

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.04.004

# 基于地面激光雷达的输电线路铁塔倾斜度测量<sup>\*</sup>

沈小军<sup>1</sup> 杜 勇<sup>2</sup> 王仁德<sup>1</sup> 赵 锴<sup>1</sup> 秦 川<sup>1</sup>

(1. 同济大学电气工程系 上海 200092; 2. 国网湖北省电力公司检修公司 武汉 430050)

**摘 要:**输电线路杆塔倾斜度是线路设计与运维均需考虑的重要参数之一,便携高效地实现输电线路杆塔倾斜度的精确测量和数字化描述,具有重要的价值。鉴于现有测量方法的不足和地面三维激光雷达技术的特点,提出了基于地面三维激光雷达实现输电线路杆塔倾斜度测量的新方法,搭建了试验系统,并基于搭建的试验系统开展了现场可行性与对比测试。现场可行性与对比测试结果表明基于地面三维激光雷达不仅能正确地实现杆塔倾斜测量,而且现场测试强度低,测量精度与全站仪测量法精度相当,满足工程测量需求;通过对目标对象的三维虚拟重构,地面三维激光雷达测量方法实现了测量结果可视化化和数字化描述,便于存档和追溯校核;所搭建的测试系统可用于实际工程测量。

**关键词:** 杆塔倾斜;地面激光雷达;点云数据;测量方法;可行性

**中图分类号:** TN959.3;TM75 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

## Inclination measurement of transmission line tower based on terrestrial 3D lidar

Shen Xiaojun<sup>1</sup> Du Yong<sup>2</sup> Wang Rende<sup>1</sup> Zhao Kai<sup>1</sup> Qin Chuan<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. State Grid Hubei Electric Power Company Maintenance Company, Wuhan 430050, China)

**Abstract:** Tower inclination is one of the important parameters to be considered when designing and maintain the transmission line. It has great value to realize accurate measurement and digital description of tower inclination with portably and high efficiency. Considering the deficiency of existing measurement methods and the feature of terrestrial 3D lidar, a new method to measure the tower inclination based on terrestrial 3D lidar is proposed in the paper, and a testing system is established. The field feasibility test and comparison test are carried out based on the developed test system. The test results show that accurate measurement of tower inclination can be realized with less field labor, and its measuring accuracy is as good as total station's which can meet the needs of the engineering survey. The measurement result can be presented with visualization and digitization by 3D modeling of target object based on terrestrial 3D lidar. This method makes it easy to keep in the archives, to retrospect and to check. What's more, the developed test system can be used when doing the actual engineering survey.

**Keywords:** tower inclination; terrestrial 3D lidar; point cloud data; measurement method; feasibility

## 1 引 言

杆塔是输电线路基本设备,当输电线路经过煤炭开采区、软土质地区、山坡地、河床地带等特殊地带时,杆塔基础会发生位移、倾斜、沉降、开裂等现象,从而引起杆塔

的变形或倾斜<sup>[1-2]</sup>。线路杆塔在整体吊装时,吊点位置选取不合理也会引起杆塔的变形倾斜<sup>[3-4]</sup>。杆塔的倾斜易造成输电线路发生倒杆、电气安全距离过小等缺陷,特别是在人口密集区、重要交叉跨越处的线路杆塔一旦发生倒塔,造成的后果十分严重<sup>[5-7]</sup>。如何高精度、高效率地实现电力杆塔倾斜度的测量是工程现场非常关心的问题

题。特别是随着特/超高压输电线路的建成投运,由于线路地理环境较为复杂,其现场测量的需求日益增长。

当前,输电线路杆塔倾斜度测量方法主要有铅垂测量法、经纬(全站)仪测量法以及平面镜法<sup>[2,8]</sup>,其中铅垂测量法需要工作人员登塔作业,存在作业量大和高风险、效率低的不足;经纬仪测量方法是当前杆塔倾斜常用的测量方法,该方法虽无需登塔,但存在操作繁琐不足,且对观测点有一定的要求,当观测点不能满足时,该方法即失效;平面镜测量法虽在到一定程度上克服了对测量地形的限制但现场操作过于复杂,测量精度较低;另外,现有的测量方法均不具备现场数字化描述的功能,不便于归档管理,已不适应智能电网建设对设备状态信息数字化的需求。可见,有必要开发出便携高效、高精度、数字化的输电线路杆塔倾斜度测量新方法,适应智能电网的需求。

