

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.023

无人机在特高压输电线路勘测中的应用研究

陈伦清, 祖为国

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 随着无人机技术的发展, 采用无人机进行线路勘测将成为一种趋势。但微型多旋翼无人机搭载传感器有效像素仅约 1 200 万时, 如何评估其航摄成果质量及提高其工效是亟待解决的问题。针对上述问题, 基于特高压线路输电线路工程机载激光 DEM 数据和工测数据, 对微型多旋翼无人机线路勘测数据的质量进行了评估, 对其作业方法进行了改进。实践证明文章所提出的作业方法能为特高压输电线路勘测提供便携、可靠及高效的数据采集方式。

关键词: 无人机; 质量; 特高压输电线路; 线路勘测

中图分类号: TM75

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)01-0119-06

Application Research on UHV Transmission Line Survey Based on Unmanned Aerial Vehicle

CHEN Lunqing, ZU Weiguo

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: With the development of UAV technique, it has become a trend to use it for transmission survey. However, it is important how to evaluate the survey quality and efficiency of UAV with 12 million pixel sensor. According the above problems, compared with the lidar data and engineering surveying data of a practical project of UHV transmission line, the quality of UAV data has been evaluated and the work method of UAV has been improved. Practice has proved that the improving method can offer a convenient, reliable, efficient way to gather data for UHV transmission line survey.

Key words: UAV; quality; UHV transmission line; survey

随着我国经济的高速发展, 我国特高压输电线路的建设已经取得飞速发展。输电线路分布点多、面广, 如何及时获取遥感和摄影影像数据成为电网工程建设的一项重要工作。由于国家对空域的管制较紧, 飞行前复杂的审批程序以及天气影响等诸多问题, 采用载人飞机进行航空摄影测量一般周期较长。随着科技的不断发展, 无人机航摄系统以其经济、便捷、高时效、高分辨率等显著特点, 已广泛应用于电网工程建设, 在突发灾害应急数据获取及小范围快速成图方面显示出了独特的优势。无人机不仅可以进行经典的数字航空摄影测量工作, 还可

进行倾斜摄影、空中 360°全景摄影等。

大量试验及工程实践已经表明无人机测绘地形图的精度可以满足 1:2 000 地形图的要求, 当测绘 1:500、1:1 000 大比例尺地形图时, 其地面分辨率可以达到规范标准, 但是高程精度及高精度可量测的正射影像图(1:500 比例尺)无法满足规范要求^[1-2]。

2016 年, 大疆精灵系列微型多旋翼无人机以其价廉物美、灵巧便携和安全稳定等特点得到用户的喜爱, 其搭载传感器有效像素仅约 1 200 万, 而低空数字航空摄影规范^[4]要求“无人机所搭载传感器有效像素应不小于 2 000 万”, 如何评估其航摄成果质量及提高其航摄工效是亟待解决的关键问题。

本文采用“智巡者”无人机低空遥感系统, 结合 Pix4D 软件进行航线设计、地面监控、空三解析、影像镶嵌、精度分析, 对滇西北至广东特高压直流

收稿日期: 2016-11-18

作者简介: 陈伦清(1970), 男, 广东南雄人, 高级工程师, 学士, 主要从事工程测量、海洋测量、精密工程测量、无人机航测、地理信息在工程中的应用研究工作(e-mail)chenlunqing@gedi.com.cn。

输变电工程及 500 kV 甲湖湾电厂出线工程改线项目,重点进行了低空航摄测绘大比例尺地形图的高程精度测试分析。

1 微型多旋翼无人机大比例测图技术路线

1.1 “智巡者”无人机低空遥感系统

“智巡者”是由成熟的多旋翼无人机平台和软件系统构成的一套无人机低空遥感系统,其中航摄平台系统采用大疆全系列无人机(见图1),本项目采用精灵4无人机,巡航时间为 23 min,巡航速度为 10~15 m/s,抗风能力 4 级,最大飞行高度 1 000 m,航摄传感器为 DJ-FC300X 非量测相机,等效焦距为 3.61 mm,分辨率 4 000 像素×3 000 像素。软件系统自主研发,主要由基于 Android 的飞行控制软件、数据处理盒子及基于 Android 数据应用软件等三部分构成。

