

智能隧道激光收敛仪的研制和应用

夏才初^{1,2}, 那通兴¹, 张平阳¹, 黄曼^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 基于相位式激光测距原理, 研制了由主机、对准调节装置和后处理软件组成的智能隧道激光收敛仪。主机有测量、编辑、计算、数据传输功能, 加密监测数据、防止数据造假的功能, 以及足够的存储空间。对准调节装置能够方便快捷地安装和拆卸, 并能使激光点精确地对准目标。后处理软件能够处理加密数据, 绘制收敛-时间曲线图和生成报表。室内试验和隧道现场实测表明, 测线长度为 5.0~14.0 m 时的施测精度为 0.50~0.68 mm; 对比收敛计和全站仪, 智能隧道激光收敛仪具有监测效率高, 劳动强度低, 操作简便快捷, 施工干扰少等优点。

关键词: 智能; 隧道收敛; 激光测距; 精度评估; 数据加密
中图分类号: TU94 **文献标志码:** A

Development and Application of Smart Tunnel Laser Convergence Gauge

XIA Caichu^{1,2}, NA Tongxing¹, ZHANG Pingyang¹, HUANG Man^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China)

Abstract: Based on the phase-shift laser ranging principle, a smart tunnel laser convergence gauge was developed which consisted of a main engine, an adjusting device and the post-processing software. The main engine has the functions of measurement, editing, calculation, and data transmission with enough memory to store monitoring data, and can encrypt the monitoring data to prevent data fraud. The adjusting device can be installed and disassembled quickly and easily. It can adjust the laser point to aim at the target accurately. Post-processing software can process the encrypted monitoring data, draw convergence-time curve and generate reports automatically. The laboratory and tunnel on-site precision tests indicate that its monitoring precision can reach 0.50 to 0.68 mm when the length of the tunnel

convergence line is within the range of 5.0 to 14.0 m. Compared with traditional convergence gauges and total stations, the smart tunnel laser convergence gauge has the advantages of high efficiency, low labor intensity and easy operation.

Key words: smart; tunnel convergence; laser ranging; precision assessment; data encrypted

通过测量隧道周边净空尺寸变化, 即对隧道周边收敛进行测量, 可以直观明确地判断围岩或结构的稳定性, 这是隧道施工监测中的必测项目^[1]。钢卷尺收敛计是监测隧道收敛的常用仪器^[2-4]。传统的钢卷尺收敛计为接触式量测, 结构较复杂且安装过程较为繁琐。测量时需在隧道壁面埋设卡钩, 将收敛计悬挂于卡钩上, 读取测点间的距离。虽然标称精度不低于 0.1 mm^[5-7], 但实际施测精度的影响因素多, 存在很大的不确定性^[8]。收敛计挂钩和洞壁卡钩的接触部位, 钢卷尺的张拉力大小等均会对其测量精度产生较大影响。钢卷尺工作时要张拉受力, 需在喷射混凝土强度形成后方可进行量测, 影响布点的及时性而损失部分收敛监测值。当隧道断面较大时, 收敛计挂设困难, 严重影响监测效率, 而且监测过程中悬挂于隧道中间的收敛计还会影响隧道内正常的施工作业。

全站仪也被应用于隧道收敛监测^[9-11], 但由于全站仪免棱镜测量的精度限制以及测点坐标变化换算得到收敛值的误差传递, 使得全站仪的实测精度难以满足隧道收敛监测的精度要求^[12]。肖国峰等研制了一种激光测距仪的固定式安装装置, 实现了隧道收敛的非接触测量, 施测精度可达 0.7 mm^[13]。但该装置固定安装在隧道壁面上, 容易因爆破振动和机械碰撞影响监测精度, 甚至被碰坏; 且该装置缺少精

收稿日期: 2016-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(41472248)

第一作者: 夏才初(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为非连续岩体力学, 岩体流变理论, 隧道与地下建筑工程健康理论及诊断技术。E-mail: tjxiacbb@126.com

确的调节功能,难以精确对准目标点,因而限制了其推广使用。

还有一些其他测量隧道收敛的仪器和方法,例如巴塞特收敛系统^[14]、近景摄影测量技术^[15]、三维激光扫描技术^[16]等,都因监测精度较低、实际操作难度太高、设备成本过高而未能在工程中推广使用。

