

DOI: 10.7672/sgjs2025160110

基于无人机的塔式起重机智能巡检系统的开发与应用

焦鑫¹, 陈宗霖¹, 邱波², 张欣¹, 范键¹, 蔡振伟¹, 徐一鸣¹

(1. 中建三局集团(深圳)有限公司, 广东 深圳 518110;

2. 长沙筑瞰智能科技有限公司, 湖南 长沙 410000)

[摘要] 当前塔式起重机安全检查仍基本采用传统人工作业方式, 存在检测时间长、强度大、风险高等问题。基于大疆MSDK开发工具包, 采用Java/Kotlin编程, 设计一款针对塔式起重机智能巡检APP, 以实现无人机对塔式起重机的自动飞行和拍摄, 快速、准确、便捷地获取塔式起重机相关影像资料, 判断塔式起重机安全隐患。该方法能大幅提升塔式起重机检查的效率和质量。由现场测试结果可知, 无人机对塔式起重机安全隐患图像采集所花费时间约为0.5h; 无人机智能巡检能初步甄别绝大部分塔式起重机隐患类型; 存在少量的两类隐患类型无法通过无人机检查判断。

[关键词] 塔式起重机; 智能巡检; 无人机; 安全隐患

[中图分类号] TU17

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)16-0110-06

Development and Application of Tower Crane Intelligent Inspection System Based on UAV

JIAO Xin¹, CHEN Zonglin¹, QIU Bo², ZHANG Xin¹, FAN Jian¹, CAI Zhenwei¹, XU Yiming¹

(1. China Construction Third Engineering Group (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518110, China;

2. Changsha Zhukan Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410000, China)

Abstract: At present, the safety inspection of tower cranes still basically adopts the traditional manual operation mode, which has the problems of long detection time, high intensity and high risk. Based on the DJI MS SDK development kit and Java/Kotlin programming, an intelligent inspection APP for tower cranes is designed to realize the automatic flight and shooting of tower cranes by drones, and to obtain tower cranes quickly, accurately and conveniently. Relevant image data to determine the safety hazards of tower cranes. This method can greatly improve the efficiency and quality of tower crane inspection. It can be seen from the field test results that it takes about 0.5h for the UAV to collect the image of the safety hazards of the tower crane. UAV intelligent inspection can preliminarily identify most types of hidden dangers of tower cranes. There are a small number of two types of hidden dangers that cannot be judged by UAV inspection.

Keywords: tower cranes; intelligent inspections; unmanned air vehicle (UAV); safety hazards

0 引言

塔式起重机作为土木工程建筑施工重要的垂直运输设备, 对保障工程建设的顺利高效进行起重重要作用, 目前已广泛应用于高层建筑、市政工程、桥梁工程等领域, 塔式起重机的安全性也同样受到广泛关注。一般而言, 塔式起重机的安全性与日常检

查、维修保养、外界环境(风力大小、周边环境、温度大小、操作距离)等因素有关, 特别是其工作重心高、运行速度快、起重荷载大等对塔式起重机构件的可靠性、运行控制系统及制动系统的稳定性带来了极大挑战^[1]。当前与塔式起重机相关的安全隐患和安全事故越来越突出, 面对越来越多的塔式起重机事故, 塔式起重机安全检查显得越来越重要, 但当前塔式起重机检查仍沿用传统的人工检测方

式,工作强度大、巡检时间长、检查盲区多、高空作业风险高、检测结果难以数字化、历史数据难以管理和追溯。面对上述问题,开发更高效、更智能的塔式起重机检测工具具有重要意义。无人机作为一种高效、机动灵活的空中飞行设备,在电力巡检^[2]、智能配送^[3]、铁路巡检^[4]、植被保护^[5]等行业得到广泛应用。本文基于大疆无人机 MSDK (Mobile SDK) 工具包,结合塔式起重机实际检测需求,开发了塔式起重机安全隐患智能巡检 APP,用户在对大疆无人机有基本了解并熟悉本文开发的塔式起重机巡检 APP 后,即可实现对塔式起重机各组成部分,如标准节、附着、顶升与回转装置、起重臂、平衡臂、司机室、塔帽等高效便捷的智能巡检,从而大幅降低塔式起重机人工检测的强度和风险,提高塔式起重机检查覆盖度,实现塔式起重机巡检的自动化和智能化。

