

海上导航系统在管节浮运、沉放、对接中的应用

文哲¹, 杨国胜²

(1. 中国瑞林工程技术股份有限公司, 江西 南昌 330031; 2. 江西中昌工程咨询监理有限公司, 江西 南昌 330038)

摘要:为解决内河沉管隧道水下施工时浮运、沉放、对接等的精确控制问题,引进海上导航系统并将其成功应用于红谷隧道工程中的沉管施工阶段。通过剖析海上导航系统的工作原理和测量方法,得出该系统能够在测量定位精度上满足本工程管节浮运、沉放、对接施工的要求,并结合实时监控系,形成对内河沉管隧道浮运、沉放、对接工序的精确控制体系。通过工程实例展示该系统的控制作业流程,可为同类沉管隧道工程等提供宝贵经验和实施手段。

关键词:海上导航系统;沉管隧道;管段浮运;沉放对接;可视化;远程监控

DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2018.S2.038

中图分类号: U 459.5

文献标志码: A

文章编号: 2096-4498(2018)S2-0285-07

Application of Maritime Navigation System in Floating, Sinking and Jointing of Pipe Joint

WEN Zhe¹, YANG Guosheng²

(1. China Nerin Engineering Co., Ltd., Nanchang 330031, Jiangxi, China;

2. Jiangxi Zhongchang Engineering Consultant and Supervision Co., Ltd., Nanchang 330038, Jiangxi, China)

Abstract: In order to precisely control the operations such as floating transportation, sinking, docking and butt-jointing in the underwater construction of inland river immersed tunnel, the marine navigation system is introduced and successfully applied to the immersed pipe construction of Honggu Tunnel. Through analyzing the working principle and measuring method of the system, it is concluded that the system can meet the construction requirements of floating, sinking and jointing of pipe joints in this project in terms of measuring and positioning accuracy. Combined with the real-time monitoring system, a precise control system for the above processes is formed. The controlled operation flow of the system is demonstrated through engineering example, which can provide valuable experience and implementation method for similar immersed tunnel projects.

Keywords: marine navigation system; immersed tunnel; pipe section floating; sinking and jointing; visualization; remote monitoring

0 引言

近年来,随着沉管法技术的日趋成熟,越来越多的水域隧道采用沉管结构,如港珠澳大桥、红谷隧道工程、海河隧道、韩国釜山巨济沉管隧道、厄勒海峡沉管等。

管节的浮运、沉放及对接是整个沉管工法中风险最大的环节,是沉管隧道建设的重中之重^[1-3],施工质量的好坏关系到隧道结构整体的水密性和安全性。文献[1]综合案例研究的结果给出沉管施工中各个风险点的分布和比例,指出沉放、对接等施工工序是沉管施

工风险的集中工序。文献[2]指出利用导航软件等综合手段可以有效保障拖航的安全,并建议制定相应的有效应急预案,加强对沉管施工的风险管控。文献[4]指出海河隧道沉管施工中采用全站仪、GPS定位、倾角仪实时监控等技术措施能有效辅助施工,值得同类工程借鉴。文献[5]研究了隧道轴线的控制和调整技术,并通过数值模拟验证,为实际施工提供参考。文献[6]指出安全有效的管节调位系统是降低沉管施工风险的重要工具。因此,管节浮运、沉放、对接过程中的精确控制和实时姿态监测十分重要。

收稿日期: 2016-05-09; 修回日期: 2018-07-31

第一作者简介: 文哲(1973—),男,江西萍乡人,1994年毕业于南昌大学,给排水专业,本科,高级工程师,现从事项目管理工作。E-mail: wenzhe@nerin.com。

上述文献给出的应对浮运、沉放、对接等施工工序中风险点的措施还不够清晰,实施方案还不够明确和具体;且在内河领域采用精确的导航控制系统鲜有报道。本文以南昌红谷隧道工程为背景,以广州打捞局的海上导航系统为基础,从计算方法和精度控制以及具体浮运、沉放、对接等关键节点,研究如何将该系统应用于内河沉管隧道领域,以期同类工程提供参考。

1 工程概况及海上导航系统工作原理简介

1.1 工程概况

红谷隧道工程是目前国内内河规模最大、最长的城市道路双向 6 车道沉管隧道。主线隧道长 2 650 m, 匝道总长 2 510 m, 江中段为直线沉管隧道, 沉管分 12

节, 总长 1 329 m。管节出坞后, 浮运 8.51 km, 途径几座大桥后到达隧址, 从东西两岸向江中段依次沉放, 采用水下对接的方式安装。工程条件十分复杂。