基于相位式激光测距原理,本文研制了一种智能隧道激光收敛仪,主要包括主机、对准调节装置和后处理软件等,实现了简单便捷的安装拆卸,以及精确对准目标点的功能。该仪器通过了实验室内、敦(煌)格(尔木)铁路当金山隧道和青岛某洞库中的精度试验评估。同时,在敦格铁路当金山隧道与全站仪测量结果进行了应用对比。

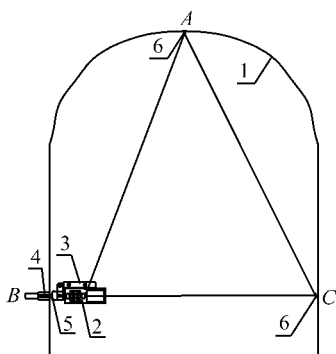
1 智能隧道激光收敛仪的研制

1.1 组成和功能

智能隧道激光收敛仪由主机、对准调节装置、固定螺栓、转换接头、反光片、后处理软件组成(见图1)。测量时调节对准调节装置,将激光束对准反光片上的目标点,使用主机测得仪器与目标点间的测线长度,通过测线长度的变化实现隧道周边收敛的监测。

$$\delta_i = l_0 - l_i \quad (1)$$

式中: δ_i 为测线累计周边收敛; l_0 为测线初始读数; l_i 为测线本次读数。



1—隧道围岩;2—激光收敛仪;3—对准调节装置;4—固定螺栓;5—转换接头;6—反光片

图1 智能隧道激光收敛仪的组成及周边收敛监测原理

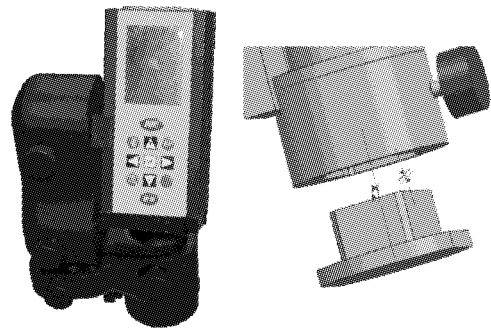
Fig.1 Smart tunnel laser convergence gauge and the measurement principle of tunnel convergence

主机的测距精度为 ± 1 mm,分辨率为0.1 mm,量程为30 m;可存储4 000组测量数据,且具有以下功能:①加密测量数据以防止数据造假;②可以输入项目名称、断面编号、测线编号,使用RS485接口和

蓝牙功能进行数据传输;③为防止测量时按键扰动主机影响测量精度,设置了外接触发按钮。主机和对准调节装置实物如图2a所示。

对准调节装置设有两个转轴,可以实现主机绕俯仰轴、回转轴进行360°调节,同时具有锁死粗调,进行微调的功能,确保主机激光束能够精确对准前方半平面空间内的任一目标点。为避免固定安装式收敛测量装置的弊端,对准调节装置底部设置了与安装在固定螺栓上的转换接头匹配的转换母头(见图2b),固定螺栓埋设在隧道围岩上,以实现对准调节装置方便快捷的安装和拆卸。

为保证测量精度,反光片在安装时可以调节合页的角度,以使激光束与反光片垂直。



a 主机及对准调节装置 b 转换连接接头、母头

图2 智能隧道激光收敛仪主机及对准调节装置

Fig.2 Main engine and adjusting device of smart tunnel laser convergence gauge

1.2 智能隧道激光收敛仪主机面板功能的开发

针对隧道周边收敛监测的实际使用需求,开发了智能隧道激光收敛仪主机的面板功能,包括编辑、测量、传输、计算等功能(见图3)。

编辑功能:测量前,提示输入项目名称、断面编号和测线编号等编辑工作,见图3a。

测量功能:对准目标点后,触发外接按钮测量数据并储存于主机内存中。存储数据时,对测量数据设置了加密算法以防止数据造假。开发外接按钮的目的是避免直接在面板上按击测量键引起仪器抖动而影响测量精度。