1 无人机智能巡检 APP 的系统设计

1.1 无人机型选型

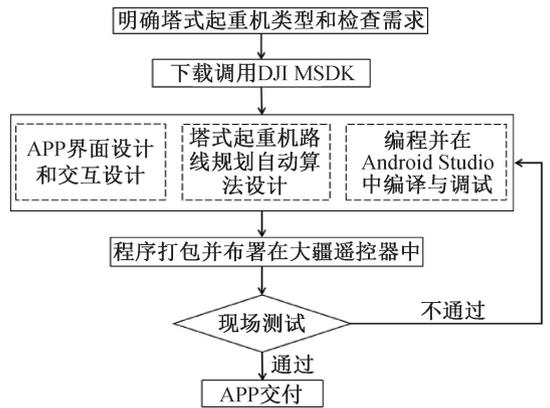
本文采用大疆最新的行业级无人机 DJI_Mavic_3E,该机小巧灵活、可折叠,便于作业携带,单节电池巡检时间达 45min,采用全向避障、4/3CMOS 广角相机,镜头支持 56 倍的混合变焦,可清晰拍摄远距离目标,结合 RTK 厘米级高精度定位功能,DJI_Mavic_3E 完全能胜任对塔式起重机的巡检。大疆 M30 系列、M300, M350 也能进行塔式起重机检查,但相对而言,DJI_Mavic_3E 价格上有着巨大优势。

1.2 系统设计

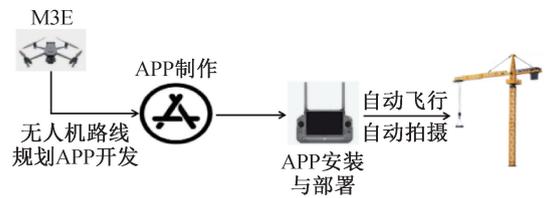
无人机智能巡检 APP 的系统设计在充分调研并梳理塔式起重机安全隐患检查清单的基础上,基于大疆 MSDK 开发工具包,采用 Java/Kotlin 编程,开发适配塔式起重机三维空间形态的无人机飞行线路规划算法,在 Android Studio 中编译打包并安装在无人机遥控器上,利用该 APP 驱动无人机即可实现无人机围绕塔式起重机自动飞行和拍摄的智能巡检功能。系统开发设计及软件安装的基本流程如图 1 所示。

1.3 无人机智能巡检航线设计

在上述系统设计中,最关键的环节为无人机沿塔式起重机进行自动飞行和拍摄的路线设计,航线设计的好与坏直接决定了无人机对塔式起重机巡检的质量。由于塔式起重机主要是由竖向结构(塔身标准节、顶升与回转装置、塔帽)和水平向结构(起重臂、平衡臂、附着等)组成,在此,以标准节和起重臂为例来说明无人机的航线设计,其他塔式起重机结构构件类似。



a 系统开发技术路线



b APP制作技术路线

图 1 系统设计与 APP 制作技术路线

Fig. 1 System design and APP production technology roadmap

对标准节而言,存在环绕式飞行路线和升降式飞行路线两种基本飞行路线,如图 2 所示。

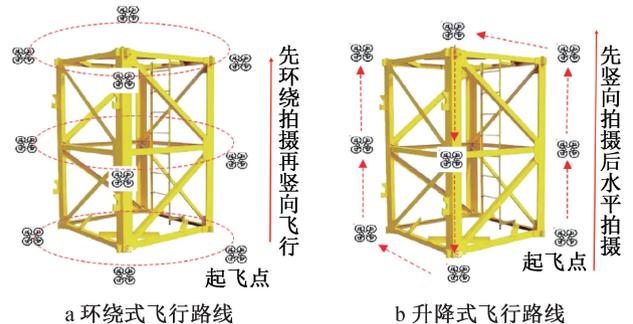


图 2 塔式起重机标准节飞行路径规划

Fig. 2 Standard section flight path planning for tower cranes

环绕式飞行路线是无人机先环绕标准节水平飞行和拍摄,之后垂直上升到上一个标准节,再环绕拍摄和垂直爬升,上述动作循环直至所有标准节拍摄完毕。升降式飞行路线是无人机沿标准节主肢一直垂直爬升和拍摄直至把最顶部的标准节主肢拍摄完毕,再沿标准节水平飞行到达邻近主肢后,垂直下降拍摄下部同一方向的所有标准节主肢,拍摄完毕后再沿标准节水平飞行到邻近主肢并竖向爬升拍摄,上述动作循环直至所有标准节拍摄完毕。环绕式飞行对塔式起重机标准节,尤其是水平支撑杆的检查更详细,但相较于升降式飞行,检

