# 隧道工程自动化激光测量放样系统研发与应用

王 巍[1], 谢 爽[2], 刘宝许[3], 石新栋[2]

(1. 中国交通建设股份有限公司广州市轨道交通十二号线总承包项目经理部, 广东 广州 510330;
2. 苏州北璇履方工程科技有限公司, 江苏 苏州 215153; 3. 中国交通建设股份有限公司哈尔滨地铁投资建设有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150070)

**摘要**: 针对隧道工程钻爆法开挖过程中钻爆设计图形放样、初期支护拱架安装定位精确度不高的问题,通过分析国内外隧道工程开挖与初期支护采用的测量放样技术,提出基于激光的全自动测量放样技术方案,并研发了配套设备。工程试验结果表明,该技术及配套设备,具有安装使用简单、运行安全可靠、定位精准等特点,能够发挥隧道开挖及初期支护全自动化快速施工测量放样的技术优势。

**关键词**: 隧道工程; 测量放样; 激光; 自动化; 北斗激光图像定位仪

**DOI**: 10.3973/j.issn.2096-4498.2019.07.015 **文章编号**: 2096-4498(2019)07-1175-05

**中图分类号**: U 45 **文献标志码**: A **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

扫二维码听语音
与作者在线交流

# Development and Application of Automatic Laser Measuring and Lofting System for Tunnel Engineering

WANG Wei[1], XIE Shuang[2], LIU Baoxu[3], SHI Xindong[2]

(1. *CCCC EPC Project Manager Department of Guangzhou Metro Line* 12, *Guangzhou* 510330, *Guangdong*, *China*; 2. *Suzhou BXLF Engineering & Technology Co., Ltd.*, *Suzhou* 215153, *Jiangsu*, *China*; 3. *CCCC Harbin Investment and Construction of Metro Co., Ltd.*, *Harbin* 150070, *Heilongjiang*, *China*)

**Abstract**: During tunnel excavation with drilling and blasting method, drilling and blasting design lofting and primary support arch installation are often not accurate enough. Hence, measuring and lofting technology used in tunnel excavation and primary support in China and abroad is analyzed, a scheme of fully automatic measuring and lofting technology based on laser is put forward and some matching equipment are developed. The engineering test shows that the measuring and lofting technology and its matching equipment are characterized by simple installation, reliable and safe operation, precise positioning, etc., which can help realize the rapid and automatic measuring and lofting of tunnel excavation and primary support.

**Keywords**: tunnel engineering; measuring and lofting; laser; automation; Big Dipper laser image locator

## 0 引言

目前,我国岩质隧道工程开挖方法基本采用 TBM 法和钻爆法,由于 TBM 装备比较昂贵,操作技术比较复杂,适用条件有限,仍未被广泛采用[1-4]。我国的隧道工程钻爆法施工技术经历了钢钎打孔—风钻钻孔—凿岩台车钻孔跨越式的技术进步,取得了显著的技术成果,隧道爆破安全状况有了较大的改善。由于钻爆法相关配套技术的进步和其较高的经济性价比,可以预见钻爆法在未来一段时期内,仍将占据隧道工程开挖的主导地位[5-7]。爆破设计是钻爆法隧道开挖的关键技术,钻孔位置(周边眼、掏槽眼、其他掘进孔位置)、钻孔深度、钻孔间距和平行度精度要求是钻爆法爆破设计的关键参数,尤其是炮孔孔位必须精准定位才能达到爆破设计的效果。实践中,钻爆法的爆破设计孔位在掌子面上的定位以及初期支护时格栅钢架的定位,多数还是采用"全站仪+人工打点"的方式,这种方式动用人工多、效率低下且孔位精准度不易控制,同时也存在高空坠落、物体打击等安全隐患[8-10]。

**收稿日期**: 2019-01-08; **修回日期**: 2019-06-17

**第一作者简介**: 王巍(1970—),男,黑龙江鹤岗人,2011 年毕业于西安科技大学,建筑与土木工程领域专业,硕士,高级工程师,现从事隧道与地下轨道交通工程技术质量管理、科研及项目管理等工作。E-mail: 295908553@qq.com。

