

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.11.057

# 盾构隧道通用楔形环管片设计排版技术研究

易琼

(广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507)

**摘要:** 盾构隧道通用楔形环是目前应用最为广泛的一种管片形式,具有制作简便、通用性强等优点。其中,管片楔形量的大小直接影响通用楔形环管片的线路拟合能力和效果。为研究盾构隧道通用楔形环管片的设计排版,介绍了目前常用的通用楔形环管片楔形量的计算方法,然后结合广州某地铁线路,提出一种简便实用的通用楔形环管片设计排版流程和算法,并基于所提出的算法采用 MATLAB 编制了管片排版程序,依据工程实例进行了排版计算,得到的排版结果可以为管片设计施工提供依据。经过计算和对比分析发现,楔形量越大的管片拟合效果不一定越好,存在一个最合适的楔形量范围,而外径 6.4 m、环宽 1.5 m 的通用楔形环管片在拟合曲线半径为 350 m 的线路时的最优楔形量约为 28.5~35 mm。

**关键词:** 盾构隧道;通用楔形环;管片排版;楔形量;线路拟合偏差

中图分类号: U452.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)11-0238-04

## 0 引言

盾构隧道通常采用预制装配式混凝土管片拼装而成,管片设计安装不当会导致线路拟合偏差过大,管片破损、错台,影响最终成型的隧道质量。目前我国盾构隧道主要通过标准化+左右转弯环和通用楔形环两种组合形式来拟合隧道设计线路。其中,通用楔形环管片借助管片宽度差形成楔形量,通过单种楔形环的各类拼装组合来拟合包括直线、圆曲线、缓和曲线等在内的各种形式的线路。由于具有通用性强、形式简单、质量易保证等优点,通用楔形环已成为当前国内盾构隧道中应用最为广泛的管片类型<sup>[1-2]</sup>。

通用环管片的楔形量直接决定了整条线路拟合效果的好坏,其大小除了应满足最小曲线半径要求外,还应满足便于施工实时纠偏的需求。对于楔形量的计算,小泉淳<sup>[3]</sup>、宋成辉<sup>[4]</sup>的研究都各自给出了不同的管片楔形量计算方法。而针对不同楔形量管片的拟合效果,张稳军等<sup>[5]</sup>综合比选各类计算方法后,结合不同楔形量管片的线路拟合情况提出了一种盾构通用环楔形量多层次控制设计流程。随着技术的进步,借助计算机的管片计算排版已成为当前的主流方向。李伟平等<sup>[6]</sup>基于数值方法,提出了一种进行通用楔形管片排版的核心算法,并借助自编程序验

证了算法的可靠性。事实证明,通过计算机排版来穷举所有可能从而确定最合适的管片楔形量是今后管片设计与排版的发展方向。

本文通过对通用楔形环管片设计排版技术进行研究探讨,提出一种简单实用的管片排版计算方法,以某一实际工程项目为例,基于所提出的方法进行排版设计,验证了其可行性。

## 1 通用楔形环几何性质及参数计算

### 1.1 通用楔形环几何参数

在盾构隧道中,针对直线段、左转弯段、右转弯段等不同线路工况,通用楔形环管片可以通过有序旋转和组合拼装来实现一种管片类型拟合不同曲率半径的线路。因此,通用楔形环具有管片类型尺寸固定、模具利用率高等优点,是目前最为常用的衬砌圆环形式。通用楔形环的结构形式如图 1 所示。