查相同的塔式起重机标准节更耗时、飞行路径更长;环绕式飞行对带附墙装置的塔式起重机实施难度更大,要特别留意环绕爬升过程中可能出现的无人机和附墙装置的碰撞风险,或由于无人机和附墙装置距离过近避障传感器生效而提前终止飞行作业。升降式飞行对标准节的检查更灵活,无论塔式起重机有无附墙装置,均可实施,相同电池电量情况下,能用更短的飞行线路检查更多的塔式起重机标准节,但该飞行线路可能存在对标准节支撑杆检查不足的问题。上述两种飞行路线可根据实际塔式起重机布置情况和环境灵活选用。

对于起重臂而言,飞行路线相对简单,如图3所示。无人机沿起重臂展方向拍摄即可,拍摄间隔或拍摄距离可根据实际检测需求来定。平衡臂采用的检查路线与起重臂相同,因此不再赘述。

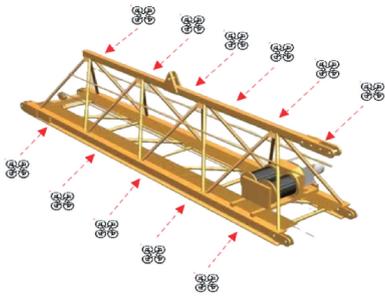


图3 塔式起重机起重臂飞行路径规划

Fig.3 Flight path planning for tower crane boom

下面对标准节、起重臂、平衡臂的飞行检查用时进行简要说明,方便工程技术和安全管理人员更好地评估和使用塔式起重机巡检APP。由于篇幅限制,本文只对软件测试过程中采用的升降式飞行路线进行具体介绍。假设无人机在巡检过程中的飞行速度为 V_{drone} ,塔式起重机标准节总高度为 H_{mast} ,则升降式飞行路线的检查用时 T_1 为:

$$T_1 = (H_{\text{mast}}/V_{\text{drone}} \times 4 + W_{\text{mast}}/V_{\text{drone}} \times 3) = \frac{4H_{\text{mast}} + 3W_{\text{mast}}}{V_{\text{drone}}} \quad (1)$$

式中: W_{mast} 为标准节横截面宽度。

起重臂和平衡臂飞行路线的检查用时 T_2, T_3 计算如下:

$$T_2 = (L_{\text{jib}} \times 2/V_{\text{drone}} + H_{\text{jib}}/V_{\text{drone}}) \times 2 + \frac{W_{\text{jib}}/V_{\text{drone}}}{V_{\text{drone}}} = \frac{4L_{\text{jib}} + 2 \times H_{\text{jib}} + W_{\text{jib}}}{V_{\text{drone}}} \quad (2)$$

$$T_3 = (L_{\text{counterjib}} \times 2/V_{\text{drone}} + H_{\text{counterjib}}/V_{\text{drone}}) \times 2 + \frac{W_{\text{counterjib}}/V_{\text{drone}}}{V_{\text{drone}}}$$

$$\frac{4L_{\text{counterjib}} + 2 \times H_{\text{counterjib}} + W_{\text{counterjib}}}{V_{\text{drone}}} \quad (3)$$

式中: $L_{\text{jib}}, H_{\text{jib}}, W_{\text{jib}}$ 分别为起重臂的长度、高度和宽度; $L_{\text{counterjib}}, H_{\text{counterjib}}, W_{\text{counterjib}}$ 分别为平衡臂的长度、高度和宽度。

2 无人机智能巡检系统实际应用

2.1 无人机智能巡检APP的应用案例

在长沙市绿地新都会项目对无人机智能巡检软件功能进行了实际测试。该项目位于长沙市万家丽南路和环保中路的交汇处西南角。项目使用TC5613型塔式起重机。

选取项目上的1台塔式起重机进行测试,塔式起重机高约为120m,标准节总高度约为100m,标准节截面宽度为1.7m,起重臂长约50m、宽1.4m、高1.2m,平衡臂长约12m、宽3.1m、高1.3m。无人机采用升降式飞行对标准节进行检查,如图4所示。遥控器界面对塔式起重机标准节、起重臂的拍摄界面如图5所示。部分无人机自动巡检所拍摄的隐患图像如图6,7所示。图6为附墙装置连接螺栓松动,由于松动螺栓位置在附墙连接件的外沿,人工肉眼检查会存在一定的视角盲区,而通过无人机视角拍摄会更加清晰明了,这也是无人机巡检更具有优势的地方。从无人机获取的塔式起重机隐患图像清晰、分辨率高,安全员可通过图像准确辨别塔式起重机所存在的隐患。

