

文章编号: 1004-924X(2016)03-0560-06

基于惯性基准的大尺寸空间角测量

肖文健, 马东玺*, 张 勇, 陈志斌
(军械工程学院 军械技术研究所, 河北 石家庄 050000)

摘要: 针对大型装备装配过程中的大尺寸空间角测量问题, 提出一种基于惯性基准的大尺寸空间角测量方法并且设计了相应的测量系统。该测量系统利用自准直原理获取被测轴线方向, 通过内部陀螺仪和编码器测量被测轴线在惯性坐标系中的单位向量坐标, 然后根据每个被测轴线在公共基准内的单位向量坐标值实现空间角的计算。建立了大尺寸空间角测量的数学模型, 并对测量系统的测量不确定度进行分析和计算。最后搭建了测量系统的原理样机并利用原理样机在实验室进行了模拟测量实验。实验结果表明, 原理样机的实际测量误差为 14", 满足了测量精度的要求。该方法采用惯性空间作为公共测量基准, 有效地解决了测量大尺寸空间角时测量基准难以建立和传递的难题, 使得测量过程更加灵活、高效。

关键词: 大尺寸测量; 空间角测量; 坐标测量; 惯性基准; 自准直
中图分类号: TH712 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162403.0560

Large-scale spatial angle measurement based on inertial reference

XIAO Wen-jian, MA Dong-xi*, ZHANG Yong, CHEN Zhi-bin
(Ordnance Technology Institute, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050000, China)
* Corresponding Author, E-mail: madxnudt@163.com

Abstract: For measuring a large-scale spatial angle during large equipment assembly, a large spatial angle measurement method based on an inertial reference was proposed and a corresponding measurement system was designed. On the basis of auto-collimation principle, a two-dimensional galvanometer was used in the measurement system to aim the direction of measured axis. A gyroscope and a photoelectric encoder were adopted to measure the vector coordinates of each measured axis in inertial coordinate system. Then, the spatial angle between measured axes was calculated by their vector coordinates in the public reference. The mathematical model of large-scale spatial angle measurement was built and the measurement uncertainty of the measurement system was analyzed and calculated. Finally 14", a prototype was established and the simulated measurement experiment was carried out by the prototype in laboratory. Experimental results show that the measurement error is , which meets the requirements of large-scale spatial angle measurement. The method overcomes difficulties that the measuring reference is difficult to be built and transmitted in measuring large-scale spatial angles and makes the measurement process more flexible and efficient.

Key words: large-scale measurement; spatial angle measurement; coordinate measurement; inertial reference; autocollimation

1 引言

空间角是指三维空间内两条异面直线之间的夹角, 空间角测量是空间几何量测量中的重要组成部分。在工业、国防等实际环境中, 往往会遇到大尺寸条件下空间角的现场测量问题, 如大型工件装配^[1]、大间距多轴线一致性校准^[2]等, 这些测量所面临的测量尺度空间一般为几米至几十米^[3]。由于被测对象相距较远, 测量的公共基准难以建立, 且被测对象的体积和重量都较大, 在测量过程中不方便移动, 因此测量的难度较大。传统基于空间点坐标的测量方法如坐标测量机^[4]、激光跟踪仪^[5]或室内定位法^[6]等, 大多需要现场严格标定, 缺乏便携性和灵活性。存在上述不足的关键原因在于, 难以在大尺寸空间内为各被测对象建立一个高精度而且易于实现的公共测量基准。

为了解决测量基准的传递问题, 文献[7]提出一种利用高精度二维直线导轨移动经纬仪测量光轴夹角的方法, 将经纬仪安装于二维平移导轨上, 在测量过程中利用平移导轨移动经纬仪至不同测量位置完成对不同光轴夹角的测量。直线导轨可以有效解决在测量过程中基准传递的问题, 但在体积或可操作性等方面具有较大劣势。文献[8][9]提出一种基于线结构光的大尺寸空间角度测量方法, 该方法以一束固定的线结构光与测量平面构成基准系, 在此基准系内, 用两个光轴相互平行且垂直于测量平面的CCD分别拍摄, 然后利用图像处理技术完成对两条异面直线夹角的测量。这种方法受被测对象外形影响较大, 如果被测对象外形结构复杂可能出现结构光遮挡的问题。本文选定惯性坐标系作为大尺寸空间角测量基准, 提出一种基于惯性基准的大尺寸空间角测量方法。分别测量各被测轴线在惯性坐标系内的单位向量坐标, 由各被测轴线的向量坐标求解其空间角。然后根据测量原理设计并搭建了测量设备的原理样机, 最后利用原理样机对被测对象进行了实际测量, 验证了所提方法的有效性。

