

激光与光电子学进展

基于免疫优化算法的 iGPS 发射器布局优化方法

范景韬¹, 黄翔^{1*}, 曾琪¹, 赵子越², 石竹风¹

¹南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016;

²航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095

摘要 为了获得更优的发射器布局,使系统达到更高的定位精度,提出一种基于免疫优化算法的 iGPS 发射器布局优化方法,根据系统的测量原理得到该系统的测量不确定度模型,由此建立亲和度函数,使用免疫优化算法对发射器布局进行优化,并通过仿真进行验证。结果表明:所提方法可以显著优化发射器布局,提高系统的测量精度;与遗传算法相比,免疫优化算法具有更好的全局寻优效果,可以得到更优的 iGPS 发射器布设站点。

关键词 测量; 布局优化; 交汇测量; iGPS; 免疫优化算法

中图分类号 TH711

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1112009

Placement Optimization of iGPS Transmitter Based on Immune Optimization Algorithm

Fan Jingtao¹, Huang Xiang^{1*}, Zeng Qi¹, Zhao Ziyue², Shi Zhufeng¹

¹College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

²AVIC Beijing Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China

Abstract To obtain a better transmitter layout and enable the system to achieve higher positioning accuracy, we propose an iGPS transmitter layout optimization method based on an immune optimization algorithm. According to the system's measurement principle, we obtain the measurement uncertainty model of the system. Besides, we establish the affinity function and utilize the immune optimization algorithm for optimizing the transmitter layout. Finally, we verify the results through the simulation. The simulation analysis shows that the proposed method can significantly optimize the transmitter layout and improve the system's measurement accuracy. Thus, the immune optimization algorithm has a better global optimization effect than the genetic algorithm and can obtain better placement of transmitters.

Key words measurement; placement optimization; intersection measurement; iGPS; immune optimization algorithm

OCIS codes 120.3930; 120.3940; 120.6085

1 引言

飞机、卫星、船舶等大型产品的装配具有作业空间大、部件结构复杂、精度要求高的特点^[1],为了

适应高效率、高精度、低成本的生产装配作业要求,具有模块化、可重组和精度高等特点的数字化测量系统在生产装配中得到广泛研究与应用,成为大型构件数字化测量技术的发展方向^[2-3]。iGPS 是一种

收稿日期: 2020-10-29; 修回日期: 2020-11-24; 录用日期: 2020-12-17

*E-mail: xhuang@nuaa.edu.cn

新型的大尺寸空间测量系统,它基于光电扫面原理,相较于其他种类的数字化测量设备,具有测量范围大、大尺寸空间测量精度高、测量实时性好、扩展方便等优点^[4],逐渐在航空、航天、航海等大型物件制造装配领域得到更多的应用^[5]。

iGPS 测量系统通过计算待测特征点位置的接收器与散布在周围空间的激光发射器之间的相对位姿关系来计算接收器所处位置的空间坐标。只要接收器可以同时接收 3 个及以上激光发射器的光学信号,该接收器的空间位置就可以计算出来^[6]。但是发射器不同的空间布局所对应测量系统的定位精度有很大差别,所以为了提高系统的测量精度,研究 iGPS 发射器的布局优化具有很重要的意义。

目前,国内外学者对 iGPS 发射器的布局问题进行了不同程度的研究。德国卡尔斯鲁尔理工学院对由 4 个 iGPS 发射器组成的不同布局进行了研究^[7],研究表明在四站系统下,Box 型布局的测量区域误差分布明显优于 C 型布局。德国亚琛工业大学机床与制造工程研究所的 Schmitt 等^[8]对 iGPS 的几种典型布局进行了仿真模拟与实验分析,研究表明在几种传统的经验构型中,标准型布局的误差分布最好。国内高校近几年在 iGPS 测量系统等光学测量网络的布局以及优化方面开展了相关研究^[9]。文献[10-11]对四站激光跟踪仪测量网络的布局优化进行了研究,但在实际应用中具有局限性。天津大学自主研发了测量原理与 iGPS 相同的 wMPS 测量系统,并对 wMPS 的布局进行了相关研究。天津大学的熊芝等^[12]研究了 wMPS 几种常见的网络布局及误差特性,研究表明待测点能接收的发射器数量越多,测量系统的误差分布越好,发射器分布越分散,测量系统的整体测量精度越高,但是发射器数量大于 4 个之后,精度提高程度就不再明显。这些研究得出了几种常见布局的误差分布规律。在实际的工程应用中,为了应对不同的任务,需要一种智能的自动化发射器布设方法。文献[13]通过研究测量过程中光平面交汇对测量稳定性的影响建立评价模型,使用遗传算法来求解激光发射器的布设位置。文献[14]基于改进自适应遗传算法对 wMPS 测量系统的激光发射器布设位置优化问题进行研究。文献[15]采用模拟退火与粒子群算法结合的协同搜索算法,将测量精度、覆盖度与成本分析相结合建立误差函数,对 2~4 个发射器的布局进行优化分析。由于算法本身的特点,遗传算法和

