

标准环加转弯环盾构管片排版及拼装选型算法研究*

熊栋栋^{1,2,3} 杨 钊^{1,2,3} 许 超^{1,2,3}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 430040, 武汉; 2. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 430040, 武汉; 3. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 430040, 武汉)

摘 要 [目的]为解决人工进行标准环+转弯环(双面楔形)盾构管片排版和选点中存在的主观性强、计算繁琐、重复工作量大等问题,特对其进行算法研究,以解决实际工程问题。[方法]开发了标准环+转弯环管片自动排版、拼装选型及预测算法软件。基于成熟施工经验,依据隧道线形和管片转角计算管片排版计划,实现了管片排版的自动化计算。提出了综合考虑隧道线形、盾尾间隙、推进油缸行程和盾构机趋势的标准环+转弯环管片选型计算方法和决策算法,实现了管片自动拼装选点。在此基础上,通过建立盾构姿态变化与盾尾间隙和油缸行程变化量的关系式,实现了未来2环标准环+转弯环管片拼装点位和管片型号的预测。[结果及结论]研究成果在广州地铁12号线成功应用,显著提升了现场标准环+转弯环管片排版、选型的工作效率,降低了人力成本,并优化了盾构隧道施工工序。

关键词 盾构法隧道; 标准环+转弯环管片; 盾尾间隙; 油缸行程; 管片排版; 拼装点位选择

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.005

Layout and Assembly Selection Algorithm for Standard Ring + Turning Ring Shield Tunnel Segments

XIONG Dongdong^{1,2,3}, YANG Zhao^{1,2,3}, XU Chao^{1,2,3}

(1. CCCC Second Harbour Engineering Co., Ltd., 430040, Wuhan, China; 2. Research and Development Center of Transport Industry Intelligent Manufacturing Technologies, 430040, Wuhan, China; 3. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, 430040, Wuhan, China)

Abstract [Objective] To address the challenges associated with the manual layout and point selection of S + T (standard rings + turning rings (double-sided wedges)) in shield tunnel segments, including high subjectivity, complex calculations, and heavy repetitive workload, a research is carried out focusing on algorithm development to resolve practical engineering issues. [Method] An automatic layout, assembly selection,

prediction algorithm and software are developed for S + T in tunnel segments. Referring to mature construction experience, segment layout plan is calculated based on tunnel alignment and segment turning angles, and segment layout calculation automation is achieved. The calculation and decision-making methods of S + T segment types are proposed with comprehensive consideration of tunnel alignment, shield tail clearance, hydraulic cylinder stroke, and shield machine trends, enabling the automatic selection and assembly of segment points. Furthermore, by establishing a relationship between shield posture changes and variations in shield tail clearance and cylinder stroke, the algorithm can predict the S + T assembly points and segment types for the two future rings. [Result & Conclusion] The research results are successfully applied to Guangzhou Metro Line 12, significantly improving the efficiency of on-site S + T layout and selection, reducing labor costs, and optimizing the shield tunnel construction process.

Key words shield tunneling; standard ring + turning ring segment; shield tail clearance; cylinder stroke; segment layout; selection of segment assembly points

0 引言

盾构隧道由管片逐环拼装而成,为了适应线路水平曲线和纵向坡度,在管片设计时有两种主流方法:一是标准环加转弯环,二是通用楔形环。标准环+转弯环管片作为主流的管片形式,在广州、南京、成都、长沙等重点城市的轨道交通建设中得到广泛应用。采用标准+转弯环管片的盾构项目,通常需要对管片进行预排版以确定不同管片型号(标准环、左转弯环、右转弯环)的工程量,以便提前预制、存放、调运所需数量和类型的管片;在盾构掘进过程中,还需根据现场实际情况逐环对当前环管片拼装点位进行选型;同时,根据施工工序要求,在完成当前环管片拼装点位选型之后,要提前确定未

* 国家自然科学基金项目(52379114);湖北省重点研发计划项目(2023BAB094)

来 1~2 环拼装的管片型号(标准环、左转弯环或右转弯环),从而为地面和井下的管片吊运工序预留时间。

然而,当前标准环+转弯环管片排版、选型及预测工作仍然由人工进行。人工排版计算繁琐、重复工作量大;人工管片拼装选点和预测无计算依据、主观性强,结果好坏取决于操作人员经验和素质,容易造成与隧道设计轴线、盾构姿态不匹配的情况,引起盾构姿态超限、管片开裂渗漏等质量问题。

对于管片排版算法,现有研究主要集中于隧道设计阶段的管片排版^[1-2]:① 根据管环的竖向和水平向楔形量及转角来综合拟合设计轴线的转角和坡度^[3];② 通过逐环拟拼装管片端面的中心点与设计轴线目标点之间的距离,选择距离最小所取的点位进行排版^[4-10]。二者计算比较复杂,现场可操作

性差,且未考虑到现场实际施工情况如施工进度、盾构姿态、盾尾间隙、油缸行程以及一些特殊施工要求,故无法指导现场实际生产和施工。对于管片拼装选型算法,现有研究主要针对通用型管片^[11-12],鲜有标准环+转弯环的管片选型的算法研究。

