

DOI: 10.7672/sgjs2026070072

铁板砂地层环境下尾盾变形及神经网络 预测分析研究*

钟涵^{1,2,3}, 何源⁴, 许超^{1,2}, 吴诗琦^{1,3}, 张飞雷¹

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040; 3. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040;
4. 中交二航局第三工程有限公司, 江苏 镇江 212021)

[摘要] 盾构掘进过程中, 由于地质、盾构操作等因素, 会造成盾构机尾盾整体或局部变形。某海外大直径水下盾构在高埋深、铁板砂地层中纠偏掘进时, 出现盾构机尾盾局部变形, 盾构无法继续掘进的情况。经过尾盾变形原因分析, 盾构机尾盾开孔取芯探查和矫正施工, 尾盾局部变形恢复, 实现盾构脱困。复推后对尾盾变形原因及采取的控制措施进行分析, 总结出盾构机尾盾局部最大变形量与以下因素有关: 地层参数、盾构姿态、分区压力、贯入度、仿行刀开启行程、径向孔放砂量。利用神经网络预测模型对已有 25 组尾盾变形样本进行训练, 得到每环掘进完成后尾盾最大变形量预测模型, 并通过另外 5 组尾盾变形数据验证了模型准确性, 用于后续盾构掘进尾盾变形预测。经过实践论证, 该神经网络模型预测变形值与实测值误差在 10% 以内且预测值比实测值偏大, 可用于盾构在高埋深、铁板砂地层尾盾变形预测。

[关键词] 海外工程; 盾构; 尾盾; 变形; BP 神经网络; 预测

[中图分类号] U455.4

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)07-0072-08

Research on Shield Tail Deformation and Neural Network Prediction Analysis Under Iron Plate Sand Stratum Environment

ZHONG Han^{1,2,3}, HE Yuan⁴, XU Chao^{1,2}, WU Shiqi^{1,3}, ZHANG Feilei¹

(1. CCCC Second Harbour Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China; 2. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan, Hubei 430040, China; 3. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan, Hubei 430040, China; 4. China Communications Second Navigational Bureau Third Engineering Co., Ltd., Zhenjiang, Jiangsu 212021, China)

Abstract: In the process of shield tunneling, due to factors such as geology and shield operation, the overall or local deformation of the shield tail will be caused. When an overseas large-diameter underwater shield was excavated in high buried and iron slab sand stratum, the local deformation of the shield tail of the shield machine occurred, and the shield cannot continue the excavation. After the analysis of the causes of the deformation of the shield tail, the hole coring exploration and correction construction of the shield tail, the local deformation of the shield tail was restored, and the shield was freed from the trap. The causes of shield tail deformation and the control measures were analyzed. It is concluded that the local maximum deformation of the shield tail is related to the following factors such as formation parameters, shield attitude, partition pressure, penetration, imitation cutter opening stroke, and radial hole sand discharge. The artificial neural network prediction model is used to train 25 groups of shield tail deformation samples, and the prediction model of the maximum deformation of the shield tail after each ring excavation was obtained. The accuracy of the model was verified by the other five groups of shield

* 国家自然科学基金(52379114)

[作者简介] 钟涵, 部门副总工程师, 工程师, E-mail: zhonghancug@163.com

[收稿日期] 2025-10-20

tail deformation data, which is used for the prediction of shield tail deformation in subsequent shield tunneling. Through practical demonstration, the error between the predicted deformation value and the measured value of the BP neural network model is within 10%, and the predicted value is larger than the measured value, which can be used to predict the deformation of the shield tail of the shield in the high buried depth and the iron plate sand stratum.

Keywords: overseas project; shields; shield tail; deformation; BP neural network; prediction

0 引言

随着我国城市交通发展的需要,隧道建设逐渐朝(超)大直径与大深度发展。目前国内有部分学者在大直径盾构方面开展了研究,主要研究成果隧道管片受力^[1]、掘进前后地面及地层扰动^[2-3]、盾构掘进参数控制^[4-6],对于盾体结构-盾构机在掘进过程中的结构变形研究较少,而盾构掘进过程中盾构机结构变形对于施工进度和质量影响重大。

