

手提盘煤仪误差因素分析

杨德山, 董丽丽*, 梁倩倩, 李 瑛, 许文海

大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026

摘要 通过数据仿真的方法, 仿真理想情况下手提盘煤仪的激光测距数据、姿态数据和定位数据, 然后根据实际情况确定各误差参数, 并将其依次代入仿真数据中, 比较理论体积和代入误差后的仿真体积, 得出误差因素对体积的影响规律, 并分析了各误差的产生机理, 比较了各误差因素对体积影响的大小, 该研究结果为手提盘煤仪中重要误差因素的抑制或补偿提供了理论依据。

关键词 测量; 激光测距误差; 姿态误差; 定位误差; 误差分析

中图分类号 TP23; TP212; TP319 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.071201

Analysis of Error Factors of Portable Coal Inventory Instruments

Yang Deshan, Dong Lili, Liang Qianqian, Li Ying, Xu Wenhai

College of Information Sciences and Technology, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China

Abstract By means of data simulation, the laser ranging data, attitude data and location data of portable coal inventory instruments under ideal conditions are simulated. According to the actual situation, each error parameter is determined and brought into the simulation data. By comparing the theoretical volume with the simulation volume after errors introduced, the influence laws of all kinds of error factors on volume are obtained. The producing mechanism for each error is analyzed and the influence degree of each error factor on volume is compared. The above research results provide a theoretical basis for the suppression or compensation of main error factors in the portable coal inventory instruments.

Key words measurement; laser ranging error; attitude error; positioning error; error analysis

OCIS codes 120.5800; 120.6650; 120.0280

1 引言

煤炭既是重要的生产、生活资料,也是重要的战略物资,电厂、港口等地会储存大量的煤而形成煤堆,国家也建立了多个大型储煤基地。快速、可靠、准确地获取当前堆场储量具有重要的实际意义。

目前,最主要的储量获取方式为体积密度折算法,即先获得煤堆的体积,再结合密度进行换算得到储量^[1]。利用激光扫描技术可快速获取被测目标的空间三维点云数据^[2-6],进而根据点云计算得到体积。目前堆场多采用一种便携式激光测量仪^[7],通过多站人工选择打点的方式获取被测堆体的表面特征点,然后插值构成堆体的三维点云形状,进而计算体积。除此之外,还有基于多传感器的测量方法^[8],车载激光盘煤方法^[9]和摄影测量方法^[10]等。但这些方法存在实时性差、测量周期长、人为因素大等缺点。关于盘点系统定量误差分析的研究鲜有报道。而手提式盘煤仪的提出,仅需测量人员手提盘煤仪围绕煤堆行走一周,即可简

收稿日期: 2017-02-14; **收到修改稿日期:** 2017-02-24

基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAB12B03)、国家自然科学基金(61501077)、中央高校基本科研业务费专项资金(3132016351)

作者简介: 杨德山(1987—),男,博士研究生,主要从事光电检测与激光三维成像方面的研究。

E-mail: deshan.yang@foxmail.com

导师简介: 许文海(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事水下探测、光电检测与光电信息等方面的研究。

E-mail: whxu@dlmu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: dll_lili@163.com

单、快速、准确地完成对煤堆的体积测量^[11]。

本文针对手提盘煤仪的测量原理,研究了影响盘点结果的设备误差因素,通过仿真数据进行验证,分析了各误差因素的影响大小,该研究结果为手提式盘煤仪的系统设计,对重要误差因素的抑制或补偿以及对盘点精度的提高提供了理论依据和技术支持,对储煤基地进行快速盘点、科学管理具有重要意义。