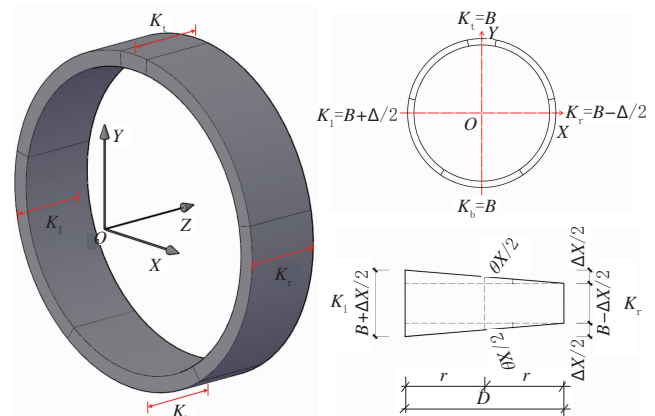


图 1 通用楔形环的几何形状

收稿日期: 2022-11-21

作者简介: 易琼(1996—),男,硕士,助理工程师,从事轨道及地下工程结构设计与研究工作。

由图1可知,通用楔形环管片的几何参数主要有直径 $D$ 、厚度 $t$ 、环宽 $K$ 、楔形量 $\Delta$ 、超前量 $\Delta'$ 、环楔变角 $\theta$ 。通用楔形环的环宽大小在不同位置是不同的,上下左右的环宽可分别定义为 $K_l$ 、 $K_b$ 、 $K_r$ 、 $K_t$ ,其中最大环宽定义为 $K_{\max}$ ,最小环宽定义为 $K_{\min}$ ,标准环宽定义为 $B$ 。而管片楔形量是最大环宽与最小环宽之间的差值,即 $\Delta=K_{\max}-K_{\min}$ 。

一般来说,管片的直径和厚度可根据使用需求、结构受力确定,标准环宽可根据管片运输拼装能力来确定,而管片楔形量则主要取决于所拼装拟合线路的曲线半径大小。

## 1.2 盾构管片拼装方式

虽然通用楔形环的楔形量是固定的,但可以通过旋转改变在平竖方向的超前量。然而其旋转的角度并不是任意的。

为满足环与环之间螺栓连接的要求,管片拼装往往设计有特定的点位。管片拼装点指的是管片在拼装时封顶块(K块)中部所在的位置,相邻的拼装点之间的角度称为分度。国内盾构隧道常用的分度有 $18^\circ$ 、 $22.5^\circ$ 、 $36^\circ$ ,相对应的一环管片内会有20、16、10个拼装点位。封顶块位置确定后,整环管片的位置随即确定。由于封顶块只可能出现在固定的管片拼装点,故通用环旋转的角度只能是分度的倍数。以 $18^\circ$ 分度为例,共有20种可能的管片拼装位置,如图2所示。

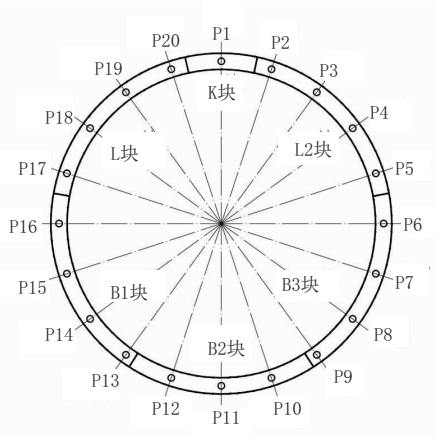


图2 管片拼装位置示意

通用环自身的旋转角度和相互之间的拼装方式会影响到最终的线路拟合情况。因此在管片设计排版拟合前,必须选定拼装形式,确定合适旋转角,从而实现最佳的拟合效果。

## 1.3 管片超前量计算

管片的楔形量通常是依据线路最小曲线半径,同时综合考虑拼装方式、管片外径及环宽后确定而

得。而管片超前量则为管片楔形量在水平和竖向方向的投影,是通用环直接用于平面和竖向拟合线路的参数。以右楔形环为例,初始状态和旋转后的衬砌圆环几何参数如图3所示。

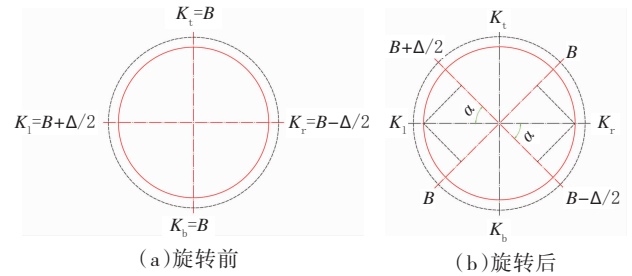


图3 考虑旋转后的通用楔形环几何参数示意图

由图3可见,确定出标准环宽轴 $B-B$ 的位置后,可根据几何关系得到楔形环上任一点的环宽,从而得到管片超前量如下:

$$\Delta X = K_l - K_r = (B + \frac{\Delta}{2} \cos \alpha) - (B - \frac{\Delta}{2} \cos \alpha) = \Delta \cos \alpha \quad (1)$$

$$\Delta Y = K_b - K_t = (B - \frac{\Delta}{2} \sin \alpha) - (B + \frac{\Delta}{2} \sin \alpha) = -\Delta \sin \alpha \quad (2)$$

$$\theta X = 2 \arctan \frac{K_l - K_r}{2D} = 2 \arctan \frac{\Delta \cos \alpha}{2D} \quad (3)$$

$$\theta Y = 2 \arctan \frac{K_b - K_t}{2D} = 2 \arctan \frac{-\Delta \sin \alpha}{2D} \quad (4)$$

式中: $\Delta$ 为管片楔形量,mm; $K_l$ 为管片左侧环宽,mm; $K_r$ 为管片右侧环宽,mm; $K_b$ 为管片下侧环宽,mm; $K_t$ 为管片上侧环宽,mm; $\Delta X$ 为平面的管片超前量,mm; $\theta X$ 为平面的管片环楔变角,mm; $\Delta Y$ 为竖向的管片超前量,mm; $\theta Y$ 为竖向的管片环楔变角,mm; $\alpha$ 为管片的旋转角,mm。

## 2 管片设计排版拟合技术研究

### 2.1 管片设计排版流程与核心算法

通常来说,给定线路后便可以确定圆心角、曲线半径等要素,由此可算得每一环管片对应线路的偏转角。管片的设计排版思路就是根据给定的管片几何参数,基于线路偏转角选取合适的管片自身旋转角和组合方式,计算出平竖方向的超前量和环楔变角后以此为依据进行排版。除了极个别情况,大多数情况下每一环的拼装都会产生误差,累计下来产生拟合偏差。根据偏差及时进行纠偏,确保整体和局部拟合偏差都在允许范围内,最后得到给定线路的通用管片环排列形式。纠偏原则为:第 $N$ 环的角度偏差 $\delta\theta$ 不应大于管片的平均环楔变角 $\bar{\theta}$ ,即可据此求得 $N$ 的大小。同时,为保证纠偏效果,可以在第 $N/2$ 环就提前插入反向偏差的管片环作为纠偏环。

从上述流程可知,管片的楔形量等几何参数决定了线路拟合效果的好坏。为尽量减小拟合误差,方便实际施工中的管片拼装,有必要预先根据设计线路和管片几何性质进行设计排版,找出拟合偏差最小的楔形量和对应排版组合形式。