为此,本文首次研发了标准环+转弯环管片自动预排版、选点算法,形成了一整套符合现场生产需求的标准+转弯环管片排版计划、管片选点和预测解决方案。

1 算法逻辑

基于成熟施工经验和合理的简化计算模型,形成了标准+转弯环盾构管片排版和管片拼装选点及预测决策的核心算法和软件,其各模块及主要算法框架如图 1 所示。

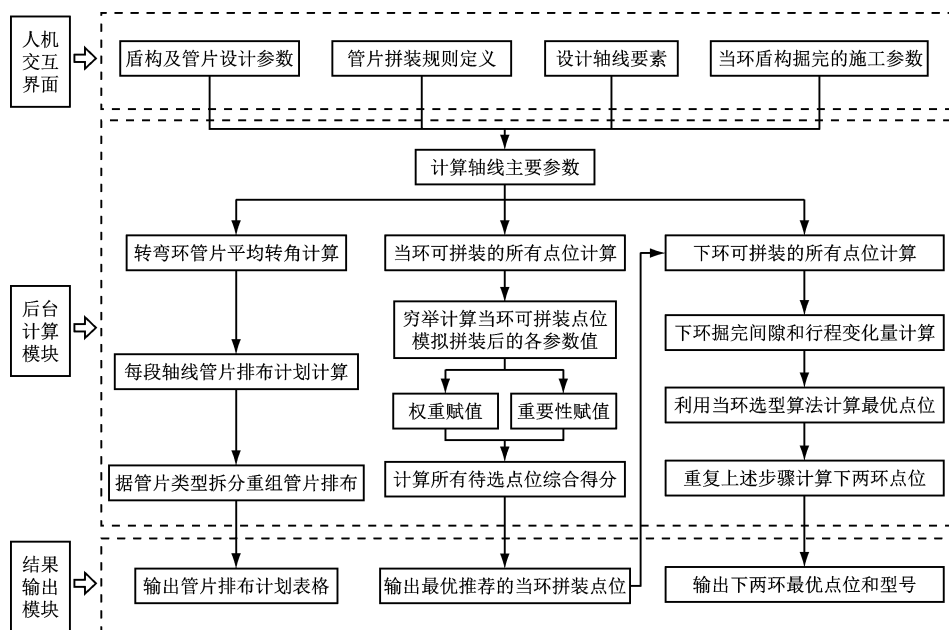


图 1 软件各模块及主要算法框架

Fig. 1 Software modules and main algorithm framework

2 管片自动排版算法

标准+转弯环管片盾构项目根据管片生产、存放、调运、施工等要求需提供区间管片总计划、季度计划、月计划及日计划等排版数据。通常,直线段时,直线环和左、右转弯环比例一般为 8:1:1,其中总环数的 10% 为左、右转弯环,用于盾构机纠偏、调整油缸行程差以及竖直方向隧道线形拟合等需要。转弯环时,例如左转弯,先按照左转弯线段的转角

来计算左转弯环数,再在剩余的管片需求中,按照直线环和左、右转弯环比例 8:1:1 来分配各管环数量。上述分配比例根据不同项目具体情况有所调整。

基于上述施工原理,本研究开发了管片自动排版算法,并自动生成管片总排版计划、月度排版计划和日排版计划,以节省人力、提高施工效率。

2.1 轴线转角计算

计算区间每一段直线段和曲线段的长度、转

角、平均转角等参数,直线段线形参数为起始里程和终止里程,得到直线段长度 L_{ZH} ,单位 m;曲线段分为两段对称的缓和曲线和中间的圆曲线,如图 2 所示。具体计算步骤如下:圆曲线长度 $L_R = L - 2L_S$ (L 为曲线长度, L_S 为缓和曲线长度),圆曲角度 $\alpha_R = L_R \times 180^\circ / \pi R$ (R 为圆曲线半径),圆曲线管片环数 $H_R = L_R / w$,其中 w 为管片环宽。圆曲线平均转角 $\theta_R = \alpha_R / H_R$,缓和曲线环数 $H_S = L_S / w$,缓和曲线的角度 $\alpha_S = (\alpha - \alpha_R) / 2$ (α 为曲线转角),缓和曲线平均转角 $\theta_S = \alpha_S / H_S$ 。

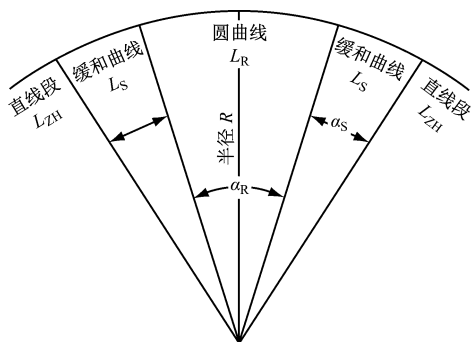


图 2 设计轴线水平线形示意图

Fig. 2 Diagram of design axis horizontal alignment

2.2 管片平均转角计算

管片平均转角 β 根据统计的管片点位出现频率,求加权平均值即可。如图 3 所示,左、右转弯环任意点位的管片转角计算式如下:

$$\beta_{\text{右转}} = 360 \arctan \left(\frac{l \cos(m2\pi/n)}{2d} \right) / \pi \quad (1)$$

$$\beta_{\text{左转}} = -360 \arctan \left(\frac{l \cos(m2\pi/n)}{2d} \right) / \pi \quad (2)$$

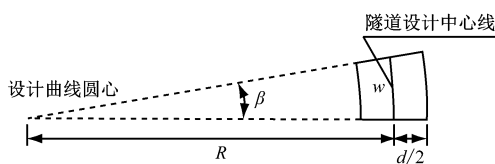
式中:

l ——管片楔形量,单位 mm;

m ——管片拼装点;

n ——一环管片总拼装点位数;

d ——管片环外径,单位 mm。



注: $R_{\text{曲}}$ 为隧道轴线曲率半径; β 为管片平均转角; $d/2$ 为管片环半径。

图 3 管片转角示意图

Fig. 3 Diagram of shield tunnel turning angle

2.3 区间管片排版计算

区间设计轴线上每一段轴线段的管片排布计

划,包括管片环号 N_{um} 、长度 L (单位 m)、管片总环数 H 、标准环数 H_B 、左转弯环数 H_Z 和右转弯环数 H_Y 。依次计算得到所有直线段和曲线段的管片排布计划,依照里程的先后顺序将每一段轴线段的管片排布计划从上至下依次排列至表格中,如图 4 所示。具体方法如下:假设某一段轴线编号为 i ,该段轴线的管片环号 $N_{\text{um}} = H_1 + H_2 + \dots + H_{i-1} + 1 \sim H_1 + H_2 + \dots + H_{i-1} + H_i$,例如当前轴线之前的所有轴线的总环数之和为 100 环,前轴线的总环数为 50 环时,则当前轴线的管片环号为:101 ~ 150;如果当前轴线段为区间第一段轴线,则管片环号 $N_{\text{um}} = "1 \sim H_1"$ 。