随着三维测量技术的发展,激光雷达可快速扫描被测物体,建立详细准确的三维点云模型,并提供精确的定量分析<sup>[9-10]</sup>。地面三维激光雷达更是将全景、高精度、快速数据采集、全数字、非接触等优点集于一身<sup>[11-12]</sup>,已被广泛应用于工厂管道测量、船舶形体和体积(容积)测量、桥梁高速公路测量、地形测量等<sup>[12-19]</sup>。理论分析表明:基于地面三维激光雷达实现输电线路杆塔倾斜度的数字化描述和测量是值得期待的一种新方法,能够很好改善现有测量方法面临的现场作业强度大、精确度不够高、受测量地形限制等不足。鉴于此,本文提出了基于地面激光雷达的输电线路杆塔倾斜度的新方法,并进行了现场可行性及对比实测。

## 2 基于地面激光雷达的杆塔倾斜度测量方法的提出

### 2.1 地面三维激光雷达技术原理

激光雷达技术(lidar)源自1970年美国航天局(NASA)的研发,目前已经有超过30种不同型号的激光扫描系被统投放市场<sup>[17-18]</sup>。激光雷达是以向物体发射大量激光点获取物体表面三维数据的测量技术,具有扫描速度快、精度高、全数字特征等优点,按承载方式不同可分为机载激光雷达技术和地面激光雷达技术。其中地面激光雷达系统主要由激光测距系统、激光扫描系统等组成,测量示意如图1所示。

地面激光雷达的测距方式有脉冲式测距和相位式测距,脉冲式测距是靠扫描控制模块控制扫描头中的两个同步反射镜快速有序的旋转,将激光脉冲发射器所发出的激光脉冲依次对目标扫描,距离测量模块可计算出每个激光脉冲从发射器端口到目标物体上再返回至发射器端口的时间 $T$ ,从而计算出目标物体上每个点的空间三

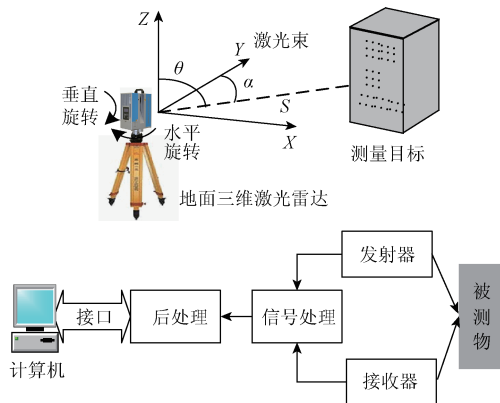


图1 地面三维激光雷达工作原理

Fig. 1 Working principle of terrestrial 3D lidar

维坐标;相位式测距系统是靠激光器对被测目标发射一个正弦调制的光信号,接收目标反射回的光信号,通过测量发射光信号和接收光信号之间的相位差 $\Delta\phi$ ,获得往返信号的时间间隔,从而计算出到目标物体上每个点的空间三维坐标值。

### 2.2 基于地面激光雷达的杆塔倾斜度测量方法

电力杆塔倾斜度定义公式为 $q = S/H$ ,其中 $S$ 为杆塔倾斜值, $H$ 为杆塔实际高度。实际工程测量中一般将杆塔等效为一个刚性整体,则其倾斜度可抽象为顶层中(重)心与塔基层中(重)心的偏离值与杆塔高度的比值。显然,利用地面激光雷达获取确定杆塔底部中心点 $O$ 、顶部中心点 $O_1$ 和其投影点 $O'_1$ ,则杆塔顶部中心点至其底部投影点的距离即为杆塔实际高度 $H$ ,投影点至杆塔底部中心点距离即为杆塔倾斜值 $S$ ,即可实现电力杆塔的倾斜度测量,如图2所示。