粒子群算法虽然搜索速度快,但是在面对待求参数多、约束方程多等问题时容易陷入局部最优^[16]。

与上述算法相比,免疫优化算法有一个显著的优点:它在全局范围内的寻优求解能力更好^[17]。本文采用免疫优化算法,通过对 iGPS 测量系统的测量原理进行分析,得到系统的测量不确定度模型,由此建立免疫优化算法的关键部分亲和度函数,对 iGPS 发射器的布设位置进行优化。对 iGPS 测量系统的典型布局优化和免疫优化算法与遗传算法的优化效果进行了仿真分析,结果表明,所提方法可以显著优化 iGPS 发射器布局,提高测量系统的测量精度,与遗传算法相比,免疫优化算法具有更好的全局寻优能力。

2 iGPS 测量原理与误差模型

iGPS(indoor GPS),即室内 GPS,是一种根据 GPS 的测量原理,基于区域 GPS 技术开发的室内空间测量系统。iGPS 系统主要由发射器、传感器、手持探头、系统软件等部分组成^[18]。激光发射器可以发射三个光学信号,其中两个是由激光器高速旋转发射的红外激光面信号,一个是由发射器基座发出的红外脉冲信号^[19]。根据激光接收器接收到的三个光信号可以计算出接收器相对于发射器的水平角和俯仰角。若已知两个及两个以上发射站的位置,根据信号处理系统计算出的水平角与俯仰角,即可计算出接收器所处的空间位置。

2.1 发射器数学模型

如图 1 所示,iGPS 发射器工作时,发射器发射出两个激光平面,这两个激光平面与垂直方向的夹角为 $\pm 30^\circ$,并且在垂直方向上的有效覆盖角度大约为 $\pm 20^\circ$ ^[20]。这两个光平面绕公共转轴以固定频率旋转。每当这两个光平面旋转一圈,基座上的

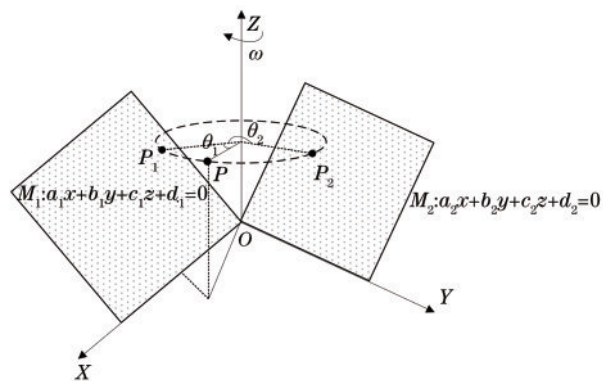


图 1 发射器局部数学模型图

Fig. 1 Part of mathematical model of transmitter

红外脉冲发射器发出一个全向激光脉冲,作为时间同步周期信号。根据接收器接收到的光学信号时间差可以计算出接收器相对于发射器的水平角与俯仰角。

当转台处于初始位置时,对发射器的两个激光扇面进行标定,得到两个光平面的特征参数,构造出两个光平面的平面方程,即

$$M_1: a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0, \quad (1)$$

$$M_2: a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0. \quad (2)$$

发射器工作时,两个光平面绕公共转轴以角速度 ω 转动。假设接收器接收到发射器同步脉冲的时刻为 t_0 ,此时两个光平面正好转动至初始位置,当光平面 M_1 先扫过接收器时,接收器记录此时的时刻为 t_1 ,此时光平面 M_1 相对于初始位置转过的角度为 θ_1 ,当光平面 M_2 正好扫过接收器时,接收器记录此时的时刻 t_2 ,此时光平面 M_2 相对于初始位置转过的

角度为 θ_2 ,则有

$$\begin{cases} \theta_1 = \omega \cdot (t_1 - t_0) \\ \theta_2 = \omega \cdot (t_2 - t_0) \end{cases} \quad (3)$$

当两个光平面分别扫过接收器时,假设转动角度为 θ ,则旋转矩阵为

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由此推导出两个光平面在旋转 θ 角度后的平面参数为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = R_z(\theta) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