1.2 海上导航系统工作原理

海上导航定位系统是一款综合导航软件, 已广泛应用于浅海过渡带勘探导航定位领域。该软件操作简单、易于使用, 能满足导航定位质量控制功能, 使得实时质量控制和后处理质量控制功能更加完善和强大。本文研究的沉管隧道施工综合定位系统是在海上导航定位系统的基础上研发, 专门用于沉管隧道管节浮运、沉放、对接施工的专业测量软件。该综合定位系统可从各视点、多角度观察沉管的实时姿态和位置(侧视图、后视图以及俯视图等), 如图 1 所示。

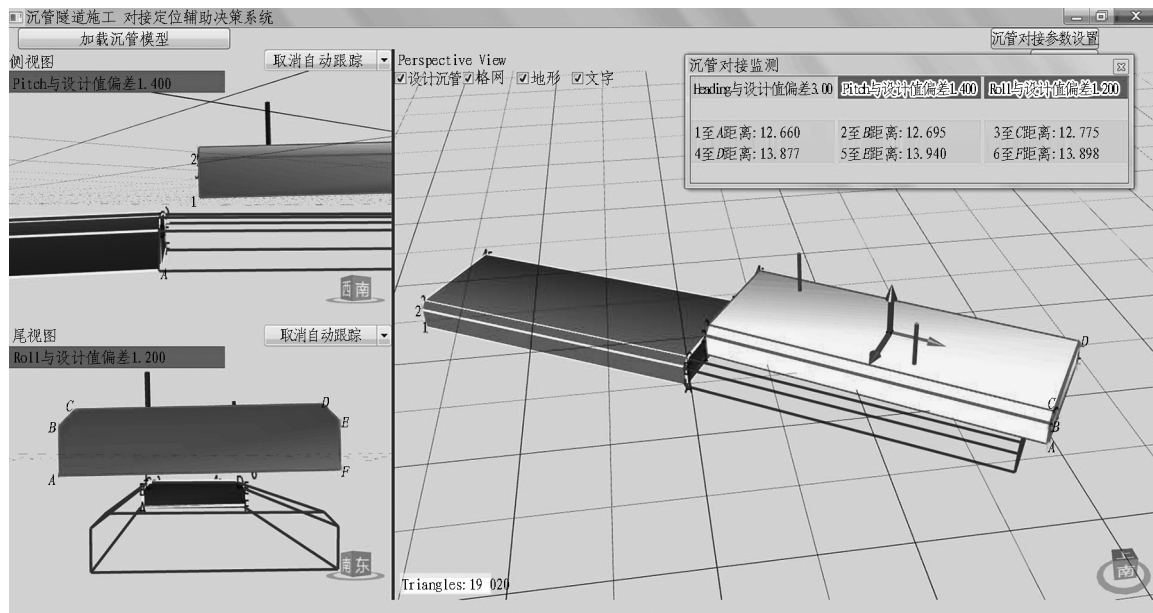


图 1 管节对接三维视图

Fig. 1 Three-dimensional view of pipe joint jointing

通过在沉管上安装 GPS-RTK 移动站接收卫星及 RTK 基站数据, 获取 cm 级精度沉管位置及航向信息, 通过管段首尾 2 台 GPS-RTK 天线计算沉管艏向, 通过 OCTANS 光纤罗经获取沉管姿态数据。当管节浮运过桥时, 因 GPS 信号被遮挡导致 GPS-RTK 处于无信号状态, 切换至 GPS 惯性导航系统采集沉管定位定向数据。

2 技术方法与精度估算

本工程在沉管浮运、沉放、对接中采用海上导航系统, 利用 GPS-RTK 技术进行同步数据采集定位, 通过人工测量与监控系统相结合的方法复核。

2.1 海上导航系统中测量塔顶定位设备标定的精度分析

测量塔顶定位设备标定方法取决于测距精度和交

会角度^[7-8]。测距精度为 $1 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} D$ (D 为测距), 各站测距精度优于 1.1 mm, 交会角最小以 30° 计算。则点位平面误差

$$M_p = \sqrt{2} M_s / \sin 30^\circ = 3.2 \text{ mm} \quad (1)$$

式中 M_s 为斜距。

高程误差取决于仪器高量取误差及纵向交会误差。仪器高量取误差为 1 mm, 则综合高程误差为 2 mm。

2.2 管节沉放、对接测量定位方法

本工程管节沉放、对接测量定位方法及流程如图 2 所示。测量塔采用 GPS-RTK 与全站仪结合的方式, 负责完成管节沉放与对接的引导定位测量工作, 并由潜水员做最终检核。GPS-RTK 主要用于管节沉放阶段的定位工作, 全站仪主要用于管节初步对接阶段的定位工作^[9-12]。