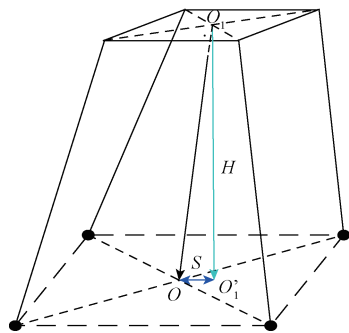


图2 基于地面三维激光雷达杆的塔倾斜度测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of transmission line tower inclination measurement based on terrestrial 3D lidar

基于地面三维激光雷达获取目标物体的外形三维点云数据,然后通过三维重构的目标物体点云模型进行物理尺寸的测量的可行性已被相关行业应用证实。可见,基于地面三维激光雷达实现杆塔倾斜度的测量方法在理

论上是可行的,关键在于杆塔点云模型的建立和杆塔顶、底中(重)心的确立。相关研究结果表明确立杆塔顶、底中(重)心的方法有很多,我们的确定方法是在杆塔彩色点云模型塔脚的底部选取基准点,依据此点创建绝对水平面,水平面与其他 3 个塔脚形成 3 个交点,此四点形成两条对角线的交点就是杆塔底部中(重)心点,如图 2 中的  $O$  点;杆塔顶部中心点则可通过选取杆塔顶部“十”字形塔材中(重)心点如图 2 中的  $O_1$  点。

基于地面激光雷达杆塔倾斜度测量步骤如下。

1) 采集并重构杆塔点云数据

地面激光雷达扫描得到的杆塔点云数据中包含由彗尾效应和空中杂质引起的噪音点。直接用含有大量噪音点的初始点云图测量杆塔的倾斜度会影响视觉效果和测量结果的精确度。通过点云数据处理软件选择各个方位的噪音点,再利用点云消噪功能将冗余点云数据剔除,得到一个视觉效果好、三维立体的杆塔点云模型。

2) 选取塔角较低点

塔角较低点位置的选择决定着杆塔实际高度值的大小,在利于选择其他 3 个塔角点的情况下,塔角较低点尽可能选取靠近地面的塔角点。首先导入消噪后的杆塔点云图,参照数码相机拍摄的杆塔真彩图,在 4 个塔角中的角钢中心点线附近选取一个较低点,将该点作为绝对水平面的基准点。

3) 创建塔底绝对水平面

由于在杆塔点云图是由成千上万的点组成,每个点均有三维坐标值。所以在确定塔角较低点的基础上,将该点的三维坐标值( $X_0, Y_0, Z_0$ )和竖直方向的法向量(0, 0, 1)代入平面的点法式方程:

$$A(X - X_0) + B(Y - Y_0) + C(Z - Z_0) = 0 \tag{1}$$

式中:( $A, B, C$ )为平面法向量, ( $X_0, Y_0, Z_0$ )为已知点的三维坐标。通过代入坐标值的计算,可得绝对水平面方程:

$$Z = Z_0 \tag{2}$$

创建的杆塔底部绝对水平面即为杆塔的底部平面,杆塔顶部中心点至该水平面的距离就是杆塔的实际高度值。

4) 确定其它塔角点并修正塔角较低坐标

创建的杆塔底部绝对水平面将会与其他 3 个塔角的角钢中心线有 3 个交点,但需要对 3 个塔角的角钢中心线进行提取以提高确定这 3 个交点位置的精确度,可通过选取角钢中心上不同高度的两点( $X_a, Y_a, Z_a$ )和( $X_b, Y_b, Z_b$ )来确定角钢中心线,然后利用三条角钢中心线方程与绝对水平面方程计算出其他 3 个塔角点,空间直线计算的方程如下:

$$(X - X_a)/(X_b - X_a) = (Y - Y_a)/(Y_b - Y_a) = (Z - Z_a)/(Z_b - Z_a) \tag{3}$$

