

DOI: 10.11779/CJGE2015S2002

# 基于北斗的机场高填方施工质量监控技术研发

姚仰平<sup>1</sup>, 阮杨志<sup>1</sup>, 刘冰阳<sup>1</sup>, 陈军<sup>1</sup>, 姜宏旭<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191; 2. 北京航空航天大学计算机学院, 北京 100191)

**摘要:** 山区机场高填方质量监控主要针对干密度进行监控, 传统的监控手段均属事后检测、操作上以点代面, 需要加强施工质量过程监控并对其进行快速监测。针对山区机场高填方质量监控的要求, 在建立冲击碾压质量实时监测指标和要求的基础上, 采用北斗卫星导航定位和3G无线传输技术, 提出了机场高填方冲击碾压质量实时监控方法, 以及冲击碾压过程的信息实时采集传输技术和GIS平台的冲击碾压过程可视化等主要技术, 实现了冲击碾压轨迹、速度和遍数等施工信息的全过程实时监测。施工现场的初步试验表明, 该技术能有效应用于山区机场, 对提高机场高填方施工质量具有重要意义。

**关键词:** 北斗卫星导航系统; 机场高填方; 施工监控

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S2-0006-05

作者简介: 姚仰平(1960-), 男, 陕西西安人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土的基本特性和本构模型研究。

E-mail: ypyao@buaa.edu.cn。

## Control technology of construction quality for high filled airport based on Beidou satellite navigation system

YAO Yang-ping<sup>1</sup>, RUAN Yang-zhi<sup>1</sup>, LIU Bing-yang<sup>1</sup>, CHEN Jun<sup>1</sup>, JIANG Hong-xu<sup>2</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. School of Computer Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The quality control for the embankment of airport in mountain areas at present is mainly based on the control of dry density of soils. The traditional control methods estimate the construction quality of the entire area by monitoring a limited number of representative points, which is difficult to ensure the rolling quality effectively or to monitor the real-time compaction quality. According to the characteristics of high embankment quality control for mountainous airports, real-time monitoring indices and criteria are established. Using the Beidou satellite navigation system and 3G wireless transmission technology, the real-time monitoring method of impact rolling for high embankment of airport is proposed. Combining the real-time collecting technology and visualization technology, the real-time monitoring of the whole process about track, speed and number of compaction is realized. The tests at the construction site show that this technology can be effectively applied for mountainous airports in cost control, project management and quality monitoring, which is significant for improving the construction quality of high embankment of airport.

**Key words:** Beidou satellite navigation system; high fill of airport; construction monitoring

## 0 引言

我国正拟建和在建一批山区支线机场, 这些机场均建在荒山荒坡区、地形地貌复杂、建设时间短, 并均涉及高填方, 挖填规模大, 填筑体的压实质量要求高<sup>[1]</sup>。施工中常采用的工法为强力夯实法和冲击碾压法, 尤以冲击碾压法为主, 有效的监控填方区冲击碾压的质量是保证机场运营安全的关键。依照现行规范, 机场高填方冲击碾压质量主要通过施工过程中的冲击碾压参数和工后压实指标来控制。现今采用的传统监测方法对工程质量监控有重要作用, 不过属于事后监

测, 测量的点有限, 检验合格与否并不能判断工程整体的质量。为保证施工质量, 需要加强施工质量的过程监控。针对这种发展需求, 有必要研究开发一种实时自动的连续监控技术, 对机场高填方的冲击碾压过程中的主要参数进行实时监测。针对我国山区机场填方体积大、填料级配不良的现状, 实现施工过程的精细化监测和管理, 对监控和提高机场填筑体的建设质