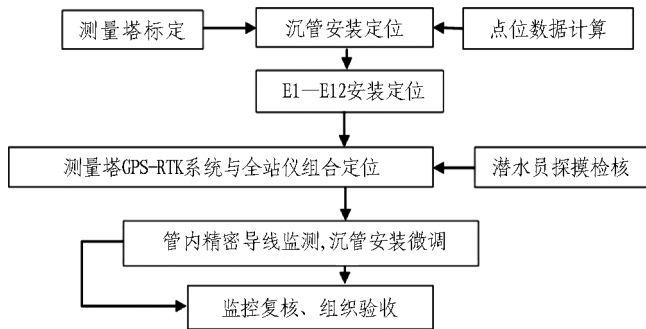


图2 管节沉放、对接测量定位流程示意图

Fig. 2 Flow chart of measuring and positioning of pipe joint sinking

在双测量塔的工作模式中, GPS-RTK 与全站仪都能够提供测量塔顶部中心的三维坐标 (x, y, h) ; 管节的轴线方位 (Heading)、纵向坡度 (Pitch) 都可由测量塔数据计算提供; 而管节的姿态 (主要是横倾 (Roll)) 由水下姿态传感器提供。根据上述数据, 可以将管节各特征点坐标实时转换成施工坐标 (南昌城建坐标系)。具体步骤如下。

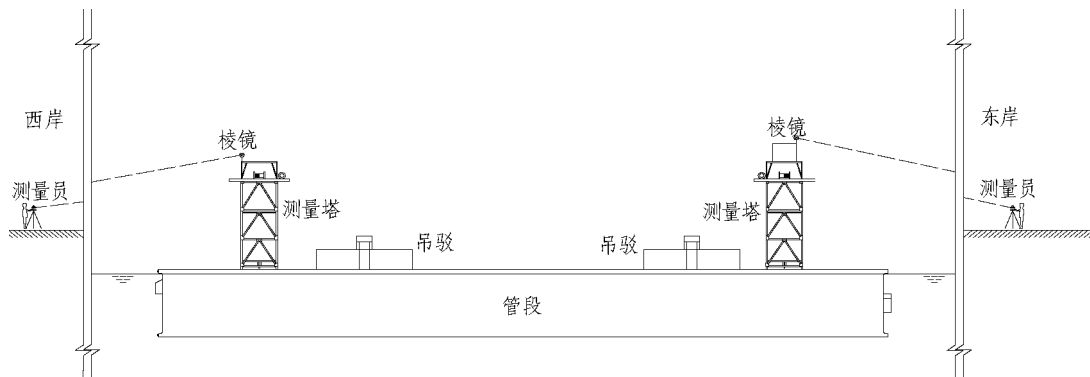


图3 全站仪定位管节沉放示意图

Fig. 3 Sketch of total station positioning for sinking and docking of pipe joints

当管节沉放到对接位置时, 为了排除仪器系统误差, 只用 1 台全站仪精确观测 2 个棱镜, 确定沉管的最终位置。对接完成后, 获取下一次对接面中心坐标及端面法线方向。

2.3 精度分析

2.3.1 平面精度分析

测量塔法的管节沉放定位平面精度分为绝对精度和相对精度, 需要分别进行分析和估计。

2.3.1.1 平面绝对精度分析

绝对定位精度受到各个测量环节上的误差影响, 包括起算点误差、特征点测量误差、测量塔上 GPS 位置标定误差、沉放定位时的 GPS-RTK 定位误差和计算对接面时的姿态仪误差等^[11]。

1) 测量起算点误差。管节顶面特征点测量时采用预制施工控制网的控制点作为起算数据。根据该网

1) GPS-RTK 方法。将 GPS-RTK 及水下姿态传感器采集的三维坐标及管节姿态数据, 通过无线电数据链和串口通讯技术实时传递给位于测控中心的定位计算机; 计算机通过该坐标及姿态数据将当前管节的实时状态在屏幕上以图形的形式展现出来; 进而结合场景中所绘制的已沉管节、水下地形及周边地物, 指导施工作业。

2) 全站仪方法。进行沉放测量时, 将全站仪安置在岸边的 2 个观测墩上, 2 台仪器分别用通讯线缆连接到便携电脑和无线电数据链, 将实时测量数据传送到测控指挥中心。沉放跟踪时, 全站仪瞄准由人工操作, 观测指令和数据发送由程序控制。如图 3 所示。

3) 沉放与对接测量。将全站仪的观测信号实时传送到位于测控中心的定位计算机, 可以得到当前时刻管节的对接参数, 如管节对接端中心坐标、尾端中心坐标, 对接端相对对接面中心的横差、高差、纵差, 尾端中心相对对接面中心的横差、高差, 尾端横倾等。指挥人员根据定位软件提供的相关数据指挥管节沉放。

的设计, 控制网点的误差 $m_0 = 2.0 \text{ mm}$ 。

2) 管节特征点的测量误差。管节顶面特征点的测量精度实为全站仪测量精度, 现使用 Leica TS06 全站仪进行标定工作, 该仪器的标称精度为: 测角精度为 $2''$, 有棱镜测距精度为 $1 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} D$ 。因此, 该误差可控制在 5 mm 之内。

