

文章编号: 1005-0523(2022)03-0047-07



# 盾尾间隙控制分析

于万友

(中铁十九局集团轨道交通工程有限公司, 北京 101300)

**摘要:**针对盾尾间隙控制因素复杂多变的问题,通过盾尾内壁与管片外壁之间的位置关系建立了隧道曲线半径、盾构俯仰角、盾尾覆盖管片长度与盾尾间隙之间的几何关系。基于以上关系,得到了最小盾尾间隙的理论计算方法,并对隧道曲线半径、盾构俯仰角、盾尾覆盖管片长度等影响因素进行分析。结果表明:隧道曲线半径的取值区间为50~400 m时,盾尾间隙受到的影响显著;盾构俯仰角与最小盾尾间隙值之间的关系接近线性,随着俯仰角增大而减小;盾尾覆盖管片的长度对盾尾间隙的影响更显著,可通过调节隧道曲线半径和盾构俯仰角的大小来平衡对盾尾间隙的影响。

**关键词:**地下铁道;地铁隧道;铁道工程;轨道交通;城轨交通

中图分类号:U455.43

文献标志码:A

本文引用格式:于万友.盾尾间隙控制分析[J].华东交通大学学报,2022,39(3):47-53.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20220406.004

## Analysis of Shield Tail Clearance Control

Yu Wanyou

(Rail Traffic Engineering Co., Ltd., China Railway 19th Bureau Group, Beijing 101300, China)

**Abstract:** Aiming at the complex and changeable control factors of shield tail clearance, through the positional relationship between the inner wall of shield tail and the outer wall of segment, the geometric relationship between tunnel curve radius, shield elevation angle, shield tail covering segment length and shield tail clearance was established. Based on the above relationship, the theoretical calculation method of the minimum shield tail clearance was obtained. Moreover, the factors such as tunnel curve radius, shield elevation angle and shield tail covering segment length were analyzed. The results show that the shield tail space is significantly affected when the tunnel curve radius is between 50 m and 400 m. The relationship between the shield pitch angle and the minimum shield tail clearance is nearly linear, and it decreases with the increase of the pitch angle. The length of shield tail covering segment has a more significant effect on shield tail clearance, and the influence on shield tail clearance can be balanced by adjusting the tunnel curve radius and shield pitch angle.

**Key words:** subway; metro tunnel; railway engineering; rail transit; urban rail transit

**Citation format:** YU W Y. Analysis of shield tail clearance control[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022,39(3):47-53.

收稿日期:2021-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52078213);江西省青年科学基金重点项目(20192ACBL21003);江西省主要学科学术和技术带头人资助计划(20194BCJ22009)

目前,国内外学者针对隧道穿越与施工影响方面已经做了一系列的研究。杨芝璐<sup>[1]</sup>,何川<sup>[2]</sup>,王超东<sup>[3]</sup>等研究了不同叠交角度下新建隧道对既有隧道的影响规律,发现在加载一定的情况下叠交角度越小,既有隧道变形越大;张轩<sup>[4]</sup>,陈大川<sup>[5]</sup>等利用数值仿真软件分析了隧道施工对沿线构筑物的影响;张斌<sup>[6]</sup>通过对地层损失率的研究,对大直径盾构隧道产生的应力释放与地表位移进行了分析研究;孙廉威<sup>[7]</sup>通过改变模型参数研究了不同工况既有地下管线存在下的开挖面失稳机制。张岳强<sup>[8]</sup>,董礼<sup>[9]</sup>,Aygarr<sup>[10]</sup>,Liang<sup>[11]</sup>等对盾构机穿越隧道与构筑物时产生的风险进行分析,并提出相应的解决办法。潘涛<sup>[12]</sup>对盾构近距离上穿运营隧道的变形规律进行探索,综合考虑既有隧道的纵向与水平变形,提出了最佳的盾构掘进速度。王超东等<sup>[13]</sup>采用室内模型实验模拟了新建隧道斜交既有隧道的工况,研究了施工对既有隧道自身结构及周围土体的影响。李小奇<sup>[14]</sup>,吴凡<sup>[15]</sup>等基于不同工况提出了下穿施工时不同上部构筑物的加固方案,并对其加固效果进行了分析。

