

# 采用新检测方法的地铁盾构隧道管片姿态检测信息管理系统

龚 率<sup>1</sup> 张小波<sup>1</sup> 乔燕燕<sup>2</sup> 黄志伟<sup>1</sup> 何 波<sup>3</sup>

(1. 成都市勘察测绘研究院, 610081, 成都; 2. 四川水利职业技术学院, 611231, 成都;

3. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 610041, 成都/第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 分析了地铁盾构隧道管片姿态测量传统方法的复杂性、计算的低效性、数据报送的不及时性、成果展示的单一性,从改进外业测量数据采集的方法入手,详细阐述了管片姿态检测信息系统的管片姿态偏差计算数学模型,并说明了该系统的设计架构及应用效果。管片姿态检测信息系统能实现盾构隧道管片姿态检测的自动化、实时化、标准化和专业化,能较好地提高隧道轴线控制的质量,还能节约地铁隧道建设成本。

**关键词** 地铁; 盾构隧道; 管片姿态检测系统

**中图分类号** U456.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.08.044

## Detection Information Management System of Metro Shield Segment Attitude with New Detection Methods

GONG Shuai, ZHANG Xiaobo, QIAO Yanyan, HUANG Zhiwei, HE Bo

**Abstract** View of the complexity, inefficiency of calculation, untimely submission of data and singleness of achievement display of the conventional method of metro shield tunnel segment attitude measurement, starting with improving the method of field measurement data collection, the mathematical model of segment attitude deviation calculation of segment attitude detection information system is described in detail. System structure and application effect are explained. Segment attitude detection information system can realize automation, real-time, standardization and specialization of segment attitude detection for shield tunnel. The system can improve the quality of tunnel axis control and can save the cost of metro tunnel construction.

**Key words** metro; shield tunnel; segment attitude detection system

**First-author's address** Chengdu Institute of Survey and Mapping, 610081, Chengdu, China

被广泛应用于各大城市的地铁隧道建设中。

盾构机按照设计的线路方向顺利掘进是盾构法施工的主要目的。在盾构法施工过程中,设计线路参数导入错误、设计轴线坐标计算错误、盾构机导向系统测量出错、管片姿态纠偏失误及地质环境突变等不利因素,均会造成盾构隧道管片水平和竖向姿态偏离设计轴线较大的质量事故,给经济上带来较大损失,甚至会造成安全事故。

本文从改进隧道管片姿态外业测量方法入手,理清管片姿态水平偏差和竖向偏差的计算模型,并研发了1套计算准确、测量高效、报警及时、网络共享、能综合展示的新型地铁盾构隧道管片姿态检测信息管理系统(以下简为“新系统”)。这对复核设计线路参数、指导盾构机姿态纠偏都具有重要的现实意义。

## 1 研究背景

### 1.1 盾构法施工要求

一方面,盾构机要按设计平、纵面进行施工,其掘进前须进行设计线路轴线坐标的计算和导入,因此必须采用专业的软件计算出每单位间隔里程(通常为1 mm)设计轴线精准的三维坐标。

另一方面,盾构机完成一定量的混凝土预制管片拼装后,应及时复测成型隧道的实际姿态,以此指导下一步施工掘进。

以成都地铁工程为例,根据业主要求,盾构机每拼装10环管片,施工单位应测量一次成型隧道的管片姿态,当实测轴线偏离设计轴线50 mm以上,应向相关各方发送预警信息,以研究改进方案、及时纠偏。

### 1.2 传统检测方法

当前,管片姿态检测主要采用“全站仪测量 +

当前,盾构法施工以其环保、高效、安全等优势

人工记录计算”的传统方法。

首先,在圆形隧道里,选用经监理或三方测量单位复核合格的控制点设站;随后,采用极坐标法,直接测得水平管片尺标靶中心反射片在线路坐标系下的三维坐标(如图 1 所示)。