3) 二次舾装区 GPS 天线位置标定误差。GPS 天线位置标定同样采用全站仪进行, 现使用 Leica TS06 全站仪进行标定工作, 测量误差 m_g 同样控制在 5 mm 之内。

4) GPS-RTK 定位的仪器平面精度。沉管沉放时采用 GPS-RTK 定位, 其平面定位精度 $m_c = 15 \text{ mm}$ 。

5) 仪器架设的对中误差。由于在整个标定过程中, 每个特征点都需架设仪器, 单次架设仪器的对中误差可控制在 2 mm 之内。不同测量方式的仪器架设误

差可随机积累,但多次测量时的仪器架设误差可随机减弱,2种方式影响的积累效应基本可以相互抵消,故仍然取仪器架设误差 $m_y = 2.0 \text{ mm}$ 。

6) GPS-RTK 定位的塔顶位置精度。以上分析的测量塔法管节沉放的各项误差彼此独立,因此塔顶 GPS 位置的精度 $m_T = \sqrt{m_0^2 + m_g^2 + m_G^2 + m_y^2} = 15.9 \text{ mm}$ 。对于管节沉放来说,还需要计算沿隧道轴线和横向的平面精度。可以认为测量塔法定位的绝对精度在隧道纵向和横向是一致的,故纵向精度(m_{TZ})和横向精度(m_{TH})均为 $m_T / \sqrt{2} = 11.2 \text{ mm}$ 。

7) 倾斜误差的影响。采用测量塔法进行管节沉放时,由塔顶 GPS 位置的变化验算对接面位置时需要进行倾斜改正,倾斜改正的角度来自姿态仪的测量结果,姿态仪的测角精度可以达到 0.01° 。最不利情况下,测量塔高度为 20.6 m ,管节高度为 8.3 m ,最远点到沉管前端底面角点斜距为 32.5 m ,其倾斜误差为 $32.5 \times 0.01 \times 3.14 / 180 \times 1000 = 5.6 \text{ mm}$ 。末端点位由尾端 GPS-RTK 测定,精度同上。

8) 测量塔法沉放对接面的绝对精度估计。由于纵向、横向精度相同,绝对精度为 $\sqrt{11.2^2 + 5.6^2} = 15.0 \text{ mm}$,可以满足沉管安装的平面绝对精度 35 mm 的要求。

2.3.1.2 测量塔法定位的相对精度分析

测量塔法定位的相对精度是指已沉放管节尾端对接面与正在沉放管节对接面之间的相对精度。其中已沉放管节尾端对接面的位置采用贯通测量方式得到,正在沉放管节对接面的位置由 GPS 定位、姿态仪测量等数据计算得到。

1) 正在沉放管节的对接面精度。考虑最不利情况下正在沉放管节的对接面精度为 15.0 mm 。

2) 相对精度。考虑到正在对接的管节对接面的误差是独立的,因此相对精度的计算方法为:纵向为 $\sqrt{5.2^2 + 15.0^2} = 15.9 \text{ mm}$; 横向为 $\sqrt{6.7^2 + 15.0^2} = 16.4 \text{ mm}$ 。其中, 5.2 和 6.7 是理论贯通测量的误差。这个精度可以满足沉管安装的平面相对精度 40 mm 的要求。

2.3.2 高程精度分析

测量塔法管节沉放定位高程精度也分为绝对精度和相对精度。

2.3.2.1 测量塔法定位的高程绝对精度分析

1) 管节顶面特征点测量的高程精度。由于沉管在一次舾装区特征点标定时采用二等精密水准测量,因此管节顶面的特征点高程精度可以控制在 1.0 mm

以内。二次舾装区 GPS 天线高度的量测也可以用全站仪三角高程测量和经过标定的钢尺丈量,其量测精度均可控制在 3.0 mm 以内。因此,可以认为沉管顶部特征点及测量塔上的 GPS 点的高程标定精度 $m_{v0} = 4.0 \text{ mm}$ 。

2) GPS-RTK 定位的仪器高程精度。沉管沉放时采用 GPS-RTK 定位,其高程定位精度 $m_{v1} = 30.0 \text{ mm}$ 。

3) 倾斜误差的影响。姿态仪误差对沉管对接面底部左右两侧点的高程影响最大,最大误差点位于沉管坐标系的 y 轴方向上,离开测量塔安装位置最远的点处。取该点与测量塔的 y 坐标差为 15.0 m ,姿态仪的综合测量误差为 0.01° ,则该位置的姿态仪误差 $m_{v2} = 15.0 \times 0.01 \times 3.14 / 180 = 2.6 \text{ mm}$ 。