2 测量原理

大尺寸空间角测量方法的原理如图1所示, 在空间内某一大型载体上有2个相距较远的轴线, 设定其中一个为参考轴, 另一轴为被测轴, 要求测量被测轴与参考轴的空间角, 假定测量过程中被测对象没有角运动。考虑到被测轴与参考轴的空间距离相距较远, 测量基准难以传递, 在惯性空

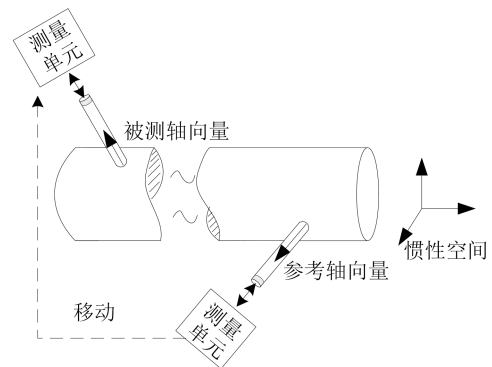


图1 测量原理图

Fig. 1 Measurement principle diagram

间内建立坐标系并以此作为测量基准。将参考轴与被测轴当作惯性空间内的2个空间向量, 然后利用测量单元分别测量被测轴与参考轴在惯性空间中的单位向量坐标, 最后通过求解空间向量夹角的方法来实现被测轴与参考轴空间角的测量。

测量单元是一个便携的手持测量装置, 其主要任务是捕获被测轴的方向以及测量被测轴在惯性坐标系中的单位向量坐标, 其工作原理如图2所示。

利用自准直原理可以准确的捕获被测轴方向。为了采用自准直原理捕获被测轴方向, 需要在被测轴前端安装平面镜并且保证平面镜光轴与被测轴平行。当测量单元实现自准直时, 测量单元的光轴与被测轴平行, 这样就可以将被测轴方向传递至测量单元光轴。然而手持式测量单元容易受测量人员的扰动在惯性空间内姿态发生变化从而不能稳定保持自准直状态, 如图2中虚线所示。根据运动学原理, 测量单元在惯性空间的任意姿态变化可分解为绕3个垂直轴向的角运动。因此若获得光轴的稳定自准直, 必须通过光轴方向调整装置对测量单元至少2个轴向(绕光轴自身轴向除外)的角运动进行补偿, 从而保持测量单元处于自准直状态, 如图2中实线所示。

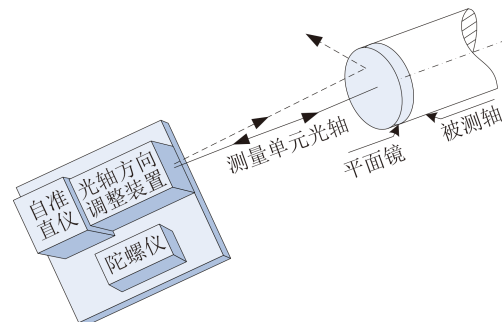


图2 测量单元工作原理图

Fig. 2 Measuring unit working principle diagram

当测量单元成功捕获被测轴的方向时,测量单元光轴在惯性空间的单位向量坐标即等于被测轴在惯性空间的单位向量坐标。陀螺仪是惯性测量中最常用的测量元件,如果将陀螺仪直接与测量单元光轴固联,这样即可直接测量测量单元光轴在惯性空间的向量坐标,但是这种安装方式结构复杂、体积较大。为了减小测量单元体积,本文采用捷联安装方式,陀螺仪与测量单元壳体固联,通过数学模型间接求解测量单元光轴在惯性空间的向量坐标。

