

# 超大型钢壳混凝土沉管安装多线形联合锁网贯通测量方法设计及应用

王建<sup>1</sup>, 成益品<sup>2</sup>, 锁旭宏<sup>2\*</sup>

(1. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 2. 中交一航局第二工程有限公司, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 以深中通道沉管隧道为例, 针对沉管隧道最终接头横向贯通精度极高的要求, 充分利用施工现场地形条件和隧道内部空间结构, 对隧道洞内外平面控制网进行优化设计和横向贯通误差模拟计算, 在左、右行车道和中廊道分别布设一套导线网, 并相互连接, 形成隧道多线形联合锁网贯通测量方法, 实现了沉管隧道最终接头的精准合龙贯通。

**关键词:** 沉管隧道; 多线形联合锁网; 横向贯通误差

中图分类号: U652.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2024)07-0066-05

doi: 10.7640/zggwjs202407013

## Design and application of multi-linear interlocking network penetration measurement method for installation of super-large steel shell concrete immersed tube

WANG Jian<sup>1</sup>, CHENG Yi-pin<sup>2</sup>, SUO Xu-hong<sup>2\*</sup>

(1. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2. No.2 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266071, China)

**Abstract:** Taking the immersed tube tunnel of the Shenzhen-Zhongshan Link as an example, in view of the extremely high requirement of transverse penetration precision of the final joint of the immersed tube tunnel, the topographic conditions of the construction site and the internal spatial structure of the tunnel are fully utilized, the plane control network inside and outside the tunnel is optimized and the transverse penetration error is simulated and calculated, a set of wire networks is arranged in the left and right lane and the middle corridor respectively, and connected to each other to form a multi-linear interlocking network penetration measurement method, achieving precise closure and penetration of the final joint of the immersed tube tunnel.

**Key words:** immersed tube tunnel; multi-linear interlocking network; transverse penetration error

### 0 引言

沉管隧道设计贯通精度要求高, 贯通测量导线网设计是隧道贯通测量的核心技术。沉管隧道结构一般包括左行车道、右行车道和检修所需的中廊道, 目前沉管隧道贯通测量导线网都在左行车道和右行车道进行布设; 然而, 对于特长沉管隧道而言, 仅仅在这2个车道上布设导线网可能

无法满足精度和可靠性的要求。一旦贯通测量数据不准确, 就会改变沉管隧道线形, 管节之间也会出现较大的错牙, 对管节之间的止水效果和管内装修都会有一定影响, 更严重的情况下, 若对接偏差超出设计限差, 从而引发重大安全事故<sup>[1]</sup>。

### 1 工程概况

深圳至中山跨江通道项目(简称“深中通道”)

收稿日期: 2024-01-01 修回日期: 2024-06-03

作者简介: 王建(1970—), 男, 山东临沂人, 安全总监, 高级工程师, 港航工程专业, 主要从事工程施工及技术管理工作。

\*通讯作者: 锁旭宏, E-mail: 1398900215@qq.com

地处珠江口核心区域, 是一项超大型跨海通道工程。其中岛隧工程隧道全长 6 845 m, 沉管隧道全长 5 035 m, 由 32 个大型预制钢壳管节对接安装而成。

隧道进、出口两端均位于人工岛上, 隧道最终接头的贯通面位于 E23 和 E24 管节之间, 隧道东端曲线段分属于沉管段与主线暗埋段, 位于半径 5 003.1 m 的圆曲线上, 沉管段曲线管节长度 536.5 m, 其余部分均为直线。

## 2 隧道控制网的设计

隧道控制网设计的关键是能够正确、有效地满足隧道贯通精度的要求, 特别是保证横向贯通精度的要求。TB 10101—2018《铁路工程测量规范》<sup>[2]</sup>中规定, 当隧道的长度大于 1 500 m 时, 要针对横向贯通误差进行洞内外平面控制网的专项设计<sup>[3]</sup>, 以估算因洞内外控制测量所产生的横向贯通误差影响值是否满足规范要求。通过对隧道洞内、外的控制测量设计, 要保证隧道能够按照设计和规范要求的精度贯通。