4) 测量塔法沉放、对接面的高程绝对精度估计值 $m_v = \sqrt{m_{v0}^2 + m_{v1}^2 + m_{v2}^2} = 30.4 \text{ mm}$ 。可以满足沉管安装的高程绝对精度 40 mm 的要求。

2.3.2.2 测量塔法高程相对精度

测量塔法定位的高程相对精度也指已沉放管节尾端对接面与正在沉放管节对接面之间的高程相对精度。其中已沉放管节尾端对接面的高程也采用贯通测量方式,以二等精密水准测量得到,正在沉放管节对接面的高程由 GPS、姿态仪等测量得到。

由于已沉放的管节采用了二等水准测量方式,测量精度较高,相比于正在沉放管节的高程精度,前者的误差可以忽略不计。因此,测量塔法高程相对精度可以认为就是正在沉放管节的高程精度,即 30.4 mm ,可以满足沉管安装的高程相对精度 40 mm 的要求。

3 海上导航系统在本工程中的应用

3.1 管节浮运中的应用

3.1.1 海上导航系统在管节浮运中的应用原理

根据多波束水下扫测地形和地貌测量结果及设计浮运航道,将设计浮运航道、大桥桥墩、水下地形等各种资料作为底图加载到导航界面上,采用专业的海上导航软件指导管节及拖轮按既定线路浮运。

浮运过程中,主要采用以下定位手段:5条拖轮采用 GPS 罗经进行定位定向,沉管采用 GPS-RTK 进行定位定向,INS 惯性导航系统作为辅助,OCTANS 光纤罗经提供姿态数据。

各船舶数据发送至沉管导航定位工作站后进行集中广播,使每条拖轮及各个指挥控制单元均可接收到其他作业船舶的位置、航向等信息。

浮运过程中,通过定位监控软件实时显示沉管的姿态、沉管偏离航道中心的距离(沉管偏航预警值设

为10 m,偏航距超过10 m后报警提示)^[13-15]。结合实时获得的测流船所测得的水流速度和方向,指挥5条拖轮使沉管保持在航道中心。此外,为了保证各级领导能够及时了解沉管浮运的动态情况,监控软件还增加了在线远程监控视频功能。

3.1.2 海上导航系统在管节浮运中的应用方法及流程

浮运导航定位主要包括控制网复测及基准站建立、设备安装调试、拖轮导航定位、沉管浮运定位、沉管过桥定位、远程监控及回放等。具体作业流程如图4所示。

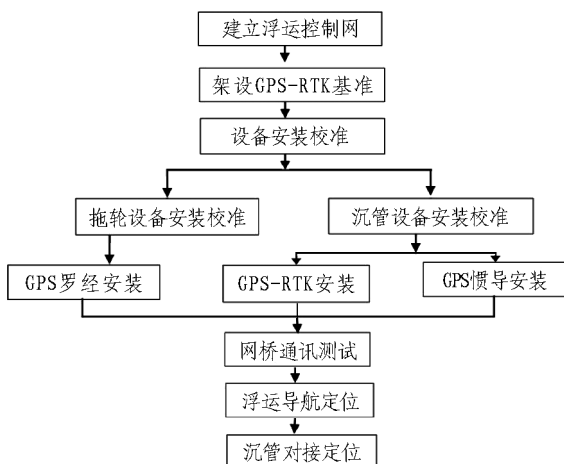


图4 导航定位流程图

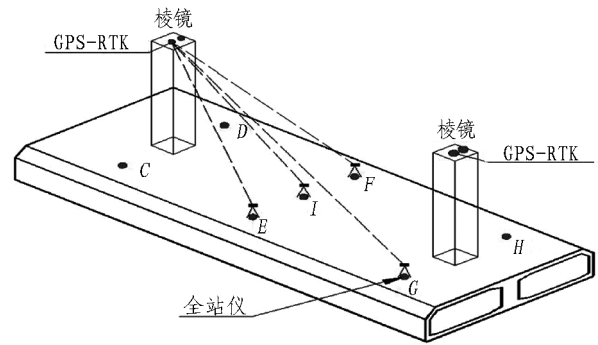
Fig. 4 Flow chart of navigation positioning

3.2 沉放、对接中的应用

测定管段上特征点的几何参数,计算并显示水下管节的几何状态,再将管段几何参数测量结果、沉管尺寸及基槽地貌图等各种资料作为底图加载到导航软件界面上,通过数字化集成控制系统指挥沉放、对接操作^[16]。对接结束后,待管节稳定,测定其在水下的最后状态以确定下节管节沉放与对接的位置。所有的控制都可在指挥中心的导航系统界面上完成。