随着我国安全、环保、快速、机械化的隧道建设理念日渐深入人心,劳动力成本日益增长,这对隧道工程建设的机械化、自动化提出了更高的要求[11-12]。国内外隧道工程实际应用中,关于炮孔定位以及格栅拱架安装自动化激光定位方面的文献报道并不多。国际上,20世纪80—90年代美国和中国台湾的工程技术人员研发了利用激光发射装置定位隧道爆破孔位的设备,但这些设备由于存在以下几个方面的缺陷并未被广泛应用:1)采用“氦氖(气体)激光器”生成激光图形,但“氦氖(气体)激光器”长期使用容易漏气,使用寿命较短,尤其是在有较大振动、冲击波的环境中使用,缺点尤为突出。2)“氦氖(气体)激光器”需要较高的稳频条件,较大功率的成本很高(经在有雾霾、烟尘较大的隧道中实际验证得知,要满足现场仪器距掌子面距离大于50 m的环境使用,激光功率至少要500 mW)。3)不具有自动测距功能。图形上任意1点$X$、$Y$坐标值的确定取决于$\alpha$角($X$轴摆角)、$\beta$角($Y$轴摆角)和仪器到隧道掌子面的距离$d$,而他们采用的扫描头、控制驱动装置只能获取$\alpha$角、$\beta$角,不能自动获取仪器到隧道掌子面的距离$d$(还需人工测量补充),属于一种半自动化产品,效率较低。4)仪器安装在三脚架上,放置在隧道路面中间,与施工作业人员、机械、车辆等相互影响,效率较低,且作业距离较短,存在很大的安全隐患。5)只能实现爆破孔位图放样,不能投射格栅拱架图形,功能单一。

国内方面,广西大学罗俊教授、武汉理工大学赵利坤教授联合开发了一种半自动化的激光投射装置[13],但同样也不具有自动获取仪器到隧道掌子面距离$d$和指导格栅拱架安装等功能,每爆破循环施工后还需要人工测量并输入下一循环掌子面需要的爆破设计参数图形,占用了工序时间,效率不高,同时该设备放在地面上,存在一定的安全隐患。中交路桥孔庆波等[14]利用激光导向仪代替全站仪进行隧道开挖和初期支护放样等工作,以单束激光线为基准,根据穿线放样测量原理,确定沿隧道纵向的中线断面,在断面上选取1个点作为控制点控制隧道测量施工。这种方法只是粗略地指引隧道开挖和初期支护,还需要人工采用尺量的方式确定爆破孔位位置,效率较低且精准性不易控制。

鉴于目前国内外激光放样技术发展现状,苏州北璇履方工程科技公司采用泵浦YAG(固体)激光器作为发射源,通过远程投射方法实现隧道开挖过程中钻孔爆破图形自动放样以及初期支护时为格栅拱架安装提供准确的边线轮廓位置,提出了一种快速、准确、安全、低成本的测量放样技术方案,并研发了第1代隧道开挖与支护全自动化激光测量放样设备及配套软件系统(北斗激光图像定位仪 Big Dipper laser image locator, 缩写为BLIL)。

## 1 全自动测量放样系统研发

### 1.1 研发思路与技术方案

针对当前工程建设领域隧道、巷道围岩开挖钻爆设计炮孔定位以及初期支护时格栅钢架的定位不准确、效率低以及不安全的问题,提供了一种定位准确快速、使用安全的远程投射式技术方案及其配套设备。

#### 1.1.1 技术方案

1)该设备可用于直线、曲线及各种形状隧道施工。1次安装直线段可使用150 m,曲线段也可使用70(曲率半径2 000 m)~100 m。在施工前,可一次性将设计图中各个断面的桩号和断面数据输入,系统会自动完整地描述整条隧道形状,只要输入桩号就会显示出该断面的标准图形。也可在钻孔作业前,打开设备,无需人工测量放点,BLIL就会按自身测距激光数据将该断面钻孔布置图投射至掌子面上,在掌子面不断向前延伸的基础上,系统按测距数据自动分析计算投射出标准断面图(与里程桩号相匹配)。

2)该设备不超过12 kg,便于携带。距掌子面一定距离(初次安装可设在100 m左右),借助全站仪将机箱牢固固定在隧道顶板中线位置上(设有智能调整平台,安装时间不超过1 h;设计有防护钢板,防止飞石破坏仪器),指令发送可在安全距离之外通过移动终端或电脑操作。

3)该设备尽量安装在隧道中心线竖直方向上,在不影响机器设备运行的情况下尽量靠近隧道顶部,一般距离小于900 mm。

4) 安置好设备后,通过水平气泡整平对中,并打开设备震镜激光及测距激光,通过全站仪测定仪器靶标中心三维坐标及工作面震镜激光点位置三维坐标,仪器震镜照射在工作面的激光点也要在中心竖直方向上,尽量使得激光点及仪器中心点在同一高程上。该过程需要设备和全站仪配合工作,以使设备竖轴垂直、水平轴水平,设备中心、激光点在中心线上,水平方向实际偏差≤5 mm即可。通过全站仪测量,得到激光光路坡度、方位角,有了激光点三维坐标还可以算出和中心线的交点切线方位角及里程桩号,进而得到对应的断面轮廓。