隧道多线形导线贯通测量方法包括多线形联合锁网布设和多线形导线联合观测的步骤, 其中, 多线形联合锁网布设的步骤包括布设 1 个洞外控制网、2 个洞内全导线网以及 1 个中廊道全导线网, 并将各网形相互联系以形成多线形联合锁网; 多线形导线联合观测的步骤包括 GNSS 静态测量<sup>[4]</sup>

并解算 2 个洞外起始点的 GNSS 坐标、将全站仪依次架设于洞外起始点以及洞内控制点和中廊道控制点处进行隧道贯通测量。

### 2.1 隧道洞外控制网的设计

在隧道进洞口外, 布设对应左行车道的左洞外起始点 LX1、对应右行车道的右洞外起始点 RX1、以及多个洞外控制点 D1、D2、D3, 以组成洞外控制网。

洞外控制网图形如图 1 所示, 图中: 1 是左车道; 2 是右车道; 3 是中廊道; D1、D2、D3 是洞外控制点; LX1 是左洞外起始点; RX1 是右洞外起始点; L1、L2、L3、L4、L5、L6、L7、L8、L9、L10 是左洞内控制点; R1、R2、R3、R4、R5、R6、R7、R8、R9、R10 是右洞内控制点; Z0 是中廊道进口控制点; Z1、Z2、Z3、Z4、Z5、Z6、Z7、Z8 是中廊道控制点; ML 是左出洞口控制点; MR 是右出洞口控制点; MZ 是中廊道出口控制点。

LX1、RX1 设站作为多线形联合锁网导线测量的起算点, 隧道洞口进洞点与相应定向点 D1、D2、D3 边长控制在 500 m 以上。左洞外起始点 LX1、右洞外起始点 RX1 及多个洞外控制点 D1、D2、D3 处同步架设 GNSS 接收机进行静态测量, 以解算所述左洞外起始点和右洞外起始点的 GNSS 坐标。

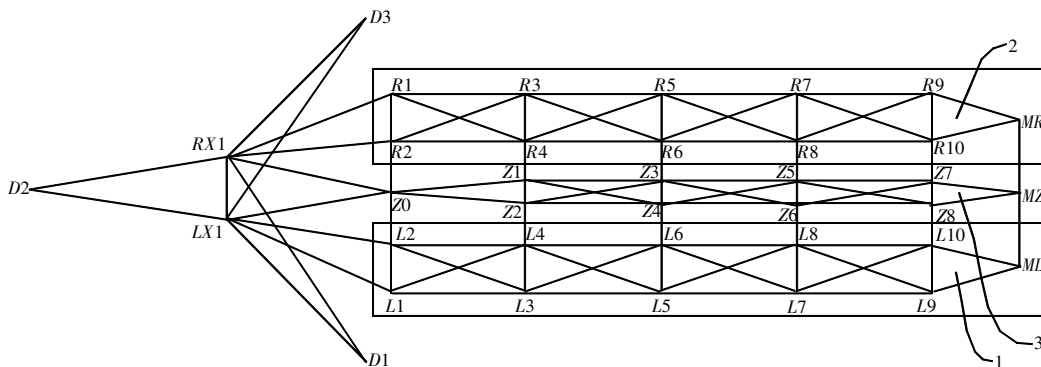


图 1 沉管隧道多线形联合锁网贯通测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-linear interlocking network penetration measurement for immersed tube tunnel

### 2.2 隧道洞内控制网的设计

洞内平面控制测量主要是保证隧道的平面位置, 按设计规定的精度贯通。洞内按照二等导线测量的要求进行控制网的设计。分别在隧道左、右行车道和中廊道内布设多个洞内控制点, 将洞外控制网、中廊道全导线网以及左、右行车道 2 套洞内全导线网相互联系, 形成多线形联合锁网<sup>[5]</sup>,