传输功能:主机可以储存4 000条监测数据,开发了RS485数据接口连接电脑,以及蓝牙接口连接电脑和手机功能,见图3b。这样,无论隧道工地有多偏僻,均可以通过互联网将数据传输给数据处理和分析部门,从而大大减少数据处理和分析技术部门的人员数量,提高监测反馈的速度和效率。

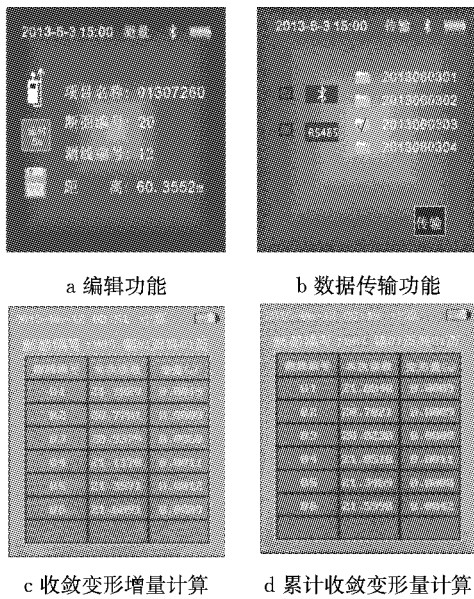


图 3 智能隧道激光收敛仪操作界面
Fig.3 Operation interface of smart tunnel laser convergence gauge

计算功能:调用该测线的前一次监测数据计算该测线的收敛变形增量,见图 3c,以及调用该测线的第一次监测数据(即初始读数)计算该测线的累计收敛变形量,见图 3d. 主机收敛量测的分辨率为 0.1 mm,即时的计算可了解监测结果的正确性,也可根据隧道收敛累计变形量和收敛变形增量来判断隧道的安全状况,以便及时采取对策.

1.3 后处理软件的开发

为了提高测量数据的处理效率,自动生成监测数据报表和时间-变形曲线,开发了后处理软件 TunnelDataMgr. 该软件具有“工程”、“数据”、“系统”和“帮助”4 个部分(见图 4).



图 4 TunnelDataMgr 软件界面
Fig.4 Software interface of TunnelDataMgr

“工程”功能用于设置工程基本信息,如项目名称、合同段、公路等级、施工单位、监理单位等.

“数据”功能用于测量数据的导入和处理. 导入的数据存储于电脑,后处理软件根据新导入的数据与原有数据计算收敛变形增量和累计收敛变形量,

生成周边收敛监测日报表和周边收敛阶段性报表,绘制周边收敛-时间变形曲线图(见图 5). 现阶段时常有监测部门和监测人员伪造和修改监测数据的行为发生,主机和后处理软件对监测数据设置了加密算法,原始数据仅能查看. 每个监测数据都标记有详细的编号、测量时间,使得伪造数据的时间大于实际的测量时间,避免数据造假.

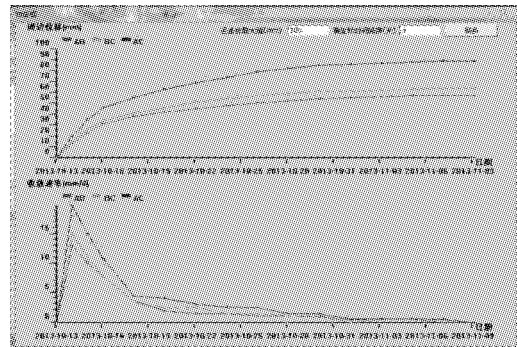


图 5 隧道周边收敛-时间曲线图
Fig.5 Deformation-time curve of tunnel convergence

“系统”功能用于设置监测数据的存储位置. “帮助”功能包含使用帮助文档等内容.

2 智能隧道激光收敛仪的精度分析

为了评估智能隧道激光收敛仪的测量精度,在华东国家计量测试中心进行了精度检测,在实验室内和青岛某洞库施工现场进行了隧道周边收敛监测重复性测量试验. 重复性测量误差可反映仪器系统误差,安装、对准误差,以及环境因素的影响,本文采用实际测量工作中常用的中误差作为评价标准.

2.1 主机精度检测

参考国家计量检定规程《手持式激光测距仪检定规程》(JJG 966—2010),在华东国家计量测试中心使用 100 m 的长度基线对主机的测距精度进行了检定,检定结果如表 1 所示.

