引文格式：史汉斌, 黄基峻, 孙文婷. 基于双棱镜的矩形顶管自动引导测量系统研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(8): 68-71. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2023.08.017

基于双棱镜的矩形顶管自动引导测量系统研究

史汉斌[1]，黄基峻[2]，孙文婷[1*]
（1. 广东省国土资源测绘院，广东 广州 510000；2. 广西机电工业学校，广西 南宁 530000）

摘　要：矩形顶管机头姿态测量参数众多，人工测量效率较低，严重影响了顶进施工进度。为实现矩形顶管机头姿态及轴线偏差的快速准确测量，提出一种基于电控双棱镜的矩形顶管机头姿态自动测量系统，利用双棱镜测量数据分别求解不同安装环境下的矩形顶管机头中心的平面、高程坐标，以及机头滚动角，并分别阐述了自动引导测量系统的顶进里程、轴线偏差、机头侧向翻转及俯仰偏差的解析原理，从而获取最为接近真值的机构姿态变化数据；并利用某地铁车站地下通道项目对该系统的可靠性进行分析验证。结果表明：自动引导测量系统与人工校核成果最大偏差为平面0.84 cm、高程1.22 cm，基本一致，满足顶管施工轴线控制及纠偏要求；顶管工程贯通误差为平面2.25 cm、高程4.38 cm，满足顶管工程贯通限差要求。因此，基于电控双棱镜的矩形顶管自动引导测量系统能够较为准确地获取机头姿态及轴线偏差数据，具有较强的可靠性和适用性，为矩形顶管机头姿态信息的自动化测量提供了新的方向。

关键词：矩形顶管；电控双棱镜；轴线偏差；机头姿态
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）08-0068-04

Research on Automatic Guidance Measurement System of Rectangular Pipe Jacking Based on Biprism

SHI Hanbin[1], HUANG Jijun[2], SUN Wenting[1]
(1. Guangdong Institute of Land and Resources Surveying and Mapping, Guangzhou 510000, China;
2. Guangxi Mechanical and Electrical Engineering School, Nanning 530000, China)

Abstract: Due to various attitude measurement parameters of the rectangular pipe jacking machine head and low efficiency of the manual measurement, the construction progress of jacking thus seriously impeded. In order to realize the fast and accurate measurement of attitude and axis deviation of rectangular pipe jacking head, we proposed an automatic measurement system for the attitude of the rectangular pipe jacking head based on the electronically controlled biprism. In addition, we analyzed the plane and elevation coordinates of nose and roll anglecenter, and expounded the analytical principles of jacking distance, axis deviation, nose lateral rollover and pitch deviation of automatic guidance measurement system respectively, so as to obtain the closest true value. And we analyzed and verified the reliability of system by using a subway station underground passage project. The results show that the maximum deviation between the automatic guidance measurement system and the manual calibration results is 0.84 cm in plane and 1.22 cm in elevation, which are basically consistent, and meets the requirements of axis control and deviation correction in the pipe jacking construction. The penetration error of pipe jacking project is 2.25 cm in plane and 5.38 cm in elevation, which meets the penetration tolerance requirements of pipe jacking project. Therefore, the rectangular pipe jacking automatic guidance measurement system based on the electronically controlled biprism can accurately obtain the nose attitude and axis deviation data with its strong reliability and applicability, which can providea new direction for the automatic measurement of rectangular pipe jacking nose attitude information.

Key words: rectangular pipe jacking, electronically controlled biprism, axis deviation, nose attitude

顶管法施工作为近年来大力发展的地下工程非开挖施工工艺，越来越受到广大城市建设者的关注[1]。相较于圆形顶管而言，矩形顶管对于地下空间的利用率更高、适用性更强，因此包括地铁、地下通道等在内的地下矩形设施逐渐开始采用矩形顶管机来进行地下空间建设。顶管施工过程中需对顶管机机头的实时位置进行准确控制[2]，以防出现偏离设计轴线现象。矩形顶管除顶进轴线偏差外，还需要关注顶进过程中的机头和管节滚动旋转问题[3-4]，防止后续管节无法拼接或拼接不严密，影响地下空间的正常使用。常规矩