具体如图 1 所示。左行车道洞外起始点、右行车道洞外起始点、多个洞内控制点以及多个中廊道控制点处依次架设全站仪, 依托多线形联合锁网进行隧道贯通测量。

洞内多线形联合锁网敷设视钢封门切割情况逐步向前延伸, 左右行车道及中廊道导线边长每间隔 820 m 左右布设 1 对导线点。左右行车道 1

对导线点间距控制在 15 m 左右, 由于中廊道宽度受限, 中廊道 1 对导线点间距控制在 4 m 左右, 中廊道左、右侧导线点分别和右、左行车道外侧墙导线点进行联测, 左右行车道导线网联测通过外侧墙(间距约 38 m)导线点进行。

### 3 横向贯通误差预计

横向贯通误差预计是在贯通测量规范设计及验评标准允许偏差范围内, 选择合理的平面控制网测量方案和适用于本工程测量作业方法及等级的有效手段。根据现场测量条件, 选择合适的导线长度、夹角等, 合理分配误差, 通过软件进行控制网模拟计算, 得出贯通面的误差预计, 为合理设计贯通测量方案提供可靠依据, 进而为沉管隧道顺利贯通提供更有保障。

#### 3.1 洞外控制网测量贯通误差估算

##### 1) 误差分配

根据管节安装验收允许偏差, 沉管隧道横向贯通限差为 50 mm, 限差是中误差的 2 倍, 则横向总中误差  $M_{总}$  为 25 mm, 以此作为沉管隧道横向贯通测量精度设计的依据<sup>[6]</sup>。

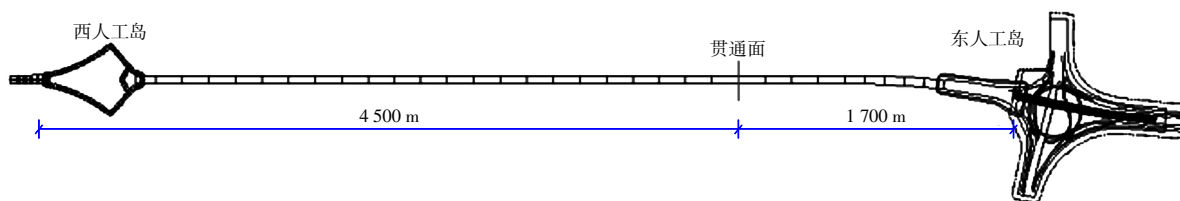


图 2 沉管隧道东、西侧距贯通面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the distance between the east and west sides of immersed tube tunnel and the penetration surface

##### 2) 洞外控制网引起的隧道横向贯通误差估算

通过对多次静态观测计算结果进行统计可知, GNSS 控制网的精度很高, 最弱点点位中误差不大于 0.4 mm。所以对 GNSS 网引起的横向贯通误差进行估算时, 取 0.4 mm 为进洞点的方向位差。

西人工岛进洞方向的方位角中误差估算:

$$M_{\alpha_{西}} = \rho \frac{\bar{P}_g}{S_{PA}} = 206\,265 \times \frac{0.4}{700 \times 1\,000} = 0.12''$$

式中:  $M_{\alpha_{西}}$  为西人工岛进洞方向的方位角中误差;  $\rho$  为常数,  $\rho=206\,265$ ;  $\bar{P}_g$  为垂直于 PA 方向上的位差;  $S_{PA}$  为 PA 两点间的距离; P 为控制网中的待定点; A 为控制网中的已知点。

西岛端洞外定向边引起的隧道横向贯通误差为:

$$M_{西外} = \pm \sqrt{\left(S_y \frac{M_{\alpha_{西}}}{\rho}\right)^2 + M_x^2} =$$

假设隧道外控制测量引起的横向贯通误差为  $M_{外}$ , 东、西人工岛两端隧道内控制测量引起的横向贯通误差分别为  $M_{东内}$ 、 $M_{西内}$ , 则  $M_{外}^2 + M_{东内}^2 + M_{西内}^2 = M_{总}^2$ , 若按照等影响原则, 即  $M_{外} = M_{东内} = M_{西内}$ , 则隧道外控制网和东、西人工岛端隧道内控制网引起的横向贯通误差均为 14.43 mm。