2 测量原理与误差因素

2.1 测量原理

手提盘煤仪的测量示意图如图 1 所示。在测量人员手提盘煤仪行走过程中,定位系统可实时测量盘煤仪的位置信息,姿态测量系统同时记录盘煤仪的姿态数据;二维激光扫描仪发射激光脉冲到堆体表面进行测距,激光脉冲在堆体表面的反射点称为激光脚点,设任一脚点的测量距离为 S ,对应扫描角为 θ ,则可计算该脚点在全局测量坐标系中的坐标为

$$\begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_M^G \\ Y_M^G \\ Z_M^G \end{bmatrix} + \mathbf{R}_{G1} \left(\mathbf{R}_{IL} S \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_I^L \\ y_I^L \\ z_I^L \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} x_G^L \\ y_G^L \\ z_G^L \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{R}_{IL} 为安装角旋转矩阵; (x_I^L, y_I^L, z_I^L) 为扫描仪中心在姿态坐标系下的偏心量坐标; \mathbf{R}_{G1} 为由姿态坐标系向局部测量坐标系的转换矩阵; (x_G^L, y_G^L, z_G^L) 为姿态测量中心在局部测量坐标系下的坐标值; (X_M^G, Y_M^G, Z_M^G) 为全球定位系统(GPS)天线相位中心在全局测量坐标系下的坐标,由系统的定位测量值确定。在固定刚体结构中,安装角和偏心量坐标为常量,可以通过系统标定获得^[12]。在行走一周后将所有测量点转换为全局测量坐标,即可得到堆体三维点云模型,然后采用投影剖分法将点云剖分为多个三棱柱体,最后计算每个三棱柱的体积并积分得到堆体体积。

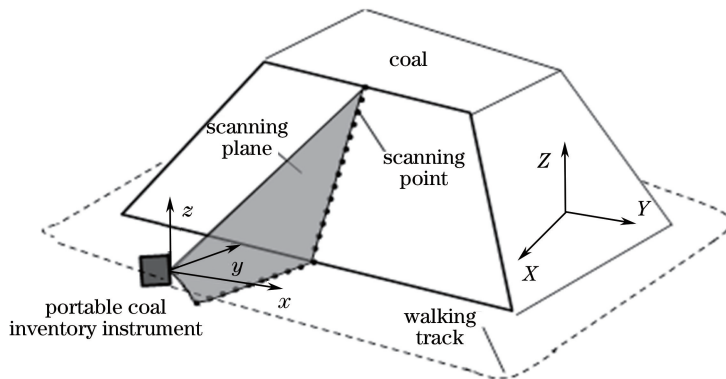


图 1 手提盘煤仪测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement with portable coal inventory instrument

2.2 误差因素的确定

从测量原理来看,影响盘煤仪盘点结果的误差因素主要分为硬件误差和体积算法误差。而硬件误差又分为设备误差和系统集成误差,其中设备误差包括激光测距误差、姿态测量(俯仰角、横滚角、偏航角)误差和定位误差等,该部分误差具有随机分布特征,且同时存在并交叉影响,是误差分析的难点^[13-14];系统集成误差主要为不同传感器测量系统在集成安装过程中的空间相对位置误差,该部分误差一般为固定值,可通过系统标定进行校正^[15]。体积算法主要依据点云密度和剖分后三棱柱体的体积,因此体积算法误差由点云模型决定,而点云模型的准确与否取决于硬件误差。本文主要分析各传感器设备误差对盘点结果的影响及对影响大小进行排序。忽略系统安装误差,(1)式可简化为

$$\begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_M^G \\ Y_M^G \\ Z_M^G \end{bmatrix} + \mathbf{R}_G S \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{R}_G 为由激光局部坐标系向全局测量坐标系的转换矩阵。

进一步计算可得到

$$\begin{cases} X_M = S \cos \theta (\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma) - S \sin \theta \cos \beta \sin \gamma + X_M^G \\ Y_M = S \cos \theta \sin \alpha \cos \beta + S \sin \theta \sin \beta + Y_M^G \\ Z_M = S \cos \theta (\sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma) + S \sin \theta \cos \beta \cos \gamma + Z_M^G \end{cases}, \quad (3)$$