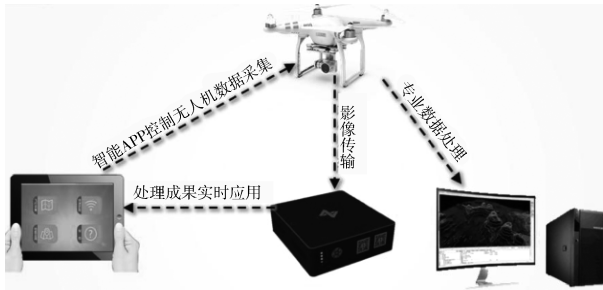


图1 “智巡者”无人机低空遥感系统

Fig. 1 Esmart UAV low-altitude remote sensing system

1.2 微型多旋翼无人机航摄测图工作流程

微型多旋翼无人机航摄测图的主要工作流程如图2所示。

1.3 工程实例

1.3.1 项目概况

测区位于博罗,宽约 1.7 km,长约 4 km。测区地貌既有平地,又有丘陵、山地等,植被以桉树、松杂、果园为主。

1.3.2 技术设计及航测实施

本测试按照无人机航摄测图工作流程,使用“智巡者”无人机低空遥感系统结合 Google 地图进行了技术设计、像控点布设、航线设计和航摄飞行,如图3所示。采用 GDCORS 获取了 11 个像控点 1 980 西安坐标,平面及高程精度为 ± 2 cm。

航飞实施具体情况如下:

航摄比例尺为 1:2 000,航向重叠度为 80%,

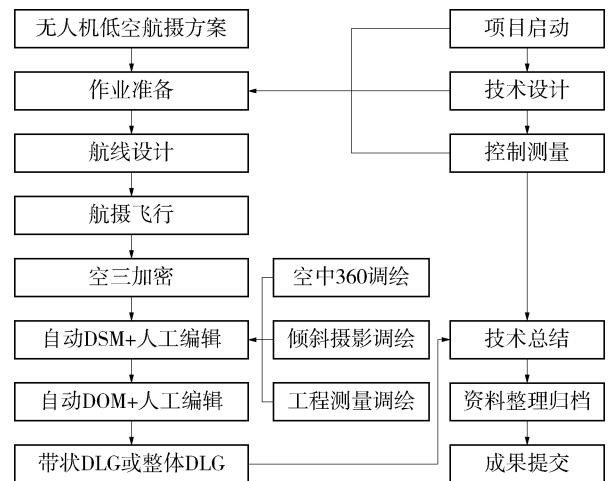


图2 无人机影像获取与处理流程

Fig. 2 UAV image acquisition and processing process

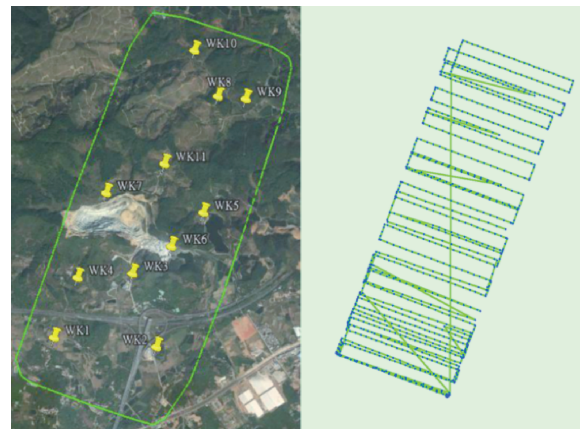


图3 像控点布设及航迹图

Fig. 3 Ground control point & aerophoto grammetry trace

旁向重叠度 60%,地面分辨率为 0.12~0.18 m,航高为 250~350 m,实施航飞 8 个架次共采集了 988 张有效照片,航飞面积达 6.8 km²。

1.3.3 数据处理

本测试采用 Pix4D 软件进行数据预处理、自动空三加密、自动生成 DSM、自动生成 DOM。由于无人机飞行高度较低,高层地物同名点视差较大,所携带的航摄系统为小焦距非量测型相机,按照相机中心投影的成像原理,影像边缘投影误差较大,经过软件自动处理生成的 DSM 和 DOM,由于 DSM 精度不足,对于地面高层建筑无法进行真正射纠正,自动生成的 DOM 往往会出现接缝和建筑物边缘扭曲的现象,所以,需要对正射影像的镶嵌线进行人工编辑。

1.3.4 精度指标

1) 区域网空三中误差为 0.15 像素。

2) 相机自检校误差正常。

3) 像控点量测精度。依据数字航空摄影测量控制测量规范[6] 1:500、1:1 000、1:2 000 像控点平面中平地、丘陵误差为 0.06 m、0.12 m、0.24 m, 山地误差为 0.08 m、0.16 m、0.32 m, 高程中误差不超过基本等高距的 1/10, 根据表 1 可知本项目像控点平面残差为 0.070 153 m, 高程残差为 0.009 247 m, 满足规范[6]要求。