收稿日期：2022-05-16；修回日期：2022-08-05。
项目来源：广西职业教育智慧国土专业群发展研究基地项目（桂职教成〔2018〕37号）。
第一作者简介：史汉斌（1993—），工程师，研究方向为工程测量、地理信息等领域，E-mail：shihanbin1993@21cn.com。
通信作者：孙文婷（1993—），工程师，研究方向为工程测量、地理信息等领域，E-mail：shihanbin1993@21cn.com。

形顶管机头姿态测量多采用人工测量方式，效率较低，严重影响顶进施工进度[5]，故矩形顶管机头姿态全方位自动化测量系统的研究尤为重要。

本次研究基于测量机器人的自动搜索照准功能，从矩形顶管机头姿态测量原理出发，设计电控双棱镜测量模式，并搭配高精度双轴倾角计，既解决了全站仪小视场问题，又可以实现矩形顶管机头姿态全方位动态信息采集，为矩形顶管机头姿态的自动化测量提供了新的思路。

1　自动引导测量系统

1.1　系统简介

矩形顶管自动引导测量系统采用测量机器人非接触量测方法进行自动化测量[5]，将测量机器人固定安装在始发井中的强制对中台上，利用极坐标、三角高程法进行测量机头棱镜点的三维坐标信息。首次测量前应进行一次学习测量，测量时采用双盘位消除轴误差，多测回测量提高测量精度，采用电控开关棱镜消除小视场的影响。自动引导测量系统拓扑关系如图1所示。

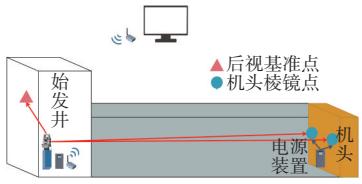


图1　自动引导测量系统拓扑图

1.2　测量要素

与圆形顶管相比，矩形顶管机头姿态测量要素相对较多[6]，不仅要对顶进轴线的偏差进行实时测量，还需要测量矩形顶管的水平旋转、侧向滚动等，以便及时进行纠偏[7-8]。其测量要素主要可分为以下几个部分：①机头中与设计轴线的水平与竖直方向偏差；②顶管机头左右偏转与倾斜；③顶管机头俯仰姿态。

2　顶管机机头姿态测量原理

顶管自动引导测量系统原理与人工测量相似，均是采用工程测量中支导线法测量原理[9]。测量机器人通过对机头双棱镜进行测量，得到机头中心两侧2个固定点的三维坐标，然后可以推算出机头中心点的三维坐标信息，与该点设计轴线里程的位置信息进行比对，即可得出该点的中心轴线偏差。

2.1　理想安装条件

棱镜A、B安装在顶管机机头盾首中心点Q左右两侧相同距离 l 处，如图4所示，棱镜A、B坐标可由全站仪测得，所以Q点的三维坐标计算过程如式（1）所示。

$$\begin{cases} \mathrm{XP}=1/2(\mathrm{XA}+\mathrm{XB}) \\ \mathrm{YP}=1/2(\mathrm{YA}+\mathrm{YB}) \\ \mathrm{ZP}=1/2(\mathrm{ZA}+\mathrm{ZB}) \end{cases} \tag{1}$$

当顶管机机头盾首发生滚动时，可由棱镜A、B的高差变化计算滚动角偏差 θ，滚动角 θ 计算公式如式（2）所示。

$$\theta=\arcsin\frac{\mathrm{ZA}-\mathrm{ZB}}{2l} \tag{2}$$

2.2　实际安装条件

在实际安装过程中，很难保证棱镜A、B连线的中点恰好是机头盾首中心，通常情况下为追寻最佳通视条件，棱镜A、B需安装在矩形顶管机头上部位置，如图2所示。

图2中，Q为矩形顶管机头中心点；l_1、l_2 分别为棱镜A、B到盾首中心的水平距离；h_1、h_2 分别为A、B到盾首中心的垂直距离；h 为AB连线上一点P到机头中心Q的垂直距离。

