

基于GNSS的建筑塔机垂直度全圆智能检测

周命端, 马博泓, 鲍宏伟, 师佳艺, 罗德安

(北京建筑大学测绘与城市空间信息学院, 北京, 102616)

摘要: 鉴于传统经纬仪测量方法检测塔机垂直度存在诸多弊端, 提出一种基于全球卫星导航系统(Global navigation satellite system, GNSS)的建筑塔机垂直度全圆智能检测技术。基于GNSS的动态检测模型, 设计一种建筑塔机垂直度全圆智能检测方法, 并基于Visual Studio 2017平台, 利用C#编程语言, 设计并开发一种基于GNSS的建筑塔机垂直度全圆智能检测系统(GNSS-based verticality intelligent detection system in rounds, GNSS_VDS)。实验结果表明:GNSS_VDS系统全圆智能检测水平精度优于3 cm、高程精度优于4 cm, 本文算法是行之有效的, 可为建筑塔机抗倾翻稳定性实时监测提供一种高精度智能化解决方案。

关键词: 全球卫星导航系统; 单历元定位; 垂直度; 全圆智能检测; 建筑塔机

中图分类号: P258 **文献标志码:** A

GNSS-Based Verticality Intelligent Detection in Rounds for Construction Tower Crane

ZHOU Mingduan, MA Bohong, BAO Hongwei, SHI Jiayi, LUO Dean

(School of Geomatics and Urban Spatial Informatics, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, 102616, China)

Abstract: In view of the disadvantages of the traditional theodolite surveying method applied to verticality detection for construction tower crane, a global navigation satellite system (GNSS) based verticality intelligent detection technique in rounds for construction tower crane is proposed. And then, a verticality intelligent detection method in rounds for construction tower crane is designed based on GNSS dynamic detection model and the GNSS-based verticality intelligent detection system in rounds (GNSS_VDS) is designed and developed based on Visual Studio 2017 platform using C# program language. The preliminary experimental results show that the accuracy of intelligent detection in rounds of GNSS_VDS system is better than 3 cm in the horizontal direction and 4 cm in the vertical direction, verifying the effectiveness of the proposed algorithm. The high-precision intelligent solution can be provided for real-time monitoring of anti-toppling stability for construction tower crane.

Key words: global navigation satellite system(GNSS); single-epoch positioning; verticality; intelligent detection in rounds; construction tower crane

引言

塔式起重机又名塔机或塔吊, 是建筑工程施工领域常用的工程机械起重特种设备, 在建设全产业

链中发挥着重要作用,极大地提高了施工效率。建筑塔机塔身主要由标准节螺栓连接,顶升高度一般在100 m以下,塔身轴心线对塔基支承面的垂直度与整机抗倾翻稳定性有着密切关系,垂直度越精准,塔机工作状态的安全性越高。随着(超)高层建筑的兴起,塔机顶升高度将会越来越高。当塔机顶升高度不断增高时,塔机垂直度如果出现一定程度的偏斜,并且没有得到及时调整,可能会造成重大安全事故。基于这一过程,GB/T 5031—2019《塔式起重机》规定:塔机安装到设计规定的最大独立高度时,应符合在空载、无风状态下,独立状态塔身轴心线侧向垂直度误差不大于0.4%^[1]。建筑塔机垂直度检测对于确保塔机安全运行具有重要的保障作用。目前,塔机垂直度检测方法主要采用经纬仪测量^[2-3],这种方法存在工作效率低、施测工序复杂、现场工作环境恶劣、测量精度低及对施测人员要求高等诸多弊端^[4-5]。随着传感器技术、计算机技术和网络技术的不断发展,郜愿愿等^[6]利用两个MXD2020倾角测量传感器垂直安装放置于同一水平面上测出倾斜角度进行塔身垂直度检测;然而,全球卫星导航系统(Global navigation satellite system, GNSS)接收机是建筑塔机精准管控的重要传感器之一,利用载波相位观测值能够精准定点放样建筑塔机吊装作业,其智能指挥精度在厘米级水平^[7-8],考虑到GNSS传感器的精准定位优势^[9-10],本文提出一种基于GNSS的建筑塔机垂直度全圆智能检测技术,可为建筑塔机抗倾翻稳定性实时监测提供一种高精度智能化解决方案,对施工现场塔机安全运行具有重要的现实意义。