3.2.1 管段几何参数测定

管段几何参数测定是提供导航对接界面的重要手段。沉放、对接之前,在2个测量塔顶上各安装1个棱镜,如图5所示。测量塔的高度要保证管节沉放到底时,棱镜仍在水位之上;测量塔的结构刚度要足以保证棱镜与管节的几何关系不变。在测量棱镜位置前,需重新测量管节与测量塔的相对位置,从而确保棱镜与管节的几何关系准确,即2个棱镜塔的三维坐标与管节前后2个端面的中心三维坐标、法线方向、横倾旋角等几何参数状态一致。



C、D、E、F、G、H、I为管节测量特征点。

图5 管节测量特征点相对关系图

Fig. 5 Relative relationship of measured feature points of pipe joints

3.2.2 沉放及初步对接步骤

以E3管节为例,介绍管节沉放、对接的一般步骤。E3管节西端设计底标高为-2.168 m、东端设计底标高为-1.018 m,管节坡度为1%(西低东高),两端高差为1.15 m;E2管节东端顶标高为+6.132 m,考虑0.52 m拉合座高度,修正后标高为+6.652 m;沉放时水面标高约+17 m,E3管节沉放前管底标高为+8.8 m,E3西端管底距设计底标高10.968 m,距E2管节东端顶部2.148 m。具体步骤如下。

1)通过导航对接界面将E3管节绞拉移至管头距离E2管节管尾2.5 m位置,接触面1—6点与对接面A—F点的距离逐步满足要求,根据界面实时显示管节轴线方位(Heading)、纵向坡度(Pitch)和横倾(Roll)的数值,及时调整与设计数据的差值。

2)管节压载至负浮力约3 000 kN,记录吊驳四角吃水。测量吊驳2台绞车和起重船的同步性,然后将管节匀速下沉至管头距离设计标高约7 m,调整管节轴线、纵向坡度和横倾的数值,完成管节初步下沉。测量员通过全站仪实时监控,并将测量数据与系统姿态数据进行比较,通过对讲机汇报至指挥中心。

3)数控系统显示继续下沉管节至管头距离设计标高约4 m,此时管尾距离设计标高约2.85 m。数控系统显示管节纵坡、横坡偏离设计值时,检查管内连通管读数与现场全站仪测量数据,及时调整横倾、纵倾。

4)将E3管节绞拉移至距离E2管节管尾1.5 m位置,管节沉放至距离设计标高1.8 m,调整管节轴线、横倾、坡度;潜水员测量2条管节的相对位置。

5)管节逐步下沉至距离设计标高0.4 m、E3管节管首距离E2管节管尾0.5 m位置,微调管节轴线、横倾、坡度;潜水员测量2条管节端钢壳距离、轴线偏

差,与数控系统数据、测量员数据对照印证。

6) 先将管节沉放至 E3 管节上部导向装置与 E2 管节下部导向装置搭接,再将管尾下放至临时垫块垂直千斤顶上;潜水员测量两管节接头端钢壳距离及轴线偏差,安装拉合千斤顶,进行管节初步拉合对接。拉合应对称、逐级、缓慢进行,以保证 GINA 止水带均匀压缩且不受损伤。

7) 初步拉合对接后,在 2 条管节封门之间通过 GINA 止水带形成一个相对水密空间;将封门之间的水排出去,利用待安装管节尾部的水压力将 GINA 止水带向已装管节方向压接。至此形成管节的最终压接。

