

DOI: 10.13382/j.jemi.2016.11.006

# 大空间坐标测量网络的精度自适应构建方法\*

张红英 余晓芬 王 标

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院 合肥 230009)

**摘要:**针对重大装备测量中,测量点分散、坐标测量精度要求不尽一致的现实情况,提出了多边法空间坐标测量网络的精度自适应构建方法,能实现快速、低成本地构建同时符合不同测量点不同坐标测量精度要求的测量网络。方法根据测量点的概略坐标及坐标测量精度要求,使用改进的“免疫克隆算法”搜索网络布局,即首先随机生成若干组初始网络布局,然后计算初始布局测量网络下各测量点的理论坐标测量精度与要求的坐标测量精度之间的差值,并在差值较小的若干组网络布局的基础上生成新的初始布局,重复上述过程,直至所得布局测量网络能满足所有测量点的坐标测量精度要求。所提方法提高了网络的构建效率,降低了网络的构建成本。

**关键词:** 激光测距; 多边法; 布局优化; 免疫克隆算法

**中图分类号:** TN249; TH721      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.4099

## Precision adaptive building method for large scale coordinate measuring network

Zhang Hongying Yu Xiaofen Wang Biao

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** There are always lots of scattered points need to be measured during the measurement of major equipment. And sometimes the requirements of measurement accuracy of the points are different. To build the coordinate measuring network fast and at low cost under the condition of meeting the points' measurement accuracy requirements, the precision adaptive building method is proposed. The method searches optimization network layout by using improved immune clone algorithm. Specifically, a number of initial network layouts randomly is generated, the differences of the theory measurement accuracy and the required measurement accuracy of the points under the networks with the initial layouts are calculated, the new initial network layouts on the basis of the network layouts owning small differences are generated and the above processes are repeat until the optimization network meets the requirements of measurement accuracy of the all points. The proposed method can improve the efficiency and reduce the cost of network's construction.

**Keywords:** laser ranging; multi-lateration; layout optimization; immune clone algorithm

## 1 引言

重大装备技术的进步离不开先进大尺寸测量手段的支持<sup>[1]</sup>。基于多边法的大空间坐标测量网络由3个以上测量基站组成<sup>[2]</sup>,依靠距离约束解算

测量点坐标。由于激光测距可达到很高的测量精度,因此多边法空间坐标测量网络具有很好的精度潜力,是大空间坐标尺寸测量领域的一个重要研究方向。重大装备的测量具有尺度大、测量点分散、精度要求高等特点<sup>[3]</sup>,通常需要在现场条件下构建

收稿日期: 2016-07      Received Date: 2016-07

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51275149)资助项目

测量网络。但实际操作中,测量网络的构建具有一定的盲目性。这是由于测量点的坐标测量精度与测量基站的数量及安装位置有关<sup>[4]</sup>,当测量点数量较多时难以较为合理、准确的确定这些参数。当测量点坐标测量精度要求不一致时,确定相关参数就显得更为困难。从文献[5-9]来看,多测量点条件下的经纬仪、室内空间定位系统的布站优化上已有一定的研究成果,但未涉及测量点坐标测量精度要求不一致的情况;而基于多边法的坐标测量研究中,尚未有从测量点分布及坐标测量精度要求出发优化测量基站数量及安装位置的成果。

为便于表述,称多测量点且测量点坐标测量精度要求不一致的条件下,大空间坐标测量网络的测量基站数量及安装位置优化问题为精度适应问题。本文首先研究了问题的数学模型,然后对模型的求解进行了探讨,以期在网络构建中测量基站的安装提供科学依据,提高网络构建的效率,降低网络构建的成本。