1 GNSS垂直度检测原理

建筑塔机塔身主要由各个标准节依次螺栓链接形成主体柱形,在吊装作业、风力等复杂荷载作用下,具有非线性无规律应力变形特征^[11-13],本文提出一种利用GNSS技术全圆实时检测建筑塔机垂直度,将是一种全新的无损智能检测技术。GNSS系统是所有导航卫星系统的总称,目前主要包括美国的GPS、中国的BDS、俄罗斯的GLONASS和欧盟的Galileo。基于伪距的米级GNSS定位因精度低不适应智能化塔机发展要求,采用高精度载波相位建立基于GNSS的动态检测模型,提出一种基于GNSS的建筑塔机垂直度全圆智能检测方法,对应的GNSS垂直度检测原理如图1所示。其中,基准站可以是自主架设于视野开阔的施工现场(也可以是现有的地基增强系统或CORS系统的参考站),检测站固定安装于建筑塔机塔顶中心部。

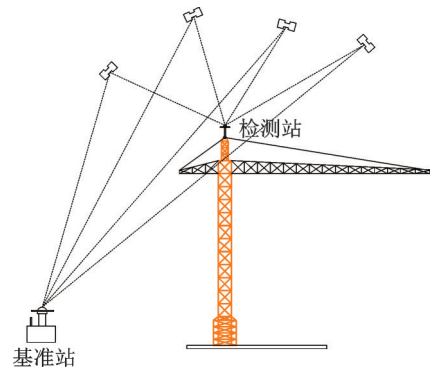


图1 GNSS垂直度检测原理

Fig.1 GNSS-based verticality detection principle

1.1 基于GNSS的动态检测模型

假设基准站和检测站(用下标D表示)在某一检测历元同步观测的导航卫星数为 n^k ,且以同步观测的导航卫星高度角最大的卫星 k 作为参考导航卫星,则针对施工现场短基线情况下可列出 $n^k - 1$ 个双差载波相位观测方程,其所对应的误差方程可用矩阵形式表示为

$$V = A \cdot \delta X_D + B \cdot \nabla \Delta N + \nabla \Delta L \quad (1)$$

式中: $V = [v^1 \ v^2 \ \dots \ v^{n^k-1}]^T$, $\delta X_D = [\delta x_D \ \delta y_D \ \delta z_D]^T$, $\nabla \Delta N = [\nabla \Delta N^1 \ \nabla \Delta N^2 \ \dots \ \nabla \Delta N^{n^k-1}]^T$,

$$\nabla \Delta L = [\nabla \Delta L^1 \ \nabla \Delta L^2 \ \dots \ \nabla \Delta L^{n^k-1}]^T, A \text{ 和 } B \text{ 为系数矩阵, 其中: } A = \frac{1}{\lambda} \cdot \begin{bmatrix} \Delta l_D^1 & \Delta m_D^1 & \Delta n_D^1 \\ \Delta l_D^2 & \Delta m_D^2 & \Delta n_D^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta l_D^{n^k-1} & \Delta m_D^{n^k-1} & \Delta n_D^{n^k-1} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

根据式(1)可知,一旦双差整周模糊度 $\nabla\Delta N$ 快速确定^[14-16],则由最小二乘参数估计原则 $V^T P V = \min$ 可以实时获得检测站的三维坐标及精度信息^[9-10],即

$$\begin{cases} \delta\hat{X}_D = -(A^T P A)^{-1} \cdot A^T P (B \cdot \nabla\Delta N + \nabla\Delta L) \\ \hat{X}_D = X_D^0 + \delta\hat{X}_D \\ Q_{\hat{X}_D} = Q_{\delta\hat{X}_D} = (A^T P A)^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: \hat{X}_D 和 $Q_{\hat{X}_D}$ 分别为检测站单历元检测的参数估值及其协因数阵; X_D^0 为检测站的待估参数初值; $\delta\hat{X}_D$ 和 $Q_{\delta\hat{X}_D}$ 分别为检测站单历元检测的参数改正数及其协因数阵; P 为双差载波相位观测值的权矩阵,即