表 1 主机测距精度检定结果

Tab.1 Accuracy verification result of main engine

序号	标准值/m	仪器示值/m	差值/mm	序号	标准值/m	仪器示值/m	差值/mm
1	2.999	2.998	-1	8	23.988	23.989	1
2	5.999	6.000	1	9	27.002	27.003	1
3	8.997	8.997	0	10	30.002	30.003	1
4	11.992	11.991	-1	11	32.993	32.992	-1
5	15.005	15.005	0	12	36.012	36.012	0
6	17.995	17.994	-1	13	38.997	38.995	-2
7	20.986	20.986	0	14	41.999	41.997	-2

表 1 的检定结果表明,在测距为 36 m 以内,激

光收敛仪与标准长度基线的差值不大于±1 mm,表明激光收敛仪的精度在 30 m 内可以达到±1 mm. 实际工程中的隧道开挖跨度极少大于 30 m,所以激光收敛仪可以满足隧道监测的精度要求.

2.2 室内重复测试试验

在实验室墙壁上安装膨胀螺丝,在另一墙壁上安装反光片,按照仪器安装、测量、拆卸再安装的过程进行重复测量.对距离为 6.3 m 和 12.2 m 的模拟断面分别进行了 22 次水平收敛重复测试试验,测量误差分布如图 6 所示.测试得到 6.3 m 和 12.2 m 测线的中误差分别为 0.45 mm 和 0.52 mm(见表 2),表明智能隧道激光收敛仪的测试精度达到±1 mm.

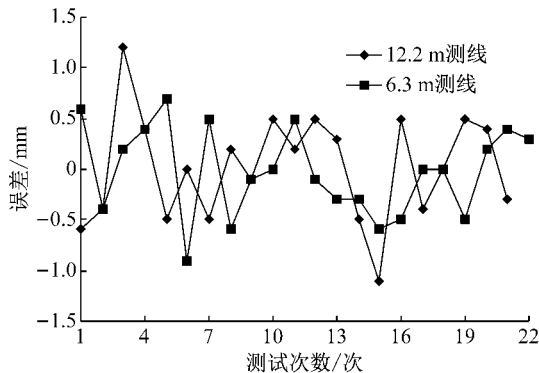


图 6 水平收敛室内重复测试试验误差分布

Fig.6 Error distribution of horizontal convergence in laboratory repeated test

表 2 水平收敛室内重复测试试验误差

Tab.2 Horizontal convergence error of laboratory repeated test

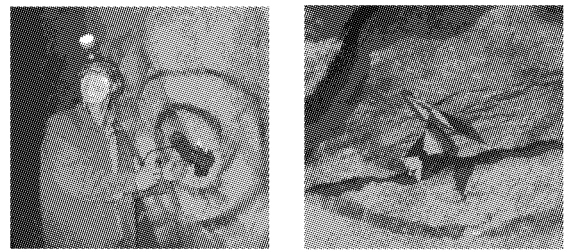
测线	均值/ m	次数/ 次	最大正 误差/mm	最大负 误差/mm	方差/ mm ²	中误差/ mm
测线 1	6.358 4	22	0.7	-0.9	0.20	0.45
测线 2	12.242 3	22	1.2	-1.1	0.27	0.52

2.3 隧道现场实测

周边收敛的现场实测在青岛某洞库进行.该洞库为变截面隧洞,岩性为粗粒花岗岩,呈中薄层状结构,为Ⅲ级围岩.分别对隧洞跨度约为 5.0 m 和 14.0 m,周边收敛变形稳定的断面进行了 50 次和 25 次重复测试.测试断面布设的 3 条测线如图 1 所示.