## 1 盾尾间隙的控制计算分析

### 1.1 隧道曲线半径与盾尾间隙的相关计算分析

为了更好地控制盾构在曲线上掘进施工,对盾构机盾尾内壁与管片外壁之间的间隙进行分析计算;而由于不同盾构机的设备参数是不同的,因此盾尾间隙的初始值也不一样。假设管片环的拼装是符合理想状态的,并且盾尾间隙的初始值为 $y$ ,其计算简图如图1所示,计算式如下

$$x = \left(R - \frac{D}{2}\right) (1 - \cos \beta) \quad (1)$$

$$\sin \beta = \frac{l}{R - \frac{D}{2}} \quad (2)$$

$$x = \left(R - \frac{D}{2}\right) \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{l}{R - D/2}\right)^2}\right) \quad (3)$$

$$\delta = y - \frac{1}{2}x \quad (4)$$

式中: $R$ 为隧道曲线半径,m; $D$ 为管片环外直径,mm; $l$ 为盾尾覆盖管片的长度,m; $x/2$ 为盾构转弯需要的盾尾间隙,mm; $\delta$ 为最小盾尾间隙值,mm; $y$ 为盾尾间隙初始值,mm。

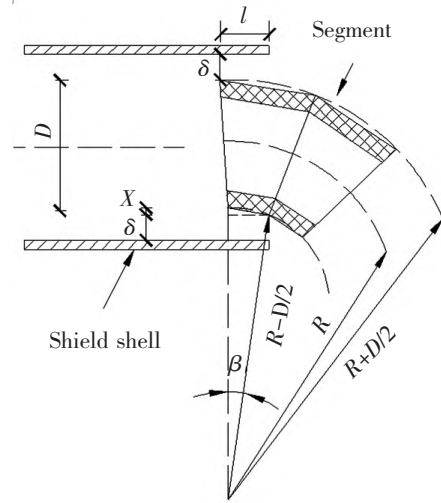


图1 盾构曲线段施工时盾尾间隙计算简图

Fig.1 Calculation diagram of shield tail clearance during shield construction

### 1.2 盾构俯仰角影响下的盾尾间隙计算分析

为了适应盾构俯仰角的变化情况,需对盾构在曲线段上掘进时所需要的盾尾间隙下,进一步分析在受到俯仰角的影响下,盾尾间隙的变化情况。其计算简图如图2所示,图2中的 $x$ 值与式(1)中的 $x$ 值算法一致但值的大小不同,而图2中的 $\delta$ 值与图1中的 $\delta$ 值是不一样的,可从图2与式(4)得到计算式如下

$$\delta' = l \tan \alpha \quad (5)$$

$$\delta = y - \frac{1}{2}x + \frac{1}{2}\delta' \quad (6)$$

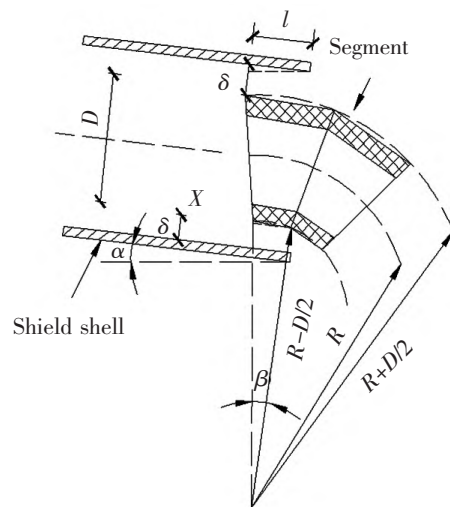


图2 盾构施工受俯仰角影响下的盾尾间隙计算简图

Fig.2 Calculation diagram of shield tail clearance under the influence of pitch angle in shield construction