盾体机盾体通常由前盾(切口环)、中盾(支撑环)、尾盾(尾盾环)三部分组成。前盾主要用来支撑掌子面及周围地层的稳定,同时为各种设备提供安装接口;中盾主要承受地层压力、盾构机推进反力、切口入土的正面阻力以及衬砌拼装时的施工荷载等;尾盾空间是管片衬砌的作业区域,通常设计为薄壁圆筒结构,使得尾盾成为盾体中刚度最薄弱的部分,也是最易变形的结构^[7-8]。盾构机在正常水土压力作用下的尾盾受力已有研究,管会生等^[9]采用等截面圆环形梁结构模型,推导了尾盾的内力计算公式,分析不同分项荷载对尾盾内力的影响;邵成猛^[10]以苏州地铁土压平衡盾构机为研究对象,分析6点同步注浆与4点同步注浆对尾盾结构的影响,结果表明6点注浆法能很好地减少尾盾的变形量;张雪辉等^[11]对大深度超大直径盾构尾盾受力性能进行探究,考虑尾盾壳体的初始几何缺陷及中空层合板构造对尾盾结构的影响,提出超大直径尾盾设计时需考虑几何缺陷和中空层合板构造对尾盾变形的放大效应。以上研究都是基于尾盾结构设计和单一因素作用下的尾盾变形研究,在盾构掘进过程中尾盾产生的变形因素复杂,从多因素分析尾盾变形更贴近实际施工,有必要针对多因素情况下尾盾变形建立预测模型,指导盾构施工。

本文以某海外工程为依托,以大直径($D = 12.16\text{m}$)盾构为研究对象,总结提炼出尾盾变形主要因素,利用神经网络建立尾盾变形预测模型,用于后续盾构掘进变形预测。

1 尾盾变形及矫正概述

1.1 工程概况

某海外隧道为大型河底公路隧道,盾构隧道在河底分离为两管盾构,单条隧道总长约2 450m。盾构采用自主设计研发的气垫式泥水加压平衡盾构设备,盾构机开挖直径12.16m,盾体总长13.58m。项目位于入海口位置,连接入海口东西两岸,盾构掘进至河底时,上覆土平均厚度30m,水深12~14m,开挖面处于④全断面粉细砂地层,该地层饱和、密实,成分较均匀,强度高,力学性质较好,推荐地基土容许承载力基本值 $f_{so} = 200 \sim 300\text{kPa}$;标贯平均值47.1,砂中石英含量65%~80%,属于典型铁板砂地层。左线盾构掘进至612环完成2 000mm管理行程后回缩油缸过程中,发现油缸撑靴板与尾盾内侧30mm高导向条发生互切,导向条铁块被切下,剩余部分仅余18mm,且612环管片贴紧尾盾导向条并将管片端面附近保护层破坏。采用全站仪通视尾盾全断面采集尾盾变形数据发现,19~20号油缸区域盾体钢板向内凹陷最大值达67.5mm。尾盾变形如图1所示,距离中盾、尾盾焊缝1.1,1.9m典型断面变形数据如图2所示。

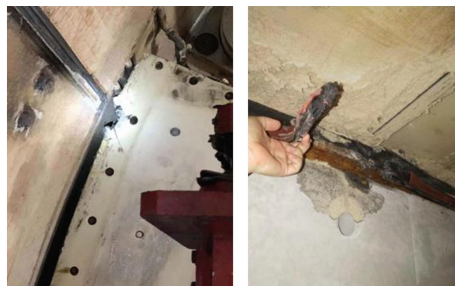


图1 尾盾变形实拍

Fig. 1 The actual shield tail deformation

1.2 矫正概况

现场采用尾盾开孔排砂、多孔协同注入膨润土泥浆等辅助措施,成功使尾盾周边水土应力重分布。在尾盾受限空间(避开无法拆卸的管片拼装机及行进托梁)条件下,采用型钢拼接成矫正工装梁,通过不断改变顶点位置、顶铁受力面,多个简易梁灵活组合进行顶撑矫正,成功实现了尾盾的局部整

