

# 一种现场大尺寸测量精度的评价方法

张福民 曲兴华 戴建芳 叶声华

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 针对现场全面评价大尺寸测量仪器精度的特殊性,提出了一种采用多仪器站多控制点的精度评价方法。基于四元数的空间数据配准,将多仪器站的测量数据统一到全局坐标系下,基于控制点坐标不变约束,对测量值进行统计得到测量不确定度,并从中提取仪器内部各传感器单元分量的不确定度。利用多传感器信息融合技术求得最优控制点,减小坐标转换误差对结果的影响。以激光跟踪仪为例进行了仿真和现场实验,结果表明,该方法评价测距和测角不确定度的误差可分别降至  $1\ \mu\text{m}$  和  $0.1''$  以内。

**关键词** 光学测量; 大尺寸测量; 精度评价; 多传感器融合; 激光跟踪仪

**中图分类号** TB92      **文献标识码** A      **doi:** 10.3788/AOS20082811.2159

## A Method of Precision Evaluation for Field Large-Scale Measurement

Zhang Fumin Qu Xinghua Dai Jianfang Ye Shenghua

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** A method of precision evaluation for field large-scale measurement instruments is proposed with multi-instrument stations and multi-reference points. The measured data from multi-instrument stations are unified in the global coordinate system using spatial data registration based on quaternion. The measurement uncertainty is obtained by statistics of measurement values based on controlling points coordinate invariable constraint, so that the uncertainty of each sensor component is acquired. The optimal controlling points are calculated by multi-sensors information fusion technique, and the effect of coordinate transform error is decreased. Taking laser tracker as an example, the simulation and field experiments show that the uncertainty error of range and angle are decreased to  $1\ \mu\text{m}$  and  $0.1''$ , respectively.

**Key words** optical measurement; large-scale measurement; precision evaluation; multi-sensor fusion; laser tracker

## 1 引 言

目前常规尺寸的精度评价体系已成熟,大尺寸测量发展较晚,其精度评价体系也不完善<sup>[1]</sup>,而越来越多的装配、质量控制、逆向工程等领域迫切需要解决大型几何量测量的难题<sup>[2,3]</sup>。目前常用的大尺寸测量仪器有激光跟踪仪<sup>[4,5]</sup>、摄影测量系统<sup>[6,7]</sup>和经纬仪等。要对这些测量仪器进行验收或确认该仪器是否满足具体测量任务时,首先需要确定仪器内部各传感器单元的不确定度模型。常规尺寸的精度评价方法不适于大尺寸,而具体分析各项误差源的解

析法对于大尺寸测量,现场温度梯度等误差源较多,分析过于繁杂,且多数方法只能给出最终笛卡尔坐标系下各坐标轴的不确定度。另外,仪器生产厂家给出的精度指标数值规格是在较理想的实验室环境下得到的,而工厂现场使用时精度往往受到多种因素影响,很难达到实验室规格指标,不能反映真实条件下使用仪器得到的性能。这样容易出现按照理想指标满足测量任务,而在现场测量误差增加,导致测量任务失败。

基于大尺寸测量仪器精度评价的重要性和难

**收稿日期:** 2008-03-10; **收到修改稿日期:** 2008-05-06

**基金项目:** 国家自然科学基金(50575158, 60723004)和全国博士学位论文作者专项资金(200537)资助课题。

**作者简介:** 张福民(1982—),男,博士研究生,主要从事测试计量技术及仪器等方面的研究。

E-mail: zhangfumin@tju.edu.cn

**导师简介:** 曲兴华(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事测试计量技术及仪器等方面的研究。

E-mail: xinghuaq@sina.com

点,国内外相关研究人员已投入到这项研究中<sup>[8,9]</sup>。本文以激光跟踪仪为例,基于统计法给出各个测量单元的 uncertainty,更加全面地评价了仪器性能,适合现场应用。