式中: $\delta'/2$  为盾构俯仰角变化所产生的盾尾间隙变化量,mm; $\alpha$  为盾构产生的俯仰角, $(^\circ)$ 。

当在直线段上施工,且只受到俯仰角的影响时,其盾尾间隙计算式为

$$\delta=y-\frac{1}{2}\delta' \quad (7)$$

## 2 盾尾间隙的影响因素分析

### 2.1 隧道曲线半径对盾尾间隙的影响

隧道曲线半径对盾尾间隙的影响是显著的,从式(3)可知,在管片大小确定的情况下,盾尾间隙主要与隧道曲线半径和盾尾覆盖管片的长度有关;并且隧道曲线半径与盾尾覆盖管片的长度关系到盾尾间隙改变量的大小;其中隧道曲线半径是变量时,对盾尾间隙的影响是最显著的。并且在管片环直径的大小已知时,可以通过公式计算出不同隧道曲线半径下的盾尾间隙改变量。

本次计算是以无锡地铁的盾构设备参数进行相关计算,其中盾尾外径为 6.37 m,盾尾盾壳厚度为 40 mm,楔形管片环的外直径为 6.2 m,盾尾间隙为 45 mm;假设盾尾覆盖管片的最大长度与管片幅宽的值是一致的,并且根据国内管片现状,把管片幅宽  $L$  的取值为 1,1.2,1.5,2 m;隧道曲线半径的取值范围是 50~1 200 m。通过上述条件计算得到的盾尾间隙改变量与隧道曲线半径的关系曲线图,如图 3 所示。并且盾尾间隙的初始值为 45 mm,由式(4)得到最小盾尾间隙值与隧道曲线半径的关系曲线图,如图 4 所示。