现场测试步骤如下:①用电锤在隧道拱顶及侧壁围岩上成孔,埋设膨胀螺栓;②将转换公头、反光片安装到膨胀螺栓上,反光片安装时调节合页的角度,以使激光束与反光片垂直;③测量时将对准调节装置底部的转换母头插入转换公头,锁死螺母,完成仪器安装;④打开激光,调节对准调节装置,使激光束对准反光片上的目标点,触发外接测量按钮完成

收敛测线的距离量测.现场测试照片如图 7 所示,重复性测试试验的误差分析见表 3.



a 现场实测照片 b 拱顶反光片

图 7 周边收敛现场测试照片

Fig.7 On-site convergence surveying

表 3 隧道现场重复测试试验周边收敛误差

Tab.3 Convergence error of tunnel on-site repeated test

断面	测线	次数/ 次	均值/ m	最大正误 差/mm	最大负误 差/mm	方差/ mm ²	中误 差/mm
断面 1	AB	50	4.008 0	1.1	-1.7	0.41	0.64
	AC	50	4.031 9	1.2	-0.9	0.30	0.50
	BC	50	5.182 9	1.1	-1.0	0.28	0.53
断面 2	AB	25	7.469 5	1.1	-1.1	0.33	0.57
	AC	25	10.286 4	1.2	-0.6	0.21	0.46
	BC	25	14.451 7	1.8	-1.1	0.46	0.68

表 3 数据表明,在测线长度为 5.0~14.0 m 时的中误差为 0.50~0.68 mm,满足《铁路隧道工程施工技术指南》(TZ 204—2008)规定的周边收敛监测精度为 0.5~1.0 mm 的要求^[17].

从表 2 和表 3 可以看出,隧道现场实测的中误差略大于室内测试.因为隧道现场的测试环境为智能隧道激光收敛仪的使用环境,包含了仪器误差、安装误差、环境因素影响等诸多因素,该误差为综合误差,更能表征智能隧道激光收敛仪的实用性能.

将隧道现场实测的 6 条测线共 225 次的误差作为样本总体,使用正态分布函数进行拟合,测量误差满足标准正态分布,误差频数分布和正态分布曲线如图 8 所示.统计结果表明,误差在(-1 mm, 1 mm)范围内的置信水平为 0.93.

2.4 误差成因分析

在实际的测量工作中不可避免地会产生测量误差,误差大小与测量者、测量仪器自身的精度、观测条件,以及一些不可预测条件密切相关.智能隧道激光收敛仪的误差主要来源是对准误差.

分析了激光束与反光片有不同夹角条件下,激光束的对准偏差对测量精度的影响,见表 4.表 4 列举了激光束与反光片的夹角分别为 90°,85°,80°,激光束对准目标点的偏差分别为 5,10,20 mm 时对测线长度的影响.

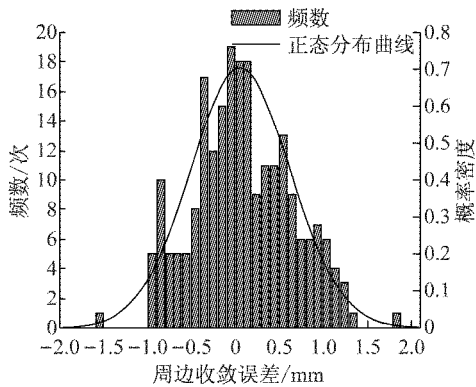


图 8 周边收敛误差频数分布和正态分布曲线

Fig. 8 Error frequency distribution and normal curve of convergence

表 4 激光束与反光片有不同夹角时对准偏差对测线长度的影响

Tab. 4 Alignment deviation influence on the length of the survey line in the condition of different angle between laser beam and reflector

激光束 与反光 片夹角/(°)	目标点 对准偏 差/mm	对不同测线长度的影响/mm				
		6.0 m	9.0 m	12.0 m	15.0 m	18.0 m
90	20	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01
	10	0.01	0.01	0	0	0
	5	0	0	0	0	0
85	20	1.71	1.72	1.73	1.73	1.73
	10	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87
	5	0.43	0.43	0.43	0.43	0.44
80	20	3.44	3.45	3.46	3.46	3.46
	10	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73
	5	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87

从表 4 得出,当激光束与反光片的夹角为 90° (垂直),目标点对准偏差为 20 mm 时,对准偏差对测线长度的影响仅为 0.03 mm.随着激光束与反光片的夹角减小,对准误差对测线长度的影响越来越大.当激光束与反光片的夹角为 80° ,目标点对准偏差为 5 mm 时,对准偏差对测线长度的影响已接近 1 mm.因此,在安装反光片时,需要调节反光片的角度以尽量保证激光束与反光片垂直.

