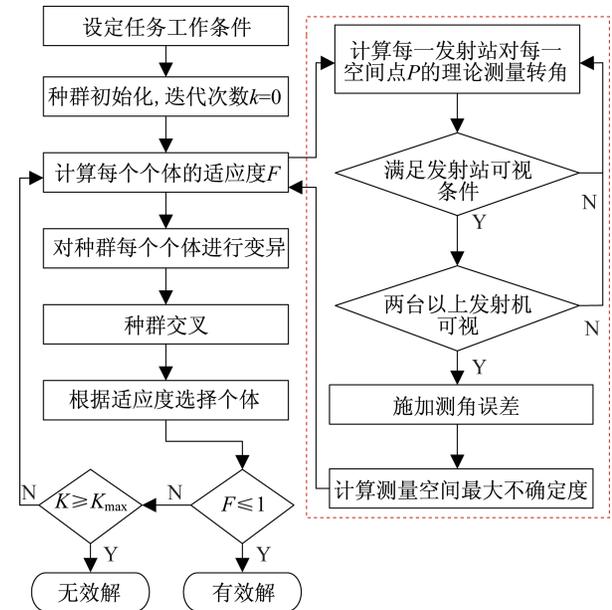


图 3 布站优化流程

Fig.3 Layout optimization process

## 3 仿真及实验分析

### 3.1 仿真分析

以一个运载火箭对接工位的测量场构建为任务进行 R-LATs 的布站问题优化设计,以此表明本文方法的有效性。运载火箭装配车间如图 4 所示,为保证火箭装配工作的顺利进行,要求 R-LATs 系统的有效测量区域长 24 m,宽 4 m,高 4 m,且基站需实现顶装式布局。布局平面距离地面 15 m,长 30 m,宽 4 m。

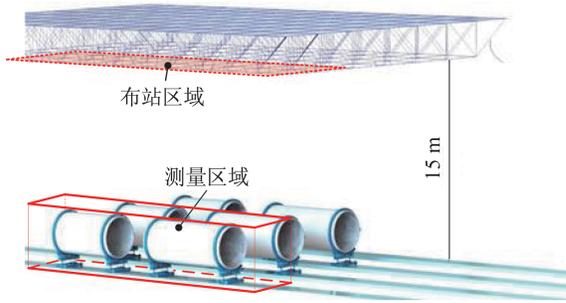


图 4 运载火箭装配车间三维示意图

Fig.4 3D Schematic diagram of the launch vehicle assembly workshop

由于照明设备和排气窗口的存在,基站距离照明设备和排气窗口至少为 1 m,布站区域被进一步限制。以布站平面为  $XOZ$  平面,坐标系原点为布站区域中心, $Y$  轴竖直向下,建立坐标系。

在该坐标系下,所有可用布站区域为: $x \in [-15\ 000, -11\ 430] \cup [-9\ 780, -7\ 710] \cup [-6\ 410, -5\ 560] \cup [-2\ 190, 840] \cup [2\ 520, 3\ 410] \cup [7\ 920, 8\ 810] \cup [13\ 820, 15\ 000]$ ,  $y=0, z \in [-2\ 000, 2\ 000]$ 。布站时为美观考虑,所有基站应布在同一直线上。

R-LATs 系统中基站的激光平面张角为  $30^\circ$ ,光平面最远可达距离为 20 m。在基于差分进化算法的优化布站计算中,基站的测角误差的正态分布为  $\sigma \sim N(0, 2, 196^2)$ ,单位 as,蒙特卡罗评估空间每点的重复次数为 300 次,差分进化算法的控制参数见表 1。

表 1 优化参数设置

Tab.1 Optimization parameter settings

种群数量	变异因子 $F$	交叉因子 $cr$	结果重复次数上限 $K$	最大迭代代数 $K_{\max}$
40	0.5	0.4	200	1 000

差分进化优化经过 435 代计算停止,其最优个体适应度进化曲线如图 5 所示。可以看到,经过大约 60 次迭代目标函数值降到最小值附近,之后的迭代过程中目标函数值降低幅度较小。