沉管就位沉放、对接及远程可视化监控示意如图 6—7 所示。

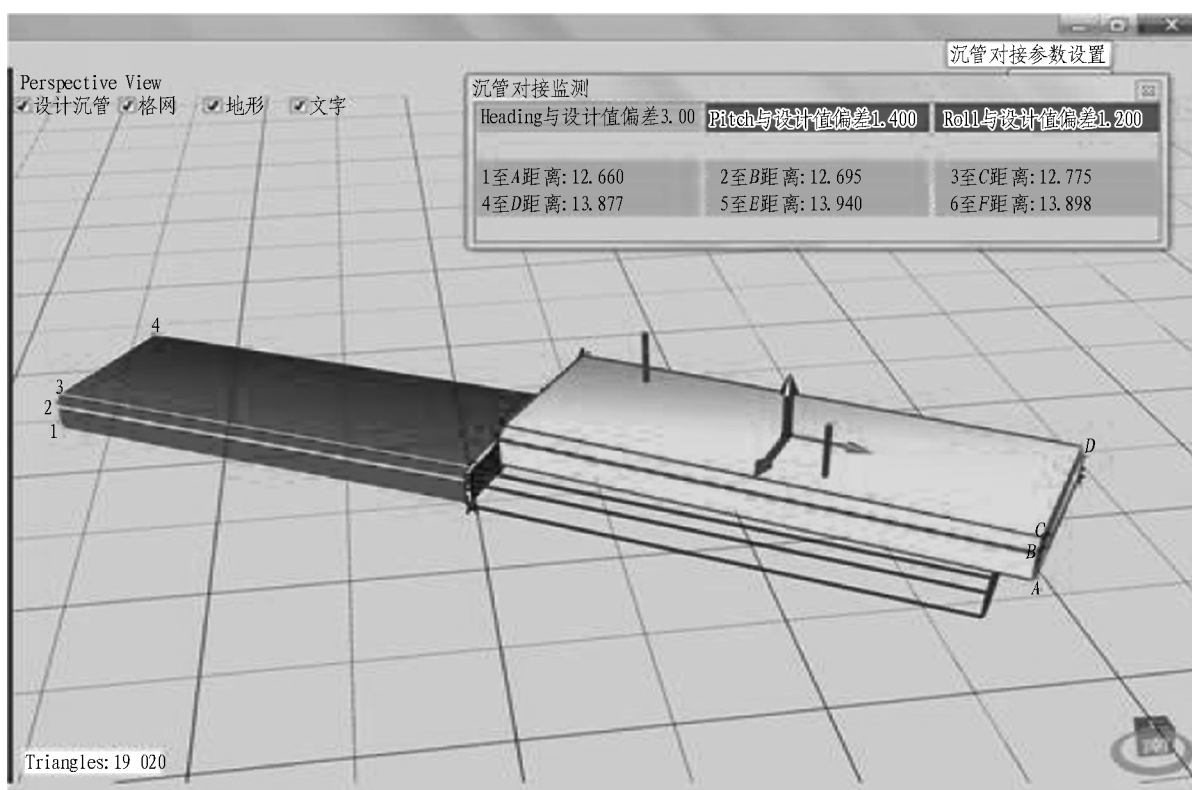


图 6 管段就位可视化监控示意图

Fig. 6 Sketch of visual monitoring of pipe section in place

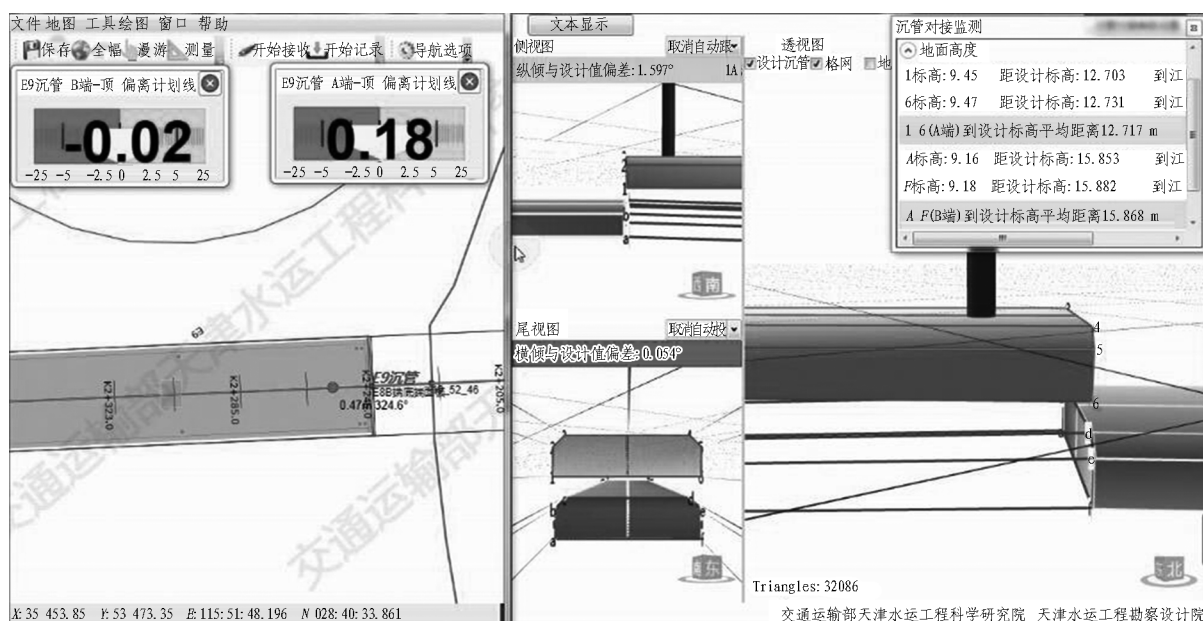


图 7 管段沉放可视化监控示意图

Fig. 7 Sketch of visual monitoring of pipe section sinking

4 结论与建议

1) 针对性地结合内河沉管隧道的施工特点和环境影响因素,可以有效地运用海上导航系统做到高精度的沉管浮运、沉放、对接等施工作业。

2) 借用 GPS 定位技术强大的功能与无线网桥技术,并将其应用在内河沉管浮运、沉放、对接施工中,具有很大的优越性和适应性,其精度完全能够满足浮运轨迹的控制标准。在管段沉放及对接过程中由于 RTK 定位精度自身的局限性,需要结合常规测量控制验证其效应,弥补了水下沉放、对接精度的要求。