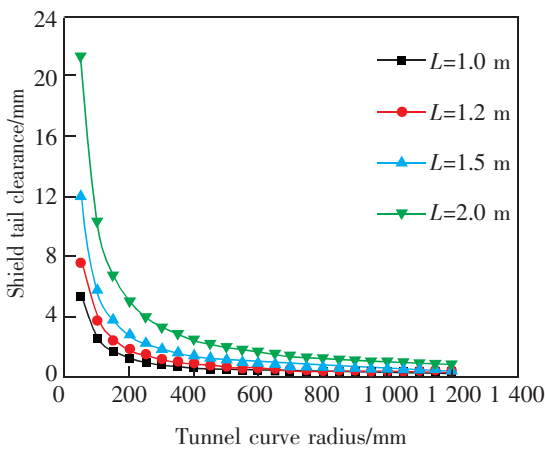


图 3 隧道曲线半径对盾尾间隙的影响

Fig.3 Influence of tunnel curve radius on shield tail clearance

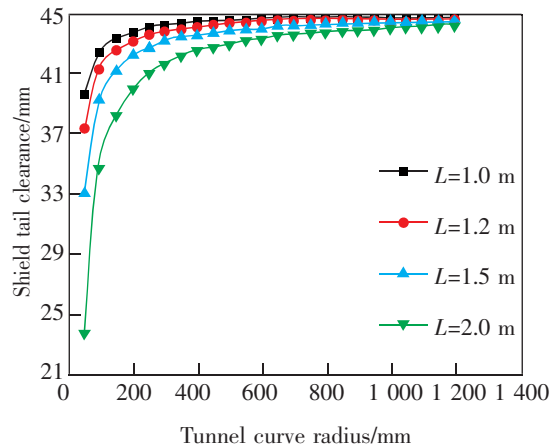


图 4 隧道曲线半径对应的最小盾尾间隙

Fig.4 Minimum shield tail clearance corresponding to tunnel curve radius

在管片外直径确定的情况下,盾尾间隙主要受隧道曲线半径和管片幅宽的影响。从盾尾间隙所需改变量与隧道曲线半径关系曲线图(图 3)可以看出,盾尾间隙受到曲线半径的影响更显著;管片幅宽的大小不相同,盾尾间隙所需改变量不同,但曲线图的整体趋势都是盾尾间隙改变量随着曲线半径的增大而逐渐减小。而从盾尾间隙值与曲线半径关系曲线图(图 4)可以看出,最小盾尾间隙值随着隧道曲线半径的增大而增大;其中曲线半径取值的范围为 50~400 m 是盾尾间隙变化最明显的阶段,盾尾间隙随着曲线半径的增大而逐渐从快到慢的增大;曲线半径的取值为 400~800 m 是盾尾间隙变化逐渐减缓的阶段,曲线图随着曲线半径的增大逐渐趋近于一条直线;而当曲线半径的取值范围为 800~1 200 m 是盾尾间隙变化最不明显的阶段,关系曲线图已基本趋近于一条直线。

### 2.2 盾构俯仰角对盾尾间隙的影响

盾尾间隙在盾构机制造时就已经确定了具体数值,并且盾尾间隙值相比于盾构机的其它参数来说是微不足道的,有时候盾构机掘进施工过程中出现的微小变化也是有可能对盾尾间隙造成较大影响的;而盾构俯仰角的产生就是一种微小的变化,其对盾尾间隙的影响是十分显著的。从式(5)可知,俯仰角越大盾尾间隙所需的改变量就越大,而盾尾间隙在盾构机制造时就已经是一个确定的值;因此盾构俯仰角不能过大,以免出现盾尾间隙所需的改变量大于盾尾间隙值的情况。

无锡地铁的盾构机参数中盾尾间隙的取值为

45 mm,通过式(5),式(7)可算出盾构俯仰角在不同管片幅宽时所能取到的最大值;并且管片幅宽越大,盾构俯仰角所能取得的值越小。在管片幅宽不同的情况下绘制关系图时,俯仰角能取得的最大值为管片幅宽最大时所对应的俯仰角值。如图5所示,不同盾构俯仰角下所需要的盾尾间隙关系图;又盾尾间隙的初始值为45 mm,由式(7)得到盾构俯仰角与盾尾间隙值的关系曲线图,如图6所示。

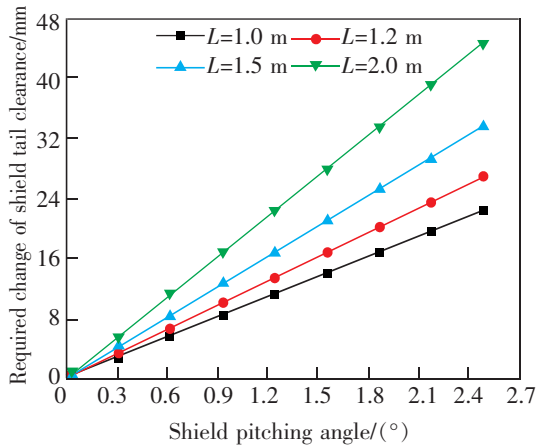


图5 盾构俯仰角对盾尾间隙的影响

Fig.5 Influence of shield elevation angle on shield tail clearance

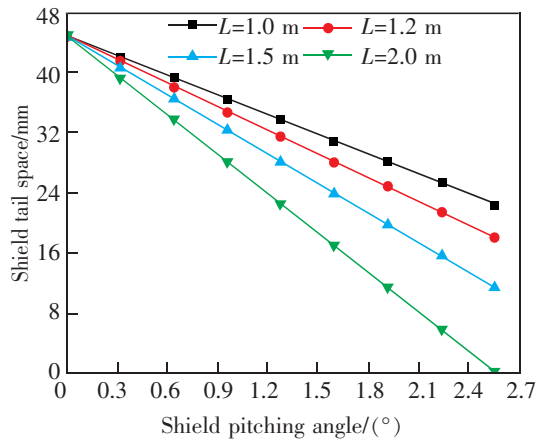


图6 盾构俯仰角对应的最小盾尾间隙值

Fig.6 Minimum shield tail clearance corresponding to shield elevation angle

从图5可知,盾构俯仰角与管片幅宽对盾尾间隙的影响是显著的,其中俯仰角对盾尾间隙的影响更大,且俯仰角的取值范围与盾尾间隙所需改变量都是微小的变化。虽管片幅宽大小不同,但曲线的趋势都是盾尾间隙改变量随着盾构俯仰角的增大而增大;并且管片幅宽越大,盾尾间隙的改变量的增长速率越快。而从盾构俯仰角与盾尾间隙值的关