## 2 精度适应问题模型的建立

为定量研究精度适应问题,本文首先将其转化为数学优化问题,并构建优化目标函数,然后针对优化问题的求解展开进一步研究。

### 2.1 精度适应问题的数学表述

精度适应问题是在测量点的概略坐标及坐标测量精度要求已定的条件下,研究如何快速确定需要使用的最少测量基站数量及此时测量基站的安装位置,用于指导构建同时满足各测量点测量精度要求的空间坐标测量网络。实际任务中,测量点的概略坐标可以选择一定的参照物并结合装备的设计参数大致确定,坐标测量精度要求则可根据装备的设计指标来确定。此外,问题条件还应包含测量基站的可选安装范围及测距精度。实际上,除测量基站的数量、安装位置和测距精度外,影响测量点坐标测量精度的因素还有测量基站的坐标标定精度、旋转偏心、震动等。为简化问题模型,本文暂不考虑这些因素,这是因为这些因素的影响会部分的表现测距精度的降低。至此,精度适应问题可表述如下。

在空间直角坐标系  $o-xyz$  下,给定测量基站的坐标取值范围:

$$\begin{cases} x_M \in [x_d, x_u] \\ y_M \in [y_d, y_u] \\ z_M \in [z_d, z_u] \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x_M, y_M, z_M$  为测量基站的坐标分量,  $n$  个测量点的概略坐标为  $(x_{p_j}^0, y_{p_j}^0, z_{p_j}^0)$ , 及要求的测量点坐标测量精度为  $\sigma_{p_j}^0 (j = 1, 2, \dots, n)$ , 测量基站的测距精度为  $\sigma_0$ , 试确定构建同时满足各测量点坐标测量精度要求的测量网络需要使用的最少测量基站数量及此时测量基站的安装位置。

### 2.2 精度适应问题的目标函数

精度适应问题可视为一类数学优化问题,其核心是测量基站安装位置即网络布局的优化。为此首先对网络布局与测量点坐标测量精度之间的关系进行建模,在此基础上再构建精度适应问题的优化目标函数。

考虑用  $m$  台测距精度均为  $\sigma_0$  的测量基站确定测量点的坐标,测量基站的坐标为  $(x_{M_i}, y_{M_i}, z_{M_i})$ ,  $i = 1, 2, \dots, m (m \geq 3)$ , 测量点的坐标记为  $\mathbf{X} = (x, y, z)$ , 要求的坐标测量精度为  $\sigma_p^0$ 。设第  $i$  台测量基站与测量点之间的距离为  $d_i$ , 则可以得到  $m$  个形式如下的测距方程:

$$(x - x_{M_i})^2 + (y - y_{M_i})^2 + (z - z_{M_i})^2 = d_i^2 \quad (2)$$

由于式(2)是非线性方程,需要采用泰勒公式进行线性化展开后再使用最小二乘法进行计算。设测量点坐标的近似值为  $\mathbf{X}^0 = (x_0, y_0, z_0)^T$ , 相应的偏差为  $\Delta \mathbf{X} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ , 则存在下列关系:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}^0 + \Delta \mathbf{X} \quad (3)$$

线性化后的测距方程为:

$$\mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{X} = L \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{A}$  为测距值对测量点坐标偏导数的雅克比矩阵,  $L$  为常数项。根据最小二乘估计得到的测量点坐标为:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{L} + \Delta \mathbf{X} \quad (5)$$

由最小二乘估计量的精度估计原理可知测量点的坐标测量精度为:

$$\sigma = (\text{trace}[(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}])^{1/2} \cdot \sigma_0 \quad (6)$$

式中:  $\text{trace}(\cdot)$  表示求矩阵的迹。

精度适应问题的主要优化目标是使多边法空间坐标测量网络满足测量点的坐标测量精度要求。

因此,本文将精度适应问题的目标函数设定为:

$$f_j(x) = (\text{trace}[(\mathbf{A}_j^T \mathbf{A}_j)^{-1}])^{1/2} \cdot \sigma_0 - \sigma_{P_j}^0 \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{A}_j$  为多边法空间坐标测量网络下第  $j$  个测量点的雅克比矩阵,  $\sigma_{P_j}^0$  为第  $j$  个测量点要求的坐标测量精度,  $j = 1, 2, \dots, n$ 。