量有重要的意义。

目前, 国内外尚无涉及针对高填方机场冲击碾压质量监控的相关研究, 现有的研究主要集中在道路施工中的路面振动碾压监控方面, 以及堆石坝振动碾压的质量监控。

道路施工中的路面振动碾压监控技术是一种在振动碾压机械碾压土料过程中自动监控碾压质量的技术, 被称为道路施工先进碾压技术 (Advanced Compaction Technology, ACT)。试验<sup>[2-4]</sup>和工程实践<sup>[5]</sup>表明, ACT 技术相关的监控指标与填料性能之间具有强相关性。基于此, ACT 技术能够较准确地预测压实程度, 从而防止欠压漏压, 保证了压实质量, 同时能够显示过压情况, 减少无用功, 提高了压实效率, 体现了实时监控的优越性。水利工程中, 黄声享等<sup>[6]</sup>针对面板堆石坝填筑施工的质量监控需要, 研制了 GPS 实时监控系统, 用于清江水布垭大坝堆石体碾压过程中的行车速度、碾压遍数、铺层厚度等参数的实时监测<sup>[7]</sup>。就高心墙堆石坝填筑碾压质量监控的要求和特点, 钟登华等<sup>[8]</sup>提出了对碾压过程的实时监控技术, 建立了碾压过程的精细化仿真模型, 在糯扎渡水电站的心墙堆石坝工程的填筑单元中得到了应用。不过, 机场高填方施工质量监控要求的冲击碾压参数、压实指标和施工工艺, 都与道路工程或者水利工程中的施工质量监控有一定区别, 所以在监控内容、监控要求以及监控技术的实现上与前两者有所不同。本文将在国内外现有研究的基础上, 结合新技术和国家战略的需求, 深入研究机场高填方冲击碾压质量实时监控技术及其工程应用的问题。

## 1 机场高填方冲击碾压实时监控原理

### 1.1 冲击碾压过程监控的压实速度指标

对于机场高填方, 填筑材料均就近取材, 填土品种繁多, 性质各异, 级配很难保证。施工过程中常采用的是冲击碾压法, 图 1 所示为施工过程中碾压轮的运动规律, 下面介绍该法的几个特点。

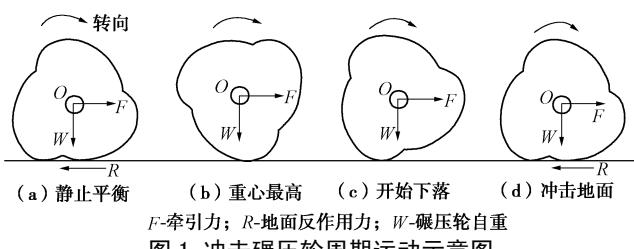


图 1 冲击碾压轮周期运动示意图

Fig. 1 Periodic motion of impact rolling wheel

(1) 冲击碾压机械的自重是普通振动碾压机械的几倍到十几倍, 对填筑土体形成巨大的静压力, 密实土体。

(2) 大振幅的低频运动使得对土体的每次冲击都能够较好地转化为压实能, 较之普通振动碾压机械, 冲击碾压机械没有调节振动的能力, 唯一能改变压实能量的指标为冲击碾压轮的压实速度。

(3) 根据压实的机理, 冲击碾压机械的工作机理类似于强力夯击的冲击能, 与传统振动碾压通过引起振动密实土体有很大不同。

而在施工现场, 冲击碾压机械是监测数据和填筑体相关信息的结合点。针对以上特点, 冲击碾压施工实时监控的指标包括冲击碾压机械行驶速度  $v_t$ 。冲击碾压的速度直接影响每次冲击的效果, 速度过大时, 碾压轮在接触地面后快速弹起, 冲击能量转化为压实能的效率低, 不利于压实。相反, 如果速度过低, 碾压轮的动能小, 冲击能不够, 降低了单次冲击碾压的质量。

故, 冲击碾压过程监控的要求为

$$v_{\min} \leq v_t \leq v_{\max}, \quad (1)$$

即冲击碾压的速度应该限制在规定的最小速度和最大速度之间。

### 1.2 冲击碾压过程监控的压实遍数指标

填筑体的位置信息可以通过标段  $b$ 、铺层  $c$  和水平坐标  $(m, n)$  来确定, 碾压遍数用  $P_{b,c,m,n}$  表示。对于冲击碾压的遍数, 将监控的填土层平面分成足够小的方格, 两个相邻时间点之间的滚轮轨迹形成的压实面覆盖方格之后, 将方格的压实遍数做加一处理。随着压实遍数的增加, 填筑体的干密度增加逐渐变缓, 最后趋于稳定<sup>[9]</sup>。根据碾压试验, 速度处于一定范围时, 取压实遍数的最低值  $P_0$  作为上限。对标段内该层填土冲击碾压完成之后, 最终压实遍数应满足