式中 S 为激光测距值, α, β, γ 分别为系统的俯仰角、横滚角、偏航角, (X_M^G, Y_M^G, Z_M^G) 为系统的定位测量值。各测量值均包含真实值和测量误差, 设 S, α, β, γ 和 (X_M, Y_M, Z_M) 的测量值分别为 $S_r + \Delta S, \alpha_r + \Delta \alpha, \beta_r + \Delta \beta, \gamma_r + \Delta \gamma$ 和 $(X_{M_r}^G + \Delta X_{M_r}^G, Y_{M_r}^G + \Delta Y_{M_r}^G, Z_{M_r}^G + \Delta Z_{M_r}^G)$, 将其分别代入(3)式, 可计算得到该测量误差下的坐标测量值 $[X_M(\Delta), Y_M(\Delta), Z_M(\Delta)]$, 其与坐标真实值 $(X_{M_r}, Y_{M_r}, Z_{M_r})$ 之差为该误差因素对最终坐标结果的影响:

$$\begin{bmatrix} \Delta X_M \\ \Delta Y_M \\ \Delta Z_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_M(\Delta) \\ Y_M(\Delta) \\ Z_M(\Delta) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{M_r} \\ Y_{M_r} \\ Z_{M_r} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中下标 r 表示真实值, Δ 表示测量误差。

3 仿真实验验证

3.1 标准堆体数据的仿真

由于一般大型煤堆呈四棱台堆放形式, 因此首先仿真理想四棱台堆体测量时的盘煤仪测量数据, 主要包括激光测距数据、姿态数据和定位数据。在构建理想数据时, 确定以下理想测量条件: 堆体的堆积角为 45° , 堆体高 15 m, 手提盘煤仪提起高度为 50 cm, 在测量过程中激光扫描仪光轴始终正对堆体且垂直于行走轨迹, 激光扫描仪距堆体下边缘水平距离为 2 m, 测量过程中激光扫描仪无俯仰和横滚姿态变化, 行走轨迹为理想长方形, 匀速直线行走过程中, 偏航角保持不变, 并且假设系统没有偏心位移和偏心角。在测量过程中, 激光扫描仪的最远测量距离为测量中心到堆体顶端的距离, 根据三角形原理计算可知, 最远测距为 22.34 m, 最近测量距离为测量中心到堆体下边缘距离, 计算可知最近测距为 2.06 m。

由于所有传感器的测量误差对不同体积煤堆的影响有所不同, 因此根据实际堆场情况, 仿真体积由小到大的多个理想堆体, 分别检验各个传感器的设备误差对不同体积堆体盘点误差的影响。以体积为 17855.3 m^3 的堆体为例, 仿真得到理想情况下的堆体点云如图 2 所示。

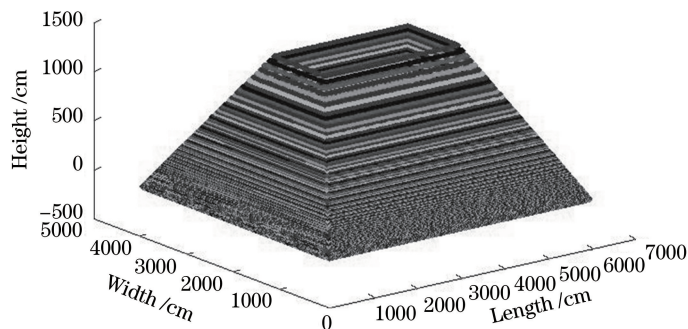


图 2 理想堆体点云仿真结果

Fig. 2 Simulated result of ideal reactor point clouds

理想四棱台的外形参数可在仿真之前确定, 其真实体积可通过理论计算得到, 即真值为 V , 而加入误差参数后的仿真测量结果为测量值 V_i , 误差参数对盘点结果造成的误差影响为

$$e = \frac{|V_i - V|}{V}. \quad (5)$$

3.2 激光测距误差的影响

对于激光误差数据的取值要符合实际设备参数的误差特性, 目前常用的堆场激光扫描仪的测距精度在 1 cm 左右, 因此选取测距误差参数为 1 cm。激光测距误差具有随机性, 在堆体点云上表现为原本光滑的表面出现凹凸现象, 但这些凹凸点可能会产生互补效应, 使得测量体积误差相互抵消, 因此, 在考虑激光误差