## 2 评价方法

常采用仪器在单测量站点多次测量多控制靶点,然后统计求取标准差的方法评价仪器传感器单元精度。但对于大尺寸测量仪器,测量范围较大,一个站点不足以描述现场整体测量范围性能<sup>[10]</sup>。因此本文采用一个仪器从多测量站点测量多个控制靶点的方法评价测量仪器的 uncertainty,在大范围空间内固定多个被测点,测量仪器多次移站,测量这些固定靶标,基于控制点坐标不变的约束,理论上每个站测得的控制点坐标测量值应相同。但由于 uncertainty 的存在,使得测量值存在差异,对这种差异进行统计就反映了仪器的现场 uncertainty。该方法不追究其 uncertainty 引起的具体因素,综合考虑包括操作人员、环境条件、反射器和测量仪器本身等各方面引起的 uncertainty,适于评价现场测量 uncertainty。

设有  $n_T$  个仪器测量站,  $n_P$  个靶点。仪器搬到不同的站点后,测量坐标系发生变化,需要转换到统

一坐标系下才能进行统计。坐标转换公式为

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}\mathbf{M} + \mathbf{T}, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{R}$  为转换矩阵,即为正交矩阵,其 9 个元素满足正交约束,因此只是 3 个旋转角  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  的函数。 $\mathbf{T}$  为平移向量,  $\mathbf{F}$  为全局坐标系下的控制点测量值,  $\mathbf{M}$  为控制点测量数据。一般定义某一个站的坐标系为全局坐标系,其余站点的控制点测量数据为局部坐标,都通过(1)式转换到全局坐标系下。旋转矩阵和平移向量共有 6 个未知数,至少测量 3 个公共点,列出非线性方程组求解。由于测量误差的存在,必然存在残差,因此一般多测量一些公共点,按残差平方和最小原则列出目标函数为

$$e(\alpha, \beta, \gamma, t_1, t_2, t_3) = \sum \| \mathbf{F} - (\mathbf{R}\mathbf{M} + \mathbf{T}) \|^2. \quad (2)$$

本文利用基于四元数的坐标系转换方法求解(2)式,进行全局空间配准。在最优转换时,两组点应有相同的重心。利用这一约束条件,可以先将两组坐标数据重心化,避免求解平移向量。

重心坐标分别为  $\bar{\mathbf{F}} = \sum \mathbf{F}/n_P$ ,  $\bar{\mathbf{M}} = \sum \mathbf{M}/n_P$ , 重心化后的坐标分别为  $\mathbf{F}_C = \mathbf{F} - \bar{\mathbf{F}}$ ,  $\mathbf{M}_C = \mathbf{M} - \bar{\mathbf{M}}$ 。

$$\text{令 } S_{ab} = \sum \mathbf{M}_C \mathbf{F}_C^T$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} S_{xx} + S_{yy} + S_{zz} & S_{yz} - S_{zy} & S_{zx} - S_{xz} & S_{xy} - S_{yx} \\ S_{yz} - S_{zy} & S_{xx} - S_{yy} - S_{zz} & S_{xy} + S_{yx} & S_{zx} + S_{xz} \\ S_{zx} - S_{xz} & S_{xy} + S_{yx} & S_{yy} - S_{xx} - S_{zz} & S_{yz} + S_{zy} \\ S_{xy} - S_{yx} & S_{zx} + S_{xz} & S_{yz} + S_{zy} & S_{zz} - S_{xx} - S_{yy} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

求解  $\mathbf{P}$  的特征值和特征向量,其中最大特征值对应的特征向量为最佳四元数  $q$ ,即可按(3)式计算  $\mathbf{R}$ :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

然后求解平移向量

$$\mathbf{T} = \mathbf{F}_C - \mathbf{R}\mathbf{M}_C. \quad (5)$$

提取总残差则可给出笛卡尔各坐标轴的总 uncertainty,还可从残差中提取需要的传感器分量,给出内部传感器的 uncertainty。本文以激光跟踪仪为例。激光跟踪仪是大尺寸测量领域应用广泛的高精度仪器,其内部有一个激光干涉测距单元可测量到被测目标的距离  $l$ ,两个测角单元可测量相对被测目标的水平角  $\alpha$  和垂直角  $\beta$ ,即球坐标  $\boldsymbol{\theta} = (l, \alpha, \beta)^T$ ,再转换为笛卡尔坐标系下的三坐标:

$$\mathbf{m} = f(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} l \cos \alpha \sin \beta \\ l \sin \alpha \sin \beta \\ l \cos \beta \end{bmatrix}, \quad (6)$$