智能隧道激光收敛仪的误差来源还有:①相位式激光测距传感器的光速传播误差、调制频率误差和相位测量误差;②通过转换接头安装智能隧道激光收敛仪时的安装误差;③隧道现场测量时的光线强度、粉尘浓度、空气湿度,反光片清洁度等环境因素引起的误差.

3 与全站仪的应用对比

3.1 精度对比

在敦格铁路当金山隧道,分别采用智能隧道激

光收敛仪和全站仪进行周边收敛监测.当金山隧道开挖断面尺寸约为 $6.0\text{ m} \times 6.5\text{ m}$,围岩级别为 IV 级.在新开挖的断面布设 3 条周边收敛测线 BC, AB, AC.对比监测仪器为徕卡 TS15 全站仪. TS15 全站仪采用双光源同轴测距系统,距离测程长,在恶劣的野外条件下仍能提供稳定可靠的测量结果.其角度测量精度为 $1''$, $0 \sim 500\text{ m}$ 无棱镜标准测量精度为 $2\text{ mm} + 2 \times 10^{-6} D$ (D 为测量距离, km).对比监测结果如表 5 所示, BC, AB, AC 测线的周边收敛-时间曲线对比见图 9.

表 5 智能隧道激光收敛仪与全站仪监测结果对比

Tab. 5 Comparative monitoring result of smart tunnel laser convergence gauge and total station

日期	监测结果/mm					
	测线 BC		测线 AB		测线 AC	
	收敛仪	全站仪	收敛仪	全站仪	收敛仪	全站仪
2014-09-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2014-09-03	1.4	10.0	1.1	7.5	-0.1	3.9
2014-09-05	2.9	10.8	1.9	5.2	0.8	4.5
2014-09-06	3.7	10.9	2.5	6.5	1.2	5.4
2014-09-07	4.8	19.2	2.9	10.8	2.1	5.2

图 9 表明,智能隧道激光收敛仪测量得到的周边收敛-时间曲线中,除测线 AC 在 2014 年 9 月 6 日出现 -1 mm 的波动外,其余的周边收敛监测结果无明显波动.因测线 AC 累计周边收敛很小,所以图 9c 中 AC 测线在 2014 年 9 月 6 日的波动是正常的.而全站仪测得的周边收敛-时间曲线波动较大,除了测线 AC 的测量结果比较稳定外,另两条测线 BC 和 AB 在 2014 年 9 月 3 日和 9 月 7 日都出现明显波动,可以推测是全站仪的人为测量误差所致.而在其他时间段,全站仪的测量结果波动也大于 1 mm,因此,智能隧道激光收敛仪的监测精度及稳定性都要优于徕卡 TS15 全站仪.

3.2 经济技术对比

针对智能隧道激光收敛仪、高精度全站仪和钢卷尺收敛计 3 种隧道周边收敛测量仪器,从经济、技术角度进行对比,具体的对比指标如表 6 所示.

从表 6 可以看出,智能隧道激光收敛仪相比于钢卷尺收敛仪具有监测效率高、数据处理反馈快、不影响隧道正常施工的优势;相比与全站仪具有监测精度高、成本低、操作要求的优势.

本文研制的智能隧道激光收敛仪在测线长度为 $5.0 \sim 14.0\text{ m}$ 时,精度达到 $0.50 \sim 0.68\text{ mm}$,实测数据表明,绝大多数隧道在开挖后的周边收敛变形都超过 10 mm,满足国际测量工作者联合会上建议的变形监测观测中误差小于允许变形值的 $1/20 \sim 1/10$