时,考虑其极限情况,即所有测量值均取最大测量误差,此时激光测距误差对体积的影响量最大。1 cm 的激光测距误差随仿真体积大小的变化结果见表 1。

表 1 1 cm 的激光测距误差对体积的影响

Table 1 Influence of 1 cm laser ranging error on volume

Theoretical volume /m ³	Simulated volume /m ³	Error /%
10449.8	10413.5	0.35
12301.2	12260.5	0.33
14152.6	14107.6	0.32
16003.9	15954.6	0.31
17855.3	17801.6	0.30
19706.7	19648.6	0.29
21558.1	21495.6	0.29
23409.4	23342.7	0.28
25260.8	25189.7	0.28
27112.2	27036.7	0.28

由表 1 可以看出,随着堆体体积的增大,1 cm 的激光测距误差对体积误差的影响逐渐减弱,符合测量原理。实际测量中激光测距产生的误差应小于这些误差值。

3.3 姿态角误差的影响

姿态角误差分别为俯仰角、横滚角和航向角误差,如图 1 所示,绕 x 轴旋转的为俯仰角,绕 y 轴旋转的为横滚角,绕 z 轴旋转的为航向角。目前用来测量姿态角的设备有很多,其中倾角仪小巧灵活,可用于手提测量,且平均静态精度标称在 0.1° 左右,但在实际动态测量过程中,倾角仪由于受到外在加速度的影响,其测量精度很难达到标称值^[16-17],并且随着动态频率的增加而出现误差急剧增大的情况;而有些高精度的测量系统因为重量等原因无法应用于手提测量上,因此在仿真了倾角仪误差为 0.1° 的情况下,又分别仿真了 0.5° 和 1° 两种误差影响,即在实际测量中,如果出现比标称值更大的误差,考虑姿态角的误差变化对体积测量误差的影响。与激光测距误差类似,姿态角的随机误差也会使得堆体的点云出现波浪状起伏的情况,这种起伏会使堆体体积产生的误差相互抵消,因此,在仿真姿态误差时,考虑姿态角的极限情况,即对任一姿态,其所有测量值均有最大误差,分析其对体积结果带来的误差情况,结果见表 2~4。

分析可知,在底面积基本保持不变的条件下,俯仰角带来的误差会使堆体点云上表面面积增大,同时使得堆体高度增加,从而影响体积结果,而横滚角和航向角带来的误差会使堆体的侧面点云产生扭曲和平移,扭曲会改变堆体点云的高度,而平移会改变堆体点云的底面积大小从而影响体积。从表 2 可以看出,当姿态测量系统误差为 0.1° 时,横滚角和航向角带来的误差为主要误差,其远大于俯仰角的误差,而横滚角和航向角对体积误差带来的影响基本相当;但当姿态测量误差发生变化时,如从 0.1° 变为 0.5° 或 1° 时,其结果见表 3、4,俯仰角带来的误差成为主要误差,而相比俯仰角的误差变化,横滚角和俯仰角带来的误差变化不大。在实际测量中,由于姿态测量系统会出现较大误差,且俯仰角带来的误差是测量系统的主要误差,其大于横滚角和航向所带来的误差,因此需要通过其他方法来测量系统的俯仰角^[18]。

表 2 0.1° 的姿态角误差对体积的影响Table 2 Influence of 0.1° attitude angle error on volume

Theoretical volume /m ³	Simulated volume /m ³			Error /%		
	Pitch angle	Roll angle	Heading angle	Pitch angle	Roll angle	Heading angle
10449.8	10446.6	10414.6	10414.6	0.031	0.337	0.337
12301.2	12298.2	12261.2	12261.3	0.024	0.325	0.324
14152.6	14149.8	14107.9	14107.9	0.020	0.316	0.316
16003.9	16001.4	15954.5	15954.6	0.016	0.309	0.308
17855.3	17853.0	17801.2	17801.2	0.013	0.303	0.303
19706.7	19704.6	19647.8	19647.9	0.011	0.299	0.298
21558.1	21556.2	21494.5	21494.5	0.009	0.295	0.295
23409.4	23407.8	23341.1	23341.2	0.007	0.292	0.291
25260.8	25259.4	25187.8	25187.9	0.006	0.289	0.289
27112.2	27111.0	27034.4	27034.5	0.00	0.290	0.290