### 3 精度适应问题的求解

在第 2 节中,精度适应问题被转化成数学优化问题,具体来说是一种约束优化问题,约束条件则是测量基站的坐标取值范围。由于目标函数较为复杂,因此难以采用传统算法进行优化。智能优化算法则通过模拟生物智能或物理现象采用一定的搜索方法寻找问题的最优解<sup>[10-11]</sup>,常用的智能优化算法有蚁群算法、遗传算法、模拟退火算法、禁忌搜索算法等。其中蚁群算法和禁忌搜索算法适合于求解路径规划、过程控制一类的问题<sup>[12-15]</sup>;遗传算法则需要对问题的解空间进行离散化编码<sup>[16-17]</sup>;模拟退火算法需要选择合适的冷却进度表<sup>[18]</sup>。本文所述精度适应问题与路径规划、过程控制问题有较大区别;而离散化后的解空间较大,使得遗传算法搜索时间较长,同时较容易出现陷入局部最优的情况;又由于测量基站数量不是固定的,难以确定合适的冷却进度表。因此,对于精度适应问题不宜采用上述算法。克隆免疫算法<sup>[19]</sup>是另一种智能算法,它不需要对解空间进行离散化处理,对于求解精度适应问题具有一定的优势。

本文利用免疫克隆算法求解精度适应问题的思路如下:从只使用 3 台测量基站来构建空间坐标测量网络开始,利用免疫克隆算法进行求解,若优化所得布局测量网络能够使得式(7)中所有目标函数均为负值,则将优化结果输出;否则增加一台测量基站,并重新进行求解,直至优化结果满足要求。实际应用中发现,直接采用免疫克隆算法求解精度适应问题时,会出现克隆选择操作中非支配个体过少甚至没有非支配个体从而导致求解非正常中止的情况。为此,本文引入误差指数的概念,以改进克隆选择操作;此外,为加快算法的求解速度,本文将每一次迭代过程中表现最好的抗体保留了下来,并使其参与到下一代抗体的优化筛选中,下面给出求解方法。

#### 3.1 误差指数

由于多边法空间坐标测量网络下测量点的坐标测量精度不尽相同,为表征测量网络的精度情况,本文取所有测量点目标函数的最大值作为评判指标,并称之为误差指数,用数学语言表述如下:

$$e = \max[f_j(x)] \quad (8)$$

式中:  $j = 1, 2, \dots, n$ 。显然,当误差指数为负值时,网络的坐标测量精度能满足所有测量点的要求。

#### 3.2 抗体

在免疫克隆算法中抗体是指问题的候选解,具体到本文中抗体就是指网络布局。当测量基站的数量为  $m$  台时,抗体定义为:

$$\mathbf{b} = (x_{M1}, y_{M1}, z_{M1}, \dots, x_{Mm}, y_{Mm}, z_{Mm}) \quad (9)$$

根据式(8)可计算抗体对应的误差指数。

#### 3.3 免疫克隆算法步骤

1) 设定测量基站台数变量  $m = 3$ 。

2) 抗体群初始化。设定迭代计数变量  $t = 0$  及最大迭代次数  $T$ ,随机产生规模为  $N$  的抗体群:

$$\mathbf{B} = \{\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_N\} \quad (10)$$

3) 免疫克隆操作。采用相同的比例  $m_c$  对抗体群  $\mathbf{B}$  进行克隆操作,得到抗体群:

$$\mathbf{B}' = \{\mathbf{b}_1^1, \mathbf{b}_1^2, \dots, \mathbf{b}_1^{m_c}\} + \dots + \{\mathbf{b}_N^1, \mathbf{b}_N^2, \dots, \mathbf{b}_N^{m_c}\} \quad (11)$$

4) 免疫基因操作。保留抗体群  $\mathbf{B}'$  的第一个抗体,对其余抗体采用克隆变异操作,得到抗体群:

$$\mathbf{B}'' = \{\mathbf{b}_1^1, \mathbf{b}_1'^2, \dots, \mathbf{b}_1'^{m_c}\} + \dots + \{\mathbf{b}_N^1, \mathbf{b}_N'^2, \dots, \mathbf{b}_N'^{m_c}\} \quad (12)$$

5) 克隆选择操作。计算抗体群  $\mathbf{B}''$  中每个抗体的误差指数,并按误差指数对抗体进行升序排列,得到抗体群  $\mathbf{B}'''$ ;将抗体群  $\mathbf{B}'''$  的前  $N$  个抗体依次赋值给抗体群  $\mathbf{B}$ 。