3 测量数学模型

3.1 相关坐标系

由于空间角测量的数学模型只涉及坐标系旋转变换,其旋转角度与坐标系原点位置的选取无关,所以在定义相关坐标系时可以不用考虑坐标系原点的位置。为了方便计算,涉及的所有坐标系均为同一坐标原点。

(1)被测对象坐标系

被测对象坐标系是指被测轴线所处的坐标系, x 轴沿轴线指向前方, y 轴指向轴线右侧, z 轴向下,根据被测对象不同可分为参考轴坐标系和被测轴坐标系。

(2)惯性坐标系

惯性坐标系为所提空间角测量方法的测量基准,记为 $x_0y_0z_0$ 。为了计算方便,设定惯性坐标系方向与参考轴坐标系重合。

(3)测量单元坐标系

测量单元坐标系记为 $x_my_mz_m$ 。 x_m 轴沿测量单元纵轴指向前方, y_m 轴指向测量单元右侧, z_m 轴指向测量单元的底部。

(4)光轴坐标系

光轴坐标系是指测量单元光轴的坐标系,记为 $x_oy_oz_o$ 。沿光束出射方向为 x_o 轴, y_o 轴指向光轴右侧, z_o 轴朝下。光轴坐标系的初始方向与测量单元坐标系方向重合,光轴方向经过调整后两坐标系发生旋转变换。

3.2 测量模型推导

测量单元坐标系先后经 z 轴和 y 轴两次旋转可以变换到光轴坐标系,如图3所示。

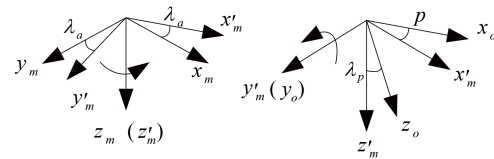


图3 测量单元坐标系旋转示意图

Fig. 3 Measuring unit coordinate system rotating diagram

测量单元坐标系到光轴坐标系的旋转变换矩阵可用2次旋转的矩阵乘积来求解:

$$C_m^o = \begin{bmatrix} \cos \lambda_p & 0 & \sin \lambda_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \lambda_p & 0 & \cos \lambda_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \lambda_a & \sin \lambda_a & 0 \\ -\sin \lambda_a & \cos \lambda_a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \lambda_p \cos \lambda_a & \cos \lambda_p \sin \lambda_a & \sin \lambda_p \\ -\sin \lambda_a & \cos \lambda_a & 0 \\ -\sin \lambda_p \cos \lambda_a & -\sin \lambda_p \sin \lambda_a & \cos \lambda_p \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: λ_a 和 λ_p 分别表示光轴偏转的方位角和俯仰角,可以通过光轴方向调整装置的反馈值得到。

因为坐标旋转变换矩阵为正交矩阵,其逆矩阵等于转置矩阵,所以从光轴坐标系到测量单元坐标系的旋转变换矩阵为:

$$C_o^m = (C_m^o)^T \quad (2)$$

$$C_i^m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_m & \sin \phi_m \\ 0 & -\sin \phi_m & \cos \phi_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_m & 0 & -\sin \theta_m \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_m & 0 & \cos \theta_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi_m & \sin \psi_m & 0 \\ \sin \psi_m & \cos \psi_m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi_m \cos \theta_m & \sin \psi_m \cos \theta_m & -\sin \theta_m \\ -\sin \psi_m \cos \phi_m + \cos \psi_m \sin \theta_m \sin \phi_m & \cos \psi_m \cos \phi_m + \sin \psi_m \sin \theta_m \sin \phi_m & \cos \theta_m \sin \phi_m \\ \sin \psi_m \sin \phi_m + \cos \psi_m \sin \theta_m \cos \phi_m & -\cos \psi_m \sin \phi_m + \sin \psi_m \sin \theta_m \cos \phi_m & \cos \theta_m \cos \phi_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