2.2.1　机头中心平面归算

首先将直线AB投影到XOY平面上，即不考虑棱镜A、B与盾首中心Q的垂直偏差，假设Y轴为顶管机顶进方向，如图3所示。

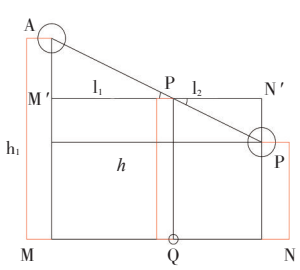


图2　实际工况下双棱镜安装示意图

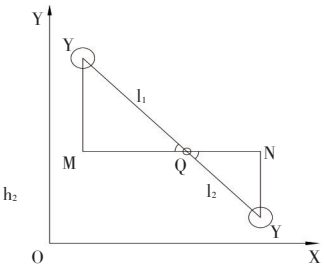


图3　矩形顶管机头平面投影

假设棱镜A和B的实测坐标分别为 (x_a,y_a,z_a)、(x_b,y_b,z_b)，依据内插原理可得：

$$\frac{l_1}{l_2}=\frac{x_q-x_a}{x_b-x_q}=\frac{y_a-y_q}{y_q-y_b} \tag{3}$$

因此，Q的平面坐标 (x_q,y_q) 为：

$$\begin{aligned} x_q&=\frac{l_1x_b+l_2x_a}{l_1+l_2} \\ y_q&=\frac{l_1y_b+l_2y_a}{l_1+l_2} \end{aligned} \tag{4}$$

2.2.2　机头中心高程归算

棱镜A、B与顶管机机头中心Q的垂直偏差分别为 h_1、h_2，h 为AB连线上一点P到盾首中心Q的垂直距离，h' 为P与盾首中心Q的高差，θ 为滚动角，假设Y轴为顶进方向，则有：

$$\frac{l_1}{l_2}=\frac{h_1-h}{h-h_2} \tag{5}$$

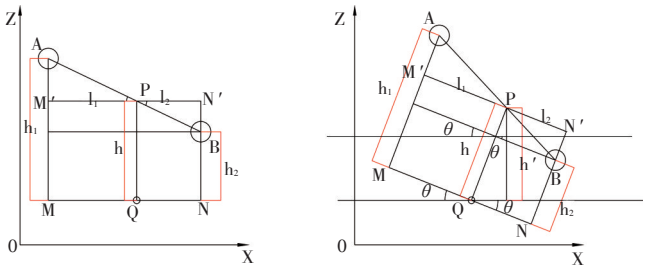


图4　矩形顶管机头高程归算示意图

由于顶管机机头可能会发生滚动偏差，导致点P与点Q的垂直距离 h 并不是两点之间的高差，如图5所示，则实际高差为 $h'=h\cos\theta$，依据内插原理可得高程和平面坐标的关系，如式（6）所示。

$$\frac{x_p-x_a}{x_b-x_p}=\frac{z_a-z_p}{z_p-z_b}=\frac{|\mathrm{PA}|}{|\mathrm{BP}|}=\frac{l_1}{l_2} \tag{6}$$

因此，利用机头双棱镜获取的机头中心点高程为：

$$z_q=z_p-h'=\frac{l_1z_b+l_2z_a}{l_1+l_2}-\frac{l_1h_2+l_2h_1}{l_1+l_2}\cos\theta \tag{7}$$

2.2.3　机头滚动角归算

初始状态下，由于棱镜A、B安装时会有一定的高差，在进行滚动角偏差计算时，需要进行修正。初始绝对滚动角为 $\theta_0=\arctan\frac{h_1-h_2}{l_1+l_2}$，当顶管机机头发生滚动时，实时绝对滚动角为 $\theta_1=\arctan\frac{z_a-z_b}{\sqrt{(x_b-x_a)^2+(y_b-y_a)^2}}$，则顶管机机头滚动角的偏差值为 $\theta=\theta_1-\theta_0$。

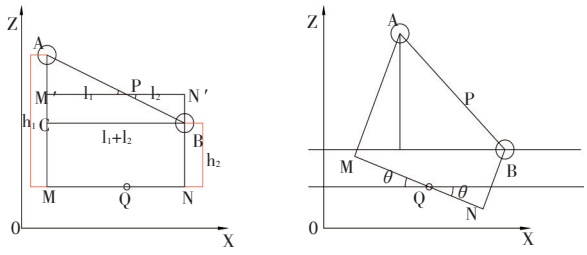


图5　矩形顶管机头滚动示意图

综上所述，由棱镜A、B的实测三维坐标 $(x_a,y_a,z_a),(x_b,y_b,z_b)$，以及棱镜A、B初始状态下到顶管机头中心Q的水平距离 l_1、l_2 与垂直距离 h_1、h_2 可求得顶管机机头盾首中心点 $\mathrm{Q}(x_q,y_q,z_q)$ 及盾首滚动角偏差 θ，如式（8）所示。