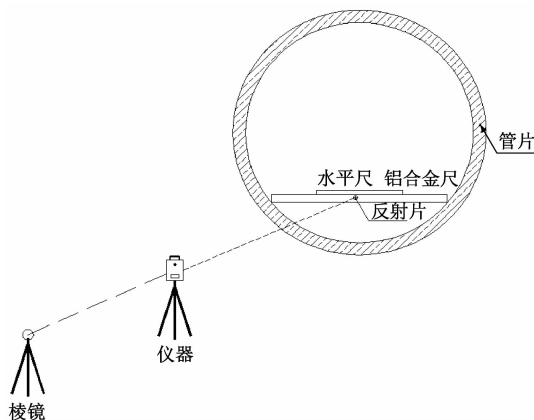


图 1 管片姿态测量示意图

设靶中心及隧道中心的在地铁施工坐标系下实测的纵坐标、横坐标、高程分别为  $(x_b, y_b, h_b)$  及  $(x_p, y_p, h_p)$ , 则根据水平尺与圆形隧道的几何关系, 可反算隧道管片中心处的坐标:

$$\left. \begin{aligned} x_p &= x_b \\ y_p &= y_b \\ h_p &= h_b - \Delta h + R_n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:

$\Delta h$ ——标靶中心距离管片底部垂直距离,可直接量取;

$R_n$ ——管片内径。

传统的管片姿态检测有 2 种操作方法:

1) 现场计算:测量现场需计算出姿态大小;通常至少需要 1 人测量,另 1 人手持可编程电子计算器计算姿态偏差并手工记录于记录簿中。

2) 外业采集、内业专门计算:现场只采集数据;测量人员出隧道后,从全站仪中导出三维坐标数据,再在借助 AutoCAD 及 Excel 等辅助软件来计算管片姿态偏差。

由此可见,管片姿态检测传统方法有如下不足:

1) 现场计算的方法:外业投入人力成本较高;目前的可编程式计算器智能化程度较低,人工干预大,计算出错率高;隧道内潮湿、易滑的环境容易损毁纸质记录手簿,而造成数据丢失。

2) 外业采集、内业计算的方法:不能现场知晓管片姿态的偏差大小,时效性极差;内业采用辅助

软件进行姿态计算,效率低下、准确性较差。

3) 管片姿态检测传统方法不利于数据的精准计算、标准化保存、展示、共享、查询及分析。

由于传统管片姿态检测方法的诸多不足,参建各方很难实时、准确、全面地掌握成型隧道管片的拼装质量,不利于对下一步施工进行科学决策部署。

### 1.3 新系统概况

针对管片姿态检测传统方法的不足,本研究采用 Java 语言开发了一款手机 App(应用程序)——管片姿态测量系统。通过该 App,能实现全站仪与移动终端的蓝牙匹配通信,可对管片姿态数据同步进行采集、记录及计算等处理,并直接显示计算结果(如图 2 所示)。该 App 无需专人记录和计算,极大地减少了劳动强度,提高了测量效率,降低了计算出错率。

检测数据				
蓝牙已连接 全站仪 徕卡4位精度				
测 量	X坐标	Y坐标	Z坐标	
	13105.4495	21885.0889	468.543	
添 加	里 程	水 平	垂 直	
	18230.197	-3.449	3.044	
数据列表				
环号	里 程	水平偏差	垂直偏差	删除
968	18246.727	-2.9	4.2	
969	18245.233	-1.9	3.0	
970	18243.843	-1.9	2.1	
971	18242.209	-2.5	1.9	
972	18240.711	-2.9	2.1	

图 2 移动端 App 显示界面

用户在有网络的环境下,不仅可以通过 QQ 或微信等手机软件对已采集和计算的管片姿态数据进行网络分享,还可以将数据上传至管片姿态检测管理系统的云计算中心进行永久存储、拓展计算、分析、统计、绘图、制表及短信预警等处理。