6) 若  $t < T$ ,更新迭代计数变量  $t = t + 1$ ,然后转到步骤 3)。

7) 若抗体群  $\mathbf{B}$  的第一个抗体对应的误差指数为负值,则将该抗体作为最终的优化结果并输出,终止计算;否则,更新测量基站台数变量  $m = m + 1$ ,然后转到步骤 2)。

#### 3.4 算法时间复杂度分析

算法时间复杂度的本质是算法的执行时间,在

分析过程中,最关键的是得出算法中执行次数最多的语句<sup>[20]</sup>。可以看出,免疫克隆算法中步骤 3) ~ 5) 的执行次数相同,但由于涉及求逆运算,步骤 5) 的耗时最多。

为简化分析,假定式(7)计算耗时为 1,则算法耗时为:

$$T_c(m, n) \approx m_c \cdot N \cdot n \cdot T \cdot (m - 2) \quad (13)$$

式中:  $m$  为算法所得优化结果的测量基站数量,  $n$  为参与优化的测量点个数,  $m_c$  免疫克隆比例,  $N$  为初始抗体群的规模,  $T$  为最大迭代次数。显然,算法耗时分别与  $m$ 、 $n$  正线性相关。

## 4 仿真实例

为验证所提方法的可行性,在计算机型号为 Lenovo G510,软件版本为 MATLAB 7. 11. 0 的环境下进行了 3 组构建大空间坐标测量网络的仿真实验。实验中,24 个测量点的概略坐标和三组相应的坐标测量精度要求分别如表 1 所示,测量基站的测距精度  $\sigma_0 = 1.0 \text{ mm}$ ,安装范围  $x_M \in [0, 50] \text{ m}$ 、 $y_M \in [0, 30] \text{ m}$ 、 $z_M \in [8, 10] \text{ m}$ ,初代抗体群的规模  $N = 100$ ;克隆比例  $m_c = 5$ ;最大迭代次数  $T = 15$ 。

表 1 测量点的概略坐标及要求的坐标测量精度

Table 1 The general coordinates and accuracy requirements of the measurement points

概略坐标/m	(6,6,1)	(6,24,1)	(6,6,5)	(6,24,5)	(19,6,1)	(19,24,1)	(19,6,5)	(19,24,5)
精度要求 1/mm	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
精度要求 2/mm	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
精度要求 3/mm	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
概略坐标/m	(21,6,1)	(21,24,1)	(21,6,5)	(21,24,5)	(29,6,1)	(29,24,1)	(29,6,5)	(29,24,5)
精度要求 1/mm	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
精度要求 2/mm	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
精度要求 3/mm	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
概略坐标/m	(31,6,1)	(31,24,1)	(31,6,5)	(31,24,5)	(44,6,1)	(44,24,1)	(44,6,5)	(44,24,5)
精度要求 1/mm	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
精度要求 2/mm	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
精度要求 3/mm	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6

每组仿真实验重复进行了 30 次,相应地分别得到了 30 次优化结果。第 1 组实验(精度要求 1)优化结果中测量基站的数量均为 4 台,第 2 组实验(精度要求 2)优化结果中测量基站的数量均为 5 台,第 3 组实验(精度要求 3)优化结果中测量基站的数量均为 6 台,每组实验中优化得到的测量基站安装位置则有所不同,这在很大程度上说明了所提

方法给出的优化结果使用的测量基站数量最少。表 2 ~ 4 分别给出了各组实验中最后一次实验的优化结果。对于表 1 中测量点,3 个经验布局的误差指数如表 5 所示。可以发现即使在已经确定测量基站数量的情况下,也难以依靠经验得到同时符合各测量点坐标测量精度要求的布局。

表 2 优化结果 1

Table 2 The optimization result 1

测量基站编号	M1	M2	M3	M4
安装位置/m	(15.8,5.0,9.8)	(19.9,27.8,10.0)	(36.1,1.5,9.1)	(38.2,24.3,8.5)
误差指数/mm	-0.05			