考虑隧道外控制采用 GNSS 网, 隧道内为狭长导线网, 测量误差影响值可以相应分配大一些, 按隧道外与隧道内 1:3 的比例分配, 可确定出隧道洞外 GNSS 网和隧道内导线网测量引起的横向贯通误差分别为 12.49 mm 和 15.30 mm。由于贯通面位于从西人工端起 E23 和 E24 管节之间, 东人工岛到贯通面距离约 1.7 km, 西人工岛到贯通面距离约 4.5 km, 根据东人工岛端和西人工岛端隧道内导线网的长度, 把东人工岛端和西人工岛端的测量误差比例关系定为 1:5, 确定出地面 GNSS 网和隧道内导线网测量引起的横向贯通误差分别为 12.49 mm(隧道外)、8.83 mm(东人工岛)和 19.75 mm(西人工岛)。沉管隧道东、西侧距贯通面示意图如图 2 所示。

$$\pm \sqrt{\left(4\,500 \times \frac{0.12}{206\,265}\right)^2 + \left(\frac{0.4}{1\,000}\right)^2} \times 1\,000 = \pm 2.65 \text{ mm}$$

式中:  $M_{西外}$  为西岛端洞外定向边引起的隧道横向贯通误差;  $S_y$  为测站点到贯通面的距离;  $M_x$  为测站点横向点位误差。

同理, 东人工岛端最弱点点位中误差取投点误差 2 mm, 进洞方向的方位角中误差估算为 0.84'', 东人工岛端洞外定向边引起的隧道横向贯通误差  $M_{东外}$  为 8.25 mm。

洞外 GNSS 网引起的隧道横向贯通误差是 8.67 mm, 如下式计算, 小于分配的误差。

$$M_{外} = \sqrt{M_{西外}^2 + M_{东外}^2} = \sqrt{2.65^2 + 8.25^2} = 8.67 \text{ mm} < 12.49 \text{ mm}$$

式中:  $M_{外}$  为东、西岛两端洞外定向边引起的隧道

横向贯通误差;  $M_{\text{东外}}$  为东岛端洞外定向边引起的隧道横向贯通误差。

### 3.2 洞内控制网测量贯通误差估算

洞内平面测量采用二等导线网<sup>[7-9]</sup>, 测角中误差要求为  $1.0''$ 。对多线形联合锁网进行估算, 测角中误差取  $1.0''$ , 测边误差取所用仪器 LeicaTS60 的标称测距精度  $0.6 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} D$  ( $D$  为测距, mm)。

利用科傻软件, 按照洞内设计的网形和测角、测距精度, 进行控制网平面模拟计算, 通过计算得出东人工岛端导线网引起的横向贯通误差为  $3.50 \text{ mm}$ , 西人工岛端导线网引起的横向贯通误差为  $16.83 \text{ mm}$ 。

综合洞外定向边和洞内控制网按照双线形联合锁网布网引起的横向贯通误差, 总的贯通中误差为  $19.25 \text{ mm}$ , 低于深中通道沉管隧道贯通精度  $25 \text{ mm}$  要求。

## 4 工程应用

以示意图 1 所示, 在隧道进洞口外, 布设对应左行车道的左洞外起始点  $LX1$ 、对应右行车道的右洞外起始点  $RX1$ 、以及多个洞外控制点, 以组成洞外控制网。需要说明的是, 洞外控制点的数量包括但不限于 3 个, 如图 1 所示的洞外控制点  $D1$ 、 $D2$ 、 $D3$ , 3 个点位于左行车道洞外起始点  $LX1$  和右行车道洞外起始点  $RX1$  以外的不同方位上, 以增强洞外控制网的图形结构。在左行车道内和右行车道内, 统一布设多个洞内控制点, 以组成分别位于左行车道内和右行车道内的 2 套洞内全导线网, 也即左行车道内和右行车道内的洞内全导线网的网形一致。在中廊道内, 预留贯通导线测量通道, 并布设多个中廊道控制点, 以组成中廊道全导线网。将洞外控制网、中廊道全导线网以及 2 套洞内全导线网相互联系, 形成多线形联合锁网。

多线形导线联合观测的步骤具体包括:

#### 1) 洞外 GNSS 测量

在左洞外起始点  $LX1$ 、右洞外起始点  $RX1$  及多个洞外定向控制点 ( $D1$ 、 $D2$ 、 $D3$ ) 处同步架设 GNSS 接收机进行静态测量, 静态测量完成后收回 GNSS 接收机; 根据静态测量的结果来解算左洞外起始点  $LX1$ 、右洞外起始点  $RX1$  及洞外定向控制点 ( $D1$ 、 $D2$ 、 $D3$ ) 的 GNSS 坐标, 为中廊道全导线网以及 2 套洞内全导线网提供起算数据。

#### 2) 洞内边角观测

左行车道洞外起始点  $LX1$ 、右行车道洞外起始点  $RX1$ 、多个洞内控制点以及多个中廊道控制点均为多线形联合锁网中的导线测量点, 在各个导线点处依次架设全站仪, 对与全站仪所在点位相连接的各导线测量点进行边角测量, 依次迁站测量至左行车道洞内控制点  $ML$ 、右行车道洞内控制点  $MR$  和中廊道洞内控制点  $MZ$ 。

#### 3) 内业平差计算

根据边角测量步骤中得到的测量结果, 结合左行车道洞外起始点  $LX1$  和右行车道洞外起始点  $RX1$  的 GNSS 坐标, 进行整体平差计算, 以得到多线形联合锁网中各导线测量点的 GNSS 坐标结果。

#### 4) 检核步骤

在中廊道洞内控制点  $MZ$  处架设全站仪, 后视靠近中廊道洞内控制点  $MZ$  处的中廊道控制点组中的一个中廊道控制点, 检核该中廊道控制点组中的另一个中廊道控制点, 防止出现粗差, 确保贯通测量工作严谨准确, 进而完成隧道的贯通测量。

## 5 结语

隧道多线形导线贯通测量方法, 充分利用隧道结构, 通过中廊道与左右行车道同步布设贯通测量导线并联系测量的方式, 实现了中廊道全导线网与 2 套洞内全导线网之间的相互联系, 增加多余观测数目和检核条件, 且使多线形联合锁网的网形结构更为规整, 形成较强的网形图形结构, 提高了隧道的贯通测量精度, 增强了测量结果的可靠性和稳定性, 满足日益提高的沉管隧道贯通设计精度要求以及特长隧道贯通测量精度需求, 实现对隧道的精确贯通测量, 从而保证隧道施工测量精度, 确保隧道各个开挖面之间的准确贯通, 具有较高的推广价值和良好的应用前景。

深中通道沉管隧道最终接头依托多线形联合锁网进行隧道贯通测量, 为最终接头水下推出安装提供了精准的线形调控参数, 保障了最终接头高精度对接合龙贯通。基于日益提高的沉管隧道贯通设计精度要求以及特长隧道贯通测量精度需求, 通过在沉管隧道设计之初与设计联动, 于隧道贯通施工期间在隧道洞口中廊道预留贯通导线测量通道, 使隧道具备中廊道与左右行车道同步布设贯通测量导线网和联系测量的条件, 以期提升贯通测量精度、贯通测量的可靠性及观测数据的稳定性。

## 参考文献:

- [1] 刘静. 地铁隧道横向贯通误差预计及测定[J]. 地理空间信息, 2017, 15(8): 97-98.  
LIU Jing. Estimation and determination of the lateral through error of subway tunnel[J]. Geospatial Information, 2017, 15(8): 97-98.
- [2] TB 10101—2018, 铁路工程测量规范[S].  
TB 10101—2018, Code for railway engineering survey[S].
- [3] 杨柳. 长大隧道控制网设计及横向贯通误差预计[J]. 北京测绘, 2012(4): 26-28.  
YANG Liu. Design of tunnel control network and estimation of through error[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2012(4): 26-28.
- [4] GB/T 18314—2009, 全球定位系统(GPS)测量规范[S].  
GB/T 18314—2009, Specifications for global positioning system (GPS) surveys[S].
- [5] 成益品, 董理科, 锁旭宏, 等. 隧道多线形导线贯通测量方法: ZL 202210308581.X[P]. 2022-06-07.  
CHENG Yi-pin, DONG Li-ke, SUO Xu-hong, et al. The method of tunnel multi-linear traverse penetration measurement: ZL 2022 10308581.X[P]. 2022-06-07.
- [6] 成益品, 孙阳阳, 高应东. 外海超长沉管隧道精密贯通测量设计与实践[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(5): 12-15.  
CHENG Yi-pin, SUN Yang-yang, GAO Ying-dong. Design and practice of precise through survey of offshore super long immersed tunnel[J]. China Harbour Engineering, 2018, 38(5): 12-15.
- [7] GB 50026—2007, 工程测量规范[S].  
GB 50026—2007, Code for engineering surveying[S].
- [8] 张正禄. 工程测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.  
ZHANG Zheng-lu. Engineering surveying[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005.
- [9] 孔祥元, 郭际明. 控制测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.  
KONG Xiang-yuan, GUO Ji-ming. Control surveying[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2006.