## 2 新系统的计算模型

选择管片中心点作为管片姿态测量的特征测点(以下简为“测点”)。管片姿态的水平偏差是指测点与设计隧道中线的水平偏距。通常设计隧道中线与设计线路中线在直线段处完全重合,在曲线段存在偏移值。曲线段偏移值根据列车设计速度和力学特性由设计人员计算,并提供于设计蓝图中。因此,计算姿态的水平偏差关键是计算出测点到设计线路中线的水平偏距。根据平面坐标  $(x_p,$

$y_p$ )和平面曲线设计参数,可计算管片姿态测点的坐标、在线路上的里程 $L_p$ 及其与线路中线的水平偏差 $d_p$ 。

管片姿态的竖向偏差是指测点的实测高程与其设计高程之差。根据 $L_p$ 和纵断面设计图计算得到该里程位置管片中心的设计高程,并与 $h_p$ 进行比较,即可求出管片姿态的竖向偏差 $d_h$ 。

## 2.1 $d_p$ 计算模型

地铁隧道平面设计线形主要由直线段、缓和曲线段和圆曲线段等组成。测点可能处于任意类型的设计曲线范围内。因此,应先分析测点与设计线路控制点 $D_{ZH}$ (直缓点)、 $D_{HY}$ (缓圆点)、 $D_{QZ}$ (曲中点)、 $D_{YH}$ (圆缓点)、 $D_{HZ}$ (缓直点)的距离和方向,来判断测点在设计线路中的具体位置,再求取测点对应线形的水平偏差和里程 $[2]$ 。

### 2.1.1 测点在直线段

在直线段,测点 $P(x_p, y_p)$ 到设计直线段的最短距离为测点到设计线路中线的偏移量 $d$ ;其在对应设计直线段的垂足点为 $P_0(x_0, y_0)$ , $P$ 与 $P_0$ 的里程均为 $L_p$ ;  $D_{ZH}$ (或 $D_{HZ}$ )的坐标为 $(X_0, Y_0)$ ,过该点的直线段坐标方位角为 $A_0$ ,则该段直线 $a_1$ 为:

$$Y - Y_0 = K_1(X - X_0) \quad (2)$$

式中:

$K_1$ ——直线 $a_1$ 的斜率。

过点 $P$ 及 $P_0$ 的直线 $a_2$ 为 $[3]$ :

$$Y - Y_p = K_2(X - X_p) \quad (3)$$

式中:

$K_2$ ——直线 $a_2$ 的斜率。

因 $a_1$ 与 $a_2$ 互相垂直,故 $K_1 \times K_2 = -1$ 。联立式(2)及式(3),得到的解即为 $P_0$ 坐标。进而可求得点 $P$ 与点 $P_0$ 之间的距离即为 $d$ 和 $L_p$ 。

### 2.1.2 测点在圆曲线段

若测点 $P(x_p, y_p)$ 位于圆曲线附近。设 $(x_y, y_y)$ 为圆心设计坐标, $r$ 为圆曲线的设计半径, $\beta$ 为圆心到测点 $P$ 和 $D_{HY}$ 构成直线的夹角, $L_{HY}$ 为 $D_{HY}$ 的设计里程。则其到圆曲线的 $d$ 和 $L_p$ 为 $[3]$ :

$$\left. \begin{aligned} d &= \sqrt{(x_p - x_y)^2 + (y_p - y_y)^2} - r \\ L_p &= r\beta + L_{HY} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

### 2.1.3 测点在缓和曲线段

若测点 $P(x_p, y_p)$ 位于缓和曲线附近,则首先建立以 $D_{ZH}$ (或 $D_{HZ}$ )为原点,以过 $D_{ZH}$ (或 $D_{HZ}$ )的切线为 $x$ 轴建立独立坐标系,如图3所示。