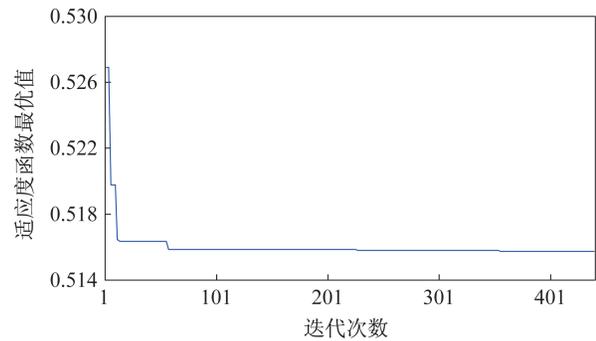


图 5 适应度值变化图

Fig.5 Change diagram of the fitness value

全火箭对接工位的基站布局位置如图 6 所示,共需 5 台基站。在该布局下,测量空间内  $Y=15$  m 平面,即工位地面平面内的标准测量不确定如图 7 所示。可以看到:除部分区域可被 4 台基站覆盖,测量精度较高外,其余部分的标准测量不确定度在 0.25 mm 以内,满足火箭对接任务的测量需求。

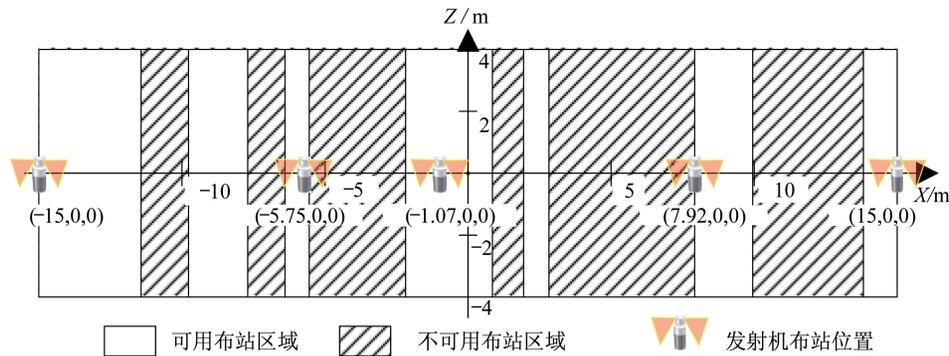


图 6 优化后基站布局位置

Fig.6 Layout positions of the base station after optimization

### 3.2 实验应用

根据 3.1 节中仿真结果所得基站布站位置,将 5 台基站安装于运载火箭装配车间的顶部。完成安

装后为对装配测量场的定位精度进行验证,在测量区域内随机选取 10 个位置,用分辨率为 0.005 mm 的数显光栅尺和 R-LATs 系统同时对 1 m 标准长度进

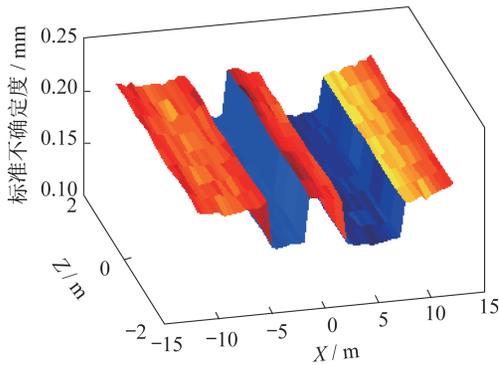


图 7 优化后测量不确定度

Fig.7 Measurement uncertainty after optimization

行测量,并将两者测量结果进行对比。每个位置处的 R-LATs 系统 1 m 标准长度测量残差如图 8 所示。可以看到,测量场内的长度残差分布在  $\pm 0.4$  mm 以内,测量精度满足火箭自动装配的需求。