惯性坐标系到测量单元坐标系的变换,可以通过先后绕 z 轴、 y 轴和 x 轴3次转动来实现,如图4所示。

从惯性坐标系到测量单元坐标系的旋转变换矩阵可用3次旋转矩阵的乘积来求解,如式(3)所示。

ψ_m , θ_m 和 ϕ_m 可由陀螺仪测量值求解。

由式(3)可得,从测量单元坐标系到惯性坐标系的旋转变换矩阵为:

$$C_m^i = (C_i^m)^T \quad (4)$$

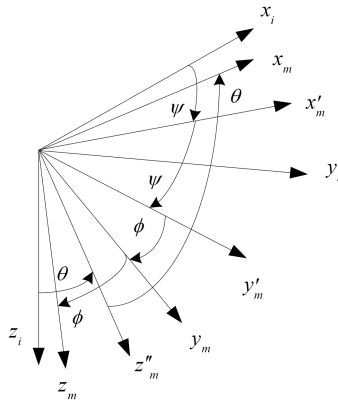


图4 惯性坐标系旋转示意图

Fig. 4 Inertial coordinate system rotating diagram

根据式(2)和式(4)可以得到光轴坐标系到惯性坐标系的旋转变换矩阵为:

$$C_o^i = C_m^i C_o^m \quad (5)$$

当测量单元通过自准直原理成功跟踪到被测轴时, 测量单元光轴与被测轴平行。因此被测轴坐标系到惯性坐标系的旋转变换矩阵也为 C_o^i 。

根据惯性坐标系的定义, 参考轴在惯性坐标系中的单位向量为:

$$r_r^i = [1 \ 0 \ 0]^T \quad (6)$$

根据被测轴系系的定义, 被测轴在被测轴坐标系中的单位向量为 $r_m^o = [1 \ 0 \ 0]^T$, 那么被测轴在惯性坐标系中的单位向量为:

$$r_m^i = C_o^i r_m^o \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可得, 参考轴与被测轴的空间夹角 θ 满足:

$$\theta = \arccos(r_r^i, r_m^i), \theta \in [0^\circ, 180^\circ] \quad (8)$$

4 实验与分析

4.1 测量单元设计与搭建

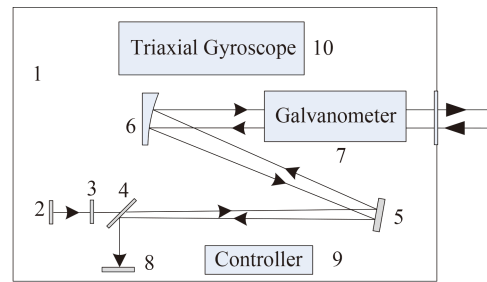
为了验证测量方法的实际测量效果, 根据前文所述测量原理设计了测量单元的原理样机。原理样机选用卡塞格林反射式准直系统, 通过光路折叠, 大大缩短了测量单元的体积。光轴方向调节通过二维振镜实现, 二维振镜的响应快、精度高, 能够实时调节光轴方向。控制系统根据自准直图像中十字分划中心与CCD几何中心的偏差来计算二维振镜的控制量, 并将控制量送至二维振镜的驱动器, 控制二维振镜偏转直至十字分划中心

与CCD中心重合, 以保证测量单元光轴与被测轴平行。值得注意的是, 光轴偏转角度与二维振镜偏转角度是非线性关系, 其满足:

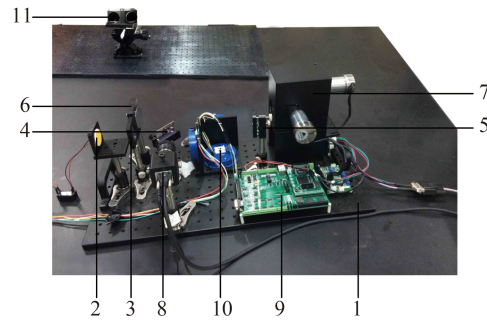
$$\begin{cases} \lambda_\alpha = \arctan\left(\frac{\tan(2\lambda_1)}{\cos(2\lambda_2)}\right) \\ \lambda_p = \arctan\left(\frac{\sin(2\lambda_2) \cos(2\lambda_1)}{\sqrt{1 - \sin^2(2\lambda_2) \cos^2(2\lambda_1)}}\right) \end{cases} \quad (9)$$