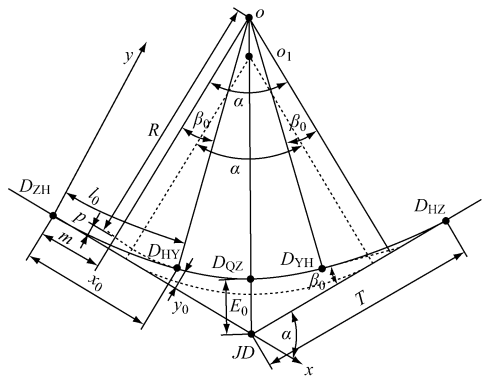


图3 缓和曲线独立坐标系

则可迭代计算求解独立坐标系的参数 $[2]$ :

$$D_p = 1 - \frac{l y_{p,A}}{r l_0} + \frac{l^3 x_{p,A}}{2 r^2 l_0^2} - \frac{l^4}{3 r^2 l_0^2} + \frac{l^5 y_{p,A}}{8 r^3 l_0^3} - \frac{l^7 x_{p,A}}{48 r^4 l_0^4} + \frac{l^8}{105 r^4 l_0^4} \quad (5)$$

式中:

$l_0$ ——缓和曲线长度;

$l$ ——缓和曲线上一点离 $D_{ZH}$ (或 $D_{HZ}$ )的曲线距离;

$P(x_{p,A}, y_{p,A})$ ——测点 $P$ 在独立坐标系下的坐标;

$D_p$ ——测点 $P$ 距离缓和曲线水平偏差的平方。

当测点在缓和曲线上,则有:

$$\left\{ \begin{aligned} d &= \sqrt{D_p} \\ L_{p1} &= L_{ZH} + l \\ L_{p2} &= L_{HZ} - l \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中:

$d$ ——测点 $P$ 距离缓和曲线的水平偏差;

$L_{p1}, L_{p2}$ ——分别为测点 $P$ 在前、后缓和曲线上的线路里程;

$L_{ZH}, L_{HZ}$ ——分别为控制点 $D_{ZH}$ 及 $D_{HZ}$ 的里程。

### 2.1.4 $d_p$ 的计算

为了抵消列车在曲线行驶的离心力,保持列车的稳定,往往在曲线段设置超高,以及线路中线与隧道中线偏移量 $[4]$ 。隧道按设计的隧道中线掘进,因此 $d_p$ 与 $d$ 关系为:

$$d_p = Fd + \Delta d \quad (7)$$

式中:

$\Delta d$ ——线路中线与隧道中线的偏移量;曲线右转时 $\Delta d > 0$ ,曲线左转时 $\Delta d < 0$ ,直线段 $\Delta d = 0$ ,此值一般由设计单位提供;

$F$ ——测点方向函数;若测点在线路中线大里

程方向的左侧则  $F = -1$ , 反之  $F = 1$ 。

## 2.2 $d_h$ 计算模型

根据  $L_p$  和纵断面设计图, 由文献[2]的计算公式, 可计算测点的设计轨面高  $H_{L_p}$ , 则有:

$$d_h = h_p - (H_{L_p} - \Delta H + R_0) \quad (8)$$

式中:

$\Delta H$ ——道床设计高度;

$R_0$ ——管片设计内径。

$\Delta H$  和  $R_0$  均可从设计图纸中获得。

## 3 新系统的开发及应用

基于新系统的计算模型, 本研究采用 Java 语言结合 SQL server 数据库管理系统进行系统开发。新系统采用 B/S(浏览器/服务器)模式和 C/S(服务器/客户机)模式相结合的架构方式, 主要由全站仪、云计算中心、移动终端和 Web(全球广域网)管理客户端等构成<sup>[5]</sup>。主要系统架构如图 4 所示。