系曲线图(图6)可以看出,最小盾尾间隙值随着盾构俯仰角的增大而减小,且盾构俯仰角与盾尾间隙值的关系非常接近线性关系。管片幅宽越大,盾构俯仰角所能取得的最大值与取值范围越小;并且关系曲线图的总体趋势是盾构俯仰角越大,对盾尾间隙的影响越大,最小盾尾间隙的值也就越小。

### 2.3 盾尾覆盖管片长度对盾尾间隙的影响

盾构隧道是由管片拼装而成的,而其中管片幅宽决定了盾构机在曲线段上顶推一环所需的距离,并且也决定了盾构机盾尾所需覆盖管片的最大长度。从式(1),式(2)可以看出,当隧道曲线半径不变时盾尾覆盖管片的长度越长,实际施工中盾构转弯所需的盾尾间隙就越大;然而所需盾尾间隙越大,最小盾尾间隙值就越小,当盾尾间隙过小时,盾尾内壁壳上的力会直接挤压到管片外壁上,造成盾构掘进中盾尾与管片发生碰撞。反过来当管片幅宽过小时,造成盾尾间隙就越大,盾尾刷的密封效果就越差,密封效果不好将会导致水泥浆出现渗漏。因此为了避免出现盾尾覆盖管片长度不当而造成盾尾间隙过大或过小的情况发生,对于管片幅宽就需要选择适合现场施工的。

盾构掘进施工过程中,盾尾覆盖管片的最大长度是随着盾构顶推前进而逐渐减小的;并且盾尾覆盖管片的长度与盾尾间隙的计算是息息相关的,不管盾尾间隙是受到隧道曲线半径还是盾构俯仰角的影响都需要通过盾尾覆盖管片的长度来计算盾尾间隙值。并且可以通过公式把盾尾覆盖管片的长度设置成变量,绘制出不同条件下的关系曲线图。如图7所示,盾尾覆盖管片长度与盾尾间隙值的关

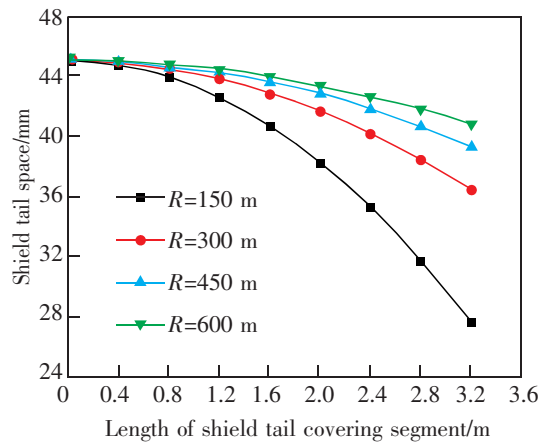


图7 不同曲线半径下盾尾覆盖管片长度对盾尾间隙的影响

Fig.7 Effect of shield tail covering segment length on shield tail clearance under different curve radius