在确定这 3 个塔角点的基础上,利用同样的方法对杆塔较低点进行坐标修正,以便更准确地确定杆塔底部中心点的位置。

5) 确定杆塔中心点  $O$  及投影点  $O_1$

杆塔的塔角点是由 4 条角钢中心线和同一绝对水平面确定的,所以这 4 个塔角点处于同一水平面内,它们的对角线也同样相交于绝对水平面内,该交点即为杆塔底部中心点  $O$ ;电力杆塔顶部构造具备对称性,其结构的中心点可等效为杆塔顶部中心点  $O_1$ ,可在杆塔点云图中直接选取;然后依据杆塔顶部中心点的坐标和绝对水平面方程确定杆塔顶部中心点在水平面内投影点的空间位置。

6) 计算杆塔的高度  $H$  和倾斜值  $S$

依据杆塔底部中心点  $O$ ,顶部中心点  $O_1$ ,及其投影点的空间坐标值  $O'_1$ ,计算出杆塔的高度  $H$  和杆塔的倾斜值  $S$ ,依据杆塔倾斜度定义公式计算倾斜度。

3 现场可行性测试

3.1 测试系统与试验方案

要检验基于地面三维激光雷达杆塔倾斜度测量方法的可行性,必须搭建一套试验系统,开展地面三维激光雷达扫描仪和点云数据重构软件的选型。

由第 2 节的测量方法可知,获取满足测量需求的点云数据是实际测量中基于地面激光雷达实现杆塔倾斜度测量关键问题之一。目前主流地面三维激光雷达系统有 RIGEL 的 VZ 系列,Leica 的 HDS 系列,Z + F 的 image 系列,FARO 的 Focus3D 系列等。经性能对比分析,本次试验中选择了 Z + F image 5010 型地面三维激光雷达扫描仪以满足杆塔倾斜度测量的精度要求。Z + F image 5010 型地面三维激光雷达扫描仪是目前远距离商业化地面激光雷达扫描仪精度最高的设备之一,支持扫描时间、数据采集精度、角度、白平衡等参数调节和工作模式的设置,其部分指标参数如表 1 所示。

表 1 Z + F 5010 地面激光雷达主要性能指标  
Table 1 Main parameters of Z + F image 5010-type terrestrial 3D lidar

| 指标名称 | 参数              |
|------|-----------------|
| 扫描模式 | 相位式             |
| 测量范围 | 水平 360°,垂直 320° |
| 激光等级 | 一级              |
| 扫描距离 | <187 m          |
| 扫描精度 | 1 mm@50 m       |

工程应用中激光雷达点云数据专业软件主要有 Polyworks、pointcloud、terrasolid 等。其中 Polyworks 软件由加拿大 InnovMetric 公司于 1996 年开发的,是一个基于

模块操作的软件,它支持 POL、PIF、IGE、XYZ 等格式文件的输入输出,包括数据配准 (IMlign)、检测模块 (IMinspect)、数据融合 (IMMerge)、模型编辑和后期处理 (IMedit)、模型浏览 (IMView) 等功能模块,其中的检测模块可对点云图进行各类测量,例如角度、距离、面积等。本文试验中将基于该软件模块开展杆塔倾斜度所需参数的数字化测量。

另外,为了验证基于地面激光雷达测量杆塔倾斜度的有效性,采用目前应用较多的全站仪法对杆塔倾斜度进行测量。对比测试中选用了徕卡 TPS 802 型全站仪,其部分性能指标如表 2 所示。

表 2 徕卡 TPS 802 全站仪主要性能指标

Table 2 Main parameters of Leica TPS 802 total station

| 指标名称 | 参数                                   |
|------|--------------------------------------|
| 测量方法 | 绝对编码连续测量                             |
| 测量范围 | 1 000 m                              |
| 测量精度 | 2 mm + 2 × 10 <sup>-6</sup> D@ 500 m |