5)钻孔工作人员按投射在隧道掌子面上的钻爆设计图,直接按光点位置进行钻孔作业,能够保证隧道(巷道)轮廓及爆破设计方案的精准执行(150 m距离误差小于2 cm)。

6)初期支护时,无需人工测量定位,BLIL按照位置测距指令自动投射指导拱架施工的激光光环(自动识别该处里程所对应的设计图纸),指导作业人员准

确地安装格栅拱架。

1.1.2　技术原理

北斗激光图像定位仪由激光定向仪硬件和软件系统组成,采用激光发生器振镜原理并结合激光测距功能,可在隧道施工作业面上,按设计断面尺寸智能投射开挖进尺的断面或轮廓线。该设备是一种用智能化人机交互方式实现远距离激光投射钻爆设计图像、进行隧道掘进初期支护定位的系统。首先,通过专用软件,将设计图纸数据转化为 BLIL 可识别的扫描图形,实现设计图形尺寸的自动跟随(与掌子面桩号相匹配);其次,进行激光图形扫描达到投射图像与设计图纸图形相同的目的,指导施工。技术原理示意图见图 1。

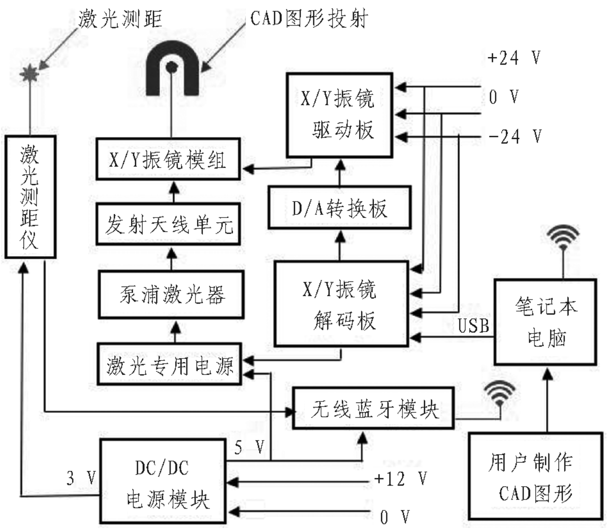


**图 1　技术原理图**

Fig. 1　Sketch of technical principle

1)通过终端系统,无线蓝牙模块向 BLIL 发送指令,BLIL 自动获取当前位置与掌子面目标之间的距离 $d$,通过无线蓝牙模块反馈给计算机,计算机经过处理确定合适的扫描振镜的角度 $\theta$。

2)根据激光断面仪与掌子面目标之间的距离 $d$ 与扫描振镜的角度 $\theta$ 确定所需图形,并在电脑中转换,生成振镜系统可辨析的扫描图形。

3)将 2)生成的扫描图形通过无线蓝牙模块回馈给 X/Y 振镜解码板,控制泵浦激光器系统,并经过 D/A 转换板、X/Y 振镜驱动板、激光发射天线单元、振镜系统单元处理,将处理后的扫描图形在掌子面上投射出激光点(轮廓带)。

4)扫描振镜的角度 $\theta$ 随着距离的变化而发生变化,以保持激光断面仪投射方向与事先设定方向一致,并且使振镜在不同距离下投射图形尺寸大小相同,即投射图形的半径 $H=d\tan\theta$($d$ 为激光断面仪到断面的水平距离,$\theta$ 为激光断面仪投射光束的张角)。