通用楔形环管片的设计排版流程如图4所示。通过该流程可以计算出给定线路条件下不同楔形量时通用楔形环的拟合偏差大小,并从而确定最合适的楔形量。

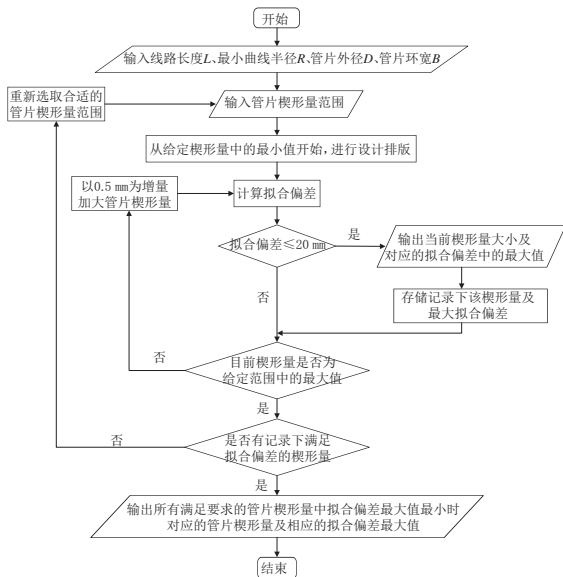


图4 通用楔形环管片排版设计流程

以上述流程和算法思想为基础,基于MATLAB开发“盾构隧道通用楔形环管片排版程序”,求解出给定条件下的最优管片楔形量,为管片的设计排版和拼装提供一定的参考。

2.2 工程案例

广州某地铁线路的区间隧道采用内径5.8 m的标准衬砌圆环管片,管片具体参数见表1。整条线路长约31.7 km,其中最小曲线半径为350 m,详细的线路情况见表2。

表1 管片设计参数

项目	设计参数
衬砌外径/mm	6 400
衬砌厚度/mm	300
衬砌内径/mm	5 800
衬砌环宽/mm	1 500
分块方式	6块,1封顶块+2邻接块+3标准块
分块角度	封顶块22.5°,其余67.5°

受限于篇幅,本文仅以曲线半径350 m、长707.2 m的这一段圆曲线进行排版计算。

2.3 工程案例拟合计算分析与效果对比

根据最小曲线半径350 m,代入管片设计参数后,基于理论楔形量计算公式<sup>[5]</sup>得到初始管片楔形量

表2 区间线路平面特征统计

类别	长度/m	
直线	24 386.5	
曲线	R=350 m	707.2
	350 m < R ≤ 500 m	770.8
	500 m < R ≤ 600 m	2 254.0
	R > 600 m	3 313.7
总计	31 732.2	

约为27.4 mm,进一步根据其中不同拼装形式的楔形量计算公式<sup>[5]</sup>反推得到考虑错缝拼装后其对应的拟合半径为368.4 m。可见,理论楔形量无法满足350 m的拟合半径要求,故适当放大范围后选定管片楔形量计算范围为25~40 mm,其中在27.4 mm附近间距加密进行计算。利用上述开发的管片排版程序,输入相关参数后进行排版计算,得到的结果见表3。

表3 拟合排版结果

管片楔形量/mm	拟合排版情况	理论最大平面拟合偏差/mm	实际最小拟合半径/m
25	无法完成拟合排版,多环管片线路拟合偏差超限	79.178	403.8
27.5	无法完成拟合排版,多环管片线路拟合偏差超限	15.699	367.1
28.5	可以完成拟合排版,拟合效果好,线路平面拟合偏差在10 mm内	3.56	354.2
30	可以完成拟合排版,拟合效果好,线路平面拟合偏差在10 mm内	6.17	336.5
35	可以完成拟合排版,拟合效果好,线路平面拟合偏差在10 mm内	9.05	288.4
40	可以完成拟合排版,拟合效果较好,线路平面拟合偏差在15 mm内	13.03	252.4

从表3中结果来看,楔形量小于28.5 mm的通用环管片均无法完成排版,拟合偏差呈不断增长发散趋势。而从28.5 mm至40 mm的管片则均可以完成线路排版,最大偏差基本在20 mm以内。注意到,计算的理论管片楔形量无法满足线路拟合要求,需适当增大。而在满足要求的楔形量范围内,楔形量越大,最大拟合偏差反而越大。这表明并不是楔形量越大,拟合效果就越好,而是存在一个合适的楔形量范围。

接下来将可以满足线路拟合排版要求的楔形量及其对应的线路拟合偏差绘制成曲线,如图5所示。

由图5可见,楔形量为28.5 mm时的拟合偏差最小,理论最大拟合偏差仅为3.56 mm,拟合效果最好;30 mm楔形量次之,理论最大拟合偏差为6.17 mm;之后随着楔形量的增大,拟合偏差也不断增