2 无人机大比例测图关键问题研究

2.1 基于工程测量方法质量检验

基于 500 kV 甲湖湾电厂出线工程改线项目工测数据, 对无人机航测成果和滇西北至广东特高压直流输变电工程激光雷达 DEM 成果(2014 年底)进行质量评估, 对每个工测数据基于无人机 DSM 与激光 DEM 分别内插得到高程, 对比统计结果见表 2。

根据表 2 统计结果进行分析发现:

- 1) 由于激光点可穿透稀疏植被至地面, 导致激光雷达 DEM 成果高程精度远优于无人机 DSM 成果高程精度。
- 2) 工测和无人机的高程差值与植被厚度密切相关。

2.2 基于激光 DEM 点云数据质量检验

激光雷达 DEM 成果经过大量工程工测数据验证, 满足机载激光雷达数据处理技术规范[7]要求, 可作为无人机航测高程精度评估标准。

在整个测区内按间隔 10 m 生成格网点, 共 57 672 个点。对每个格网点基于无人机 DSM 与激光 DEM 分别内插得到高程, 对比统计结果见表 3 和图 4。

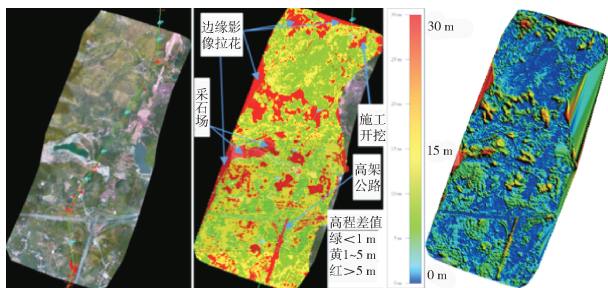


图 4 工测数据(图左)、激光 DEM 与无人机 DSM 高程比对(图中 & 图右)

Fig. 4 Engineering surveying data (left image) and Lidar DEM & UAV DSM elevation check (middle image & right image)

剔除采石场开挖、高速公路开挖、高架高速等人工建构物、山地边缘区域等因素影响, 高程差值与植被厚度密切相关。

依据低空数字航空摄影测量内业规范[5] 数字线划图(B类)精度要求, 1:500、1:1 000、1:2 000 山地高程注记点精度要求中误差分别为 0.7 m、1.2 m 和 2.5 m。根据表 1 统计结果进行分析发现:

1) 结合 DOM 影像分析, 山地密林测区边缘及影像拉花处, 无人机航测高程数据易出现异常, 该部分数据应剔除。

2) 测区范围内有高大植被及建构物时, 应对该区域进行调绘、现场工测或立体量测等方式, 进行 DEM 精细编辑, 当该区域 DEM 编辑后的高程中误差小于 2.5 m, 可确保满足 1:2 000 数字线划图(B类)的高程精度要求。

3) 测区范围内有低于 5 m 的稀疏、低矮植被及低矮居民区域时, 宜对该区域进行调绘及进行 DEM 编辑, 当该区域 DEM 编辑后的高程中误差小于 1.2 m, 可确保满足 1:1 000 数字线划图(B类)的高程精度要求。

4) 测区范围内植被稀疏、低矮时, 宜对该区域进行调绘及进行 DEM 编辑, 当该区域 DEM 编辑后的高程中误差小于 0.7 m, 可确保满足 1:500 数字线划图(B类)的高程精度要求。

2.3 稀少像控点布设方法及质量评估

无人机航测像幅小, 相片数量大, 依照现行规范, 需要布设大量的野外控制点。为提高无人机航测工效, 研究稀少像控点的布设方法是一条重要途径。基于本次航测数据, 特将像控点删减为 6 个点, 然后重新自动计算获得 DSM₆。按照上述方法, 对像控点为 11 个点自动计算获得 DSM₁₁ 进行比较, 共计高程点 57 665 个, 对比统计结果见图 5 和表 4。

根据表 4 统计结果分析发现:

1) 像控点周围及像控点间带状区域裸露地表 DSM₆ 与 DSM₁₁ 高程差值很小。

2) 由于 DSM₆ 与 DSM₁₁ 零点不一致, 导致内插计算格网点高程出现高程差值, 高程差值与植被厚度变化大小密切相关, 高程差值 2 m 以上的高程点基本位于密林区域, 高程差值 5 m 以上的高程点基本位于桉树林区域。