$$x_q=\frac{l_1x_b+l_2x_a}{l_1+l_2}$$

$$y_q=\frac{l_1y_b+l_2y_a}{l_1+l_2}$$

$$zq=\frac{(l_1zb+l_2za)-(l_1h_2+l_2h_1)\cos\theta}{l_1+l_2}$$

$$\theta=\arctan\frac{za-zb}{\sqrt{(xb-xa)^2+(yb-ya)^2}}-\arctan\frac{h_1-h_2}{l_1+l_2} \tag{8}$$

3　顶管机顶进偏差测量

顶管机机头盾首中心点Q为盾首的实时位置坐标，将其与设计轴线同一里程的三维坐标进行对比，即可得出顶管机机头盾首的实时顶进偏差。

3.1　顶进里程

1）直线段。直线段顶管顶进里程可由机头中心点 $\mathrm{Q}(x_q,y_q)$ 与顶管机机头进洞起点O始 (x_o,y_o)（即轴线起点）以及直线段终点O终 (x_1,y_1) 进行计算，计算逻辑为：已知O始Q和O始O终的方位角和SQO始，则可求出∠QO始O终，利用三角函数可求得Q在直线段设计轴线的投影 Q' 到轴线起点O始的距离，即为直线段实时顶进里程，如图6左幅所示。

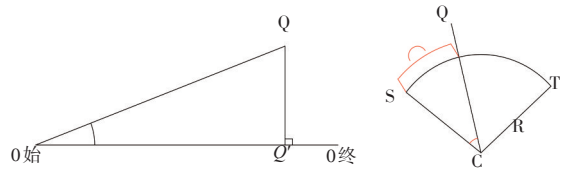


图6　直线段（左）和圆曲线段（右）顶进里程示意图

2）圆曲线段。圆曲线段起点坐标S、圆心坐标C以及半径R已知，机头中心点Q坐标已知，则SC和QC的方位角的差值即为对应弧长的圆心角，可计算出该段弧长，该段弧长加上直线段已顶里程即为此时的实时顶进里程，如图6右幅所示。

3.2　顶进轴线偏差

顶进轴线偏差分为水平偏差和垂直偏差。由于机头中心点 $\mathrm{Q}(x_q,y_q,z_q)$ 和对应里程位置 $Q'(xq',yq',zq')$ 已知，则顶进轴线的垂直偏差为 $zq-zq'$，正值表示机头中心位于设计轴线上方，负值表示机头中心位于设计轴线下方。水平偏差由Q和 Q' 的空间关系求得，Q'Q的方位角位于第一和第二象限时，水平偏差取正值，机头中心位于设计轴线右侧；Q'Q的方位角位于第三和第四象限时，水平偏差取负值，机头中心位于设计轴线左侧。

3.3　机头侧向翻转

在安装机头两侧棱镜A、B时，如若AB在同一水平面上，那么AB两棱镜距离设计轴线中心平面的高差是相同的；若AB不在同一水平面上，则AB到设计轴线中心平面的高差是已知且固定不变的。当机

头发生侧向偏转时，AB两棱镜到设计轴线中心平面的高差会发生变化，具体表现为一侧增大，一侧减小，机头向减小的一侧翻转。

3.4　机头俯仰偏差

在实际顶进过程中，顶进轴线可能会和设计轴线有所偏差，从而导致AB到设计轴线中心平面的高差同时增大或者同时减小，此时不能说明机头发生侧向偏转，可能是机头发生俯仰偏差。由于顶管机机头空间位置有限，俯仰偏差由顶管机机头位置安装的双轴倾斜仪测得。

4　实例应用

本工程为某地铁车站地下通道，顶管段施工采用9.90 m×8.15 m的土压平衡矩形顶管机施工，单条顶管长度为445 m，共两条平行顶管。由于顶管顶进距离较短，管径较大，通视条件相对较好，因此本项目拟投入一台测量机器人进行自动化引导测量，在始发井内合适位置浇筑强制对中台，将全站仪安置在对中台上，并在始发井的侧方坑壁上布设稳固的后视基准点，同时借由井外控制基准点进行测站点和后视点坐标的联系测量，获取平面坐标和高程信息。