系曲线图;如图8所示,盾尾间隙与盾尾覆盖管片长度的关系曲线图。

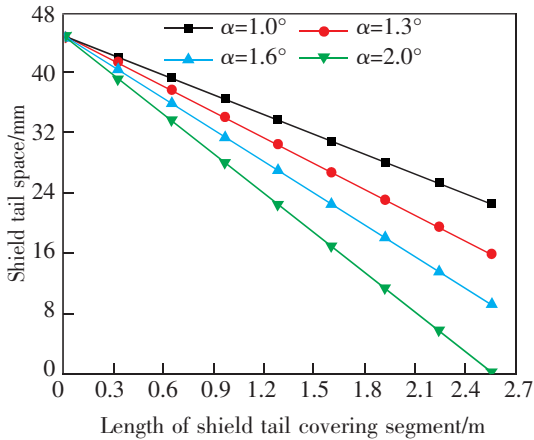


图8 不同俯仰角下盾尾覆盖管片长度对盾尾间隙的影响  
Fig.8 Effect of shield tail covering segment length on shield tail clearance under different pitch angles

从图7可以看出,在隧道曲线半径为一确定值时,盾尾覆盖管片的长度越长,最小盾尾间隙值就越小;也就说明盾构在曲线段上施工时,最小盾尾间隙值是随着盾构不断向前掘进而逐渐增大的,即盾尾覆盖管片的长度是随着盾构掘进而逐渐减小的;隧道曲线半径越小,最小盾尾间隙值的变化趋势越快。而从图8可以看出,在盾构俯仰角的值是确定的时候,盾尾覆盖管片的长度越大,盾尾间隙的最小值越小;并且与图7对比发现,图8受到盾尾覆盖管片长度的影响更显著,且盾尾间隙值与盾尾覆盖管片长度的关系非常接近线性关系;并且俯仰角越大,最小盾尾间隙值的变化趋势越快。

### 3 盾尾间隙控制措施与建议

#### 3.1 盾尾间隙控制措施

根据盾尾间隙的分析计算与盾尾间隙的影响因素分析可知,由于盾尾间隙大小的控制范围,以及隧道曲线半径、盾构俯仰角、盾尾覆盖管片的长度的大小,决定了盾尾间隙的控制措施,主要如下。

1) 隧道曲线半径对盾尾间隙的影响分析表明,在管片大小确定的情况下,盾尾间隙主要与隧道曲线半径和盾尾覆盖管片的长度有关;其中隧道曲线半径对盾尾间隙的影响是更显著的。在管片直径与盾尾覆盖管片的长度已知时,可通过改变隧道曲线半径来调节最小盾尾间隙值,找到适合施工环境的

盾尾间隙值。

2) 盾构俯仰角对盾尾间隙的影响分析表明,盾构俯仰角的产生在盾构掘进施工中的变化是微小的,但其对盾尾间隙的影响是十分显著的;并且俯仰角越大盾尾间隙所需的改变量就越大,而盾尾间隙在盾构机制造时就已经是一个确定的值,因此盾构俯仰角不能过大,避免出现盾尾间隙所需的改变量大于盾尾间隙初始值的情况。

3) 盾尾覆盖管片的长度对盾尾间隙的影响分析表明,当隧道曲线半径不变时盾尾覆盖管片的长度越长,实际施工中盾构转弯所需的盾尾间隙就越大,盾尾间隙值就越小;反过来当盾尾覆盖管片的长度过小时,造成的盾尾间隙值就越大。为了避免出现盾尾覆盖长度不当而造成盾尾间隙过大或过小的情况发生,对于管片幅宽就需要选择适合现场施工的,并且也可通过调节隧道曲线半径和盾构俯仰角的大小来改变最小盾尾间隙值。

#### 3.2 盾尾间隙控制建议

由以上关于盾尾间隙控制措施可知,影响盾尾间隙的因素是多方面的,为此对盾尾间隙的控制提出以下建议。

1) 在管片外直径与盾尾覆盖管片的最大长度已知时,盾尾间隙的大小跟隧道曲线半径的大小是息息相关的。因此,为了使盾尾间隙值满足施工条件,尽量使用更大的隧道曲线半径。

2) 在盾构俯仰角增大的过程中所需的盾尾间隙量是非常多,而盾尾间隙的初始值是一定的。为了使盾构俯仰角产生的盾尾改变量满足盾尾间隙的初始值,尽量使产生的盾构俯仰角更小。