需评价这三个传感器单元的精度指标是否满足精度规格:

$$\begin{aligned} l &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \\ \alpha &= \arctan(y/x), \\ \beta &= \arccos(z/l), \end{aligned} \quad (7)$$

按(7)式从残差中提取测长残差  $\epsilon_l$ 、测水平角残差  $\epsilon_\alpha$  和测垂直角残差  $\epsilon_\beta$ 。

进而由残差求得各传感器单元的测量不确

定度：

$$\begin{aligned}
 U_l &= \sqrt{\sum \sum \epsilon_l^2 / (n_T n_P)}, \\
 U_a &= \sqrt{\sum \sum \epsilon_a^2 / (n_T n_P)}, \\
 U_\beta &= \sqrt{\sum \sum \epsilon_\beta^2 / (n_T n_P)}.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

基于四元数的方法可使控制点转换到同一坐标系后残差平方和最小,但由于各个坐标系的测量点  $F$  和  $M$  都有测量误差,使得  $R$  和  $T$  都有较大误差。上述过程假定作为全局坐标系的某一仪器站的测量值为真值,而事实是无论哪一个仪器作为全局坐标系都有测量误差。因此,这种方法引入了较大的坐标转换误差,而这种误差传播到最终不确定度的评价,使最终结果相对真实结果偏大。

### 3 基于多传感器融合的点最优化

利用矩阵加权线性最小方差最优融合准则,充分融合各仪器站的数据,得到最优融合测量值,其精度应最高,以此值为全局坐标系数据,再将其他仪器站的数据转换到全局坐标系下,可进一步提高  $R$  和  $T$  的精度,减少残差平方和。

激光跟踪仪的测量模型是非线性模型。设  $\theta_i$  为第  $i$  个仪器站的球坐标测量数据,  $m_i$  为其笛卡儿三坐标数据。对(6)式泰勒展开,略去二次项,得

$$m = f(\theta) + J(\theta)\delta\theta, \tag{9}$$

式中  $J$  为雅可比矩阵,  $J(\theta) = \partial m / \partial \theta$ 。

$m_i$  的协方差矩阵为

$$V_i = J Q_i J^T, \tag{10}$$

式中  $W_i$  为权重矩阵

$$W_i = \left[ \sum V_i^{-1} \right]^{-1} V_i^{-1}, \tag{11}$$

即可确定按矩阵加权无偏融合估计  $\hat{m}$

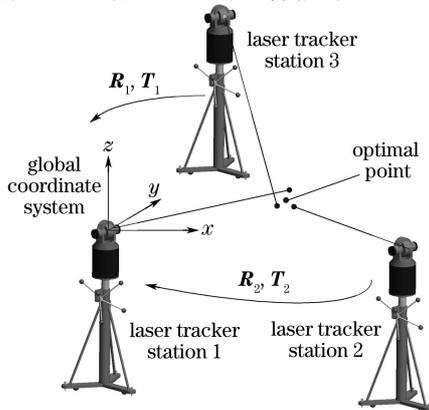


图 1 多站测量残差

Fig. 1 Residual error of multi-station measurement

$$\hat{m} = \sum W_i m_i, \tag{12}$$

$\hat{m}$  的协方差为

$$\hat{V} = \left[ \sum_{i=1}^{n_T} V_i^{-1} \right]^{-1}. \tag{13}$$

由(13)式易得出  $\hat{V}^{-1} > V_i^{-1}$ , 进一步得出  $\hat{V} < V_i$ 。由此证明,融合估计精度高于每个局部估计精度。以融合点为基准进行坐标配准,这样求得转换参数的精度进一步提高,降低坐标转换残差。