直线段 L_{ZH} 中,管片总环数 $H_{\text{总,ZH}} = L_{ZH} / w$,标准环数 $H_{B,ZH} = H_{\text{总,ZH}} \times 80\%$,左转弯环数 $H_{Z,ZH} = H_{\text{总,ZH}} \times 10\%$,右转弯环数 $H_{Y,ZH} = H_{\text{总,ZH}} \times 10\%$ 。

缓和曲线段(以曲线为左转弯为例) L_S 中,管片总环数 $H_{\text{总,h}} = L_S / w$,左转弯环数 $H_{Z,h} = \alpha_S / \beta + (H_{\text{总,h}} - \alpha_S / \beta) \times 10\%$,标准环数 $H_{B,h} = (H_{\text{总,h}} - \alpha_S / \beta) \times 80\%$,右转弯环数 $H_Y = (H_{\text{总,h}} - \alpha_S / \beta) \times 10\%$ 。

圆曲线段(以曲线为左转弯为例) L_R 中,管片总环数 $H_{\text{总,y}} = L_R / w$,左转弯环数 $H_{Z,y} = \alpha_R / \beta + (H_{\text{总,y}} - \alpha_R / \beta) \times 10\%$,标准环管片环数 $H_{B,y} = (H_{\text{总,y}} - \alpha_R / \beta) \times 80\%$,右转弯环管片数 $H_{Y,y} = (H_{\text{总,y}} - \alpha_R / \beta) \times 10\%$ 。

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
管片类型	直线	左转弯	右转弯	接触网环	合计				
1 I类	160	217	88	117	582				
2 II类	0	0	0	0	0				
3 III类	104	125	18	60	307				
4 特殊管片	0	4	0	2	6				
5 合计	264	346	106	179	895				
区间管片计划排版									
环号	长度(m)	线型	管片类型	轴侧方向	总环数	直线环	左转弯	右转弯	接触网环(直线环)
9 1—6	7.563	直线	I类	直线	6	5	0	0	1
10 7—21	25.437	缓和曲线	I类	左转弯	15	7	5	0	3
11 22—53	44.563	缓和曲线	II类	左转弯	32	13	11	1	7
12 54—93	63.437	圆曲线	III类	左转弯	40	8	24	0	8
13 94—162	105	圆曲线	I类	左转弯	69	13	41	1	14
14 163—218	84	圆曲线	II类	左转弯	56	11	33	1	11
15 219—259	63	圆曲线	I类	左转弯	41	8	24	1	8
16 260—262	6	圆曲线	特殊管片	左转弯	3	0	2	0	1
17 263—316	81	圆曲线	II类	左转弯	54	11	32	1	10
18 317—337	33	圆曲线	I类	左转弯	21	3	13	0	5
19 338—350	21	圆曲线	II类	左转弯	13	3	8	0	2
20 351—447	141	圆曲线	I类	左转弯	97	18	56	3	20
21 448—462	24	圆曲线	II类	左转弯	15	3	9	0	3
22 463—541	114	圆曲线	I类	左转弯	79	16	46	2	15
23 542—544	6	圆曲线	特殊管片	左转弯	3	0	2	0	1
24 545—575	40.622	缓和曲线	I类	左转弯	31	6	17	2	6
25 576—607	50.878	缓和曲线	I类	左转弯	32	14	11	0	7
26 608—622	19.122	缓和曲线	II类	左转弯	15	6	5	1	3
27 623—675	80.878	直线	III类	直线	53	39	2	2	10
28 676—693	25.275	直线	I类	直线	18	12	1	1	4
29 694—728	55.725	缓和曲线	I类	右转弯	35	17	0	11	7
30 729—743	19.275	缓和曲线	II类	右转弯	15	6	1	5	3
31 744—757	22.725	圆曲线	III类	右转弯	14	4	0	7	3
32 758—871	168.365	圆曲线	I类	右转弯	114	30	3	59	22
33 872—895	35.91	缓和曲线	I类	右转弯	24	11	0	8	5

图 4 自动计算区间管片排版并生成表格截图

Fig. 4 Screenshot of automated interval segment layout calculation and table generation

2.4 考虑管片类型的排版计算

基于不同区域的隧道结构受力特性和风险等级,设计过程中将盾构隧道管片根据配筋情况细分为多种类型(如 I 型、II 型、III 型等),导致在隧道区间内,不同里程段的管片类型各异。

根据设计给出的不同管片类型沿区间里程分布信息,依次将包含某一段管片类型线段的起始和终止里程所对应的直线段或曲线段进行匹配,并在 2.3 节形成的管片排版计划中将该轴线段的管片排版按照管片类型的里程进行比例拆分。若某轴线段的里程范围覆盖了某一段特定管片类型的里程,则根据该管片类型在轴线段内的里程占比,将该轴线段相应地划分为多个部分。最终,生成了一个包含详细管片类型信息的区间管片总排布计划。在表格中,根据区间里程的先后顺序,将具有相同属性的轴线段管片排布计划从上至下逐一排列。

2.5 区间管片分步排版计划计算

根据不同区域的隧道结构受力和风险等级,设计上将盾构隧道管片根据不同的配筋情况分为几种管片类型(例如 I 型、II 型、III 型等),因此区间不同的里程范围管片类型也不相同。根据设计给出的不同管片类型沿区间里程分布信息,依次将包含某一段管片类型管片段的起始和终止里程所对应的直线段或曲线段进行匹配,并在 2.3 节形成的管片排版计划中将该施工段的管片排版按照管片类型的里程进行比例拆分。若某施工段的里程范围将某一段管片类型的里程包含在内,则根据实际需求将此施工段进行相应的拆分。最终,形成新的包含管片类型信息的区间管片总排布计划。在表格中,我们按照区间里程的先后顺序,将每一段管片类型、长度、转角等属性完全相同的管片段的管片排布计划从上至下依次排列。

