

# 沉管隧道最终接头水力平衡+千斤顶推出工艺的推出速度计算方法研究及应用

宁进进<sup>1,2,3</sup>, 熊昊翔<sup>4</sup>, 张朝亮<sup>5</sup>

(1. 同济大学, 上海 200092; 2. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300461; 3. 中交集团海岸工程水动力重点实验室, 天津 300222; 4. 深中通道管理中心, 广东 中山 528400; 5. 穆钺(上海)动力技术有限公司, 上海 201108)

**摘要:** 深中通道沉管隧道采用水力平衡+千斤顶推出的方式, 水力平衡过程中进水管系的沿程压力损失与推出速度有直接关系, 通过查阅相关资料, 采用假定推出速度推算千斤顶增加值的方式, 确定了施工推出速度。经过与现场推出速度、千斤顶推出和水头差的监测数据对比, 验证了该计算方法有一定的指导性, 施工方案中假定的推出速度也是合理的, 同时也可参考实际推出的经验为后续类似推出方式提供一些新思路。

**关键词:** 沉管隧道; 最终接头; 水压平衡; 沿程压力损失; 千斤顶推出; 推出速度

中图分类号: U655.1 文献标志码: B 文章编号: 2095-7874(2025)02-0083-05

doi: 10.7640/zggwjs202502012

## Research and application of jacking speed calculation method of "hydraulic balance + jack thrust" process for final joint of immersed tube tunnels

NING Jin-jin<sup>1,2,3</sup>, XIONG Hao-xiang<sup>4</sup>, ZHNAG Zhao-liang<sup>5</sup>

(1. Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. CCCC Tianjin Port Engineering Design & Consulting Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 3. Key Laboratory of Coastal Engineering Hydrodynamics, CCCC, Tianjin 300222, China; 4. Shenzhen-Zhongshan Link Administration Center, Zhongshan, Guangdong 528400, China; 5. Megatec(Shanghai)Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

**Abstract:** The immersed tube tunnel of the Shenzhen-Zhongshan Link adopts a method of hydraulic balance combined with jack thrust. During the hydraulic balance process, the pressure loss along the water inlet pipe system is directly related to the jacking speed. By consulting relevant materials, this paper determines the construction jacking speed by assuming the jacking speed and calculating the increment of the jack. After comparing with the monitoring data of on-site jacking speed, jack thrust, and head difference, it has been verified that this calculation method has a certain degree of guidance. The assumed jacking speed in the construction plan is also reasonable. At the same time, it can also provide some new ideas for similar jacking methods in the future by referring to actual jacking experience.

**Key words:** immersed tube tunnel; final joint; hydraulic balance; pressure loss along the pipeline; jack thrust; jacking speed

### 0 引言

沉管隧道最终接头是隧道贯通前的最后一个小管节, 是设计与施工难度最大的一个管节, 也

是沉管隧道中最为关键的工序之一。目前, 沉管隧道最终接头形式主要有干地施工法、止水板施工法以及近年来应用的预制最终接头法 3 大

收稿日期: 2024-09-22 修回日期: 2024-10-12

作者简介: 宁进进 (1981—), 男, 山东泰安人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事港口工程、沉管隧道施工作业。E-mail: 635945636@qq.com

类<sup>[1]</sup>。其中预制最终接头法近年在国内应用较多,主要用在了国内的3条外海沉管隧道(港珠澳大桥沉管隧道、大连湾海底隧道、深中通道)和中国香港地铁过海隧道<sup>[2]</sup>。国内3条外海沉管隧道最终接头主要数据见表1。

表1 国内推出式最终接头主要数据表

Table 1 The main data table of the domestic jacking type final joint

项目名称	主要尺寸	重量/t	安装水深/m	备注
港珠澳大桥	长 37.95 m × 宽 9.6 (12) m × 高 11.4 m	6 000	28	倒梯形
大连湾海底隧道	长 34.05 m × 宽 5.75 m × 高 10.05 m	陆上 2 500; 水下 380	25	
深中通道	长 46.00 m × 宽 4.65 m × 高 9.75 m	陆上 1 550; 水下 500	24	存在空仓