### 4 仿 真

利用仿真实验,验证提出的方法是否能真实评价仪器测量不确定度,同时观察测量点数对不确定度评价的影响。理论上测量控制点数越多越能真实评价测量系统的不确定度,但过多的控制点将使方程数量增加,计算任务过于庞大。

仿真实验共布设 4 个测量站,以第一个仪器站为原点,其余 3 个仪器站的坐标分别为(5000, 0, 0)、(2500, 5000, 0)和(2500, 2500, 5000)。在 5 m × 5 m × 5 m 空间内随机分布被测控制点,可求出每个仪器站测量控制点的真值。然后给长度测量值加入服从正态分布的随机噪声,模拟测量误差,其标准差为  $\sigma_l = 10 \mu\text{m} + 0.8 \mu\text{m}/\text{m}$ 。角度测量值同样加入服从正态分布的随机噪声,标准差为  $\sigma_a = \sigma_\beta = 1''$ 。得到仿真的测量值后,按照本文的方法得到不确定度评价。而加入噪声的标准差即为不确定度真值。两者比较,即可得到本文提出的方法评价误差,如图 2 所示。

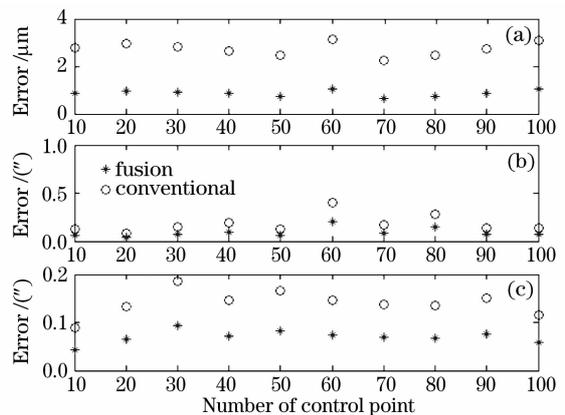


图 2 距离(a),水平角(b),垂直角(c)的不确定度估计的误差  
Fig. 2 Error of uncertainty evaluation of distance (a), horizontal angle (b), vertical angle (c)

从图 2 可见,本文提出的方法可准确评价真实不确定度,加入融合后的不确定度评价更加接近不确定度真值,控制点数量对评价结果的影响不大。

## 5 实验结果

共布设 4 个激光跟踪仪测量站, 16 个固定控制点靶标, 靶标均匀分布在  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$  的测试空间内, 网络拓扑如图 3 所示。

以仪器站 1 为全局坐标系。没有加入融合方法残差平方和为  $0.093\text{ mm}$ , 而加入融合方法的坐标转换残差为  $0.046\text{ mm}$ , 因此加入融合方法极大降低了坐标转换误差, 剩余残差即可认为是仪器的不确定度所致。共有  $3 \times 4 \times 16 = 192$  个残差方程, 各单元的残差统计如图 4。表 1 所示为传感器单元精度评价结果。

由图 4 可见, 统计结果有明显的正态概率分布趋势。没有采用多传感器融合的方法得到的不确定度结果高于加入融合优化的方法, 正是较大坐标转换误差混入的结果。这种方法不区别具体误差源,

求得的精度结果综合了多种因素, 例如现场环境、装配误差等。本文在实验室内进行实验, 温控环境较好, 因此结果较理想, 优于性能指标。

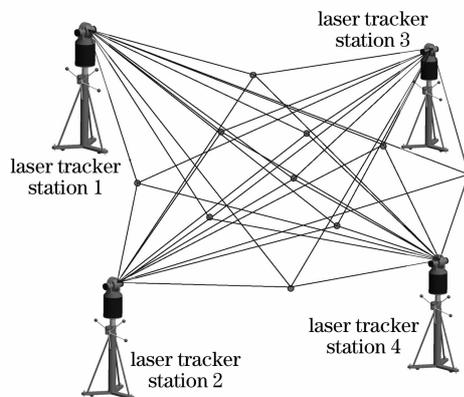


图 3 多站测量示意图

Fig. 3 Schematic of multi-station measurement

表 1 各传感器单元精度评价结果

Table 1 Precision evaluation result of components

	Conventional method	Fusion method	Nominal specification
Evaluation of distance /mm	0.0355	0.0175	0.02
Evaluation of horizontal angle /(")	1.4569	0.7827	1
Evaluation of vertical angle /(")	0.8639	0.43	1