3) 盾尾覆盖管片的长度对盾尾间隙的影响是显著的,其对隧道曲线半径和盾构俯仰角都有一定程度的影响。对于盾尾覆盖管片长度尽量选择适中的,即管片幅宽的选择要适当。

### 4 结论

1) 在管片环外直径已知,并且盾尾间隙在受到隧道曲线半径影响的情况下,可知隧道曲线半径对盾尾间隙的影响主要体现在曲线半径为50~400 m的区间上,并且在曲线半径大于600 m后对盾尾间隙的影响逐渐减小。

2) 由盾构机前重后轻而产生的盾构俯仰角,对盾尾间隙的影响是显著的,且盾构俯仰角与盾尾间

隙值的关系非常接近线性关系。并且产生的俯仰角是有一定界限的,不能过大,避免出现所需盾尾间隙改变量大于盾尾间隙初始值的情况。

3) 盾尾覆盖管片的长度越大,对盾尾间隙的影响就越显著,且盾尾覆盖管片的长度可通过隧道曲线半径来减小对盾尾间隙的影响。即盾尾覆盖管片的长度过大时,可通过增大隧道曲线的半径来调节。

4) 盾构俯仰角受到盾尾覆盖管片的长度的影响是显著的,且不同盾构俯仰角下盾尾间隙值与盾尾覆盖管片长度的关系非常接近线性关系。而为了使最小盾尾间隙值符合施工要求,覆盖管片的长度越长,产生的俯仰角就要越小。

#### 参考文献:

- [1] 刘成,管会生,谢友慧,等. 盾构掘进姿态和纠偏曲线研究[J]. 现代隧道技术,2019,56(4):105-112.  
LIU C, GUAN H S, XIE Y H, et al. Research on shield tunneling attitude and deviation correction curve[J]. Modern Tunnel Technology, 2019, 56(4): 105-112.
- [2] 彭涌涛. 盾构掘进姿态控制技术[J]. 森林工程, 2013, 29(6): 106-110.  
PENG Yongtao. Research on attitude control technology of shield tunneling[J]. Forest Engineering, 2013, 29(6): 106-110.
- [3] 王春凯. 盾构姿态控制研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(11): 1389-1393.  
WANG C K. Research on shield attitude control[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(11): 1389-1393.
- [4] 任颖莹,孙振川,褚长海. 盾构推进姿态控制策略研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(6): 1038-1044.  
REN Y Y, SUN Z C, CHU C H. Research on shield propulsion attitude control strategy[J]. Tunnel construction(Chinese and English), 2019, 39(6): 1038-1044.
- [5] LI P, LU Q R, CHEN X P, et al. Influence of shield tail clearance on surface settlement during shield construction in soft soil area[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 719(3):
- [6] 张治国,张孟喜. 软土城区土压平衡盾构上下交叠穿越地铁隧道的变形预测及施工控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3428-3439.  
ZHANG Z G, ZHANG M X. Deformation prediction and construction control of Earth Pressure Balance Shield Crossing subway tunnel in soft soil urban area[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3428-3439.
- [7] KOMIYA K, SOGA K, AKAGI H, et al. Finite element modelling of excavation and advancement processes of a shield tunnelling machine[J]. Soils & Foundations, 1999, 39(3): 37-52.
- [8] 杨志勇,杨星,江玉生,等. 盾构近距离上跨既有运营隧道施工控制技术[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(11): 1898-1904.  
YANG Z Y, YANG X, JIANG Y S, et al. Construction control technology of shield tunneling over existing operating tunnels[J]. Tunnel Construction(Chinese and English), 2019, 39(11): 1898-1904.
- [9] 吴凡. 盾构下穿高架桥桩基的托换施工技术分析[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(2): 15-21.  
WU F. Analysis on underpinning construction technology of shield under Viaduct Pile Foundation[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(2): 15-21.
- [10] SUGIMOTO M, SRAMOON A. Theoretical model of shield behavior during excavation I: theory[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(2): 138-155.
- [11] 沈翔,袁大军. 盾构俯仰角变化对盾构-土相互作用影响研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1366-1376.  
SHEN X, YUAN D J. Study on the influence of shield pitch angle change on shield soil interaction[J]. Geotechnical Mechanics, 2020, 41(4): 1366-1376.
- [12] 夏杰,付龙龙,周顺华,等. 盾尾千斤顶推力与盾构机转角匹配关系研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(S2): 696-701.  
XIA J, FU L L, ZHOU S H, et al. Study on matching relationship between shield tail Jack thrust and shield machine angle[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S2): 696-701.
- [13] YUE M, SUN W, WEI J. Sliding mode robust controller for automatic rectification of shield machine[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(2): 536-541.
- [14] YUE M, WEI J, SUN W, et al. Dynamic mechanism and key rectification techniques of shield machine in the vertical plane[C]//International Conference on Intelligent Robotics and Applications 2009; Intelligent Robotics and Applications, 2009.
- [15] 梁荣柱,夏唐代,林存刚,等. 软土地区盾构施工竖向姿态控制研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(5): 152-157.  
LIANG R Z, XIA T D, LIN C G, et al. Research on vertical attitude control of shield construction in soft soil area[J].