表 3 0.5°的姿态角误差对体积的影响

Table 3 Influence of 0.5° attitude angle error on volume

Theoretical volume /m ³	Simulated volume /m ³			Error /%		
	Pitch angle	Roll angle	Heading angle	Pitch angle	Roll angle	Heading angle
10449.8	10575.6	10414.4	10415.3	1.20	0.34	0.33
12301.2	12447.1	12260.9	12262.0	1.19	0.33	0.32
14152.6	14318.5	14107.5	14108.7	1.17	0.32	0.31
16003.9	16190.0	15954.1	15955.4	1.16	0.31	0.30
17855.3	18061.5	17800.7	17802.1	1.15	0.31	0.30
19706.7	19932.9	19647.3	19648.8	1.15	0.30	0.29
21558.1	21804.4	21493.8	21495.5	1.14	0.30	0.29
23409.4	23675.9	23340.4	23342.2	1.14	0.29	0.29
25260.8	25547.3	25187.0	25188.9	1.13	0.29	0.28
27112.2	27418.8	27033.6	27035.6	1.13	0.29	0.28

表 4 1°的姿态角误差对体积的影响

Table 4 Influence of 1° attitude angle error on volume

Theoretical volume /m ³	Simulated volume /m ³			Error /%		
	Pitch angle	Roll angle	Heading angle	Pitch angle	Roll angle	Heading angle
10449.8	10738.2	10413.6	10417.2	2.76	0.35	0.31
12301.2	12634.6	12259.9	12264.1	2.71	0.34	0.30
14152.6	14531.0	14106.3	14111.0	2.67	0.33	0.29
16003.9	16427.4	15952.7	15957.8	2.65	0.32	0.29
17855.3	18323.8	17799.0	17804.7	2.62	0.32	0.28
19706.7	20220.2	19645.4	19651.5	2.61	0.31	0.28
21558.1	22116.6	21491.8	21498.4	2.59	0.31	0.28
23409.4	24012.9	23338.2	23345.3	2.58	0.30	0.27
25260.8	25909.3	25184.5	25192.1	2.57	0.30	0.27
27112.2	27805.7	27030.9	27039.0	2.56	0.30	0.27

3.4 定位误差的影响

目前常用的高精度全局定位系统为差分 GPS,由基站和移动站组成,当基站和移动站之间的基线距离在 10 km 范围内时,其定位精度都在厘米量级,完全可以覆盖现代堆场的范围,其定位精度一般为 1 cm,包括横向、纵向和高度误差。

针对定位误差,由(1)式可知,其使得点云模型作水平或垂直方向上的平移,并不会对模型的整体体积产生误差影响,只有随机分布的定位误差才会对体积结果产生影响。因此,与上述仿真的处理方式不同,仿真定位误差时采用随机误差的处理方法,而不是最大误差处理方式,仿真结果见表 5。

表 5 1 cm 定位误差对体积的影响

Table 5 Influence of 1 cm positioning error on volume

Theoretical volume /m ³	Simulated volume /m ³			Error /%		
	Horizontal error	Vertical error	Height error	Horizontal error	Vertical error	Height error
10449.8	10414.7	10414.6	10413.9	0.336	0.337	0.344
12301.2	12261.1	12261.3	12260.5	0.326	0.324	0.331
14152.6	14107.9	14108.0	14107.1	0.316	0.315	0.321
16003.9	15954.3	15954.7	15953.6	0.310	0.307	0.314
17855.3	17801.3	17801.4	17800.4	0.302	0.302	0.307
19706.7	19647.9	19647.8	19646.8	0.298	0.299	0.304
21558.1	21494.3	21494.3	21493.4	0.296	0.296	0.300
23409.4	23341.3	23341.4	23340.3	0.291	0.290	0.295
25260.8	25187.8	25187.8	25186.5	0.289	0.289	0.294
27112.2	27034.3	27034.2	27033.1	0.287	0.288	0.292