$$P_{b,c,m,n} \geq P_0. \quad (2)$$

故最终压实遍数不小于最小压实遍数。通过压实遍数能预测填料的干密度, 最终干密度应满足

$$\rho_d \geq \rho_0. \quad (3)$$

故最终干密度应不小于工程干密度的要求, 监控了施工质量即可使填筑体的最终干密度达到标准。如未能满足以上准则需求, 需要对施工薄弱位置及时进行增压、补压。

目前, 在正式施工前会开辟试验段, 以确定指标的标准, 指标达标时, 填土的干密度基本能够满足工程质量要求。本文通过监测施工车辆位置信息, 获取运动轨迹, 计算压实遍数, 从而保证压实指标的落实。

## 2 基于北斗的冲击碾压施工监控技术

### 2.1 北斗定位技术

我国的导航产业目前仍过度依赖 GPS 系统, 国产

的北斗卫星导航系统(Compass/Beidou satellite navigation system)作为国家战略性新兴产业的重要组成部分, 应当在这个以信息化为主的社会中发挥其基础性和先导性作用。

北斗系统的建立分为两步走:

(1) 目前已经完成的北斗一代卫星导航系统: 该系统采用双星定位, 具有报文通信和主动授时的功能, 实现了全天候、高精度、区域性的定位, 不过难以满足高动态、高保密性的要求。

(2) 逐步完善中的北斗二代卫星导航系统: 该系统继承了一代系统的报文通信功能, 信号采用了码分多址无线电导航卫星系统(Radio Navigation Satellite System, RNSS)结构体制每个导航信号上均正交调制有普通测距码和精密测距码<sup>[10]</sup>。自 2012 年 12 月 27 日正式开始运行以来, 该系统已经具有独立的双频 RTK 定位能力, 其伪距和载波相位测量精度已与 GPS 处在同一水平<sup>[11-12]</sup>。基于北斗二代卫星导航系统的产品已经在市场上占据了一定地位, 有关行业的应用也已见报道<sup>[13-14]</sup>, 说明该系统已经能够实现产品化。

本文采用的卫星定位接收机使用的定位技术为北斗卫星导航系统的双频 RTK 定位技术, 采用的定位板卡为 BDM670 型, 在对其进行静态和动态的定位精度测试之后, 确定其 RTK 定位误差小于 1 cm。

## 2.2 实时监控方法

施工过程中, 如果能够确保压实指标达标, 即可基本保证压实后填土的密实度达到工程质量要求。限于现场施工管理的水平, 根据机场高填方冲击碾压的施工过程, 采用北斗卫星导航定位技术、3G 无线传输技术和数据库技术等, 提出如图 2 所示的机场高填方冲击碾压质量实时监控的总体方案。具体的实时监控方法如下:

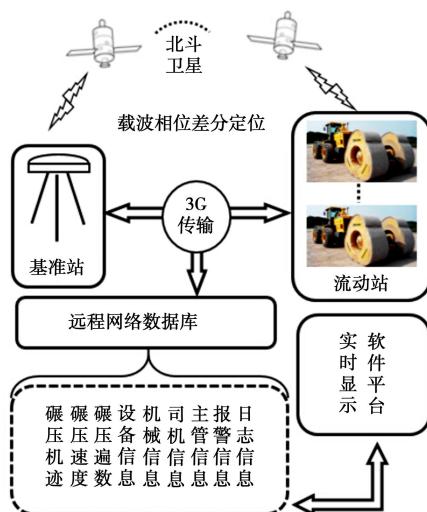


图 2 机场高填方冲击碾压实时监控的总方案

Fig. 2 Total program for real-time monitoring of impact rolling

(1) 测量施工场地的经纬度范围, 输入监控端的软件平台, 并预处理地理信息系统中的图层, 使其能够对过程监控的主要指标进行显示。

(2) 施工现场架设北斗卫星导航定位基准站, 并于冲击碾压机械上安装流动站的定位设备, 如图 3 所示。基准站与流动站的定位组合, 实现实时动态载波相位差分结算定位坐标, 定位信息经 3G 无线传输模块实时传送到远程网络数据服务器。