3) 删减控制点前后, 测区 DSM 高程差值中误

表1 像控点精度统计表

Tab. 1 Statistics of image control point precision

GCP 名称	XY/Z 精度/mm	X 误差/m	Y 误差/m	Z 误差/m	投影误差/像素	验证/标记
WK3(3D)	0.020/0.020	0.026	0.041	0.001	0.547	31/31
WK4(3D)	0.020/0.020	0.062	-0.044	-0.010	0.613	55/55
WK5(3D)	0.020/0.020	-0.033	0.023	-0.002	0.438	56/56
WK6(3D)	0.020/0.020	-0.068	-0.019	0.021	0.577	26/26
WK7(3D)	0.020/0.020	0.023	-0.020	-0.010	0.567	32/32
WK8(3D)	0.020/0.020	0.135	0.033	0.012	0.754	42/42
WK9(3D)	0.020/0.020	-0.122	0.024	0.006	0.752	47/47
WK10(3D)	0.020/0.020	0.002	-0.003	0.001	0.555	38/38
WK11(3D)	0.020/0.020	0.022	-0.035	0.009	1.138	37/37
WK12(3D)	0.020/0.020	-0.036	-0.013	0.001	0.706	45/45
WK2(3D)	0.020/0.020	-0.019	0.006	-0.002	0.396	72/72
Mean	/	-0.000 838	-0.000 681	0.002 305	/	/
Sigma	/	0.064 771	0.026 928	0.008 955	/	/
RMS Error	/	0.064 776	0.026 936	0.009 247	/	/

表2 基于工测数据高程比对统计表

Tab. 2 Statistics of elevation contrast based on engineering survey data

分布范围	工测高程 - 无人机航测高程			工测高程 - 激光高程		
	高差/m	高程点/个	比例/%	高差/m	高程点/个	比例/%
空旷、裸露地表	0~1	157	35.04	0~1	407	90.85
10 m 范围内有稀疏、低矮植被的裸露地表等	1~2	99	22.10	1~2	24	5.36
低于 5 m 的稀疏、低矮植被及低矮居民区域	2~5	144	32.14	2~5	12	2.68
高大植被及建构物	5~18	48	10.71	5~11	5	1.12
/	合计	448	100	合计	448	100

表3 基于激光 DEM 点云数据高程比对统计表

Tab. 3 Statistics of elevation contrast based on lidar DEM data

分布范围	高差/m	高程点/个	比例/%	中误差/m
空旷、裸露地表	0~1	20 310	35.22	高差 0~1m; 0.53
10 m 范围内有稀疏、低矮植被的裸露地表和水面等	1~2	9 775	16.95	高差 0~2m; 0.95
低于 5 m 的稀疏、低矮植被及低矮居民区域	2~5	14 654	25.41	高差 0~5m; 2.08
高大植被及建构物、开挖场地、山地密林测区边缘	5~25	11 716	20.31	高差 0~25m; 5.48
山地密林测区边缘、开挖场地(采石场、在建高速)	25~158	1 217	2.11	高差 0~158m; 10.57
/	合计	57 672	100	/

表4 基于稀少像控点布设方法高程质量评估统计表

Tab. 4 Statistics of elevation quality evaluation based on exiguity control points design method

分布范围	高差/m	高程点/个	比例/%	中误差/m
像控点周围及像控点间带状区域裸露地表。	0~0.1	18 221	31.60	/
/	0.1~0.5	34 668	60.12	/
/	0, 5~1	3 805	6.60	/
DSM ₆ 与 DSM ₁₁ 零点差异, 内插计算高程点出现差异; 密林厚度变化越大, 内插高程差异越大。	1~2	741	1.29	高差 0~2 m; 0.31
/	2~17	230	0.40	高差 0~17 m; 0.44
/	合计	57 665	100%	/

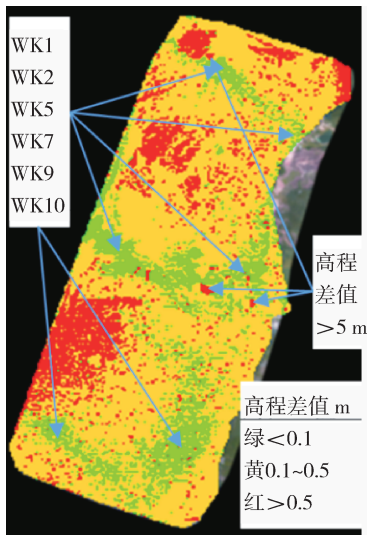


图 5 DSM_6 与 DSM_11 高程比对

Fig. 5 DSM_6 & DSM_11 elevation check

差为 0.44 m, 如果忽略测区植被覆盖区域影响, 则测区 DSM 高程差值中误差为 0.31 m, 远小于规范^[5] 1:2 000 数字线划图(B类)的高程精度要求 1/3, 根据误差传播理论, 删减控制点前后对测区 DSM 高程质量的影响可忽略不计。