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sigma^2} \cdot \frac{1}{n^k} \begin{bmatrix} n^k - 1 & -1 & \cdots & -1 \\ -1 & n^k - 1 & \cdots & -1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & -1 & \cdots & n^k - 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: σ^2 为高精度载波相位观测值的单位权方差因子。

1.2 垂直度全圆检测方法

建筑塔机的塔基中心位置在GNSS坐标系下的平面坐标 (x_o, y_o) 和高程 H_o 为预先已知,假设塔顶GNSS检测站在第 n 个检测历元的平面坐标和高程为 (x_D^n, y_D^n, H_D^n) ,针对塔顶GNSS检测站第 n 个检测历元在平面上相比塔基中心平面坐标 (x_o, y_o) 产生的北向偏心量和东向偏心量分别为

$$\Delta N^n = x_D^n - x_o \quad \text{北向} \quad (4)$$

$$\Delta E^n = y_D^n - y_o \quad \text{东向} \quad (5)$$

根据式(4,5),塔顶GNSS检测站的第 n 个检测历元的平面偏心量 P^n 及其对应的偏心方位角分别为

$$P^n = \sqrt{(\Delta N^n)^2 + (\Delta E^n)^2} \quad (6)$$

$$A_p^n = \arctan\left(\frac{\Delta E^n}{\Delta N^n}\right) \quad (7)$$

根据垂直度的定义,利用塔顶GNSS检测站检测第 n 个历元的建筑塔机垂直度及其对应的倾斜角分别为

$$\begin{cases} I^n = \frac{P^n}{H_D^n - H_o} \\ \Phi^n = \arctan\left(\frac{P^n}{H_D^n - H_o}\right) \end{cases} \quad (8)$$

式中: I^n 为第 n 个历元的建筑塔机垂直度; Φ^n 为第 n 个历元的建筑塔机垂直度对应的倾斜角。

通过对 I^n, A_p^n 和 Φ^n 的实时监测与时间序列分析,可以实现建筑塔机垂直度全圆智能检测。当 I^n 大于某一预警阈值 $I^n = 0.4\% \times k$ 时,系统发出预警信号,其中 k 为预警系数。

2 全圆智能检测系统

2.1 系统框架设计

基于GNSS的建筑塔机垂直度全圆智能检测系统(GNSS-based verticality intelligent detection system in rounds, GNSS_VDS)的框架设计包括硬件装备和全圆智能检测系统开发。GNSS_VDS系统框架设计思路主要包括由GNSS基准站和GNSS检测站构成数据采集单元,并由4G数据传输模块(DTU)构成无线通信单元,用于实时无线传输数据采集单元所采集的检测数据信息发送至固定IP云服务器单元(腾讯云CVM或阿里云CVM或其他云端),并在云服务器单元安装SQL数据库和垂直度全圆智能检测系统作为服务器端,构成数据处理单元和数据分析单元,基于SQL数据库管理GNSS检测站精密位置信息以及垂直度检测结果,由数据分析单元提供预警提示信息或报警信息,将有效指令信息实时播发给客户端,实现建筑塔机垂直度智能检测。GNSS_VDS系统框架设计原理如图2所示。

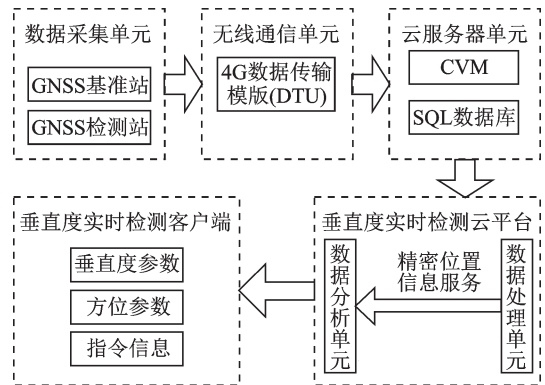


图2 GNSS_VDS系统设计原理
Fig.2 GNSS_VDS system design principle

GNSS_VDS系统设计具有以下特点:(1)利用导航卫星的高精度载波相位观测值数据精准定位建筑塔机塔顶的三维空间位置,垂直度检测精度可达厘米级水平;(2)利用4G数据传输模块进行检测数据的无线、实时传输,实现全自动化远程实时检测,智能化程度高;(3)可以对施工现场的群塔同时进行实时垂直度检测,提升群塔安全管理水平。