测试对象为国网湖北省电力公司检修公司管辖的凤凰山 500 kV 军风 II 回 104 号杆塔,建设资料显示该塔为预倾斜、耐张塔,理论设计倾斜度为 5.00‰。试验中利用 Z + F image5010 型地面激光雷达在塔底选择合适位置一站式采取杆塔点云数据与彩色图片;同时采用徕卡 TPS 802 型全站仪在杆塔横线路和顺线路方向获取杆塔的倾斜数据,现场测量如图 4 所示。

由于基于地面三维激光雷达和全站仪获取杆塔初始测量数据的类型不一致,故它们计算杆塔倾斜度公式分别为:

$$q = \frac{S}{H} \times 1\,000‰ \tag{4}$$

$$q = \sqrt{q_1^2 + q_2^2} \tag{5}$$

式(4)为基于地面三维激光雷达测量法计算公式,其中  $S$  为杆塔倾斜值,  $H$  为杆塔实际高度;式(5)为全站仪法计算公式,其中  $q_1$  为横线路方向倾斜度,  $q_2$  为顺线路方向倾斜度。



(a) 被测杆塔图片  
(a) Picture of tested tower

(b) 地面激光雷达采集点云  
(b) Point cloud acquisition by terrestrial 3D lidar



(c) 全站仪横线路测量  
(c) Measurement from the direction of horizontal line by total station instrument

(d) 全站仪顺线路测量  
(d) Measurement from line direction by total station instrument

图 4 现场测量图

Fig. 4 Scene testing picture

3.2 测试结果分析

依据第 2 节描述的测量原理和流程,基于文中搭建的地面激光雷达测试系统获取的 500 kV 军风 II 回 104 号杆塔点云数据经过消噪重构处理后,测得武汉市凤凰山 500 kV 军风 II 回 104 号杆塔倾斜值  $S$  为 0.192 m,杆塔高度  $H$  为 40.162 m,如图 5 所示。

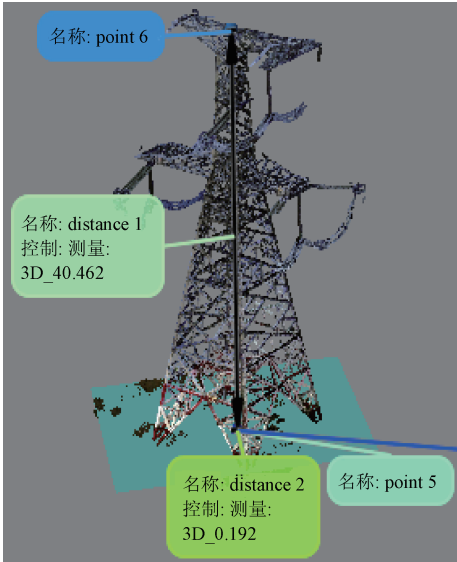


图 5 基于点云重构模型的测量结果

Fig. 5 Measurement results based on reconstruction model

全站仪测得该杆塔横线路方向倾斜度  $q_1$  为 4.89‰,顺线路方向倾斜度  $q_2$  为 1.96‰。将上述数据分别代入利用式(1)和(2)分别计算出杆塔倾斜度,并与设计值对比,如表 3 所示。

由表 3 可知,地面激光雷达法和全站仪法的相对误差分别为 0.22‰ 和 0.26‰,同时两种测量方法之间的

表 3 杆塔倾斜度测试结果

Table 3 Test results of tower inclination (%)

| 测量方法    | 测量结果 | 理论值  | 误差   |
|---------|------|------|------|
| 地面激光雷达法 | 4.78 | 5.00 | 0.22 |
| 全站仪法    | 5.26 | 5.00 | 0.26 |