2.4 提高微型多旋翼无人机航摄成果质量的措施

2.4.1 带状 DEM 编辑

倾斜摄影技术能够从不同角度对地面系统的物体进行全方位拍摄, 通过配套软件可直接利用成果影像进行高度、长度、面积、体积、角度、坡度等属性的量测^[2]。空中 360 全景摄影技术把传感器球形拍摄的一组或多组照片拼接成一个全景图像, 能为用户提供超大视角浏览的球形全景图。它具有数据获取简单、建模速度快、真实感强、交互性能好等优点。

基于倾斜摄影技术和空中 360 全景摄影, 对沿线带状区域植被及建构物进行快速调绘, 采用自动生成的数字表面数据(DSM), 对植被覆盖区域及建构物进行局部人工编辑, 得到带状 DEM 数据。

2.4.2 立体模型量测

采用 DSM 数据, 套合立体模型数据, 对植被覆盖区域及建构物进行人工编辑, 使点位切准地面, 得到 DEM 数据。

2.4.3 局部 DLG 编辑

采用立体像对量测的方式, 对局部 DOM 变形

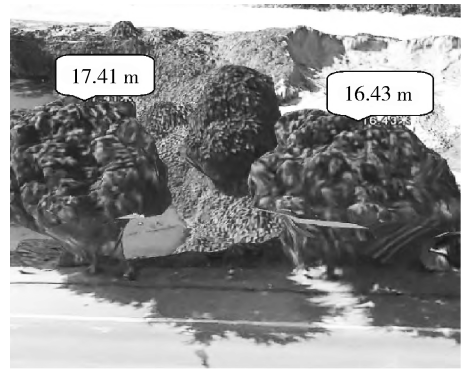


图 6 树高量测

Fig. 6 Tree height measurement

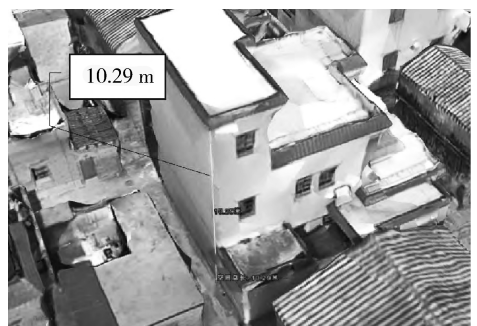


图 7 房屋高度量测

Fig. 7 Height measurement of building

较大区域的建构物进行人工编辑, 使点位切准建构物地面特征点, 得到 DLG 数据。

2.5 提高微型多旋翼无人机航摄工效的措施

2.5.1 优选起降点

多旋翼无人机续航时间短, 相同距离无人机耗电量垂直起降一般约为水平位移的 3 倍, 因此, 起降点宜优先考虑测区附近且易于到达的高点, 其次考虑每架次摄区的角点附近, 以减少非航摄作业期间的电量损耗。

2.5.2 采用稀少像控点布设方案

在测区四周拐点或边缘均匀布设像控点, 点间距离不大于 1.5 km, 每平方公里不少于 1 个点, 最少 4 个点; 像控点采用实地选点或实地造靶标方式, 确保影像清晰, 易于判刺和立体量测, 精度满足规范^[6]要求; 同时, 加大像片重叠度设计, 航向宜不小于 80%, 旁向宜不小于 60%, 提高立体模型的联结强度。

2.5.3 线路带状航测带宽宜适当下调

由于载人飞机航测审批等原因一般周期较长, 为便于设计人员进行线路路径优化, 尽量避免补

飞, 载人飞机航测带宽通常规定为 2.3~3 km, 通过大量的工程实践证明, 该规定对载人飞机航测是适宜的。而无人机航测方便快捷, 当局部需要补飞时, 无人机可及时响应。结合工程实践, 航测带宽可适当下调为 1.5~2.0 km, 在保障设计人员进行线路路径优化时, 提高航测工效。