2.2 系统硬件装备

GNSS_VDS系统的硬件装备主要包括:

(1) 数据采集单元。由安置于基准站和检测站的GNSS接收机构成。其中,基准站可以架设在地势较高且卫星观测视域无遮挡的施工现场;检测站固定架设于建筑塔机塔顶中心部。

(2) 无线通信单元。由4G数据传输模块构成,分别将基准站和检测站的GNSS接收机采集的卫星数据实时无线传输至固定IP的云服务器单元。

(3) 云服务器单元。由固定IP的云服务器CVM以及SQL数据库、垂直度检测服务端构成,为建筑塔机垂直度实时检测的数据处理、数据分析提供云平台。

(4) 垂直度检测客户端。由微型计算机、IPAD或手机等移动设备构成,实时响应有效指令信息。

2.3 全圆智能检测系统开发

根据基于GNSS的动态检测模型以及垂直度全圆检测方法,决定了本系统框架设计的垂直度检测系统开发包括3大功能模块:数据进出口功能模块、数据处理功能模块和垂直度检测分析功能模块,系统功能模块设计如图3所示。

根据上述功能模块设计思路,基于Visual Studio 2017开发平台,运用C#编程语言,设计并开发了一套基于GNSS的建筑塔机垂直度全圆智能检测系统(GNSS_VDS)。GNSS_VDS系统主界面设计如图4所示。GNSS_VDS系统主界面设计主要包括实时显示塔机基本参数、塔身垂直度参数及对应的偏