误差不超过 0.5%，可见本文所提的基于地面三维激光雷达的测量方法和流程是可行的，搭建的测量系统可用于现场实测，测量精度满足工程需求。但需要指出的是地面激光雷达测试杆塔倾斜度的测量精度和可信性与杆塔点云数据的采集及模型重构精度是直接相关的，实际应用中需要选择合适的地面激光雷达仪和工作模式；另外，应用中需充分发挥地面三维激光雷达获取的杆塔三维数据可多次重复测量的优势，采用多次测量求平均值以消除单次测量中人为选点带来的误差。

4 结 论

精确、高效地实现杆塔倾斜度测量对电力系统的安全运行具有重要的意义。基于地面激光雷达的杆塔倾斜度测量方法通过一站式快速获取杆塔实景三维数据，能有效降低现场作业强度，缩短户外测量时间，减少现场往返次数；该方法不仅能实现电力杆塔倾斜度的精确测量，还能实现测量结果的图像化和数字化描述，便于存档和追溯。基于地面激光雷达的杆塔倾斜度测量方法作为一种高效的、全新的图像数字化测量方法值得推广应用。

参考文献

[ 1 ] 张宏志. 500 kV 输电线路典型缺陷分析图册[ M ]. 北京: 中国电力出版社, 2009.  
ZHANG H ZH. Typical Defects and Pictures of 500 kV Transmission Line [ M ]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.

[ 2 ] DL/T 741—2010 架空送电线路运行规程[ S ]. 北京: 国家能源局, 2010.  
DL/T741-2010 Operating code for overhead transmission line[ S ]. Beijing: National Energy Administration, 2010.

[ 3 ] GB 50233—2005 110 ~ 500 kV 架空送电线路施工及验收规范[ S ]. 北京: 中华人民共和国建设部、中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 2005.  
GB 50233—2005 Code for construction and acceptance of 110 ~ 500kV overhead transmission line [ S ]. Beijing: The Ministry of Construction of the People’s Republic of China, the General Administration of Quality Supervision, inspection and Quarantine of the People’s Republic of China, 2005.

[ 4 ] Q/GDW 153—2006 1000 kV 架空送电线路施工及验收规范[ S ]. 北京: 中华人民共和国国家电网公

司, 2007.  
Q/GDW 153—2006 Code for construction and acceptance of 1000kV overhead transmission line [ S ]. Beijing: China State Grid Corp of the people’s Republic of China, 2007.

[ 5 ] 胡毅, 输电线路运行故障的分析与防治[ J ]. 高电压技术, 2007, 33(3): 1-8.  
HU Y. Analysis on operation faults of transmission line and countermeasures [ J ]. High Voltage Technology, 2007, 33(3): 1-8.

[ 6 ] 陈海波, 王成, 李俊峰, 等. 特高压输电线路在线监测技术的应用[ J ]. 电网技术, 2009, 33(10): 55-58.  
CHEN H B, WANG CH, LI J F, et al. Application of on-line monitoring technologies for UHV AC transmission lines [ J ]. Power System Technology, 2009, 33 ( 10 ): 55-58.

[ 7 ] 黄新波, 孙钦东, 王小敬, 等. 输电线路危险点远程图像监控系统[ J ]. 高电压技术, 2007, 33(8): 7-9.  
HUANG X B, SUN Q D, WANG X J, et al. Image remotes monitoring system of transmission lines dangerous items [ J ]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 7-9.

[ 8 ] 宋继明, 宋华松, 汪以文, 等. 特殊地形条件下杆塔倾斜率的测量方法[ J ]. 电网技术, 2010, 34(12): 219-222.  
SONG J M, SONG H S, WANG Y W, et al. Measurement on the inclination of power pole and tower erected on special landform [ J ]. Power System Technology, 2010, 34(12): 219-222.

[ 9 ] MÉNDEZ V, CATALÁN H, ROSELL-POLO J R, et al. LiDAR simulation in modelled orchards to optimise the use of terrestrial laser scanners and derived vegetative measures [ J ]. Biosystems Engineering, 2013, 115(1): 7-19.