通过上述措施, 可确保每架微型多旋翼无人机线路航测工效达到 7~10 km/d。当采用机群作业方式时, 可进一步提高航测工效。

3 结论

通过工程实践, 微型多旋翼无人机航测成果质量可满足 1:2 000 地形图测绘的要求, 在植被稀疏、低矮的丘陵地区及山地可满足 1:1 000 测图要求和 1:5 000/1:500 线路平断面图测量的精度要求, 完全可以满足输电线路优化选线以及平断面图数据采集的要求; 同时, 采用稀少像控点布设方法可大幅提高微型多旋翼无人机工效; 采用倾斜摄影和空中 360 技术对测区局部高大植被进行快速调绘+实地工测的方法, 经局部 DSM 编辑后, 可有效提高无人机 DSM 质量, 有利于无人机技术在特高压输电线路勘测中的推广应用。

(责任编辑 郑文棠)

参考文献:

- [1] 陈姣. 无人机航摄系统测绘大比例尺地形图应用研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [2] 赵明泽, 申兴旺, 郭明, 彭江帆. 基于低空摄影测量的高精度数字正射影像图生成 [J]. 工程勘察, 2016(4): 46-50. ZHAO Mingze, SHEN Xingwang, GUO Ming, PENG Jiangfan. The generation of high-precision digital orthophoto maps based on the low altitude photogrammetry [J]. Geotechnical Investigation & Survey, 2016(4): 46-50.
- [3] 汤坚, 杨骥. 无人机倾斜摄影技术在特高压输电线路路径优化中的应用研究 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(Supp.1): 203-206. TANG Jian, YANG Ji. Research and application of UHV transmission line optimization based on oblique photography of UAV [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(Supp.1): 203-206.
- [4] 国家测绘局. 低空数字航空摄影规范: CH/Z 3005—2010 [S]. 北京: 测绘出版社, 2010.
- [5] 国家测绘局. 低空数字航空摄影测量内业规范: CH/Z 3003—2010 [S]. 北京: 测绘出版社, 2010.
- [6] 国家测绘局. 数字航空摄影测量控制测量规范: CH/Z 3006—2010 [S]. 北京: 测绘出版社, 2011.
- [7] 国家测绘局. 机载激光雷达数据处理技术规范: CH/T 8023—2011 [S]. 北京: 测绘出版社, 2011.

(责任编辑 郑文棠)

(下接第 133 页 Continued from Page 133)

参考文献:

- [1] 黄涛, 李忠诚. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的抗飞机撞击结构非线性动力分析 [J]. 核科学与工程, 2015, 35(4): 743-748. HUANG T, LI Z C. Nonlinear dynamic analysis of air plane crash shell based on ansys/ls-dyna [J]. Nuclear Science and Engineering, 2015, 35(4): 743-748.
- [2] 胡正春, 梁峻峰, 万志军, 等. 台山核电厂核岛厂房土建安全设计技术 [J]. 核动力工程, 2015, 36(Supp.1): 1-4. HU Z C, LIANG J F, WAN Z J, et al. Safety design technology for civil engineering of nuclear island building in taishan nuclear power plant [J]. Nuclear Power Engineering, 2015, 36(Supp.1): 1-4.
- [3] 李骏, 刘军, 李政. 几种模板体系在 EPR 核电站中的应用 [J]. 施工技术, 2012, 41(6): 70-73. LI J, LIU J, LI Z. Application of several kinds of formwork in epr nuclear power plants [J]. Construction Technology, 2012,

41(6): 70-73.

- [4] 陈敦, 田杰, 田大业. 新型柱板式高墩施工关键技术 [J]. 施工技术, 2015, 44(4): 79-84. CHEN D, TIAN J, TIAN D Y. Key construction technology of the new column-slab high pier [J]. Construction Technology, 2015, 44(4): 79-84.
- [5] 郑群, 乔传颀, 于戈, 等. 望京 SOHO 中心多体系核心筒爬模施工技术 [J]. 施工技术, 2015, 44(19): 34-38. ZHENG Q, QIAO C H, YU G, et al. Construction technology of core tube climbing formwork in wangjing soho center [J]. Construction Technology, 2015, 44(19): 34-38.
- [6] 牛潮, 杨易琳. 台山核电水库大坝工程悬臂挂架模板施工技术 [J]. 施工技术, 2014, 43(16): 70-73. NIU C, YANG Y L. Construction technology of cantilever pylon formwork for the reservoir dam engineering of taishan nuclear power station [J]. Construction Technology, 2014, 43(16): 70-73.

(责任编辑 高春萌)