3 管片拼装点位选择算法

3.1 管片拼装点位选择总体原则

标准环+转弯环盾构管片拼装选点及预测施工算法,充分结合了优秀工程师的成熟施工经验,在考虑盾尾间隙、油缸行程差及盾构机趋势的基础上,综合了隧道线形等因素的耦合影响,实现了标准环及左右转弯环管片当前环的合理选型。同时,在当前环管片选点方法的基础上,该算法依据盾构机姿态,结合盾构机与设计轴线的合理简化模型,计算未来 1~2 环盾构掘进完毕之后的盾尾间隙和

油缸行程等参数,从而实现了对未来 1~2 环管片点位及型号的合理预测。

3.2 管片拼装选点方法

3.2.1 管片拼装选点加权计算方法

根据当前盾构机所在轴线段的转角、盾尾间隙、油缸行程、盾构机趋势 4 个因素进行加权计算,计算出每一种管片型号(标准环和左、右转环)中的所有可选拼装点位的综合目标函数,根据综合目标函数大小推荐管片点位先后顺序,具体方法如下。

分别依据轴线转角、盾尾间隙、推进油缸行程、盾构机趋势等 4 个因素当前参数值的重要性加权系数 I_{1i} 、 I_{2i} 、 I_{3i} 、 I_{4i} 和各点位模拟拼装后的上述 4 个因素的拼装效果加权系数 V_{1i} 、 V_{2i} 、 V_{3i} 、 V_{4i} 进行赋值,计算第 i 环各待选点位综合目标函数 J_i ,选取 i 环最优拼装点位,各可选点位的综合目标函数为:

$$J_i = V_{1i}I_{1i} + V_{2i}I_{2i} + V_{3i}I_{3i} + V_{4i}I_{4i} \quad (3)$$

3.2.2 管片拼装选点的轴线转角权重计算

轴线转角的重要性加权系数 I_{1i} 和拼装效果加权系数 V_{1i} 的计算方法如下:

1) 分别计算每一种管片型号的各个可选拼装点位的管片转角 β 。对于标准环,各个点位的管片转角均为 0;而左、右转环的管片转角则根据式(1)、式(2)计算得出。曲线转角 α 即为当前盾构所处轴线段的转角,若为直线段,则曲线转角为 0;左转弯时转角为负,右转弯时转角为正。

2) 计算一环管片拼装之后的转角变化量 $\beta - \alpha$,并据此得出累积转角 θ 。累积转角 θ 表示从轴线段起始里程开始,管片逐环拼装后转角变化量的累积。具体计算公式为: $(\beta_1 - \alpha_1) + (\beta_2 - \alpha_2) + \dots + (\beta_{i-1} - \alpha_{i-1}) + (\beta_i - \alpha_i)$ 。

3) 根据上一环累积转角 θ_{i-1} 的大小进行重要性加权系数 I_{1i} 的赋值。具体规则如下:① 若 θ_{i-1} 为 0,则 I_{1i} 为 1。② 若 θ_{i-1} 的绝对值越大,则 I_{1i} 越大。③ 当前轴线段为左转弯时,若 θ_{i-1} 的绝对值相同,则 $\theta_{i-1} < 0$ 时的权重为 I_{1i} , $\theta_{i-1} > 0$ 时的权重为 $1.1I_{1i}$;反之亦然(即当前轴线段为右转弯时,情况相反)。④ 若当前轴线段为直线段,则权重为 $0.2I_{1i}$ (此处的 0.2 是示例值,具体值应根据实际情况确定)。

根据当前环可选点位模拟拼装之后计算出的 $\beta - \alpha$ 值进行拼装效果加权系数 a_1 赋值, a_1 取值在 0~1 之间,当 $|\beta - \alpha| = 0$ 时, $a_1 = 1$, $|\beta - \alpha|$ 越大, a_1 越小,并逐渐趋近于 0, $\beta - \alpha$ 绝对值相同时,若当前

轴线段为右转弯, $\beta - \alpha > 0$ 时的权重等于 a_1 , $\beta - \alpha < 0$ 时权重为 $0.85a_1$, 反之, 则 $\beta - \alpha < 0$ 时的权重等于 a_1 , $\beta - \alpha > 0$ 时权重为 $0.85a_1$, 当前轴线段为直线段时, $a_1 = 0$; 当前环可选点位管片模拟拼装之后的累积转角 θ_i 值进行拼装效果加权系数 a_2 赋值, a_2 取值在 $0 \sim 1$ 之间, 当 $|\theta_i| = 0$ 时, $a_2 = 1$, $|\theta_i|$ 越大, a_2 越小, 并逐渐趋近于 0。轴线转角的拼装效果加权系数 $V_{1i} = 0.4a_1 + 0.6a_2$ 。

一环管片拼装之后的转角变化量如图 5 所示。

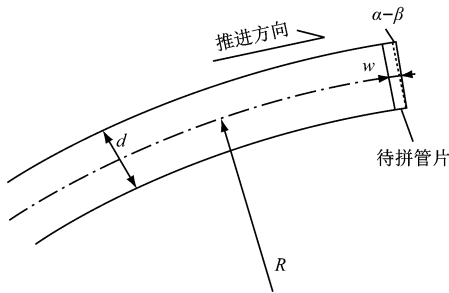


图 5 一环管片拼装之后的转角变化量

Fig. 5 Variation in turning angle after assembling a ring of segments

3.2.3 管片拼装选点的油缸行程权重计算

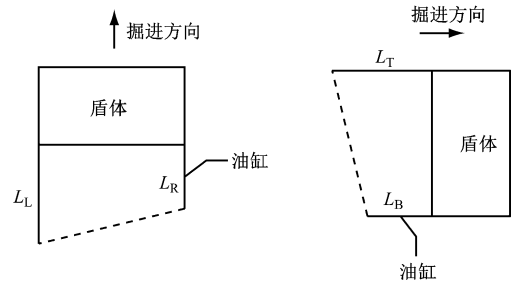
3.2.3.1 重要性加权系数 I_{3i} 的计算方法

根据上、下、左、右油缸行程值, 计算上下和左右油缸行程差, 选择当中较大的油缸行程差值进行重要性加权系数 I_{3i} 赋值。 I_{3i} 随着油缸行程差值的增大而增大, 表示管片拼装前的油缸行程差越大, 情况就越差, 管片选点时考虑油缸行程差的权重就越高。取某一油缸行程差值为临界值, 输入油缸行程差大于该临界值时, 取 $I_{3i} = 1$, 表示此油缸行程差值有利于盾构施工, 管片拼装选点时无须着重考虑, 当输入油缸行程差值大于该临界值时, 取 $I_{3i} > 1$, 且 I_{3i} 随着油缸行程差值的增大而增大。