港珠澳大桥沉管隧道最终接头由大型浮吊吊装沉放就位后,通过最终接头内设的液压油缸顶推系统,将两侧滑移小梁顶出,压缩 GINA 止水带与 E29(E30)管节钢帽顶紧,实现与外界海水隔离,抽排结合腔海水,形成结合腔管内干作业环境,再施焊钢接头连接钢板将最终接头与 E29(E30)管节钢帽连为整体,最终实现整个沉管的贯通<sup>[2]</sup>。与之前的工法相比,港珠澳大桥岛隧工程开发了整体式主动止水最终接头技术,该技术把最终接头做成一个整体,运输与沉放时,其纵向尺寸小于最终状态尺寸,对接时,其自身能沿纵向展开直至接触相邻的管节。最终接头小梁的推出方式是采用两侧各 27×200 t 千斤顶实现,千斤顶推出过程中主要克服水压力 and GINA 压缩力,这种结构的最终接头推出速度是单纯由千斤顶决定。

大连湾海底隧道最终接头位于 E18 和南岸暗埋段之间,采用的是原位顶进节段法的方式,最终接头结构主要包括顶进节段、外部套筒、止水构造、顶推装置及锁定构造、后浇带等结构。推出方式是通过增加进水管后采用了“水力平衡+千斤顶推出”方式<sup>[3]</sup>。

深中通道沉管隧道最终接头,提出采用整体浮运管内推出式最终接头工艺,最终接头设置与 E23 和 E24 管节之间。整体浮运管内推出式最终接头是预制与标准管节有相同断面的小型管节(推出段),一端设置 GINA 止水带,背面设置临时封门。在最后一个待沉放管节艏端设置扩大段,将最终接头设置在扩大段内。完成最后一个管节的沉放后,利用推出系统将推出段从扩大段内推

出,使其与相邻管节的端面接触,完成 GINA 止水带的初始压接,然后抽排对接腔内水体,利用水力压接使 GINA 止水带充分压缩,最后在沉管隧道内部进行止水及纵向锁定施工。推出方式是采用了“水力平衡+千斤顶推出”方式。

### 1 深中通道“水力平衡+千斤顶推出”方式

深中通道最终接头采用了水压平衡+千斤顶推出的方式,其机理为:推出段与相邻管节结合腔通过水力系统与外海连通,如果进水速度与推出速度匹配,可以实现推出段内外侧水压力平衡,顶推千斤顶仅克服推出段与滑轨间的摩擦力和运动水阻力,另外通过千斤顶可以更加有效控制推出段的推出和收回,其结构见图1。

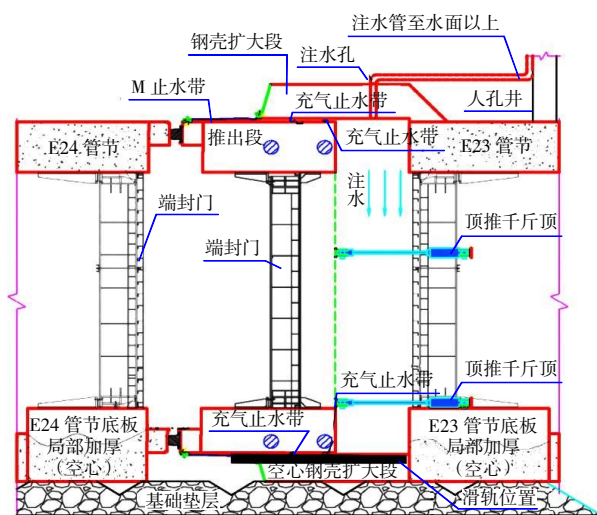


图1 深中通道最终接头结构图

Fig. 1 Structural diagram of the final joint of the Shenzhen-Zhongshan Link

推出段推出前,通过管顶灌排水管路将 E23 管节与推出段结合腔与外界海水连通,通过自流注水方式使推出段与 E23 管节结合腔内水压与外海平衡。

推出段推出前整体受力平衡,控制顶推千斤顶克服初始阻力即可实现最终接头推出段的初始推出。最终接头推出需要克服的初始阻力主要包括:推出段匀速推出时推出段封门前端水阻力、推出段匀速推出时推出段封门后端水阻力、推出段与滑轨间摩擦力。