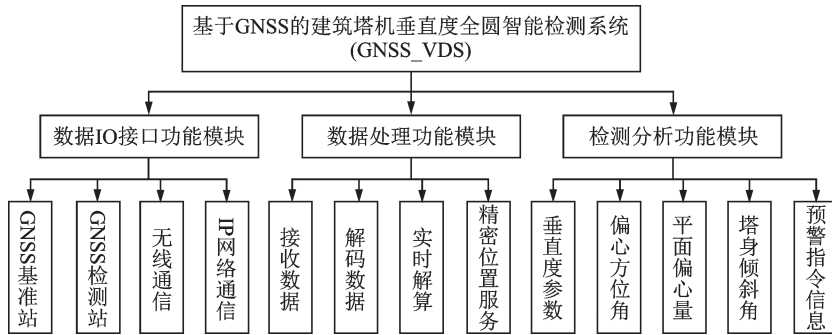


图3 功能模块设计

Fig.3 Function model design

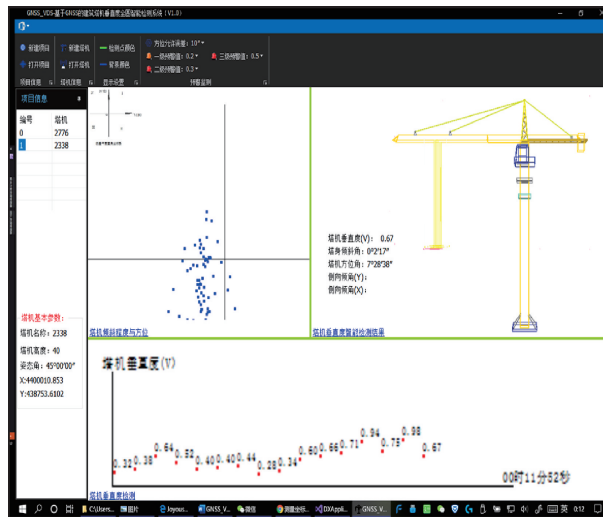


图4 GNSS_VDS系统主界面设计

Fig.4 Main interface design of GNSS_VDS system

心方位角和塔身倾斜角、预警指令信息等。

3 实验测试与分析

为验证与分析基于GNSS的建筑塔机垂直度全圆智能检测技术的可行性以及GNSS_VDS系统的正确性,笔者于某施工现场建筑塔机塔顶中心部位固定安装了1台国内某品牌的GNSS接收机作为检测站,并于施工场地视野开阔地架设了1台相同品牌的GNSS接收机作为基准站。其中,两台接收机的采样率均设置为1 Hz,卫星截止高度角设置为15°,检测站与基准站之间形成的单基线空间长度为204.3 m(其中:水平长度为202.2 m,高度差为29.1 m),建筑塔身高度 $h=30.640$ m。塔基中心坐标为($x_0=^*00\ 010.873$ m, $y_0=^*8\ 753.600$ m, $H_0=31.805$ m,“*”表示省略数字)。

为评估GNSS检测建筑塔机在空载或吊装作业状态下塔顶非线性变形轨迹特征,不妨选取连续50 min的3 000个检测历元(其中位置精度因子(Position dilution of precision, PDOP)=1.7~2.9)进行统计分析,获得了GNSS检测站平面轨迹(图5)以及高程轨迹(图6)。

为进一步评估与分析GNSS检测站的检测精度,对连续50 min的3 000个检测历元的定位精度从

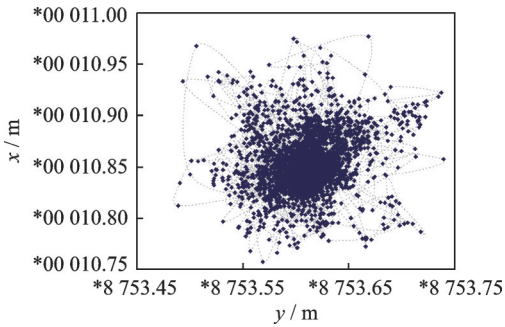


图5 塔顶GNSS检测站平面轨迹特征图

Fig.5 Horizontal trajectory characteristic diagram of GNSS-based detection station on tower top

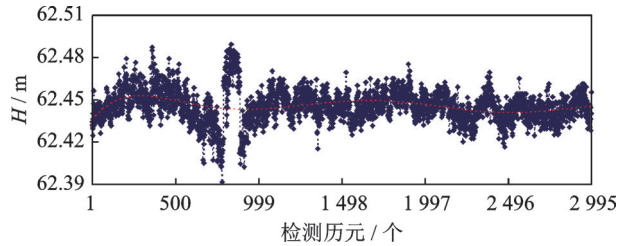


图6 塔顶GNSS检测站高程轨迹特征图

Fig.6 Elevation trajectory characteristic diagram of GNSS-based detection station on tower top

平面RMS及高程RMS进行统计分析,结果如图7所示。

从图7可以看出,针对3000个连续检测历元的RMS统计与分析,平面精度在0.008~0.026 m,高程精度在0.012~0.037 m,这说明GNSS_VDS系统全圆智能检测平面精度优于3 cm、高程精度优于4 cm。

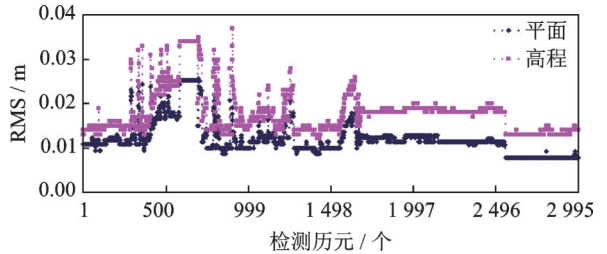


图7 GNSS检测站的检测精度分析

Fig.7 Detection accuracy analysis of GNSS-based detection station

因此,基于GNSS_VDS系统提供的厘米级位置信息,为实时检测建筑塔机垂直度参数及其对应的偏心方位角和塔身倾斜角,针对50 min的3000个连续检测历元进行统计分析,获得了建筑塔机塔顶GNSS检测站的南北向偏心量和东西向偏心量的全圆检测结果如图8所示,建筑塔机垂直度实时检测结果时间序列如图9所示。