(3) 现场的监控中心实时获取远程网络数据服务器内的数据信息, 包括时间、经度、纬度和高度等, 并做进一步的运算, 包括机场高填方的主要指标, 如碾压轨迹、遍数和速度等。

(4) 将这些指标的监测值与监控准则进行比较, 根据偏差, 显眼地标示于监控软件平台, 并以短信方式通知标段负责人, 反馈现场, 指导施工。

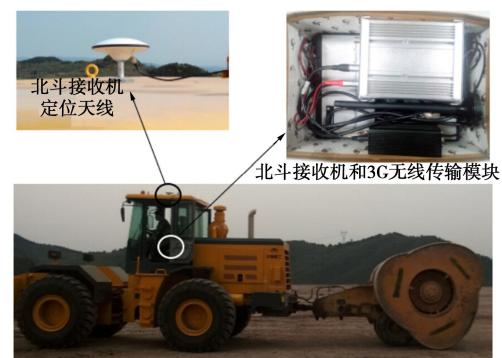


图 3 冲击碾压机械和监控硬件设备

Fig. 3 Impact rolling machines and monitoring hardware devices

## 2.3 碾压过程信息实时采集和传输技术

实现对冲击碾压设备的位置信息进行实时采集和传输是整个监控技术能够实现的基础。本文采用自主研发的采集装置, 实现了以上功能。具体采集和传输方法如下:

(1) 设置在固定位置的基准站和安装在冲击碾压机械上的流动站内部均包含北斗卫星导航定位的板卡, 能够分别接收北斗卫星信号和经过载波相位差分的卫星定位数据。

(2) 基准站和流动站均配置有 3G 无线传输模块, 两者定位板卡上设置好差分程序后, 基准站将修正后的高精度位置信息发送到流动站, 能够实现实时载波相位差分。

(3) 定位信息通过 3G 无线传输模块实现互相之间的通讯和与远程网络数据服务器之间的数据传输。3G 无线传输模块较之道路工程和水利工程中使用的 GPRS 技术稳定性更好、传输效率更高、速度更快。其原理是将位置信息的数字信号通过 3G 无线模块的

固定 IP 地址链接到 Internet 网, 存储于远程的网络数据服务器。监控中心的软件平台从服务器实时获取数据之后, 即可对数据进行运算和处理, 以及相应的指标显示。

## 2.4 数据库和指标显示技术

### (1) 数据库技术

在实时获取冲击碾压机械的位置信息之后, 实现了数据存储。为使得软件平台能够有效利用数据, 减少冗余数据查询, 提高查询效率, 需要优化数据表结构, 提供数据的修改、更新和提取等功能。针对软件平台的主要功能设置的数据表如表 1 所示。绘制实时压实轨迹需要当前的和上一时刻的位置信息, 将此以设备编号为主键存入两张表中, 可以合理处理车辆停止工作等非正常工作情况。对司机、主管人员、设备、冲击碾压机械等工程信息, 分别设表, 以冲击碾压机械为纽带, 将人、物信息联系起来, 实现关联查询和分别管理。

表 1 数据库优化后平台功能与数据表对照表

Table 1 Correspondence of functions and optimized data

功能	数据表
实时压实轨迹	RealTimeData
历史压实遍数	Last_RealTimeData
设备信息管理	YSBSInfoyyyMMddhhmmss
机械信息管理	EquipmentInfo
报警信息管理	MechanicalInfo
日志信息管理	AlarmInfo
司机信息管理	LogInfo
司机信息管理	DriversInfo
主管信息管理	AdministratorsInfo

### (2) 压实遍数计算和显示

获取施工标段的坐标信息, 建立 GIS 地理信息的图层, 并将其网格化, 使得每个网格足够小, 以网格中心点的大地坐标来标记网格的位置。在实时监测过程中, 每得到一个新的有效位置信息, 结合冲击碾压机械的尺寸, 就能确定碾压的范围, 网格中心点被包含在冲击碾压区域范围内时, 将该网格的压实遍数加一, 压实遍数计算示意图如图 4 所示。