3) 在本工程实践过程中,形成了一套有效的沉管管节浮运、沉放、对接的流程,结合实时监控系,形成了对内河沉管隧道浮运、沉放、对接等工序的精确把握。

4) 下一步建议结合最新的科技成果,充分利用物联网加强智能监控和实时动态调整,将信息第一时间传达到每位具体操作人员和管理人员手中,建立一套全方位信息体系。

参考文献(References):

- [1] 张青海. 外海沉管隧道浮运安装施工的风险管理研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(11): 1150.
ZHANG Qinghai. Risk management in offshore towing and installation of immersed tunnel tubes [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(11): 1150.
- [2] 谭光宗. 大断面海底隧道建设的安全风险评估与控制对策[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
TAN Guangzong. Assessment and control measures of security risk during construction of large section subsea tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [3] 宿发强. 超大型沉管浮运的风险管控[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(7): 1.
SU Faqiang. Risk management on floating of ultra-large immersed tube [J]. China Harbor Engineering, 2015, 35(7): 1.
- [4] 郭建文. 海河隧道沉管沉放对接的主要施工技术[J]. 铁道标准设计, 2013(4): 73.
GUO Jianwen. Key construction technologies of sinking and docking of immersed tube of Haihe River Tunnel [J]. Railway Standard Design, 2013(4): 73.
- [5] 孙召才. 沉管隧道轴线控制和调整技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
SUN Shaocai. Study of immersed tunnel axis control and adjustment technology [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [6] 马宗豪, 孙健, 管泽旭. 沉管隧道管节线形控制方法[J]. 中国港湾建设, 2014(11): 12.
MA Zonghao, SUN Jian, GUAN Zexu. Linear control method of immersed tube tunnels [J]. China Harbor Engineering, 2014(11): 12.
- [7] 赵坤. 港珠澳大桥沉管隧道测控系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
ZHAO Kun. Research on measurement and control system of immersed tube tunnel of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [8] 成益品. 测量塔定位系统在港珠澳大桥沉管安装中的应用[J]. 中国港湾建设, 2015(7): 36.
CHENG Yipin. Application of measuring tower positioning system in Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge immersed tube installation [J]. China Harbor Engineering, 2015(7): 36.
- [9] 廖健雄. 沉管隧道管节沉放测量[J]. 人民珠江, 2014, 35(5): 100.
LIAO Jianxiong. Immersed tube section sinking measure [J]. Pearl River, 2014, 35(5): 100.
- [10] 雷巨光. 沉管隧道施工控制测量方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
LEI Juguang. Study of construction control survey methods of immersed tube tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [11] 郑伟, 李炜. GPS-RTK 三维水下地形测量的应用与误差分析[J]. 中国港湾建设, 2015(7): 42.
ZHENG Wei, LI Wei. Application and error analysis of GPS-RTK three-dimension underwater topographic survey [J]. China Harbor Engineering, 2015(7): 42.
- [12] 欧阳麟桦, 方长远, 严峻. 环境因素对测量塔全站仪定位精度的影响研究[J]. 测绘地理信息, 2013, 38(3): 67.
OUYANG Linhua, FANG Changyuan, YAN Jun. Study on impact of environmental factors on measurement of total-station positioning [J]. Journal of Geomatics, 2013, 38(3): 67.
- [13] 钟伟春, 江巨桓, 曾淦辉. 动态测量技术在沉管法隧道施工中的研究与应用[J]. 施工技术, 2013, 42(1): 108.
ZHONG Weichun, JIANG Juhuan, ZENG Ganhui. Research and application of dynamic measurement technology in immersed tunnel construction [J]. Construction Technology, 2013, 42(1): 108.
- [14] 任朝军, 吕黄, 苏林王, 等. 沉管隧道管节沉放实时定位测量技术现状分析[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(1): 44.
REN Zhaojun, LYU Huang, SU Linwang, et al. The state of real-time positioning measurement technology for immersed tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(1): 44.
- [15] 张彦昌, 黄永军. 港珠澳大桥隧道沉管安装定位及姿态监测技术[J]. 海洋测绘, 2012, 32(5): 25.
ZHANG Yanchang, HUANG Yongjun. Study on underwater tunnel tube positioning and posture monitoring of GANG-ZHU-AO Bridge [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2012, 32(5): 25.
- [16] 潘润秋, 高耿明. 多波束测深技术在海底沉管基槽边坡稳定性监测中的应用[J]. 测绘通报, 2010(增刊): 34.
PAN Runqiu, GAO Gengming. Multi-beam bathymetric technology in undersea immersed tube foundation trench slope stability monitoring application [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2010(S): 34.