式中: λ_α 和 λ_p 为光轴偏转的方位角和俯仰角, λ_1 和 λ_2 分别表示两振镜偏转角度, 可由二维振镜的编码器测得。

根据设计方案搭建原理样机, 如图5所示。



(a) 结构图
(a) structure chart



(b) 实物图
(b) real product

图5 实验原理样机

Fig. 5 Experimental prototype

原理样机的所有元件安装于一块600 mm×300 mm的光学平板(1)上, 光从LED面光源(2)出射依次经过十字分划靶板(3)、分光镜(4)、卡塞格林系统的次镜(5)和主镜(6), 再经过二维振镜(7)出射至目标反射镜(11), 然后原路返回至CCD(8)成像。二维振镜由控制器(9)进行控制, 测量单元相对惯性空间的姿态变化由三轴光纤陀螺(10)测量。

4.2 测量不确定度分析

完整的测量结果应包括测量不确定度的说明, 测量不确定度反映了测得的量值的可信程度。由

于空间角测量方法的测量模型为比较复杂的非线性模型,采用GUM法评估测量不确定度比较困难,因此采用蒙特卡洛法来评价测量不确定度。

影响测量不确定度的因素有很多,如被测量定义、测量设备、测量环境和测量设备标定等。在本测量中,被测量、测量环境以及测量设备标定所引入的不确定度很小,对测量结果影响不大,在不考虑设备安装误差的情况下,影响测量不确定度的因素主要是由测量设备引入,其包括陀螺仪和编码器的测量误差以及被测轴方向捕获误差。根据最大熵原理,陀螺仪的测量误差 ε_g 、编码器的测量误差 ε_c 以及被测轴方向捕获误差 ε_a 均符合正态分布,对其进行统计学分析可得:

$$\begin{cases} \varepsilon_g \sim N(0, 4.5^2) (^{\circ}/h) \\ \varepsilon_c \sim N(0, 1.2^2) (") \\ \varepsilon_a \sim N(0, 2.5^2) (") \end{cases} \quad (10)$$

蒙特卡洛试验次数 M 至少应大于 $1/(1-p)$ 的 10^4 倍,对于 $p=95\%$ 包含的区间通常取 $M=10^{6[10]}$ 。从输入量的概率密度函数中抽取 M 个样本值,代入测量模型中即可得到大小为 M 的随机测量样本。对随机样本进行统计学分析得到其标准差 $\sigma=8.2"$,以2倍的标准差来表示不确定度,就得到空间角的测量不确定度为 $u=2\sigma=16.4"$ 。

4.3 测量实验与结果分析

为了在实验室内模拟大尺寸空间角测量,用2个平面镜表示被测对象,测量两平面镜光轴夹角。为了模拟大尺寸,在测量单元成功跟踪其中一平面镜光轴后,由测量人员手持测量单元自由移动一定距离(约10 m),然后再回到被测对象处跟踪另一个平面镜光轴。

两个平面镜安装于同一载体上,如图5(b)中(11)所示,其光轴的实际空间角已知为 $16^{\circ}32'41"$ 。设定左侧平面镜光轴为参考轴,右侧平面镜光轴为被测轴,实验过程中,测量单元首先与参考轴对准,确定惯性坐标系以及参考轴在惯性坐标系中的单位向量坐标;然后再与被测轴对准,测量被测轴在惯性坐标系中的单位向量坐标;最后根据参考轴与被测轴在惯性坐标系中的单位向量坐标求解其空间角。重复测量10次,测得被测轴在惯性坐标系中的单位向量坐标以及参考轴与被测轴的空间角如表1所示。因为惯性坐标系与参考轴重合,所以参考轴在惯性坐标系中的单位向量坐标

始终满足 $r_r^i = [1 \ 0 \ 0]^T$ 。

对测量数据进行统计分析可得,测量系统对被测轴线空间角测量误差大小如式(11)所示,满足在外场测量过程中对空间角 0.1 mrad (约为 $20"$)的测量误差要求:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \approx 14" < 20" (n=10). \quad (11)$$