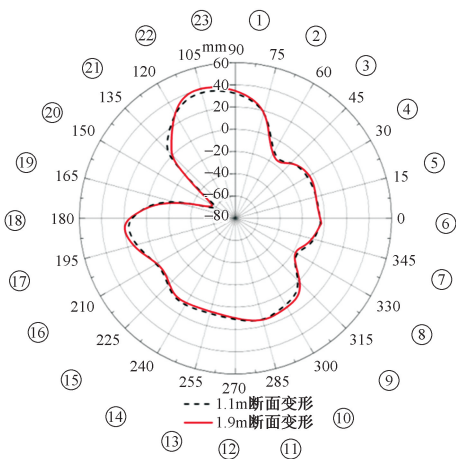


图 2 典型断面测量结果

Fig. 2 The deformation measurement result of typical section

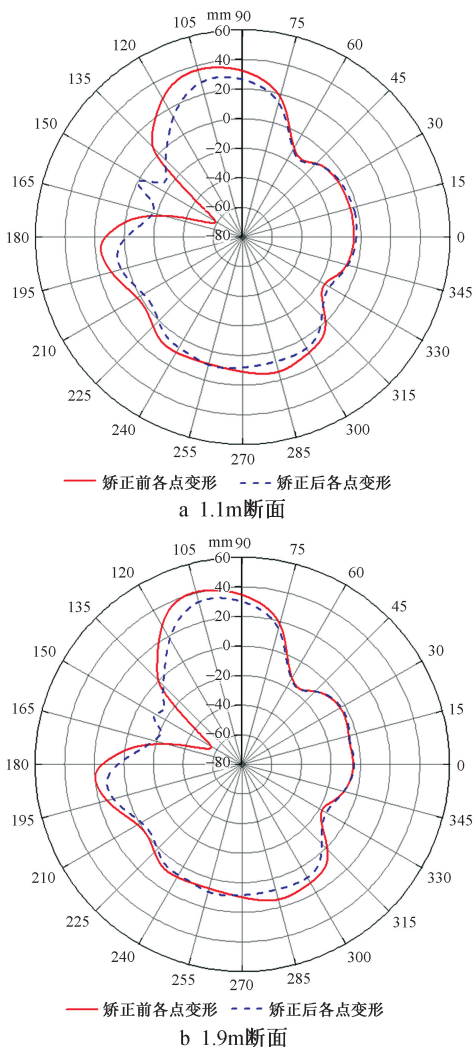


图 3 矫正前后变形对比

Fig. 3 Contrast of deformation before and after correction

圆。典型断面矫正效果如图 3 所示。

对比尾盾矫正作用点 1.1m 断面(最大变形断

面)测量结果,最大变形处由内凹 67.5mm 变形至外凸 6.5mm,最大变形区域平均内凹变形 14mm,与盾构组装时尾盾最大内凹 12mm 对比,最大变形区域的尾盾矫正基本恢复至装机初始状态。

2 盾构机尾盾变形原因分析

盾构左线水下掘进尾盾变形受困后,从地层参数、盾构设备、盾构操作 3 个方面分析尾盾变形原因。

2.1 地层参数

盾构隧道江中段河床平缓,地层分布均匀,从上到下依次为②淤泥质粉质黏土,③₆粉砂,③₈粉细砂和④粉细砂,隧道全断面处于④粉细砂,根据地勘报告显示垂直和水平基床系数为 35MPa/m,标贯平均值为 47.1 且砂层中石英含量为 65%~80%。盾构掘进过程中多次从径向孔取得粉细砂地层的土样,取样研究发现,此类粉细砂静止片刻迅速脱水沉淀形成致密铁板状态,骨架密实且强度高,经振荡扰动后土骨架迅速被水溶解形成浑浊溶液。由此推断该地层地下水丰富,极易扰动,地层扰动过后,砂颗粒迅速下沉板结,表现为典型铁板砂地层;盾构掘进扰动地层后,盾体周围地层迅速重分布、自密实包裹盾体。在尾盾矫正过程中,采用磁力钻从尾盾变形处开孔取出盾体外侧硬物,确定变形区域壁后存在厚度不均的硬塑状外包体。为探明盾体外侧硬物中是否含有尾盾后方同步注浆前窜的水泥,项目部委托北京中科光析化工技术研究所做了 3 次试验,均判定该硬物中不存在水泥成分,推断外包体的形成原因主要为在高压海水环境处盾构长期纠偏过程中,地层中的砂土含黏土夹层在盾构周边选择性聚集成团、失水变硬,在盾构机向前掘进过程中不断黏聚-长大-挤密-脱落-再黏聚,最终形成硬塑状土体结块外包体。外包体的形成导致盾体直径变大,盾构姿态进一步恶化,盾构纠偏过程中推力骤增,在尾盾变形处形成巨大的侧向力,会加剧变形发生。由此可见,高埋深、铁板砂地层和盾体外高应力压缩固结的外包体是此次尾盾变形的主要原因之一。