3.2.3.2 拼装效果加权系数 V_{3i} 的计算方法

图 6 为缸行程差投影图。由图 6 可以看出, 拼装前输入上下、左右油缸行程差分别为 $\Delta L_{i-1 \cdot H} = L_L - L_R$, $\Delta L_{i-1 \cdot V} = L_T - L_B$; 标准环、右转弯环和左转弯环管片的上下、左右宽度, 计算各个管片型号下各可选点位的油缸行程差变化值, 模拟拼装之后的油缸行程差计算值等于拼装前的输入油缸行程差值与油缸行程差变化值之和, 右转弯环模拟拼装之后的上下、左右油缸行程差分别为 $L_{R \cdot V} = \Delta L_{i-1 \cdot V} - (S_{R \cdot T} - S_{R \cdot B})$, $L_{R \cdot H} = \Delta L_{i-1 \cdot H} - (S_{R \cdot L} - S_{R \cdot R})$; 左转弯环模拟拼装之后的上下、左右油缸行程差分别为

$L_{L \cdot V} = \Delta L_{i-1 \cdot V} - (S_{L \cdot T} - S_{L \cdot B})$, $L_{L \cdot H} = \Delta L_{i-1 \cdot H} - (S_{L \cdot L} - S_{L \cdot R})$; 标准环模拟拼装之后的上下、左右油缸行程差不变。



a) 油缸行程差水平投影图 b) 油缸行程差竖直投影图

图 6 油缸行程差投影图

Fig. 6 Projection diagram of cylinder stroke difference

根据油缸行程差较大值进行拼装效果加权系数 V_{2i} 赋值, 油缸行程拼装效果加权系数赋值范围为 $0 < V_{3i} < 1$, 其随着油缸行程差的缩小而增大, 逐渐趋近于 1; 随着油缸行程差的增大而减小, 逐渐趋近于 0, 这表示管片拼装后的油缸行程差越大, 管片选型效果越差, 对应的拼装效果加权系数就越低, 反之, 则越高。

3.2.4 管片拼装选点的盾尾间隙权重计算

3.2.4.1 重要性加权系数 I_{2i} 计算方法

根据上、下、左、右盾尾间隙输入值, 选择当中最小盾尾间隙值进行重要性加权系数 I_{2i} 赋值。 I_{2i} 随着盾尾间隙值的减小而增大, 表示管片拼装前的盾尾间隙越小, 情况就越差, 管片选点时考虑盾尾间隙的权重就越高。设定盾尾间隙值临界值, 输入盾尾间隙值大于临界值时, 取 $I_{2i} = 1$, 表示此盾尾间隙值比较安全, 当前环管片拼装选点时无须重点考虑, 当输入盾尾间隙值小于临界值时, 取 $I_{2i} > 1$, 且 I_{2i} 随着输入盾尾间隙值的减小而增大。

3.2.4.2 拼装效果加权系数 V_{2i} 计算方法

首先, 分别计算标准环、右转弯环和左转弯环管片的上、下、左、右宽度。标准环水平投影和竖直投影均为方形, 因此上、下、左、右管片宽度均为管片标准宽度 w , 右转弯环管片上、下、左、右侧宽度计算分别如下:

$$S_{R \cdot T} = w - \frac{l}{2} \cos \left(\frac{2m\pi}{n} + \frac{\pi}{2} \right) \quad (4)$$

$$S_{R \cdot B} = w - \frac{l}{2} \cos \left(\frac{2m\pi}{n} - \frac{\pi}{2} \right) \quad (5)$$

$$S_{R \cdot L} = w + \frac{l}{2} \cos \left(\frac{2m\pi}{n} \right) \quad (6)$$

$$S_{R \cdot R} = w - \frac{l}{2} \cos \left(\frac{2m\pi}{n} \right) \quad (7)$$

左转环管片上、下、左、右侧宽度计算分别如下:

$$S_{L \cdot T} = w - \frac{l}{2} \cos \left(\frac{2m\pi}{n} - \frac{\pi}{2} \right) \quad (8)$$

$$S_{L \cdot B} = w - \frac{l}{2} \cos \left(\frac{2m\pi}{n} + \frac{\pi}{2} \right) \quad (9)$$

$$S_{L \cdot L} = w - \frac{l}{2} \cos \left(\frac{2m\pi}{n} \right) \quad (10)$$

$$S_{L \cdot R} = w + \frac{l}{2} \cos \left(\frac{2m\pi}{n} \right) \quad (11)$$

其次,分别计算右、左转环和标准环管片的上、下、左、右盾尾间隙变化量。右转环模拟拼装之后的上、下、左、右盾尾间隙变化量计算如下:

$$\Delta\delta_{R \cdot T} = S_{R \cdot T} \sin \left(\arctan \left(\frac{S_{R \cdot T} - S_{R \cdot B}}{2d} \right) - \arctan \left(\frac{o-p}{q} \right) \right) \quad (12)$$

$$\Delta\delta_{R \cdot B} = -S_{R \cdot B} \sin \left(\arctan \left(\frac{S_{R \cdot T} - S_{R \cdot B}}{2d} \right) - \arctan \left(\frac{o-p}{q} \right) \right) \quad (13)$$

$$\Delta\delta_{R \cdot L} = S_{R \cdot L} \sin \left(\arctan \left(\frac{S_{R \cdot L} - S_{R \cdot R}}{2d} \right) - \arctan \left(\frac{o-p}{q} \right) \right) \quad (14)$$

$$\Delta\delta_{R \cdot R} = -S_{R \cdot R} \sin \left(\arctan \left(\frac{S_{R \cdot L} - S_{R \cdot R}}{2d} \right) - \arctan \left(\frac{o-p}{q} \right) \right) \quad (15)$$