将(5)式代入平面方程(1)式和(2)式,得到两扇光平面的平面方程的系数分别为

$$\begin{bmatrix} a_1(\theta_1) \\ b_1(\theta_1) \\ c_1(\theta_1) \\ d_1(\theta_1) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \\ d_1 \end{bmatrix}^T \cdot R_z^{-1}(\theta_1) = \begin{bmatrix} a_1 \cdot \cos \theta_1 - b_1 \cdot \sin \theta_1 \\ a_1 \cdot \sin \theta_1 + b_1 \cdot \cos \theta_1 \\ c_1 \\ d_1 \end{bmatrix}^T, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} a_2(\theta_2) \\ b_2(\theta_2) \\ c_2(\theta_2) \\ d_2(\theta_2) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \\ d_2 \end{bmatrix}^T \cdot R_z^{-1}(\theta_2) = \begin{bmatrix} a_2 \cdot \cos \theta_2 - b_2 \cdot \sin \theta_2 \\ a_2 \cdot \sin \theta_2 + b_2 \cdot \cos \theta_2 \\ c_2 \\ d_2 \end{bmatrix}^T, \quad (7)$$

则两个平面的平面方程为

$$\begin{cases} a_1(\theta_1) \cdot x + b_1(\theta_1) \cdot y + c_1 \cdot z + d_1 = 0 \\ a_2(\theta_2) \cdot x + b_2(\theta_2) \cdot y + c_1 \cdot z + d_1 = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

由此便可得到 iGPS 发射器的单站数学模型。

2.2 测量误差模型

由单站测量的数学模型可知,每个发射器都可以与接收器联合建立两个方程,其中的 x, y, z 为信号接收器的空间位置,方程系数为发射器两个平面的方程系数。这样,每有 n 台发射器就可以列出 $2n$ 个方程组:

$$\begin{cases} a_{11} \cdot x + b_{11} \cdot y + c_{11} \cdot z + d_{11} = 0 \\ a_{12} \cdot x + b_{12} \cdot y + c_{12} \cdot z + d_{12} = 0 \\ a_{21} \cdot x + b_{21} \cdot y + c_{21} \cdot z + d_{21} = 0 \\ a_{22} \cdot x + b_{22} \cdot y + c_{22} \cdot z + d_{22} = 0 \\ \vdots \\ a_{n1} \cdot x + b_{n1} \cdot y + c_{n1} \cdot z + d_{n1} = 0 \\ a_{n2} \cdot x + b_{n2} \cdot y + c_{n2} \cdot z + d_{n2} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

假设接收器 P 在全局坐标系下的坐标值为 (x_P, y_P, z_P) ,接收器 P 在发射器 N 的坐标系下的坐标值为 (x_{PN}, y_{PN}, z_{PN}) ,全局坐标系到发射器测量坐标系的坐标转换旋转矩阵为 R_n ,平移矩阵为 T_n ,则有

$$\begin{bmatrix} x_{PN} \\ y_{PN} \\ z_{PN} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_n & T_n \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

联立(8)式与(10)式,则有

$$f_{ni}(D) = [a_{ni} \quad b_{ni} \quad c_{ni} \quad d_{ni}] \cdot R_z^{-1}(\theta) \cdot \begin{bmatrix} R_n & T_n \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \\ 1 \end{bmatrix} = 0, \quad (11)$$

$$\mathbf{R}_n = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_n = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

由于旋转矩阵 \mathbf{R}_n 为正交矩阵, 因此 r_1, r_2, \dots, r_9 等元素满足以下约束条件:

$$\begin{cases} r_1^2 + r_4^2 + r_7^2 = r_2^2 + r_5^2 + r_8^2 = r_3^2 + r_6^2 + r_9^2 = 1 \\ r_1 \cdot r_2 + r_4 \cdot r_5 + r_7 \cdot r_8 = 0 \\ r_3 \cdot r_2 + r_6 \cdot r_5 + r_9 \cdot r_8 = 0 \\ r_1 \cdot r_3 + r_4 \cdot r_6 + r_7 \cdot r_9 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