表 3 优化结果 2

Table 3 The optimization result 2

测量基站编号	M1	M2	M3	M4	M5
安装位置/m	(7.2,21.5,9.8)	(9.4,3.5,9.8)	(20.9,23.7,8.4)	(31.0,2.0,9.8)	(48.6,21.1,8.6)
误差指数/mm	-0.13				

表 4 优化结果 3

Table 4 The optimization result 3

测量基站编号	M1	M2	M3	M4	M5	M6
安装位置/m	(8.5,27.3,9.6)	(9.7,3.5,9.7)	(28.2,24.8,9.6)	(32.4,3.2,8.2)	(43.7,2.9,10.0)	(46.9,25.5,9.5)
误差指数/mm	-0.08					

表 5 经验布局下的误差指数

Table 5 Error indices in experience layouts

测量基站编号	M1	M2	M3	M4	M5	M6	误差指数/mm
精度要求 1 对应的布局	(17,2,10)	(17,28,10)	(33,2,10)	(33,28,10)			0.70
精度要求 2 对应的布局	(5,2,10)	(5,28,10)	(21,15,10)	(31,2,10)	(31,28,10)		1.08
精度要求 3 对应的布局	(4,2,10)	(4,28,10)	(28,2,10)	(28,28,10)	(49,2,10)	(49,28,10)	0.02

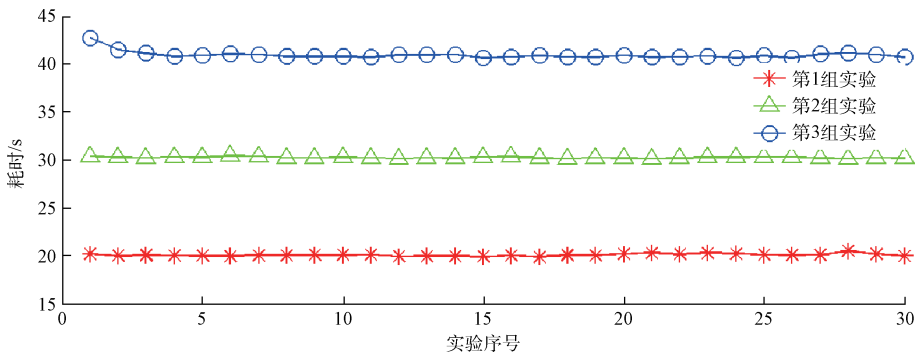


图 1 各组实验的计算耗时情况

Fig. 1 Time consuming of the experiments

另外,三组实验计算耗时情况如图 1 所示,可以看出耗时与优化结果中测量基站的数量正线性相关,与算法的时间复杂度分析结果相符。

## 5 结 论

多边法空间坐标测量网路下测量基站的数量及安装位置对测量点的坐标测量精度有较大影响,本文定量分析了测量基站安装位置与测量点坐标测量精度之间的关系,并在此基础上提出了以改进的免疫克隆算法为核心的精度自适应构建方法。为验证方法的可行性,对所提方法进行了仿真实验。实验结果表明所提方法能够在同时满足各测量点坐标测量精度要求的条件下,快速确定构建坐标测量网络所需的最少测量基站数量及此时测量基站的安装位置。

此外,本文所建模型对实际问题进行了简化。因此按所提方法构建网络时,实际坐标测量精度会有所降低。为此,可在求解测量基站数量及安装位

置时预留一定的精度余量,即计算时降低测量基站的测距精度。综上所述,本文多提方法对于大空间坐标测量网络的构建具有重要的指导意义,减少了网络构建过程中测量基站安装的盲目性,提高了测量网络的构建效率,降低了测量网络的构建成本。

## 参考文献

[1] 叶声华, 郝继贵, 张滋黎, 等. 大空间坐标尺寸测量研究的现状与发展[J]. 计量学报, 2008, 29(4A): 1-6.  
 YE SH H, ZHU J G, ZHANG Z L, et al. Status and development of large-scale coordinate measurement research[J]. Acta Metrologica Sinica, 2008, 29(4A): 1-6.