[ 10 ] 刘佳. 三维激光全景扫描系统误差分析及相机标定[ D ]. 北京: 首都师范大学, 2009.  
LIU J. Error analysis of 3D laser panoramic scanning system and camera calibration [ D ]. Beijing: Capital Normal University, 2009.

[ 11 ] ARAYICI Y. An approach for real world data modelling with the 3D terrestrial laser scanner for built environment [ J ]. Automation in Construction, 2007, 16(6): 816-829.

[ 12 ] 徐祖舰, 王滋政, 阳锋. 机载激光雷达测量技术及工程应用实践[ M ]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009.  
XU Z J, WANG Z ZH, YANG F. Measuring Technology and Engineering Practice of Airborne Laser Radar [ M ]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009.

[ 13 ] 郝雪丽, 孙朝云, 沙爱民, 水泥混凝土路面刻槽磨损程

- 度三维检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1767-1773.
- HAO X L, SUN ZH Y, SHA AI M, et al. 3D Detection of the groove wear degree on cement concrete pavement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(8): 1767-1773.
- [14] 陈伟民, 李存龙, 基于微波雷达的位移/距离测量技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1251-1265.
- CHEN W M, LI C L. Radar-based displacement / distance measuring techniques[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9): 1251-1265.
- [15] 陈伟, 郝华东, 李东升, 等. 激光扫描立式罐倾斜测量新方法研究[J], 中国测试, 2015, 41(2): 22-26.
- CHEN W, HAO H D, LI D SH, et al. Study on new tilt measuring method for vertical tanks based on laser scanning [J]. China Measurement & Test, 2015, 41(2): 22-26.
- [16] 南刚雷, 张瑞峰, 张梓然. 基于 PCL 的柴油机缸盖三维特征提取技术[J], 电子测量技术, 2016, 39(2): 80-82.
- NAN G L, ZHANG R F, ZHANG Z R. Technology about cylinder head's 3D feature extraction based on PCL[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(2): 80-82.
- [17] 李清泉, 李必军, 陈静. 激光雷达测量技术及其应用研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(5): 387-391.
- LI Q Q, LI B J, CHEN J. Research on laser range scanning and its application [J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 2000, 25(5): 387-391.
- [18] 周娜, 安志勇, 李咏豪. 采用激光雷达的大尺寸三维形貌测量技术[J], 红外与激光工程, 2011, 40(12): 23-29.
- ZHOU N, AN ZH Y, LI Y H. Large-sized three-dimensional profile measurement technology based on laser radar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 23-29.
- [19] 谭国铨. 3D 激光扫描仪在电厂冷却塔变形监测中的应用探讨[J]. 电力勘测设计, 2009(4): 30-32.
- TAN G Q. Apply 3D laser scanner in the deformation monitoring of cooling towers in power plant [J]. Electric Power Survey & Design, 2009(4): 30-32.

## 作者简介



E-mail: sxj999000@tongji.edu.cn

**Shen Xiaojun** received his B. Sc. degree in 2001 from North China Electric Power University, received his M. Sc. degree in 2004 from North China Electric Power University, received his Ph. D. degree in 2007 from Shanghai Jiaotong University, now he is associate professor in Tongji University. His main research interest include Electric power equipment status evaluation, real 3D reconstruction and its application, energy efficient utilization, etc.



**杜勇**, 1995 年于武汉水利水电大学获得学士学位, 2004 年于武汉大学获得硕士学位, 现为国网湖北省电力公司检修公司高级工程师, 主要研究方向为超、特高压电网运维技术。

E-mail: duyuf@163.com

**Du Yong** received his B. Sc. degree in 1995 from Wuhan University of water resources and hydropower, received his M. Sc. degree in 2004 from Wuhan University, now he is senior engineer with the rank of a professor in State Grid Hubei electric Power Company Maintenance Company, His main research interest include ultra-high voltage power grid operation and maintenance technology.