(11) 式中的 n 表示第 n 个发射器, 即发射器序号, i 为

第 n 个发射器的光平面序号, 取 1 或 2, $\mathbf{R}_z^{-1}(\theta)$ 为光平面转动 θ 角度时光平面系数旋转矩阵, \mathbf{R}_n 与 \mathbf{T}_n 分别为全局坐标系到发射器测量坐标系的坐标转换旋转矩阵和平移矩阵, 即待求的接收器坐标。由于存在各个阶段的误差, 多个平面最终不一定交汇于一点, 将最终解得的坐标值代入 (11) 式, 则方程的值不一定为 0。该方程组可以用 Levenberg-Marquardt 方法^[21]求解。利用 Levenberg-Marquardt 方法求解方程组, 可使得方程的误差平方和最小, 即

$$\mathbf{E} = \sum_{m=1}^n \sum_{i=1}^2 [f_{mi}(D)]^2 = \sum_{m=1}^n \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{bmatrix} a_{mi} & b_{mi} & c_{mi} & d_{mi} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{R}_z^{-1}(\theta) \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R}_m & \mathbf{T}_m \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{bmatrix} \right\}^2 \quad (14)$$

根据文献[22], 待测点三维数据 \mathbf{p} 对测量值 D 的导数可由隐函数的求导法则求出, 即

$$\frac{d\mathbf{p}}{dD} = - \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{p}} \right)^{-1} \cdot \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial D} \quad (15)$$

式中: $\left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{p}} \right)^{-1}$ 为 $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{p}}$ 的广义逆矩阵; $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{p}}$ 为函数 \mathbf{E} 对三维数据 \mathbf{p} 中各个变量求偏导, 即 \mathbf{E} 关于 \mathbf{p} 的雅可比矩阵。

三维数据的协方差矩阵 \mathbf{C} 可根据方差-协方差传播率得出

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 \\ \sigma_{yx}^2 & \sigma_y^2 & \sigma_{yz}^2 \\ \sigma_{zx}^2 & \sigma_{zy}^2 & \sigma_z^2 \end{bmatrix} = \frac{d\mathbf{p}}{dD} \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & & & \\ & \sigma_1^2 & & & & \\ & & \sigma_2^2 & & & \\ & & & \sigma_2^2 & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \sigma_n^2 \\ & & & & & & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \left(\frac{d\mathbf{p}}{dD} \right)^T \quad (16)$$

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (17)$$

式中: σ_p 为测量误差; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为测量值分别在 x, y, z 3 个方向上的测量不确定度; $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ 分别为第 1, 2, \dots, n 台发射器扇面的扫描角度不确定度。 σ_p 越小, 系统的测量不确定度越小, 说明发射器的布局越好。

3 优化算法设计

人工免疫优化算法是一种由遗传算法改进的智能优化算法, 其优势主要体现在种群多样性的提升上^[23]。遗传算法是由单一的生物学进化理论发展而来, 当种群分布不均匀时容易出现陷入局部最优的情况, 而免疫优化算法是基于免疫的概念及其相关理论对遗传算法进行改进, 增加了抗体促进和抑制的步骤, 具有全局收敛性。

室内空间定位系统具有测量范围广、条件方程多、计算量较大的特点, 为了避免陷入局部最优, 故采用人工免疫算法优化发射器布局, 降低计算量, 快速找到在规定测量范围内的合适发射器位置。

3.1 抗体编码与种群初始化

在解决实际问题时, 一般将待求解的目标函数作为抗原, 而问题的解作为抗体。在此问题中, iGPS 发射器的布设站位即可作为抗体。iGPS 发射器的布设区域为三维空间, 设发射器的总数为 n , 第 i 个发射器在空间中的坐标设为 $P_i(x_i, y_i, z_i)$, 则所有发射器的三维坐标即构成了问题的解空间。抗体编码首先要将解空间映射到编码空间中, 发射器的布设范围根据具体的测量环境确定, 假设

$x \in [X_{\min}, X_{\max}]$, 根据精度要求确定搜索步长 K 。对 x 进行二进制编码, 则有

$$2^{l-1} \leq \frac{X_{\max} - X_{\min}}{K} - 1 \leq 2^l, \quad (18)$$

式中: L 为二进制编码的长度; $(X_{\max} - X_{\min})$ 为解的搜索范围; K 为搜索步长。其他的待求参数如 y, z 等也采取与此相同的方式进行编码。每种布局中所有发射器的三维坐标共同组成一个抗体, 然后根据抗原对抗体进行选择。

通过对所有参数进行编码后即可得到单个抗体的编码长度 M , 随机产生 N 个长度为 M 的个体, 由这些个体组成的集合记为初始种群 G_{start} 。

3.1.1 抗体和抗原的亲合度

抗体和抗原之间的亲合度决定了抗体对最优解的接近程度。计算亲合度的关键在于评价函数的构造。在 iGPS 发射器的布局优化问题中, 可以使用 (17) 式的测量误差作为评价函数 $F_i = \sum \sigma_p / k$, 其中 k 为待测点数量, F_i 表示抗体群体中第 i 种布局对应的所有点位置的测量不确定度算术平均值。在免疫优化算法中, 常将最小化问题转化为最大化问题, 则抗原与抗体的亲合度可以表示为

$$A_i = \frac{1}{1 + F_i}, \quad (19)$$

式中: F_i 为第 i 个抗体与抗原间的亲合度。当 $A_i = 1$ 时, 表示抗体 i 与抗原完全匹配; A_i 越趋近于 1, 则抗体 i 与抗原的亲合度越高。