1.1.3　BLIL 系统组成

BLIL 系统,见图 2,包括硬件系统和软件系统 2 个部分。

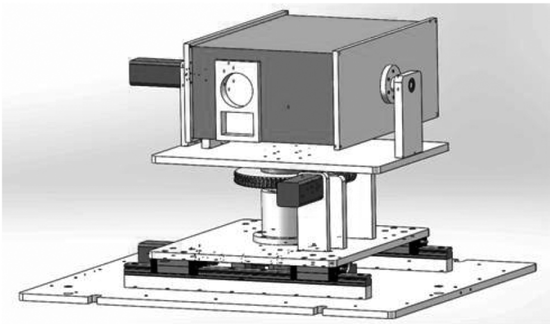

**图 2　BLIL 系统示意图**

Fig. 2　Sketch of BLIL system

1.1.3.1　硬件系统

硬件系统包括机箱、定位调试系统、激光发射部分、振镜系统、电源部分、激光自定位系统及专用软件,激光发射部分、振镜系统及电源部分都设置在机箱内。激光发射部分包括无线蓝牙模块、激光测距仪、控制泵浦激光器系统、激光发射天线单元以及激光专用电源;振镜系统包括 X/Y 振镜解码板、D/A 转换板、X/Y 振镜驱动板;电源部分包括 DC/DC 电源模块和开关电源模块。机箱设置有箱盖、连接块、定位卡紧件、安装板、空心轴、契销;其中,箱盖连接块连接定位卡紧件,定位卡紧件通过组合螺母连接安装板,安装板连接空心轴,空心轴通过双头螺栓连接契销及契型胀销固定。

1.1.3.2　软件系统

专门开发的软件系统可根据录入的设计资料实时分析计算断面轮廓、隧道走向和坡向数据,控制仪器在隧道工作面投射断面图指导施工。软件操作界面简洁,对计算机要求不高,操作简便,如图 3 所示。

## 2　BLIL 系统现场试验

为了掌握 BLIL 在隧道开挖及初期支护测量放样过程的实际性能,BLIL 系统样机研发完成后,分别在北京至沈阳铁路客运专线 J-1 标三棱山隧道、哈尔滨至牡丹江铁路客运专线站前工程 SG-6 标红旗沟隧道、新建衢州至宁德铁路 QNZJZQ-3 标黄坞隧道进行了 3 次设备定型试验(见图 4),测试该系统的基本功能(见图 5),先后检验了 BLIL 系统在真实环境下的应用效果。

### 2.1　BLIL 系统功能

现场操作表明,该系统安装简单、快捷、易操作,能显著提高拱架的安装速度,提高施工的科技含量,使用中每个循环可以节省 1 个多 h,同时可以提高布眼的准确率,大量减少由于超挖带来的混凝土用量,现场作业工人及管理人员对设备的自动化、精准性及高效性

等给予高度肯定。


(a) 基础管理和分析界面


(b) 应用终端界面

**图 3 软件运行平台界面**

Fig. 3 Interface of software operating platform

(a)

(b)

**图 4 设备现场调试**

Fig. 4 Equipment field debugging

通过现场实际验证,BLIL 系统能够实现以下基本功能:

1)激光自动测距。将所测的距离参数 $d$ 输入电脑能够自动匹配当前掌子面所对应的钻爆设计图形,实现图形自动跟随功能,使投射到掌子面的激光图形与该里程桩号爆破设计图纸保持一致。

(a) 格栅光带投射

(b) 爆破孔位投射

**图 5 现场格栅光带和爆破孔位投射图**

Fig. 5 Diagrams of light strip and blasting hole

2)由 X/Y 扫描振镜、X/Y 马达、X/Y 微型测角原件、X/Y 控制电路及 X/Y 振镜解码器板组成的智能化 X/Y 振镜系统,可以自动且精确地获取掌子面上任意 1 点 $X$ 和 $Y$ 方向的转角($\alpha$、$\beta$ 角)。

3)X/Y 驱动马达与控制电路之间设有绝对式微测角编码器,可以对马达的转角进行精准地测量和控制,即能够对马达连接的振镜的摆动角度进行精准测量与控制。

4)系统设置的 2 个附加半导体激光器,可以监控爆破作业后机箱的移动情况,如有移动,可重新对挂在洞顶的仪器进行调整,能起到保证监测可靠的作用。

5)当 CAD 原始图参数通过电脑输入主机后,电脑部分可整体移到隧道之外,仪器的工作指令可通过手机、PAD 等移动端进行远程无线操控。

## 2.2 BLIL 系统不足

通过试验,也发现 BLIL 系统还有需进一步深入研究和改进的地方:

1)可增加隧道断面仪的功能,用于隧道初期支护前超欠挖统计以及初期支护后、二次衬砌后的断面检查。

2)软件系统的稳定性方面还需改善和提高。

3)主机质量 12 kg 对于大断面隧道而言,安装仍然不易,设备在轻量化、小型化方面还需进一步优化。

## 3　结论与体会

通过全自动隧道激光测量放样系统的研发和实践,突破了无法自动获取仪器到掌子面距离、爆破图形自动跟随、无线数据传输及指令下达等核心技术融合难题,很好地实现了隧道工程开挖及支护过程中测量放样自动、高效、精准的目的,为实现隧道施工机械化、自动化提供了一种可行的技术方案。