#### 1.1 水阻力

推出段前端因推出产生的水阻力可根据相关规范公式<sup>[4]</sup>进行计算,具体公式如下:

$$F_w = \frac{1}{2} C_w \rho A V^2 \quad (1)$$

式中:  $F_w$  为水流力标准值, kN;  $C_w$  为水阻力系数;  $\rho$  为海水密度, 取  $1.025 \text{ t/m}^3$ ;  $A$  为计算构件在与流向垂直平面上的投影面积,  $\text{m}^2$ ;  $V$  为水流设计流速,  $\text{m/s}$ 。

按照推出速度  $0.01 \text{ m/s}$ 、 $A=448.5 \text{ m}^2$  进行计算, 水阻力为  $0.03 \text{ kN}$ , 与推出段前端水压力可忽略不计。

## 1.2 摩擦力

为了保证最终接头推出段顺利推出, 在扩大段底部布置了4条滑轨, 滑轨结构从下往上包括: 填充水泥基或环氧树脂、钢垫板、MGB板<sup>[9]</sup>。为了满足滑道纵向平整度小于 $\pm 1 \text{ mm}$ 和4条滑道横向高差小于 $2.5 \text{ mm}$ 的要求, 钢垫板采用铣刨加工, MGB板为定制。为了确定MGB板与钢壳之间的摩擦系数, 开展了相关物理模型试验, 得到摩阻力系数见表2。

表2 滑轨摩擦力试验数据表

Table 2 Test data table of the friction force of slide-rail

试验工况	静摩擦系数	动摩擦系数
干摩擦	0.181~0.266	0.150~0.226
水润滑	0.138~0.223	0.106~0.149
油润滑	0.086~0.106	0.085~0.095

按照水下+油润滑工况进行计算, 最终接头推出的摩擦力最大为  $784 \text{ kN}$ 。

## 1.3 推出合力

综上所述, 最终接头水下推出期间, 主要以摩擦力为主, 推出段前的水压力可以忽略不计, 正常情况推出力为  $784 \text{ kN}$ 。

## 2 水管流量的压力损失

### 2.1 推出面设计

推出段前后端设计基本一致, 从进入方面考虑, 推出段E23侧的面积约为  $448.5 \text{ m}^2$ , 见图2。根据现场实测的推出距离为  $2.03 \text{ m}$ , 最终接头推出阶段总注水量约为  $910.46 \text{ m}^3$ 。

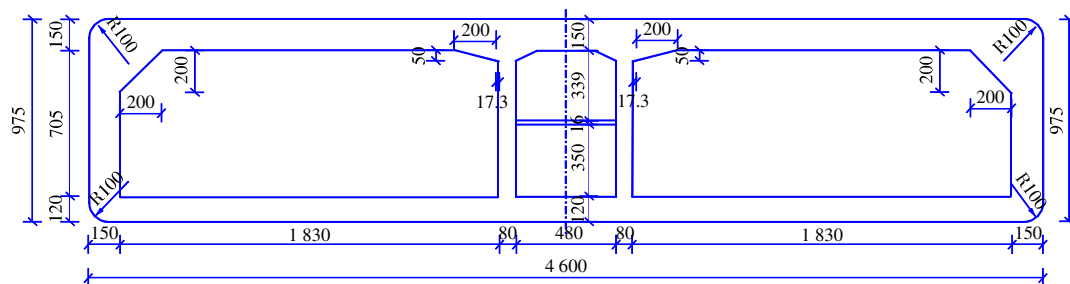


图2 深中通道最终接头推出段横断面图(cm)

Fig. 2 Cross-sectional diagram of the jacking section of the final joint of the Shenzhen-Zhongshan Link (cm)