盾构左线掘进至 613 环时,尾盾变形至无法掘进,此处地层土体参数如表 1 所示。

2.2 盾构设备

为研究尾盾同步注浆孔、尾盾油脂孔和冷冻孔对结构整体力学性能的影响,建立一种有孔道、一种无孔道的尾盾有限元模型,在相同工况下分析两者结构性能的差异性。

表 1 土体参数
Table 1 Soil parameters

层号	岩土名称	层厚/m	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	侧压力 系数	基床系数/ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	
							垂直	水平
②	淤泥质粉质黏土	5.8	18.3	8.6	2.6	0.72	6	6
③ ₆	粉砂	5.6	19.9	4.6	32.7	0.41	20	20
③ ₈	粉细砂	3.3	20.6	4.6	33.5	0.40	25	25
④	粉细砂	16.0(中心)	20.6	4.0	35.0	0.40	35	35

尾盾周边荷载为水土压力,采用水土分算的方式进行计算^[12],不考虑尾刷结构及腔体内部尾盾油脂对尾盾后部的支撑作用;模型约束仅考虑一端固定,周围土体采用仅受压弹簧考虑。设计两种计算工况:工况 A 为考虑盾体管路设置状态下尾盾结构受力状况,工况 B 为无管路状态下尾盾结构受力状况。两种工况计算模型如图 4 所示。

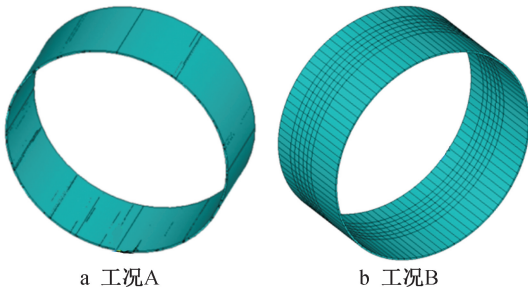


图 4 尾盾计算模型

Fig. 4 Calculation model of shield tail

经过工况分析和数值模拟,工况 A、B 的最大变形均在 15mm 左右,而在 19~20 号油缸位置变形仅有 5.9mm,满足尾盾结构变形要求;尾盾中的管路仅影响结构局部应力,对结构变形和整体应力状态影响不大。故尾盾构造因素不是此次影响尾盾变形的主要原因,尾盾刚度满足正常掘进的施工要求,但在盾构需要进行纠偏时可能存在刚度不足。

2.3 盾构操作

由于 19~20 号管片拼装点位盾体外侧存在硬塑状土体结块外包体,导致盾构推进时左右侧地层摩擦力不均,盾构持续存在左漂现象。

盾构持续左漂导致盾构水平姿态难以控制,为保证盾构姿态,533~613 环掘进时采取了许多措施控制盾构以稳定姿态推进,诸如左侧区压远大于右侧区压,盾构机必须以机头偏右、机尾偏左的趋势掘进,533~613 环扭矩趋势如图 5 所示。盾构左漂和姿态控制会使尾盾与土体产生不同程度的接触,当尾盾行进轨迹超出刀盘开挖范围后,盾体会与土体相互挤压,产生附加应力,导致尾盾产生变形。附加应力与地层基床系数和尾盾向地层偏移距离

有关,在同一地层下,尾盾变形与尾盾向地层偏移距离有直接关系。以盾构机前点和后点在同一里程的水平姿态差作为尾盾向地层水平偏移距离,则 613 环尾盾变形前 80 环其向地层水平偏移距离如图 6 所示。由图 6 可知,533~613 环掘进过程中尾盾左侧一直存在大量挤土的现象。