从表 5 可以看出,当定位误差为 1 cm 时,高度误差带来的影响大于横向和纵向定位误差的影响,为定位误差的主要因素。因为高度误差影响点云生成的整体高度,所以影响整体体积;而横向和纵向误差主要对堆体的长宽方向产生影响,当堆体长宽互换时,其作用效果也互换,故对体积的整体误差影响基本相当。

3.5 体积计算模型误差的影响

根据理想四棱台模型,在没有设备测量误差条件下,仿真理想棱台点云数据,然后利用该点云数据,根据体积计算模型,计算理想棱台的体积,比较该体积计算值和理论值之差,则该误差值即为体积计算模型对测量结果的影响,结果见表 6。

表 6 体积模型算法影响
Table 6 Influence of volume model algorithm

Theoretical volume /m ³	Simulated volume /m ³	Error /%
10449.8	10448.2	0.015
12301.2	12299.5	0.014
14152.6	14150.6	0.014
16003.9	16001.6	0.014
17855.3	17852.9	0.013
19706.7	19704.1	0.013
21558.1	21555.3	0.013
23409.4	23406.5	0.012
25260.8	25257.8	0.012
27112.2	27108.9	0.012

从表 6 可以看出,在无测量误差的情况下,理想点云数据经过体积计算模型计算后的误差最大值为 0.015%,相比设备误差造成的测量误差而言,体积计算模型所带来的误差影响基本可以忽略不计。

3.6 结果分析

从上述结果可以看出,俯仰角变化带来的误差相比其他误差因素的影响更大,为主要误差影响因素;定位误差对体积结果的影响大于横滚角和航向角误差对体积结果的影响,其中高度定位误差大于水平定位误差;横滚角对体积结果误差的影响略大于航向角的;激光测距误差与横滚角和航向角带来的误差影响基本相当。在所有误差参数固定的情况下,各测量因素对测量结果的影响均随着堆体体积的增大而逐渐减弱。针对俯仰角变化对体积测量带来的影响,根据前期研究成果,提出了一种基于地面点云的俯仰角测量方法^[18],该方法可提高俯仰角的测量精度,且不受外在加速度的影响,从而提高盘煤仪的测量精度。

4 结 论

首先介绍了手提盘煤仪的测量方式和原理,分析了影响手提盘煤仪的设备误差因素。根据各设备误差的实际测量情况,确定各设备的误差参数;通过数据仿真的方式,仿真理想堆体点云,并将各误差参数代入仿真点云中,得出仿真堆体测量结果,并与理论计算体积相比较,得到该误差因素对体积结果影响的变化规律。该研究结果对手提盘煤仪的设计提供了重要依据,为提高测量精度、抑制主要误差因素提供了理论支持。

参 考 文 献

- [1] Dong Dayong, Yang Liming, Yuan Zhiwu. The inventory method and inventory-making calculation of profit and loss in coal yard[J]. Coal Quality Technology, 2014(3): 13-15.
董大勇, 杨立明, 袁志武. 煤场盘点方法及盘点盈亏量的计算[J]. 煤质技术, 2014(3): 13-15.
- [2] Dai Bin, Zhong Ruofei, Hu Jing. Research on 3D reconstruction of urban features from data based on vehicle-borne laser scanning[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2011, 32(3): 89-96.
戴彬, 钟若飞, 胡竞. 基于车载激光扫描数据的城市地物三维重建研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 89-96.
- [3] Chen J, Wu X J, Wang M Y, *et al.* 3D shape modeling using a self-developed hand-held 3D laser scanner and an efficient HT-ICP point cloud registration algorithm[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 414-423.