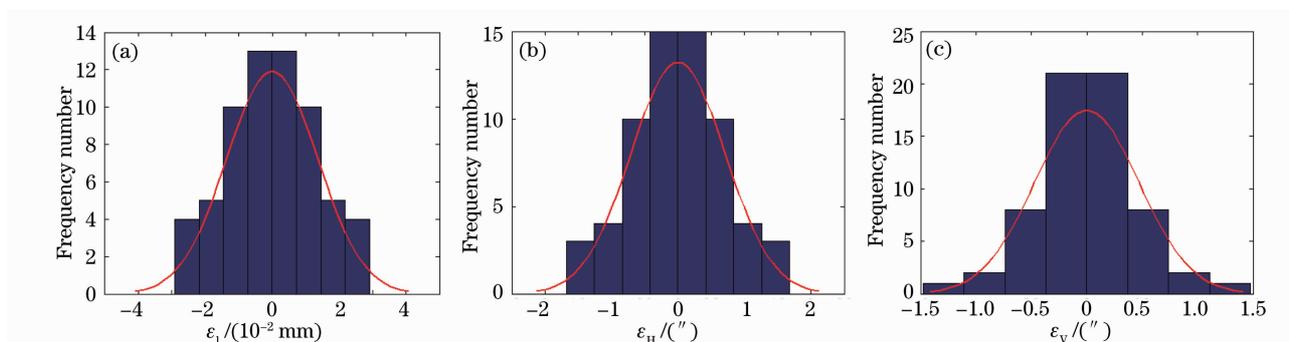


图 4 各单元的残差统计

Fig. 4 Residual error of component

## 6 结 论

提出一种基于统计的大尺寸测量不确定度估计方法。以激光跟踪仪为例进行了仿真和现场实验, 结果表明该方法评价测距和测角不确定度的误差可分别降至  $1\text{ }\mu\text{m}$  和  $0.1''$  以内, 能准确估计大尺寸测量不确定度。由于该方法只需测量有限数量的控制点, 便于现场评价测量精度, 所以同样适用于摄影测量系统等大尺寸测量仪器。

### 参 考 文 献

- 1 W. T. Estler, K. L. Edmundson, G. N. Peggs *et al.*. Large-scale metrology-an update [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2002, **51**(2): 587~609
- 2 Junhua Sun, Guangjun Zhang, Zhenzhong Wei *et al.*. Large 3D free surface measurement using a mobile coded light-based stereo vision system [J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, **132**(2): 460~471
- 3 J. M. Calkins. Quantifying coordinate uncertainty fields in coupled spatial measurement systems[D]. Virginia Polytechnic Institute, Doctor of Philosophy, 2002
- 4 Lei Linjun, Yang Yan, Chen Weibiao. High-accuracy time-interval-unit for spaceborne laser range finder [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1422~1426
- 5 雷琳君, 杨 燕, 陈卫标. 星载激光测距仪的高精度时间间隔测量单元[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1422~1426
- 6 James H. Burge, Peng Su, Chunyu Zhao *et al.*. Use of a commercial laser tracker for optical alignment[C]. *Proc. SPIE*, 2007, **6676**: 1~12
- 6 Wu Qingyang, Su Xianyu, Xiang Liqun *et al.*. A new calibration