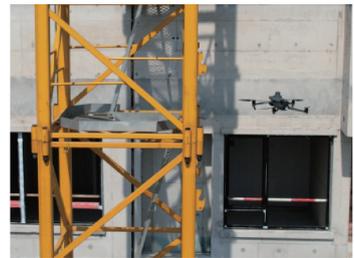


图4 无人机对标准节检查

Fig.4 UAV inspection of standard section

2.2 无人机智能巡检与人工检查对比

依据塔式起重机的相关规范、标准、要求等^[6-15],从塔式起重机隐患等级、检查部位两个角度出发整理了所有塔式起重机隐患数量,现场测试统计结果如表1所示。由表1可知,标准节实测用时7min,起重臂实测用时5min,平衡臂实测用时2min。在实际测试中,无人机检查标准节的飞行速度为1.1m/s,检查起重臂和平衡臂时飞行速度为0.8m/s。在2.1节中已知塔式起重机结构的具体参数,将上述数据代入式(1),(2),(3),得出无人机检查标准节、起重臂、平衡臂的计算用时分别为6.1,4.2,



a 无人机对标准节自动化拍摄



b 无人机对起重臂自动化拍摄

图5 无人机对塔式起重机自动化拍摄

Fig. 5 UAV automatic shooting of tower crane



图6 附墙装置连接螺栓松动

Fig. 6 Connecting bolt loose for wall attachment device

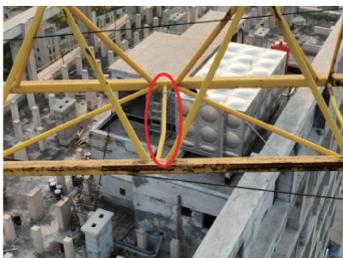


图7 起重臂杆件变形

Fig. 7 Deformation of boom components

1.1min,与实测用时吻合良好。由于在实测过程中,无人机的飞行速度受到风阻、信号等因素的影响,故实测用时大于公式计算用时。

无人机智能巡检对整个塔式起重机的安全隐患图像采集共用时约30min。通过调研可知:高度约100m的塔式起重机,采用人工检查需耗时2.5h左右。故无人机巡检相较于人工检查效率有较大幅度的提升。

由表1可知,无人机100%检查(不需要人工再复核)对重大隐患、较大隐患、一般隐患覆盖率分别

表1 无人机巡检现场测试结果

Table 1 UAV inspection site test results

检查部位	隐患等级	隐患数量	无人机100%检查项数量	无人机可初步判断,人工复核项数量	无人机无法检查项数量	无人机检查时间/min
标准节	重大隐患	9	5	3	1	
	较大隐患	16	13	1	2	7
	一般隐患	1	0	1	0	
起重臂	重大隐患	36	31	3	2	
	较大隐患	11	5	6	0	5
	一般隐患	2	2	0	0	
平衡臂	重大隐患	26	22	4	0	
	较大隐患	20	13	5	2	2
	一般隐患	1	1	0	0	
基础	重大隐患	8	5	2	1	
	较大隐患	11	8	3	0	1
	一般隐患	7	4	2	1	
电缆	重大隐患	0	0	0	0	
	较大隐患	3	3	0	0	—
	一般隐患	1	1	0	0	
吊钩与索具	重大隐患	7	6	1	0	
	较大隐患	2	2	0	0	2
	一般隐患	1	1	0	0	
驾驶室	重大隐患	5	1	4	0	
	较大隐患	8	2	5	1	0.5
	一般隐患	2	2	0	0	
附墙装置	重大隐患	37	23	13	1	
	较大隐患	0	0	0	0	4
	一般隐患	0	0	0	0	
平台护栏	重大隐患	2	2	0	0	
	较大隐患	6	6	0	0	—
	一般隐患	2	2	0	0	
变幅机构/变幅小车	重大隐患	12	11	0	1	
	较大隐患	19	11	5	3	1.5
	一般隐患	0	0	0	0	
塔头塔帽	重大隐患	13	10	1	2	
	较大隐患	4	2	2	0	1.5
	一般隐患	3	2	1	0	
回转支承	重大隐患	9	9	0	0	
	较大隐患	16	11	3	2	1.1
	一般隐患	0	0	0	0	
套架与顶升油缸	重大隐患	9	7	2	0	
	较大隐患	9	5	4	0	3
	一般隐患	1	1	0	0	