3.1.2 抗体和抗体的亲合度

抗体与抗体间的相似度为两个抗体的相似程度, 通常可以用汉明距离表示两个相同长度的编码在对应位置上不同字符的数量, 那么抗体间相似度可表示为

$$S_{ij} = \frac{L - H_{ij}}{L}, \quad (20)$$

式中: S_{ij} 表示第 i 个和第 j 个抗体之间的相似度; L 为抗体的编码长度; H_{ij} 为第 i 个和第 j 个抗体之间的汉明距离。

抗体浓度表示某抗体及其相似抗体数量在群体中所占比例, 展现了整个群体的种群多样性, 可表示为

$$C_i = \sum_{i,j=1}^N e_{ij} / N, e_{ij} = \begin{cases} 1, & S_{ij} < S_{\text{Thre}} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (21)$$

式中: S_{Thre} 为抗体间的相似度阈值, 为事先确定值; S_{ij} 为抗体 i, j 之间的相似度; e_{ij} 表示两个抗体 i, j 之间是否相似, 取值为 0 和 1, 若相似度大于阈值, 则为 1, 若相似度小于阈值, 则为 0; N 为种群的个体

总数。

3.2 抗体的繁殖度期望

与遗传算法不同的是, 在免疫优化算法中, 为了保持抗体种群的多样性, 抑制抗体群体中的高密度群体, 每个抗体的繁殖概率由它的抗体亲和度和抗原相似度两个因素共同决定, 表示为

$$P_i = \frac{A_i}{C_i}, \quad (22)$$

式中: P_i 为抗体 i 的克隆概率, 即繁殖度期望; A_i 为抗体 i 与抗原的亲合度; C_i 为与抗体 i 相似的抗体在抗体群体中的浓度。

3.3 种群更新

将种群中抗原亲合度最高的几个抗体单独拿出, 加入抗体记忆库中。由群体中剩余的个体组成父代群体。免疫优化算法的种群更新过程与遗传算法相似, 包含选择、交叉、变异等操作。父代种群中的个体由自身的繁殖度期望 P_i 决定是否选择到子代中。选择按照轮盘对赌与精英选择原则进行操作。对于未被选择的个体, 依据交叉概率和变异概率进行交叉和变异操作。

3.4 免疫优化算法的具体实现步骤

基于免疫优化算法的 iGPS 发射器布局优化流程如图 2 所示, 具体步骤如下。

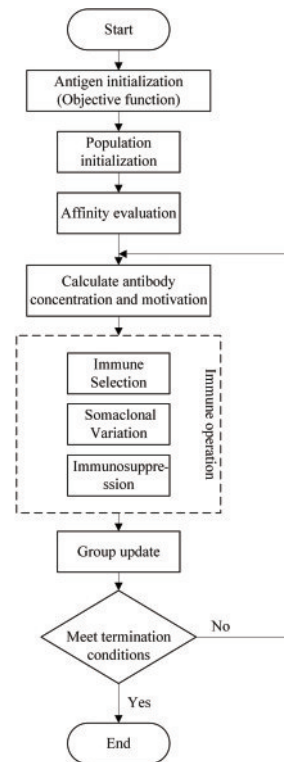


图 2 本文算法的流程

Fig. 2 Flowchart of proposed algorithm

1) 问题初始化与参数设置。将问题的目标优化函数转化为抗体与抗原的亲度函数来确定抗原;初始化算法的各个参数中,设定抗体种群规模、抗体记忆库规模,确定抗体编码长度、最大迭代次数、交叉概率、变异概率、抗体间相似度阈值等固定值参数。