- Modern Tunnel Technology, 2015, 52(5): 152-157.
- [16] 张爱军. 上软下硬地层盾构掘进姿态施工参数模糊控制研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(11): 2920-2927.  
ZHANG A J. Study on fuzzy control of shield tunneling attitude and construction parameters in upper soft and lower hard strata[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(11): 2920-2927.
- [17] 赵栓峰, 耿龙龙, 丁志兵等. 基于卷积神经网络的盾尾间隙测量系统研究[J]. 现代电子技术, 2020, 43(23): 146-149.  
ZHAO S F, GENG L L, DING Z B, et al. Research on shield tail clearance measurement system based on convolutional neural network[J]. Modern Electronic Technology, 2020, 43(23): 146-149.
- [18] 陈健, 周兆钊, 刘飞香, 等. 基于盾构机盾尾间隙空间结构的视觉测量研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(19): 116-121.  
CHEN J, ZHOU Z Z, LIU F X, et al. Research on visual measurement based on shield tail clearance spatial structure of shield machine[J]. Machine Tool and Hydraulic, 2020, 48(19): 116-121.
- [19] 路亚缙, 李光. 基于超声波测距技术的盾构盾尾间隙测量系统研制[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(S2): 135-140.  
LU Y T, LI G. Development of shield tail clearance measurement system based on ultrasonic ranging technology[J]. Tunnel Construction (Chinese and English), 2019, 39(S2): 135-140.
- [20] 路亚缙, 徐智良. 基于 Labview 的视觉盾尾间隙测量系统研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(1): 197-202.  
LU Y T, XU Z L. Research on visual shield tail clearance measurement system based on Labview[J]. Modern Tunnel Technology, 2020, 57(1): 197-202.
- [21] 孙连, 庄欠伟. 盾构盾尾间隙测量装置试验研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(S1): 56-59.  
SUN L, ZHUANG Q W. Experimental study on shield tail clearance measuring device[J]. Modern Tunnel Technology, 2016, 53(S1): 56-59.
- [22] GUO J B, ZHANG L B, LIU J Z, et al. The research on the measure system of the shield tail clearance based on digital image processing technique[J]. Advanced Materials Research, 2013: 24-28.
- [23] HE C B, XU C, XIONG D D. Development of an automatic measurement device for double laser shield tail gap based on image recognition technology[J]. Earth and Environmental Science, 2021, 783: 23-25.



第一作者: 于万友(1987—), 男, 高级工程师, 研究方向为盾构隧道施工。2011年本科毕业于中国地质大学长城学院。E-mail: 1428974281@qq.com。

(责任编辑: 姜红贵)