为了实时获得顶管机头中心与设计轴线的偏差、顶管盾首姿态与初始姿态的偏转信息，需要在顶管机盾首适当位置安置测量棱镜，由于本项目是矩形顶管，除轴线偏差以外，机头滚动角、俯仰角都需要测量获得，因此布设了2个棱镜与1个双轴倾角计进行冗余测量。为了消除全站仪测量视场内出现多个目标棱镜，拟采用电控棱镜，测量时棱镜前方遮挡装置打开，其他时间则处于关闭状态，以便消除测量时小视场问题。

依据项目实际需求，在顶管机机头盾首和盾尾位置分别安置2个电控棱镜，以盾首双棱镜解算成果作为顶管机刀盘姿态信息，以盾尾双棱镜解算成果作为矩形顶管盾尾姿态信息，俯仰角以坡比形式显示。

该系统在项目现场应用过程中，每顶进一节管节均使用该系统进行自动引导测量，获取机头姿态信息以便及时纠偏，每日早晨采用人工测量形式对自动引导测量数据进行校核。顶管顶进施工期间，自动引导测量系统与人工校核成果最大偏差为平面0.84 cm、高程1.22 cm，分析原因为自动引导测量系统全站仪架设在工作井内，一测站直接测量机头棱镜，始发井与管节内存在一定的温度差异，对测量精度产生了一定影响；人工测量洞内外转站距离较近，温度影响基本可以忽略；但该偏差远小于贯通允许误差，满足矩形顶管纠偏需求。在定期人工复核的条件下，该项目顺利贯通，贯通误差为平面2.25 cm、高程4.38 cm，满足规范中轴线偏差不大于50 mm的要求，充分验证了双棱镜矩形顶管自动引导测量系统的适用性及可靠性。

5　结　语

顶管施工作为地下非开挖工程的一种施工工艺，因其施工方式简单、成本相对较低等特点，应用越来越广泛。针对大口径矩形顶管，常规单棱镜自动化引导测量方法很难对机头的全方位姿态信息进行准确获取。本文在矩形顶管机头位置设置双棱镜，通过对测量算法原理进行详细分析，并成功运用到工程项目中去，从理论和实践两个方面验证了系统的适用性和可靠性；系统采用电控棱镜设计，消除全站仪小视场问题，极大提高了顶管引导测量作业效率。但该系统在机头高程坐标归算过程中，没有考虑俯仰角对高程的影响，故高程坐标并非真值，依据经验及初步理论分析，俯仰角变化不大时，对高程误差影响较小，但若追求真值，后续仍需改善研究。

参考文献

[1] 罗麒杰,林俊华,丁克良,等. 矩形顶管测量变形监测可视化设计与实现[J]. 测绘通报,2018(增刊):257-261

[2] 林秀桂,曹艳菊,谢东武. 软土地层长距离大断面矩形顶管姿态控制技术[J]. 现代隧道技术,2020,57(增刊):1 007-1 014

[3] 王浩. 长距离顶管平面控制测量关键技术[J]. 城市道桥与防洪,2021(2):102-106

[4] 姜留涛,汪慧琴,胡倩. 曲线顶管自动测量系统的应用[J]. 测绘通报,2021(11):161-164

[5] 刘勇,万年锋,李秉乾. 超长小口径隧洞的贯通误差控制技术研究[J]. 地理空间信息,2021,19(5):96-98

[6] 李志南,潘珂,王位赢. 并行顶管近距离上穿既有盾构隧道的安全分析[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(增刊):939-944

[7] 孔雷. 浅覆土曲线顶管轴线控制关键技术研究[J]. 城市道桥与防洪,2021(12):109-112

[8] 邵泽兴,叶斌,刘政纲,等. 多种监测方法在重大工程安全监测中的应用[J]. 地理空间信息,2022,20(1):139-141

[9] 胡宝生,肖调清. 拱北隧道暗挖段曲线管幕顶管施工精度控制技术[J]. 公路交通技术,2019,35(4):100-110