注:无人机可100%检查为通过无人机采集的图像即可识别出相关隐患类型;电缆与平台护栏已合并到其他构件中检查,不单独列出检查时间

为76.3%,64.8%,76.2%,可知大多数隐患可完全通过无人机实现检查。无人机可初步判断,需人工复核检查对重大隐患、较大隐患、一般隐患覆盖率分别为18.5%,27.2%,19%,此类隐患能通过无人机采集的图像初步判断,但还需检查人员到达塔式起重机相关隐患部位进行进一步的核查,例如平衡臂拉杆是否使用原厂生产的构件、基础转换底座是

否为原厂制造、附墙装置的附着抱箍构造是否符合要求等。

将无人机 100% 检查和无人机可初步判断,需人工复核检查的覆盖率相加得出无人机能初步判断检查对重大隐患、较大隐患、一般隐患覆盖率分别为 94.8%、92%、95.2%,故无人机智能巡检能初步甄别绝大部分的塔式起重机隐患类型^[16-18]。

在实际测试过程中发现存在少量的两类隐患无法通过无人机检测识别:①无法通过图像甄别,例如塔式起重机垂直度是否符合要求、变幅限位器是否正常工作、质量限制器是否正常工作、制动装置是否正常工作等;②需通过声音来判断是否存在,例如变幅小车滑轮组是否正常无异响、起升电机是否正常运转无异响、回转支承减速器是否有异响等。对于上述两类无人机无法检查的隐患,需提前列出详细清单,人工进行一一核查,防止遗漏导致安全事故发生。

3 结语

本文针对塔式起重机检测过程中的难点和问题,采用大疆行业级无人机,在 DJI MSDK 基础上研发了无人机沿塔式起重机智能飞行和拍摄的塔式起重机巡检 APP,经过项目测试,该 APP 能有效减少塔式起重机检查的用人、用时,提高检查覆盖面,降低高空作业风险。塔式起重机检查人员只需要花费少量时间熟悉 APP 的界面操作和无人机的基本使用。待无人机作业完成后,检查人员取出无人机存储卡中拍摄的影像资料,在电脑端即可通过查看分析隐患图像来排查塔式起重机的各类安全隐患,十分方便快捷。

1) 无人机对塔式起重机安全隐患图像采集所花费时间不超过 0.5h,且图像质量高,大大提升了检测效率。

2) 无人机 100% 检查对重大隐患、较大隐患、一般隐患覆盖率分别为 76.3%、64.8%、76.2%。

3) 无人机可初步判断,需人工复核检查对重大隐患、较大隐患、一般隐患覆盖率分别为 18.5%、27.2%、19%。

4) 无人机智能巡检能初步甄别绝大部分的塔式起重机隐患类型。

5) 存在少量的无法通过图像甄别、需要通过声音来判断是否存在的两类隐患无法通过无人机检测识别。

参考文献:

[1] 黄荣跃. 塔吊巡检无人机智能地面站设计[J]. 机电技术, 2022(5):29-32.

HUANG R Y. Design of intelligent ground station for tower crane inspection UAV[J]. Mechanical & electrical technology, 2022(5):29-32.

[2] 黄荣跃. 基于 OpenCV 的智能配送无人机设计[J]. 信息技术与信息化,2021(6):228-231.

HUANG R Y. Design of intelligent delivery UAV based on OpenCV[J]. Information technology and informatization, 2021(6):228-231.

[3] 谢尧庆, 邓继忠, 叶家杭, 等. 基于 5G 的无人机图传及在植保无人机的应用展望[J]. 中国农机化学报, 2022,43(1):135-141.

XIE Y Q, DENG J Z, YE J H, et al. UAV image transmission based on 5G and its application prospect in plant protection UAV[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2022,43(1):135-141.

[4] 马学志, 范剑雄, 柴雪松, 等. 无人机巡检系统在铁路混凝土桥梁检测中的应用[J]. 铁道建筑, 2021,61(12):76-80.