- method for two-sensor measurement system based on line-structure light[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(2): 259~264
- 吴庆阳, 苏显渝, 向立群等. 线结构光双传感器测量系统的标定方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 259~264
- 7 Ao Lei, Tan Jiubin, Cui Jiwen *et al.*. Fast and precise center location for circle target of CCD laser autocollimator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 253~258
- 敖磊, 谭久彬, 崔继文等. 一种快速高精度激光 CCD 自准直仪圆目标中心的定位方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 253~258
- 8 T. A. Clarke, X. Wang, N. R. Cross *et al.*. Performance verification for large volume metrology systems [J]. *Laser Metrology and Machine Performance V*, WIT Press, 2001. 105~116
- 9 Zhang Chunfu, Tang Wenyan, Li Huipeng *et al.*. Application of dynamic weighting in HVD coordinate integrated algorithm[J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 2007, **39**(9): 1419~1421
- 张春富, 唐文彦, 李慧鹏等. 动态加权在激光跟踪仪球坐标整合中的应用[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, **39**(9): 1419~1421
- 10 Ding Yabin, Peng Xiang, Tian Jindong *et al.*. Pose estimation of multiple viewpoints for three-dimensional digital imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 451~456
- 丁雅斌, 彭翔, 田劲东等. 一种三维数字成像系统的多视点姿态估计方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 451~456

## “2008 年度中国光学重要成果”征稿启事

《激光与光电子学进展》是中科院上海光机所主办的的科技进展类期刊,中文核心期刊,创刊于 1964 年,是国内第一本激光领域的专业期刊。本刊以及时报道国内外激光与光电子学领域科技的最新研究成果与技术应用为宗旨,促进国内外学术交流,沟通科研与产业的联系。

《激光与光电子学进展》的重点栏目——“年度中国光学重要成果”旨在介绍中国光学领域科研人员在国际著名物理学、光学期刊(如 *Nature*, *Science*, *Phys. Rev. Lett.*, *Opt. Lett.* 等)发表的部分具有重要学术、应用价值的论文。本栏目得到了包括众多著名科学家在内国内一流研究人员的肯定和支持,“2007 中国光学重要成果”发布会上,国家科技部副部长、《光学学报》主编曹健林,中国光学学会理事长、《中国激光》主编周炳琨院士,《激光与光电子学进展》主编范滇元院士,中科院上海光机所所长朱健强等为获奖代表颁奖。

为了让读者了解 2008 年度我国光学领域科研人员的最新研究成果,扩大这些成果在国内的影响,本刊 2009 年第 2 期继续推出 2008 年度中国光学重要成果栏目,现向全国在光学领域在国际知名刊物发表论文的专家、学者征稿。征稿说明如下:

1. 来稿条件:研究成果已发表在 2008.01.01~2008.12.31 日以来出版的国际知名物理学、光学刊物上,如 *Nature*, *Science*, *Phys. Rev. Lett.*, *Appl. Phys. Lett.*,

*Opt. Lett.* 等;

2. 稿件格式:最多不超过 1 500 字,不超过 2 张图片。必须用中文,语言简洁易懂,不必提供过多技术细节,尽量避免使用公式,最好选用彩色图片,参考文献不超过 5 篇,文章结尾处注明作者发表论文的出处,论文格式可参考中国光学期刊网。并注明来稿的创新之处;

3. 请作者标出所投论文的所属研究领域,如自适应光学、生物光子学、探测器、衍射光学、光纤光学、纳米光学、非线性光学、光学工程、光子结构、光传播、量子光学、半导体光学、超快光学等;投稿应该包括作者的姓名、单位和联系方式;

4. 录用稿件不收取任何审稿费、版面费,投稿截止日期 2008.12.31;

5. 投稿方式

在线投稿: [www.opticsjournal.net/lop.htm](http://www.opticsjournal.net/lop.htm)

E-mail: [lop@siom.ac.cn](mailto:lop@siom.ac.cn);

6. 说明:为了能全面反映国内光学领域的研究成果,本栏目只接受每个研究小组的一篇报道,但该报道可以介绍一个或几个相关的研究成果;本次活动入选论文将在 2009 年 3 月向社会公布并向入选作者颁奖。

《激光与光电子学进展》编辑部

2008-06-23