左转环模拟拼装之后的上、下、左、右盾尾间隙变化量计算如下:

$$\Delta\delta_{L \cdot T} = S_{L \cdot T} \sin \left(\arctan \left(\frac{S_{L \cdot T} - S_{L \cdot B}}{2d} \right) - \arctan \left(\frac{o-p}{q} \right) \right) \quad (16)$$

$$\Delta\delta_{L \cdot B} = -S_{L \cdot B} \sin \left(\arctan \left(\frac{S_{L \cdot T} - S_{L \cdot B}}{2d} \right) - \arctan \left(\frac{o-p}{q} \right) \right) \quad (17)$$

$$\Delta\delta_{L \cdot L} = S_{L \cdot L} \sin \left(\arctan \left(\frac{S_{L \cdot L} - S_{L \cdot R}}{2d} \right) - \arctan \left(\frac{o-p}{q} \right) \right)$$

$$\arctan \left(\frac{o-p}{q} \right) \quad (18)$$

$$\Delta\delta_{L \cdot R} = -S_{L \cdot R} \sin \left(\arctan \left(\frac{S_{L \cdot L} - S_{L \cdot R}}{2d} \right) - \arctan \left(\frac{o-p}{q} \right) \right) \quad (19)$$

标准环模拟拼装之后的上、下、左、右盾尾间隙变化量计算如下:

$$\Delta\delta_{S \cdot T} = w \sin \left(\arctan \left(\frac{p-o}{q} \right) \right) \quad (20)$$

$$\Delta\delta_{S \cdot B} = -w \sin \left(\arctan \left(\frac{p-o}{q} \right) \right) \quad (21)$$

$$\Delta\delta_{S \cdot L} = w \sin \left(\arctan \left(\frac{p-o}{q} \right) \right) \quad (22)$$

$$\Delta\delta_{S \cdot R} = -w \sin \left(\arctan \left(\frac{p-o}{q} \right) \right) \quad (23)$$

式中:

o ——上部油缸行程,单位 mm;

p ——下部油缸行程,单位 mm;

q ——油缸安装直径,单位 mm。

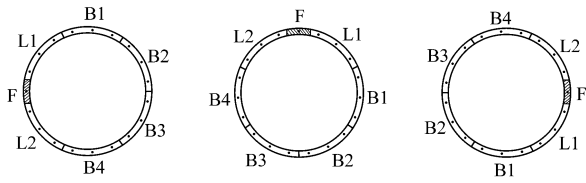
上、下、左、右盾尾间隙输入值分别为 $\delta_{i-1 \cdot T}$ 、 $\delta_{i-1 \cdot B}$ 、 $\delta_{i-1 \cdot L}$ 、 $\delta_{i-1 \cdot R}$ 。标准环的模拟拼装后的盾尾间隙计算值分别为 $\delta_{S \cdot T} = \delta_{i-1 \cdot T} + \Delta\delta_{S \cdot T}$ 、 $\delta_{S \cdot B} = \delta_{i-1 \cdot B} + \Delta\delta_{S \cdot B}$ 、 $\delta_{S \cdot L} = \delta_{i-1 \cdot L} + \Delta\delta_{S \cdot L}$ 、 $\delta_{S \cdot R} = \delta_{i-1 \cdot R} + \Delta\delta_{S \cdot R}$;左转环的模拟拼装后的盾尾间隙计算值分别为 $\delta_{L \cdot T} = \delta_{i-1 \cdot T} + \Delta\delta_{L \cdot T}$ 、 $\delta_{L \cdot B} = \delta_{i-1 \cdot B} + \Delta\delta_{L \cdot B}$ 、 $\delta_{L \cdot L} = \delta_{i-1 \cdot L} + \Delta\delta_{L \cdot L}$ 、 $\delta_{L \cdot R} = \delta_{i-1 \cdot R} + \Delta\delta_{L \cdot R}$;右转环管片的模拟拼装后的盾尾间隙计算值分别为 $\delta_{R \cdot T} = \delta_{i-1 \cdot T} + \Delta\delta_{R \cdot T}$ 、 $\delta_{R \cdot B} = \delta_{i-1 \cdot B} + \Delta\delta_{R \cdot B}$ 、 $\delta_{R \cdot L} = \delta_{i-1 \cdot L} + \Delta\delta_{R \cdot L}$ 、 $\delta_{R \cdot R} = \delta_{i-1 \cdot R} + \Delta\delta_{R \cdot R}$ 。

根据最小盾尾间隙计算值进行拼装效果加权系数 V_{2i} 赋值。盾尾间隙拼装效果加权系数赋值范围为 $0 < V_{2i} < 1$,其随着盾尾间隙的增大而增大,逐渐趋近于1,随着盾尾间隙的减小而减小,逐渐趋近于0。表示管片拼装后的盾尾间隙越小,管片选型效果越差,对应的拼装效果加权系数就越低,反之,则越高。

3.2.5 盾构机趋势权重计算

盾构机趋势重要性加权系数 I_{4i} 计算方法:输入管片拼装前的盾构机趋势值。以水平方向为例,盾构趋势朝右为正,当盾构趋势小于0, $I_{4i} > 0$,盾构趋势大于0, $I_{4i} < 0$,且 I_{4i} 的赋值随着盾构趋势值(绝对值)的增大而增大,反之,则逐渐减小,当管片拼装