[2] 胡进忠, 余晓芬, 刘媛媛. 基于激光多边法的坐标测量系统自标定研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(2): 130-137.  
 HU J ZH, YU X F, LIU Y Y. Research of self-calibration of 3D coordinate measurement system based on laser multi-lateration [J]. Journal of Electronic

- Measurement and Instrumentation, 2014, 28 (2): 130-137.
- [3] 朱永国,黄翔,李泷杲,等. 飞机装配高精度测量控制网精度分析与构建准则[J]. 中国机械工程, 2014, 25(20): 2699-2704.  
ZHU Y G, HUANG X, LI SH G, et al. Precision analysis and layout rules of surveying control network for aircraft assembly[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(20): 2699-2704.
- [4] SHARP I, YU K, GUO Y J. GDOP analysis for positioning system design[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology (S0018-9545), 2009, 58 (7): 3371-3382.
- [5] 郭丽华,朱元昌,邸彦强. 基于遗传算法的光电经纬仪布站优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4): 741 - 746.  
GUO L H, ZHU Y CH, DI Y Q. Optimization of photoelectric theodolite station distribution based on GA[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4): 741-746.
- [6] 周虎,孙艳秋,姜学超. 大尺寸交会测量系统传感器布站优化分析[J]. 宇航计测技术, 2014, 34(2): 13-17.  
ZHOU H, SUN Y Q, JIANG X CH. Analysis of optimization of sensor stations in intersection system for large scale measurement [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2014, 34(2): 13-17.
- [7] 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.  
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.
- [8] 范百兴,李广云,李佩臻,等. 激光干涉测量三维点坐标的 PDOP 模型研究和应用[J]. 测绘通报, 2015, 11: 28-31.  
FAN B X, LI G Y, LI P Z H, et al. PDOP model of laser interferometry 3D trilateration network [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(11): 28-31.
- [9] AGUADO S, SANTOLARIA J, SAMPER D, et al. Review: Influence of measurement noise and laser arrangement on measurement uncertainty of laser tracker multilateration in machine tool volumetric verification[J]. Precision Engineering (S0141-6359), 2013, 37(4): 929-943.
- [10] 高海昌,冯博琴,朱利. 智能优化算法求解 TSP 问题[J]. 控制与决策, 2006, 21(3): 241-247.  
GAO H CH, FENG B Q, ZHU L. Reviews of the meta-heuristic algorithms for TSP[J]. Control and Decision, 2006, 21(3): 241-247.
- [11] 常洪浩,冯祖仁,张兆军,等. 一种智能优化算法解质量评价方法[J]. 控制与决策, 2013, 28(11): 1735-1740.  
CHANG H H, FENG Z R, ZHANG Z J, et al. A method for the evaluation of solutions obtained from intelligent optimization algorithms [J]. Control and Decision, 2013, 28(11): 1735-1740.
- [12] 罗慧,蹇兴亮,卢伟. 基于动态蚁群算法的模拟电路最优测点选择[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(10): 2231-2237.  
LUO H, JIAN X L, LU W. Optimal test node selection based on dynamic ant colony algorithm for analog circuit[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(10): 2231-2237.
- [13] 史宝会,刘海燕. 一种基于改进蚁群优化算法的 WSNs 路由协议[J]. 中国测试, 2015, 41(9): 106-109.  
SHI B H, LIU H Y. A novel improved ant colony optimization-based routing protocol in wireless sensor networks [J]. China Measurement & Test, 2015, 41(9): 106-109.
- [14] 梁旭,刘才慧. 基于混合粒子群算法的在线检测路径规划[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(12): 30-34.  
LIANG X, LIU C H. Path planning for on machine verification system based on hybrid particle swarm optimization algorithm [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(12): 30-34.
- [15] 雷小康,刘明雍,闫茂德,等. 一种移动机器人的禁忌搜索自主导航算法[J]. 控制与决策, 2011, 26(9): 1310-1314.  
LEI X K, LIU M Y, YAN M D, et al. Tabu search based autonomous navigation algorithm for mobile robot[J]. Control and Decision, 2011, 26(9): 1310-1314.
- [16] 乔玉晶,王浩然,赵燕江. 大尺寸曲面零件的双目视觉测量网络规划研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4): 913-918.  
QIAO Y J, WANG H R, ZHAO Y J. Study on binocular vision measurement network layout for large curved surface parts[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(4): 913-918.
- [17] 王娇. 基于人工免疫算法的传感器节点布置策略[J]. 电子测量技术, 2015, 38(6): 97-99.