## 2.2 进水管系设计

沉管的压载水系统主要由压载水箱、压载管系与阀门遥控、压载水泵、液位遥测、测控柜及控制终端组成<sup>[9]</sup>, 为了便于最终接头推出, 在标准管节的基础上对原有的压载水系统进行扩容, 可以同时满足E23管节和最终接头施工。

最终接头推出时, E23管节和E22管节已经对接完成, 只能通过设置在E23管顶上的人孔进水实现内外压力平衡。由于管内空间有限, 进水系统相对比较复杂, 水通过3个截止阀、2个电动蝶阀和5个弯头进入推出腔, 截止阀、电动蝶阀和管路规格均为DN250, 进水管路总长度约为  $27.62 \text{ m}$ 。

## 2.3 沿程压力损失计算

流体运动时, 由于自身黏性和管壁粗糙度的

影响将在流体与壁面间以及流体质点间产生摩擦力, 这种沿流程阻碍流体运动的摩擦力称为沿程阻力。运动流体克服沿程阻力而产生的能量损失, 称为沿程水头损失, 其大小与流程长度成正比, 一般用  $h_f$  表示, 可以采用水力计算方法得到<sup>[7]</sup>。

沿程水头损失的计算公式为:

$$h_f = \lambda \frac{l}{D} \frac{v_1^2}{2g}$$

式中:  $h_f$  为沿程水头损失;  $\lambda$  为管路沿程阻力系数, 由雷诺数  $Re$  计算得出;  $l$  为沿程管道长度;  $D$  为管道直径;  $v_1$  为管道内介质输送流速;  $g$  为重力加速度。

### 1) 推出速度

由于推出速度是水头损失中的关键参数, 后面的计算需要通过水头差与千斤顶的推力进行对

比才能确定合适的推出速度,这里采用先假设一个推出速度进行反算的计算方式。

按照整体施工计划,暂定推出速度为一个范围值,推出速度为  $V_1=1\sim 10\text{ mm/min}$ ,推出速度与推出段的面积乘积即为进水速度,经过计算 DN250 管内进水速度为  $0.45\sim 4.49\text{ m}^3/\text{min}$ 。

#### 2) 雷诺数计算

雷诺数的计算公式<sup>[8]</sup>如下:

$$Re = \frac{\rho v_2 d}{\mu}$$

式中:  $\rho$ 、 $\mu$  分别为海水密度和动力黏性系数,海水的动力黏性系数  $\mu$  为  $1.01\times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;  $v_2$ 、 $d$  分别为流场的特征速度和管道的当量直径。

其中,雷诺数与最终接头推出速度有线性关系,当推出速度为  $1\text{ mm/min}$  时,雷诺数为 38 541,按照雷诺数的临界值进行比对,可知管内水流为紊流。

#### 3) 沿程压力损失

按照《机械设计手册(第五版)第5卷液压-气动》的相关计算公式,对于水力光滑管区,若雷诺数  $Re$  的范围为  $10^5 \leq Re < 10^8$ ,沿程阻力系数  $\lambda = \frac{0.308}{(0.842 - \lg Re)^2}$ ,按照推出速度  $1\sim 10\text{ mm/min}$ ,进行计算对应的  $\lambda$  范围为  $0.014\sim 0.220$ 。

按照上面的沿程损失计算得到与推出速度的关系,如图3所示。

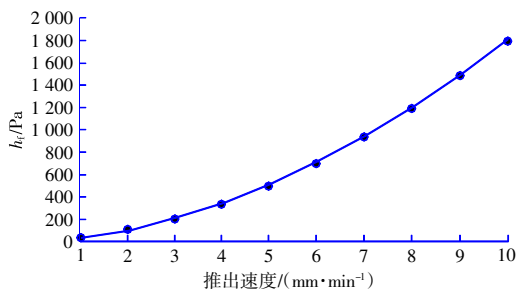


图3 推出速度与沿程压力损失的关系图

Fig. 3 Graph of the relationship between jacking speed and pressure loss along the pipeline