前的盾构趋势为 0, $I_{4i} = 0$, 表示此时, 管片选型无须着重考虑。



a) 封顶块在正左侧 b) 封顶块在正上方 c) 封顶块在正右侧

图 7 盾构机趋势的拼装效果加权系数示意图

Fig. 7 Diagram of shield machine trend assembly effect

weighted coefficients

根据盾构趋势的方向和管环封顶块的方向确定盾构趋势拼装效果加权系数 V_{4i} 的上限临界值、中间值和下限临界值, 如盾构水平趋势为正值, 表示盾构趋势朝设计轴线右侧, 如图 6 所示, 此时封顶块在正左侧的管环的纠偏效果最佳, 拼装效果加权系数为上限临界值 1, 封顶块在正上和正下侧的管环效果为 0, 对应的拼装效果加权系数为中间值 0, 封顶块在右侧的管环效果最差, 拼装效果加权系数为下限临界值 -1; 对于其他封顶块在左侧的管环, 其拼装效果加权系数 $0 < V_{4i} < 1$, 封顶块在右侧, 拼装效果加权系数 $-1 < V_{4i} < 0$ 。

3.3 管片拼装选点预测算法

按照 3.2 节选出当前环管片点位之后, 进行未来 1 环管片型号和管片拼装点位的预测。首先, 根据当前环所选管片点位计算未来 1 环管片可选拼装点位; 其次, 依据 3.2 节计算的各管片型号 (标准化及左、右转环) 下各可选点位的模拟拼装盾尾间隙和油缸行程差值, 以及已选的管片点位, 锁定当前环已选点位对应的模拟拼装盾尾间隙和油缸行程差值; 根据式 (24)、式 (25) 计算未来 1 环盾构掘进完成时的盾尾间隙变化量和油缸行程变化量:

$$\Delta\delta' = (t - w) \tan \left(\frac{360w}{2\pi R - \pi r} \right) \quad (24)$$

$$\Delta L' = w \left(\frac{2R + r}{2R - r} - 1 \right) \quad (25)$$

式中:

t ——盾尾长度, 单位 mm;

r ——油缸安装半径 (即管环半径), 单位 mm。

当前环管片模拟拼装盾尾间隙值 $\delta_T, \delta_B, \delta_L, \delta_R$ 和油缸行程差值 L_V, L_H (单位 mm), 根据当前盾构机所在轴线的方向预测未来 1 环盾构掘进完成时的

盾尾间隙值 $\delta'_T, \delta'_B, \delta'_L, \delta'_R$ 和油缸行程差值 L'_V, L'_H , 若当前轴线方向为左转, $\delta'_T = \delta_T, \delta'_B = \delta_B, \delta'_L = \delta_L - \Delta\delta', \delta'_R = \delta_R + \Delta\delta', L'_V = L_V, L'_H = L_H - \Delta L'$; 若为右转, $\delta'_T = \delta_T, \delta'_B = \delta_B, \delta'_L = \delta_L + \Delta\delta', \delta'_R = \delta_R - \Delta\delta', L'_V = L_V, L'_H = L_H + \Delta L'$ 。

确定未来 1 环盾构掘进完成的盾尾间隙值和油缸行程差预测值之后, 重复 3.2 节管片选点的方法和上述步骤, 实现未来 2 环管片点位和型号的预测。

4 软件现场应用

标准环 + 转弯环管片排版和选点及预测软件应用于广州地铁 12 号线赤仑区间左线, 如图 8 所示。根据现场需求, 将标准环管片又分为接触网环和普通标准环, 并规定每 5 环拼一环接触网环。

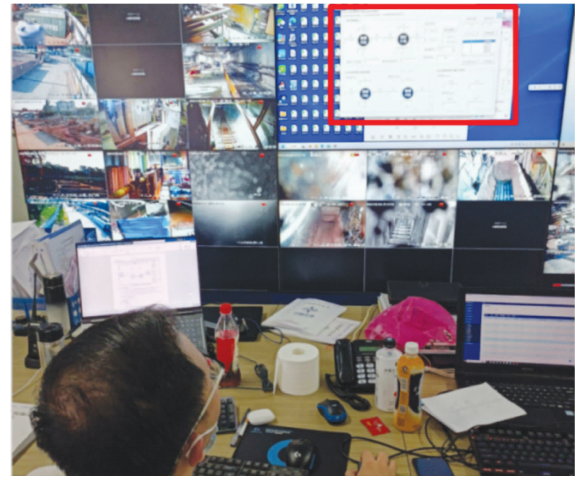


图 8 软件现场应用实景图

Fig. 8 Photo of software on-site application

经验证, 软件生成的管片排版计划与现场人员排版计划吻合度在 90% 以上, 自动生成的排版计划见表 1, 软件仅需输入起始环和终止环号, 就可以快速计算并输出分布计划, 大幅提升了现场工作效率; 后续 2 环管片选型预测是标准环 + 转弯环管片施工的关键流程, 软件的应用, 有效提升了管片选点及预测的准确性和合理性, 优化了现场施工工序。

5 结语

成功研发了标准环 + 转弯环管片排版、选点及预测的成套算法及软件, 填补了行业空白, 克服了人工进行此类工作时存在的主观性强、效率低下等问题, 有效解放了人力, 规范了现场管片选型预测施工, 并优化了现场施工工序。