表1 测量数据表

Tab. 1 Measurement data sheet

No.	Measured axis unit vector			Angle
	x	y	z	
1	0.958 59	0.282 62	0.034 95	$16^{\circ}32'43"$
2	0.958 62	0.282 52	0.034 96	$16^{\circ}32'23"$
3	0.958 62	0.282 56	0.034 86	$16^{\circ}32'29"$
4	0.958 63	0.282 51	0.034 83	$16^{\circ}32'17"$
5	0.958 59	0.282 64	0.034 93	$16^{\circ}32'46"$
6	0.958 61	0.282 57	0.034 84	$16^{\circ}32'28"$
7	0.958 59	0.282 65	0.034 86	$16^{\circ}32'46"$
8	0.958 61	0.282 58	0.035 00	$16^{\circ}32'35"$
9	0.958 61	0.282 57	0.034 88	$16^{\circ}32'30"$
10	0.958 57	0.282 71	0.034 92	$16^{\circ}32'02"$
Average	0.958 60	0.282 59	0.034 90	$16^{\circ}32'30"$

5 结论

针对在大尺寸空间角测量中难以建立精确而又容易实现的测量基准的问题,本文提出了一种基于惯性基准的大尺寸空间角测量方法。通过自准直原理将被测轴线方向传递至测量设备的光轴,然后利用测量设备测量被测轴线在惯性空间内的单位向量坐标,最后根据每个被测轴线在公共惯性基准内的单位向量坐标值求解其空间角。根据测量原理设计和搭建了测量系统原理样机,并且利用原理样机进行了实际测量,测量误差为 $14"$,满足外场测量过程中对空间角测量的精度要求。采用惯性空间作为公共测量基准的思想,有效地解决了大尺寸空间角测量时测量基准难以建立和传递的难题,使得测量过程更加灵活、高效,具有重大的应用价值和积极的研究意义。

参考文献:

- [1] MAURIZIO G, LUCA M, DOMENICO M, *et al.* Cooperative fusion of distributed multi-sensor LVM (Large Volume Metrology) systems[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2015, 64(1): 483-486.
- [2] XIAO Z, GUO X, XIA Y, *et al.* Research on detection system of optical sights triaxial parallelism[J]. *Optik*, 2014, 125(16): 4427-4430.
- [3] 林嘉睿. 大型复杂物体组合测量方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- LIN J R. Research on the combined measurement method of large complex objects[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [4] AMATO R D, CAJA J, MARESCA P, *et al.* Use of coordinate measuring machine to measure angles by geometric characterization of perpendicular planes. Estimating uncertainty[J]. *Measurement*, 2014, 47(1): 598-606.
- [5] KLAUS W, MATTHIAS F, FRANK H. Measuring large 3D structures using four portable tracking laser interferometers[J]. *Measurement*, 2012, 45(10): 2339-2345.
- [6] YANG L H, YANG X Y, ZHU J G, *et al.* Novel method for spatial angle measurement based on rotating planar laser beams[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 23(6): 758-764.
- [7] LIU R M, GUO X Q, YU J. A novel instrument for high precision angle measurement of optical axes[J]. *Optik*, 2013, 124(12): 1132-1135.
- [8] ZHANG G X, YAO J W, QIU Z R, *et al.* Large-scale spatial angle measurement[J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2008, 57(1):525-528.
- [9] 胡文川, 袁祖荣, 张国雄. 大尺寸空间异面直线夹角的检测[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1427-1433.
- HU W CH, QIU Z R, ZHANG G X. Measurement of large-scale spatial angle formed by non-uniplanar lines[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1427-1433. (in Chinese)
- [10] WANG Q, NICK Z, ROGER H. Evaluate error sources and uncertainty in large scale measurement systems[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29(1): 1-11.

作者简介:



肖文健(1989-), 男, 河北张家口人, 博士研究生, 2013年于军械工程学院获得硕士学位, 主要从事光电检测、大尺寸空间几何量测量方面的研究。
E-mail: xiao_wen_jian@163.com

导师简介:



陈志斌(1965-), 男, 湖南益阳人, 研究员, 博士生导师。2005年于北京理工大学获得博士学位, 主要从事光电检测、红外目标识别与跟踪等方面研究。
E-mail: shangxinboy@163.com