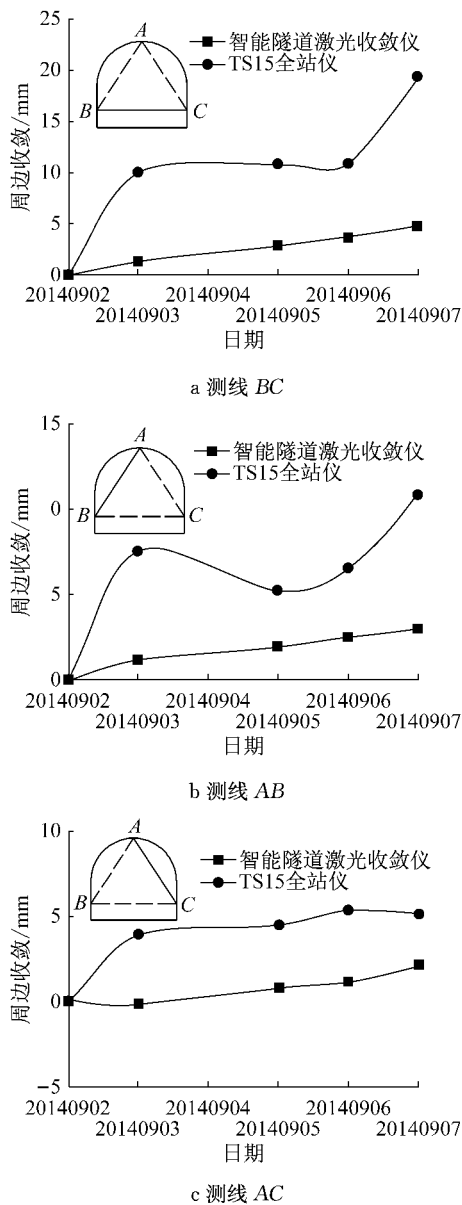


图 9 智能隧道激光收敛仪与全站仪监测结果对比

Fig.9 Comparative monitoring result of smart tunnel laser convergence gauge and total station

表 6 智能隧道激光收敛仪、全站仪、钢卷尺收敛计对比
Tab.6 Comparison of smart tunnel laser convergence gauge, total station, and steel tape convergence gauge

对比项目	智能隧道激光收敛仪	高精度全站仪	钢卷尺收敛计
操作难度	输入断面编号等基本操作,对准目标	专业测量人员	挂钩、拉紧卷尺、读数
实测精度	±0.68 mm	>±1 mm	±0.6 mm
测量速度	安装仪器、对准,速度较快	架站、整平、测量,速度稍慢	挂钩、拉紧、读数,速度较慢
施工干扰	无	车辆难以通行	车辆无法通行
操作人数	1人	2人	2人
数据传输及处理	RS485、蓝牙导入后处理软件自动处理	数据接口导出,人工处理数据	人工输入数据和处理数据
仪器价格	中	高(>10万元)	低(2千元)

的标准^[18],也满足《铁路隧道施工技术指南》(TZ 204—2008)规定的 0.5~1.0 mm 周边收敛监测精度要求。

智能隧道激光收敛仪相比全站仪和钢卷尺收敛计,具有以下优点:①监测精度高,测线长度为 5.0~14.0 m 时的精度达到 0.50~0.68 mm;②仅需 1 人操作,监测效率高,劳动强度降低;③安装、拆卸便捷,操作简单,监测时不影响隧道的正常施工;④设置外接触发按钮,避免直接按键抖动影响测量精度;⑤通过加密监测数据,防止数据造假;⑥可储存足够的监测数据,通过后处理软件自动生成报表,实现无纸化监测等。

4 结论

本文基于激光测距原理,研制了用于隧道周边收敛监测的智能隧道激光收敛仪。智能隧道激光收敛仪可简单便捷地安装、拆卸,以及精确对准监测点。通过室内试验、隧道现场实测验证,得到智能隧道激光收敛仪在测线长度为 5.0~14.0 m 时的精度达到 0.50~0.68 mm。与全站仪、钢卷尺收敛计的对比如表明,智能隧道激光收敛仪具有精度高、性能稳定、操作便捷、成本低廉、监测效率高、不影响隧道的正常施工、加密监测数据和后处理软件自动处理监测数据的优点。作为一种非接触式测量仪器,智能隧道激光收敛仪能够提高隧道周边收敛监测的监测效率,具有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路隧道施工技术规范: JTG F60—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Technical specifications for construction of highway tunnel: JTG F60—2009 [S]. Beijing: China Communications Press, 2009.

[2] 冯仲仁, 张兴才, 张世雄, 等. 大冶铁矿巷道变形监测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 483.
FENG Zhongren, ZHANG Xingcai, ZHANG Shixiong, et al. Monitoring study on drift deformation of Daye Iron Mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 483.