表 1 区间管片排版计划表
Tab.1 Interval segment layout plan

环号	长度/m	线形	钢筋类型	方向	总环数	标准环数	左转环数	右转环数	接触网环数
1~6	7.6	直线	I	直	6	5	0	0	1
7~21	25.4	缓曲	I	左	15	7	5	0	3
22~53	44.6	缓曲	Ⅲ	左	32	13	11	1	7
54~93	63.4	圆曲	Ⅲ	左	40	8	24	0	8
94~162	105.0	圆曲	I	左	69	13	41	1	14
163~218	84.0	圆曲	Ⅲ	左	56	11	33	1	11
219~259	63.0	圆曲	I	左	41	8	24	1	8
260~262	6.0	圆曲	Ⅳ	左	3	0	2	0	1
263~316	81.0	圆曲	Ⅲ	左	54	11	32	1	10
317~337	33.0	圆曲	I	左	21	3	13	0	5
338~350	21.0	圆曲	Ⅲ	左	13	3	8	0	2
351~447	141.0	圆曲	I	左	97	18	56	3	20
448~462	24.0	圆曲	Ⅲ	左	15	3	9	0	3
463~541	114.0	圆曲	I	左	79	16	46	2	15
542~544	6.0	圆曲	Ⅳ	左	3	0	2	0	1
545~575	40.6	圆曲	I	左	31	6	17	2	6
576~607	50.9	缓曲	I	左	32	14	11	0	7
608~622	19.1	缓曲	Ⅲ	左	15	6	5	1	3
623~675	80.9	直线	Ⅲ	直	53	39	2	2	10
676~693	25.3	直线	I	直	18	12	1	1	4
694~728	55.7	缓曲	I	右	35	17	0	11	7
729~743	19.3	缓曲	Ⅲ	右	15	6	1	5	3
744~757	22.7	圆曲	Ⅲ	右	14	4	0	7	3

1) 标准环+转弯环管片排版算法,实现管片合理预排版,并自动生成管片总排版计划和分布计划 excel 表格,节省了人力,有效指导了现场施工。

2) 标准环+转弯环管片选型及预测施工算法,综合考虑施工因素和隧道线形因素的耦合影响,不仅实现了当前环管片的合理选型,还能基于此对未来两环管片型号进行合理预测,相较于人工操作,显著提高了预测的准确性和合理性,进一步优化了现场施工工序。

3) 本研究中的管片拼装选点及预测算法,对未来两环盾尾间隙和油缸行程的预测主要基于盾构沿设计轴线掘进的假设。为进一步提升预测精度,未来可引入基于机器学习和神经网络的盾构姿态智能预测方法,提前预测盾构姿态,并在此基础上,实现未来 2~5 环管片拼装点位的精准预测。

参考文献

[1] 刘欣,刘鑫,柳宪东. 标准环+转弯环的双面楔形盾构管片排版技术研究[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(5):805.
LIU Xin, LIU Xin, LIU Xian Dong. Study of layout technology for double-sided-wedge shield tunnel segment with standard ring and turning ring[J]. Tunnel Construction, 2018,38(5):805.

[2] 阮承志. 盾构隧道管片排版分析方法研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(4): 224.
RUAN Chengzhi. Research on the analysis method for segment layout in shield tunnelling[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(4): 224.

[3] 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.
LI Weiping, ZHENG Guoping. Study on core algorithm of type-setting system for universal wedge segments of shield tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(5): 34.

[4] 朱继文,林平,成琨,等. 宁波轨道交通通用管片排版与纠

- 偏技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2014(3): 160.
- ZHU Jiwen, LIN Ping, CHENG Kun, et al. Research on typesetting and rectification technology of universal segment in Ningbo rail transit[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2014(3): 160.
- [5] 杜战军, 吴继峰, 徐晨. 盾构隧道通用管片点位优选及排版应用研究[J]. 施工技术, 2021, 50(19): 6.
- DU Zhanjun, WU Jifeng, XU Chen. Research on point selection and layout application of general segment in shield tunnel[J]. Construction Technology, 2021, 50(19): 6.
- [6] 张文萃, 穆世旭, 李家涛, 等. 盾构隧道通用管片排版设计与纠偏研究[J]. 施工技术, 2013, 42(13): 89.
- ZHANG Wencui, MU Shixu, LI Jiatao, et al. Research on layout design and deviation correction of the general segment in shield tunnels[J]. Construction Technology, 2013, 42(13): 89.
- [7] 郑国平, 李伟平. 考虑特殊环的盾构法隧道通用楔形管片排版及纠偏算法研究[J]. 公路, 2011, 56(8): 304.
- ZHENG Guoping, LI Weiping. Research on typesetting and rectification algorithm of general wedge segment in shield tunnel considering special ring[J]. Highway, 2011, 56(8): 304.
- [8] 潘国荣, 荣一夫. 盾构通用管片排版与纠偏控制的简化解算[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(1): 55.
- PAN Guorong, RONG Yifu. Simplified calculation of general segment composition and correction control[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(1): 55.
- [9] 张志华, 朱国力, 隆泗. 盾构管片排版计算方法的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(5): 1040.
- ZHANG Zhihua, ZHU Guoli, LONG Si. Study on calculating method for composition of segments for shield tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 1040.
- [10] 刘风华. 盾构隧道通用管片拟合排版与管片选型技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- LIU Fenghua. Research on general segment fitting typesetting and segment selection technology for shield tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [11] 杨钊, 熊栋栋, 许超, 等. 基于参数智能化采集的盾构管片自动选型算法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(5): 817.
- YANG Zhao, XIONG Dongdong, XU Chao, et al. Automatic selection algorithm for shield tunnel segment rings based on intelligent acquisition of parameters[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(5): 817.
- [12] 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.
- ZHANG Wenjun, ZHU Zhankui, ZHANG Qi, et al. Calculation method for taper of universal ring segment in metro shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(5): 746.
- 收稿日期:2024-02-28 修回日期:2024-06-03 出版日期:2024-10-10
Received:2024-02-28 Revised:2024-06-03 Published:2024-10-10
- 通信作者:熊栋栋,高级工程师,466540159@qq.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 29 页)

- [13] WU H N, SHEN S L, LIAO S M, et al. Longitudinal structural modelling of shield tunnels considering shearing dislocation between segmental rings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 317.
- [14] 金大龙. 盾构隧道群下穿既有地铁运营隧道变形机理及控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- JIN Dalong. Research on mechanism and control of existing subway tunnel deformation induced by multi-crossing of shield tunnel underneath[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- 收稿日期:2022-06-10 修回日期:2022-10-13 出版日期:2024-10-10
Received:2022-06-10 Revised:2022-10-13 Published:2024-10-10
- 通信作者:王亮,高级工程师,604178246@qq.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解

读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以

通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