为进一步验证火箭装配测量场内的重复定位

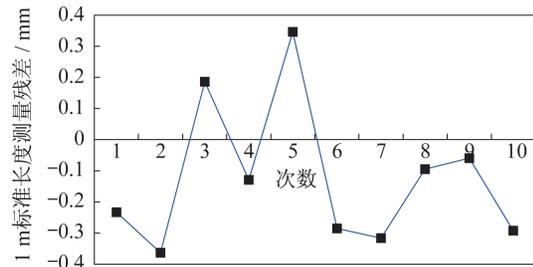
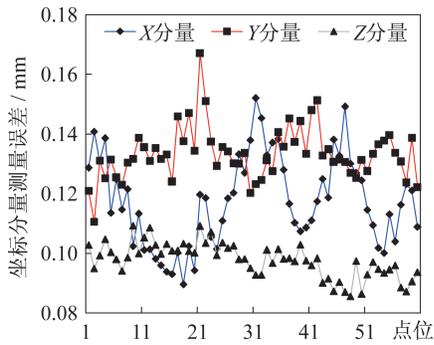


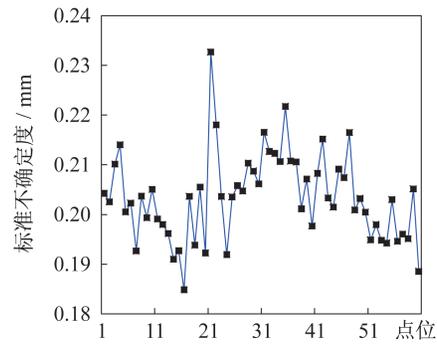
图 8 1 m 标准长度测量残差

Fig.8 1 m standard length measurement residual

精度,随机选取了 60 个点位,每个点位重复测量 20 次,得到各点位各坐标分量的标准差如图 9(a) 所示。依据误差合成理论对误差进行合成,得到在置信概率为 68.3% 时各点位的标准测量不确定度,如图 9(b) 所示。可以看到,在每个验证点处的标准测量不确定度都在 0.24 mm 以内,测量场内的重复定位精度满足运载火箭自动对接的需求。



(a) 各坐标分量测量标准差



(b) 标准测量不确定度

图 9 测量场内的重复定位精度

Fig.9 Repeated positioning accuracy in the measurement field

#### 4 结束语

为利用 R-LATs 系统完成运载火箭自动对接三维测量场的构建,本文对 R-LATs 系统数学模型进行分析,并在该模型的基础上利用蒙特卡罗法分析得到测量区域内各待测点的测量不确定度。以测量区域内的最大测量不确定度作为主要约束对象,基于差分进化算法,设计了 R-LATs 系统布站优化方法,在较小的迭代次数内得到给定布站区域内的较优布局。

结合火箭对接车间的实际应用需求,利用该方法获得了 5 台基站的布局位置,对该布站方式下测量空间的不确定度场进行了绘制并将布站结果应用于实际测量场的构建当中。在整个测量空间内,

各位置的测量精度均满足实际测量需求。结果表明:利用该方法进行运载火箭对接测量场的构建,能有效获取较优的布站方式,对指导实际工程应用中的大尺寸三维测量场构建具有明显的作用。

#### 参考文献

[ 1 ] 黄桂平, 钦桂勤. 大尺寸三坐标测量方法与系统[J]. 宇航计测技术, 2007(4): 15-19.  
 [ 2 ] 董登峰, 周维虎, 纪荣祎, 等. 激光跟踪仪精密跟踪系统的设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 309-318.  
 [ 3 ] FERRI C, MASTROGIACOMO L, FARAWAY J. Sources of variability in the set-up of an indoor GPS [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2010, 23(6): 487-499.

- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] 方红根,郭立杰,杨晓慧,等.旋转激光经纬仪空间定位网络的组合式激光三维扫描系统[J].光电工程, 2016, 43(6): 57-62.
- [ 6 ] 张卫东,王东保.新一代低温液体快速发射运载火箭及其发展[J].上海航天, 2016, 33(增刊1): 1-7.
- [ 7 ] 裴忠海,余薛浩,王鹏,等.运载火箭捷联惯组全自主对准技术应用研究[J].上海航天, 2018, 35 (5): 110-115.
- [ 8 ] GALETTO M, PRALIO B. Optimal sensor positioning for large scale metrology applications [J]. Precision Engineering, 2010, 34(3): 563-577.
- [ 9 ] ZHANG D, ROLT S, MAROPOULOS P G. Modeling and optimization of novel laser multilateration schemes for high-precision applications [J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(12): 2541.
- [ 10 ] 毛世民,聂钢.双经纬仪三维测量最佳布局[J].宇航计测技术, 1999, 19(3): 25-28.
- [ 11 ] 张耀华,林嘉睿,任瑜,等.基于遗传算法的wMPS系统布局优化研究[J].传感技术学报, 2017, 30(5): 746-751.
- [ 12 ] 熊芝,岳翀,薛彬.基于IAGA的空间测量定位系统测站优化部署[J].应用光学, 2016, 37(4): 561-566.
- [ 13 ] 熊芝,郝继贵,薛彬,等.空间测量定位网络的典型布局[J].光学精密工程, 2013, 21(9): 2354-2363.
- [ 14 ] 杨启文,蔡亮,薛云灿.差分进化算法综述[J].模式识别与人工智能, 2008, 21(4): 506-513.
- [ 15 ] 方强,陈德钊,俞欢军,等.基于优选策略的差分进化算法及其化工应用[J].化工学报, 2004(4): 598-602.
- [ 16 ] 高岳林,刘军民.差分进化算法的参数研究[J].黑龙江大学自然科学学报, 2009, 26(1): 81-85.
- [ 17 ] SUN G, XU G, JIANG N. A simple differential evolution with time-varying strategy for continuous optimization [J]. Soft Computing, 2020, 24 (4): 2727-2747.
- [ 18 ] XIN B, CHEN J, PENG Z H, et al. An adaptive hybrid optimizer based on particle swarm and differential evolution for global optimization [J]. Science China, 2010(5): 100-109.

(上接第 106 页)

### 3 结束语

1) 送丝速度和焊接速度对增材试样的尺寸有重要影响。随送丝速度的增加,宽度相应增加,而高度则无明显变化;随焊接速度增加,宽度和高度均相应减小,后续修复零件的参数可依照此规律。

2) 多层单道的熔覆层可分为 3 个区域,熔合线附近为柱状晶区,熔合线上部位等轴晶区,熔覆层中部为长大的等轴晶区。

3) 在 CMT+Advance 模式下,不同焊接速度下的增材试样均具有良好的力学性能,垂直熔覆方向和平行熔覆方向的力学性能相差不多,层间连接强度良好,抗拉强度和延伸率均超过焊丝材料的标准值,平均抗拉强度达 274.7 MPa。

#### 参考文献

- [ 1 ] 从保强,苏勇,齐铂金,等.铝合金电弧填丝增材制造技术研究[J].航天制造技术, 2016(3): 29-32.
- [ 2 ] MUGHAL M, FAWAD H, MUFTI R. Three-dimensional finite-element modelling of deformation in weld-based rapid prototyping [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220: 875-885.
- [ 3 ] 聂云鹏,张培磊,庄乔乔,等.4043 铝合金冷金属过渡薄壁构件电弧快速成形[J].焊接学报, 2018, 39(11): 61-65, 134.
- [ 4 ] 罗四维,杨静,朱德珑,等.铝合金 CMT 焊对接接头组织与性能的研究[J].上海金属, 2018, 40(6): 11-15.
- [ 5 ] 王秋雨,杨可,徐先宜,等.铝合金电弧增材制造成形工艺与性能研究[J].电焊机, 2018, 48(9): 83-87.
- [ 6 ] FENG J, ZHANG H, HE P. The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding [J]. Materials & Design, 2009, 30(5): 1850-1852.
- [ 7 ] 朱宇虹,耿志卿.薄板焊接的极限:CMT 冷金属过渡焊接技术[J].电焊机, 2011, 41(4): 69-71.
- [ 8 ] 姜云禄.基于冷金属过渡技术的铝合金快速成形技术及工艺研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
- [ 9 ] 李玉飞.电弧增材制造 5B06 铝合金工艺及性能研究[D].武汉:华中科技大学, 2017.
- [ 10 ] 郭亚轩,胡洋,步贤政,等.5B06 铝合金电弧增材制造工艺参数对成形质量的影响[J].焊接技术, 2018, 47 (1): 25-28.