#### 4) 局部水头损失

由于进水管路相对比较复杂,需要考虑进水口、阀口、弯管等因素对局部压力损失的影响,按照《机械设计手册(第五版)第5卷液压-气动》进行计算,采用局部压力损失  $\Delta P_e = \zeta \frac{\rho v_2^2}{2}$ ,其中  $\zeta$  为局部水阻力系数。

经过查表相关  $\zeta$  如表3所示。

表3 进水管系的局部阻力系数  $\zeta$  统计表

Table 3 Statistical table of local resistance coefficients  $\zeta$  of the water inlet piping system

序号	项目	局部阻力系数	数量
1	入口	0.50	1
2	弯头	1.53	5
3	截止阀、电动蝶阀	0.50	10

经过统计,局部阻力系数合为 13.15,局部压力损失最终接头推出速度有线性关系,当推出速度为  $1\text{ mm/min}$  时,局部压力损失为  $156\text{ Pa}$ 。

#### 5) 管路总压力损失

沿程压力损失和局部压力损失形成最终接头推出期间的总压力损失,总压力损失与推出速度之间的关系见图4。

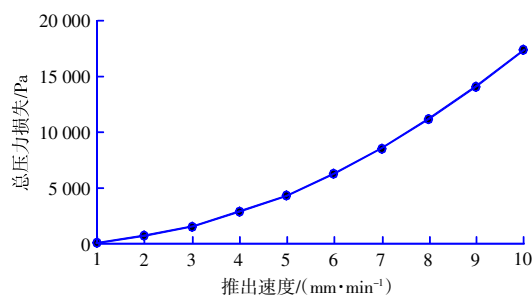


图4 推出速度与总沿程压力损失的关系图

Fig. 4 Graph of the relationship between jacking speed and total pressure loss along the pipeline

管路总压力损失反映到推出过程,是推出段/扩大段结合腔与外部海水存在一个水头差,如果推出速度达到  $10\text{ mm/min}$ ,水头差约为  $1.74\text{ m}$ 。这样需要增加千斤顶的推力克服水头差,如果水头差为  $1.74\text{ m}$ ,需要额外增加的推力为  $7\,800\text{ kN}$ 。

#### 2.4 推出速度的确定

推出系统通过在扩大段和推出段之间安装推拉千斤顶,通过推拉千斤顶和给排水系统相结合实现推出段的推出和回拉作业。液压千斤顶推出系统由8套顶推千斤顶组成,主要用于最终接头推出段的推出,千斤顶通过比例阀控制,可以单独动作,可以比例伸缩,也可同步工作。总推力和回收力分别为  $1\,724\text{ kN}\times 8$ 、 $794\text{ kN}\times 8$ 。

按照千斤顶使用效率为  $80\%$ ,总推力减去前面计算的摩擦力  $784\text{ kN}$ ,得到可以使用的推出力为  $10\,250\text{ kN}$ ,可以满足推出速度为  $10\text{ mm/min}$  的推出要求。

### 3 施工情况

2023年6月10日,项目部按照计划进行最终接头推出,由于进排气孔设计位置与沉管顶板还有5 cm左右的距离,造成M止水带内部残留部分空气,因此M止水带在推出的过程中受到压力损失的影响也会额外增加压力。为了保证止水系统的安全,初始推出过程采用了5 mm/min的速度,根据现场千斤顶和监测到水头差调整速度,后续也按照7 mm/min、8 mm/min进行推出。最终使用了7.2 h完成了1.8 m的千斤顶推出作业,最大的推出速度为8 mm/min。推出过程的施工情况见表4。

表4 最终接头推出施工过程记录表

Table 4 Record table of the jacking construction process for final joint

推出速度/ (mm·min <sup>-1</sup> )	最大实测值		对应计算值	
	合力/kN	液位差/cm	合力/kN	液位差/cm
5	3 332	58	2 762	44
7	4 145	74	4 633	86
8	5 429	115	5 798	112