MA X Z, FAN J X, CHAI X S, et al. Application of UAV inspection system in railway concrete bridge inspection[J]. Railway engineering, 2021,61(12):76-80.

[5] 王博, 宋丹, 王洪玉. 无人机自主巡检系统的关键技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2021,57(9):255-263.

WANG B, SONG D, WANG H Y. Research on key technologies of UAV autonomous inspection system[J]. Computer engineering and application, 2021,57(9):255-263.

[6] 中国建筑科学研究院有限公司建筑机械化研究分院. 塔式起重机附着安全技术规程: T/CCMA 0097—2020, T/ASC 09—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.

Research Institute of Building Mechanization, China Academy of Building Research. Safety and technical specifications for tower crane attachment: T/CCMA 0097—2020, T/ASC 09—2020[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.

[7] 北京建筑机械化研究院有限公司. 塔式起重机: GB/T 5031—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.

Beijing Institute of Building Mechanization. Tower crane: GB/T 5031—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

[8] 北京建筑机械化研究院, 中国建筑科学研究院建筑机械化研究分院. 起重机械检查与维护规程 第3部分 塔式起重机: GB/T 31052.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

Beijing Institute of Building Mechanization, Research Institute of Building Mechanization, China Academy of Building Research. Code of inspection and maintenance for lifting appliances-Part 3, Tower cranes: GB/T 31052.3—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

[9] 大连博瑞重工有限公司, 北京起重运输机械设计研究院. 起重机钢丝绳 保养、维护、检验和报废: GB/T 5972—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

Dalian Borui Heavy Industry Co., Ltd., Beijing Crane and Transportation Machinery Design and Research Institute. Care and maintenance, inspection and discard of cranes and wire ropes: GB/T 5972—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

[10] 上海市特种设备监督检验技术研究院. 起重机械定期检验规

- 则: TSG Q7015—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- Shanghai Institute of Special Equipment Supervision and Inspection Technology. Lifting appliances periodical inspection regulation: TSG Q7015—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [11] 江苏省华建建设股份有限公司, 江苏邗建集团有限公司. 建筑机械使用安全技术规程: JGJ 33—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Jiangsu Huajian Construction Co., Ltd., Jiangsu Hanjian Group Co., Ltd. Technical specification for safety operation of construction machinery: JGJ 33—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [12] 上海市建工设计研究院有限公司, 上海市第四建筑有限公司. 建筑施工塔式起重机安装、使用、拆卸安全技术规程: JGJ 196—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Shanghai Construction Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai Fourth Construction Co., Ltd. Technical specification for safety installation operation and dismantlement of tower crane in construction: JGJ 196—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [13] 广东省建筑科学研究院. 建筑塔式起重机安装检验评定规程: DBJ/T 15—73—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Guangdong Academy of Building Research. Specification for checking and evaluating of building tower crane after erection: DBJ/T 15—73—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [14] 上海市建工设计研究院有限公司, 龙元建设集团股份有限公
- 司. 建筑起重机械安全评估技术规程: JGJ/T 189—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Shanghai Construction Design & Research Institute Co., Ltd., Longyuan Construction Group Co., Ltd. Technical specification for safety assessment of building crane on construction site: JGJ/T 189—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [15] 北京建筑机械化研究院. 塔式起重机安全规程: GB 5144—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- Beijing Institute of Building Mechanization. Safety code for tower cranes: GB 5144—2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [16] 安建民, 郝兵, 郭伟伟, 等. 基于无人机在塔机检验中的应用与研究[J]. 中国特种设备安全, 2020, 36(10): 23-26, 30.
- AN J M, HAO B, GUO W W, et al. The application and research of UAV in tower crane inspection [J]. China special equipment safety, 2020, 36(10): 23-26, 30.
- [17] 柯宗乔, 陈荣. 无人机在施工现场塔吊安全巡查中的应用[J]. 建材与装饰, 2018(42): 166-167.
- KE Z Q, CHEN R. Application of UAV in safety inspection of tower crane in construction site [J]. Construction materials & decoration, 2018(42): 166-167.
- [18] 程军, 望斌, 宋毅. 无人机遥感技术在大型起重机械结构检测的应用前景展望[J]. 特种设备安全技术, 2017(4): 32-34.
- CHENG J, WANG B, SONG Y. Application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing in structural inspection of large crane [J]. Safety technology of special equipment, 2017(4): 32-34.