1)BLIL 系统能够显著提高爆破作业钻孔精准度和快速定位初期支护格栅拱架安装位置,提高了工作效率,且保证了作业人员的安全。

2)设备集成度高,安装调试便捷,能耗低,数据传输、指令下达均可远程操作,隧道后续施工中交叉干扰可忽略不计。

3)国内外同类产品和技术方案存在着一些没有解决的问题,因而使得激光测量放样技术及配套设备一直未能广泛推广应用。本文阐述的自动化激光测量放样系统,是针对目前国内外同类产品存在的不足进行的自主创新,是为推进我国隧道施工技术进步作出的努力和尝试。

随着 BLIL 系统的进一步完善,后续将增加隧道断面扫描功能,进一步轻量化、小型化主机,降低安装难度,升级软件系统,保证 BLIL 系统运行的可靠性和稳定性。

**参考文献(References):**

[1]　赵录学. 城市轨道交通工程 TBM 选型分析研究[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(2): 7.
ZHAO Luxue. Analysis of TBM selection for an urban rail transit project[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(2): 7.

[2]　靳留杰, 张娜, 杨晨. TBM 及施工技术在中国的发展与趋势[J]. 隧道建设, 2016, 36(3): 331.
JING Liujie, ZHANG Na, YANG Chen. Development of TBM and its construction technologies in China[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(3): 331.

[3]　宋天田, 薛继洪. TBM 与常规法隧道施工方案选择系统[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2006, 25(增刊 1): 19.
SONG Tiantian, XUE Jihong. Decision-making system between TBM and traditional method for tunnel construction [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2006, 25(S1): 19.

[4]　LIU Quansheng, HUANG Xing, GONG Qiuming, et al. Application and development of hard rock TBM and its prospect in China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 57: 33.

[5]　梁晋平. 钻爆法与 TBM 法施工技术经济比较[J]. 建筑机械, 2003(2): 25.
LIANG Jinping. Technology economy comparison between TBM method and drilling explosion method[J]. Construction Machinery, 2003(2): 25.

[6]　吉锋, 张骞棋, 李鸿鸣, 等. 钻爆法和 TBM 两种不同施工方法下深埋高外水压力隧洞的破坏特点及其力学机制分析[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(5): 138.
JI Feng, ZHANG Qianqi, Li Hongming, et al. Failure characteristics and mechanical mechanism of deeply-buried tunnels with high external water pressure for dirll & blast and TBM methods[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(5): 138.

[7]　JI Feng, LU Junfu, SHI Yi. Predication model of rock mass quality classification based on TBM boring parameters[J]. Dister Advances, 2013, 6(2): 265.

[8]　梁治安. 岩体爆破影响区的声波测试[J]. 岩土力学, 1992, 13(4): 73.
LIANG Zhi'an. Acoustic detecting of blast affecting areas in rockmass[J]. Rock and Soil Mechanics, 1992, 13(4): 73.

[9]　钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945.
QIAN Qihu. Challenges faced by underground projects construction safety and constructions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2012, 31(10): 1945.

[10]　钱七虎, 戎晓力. 中国地下工程安全风险管理的现状、问题及相关建议[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 649.
QIAN Qihu, RONG Xiaoli. State, issues and relevant recommendations for security risk management of China's underground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 649.

[11]　马辉, 刘仁智, 陈寿根, 等. 当前铁路隧道施工亟待解决的若干技术问题[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(5): 1.
MA Hui, LIU Renzhi, CHEN Shougen, et al. Technique problems need to be solved urgently in current railway tunnel construction [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(5): 1.

[12]　郭陕云. 隧道掘进钻爆法施工技术的进步和发展[J]. 铁道工程学报, 2007(9): 67.
GUO Shanyun. Progresses and developments of tunnel construction technology with bored blast method [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(9): 67.

[13]　罗俊, 赵利坤, 程贵海, 等. AUTOCAD 及激光器在隧道爆破掘进中的应用研究[J]. 路基工程, 2012(2): 148.
LUO Jun, ZHAO Likun, CHENG Guihai, et al. Research on application of AUTOCAD and laser in blasting tunneling [J]. Subgrade Engineering , 2012(2): 148.

[14]　孔庆波, 李霞, 于洋. 某隧道激光导向仪在隧道施工中的应用[J]. 科技资讯, 2011(33): 26.
KONG Qingbo, LI Xia, YU Yang. Application of laser guidance instrument in tunnel construction[J]. Science & Technology Information, 2011(33): 26.