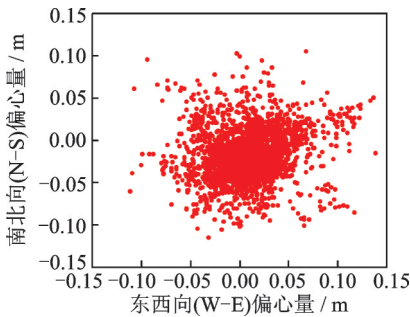


图8 塔顶GNSS检测站的偏心量图

Fig.8 Eccentricity diagram of GNSS-based detection station on tower top

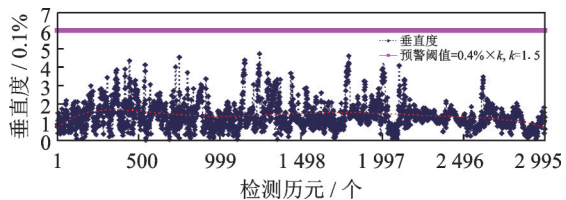


图9 塔机垂直度检测结果时间序列图

Fig.9 Time series diagram of verticality detection results of tower crane

从图8可以看出,针对连续50 min的3000个检测历元在南北向(N-S)上偏心量的最大值为0.12 m,平均值为0.02 m;在东西向(W-E)上偏心量的最大值为0.14 m,平均值为0.01 m。

从图8—9可以看出,针对连续50 min的3000个检测历元的建筑塔机垂直度实时检测结果时间序

列统计分析发现:垂直度最大值为 $I^{1244}=0.48\%$,对应的偏心方位角 $A_{0.146}^{1244}=126^{\circ}14'28''$ 和塔身倾斜角 $\Phi^{1244}=0^{\circ}16'21''$;本文若取预警系数 $k=1.5$,则这3 000个检测历元的垂直度全圆检测结果均在预警阈值范围内。

4 结束语

鉴于传统的经纬仪测量方法检测建筑塔机垂直度存在工作效率低、施测工序复杂、现场工作环境恶劣、测量精度低、对施测人员要求高等诸多弊端,本文基于GNSS的动态检测模型,设计一种建筑塔机垂直度全圆智能检测方法,并基于Visual Studio 2017平台,利用C#编程语言,设计并开发一套基于GNSS的建筑塔机垂直度全圆智能检测系统(GNSS_VDS),进而提出一种基于GNSS的建筑塔机垂直度全圆智能检测技术,应用于某施工现场建筑塔机塔垂直度全圆智能实时检测中。实验测试与结果分析表明:GNSS_VDS系统全圆智能检测水平精度优于3 cm、高程精度优于4 cm,验证了本文算法的正确性和可行性,进而对GNSS_VDS系统在保障塔机抗倾翻稳定性实时高精度监测获得了初步实验验证。值得说明的是,因受塔身最大挠度、塔身材质等诸多综合因素影响,垂直度检测的预警系数 k 值精准确定有待深入研究,后续将从提示、预警、断电报警等3个等级建立预警系数 k 值确定机制。

参考文献:

- [1] 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 Building Mechanization Research Institute Co., Ltd. Tower crane: GB/T 5031—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [2] 陈德荣.塔式起重机垂直度的检验[J].建筑机械,1997(9):40-41.
CHEN Derong. Testing of verticality for tower crane[J]. Construction Machinery, 1997(9): 40-41.
- [3] 杨国慧.塔式起重机塔身垂直度偏差测量的简单方法[J].中国特种设备安全,2009,26(1):31-33.
YANG Guohui. A simple method to measure the verticality deviation of tower crane[J]. China Special Equipment Safety, 2009, 26(1): 31-33.
- [4] 潘正风,程效军,成枢,等.数字地形测量学[M].武汉:武汉大学出版社,2015.
PAN Zhengfeng, CHENG Xiaojun, CHENG Shu, et al. Digital topographic surveying[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2015.
- [5] 张正禄.工程测量学[M].2版.武汉:武汉大学出版社,2018.
ZHANG Zhenglu. Engineering surveying[M].2nd edition. Wuhan: Wuhan University Press, 2018.
- [6] 郜愿愿,靳新宇.塔式起重机塔身垂直度检测装置的研究[J].电子制作,2014(1):241.
GAO Yuanyuan, JIN Xinyu. Research on verticality detection device of tower crane[J]. Practical Electronics, 2014(1): 241.
- [7] 周命端,郭际明,吕京国.建筑塔式起重机智能指挥防撞碰撞监控预警系统开发与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
ZHOU Mingduan, GUO Jiming, LV Jingguo. Intelligent anti-collision monitoring and warning command system development and application for construction tower crane[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [8] 周命端,罗德安,丁克良,等.建筑塔机吊装作业GNSS精准定点放样[J].测绘通报,2019(11):60-63.
ZHOU Mingduan, LUO Dean, DING Keliang, et al. GNSS accurate positioning-point and setting-out of hoisting operation for construction tower crane[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(11): 60-63.
- [9] 王坚,张安兵.卫星定位原理与应用[M].北京:测绘出版社,2017.
WANG Jian, ZHANG Anbing. Principles and applications of satellite positioning[M]. Beijing: Surveying & Mapping Publishing House, 2017.
- [10] 陈强强.基于GPS的塔类结构变形远程动态监测系统研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2018.
CHEN Qiangqiang. Study on remote dynamic monitoring system of tower structure deformation based on GPS[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2018.
- [11] 张立强,陆念力,李以申.复杂荷载作用下塔机塔身非线性变形的理论精解及实用算式[J].建筑机械,1995(9):10-12.

- ZHANG Liqiang, LU Nianli, LI Yishen. Theoretical solution and practical formula of nonlinear deformation of tower crane under complex load[J]. *Construction Machinery*, 1995(9): 10-12.
- [12] 杜赫, 高崇仁, 殷玉枫. 非均匀风载荷作用下塔机塔身非线性变形的计算[J]. *建筑机械*, 2017(3): 47-53.
DU He, GAO Chongren, YIN Yufeng. Nonclear deformation calculation of tower crane body under non-uniform wind loading [J]. *Construction Machinery*, 2017(3): 47-53.
- [13] 宋世军, 程录波, 李蕾, 等. 塔式起重机塔身顶端轨迹特征研究[J]. *起重运输机械*, 2014(6): 49-53.
SONG Shijun, CHENG Lubo, LI Lei, et al. Research on the top trajectory characteristics of tower crane[J]. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2014(6): 49-53.
- [14] 郭际明, 周命端, 谢翔, 等. 利用 DUF-COM 和 DC 算法的 GPS 单历元双差整周模糊度快速确定算法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2013, 38(7): 813-817.
GUO Jiming, ZHOU Mingduan, XIE Xiang, et al. A fast algorithm of GPS single epoch ambiguity resolution based on DUF-COM and DC algorithms[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(7): 813-817.
- [15] 郭际明, 周命端, 黄长军, 等. GPS 整周模糊度单历元 DUF-COM 方法扩展及定位解精度研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2013, 38(10): 1221-1224.
GUO Jiming, ZHOU Mingduan, HUANG Changjun, et al. Extended DUF-COM of ambiguity resolution for single epoch GPS positioning solution analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(10): 1221-1224.
- [16] GUO J M, ZHOU M D, SHI J B, et al. FARSE scheme for single epoch GPS solution based on DUF-COM and DC algorithm and its performance analysis[J]. *Survey Review*, 2014, 46(339): 426-431.

作者简介:



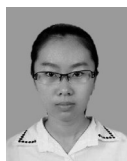
周命端(1985-),男,博士,副教授,研究方向:GNSS 精准定位理论与技术、测绘控制网数据处理技术及 GNSS 气象学, E-mail:md-zhou@bucea.edu.cn。



马博泓(2000-),男,本科,研究方向:GNSS 技术与应用, E-mail:lucky9851@sina.com。



鲍宏伟(1997-),男,本科,研究方向:空间信息软件开发, E-mail:a15901262773@outlook.com。



师佳艺(2000-),女,本科,研究方向:测绘控制网数据处理技术, E-mail:1304372632@qq.com。



罗德安(1968-),男,教授,博士后,研究方向:卫星导航定位技术、三维激光扫描测量技术, E-mail:luodean@bucea.edu.cn。

(编辑:王静)