(上接第 16 页)

此外, 该技术对我国的水运工程和大型跨海通道的建设产生了深远的影响, 同时也为海洋测绘工程领域的技术进步做出了贡献。

## 参考文献:

- [1] 李志军, 王秋林, 陈旺, 等. 中国沉管法隧道典型工程实例及技术创新与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(6): 879-894.  
LI Zhi-jun, WANG Qiu-lin, CHEN Wang, et al. Innovation and prospect of key technologies of immersed tunnels in China[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(6): 879-894.
- [2] 徐炳超. 海底公路沉管隧道施工安全风险评估及其应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.  
XU Bing-chao. Research on safety risk assessment and application of submarine highway immersed tunnel construction[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [3] 刘凌峰, 林巍, 尹海卿, 等. 世界交通沉管隧道工程建造情况与我国沉管科技发展现状[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(8): 71-79.  
LIU Ling-feng, LIN Wei, YIN Hai-qing, et al. Construction of immersed tunnel engineering in the world and development status of immersed tunnel technology in China[J]. China Harbour Engineering, 2021, 41(8): 71-79.
- [4] 李更新, 边晶梅, 毕子杨. 沉管海底隧道发展若干思考——以辽宁省为例[J]. 珠江水运, 2022(16): 58-61.  
LI Geng-xin, BIAN Jing-mei, BI Zi-yang. Some thoughts on the development of immersed tube subsea tunnels: Taking Liaoning Province as an example[J]. Pearl River Water Transport, 2022(16): 58-61.
- [5] 郭建民, 单联君, 马铭骏. 国内沉管隧道数据统计与发展分析[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(1): 173-184.  
GUO Jian-min, SHAN Lian-jun, MA Ming-jun. Statistical analysis and development of immersed tube tunnels in China[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(1): 173-184.
- [6] 深中通道沉管隧道——世界首条大规模采用钢壳混凝土组合结构的沉管隧道[J]. 隧道与轨道交通, 2020(4): 64.  
Shenzhen-Zhongshan Link immersed tunnel: The world's first large-scale immersed tube tunnel using steel shell concrete composite structure[J]. Tunnel and Rail Transit, 2020(4): 64.
- [7] 文哲, 杨国胜. 海上导航系统在管节浮运、沉放、对接中的应用[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(S2): 285-291.  
WEN Zhe, YANG Guo-sheng. Application of maritime navigation system in floating, sinking, and jointing of pipe joint[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(S2): 285-291.
- [8] 高开强, 徐泮林, 赵晓旭. RTK 坐标转换参数的应用与精度分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(8): 108-113.  
GAO Kai-qiang, XU Pan-lin, ZHAO Xiao-xu. Application and precision analysis of RTK coordinate conversion parameters[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019, 42(8): 108-113.
- [9] 刘兆权, 周相荣, 王殿文, 等. 港珠澳大桥岛隧工程浮运操作指挥系统开发[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(3): 10-14.  
LIU Zhao-quan, ZHOU Xiang-rong, WANG Dian-wen, et al. Development of the transportation operational direct system about HZMB island and tunnel project[J]. China Harbour Engineering, 2018, 38(3): 10-14.
- [10] 郝志刚. 卫星导航软件开发架构研究与设计[J]. 电子技术与软件工程, 2019(7): 43-44.  
HAO Zhi-gang. Research and design of satellite navigation software development architecture[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2019(7): 43-44.