2) 种群初始化。随机生成抗体数量为 N 的抗体初始种群;计算每个抗体与抗原的亲度,然后取出 N_m 个亲度最高的抗体放入抗体记忆库中。

3) 抗体评价。计算抗体种群中每个抗体与抗原的亲度、抗体之间的相似度,进而计算出抗体浓度和每个抗体的克隆概率。

4) 抗体记忆库更新。将抗体种群中的所有抗体根据抗体与抗原的亲度进行降序排列,取出亲度最高的 N_m 个抗体放入抗体记忆库中。

5) 形成父代群体。将抗体种群中的所有抗体依照繁殖度期望值进行降序排列,取出 $(N - N_m)$ 个抗体,组成父代群体。

6) 判断是否满足终止条件。若满足条件,则停止循环,输出最优布设位置;若未满足终止条件,继续下一步操作。在本文算法中,终止条件为抗体繁殖代数,一般设为 50。

7) 种群更新。对步骤 5) 中的父代群体进行选择、交叉、变异等操作,将得到的抗体群体与抗体记忆库相结合构成新的抗体种群,然后转至步骤 3)。

4 仿真结果与分析

4.1 优化效果仿真

为了验证所提出的基于免疫优化算法的 iGPS 发射器布局优化方法,建立相应的仿真系统,对发射器布局优化前后待测目标点的不确定度进行比较。假设发射器的布设区域为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$,场地高度为 7 m ,测量区域为场地中心的 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ 区域。

在测量区域高度小于 3 m 的空间内随机布设 8 个点为待测特征点。

在仿真过程中,发射器内部参数为发射器转轴与空间坐标系 z 轴平行,两个激光扇面与水平面的夹角都为 60° ,两个激光器与水平面的夹角为 90° 。设所有发射器都在理想状态下工作,发射器的转动头匀速逆时针旋转,忽略转动过程中振动与转速不均等引入的系统误差,发射站各个激光平面的测角不确定度根据相关研究设置为 $2''$ 。发射器的布置数量为 4 个,每个测站的有效作用距离为 $4\sim 10\text{ m}$ 。免疫优化算法的相关参数设置如下:抗体种群规模为 50,其中抗体记忆库规模设置为 10,最大迭代次数为 100,相似度阈值为 0.8,交叉和变异的概率分别为 0.6 和 0.05,抗体繁殖终止代数设置为 50。

利用以上仿真环境对 iGPS 系统待测点的测量不确定度进行仿真分析,运用所提优化方法对 iGPS 发射器布局进行优化,优化前的发射器布局选择传统的经验布局,即矩形布局。优化前、后的发射器布局如表 1 所示。优化前目标函数指为 0.784,优化后为 0.890。

iGPS 发射器优化前、后的布局对比如图 3 所示。测量系统在各待测点位置的测量不确定度在仿真系统中由仿真计算得出,各点位置优化前、后的测量不确定度如图 4 所示。

使用免疫优化算法优化后,发射器的站位发生显著变化,目标函数的函数值从 0.784 提升至 0.890,相较于优化前更接近 1,即总体测量不确定度明显减小。从图 4 可以看到,经过发射器站位优化,各待测点位置的测量不确定度明显降低。此仿真结果表明,优化后发射器布局的测量不确定度明显优于传统的经验布局,因此基于免疫优化算法的 iGPS 发射器布局优化方法可有效提高系统的测量精度。

表 1 发射器站位优化前、后的布局

Table 1 Layout of the transmitter before and after optimization

Transmitter	Layout / m	
	Before optimization	After optimization
Transmitter 1	(0, 10, 4)	(1.706, 8.367, 4.119)
Transmitter 2	(10, 10, 4)	(7.397, 7.271, 3.874)
Transmitter 3	(10, 0, 4)	(6.830, 1.481, 3.926)
Transmitter 4	(0, 0, 4)	(1.691, 2.675, 4.135)