- [4] Ahn J K, Lee K Y, Sim J Y, *et al.* Large-scale 3D point cloud compression using adaptive radial distance prediction in hybrid coordinate domains[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2015, 9(3): 422-434.
- [5] Qin Ying, Xu Jun. Non-contact optical component curvature radius detection system based on laser scanning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 091203.
覃 瑛, 许 骏. 基于激光扫描法的非接触式光学元件曲率半径测量系统[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 091203.
- [6] Zhou Sen, Guo Yongcai, Gao Chao. Development of a laser-based geometric measurement system for large-scale conical[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508008.
周 森, 郭永彩, 高 潮. 基于激光扫描的大尺寸圆锥体几何测量系统[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0508008.
- [7] Xiong Youhui, Li Peisheng, Zou Xianhong, *et al.* Study for the method of automatic disk coal in the open coal yard[J]. Electric Power, 2003, 36(6): 48-51.
熊友辉, 李培生, 邹显宏, 等. 便携式激光盘煤系统原理及应用[J]. 中国电力, 2003, 36(6): 48-51.
- [8] Zhang Dejin, Li Bijun, He Li. Application on laser measurement for large storage yard based on multi-sensor integration[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0208005.
张德津, 李必军, 何 莉. 基于多传感器集成的堆场激光测量技术应用[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0208005.
- [9] Wang Haibo, Zhang Dejin, He Li. Research on large open stockyard laser measurement methods[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0508002.
王海波, 张德津, 何 莉. 大型露天料场激光测量方法研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0508002.
- [10] Zhang Xiaohu, Ou Jianliang, Yuan Yun, *et al.* Stack-yard 3D measurement based on photogrammetry and projected contour aiding[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0612002.
张小虎, 欧建良, 苑 云, 等. 投影轮廓线辅助下的堆场三维形貌摄影测量研究[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0612002.
- [11] Yang Deshan, Dong Lili, Liang Qianqian, *et al.* Rapid volume measurement for large bulk cargo[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(9): 2126-2133.
杨德山, 董丽丽, 梁倩倩, 等. 大型散货堆体积的快速测量[J]. 光学精密工程, 2016, 24(9): 2126-2133.
- [12] Zhao Qijie, Meng Qingxu. On-line calibration method of stockpile volume measurement based on laser sensors[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1208004.
赵其杰, 孟庆栩. 基于激光传感的料堆体积测量在线标定方法[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1208004.
- [13] Wang Jianjun, Liu Jidong. Analysis and sorting of impacts of measurement errors on positioning accuracy of laser point cloud obtained from airborne laser scanning[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0414001.
王建军, 刘吉东. 影响机载激光扫描点云精度的测量误差因素分析及其影响大小排序[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0414001.
- [14] Wang Jianjun, Li Xiaolu, Xu Tongle, *et al.* Comparison of impacts of control errors and measurement errors of working parameters on accuracies of point cloud products from airborne LiDAR[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0708003.
王建军, 李小路, 许同乐, 等. 机载 LiDAR 中工作参数的控制误差和测量误差对点云产品精度的影响机理及其比较[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708003.
- [15] Zhang Dayong, Wu Wenqi, Wu Meiping. Calibration technology of airborne lidar[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(11): 2806-2813.
章大勇, 吴文启, 吴美平. 机载激光雷达系统标定方法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2806-2813.
- [16] Cao Jian'an, Zhang Leping, Wu Hao, *et al.* Analytical approach for measurement of spatial angle with inclination sensor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(10): 109-114.
曹建安, 张乐平, 吴 昊, 等. 采用倾角传感器实现空间旋转角度测量的解析方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(10): 109-114.
- [17] Feng Zhiyong, Zeng Han, Zhang Li, *et al.* Angle measurement based on gyroscope and accelerometer signal fusion[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2011, 36(4): 137-141.
冯智勇, 曾 瀚, 张 力, 等. 基于陀螺仪及加速度计信号融合的姿态角度测量[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2011, 36(4): 137-141.
- [18] Dong Lili, Yang Deshan, Xu Wenhai, *et al.* Dynamic pitch angle measurement for portable coal inventory instrument[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6): 1241-1247.
董丽丽, 杨德山, 许文海, 等. 手提盘煤仪的动态俯仰角获取方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1241-1247.