全站仪负责隧道管片中心(实测轴线)三维坐标的采集。

云计算中心可对实测轴线三维坐标进行存储、计算、分析、统计及短信预警, 还可接收 Web 管理客户端传入的线路设计参数, 并按一定的里程间距

(如 1 mm)反算设计线路中线和隧道中线的三维坐标, 最终将各种计算、分析数据反馈至 Web 端。

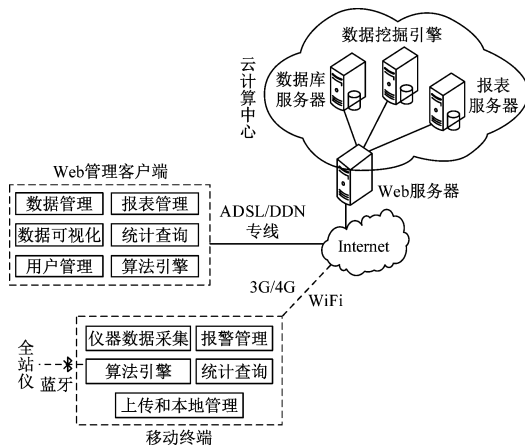


图4 管片姿态检测管理系统架构

移动终端与全站仪进行蓝牙通信后, 实时接收全站仪采集的管片姿态特征点三维坐标并进行存储、计算水平和竖向姿态偏差及数据显示。移动终端在实现网络连接后, 可将数据传输到云计算中心。

Web 管理客户端的界面如图 5 所示, 其提供各类数据上传、下载、接收、查询、展示、分析等功能<sup>[6]</sup>。



图5 Web端显示界面

新系统基于云计算和物联网技术实现了一种先进的分布式架构, 具有良好的扩展性、适用性和实时性。新系统能自动化地完成管片姿态数据采集、存储、计算、报警、统计分析可视化操作, 避免了人工主观干预, 保障了数据的质量和真实性<sup>[5]</sup>; 可为隧道施工决策单位提供实时、精准、便捷的测量方法和科学的数据管理模式; 为业主准确及时掌

握隧道掘进时成型管片的质量提供定量参考依据, 降低了业主和监理监控管片姿态的成本。

## 4 结语

基于地铁隧道管片姿态检测传统方法的复杂性、计算的不严谨性、成果资料报送的不及时性等

(下转第 222 页)

合,对托换全过程进行变形和裂缝监测,监测精度为0.01 mm。监测过程分为托换桩及承台施工阶段、受力转换至封固承台完成及既有桥桩破除阶段、盾构穿越阶段、工后4年监测阶段。前3个阶段需要对桥墩顶、墩底、桥面板和托换承台进行自动化监测,并对桥面板应力、裂缝以及托换承台应力进行常规监测;第4阶段为常规监测,根据变形情况每月1次或每年1~4次。

为更好实现裂缝监测,建和桥项目还采用了应力监测,其目的是监测受力部位应力值是否达到混凝土的开裂应力。应力控制值为其开裂应力的80%。监测结果显示:除41#墩处达到开裂应力的84%外,其余均在控制值以内。根据裂缝和应力监测结果,建和桥的桥梁在托换过程中没有出现新的裂缝。这充分说明了顶升力取值合理,顶升力控制法切实有效。

## 4 结语

通过地面预支顶措施对桥梁上部结构进行“称重”,可以精确测定超静定结构桥梁在现状使用条件下桥面板传到各桥梁支座处的力。精确测定桥梁支座处承受的荷载后,再加上桥墩自重、承台自重,即为托换时顶升力的控制值,从而完成现状使用状态下的托换。

在主动托换过程中,通过地面预支顶措施使桥面板始终保持原有的状态,从而保证结构安全和车辆正常行驶。

采用本方法还可以对桥梁现状进行检测:在超静定桥梁结构上施加与理论计算工况相同的车辆和车道荷载,通过对桥梁现状的检测,可分析桥梁实际受力与设计工况的变化情况,从而采取调整支