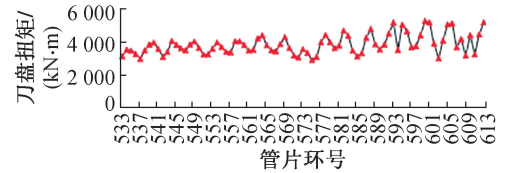


图 5 533~613 环扭矩趋势

Fig. 5 Torque trend of ring shield from ring 533 to 613

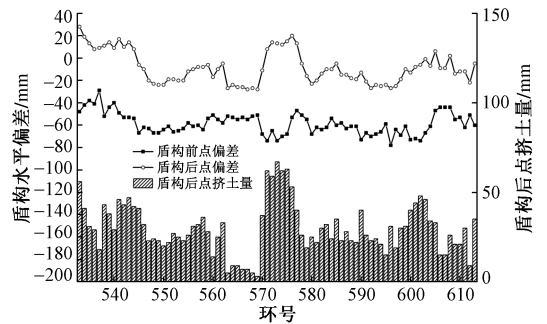


图 6 613 环尾盾变形前 80 环掘进姿态

Fig. 6 Tunneling attitude of the first 80 rings prior to deformation of ring 613 shield tail

由于 612 环掘进之前未发生管片与尾盾卡死的现象,故 612 环掘进之前未对尾盾进行全断面变形监测,也没有相应的变形数据,但可以从尾盾间隙变化反映盾构变形的程度。尾盾内径设计为 11 960mm,管片外径为 11 800mm,在不考虑导向条(厚度 4cm)设置的条件下,管片与盾体内壁间隙理论值为单边 80mm,同直径方向尾盾间隙和为 160mm。通过监测 533~613 环尾盾间隙数据可以间接验证尾盾结构的变形发展过程和趋势,533~613 环掘进变形区域尾盾间隙变化为 19 号、20~7 号、8 号(变形最大处对角线间隙和)径向间隙和值开始逐渐减小,呈现出明显的下降趋势;而 20 号、21~10 号、11 号径向间隙和值逐渐增大,呈现明显

的增长趋势。实际表现为 19 号、20~7 号、8 号油缸处盾壳内凹变形,20 号、21~10 号、11 号油缸处盾壳外凸变形,尾盾间隙趋势如图 7 所示。

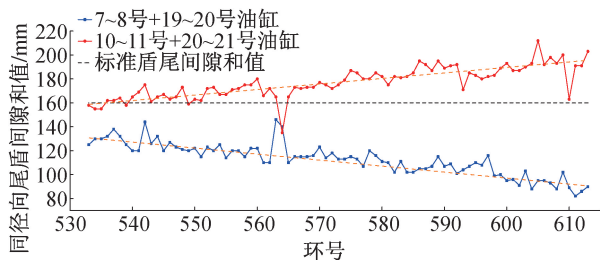


图 7 533~613 环掘进变形区域及相邻区域径向尾盾间隙之和趋势

Fig. 7 Trend of the sum of radial shield tail gap of deformation area and adjacent area during the 533~613 ring tunneling

19~20 号点位盾体外侧外包体的形成导致盾构姿态不良进一步恶化,使得左侧尾盾挤土效应不断加剧,19~20 号点位盾体内凹不断持续。故左线河底掘进左漂,盾构纠偏操作为此时尾盾产生大变形的的主要原因之一。

613 环尾盾变形矫正后,盾构姿态依然难以控制,为控制盾构姿态,盾构掘进采取以下措施:盾构机前后保持一定的水平姿态差、调整左右分区压力值、调整盾构机贯入度、调整仿形刀开启行程。在盾构机调整姿态过程中,这些操作直接影响到盾构机尾盾变形,出现了再次变形等现象。为了兼顾盾构姿态调控和尾盾变形情况,同时采取了中盾径向孔放砂、调节仿形刀开启行程的措施,有效控制了尾盾变形,并使盾构掘进姿态恢复正常。

3 尾盾变形神经网络预测

BP 神经网络是一种利用误差反向传递算法的神经网络,是目前运用最广泛的一种神经网络,在隧道工程领域运用较为成熟^[13-14]。本项目中尾盾变形因素和控制变形措施与尾盾变形量之间是一种不明确的、非线性的关系,可以通过 BP 神经网络对其中潜在的关系进行学习、训练,挖掘各影响指标与尾盾变形量之间的关系,可以得到本隧道高埋深、铁板砂地层纠偏掘进的尾盾变形预测模型。

通过尾盾变形原因分析可知,19~20 号点位盾体外侧存在包裹体、此点位持续挤土产生的地基反力过大是本次尾盾变形的的主要原因。针对上述两项原因,在后续掘进中持续采取尾盾开孔放砂、径向孔开孔放砂两项措施缓解尾盾变形。