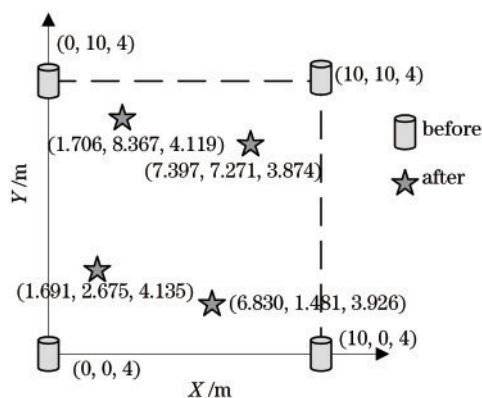


图3 优化前、后的 iGPS 发射器布局

Fig. 3 iGPS transmitter layout before and after optimization

4.2 免疫算法与遗传算法的性能对比

在同样的仿真环境下,分别运用免疫优化算法与遗传算法对 iGPS 发射器站位优化问题进行仿真分析,两种方法采用相同的参数,优化前初始布局采

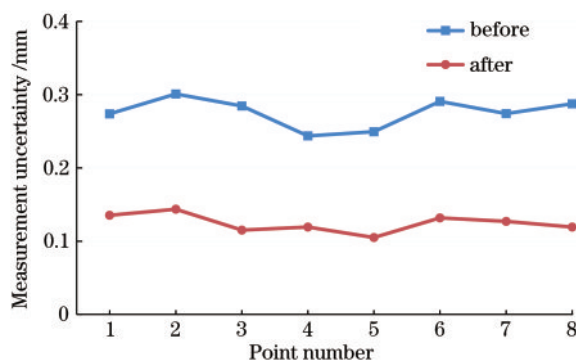


图4 各点位置优化前、后的测量不确定度

Fig. 4 Measurement uncertainty before and after optimization of each point

用与 4.1 节优化效果仿真相同的传统经验布局。采用两种方法优化后的发射器布局如表 2 所示。采用免疫优化算法优化的目标函数值为 0.890,而采用遗传算法优化的目标函数值为 0.872。

表 2 两种算法优化后的发射器布局

Table 2 The layout of transmitter before and after optimization

Transmitter	Layout /m	
	Immune optimization algorithm	Genetic algorithm
Transmitter 1	(1.835, 7.508, 4.779)	(1.337, 8.657, 4.595)
Transmitter 2	(7.456, 7.679, 3.230)	(7.576, 7.563, 3.447)
Transmitter 3	(8.853, 2.453, 3.973)	(6.245, 1.329, 3.823)
Transmitter 4	(1.619, 1.812, 4.364)	(1.587, 1.650, 4.010)

仿真中两种优化算法的收敛曲线如图 5 所示。

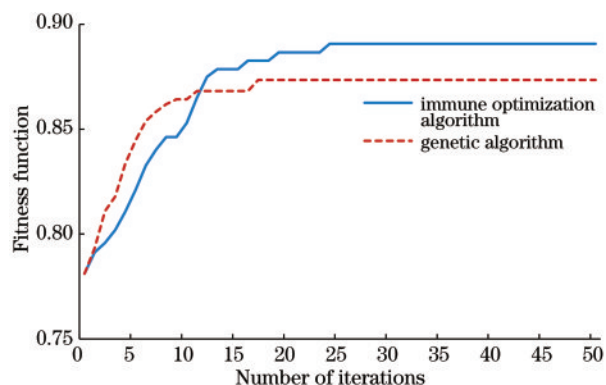


图5 免疫优化算法与遗传算法的收敛曲线对比

Fig. 5 Convergence curve comparison between immune optimization algorithm and genetic algorithm

免疫优化算法的目标函数值比遗传算法高,说明采用免疫优化算法优化后系统测量不确定度更低,采用免疫优化算法优化发射器布局的效果更优。在图 5 中,免疫优化算法的收敛速度与遗传算法相近,在遗传算法收敛停止后,免疫优化算法仍

在继续收敛。最终结果显示,免疫优化算法优化后的最终适应度函数值明显高于遗传算法,使用免疫优化算法优化的 iGPS 发射器布局下所有点的平均测量不确定度不仅远小于优化前的初值,而且远小于遗传算法优化后的平均测量不确定度,达到了布局优化的目的。由此说明,在此问题中,免疫优化算法的全局寻优能力明显优于遗传算法,可以更好地在复杂环境下解决 iGPS 发射器站位布设优化问题。

5 结 论

iGPS 发射器的空间布局对整个测量系统的测量精度具有很大影响。本文研究了 iGPS 测量系统的测量原理,以及待测数据的求解过程,建立了测量系统的测量模型。根据测量系统的测量误差模型,得到待测位置的测量不确定度。并以系统在所有待测点位置的总体测量不确定度最小为原则,设计免疫优化算法进行寻解,达到优化 iGPS 发射器布局的目的。

为了验证所提算法的有效性,设计了由 4 台 iGPS 发射器组成的测量系统,对待测点进行布局优化的仿真分析。通过仿真分析验证了所提算法的有效性及其与其他算法相比的优越性。仿真结果表明,通过所提算法优化的 iGPS 发射器布局的测量精度要明显优于传统经验布局。在此问题中,免疫优化算法的表现也优于遗传算法,虽然它们的收敛速度相近,但是经免疫优化算法优化的 iGPS 发射器布局的测量不确定度明显优于遗传算法,优化效果明显。