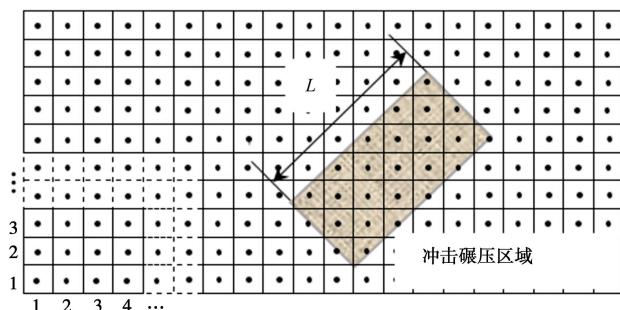


图 4 压实遍数计算示意图

Fig. 4 Schematic diagram of calculating number of impact

## 3 施工现场测试

承德新机场<sup>[15]</sup>作为华北地区地形地质条件最复杂的支线机场之一, 地形起伏大, 地面标高介于 550~781 m 之间, 挖填方总量超过 5000 万方, 最大填方高度超 100 m。

采用 C#结合 GIS 平台、SQL Server 数据库技术研发了冲击碾压质量实时监控系统, 图 5 为软件主功能区。现场测试位置在承德机场二标段西侧填方区, 其西北角坐标为北纬 41.126° 东经 118.057°, 东南角坐标为北纬 41.125° 东经 118.059°。本次现场测试旨在测试硬件系统在偏远山区的工作性能、可行性和稳定性。经过测试, 系统硬件的工作状态良好: 基准站和流动站均能接收卫星信号并进行实时载波相位差分运算, 未出现定位断点情况; 流动站设备设置在冲击碾压机械的驾驶室内, 工作正常, 证明其抗振性能良好; 3G 网络数据传输通畅, 确保实时传输。经过对现场数据的初步处理, 冲击碾压轨迹图如图 5 所示, 冲击碾压遍数如图 6 所示。

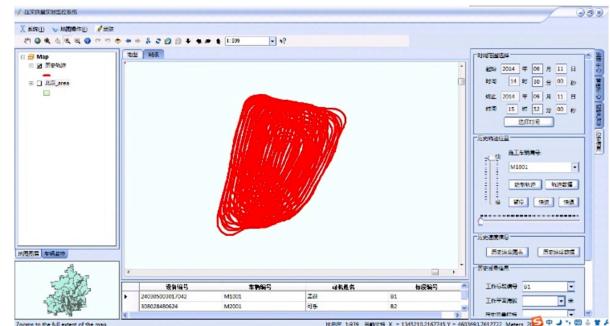


图 5 冲击碾压轨迹图

Fig. 5 Impact rolling trajectory

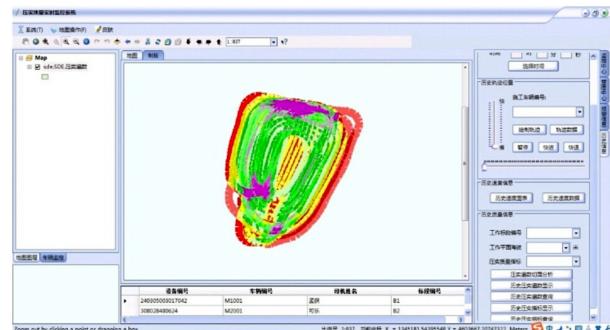


图 6 冲击碾压遍数图

Fig. 6 Number of impact rolling passes

图 6 中显示的冲击碾压机碾压轮宽度为 3 m, 根据轨迹计算后的压实遍数使用颜色标明, 能够发现在压实工作面内有很大一部分区域没有达到压实遍数的要求, 而在机械转弯的地方压实遍数超过标准。据此, 该系统能够直观地显示压实情况、发现压实不达标和

超标的位置，从而监控和优化冲击碾压的施工过程。

## 4 结语

本文基于道路交通和水利行业的相关经验，采用北斗卫星导航定位系统和 3G 无线传输等新技术，针对机场高填方冲击碾压施工要求和特点，研发了压实质量实时监控技术，实现了冲击碾压轨迹、速度和遍数等施工信息的全过程实时监测。在承德新机场施工现场的试验，初步验证了系统硬件良好的工作性能、北斗卫星导航定位和数据传输的可靠性和平台工作的稳定性。该项技术后续将会结合机场建设的工程需求，完善工程管理等功能。该技术的应用能够加强机场高填方施工质量过程监控，有效地保证和提高压实质量和施工效率，对提高机场高填方工程的施工质量有重要意义。