通过对比分析,沿程压力损失计算情况与实际推出基本符合,推出速度选择在5~8 mm/min是合理的。2023年6月11日,最终接头贯通测量完成,数据显示:最终接头相对E24偏南7.8 mm、最终接头相对E24偏低10.0 mm,最终接头安装精度符合设计及验评标准要求。

### 4 结语

“水力平衡+千斤顶推出”的最终接头推出方式是一种可以实现快速合龙、减少千斤顶数量的选择方案之一。通过专业设计进水管系是水压平衡的关键,在设计中需要结合进水管路的情况考虑沿程水压损失对推出速度、千斤顶选择的影响。通过查找管道的沿程压力损失的相关资料,按照暂定的推出速度进行计算,并匹配千斤顶的受力情况,确定最终接头推出速度的方式是可行的。经过与现场实测数据对比,计算值与实际比较接近,以后在类似的工程中可以参考这种计算方式。

后续沉管隧道如果采用“水力平衡+千斤顶推出”的最终接头推出方式,从水下推出方面提出如下建议:

1) 水力平衡的进水管系尽量简化,采用短

管、少弯头、少阀门的形式。另外尽量采用直径较大的管系。

2) 预留的排气管尽量接近结合腔顶部,减少剩余空气对最终接头推出的影响。

3) 和实际监测情况相比,理论计算的结果略偏大,在实际操作中可以根据工程风险情况忽略部分局部压力损失。

### 参考文献:

- [1] 耿伟光,徐伟.沉管隧道最终接头形式和施工工艺的改进[J].建筑施工,2017,39(1):128-130,133.  
GENG Wei-guang, XU Wei. Final connector form of immersed tunnel and improvement of construction technology[J]. Building Construction, 2017, 39(1): 128-130, 133.
- [2] 秦辉辉,徐国平,黄清飞,等.沉管隧道最终接头技术现状及研究分析[J].中国港湾建设,2023,43(7):61-65.  
QIN Hui-hui, XU Guo-ping, HUANG Qing-fei, et al. Status quo, research and analysis of technology for final jointing of immersed tube tunnel[J]. China Harbour Engineering, 2023, 43(7): 61-65.
- [3] 潘伟,王殿文.顶进节段法最终接头工艺研究及应用[J].中国港湾建设,2024,44(4):1-4.  
PAN Wei, WANG Dian-wen. Research and application of the final joint process using the segment-jacking method[J]. China Harbour Engineering, 2024, 44(4): 1-4.
- [4] JTJ 215—1998,港口工程荷载规范[S].  
JTJ 215—1998, Load code for harbour engineering[S].
- [5] 郭朝,韩涛,陈振婷,等.深中通道最终接头推出段支撑滑轨研究及应用[J].中国港湾建设,2024,44(8):27-32.  
GUO Zhao, HAN Tao, CHEN Zhen-ting, et al. Research and application of final joint supporting slide rail for Shenzhen-Zhongshan Link[J]. China Harbour Engineering, 2024, 44(8): 27-32.
- [6] 李家林,林凡刚,刘永军,等.超大型沉管压载水系统的研发与应用[J].中国港湾建设,2020,40(1):64-68.  
LI Jia-lin, LIN Fan-gang, LIU Yong-jun, et al. Development and application of superlarge immersed tube ballast water system[J]. China Harbour Engineering, 2020, 40(1): 64-68.
- [7] 王杰,朱平,袁超哲,等.基于管道粗糙度的排泥管沿程压力损失计算[J].港工技术,2022,59(3):72-74,78.  
WANG Jie, ZHU Ping, YUAN Chao-zhe, et al. Calculation of pressure loss of dredging pipe based on pipe roughness[J]. Port Engineering Technology, 2022, 59(3): 72-74, 78.
- [8] 金文良,徐国平,郭亚唯,等.深中通道沉管隧道推出式最终接头设计原理分析及试验研究[J].隧道建设,2022(S2):305-311.  
JIN Wen-liang, XU Guo-ping, GUO Ya-wei, et al. Experimental research and design principle analysis on push type final joint of immersed tunnel in Shenzhen-Zhongshan Link[J]. Tunnel Construction, 2022(S2): 305-311.