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] Xue B, Zhu J G, Yang L H, et al. The application of the wMPS in airplane level measurement [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(8): 22-26.
薛彬, 郝继贵, 杨凌辉, 等. wMPS 系统在飞机水平测量中的应用[J]. *光电工程*, 2014, 41(8): 22-26.
- [3] Ma G Q, Liu L, Yu Z L, et al. Point-cloud splicing technology for large-scale surface topography measurement system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0504001.
马国庆, 刘丽, 于正林, 等. 大尺寸曲面形貌测量系统的点云拼接技术[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0504001.
- [4] Chen D H. Research on digital level measurement of airplane based on indoor GPS [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
陈登海. 基于室内 GPS 的飞机数字化水平测量技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [5] Chen L J, Sun Z L, Jing X S, et al. Research on iGPS-based aircraft components docking technology [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(11): 34-39, 51.
陈良杰, 孙占磊, 景喜双, 等. 基于 iGPS 的飞机部件对接技术研究[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(11): 34-39, 51.
- [6] Li H. Design and implementation of aircraft level measurement based on iGPS and lidar [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
栗辉. 基于 iGPS 和激光雷达的飞机水平测量设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [7] Depenthal C, Schwendemann J. iGPS—a new system for static and kinematic measurements [J]. *Optical 3-D Measurement Techniques IX*, 2009, 1(1/2/3): 131-140.
- [8] Schmitt R, Nisch S, Schönberg A, et al. Performance evaluation of iGPS for industrial applications [C] // 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, September 15-17, 2010, Zurich, Switzerland. New York: IEEE Press, 2010: 1-8.
- [9] 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.
- [10] Hu J Z, Yu X F, Peng P, et al. Layout optimization of three-dimensional coordinate measurement system based on laser multi-lateration [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(1): 0108006.
胡进忠, 余晓芬, 彭鹏, 等. 基于激光多边法的坐标测量系统布局优化[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0108006.
- [11] Wang J D, Sun R K, Zeng X T, et al. Research on base station layout of multi-station and time-sharing measurement by laser tracker [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0404005.
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): 0404005.
- [12] Xiong Z, Zhu J G, Xue B, et al. Typical deployments of workspace measurement and positioning system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(9): 2354-2363.
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.
- [13] Zheng Y Y, Zhu J G, Xue B, et al. Network deployment optimization of indoor workspace measurement and positioning system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(5): 20-26.
郑迎亚, 郝继贵, 薛彬, 等. 室内空间测量定位系统网络布局优化[J]. *光电工程*, 2015, 42(5): 20-26.
- [14] Xiong Z, Yue C, Xue B. Station deployment of workspace measuring and positioning system based on improved adaptive genetic algorithm [J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(4): 561-566.
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.

- [15] Yue C, Xiong Z, Xue B. Station deployment of workspace measuring and positioning system based on simulated annealing particle swarm algorithm[J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(7): 67-73.
岳翀, 熊芝, 薛彬. 基于模拟退火-粒子群算法的 wMPS 布局优化[J]. 光电工程, 2016, 43(7): 67-73.
- [16] Vafae F. Learning the structure of large-scale Bayesian networks using genetic algorithm [C] // Proceedings of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, Vancouver BC Canada. New York, USA: ACM, 2014: 855-862.
- [17] Zhang C, Li Q, Wang W Q, et al. Immune particle swarm optimization algorithm based on the adaptive search strategy[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(1): 125-132.
张超, 李擎, 王伟乾, 等. 基于自适应搜索的免疫粒子群算法[J]. 工程科学学报, 2017, 39(1): 125-132.
- [18] Kang H D, Fan B X, Li Z C, et al. iGPS measurement principle and precision analysis [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012 (3): 12-15.
康海东, 范百兴, 李宗春, 等. iGPS 测量原理及其精度分析[J]. 测绘通报, 2012(3): 12-15.
- [19] Ren Y J, Zhao X, Guo S Y, et al. Path planning control of automated guided vehicle based on workshop measurement positioning system and fuzzy control[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0312003.
任永杰, 赵显, 郭思阳, 等. 基于 wMPS 和模糊控制的 AGV 路径规划控制[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0312003.
- [20] Sun F L, Zhao G, Wang W, et al. Analysis method of iGPS measurement uncertainty spatial distribution [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(1): 174-180.
孙涪龙, 赵罡, 王伟, 等. iGPS 测量不确定度空间分布分析方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(1): 174-180.
- [21] Behling R, Fischer A, Herrich M, et al. A Levenberg-Marquardt method with approximate projections [J]. Computational Optimization and Applications, 2014, 59(1/2): 5-26.
- [22] Zhang Y H, Lin J R, Ren Y, et al. Placement optimization for workshop measurement and positioning system based on genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(5): 746-751.
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.
- [23] Aydin I, Karakose M, Akin E. A multi-objective artificial immune algorithm for parameter optimization in support vector machine [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(1): 120-129.