[3] 刘泉声, 时凯, 康永水, 等. 深井煤矿中央水泵房二次衬砌监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1596.
LIU Quansheng, SHI Kai, KANG Yongshui, et al. Monitoring analysis of secondary lining structure of central pump house in deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1596.

- [4] 鲁全胜,高谦. 金川二矿区采场巷道围岩与充填体收敛变形监测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增2): 2633.
LU Quansheng, GAO Qian. Monitoring research on convergence deformation of laneway way rock and obstructer in No. 2 digging of Jinchuan [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2633.
- [5] 谷志孟,白世伟,刘继光,等. WRM-4 型收敛计的研制与现场应用[J]. 岩土力学, 1987, 8(3): 57.
GU Zhimeng, BAI Shiwei, LIU Jiguang, *et al.* The development and its application in-situ of tape WRM-4 extensometer[J]. Rock and Soil Mechanics, 1987, 8(3): 57.
- [6] 谷志孟,幸志坚,梁愈明. WRM 型系列收敛计和钻孔多点位移计的研制与应用[J]. 岩土力学, 1992, 13(1): 86.
GU Zhimeng, XING Zhijian, LIANG Yuming. Development and application of model WRM-series of convergence gauges and borehole extensometers[J]. Rock and Soil Mechanics, 1992, 13(1): 86.
- [7] 舒本仁. 钢尺式收敛计的误差分析[J]. 岩土力学, 1986, 7(1): 67.
SHU Benren. Error analysis of the tape extensometer[J]. Rock and Soil Mechanics, 1986, 7(1): 67.
- [8] 马莉. 隧道净空收敛量测精度分析[J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(1): 31.
MA Li. Accuracy analysis of measuring construction gauge of tunnel[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1997, 7(1): 31.
- [9] 覃卫民,李祺,任伟中,等. 复杂结构形式隧道的围岩位移监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 549.
QIN Weimin, LI Qi, REN Weizhong, *et al.* Monitoring analysis of surrounding rock displacement of complex structure tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 549.
- [10] 黄茂华,谢义林. 隧道收敛测量方法研究[J]. 北京测绘, 2009, 25(4): 14.
HUANG Maohua, XIE Yilin. Research on measurement of tunnel convergence[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2009, 25(4): 14.
- [11] 刘绍堂. 隧道施工期间的变形监测技术[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(增2): 1346.
LIU Shaotang. Deformation measurement during the tunnel construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(S2): 1346.
- [12] 奚魏征. 全站仪在公路隧道变形量测中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
XI Weizheng. Study on application of total station in highway tunnel deformation measurement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [13] 肖国峰,杨俊波,陈从新. 一种激光收敛测量方法及其精度评估[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 896.
XIAO Guofeng, YANG Junbo, CHEN Congxin. A new method of laser convergence monitoring and its precision assessment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 896.
- [14] BASSET R H, KIMMANCE J P, RASMUSSEN C. An automated electrolevel deformation monitoring system for tunnels[J]. Geotechnical Engineering, 1999, 137(3): 117.
- [15] SATORU M, TAKUJI Y, MICHIO I, *et al.* Configuration and displacement measurement using vision metrology [C] // Proceedings of SPIE. [S. l.]: International Society for Rock Mechanics, 2003: 50-58.
- [16] 谢雄耀,卢晓智,田海洋,等. 基于地面三维激光扫描技术的隧道全断面变形测量方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2214.
XIE Xiongyao, LU Xiaozhi, TIAN Haiyang, *et al.* Development of a modeling method for monitoring tunnel deformation based on terrestrial 3D laser scanning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2214.
- [17] 中铁一局集团有限公司. 铁路隧道工程施工技术指南: TZ 204—2008[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
China Railway First Group Co Ltd. Technical guide for construction of railway tunnel engineering: TZ 204—2008[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009.
- [18] 谢刚生,熊助国,邹自力. 工程建筑物变形监测[M]. 抚州: 华东地质学院出版社, 2004.
XIE Gangsheng, XIONG Zhuguo, ZOU Zili. Engineering building deformation monitoring [M]. Fuzhou: East China College of Geology Press, 2004.