本项目 612 环实现尾盾变形矫正,成功复推后,加密尾盾圆度测量频次,获取每次掘进完成后的尾

盾最大变形量,在盾构掘进 613~700 环区间(卡纳普里河底掘进里程 1km,地层一致)共测量 25 次尾盾圆度,尾盾最大变形量有丰富的样本。运用数值分析软件内置的 BP 神经网络模型,建立在深埋富水砂层中大直径盾构纠偏掘进尾盾变形量预测模型,选取后续 5 环掘进完成后尾盾最大变形量为检验样本,检查模型的准确性。

3.1 选取影响因素和评价体系

3.1.1 尾盾变形主要影响因素

由本文第 2 节分析,在水体高埋深均质地层中,影响尾盾变形的因素为盾构纠偏施工参数和相关措施,具体有以下 6 个:尾盾向地层偏移量,盾构上下区压差,盾构左右区压差,贯入度,径向孔放砂和仿形刀开启行程。将以上 6 个影响因素作为 BP 神经网络输入层,建立 BP 神经网络模型。选取的 25 组掘进尾盾最大变形值和 6 因素详细参数如表 2 所示。

表 2 尾盾变形预测模型训练样本

Table 2 Training samples of shield tail deformation prediction models

序号	尾盾向地层偏移量/mm	上下区压差/MPa	左右区压差/MPa	贯入度/(mm·r ⁻¹)	径向孔放砂/m ³	仿形刀行程/cm	尾盾变形最大值/mm
1	2	12.0	2.2	8	2.3	10	25.1
2	0	14.3	5.8	11	2.0	10	22.2
3	11	16.5	13.3	22	1.8	10	25.3
4	8	17.3	20.0	21	0	8	41.8
5	12	17.3	20.0	21	1.0	10	36.8
6	45	14.2	17.8	20	0.8	10	37.2
7	71	14.9	23.3	14	1.0	12	37.0
8	60	16.0	22.3	13	0	8	54.3
9	77	16.0	22.3	13	0.4	10	46.7
10	111	18.6	18.2	11	0.7	9	31.1
11	103	17.2	18.7	12	1.4	12	15.4
12	123	17.8	17.5	11	1.55	12	14.4
13	131	13.5	17.7	13	1.2	12	12.9
14	136	13.2	18.5	8	1.6	12	14.0
15	131	8.5	21.9	13	1.2	12	15.1
16	114	10.9	21.3	14	1.0	12	16.4
17	119	11.2	18.6	19	0.4	11	23.9
18	124	13.5	18.1	10	0.4	11	22.7
19	118	12.2	20.9	13	1.0	12	22.0
20	91	12.6	21.2	14	0.5	12	17.9
21	69	2.1	18.8	27	0.3	12	21.8
22	58	7.2	15.5	29	0	9	23.4
23	86	8.5	22.9	20	0	9	20.2
24	29	8.3	1.3	26	0	11	22.0
25	61	11.9	17.4	33	0	8	24.7

3.1.2 尾盾变形评价体系

根据盾构复推后的掘进状态,选取了影响盾构

掘进的主要因素,并收集了各因素的参数。为避免神经网络训练的离散性和无法收敛,需将各影响因素归一化处理,即将各参数数据映射到[0,1]区间。

选取的6因素中,前4个影响因素与尾盾变形结果正相关,后2个因素为有效措施,与尾盾变形结果为负相关。对6个因素进行归一化处理如式(1),(2)所示,归一化准则如表3所示。

$$y = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

$$y = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中: y 为归一化后指标值(无量纲,取值范围[0,1]); x 为某一因素的实际测量值; x_{\min} 为该因素所有样本中的最小值; x_{\max} 为该因素所有样本中的最大值。

3.2 BP神经网络模型训练及预测

在数值分析软件中构建大直径尾盾变形预测模型BP神经网络,该网络由输入层、隐藏层和输出层组成,隐藏层神经元个数由经验公式一般确定为2倍输入层个数加1^[15],输入参量为6个,隐藏层2个,输出参量为1个,根据经验公式可确定隐含层神经元个数为13,形成6-13-13-1的网络拓扑结构,通过BP神经网络模型不断优化内置函数和计算精度得到最优解。将尾盾变形的预测值和测量值之间的相关系数 R 作为模型性能,BP神经网络模型在最优神经网络训练阶段相关系数和均方误差如图8,9所示。