WANG J. Layout strategy based on artificial immune algorithm sensor nodes [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(6): 97-99.

[18] 石利平. 模拟退火算法及改进研究[J]. 信息技术, 2013, 37(2): 176-178.

SHI L P. Research on simulated annealing algorithm and improvement [J]. Information Technology, 2013, 37(2): 176-178.

[19] 焦李成, 尚荣阳, 马文平, 等. 多目标优化免疫算法、理论和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 67-75.

JIAO L CH, SHANG R Y, MA W P, et al. Multi Objective Optimization Immune Algorithm, Theory and Application [M]. Beijing: Science Press, 2010: 67-75.

[20] 刘怀愚, 朱昌杰, 李璟. 时间复杂度的几种计算方法[J]. 电脑知识与技术, 2011, 7(19): 4636-4638.

LIU H Y, ZHU CH J, LI J. Several calculation methods of time complexity [J]. Computer Knowledge and Technology, 2011, 7(19): 4636-4638.

## 作者简介

张红英, 1990 年出生, 现为合肥工业大学博士研究生, 主要研究方向为空间大尺寸测量及算法分析。

E-mail: zhang\_hongying8899@163.com

Zhang Hongying was born in 1990, Ph. D. candidate of Hefei University of Technology. His present research interests include large scale measurement and algorithm analysis and so on.

余晓芬, 1954 年出生, 毕业于合肥工业大学, 现为合肥工业大学教授。主要研究方向为现代检测技术和空间大尺寸测量。

E-mail: yuxiaofen99@126.com

Yu Xiaofen born in 1954, graduated from Hefei University of Technology, professor of Hefei University of Technology. Her present research interests include modern measuring technology and large scale measurement and so on.

## 是德科技在 2016 年德国慕尼黑电子展上展示诸多创新解决方案

为汽车、能源、嵌入式设计、无线通信和物联网应用保驾护航

是德科技公司 (NYSE: KEYS) 日前宣布在 2016 年德国慕尼黑电子展 (www.electronica.de) 上展示多种创新的电子设计、验证和测试解决方案。本届展会于 2016 年 11 月 8 日至 11 日在德国慕尼黑会展中心举行。

自 1939 年以来, 是德科技的设计和测试解决方案一直在为电子和通信行业的发展提供支持。

77 年来, 是德科技依靠其对技术的专注和对产业深入洞察, 为如下行业 (包括但不限于) 提供综合性解决方案和测量服务, 助力从业者将产品快速推向市场, 在成本与质量之间找到完美的平衡, 赢得消费者信赖:

- 汽车和能源
- 嵌入式设计
- 无线通信
- 物联网

是德科技行业领先的专家参加本次电子展, 重点探讨当下面临的测量挑战, 并讲解最新的解决方

案如何帮助工程师在各自领域中保持领先。这些解决方案包括:

- X 系列信号分析仪——是德科技最先进的系列产品, 且配有最广泛的特定应用软件, 适用于从完全开放的实时分析到低成本基础测量, 从复杂的故障诊断到一键式测量等各种应用

- Infiniium S 系列示波器——实现优异测量的新标杆, 拥有 500 MHz 至 8 GHz 的测量带宽, 以及业内最佳的信号完整性: 10 位 ADC、低噪声前端、超稳时基、硬件信号处理, 以及灵敏的深存储器

- FieldFox 手持式射频和微波分析仪——让您满怀信心进行测量, 覆盖 4 GHz 到 50 GHz 频率, 利用高达 50 GHz 的实时频谱分析 (RTSA) 功能捕获每一个信号

- 先进设计系统——全球领先的电子设计自动化软件, 主要用于射频、微波和高速数字应用。该系统一直引领着各种先进技术的创新和商业化应用, 例如 X 参数和 3D EM 仿真器。