座形式或支座高度等有效措施对桥梁进行养护。

## 参考文献

- [1] 朱金涌. 饱和黄土区地铁隧道穿越桥梁桩基托换技术研究[J]. 铁道标准设计, 2016(4): 78.
- [2] 李琳, 李青宁, 张立, 等. 咸阳国际机场大轴力桥梁桩基托换技术试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015(增刊2): 159.
- [3] 唐新权. 地铁区间隧道下穿桥梁大轴力桩基托换设计与施工[J]. 铁道标准设计, 2016(1): 87.
- [4] 杨正华. 地铁隧道下穿异型连续梁桩基托换设计[J]. 铁道标准设计, 2018(6): 104.
- [5] 万小飞. 主动托换技术在地铁穿越超静定桥梁中的应用[J]. 施工技术, 2015(增刊1): 151.
- [6] 寇卫锋. 主动托换技术在郑州地铁盾构穿越桥梁桩基中的应用[J]. 铁道建筑, 2018(11): 87.
- [7] 李洪庆. 桩基托换技术在广州地铁工程中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2016(8): 62.
- [8] 许东. 成都地铁3号线衣冠庙立交桥桩基托换设计[J]. 隧道建设, 2015(8): 821.
- [9] 黄希, 陈行, 晏启祥, 等. 地铁隧道下穿桥梁桩基托换力学行为与参数研究[J]. 施工技术, 2017(11): 67.
- [10] 黄希, 陈行, 晏启祥. 地铁区间隧道下穿既有桥梁的桩基托换研究[J]. 铁道标准设计, 2016(12): 89.
- [11] 杨勇, 杜斌, 吴睿麒, 等. 地铁区间穿越天桥的桩基托换设计与施工[J]. 特种结构, 2018(5): 94.
- [12] 吴文亮, 王建军, 孙凡浩. 二次托换技术在福州地铁紫五区间桩基托换中的应用[J]. 隧道建设(中英文), 2018(7): 1220.
- [13] 孙峰. 盾构下穿楼房桩基主动托换优化技术研究[J]. 铁道工程学报, 2018(9): 93.
- [14] 邓涛, 关振长, 陈开良, 等. 桥梁桩基主动托换中顶升荷载的简化计算[J]. 岩土力学, 2015(11): 3259.
- [15] 牛斌. 盾构区间下穿异形板桥梁桩基托换研究[J]. 都市轨道交通, 2020(1): 84.
- [16] 牛斌. 异形板桥梁桩基主动托换技术[J]. 施工技术, 2019(23): 33.

(收稿日期: 2020-08-12)

(上接第212页)

弊端,本文从改进外业测量数据采集的方法入手,详细阐述了管片姿态水平偏差和竖向偏差计算的数学模型,并采用云计算和物联网技术搭建“移动终端-云计算中心-Web客户端”的管片姿态检测管理系统。通过该系统,实现了线路设计轴线坐标计算,以及管片姿态测量、计算及结果表达等过程的自动化、实时化、标准化、专业化,极大地提高了检测效率、节约了监控成本,为线路设计轴线坐标的复核、盾构姿态的纠偏、掘进参数的优化等相关工作提供了重要的技术支持,值得进一步研究和推广应用。

## 参考文献

- [1] 何川, 封坤, 方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2015(1): 97.
- [2] 王兆祥. 铁道工程测量[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1999.
- [3] 郑子天, 刘成龙, 曹体涛. 轨道点线路里程的一种计算方法[J]. 测绘科学技术报, 2013(5): 448.
- [4] 史廷玉, 潘正风. 地铁曲线隧道施工中线的偏移及其坐标计算[J]. 铁道勘察, 2006(4): 1.
- [5] 王磊, 龚率, 黄志伟. 基于移动终端的地铁盾构管片姿态检测管理系统: 105927276A[P]. 2016-09-07.
- [6] 孙继东, 封坤, 赵维录, 等. 基于物联网和云计算的地铁盾构管片姿态检测管理系统: 106022560A[P]. 2016-10-12.

(收稿日期: 2019-05-08)