## 参考文献：

- [1] 曹光栩, 宋二祥, 徐明. 山区机场高填方地基工后沉降变形简化算法[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 1–5. (CAO Guang-xu, SONG Er-xiang, XU Ming. Simplified calculation methods of post-construction settlement of high-fill foundation in mountain airport[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 1–5. (in Chinese))
- [2] MARK J T, DAVID J W. Estimating compaction of cohesive soils from machine drive power[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**(12): 1771–1777.
- [3] DAVID J W, MARK J T. Relationships between in situ and roller-integrated compaction measurements for granular soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**(12): 1763–1770.
- [4] MICHAEL A M, ROBERT V R. Field monitoring of roller vibration during compaction of subgrade soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(3): 257–265.
- [5] PETERSEN D, SIEKMEIER J, NELSON C, et al. Intelligent soil compaction-technology, results and a roadmap toward widespread use[J]. Journal of Transport Research Board, 2006, **1975**(1): 81–88.
- [6] 黄声享, 刘经南. GPS 实时监控系统及其在堆石坝施工中的初步应用[J]. 武汉大学学报, 2005, **30**(9): 813–816. (HUANG Sheng-xiang, LIU Jing-nan. GPS real-time supervisory system and its preliminary application in the construction of face rockfill dam[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, **30**(9): 813–816. (in Chinese))
- [7] 吴晓铭, 黄声享. 水布垭水电站大坝填筑碾压施工质量监控系统[J]. 水力发电, 2008, **34**(3): 47–50. (WU Xiao-ming, HUANG Sheng-xiang. Quality supervisory system of filling and rolling construction in the dam of Shuibuya hydropower station[J]. Water Power, 2008, **34**(3): 47–50. (in Chinese))
- [8] ZHONG Deng-hua, CUI Bo, LIU Dong-hai. Theoretical research on construction quality real-time monitoring and system integration of core rockfill dam[J]. Science in China Series E-Technological Sciences, 2009, **52**(11): 3406–3412.
- [9] 田昊, 张东宁. 九寨黄龙机场高填方施工技术[J]. 山西建筑, 2010, **36**(7): 63–64. (TIAN Hao, ZHANG Dong-ning. The high fill construction technology of Jiuzhai Huanglong airport[J]. Shanxi Architecture, 2010, **36**(7): 63–64. (in Chinese))
- [10] 谭述森, 周兵, 郭盛桃, 等. 我国全球卫星导航信号设计研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, **40**(5): 514–519. (TAN Shu-sen, ZHOU Bing, GUO Sheng-tao, et al. Studies of compass navigation signals design[J]. Science China, 2010, **40**(5): 514–519. (in Chinese))
- [11] YANG Yuan-xi, LI Jin-long, WANG Ai-bing, et al. Preliminary assessment of the navigation and positioning performance of Beidou regional navigation satellite system[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, **57**: 144–152.
- [12] SHI Chuang, ZHAO Qi-le, LI Min, et al. Precise orbit determination of Beidou satellites with precise positioning. Science China: Earth Science, 2012, **55**: 1079–1086.
- [13] 姚作新. 基于北斗卫星短信通信方式的无人值守自动气象站网[J]. 气象科技, 2012, **40**(3): 340–344. (YAO Zuo-xin. Unmanned automatic weather station network based on Beidou satellite SMS[J]. Meteorological Science and Technology, 2012, **40**(3): 340–344. (in Chinese))
- [14] 王文松, 蓝常源, 陈涛. 基于北斗系统驾校考试终端设计研究[J]. 卫星与网络, 2013(5): 68–71. (WANG Wen-song, LAN Chang-yuan, CHEN Tao. Driving test terminal based on Beidou satellite[J]. Satellite and Network, 2013(5): 68–71. (in Chinese))
- [15] 徐坤, 周正飞. 承德新机场高填方边坡稳定性分析[J]. 公路工程, 2014, **39**(2): 251–257. (XU Kun, ZHOU Zheng-fei. Stability analysis of high fill slope of Chengde civil airport[J]. Highway Engineering, 2014, **39**(2): 251–257. (in Chinese))

(本文责编 明经平)