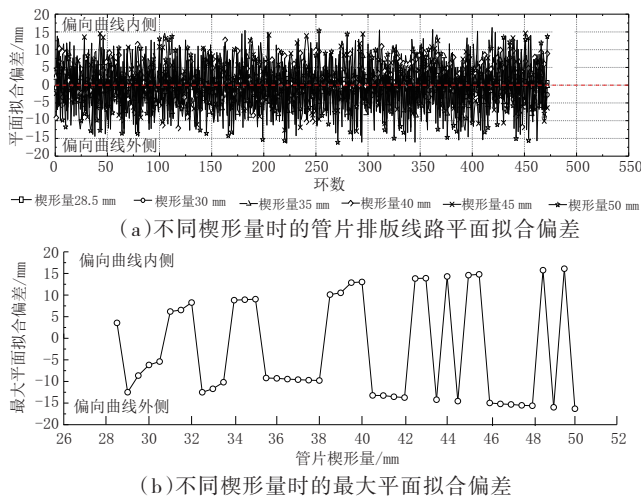


图5 不同楔形量管片拟合设计线路( $R=350\text{ m}$ )结果

大。在28.5 mm、30 mm这两种楔形量中,虽然30 mm楔形量比28.5 mm楔形量的拟合偏差更大,但也在10 mm误差范围内,并且管片制作精度更易保证,制作拼装施工误差更小。因此,建议案例中的通用楔形环管片楔形量选为30 mm。

管片的拟合半径受多种因素影响,其中最关键的是自身旋转角。管片因拼装要求自身旋转后,对应线路平面上的超前量减小,造成可拟合的最小半径增大。由于通用环的旋转角随着拼装在不断变化,相应地拟合半径也不断变化,通过计算拟合半径来选用管片进行拼装变得十分困难。而采用本文提出的排版算法直接进行排版,根据拟合偏差来选定合适的管片楔形量,避开了繁杂的分类讨论和理论计算,结果更加直观。

### 3 结语

本文主要对通用楔形环管片设计排版方法进行研究,结合广州某地铁线路的管片设计资料与线路资料,探讨了通用环管片设计排版流程与楔形量计算方法,提出了一种简单实用的设计排版流程,并根据算法流程编制了相关程序。经过计算分析,得到了以下结论:

(1)根据理论,管片楔形量越大,能拟合的曲线半径越小,管片适用性越强。但并不是楔形量越大,拟合效果越好。超过一定范围后,楔形量越大,反而线路拟合偏差越大。

(2)对于地铁盾构隧道的通用环管片设计排版拼装,既要确保管片能完成对最小曲线半径段线路的拟合,也要避免管片排版拟合出来的偏差过大。经计算比选,直径6.4 m的通用环管片拟合曲线半径350 m线路时的最佳楔形量应选在28.5~35 mm范围内。

(3)仅根据最小曲线半径计算得到的管片楔形量往往不能较为完美地进行整条线路的拟合排版,一般需以线路拟合排版中产生的拟合偏差最小为依据进行计算优化。同时参考既往工程案例来确定最合适的管片楔形量。

(4)借助算法程序进行排版所得到的管片排列组合形式仅仅是理论上的排版结果,还需要在其基础上考虑管片制作拼装等施工方面的要求进行进一步完善优化。同时,本文研究仅考虑了平面拟合偏差,忽略了竖向拟合偏差。尽管竖向偏差相较平面偏差小得多,但仍会对管片的排版起到一定的影响,这方面的研究需待后续进一步深化完善。

#### 参考文献:

- [1] 戴仕敏,李章林,何国军.大型通用楔形管片拼装施工技术[J].隧道建设,2006,26(4):64-67.
- [2] 陈强.小半径曲线地铁隧道盾构施工技术[J].隧道建设,2009,29(4):446-450,474.
- [3] 小泉淳.盾构隧道管片设计[M].官林星,译.北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [4] 宋成辉.软土地层地铁盾构通用环管片结构设计研究[J].地下空间与工程学报,2011,7(4):733-740.
- [5] 张稳军,朱战魁,张琪,等.地铁盾构通用环管片楔形量计算方法研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(5):746-753.
- [6] 李伟平,郑国平.盾构隧道通用楔形管片排版系统的核心算法研究[J].现代隧道技术,2008,45(5):34-37,43.

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com