由图8,9可知:BP神经网络模型在尾盾变形模型训练过程的相关系数为0.92122,均方误差为0.0049996,相关误差值在可接受范围内,表明BP神经网络模型预测尾盾变形值和工程实测变形值之间存在非常高的相关性。因此,可以认为此次BP神经网络训练模型可以应用于本工程该工况下的

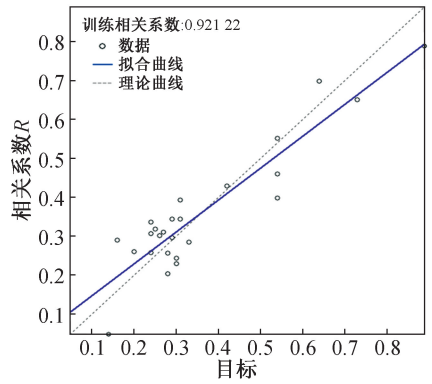


图8 最优神经网络训练阶段相关系数

Fig. 8 Correlation coefficient of optimal neural network training stage

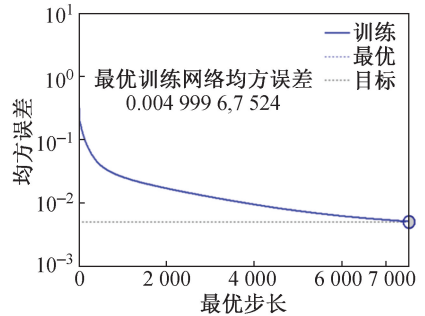


图9 最优神经网络训练阶段均方误差

Fig. 9 Mean square error in the training stage of optimal

尾盾变形分析。由此可得尾盾变形BP神经网络预测模型信息如表4所示。

随机抽取后续掘进的5环参数及相应的减缓变形措施参数作为验证BP神经网络尾盾预测模型的验证样本,具体参数如表5所示。

通过命令流 $Y = \text{sim}(\text{net}, p)$ 调用建立的最优BP神经网络模型,获得盾构复推后的尾盾变形预测值,其中 net 为构建的最优BP神经网络, p 为归一化后的输入参数矩阵。

表3 尾盾变形影响因素归一化准则

Table 3 Normalization criteria for shield tail deformation influencing factors

量化值	尾盾向地层偏移量/mm	上下区压力差(下-上)/MPa	左右区压力差(左-右)/MPa	贯入度/(mm·r ⁻¹)	径向孔放砂/m ³	仿形刀行程/cm	尾盾变形最大值/mm
0	≤0	≤0	≤0	0	≥2.5	12	≤10
0~1	式(1)归一化处理	式(1)归一化处理	式(1)归一化处理	式(1)归一化处理	式(2)归一化处理	式(2)归一化处理	式(1)归一化处理
1	≥150	≥24	≥24	样本最大值	0	0	≥60

表4 最优BP神经网络模型信息

Table 5 The optimal artificial neural network model information

输入神经元数目	输出神经元数目	隐含层层数	第1隐藏层		第2隐藏层		输出层		网络模型
			函数	神经元数目	函数	神经元数目	函数	数目	
6	1	2	tansig	13	logsig	13	purelin	1	前向BP神经网络

表 5 尾盾变形影响因素参数验证样本

Table 6 Validation sample of the shield tail deformation influencing factors

序号	尾盾向地层 偏移量/mm	上下区压力差(下-上)/ MPa	左右区压力差(左-右)/ MPa	贯入度/ (mm·r ⁻¹)	径向孔放砂/ m ³	仿形刀行程/ cm
1	56	10.1	6.1	33	0.4	6
2	48	5.9	1.9	36	0.8	6
3	68	10.0	0	38	0.4	8
4	83	10.3	7.9	40	0	8
5	86	7.2	8.9	34	0.8	10

5 处尾盾变形量的 BP 神经网络预测结果与实测值对比如表 6 所示。

表 6 BP 神经网络预测结果与实测值对比

Table 6 Comparison of BP neural network prediction results and measured values

编号	尾盾变形 预测归一 化值	尾盾变形 预测最大实值/ mm	尾盾变形 实测最大实值/ mm	误差/%
1	0.33	26.5	28.3	-6.36
2	0.38	29.0	26.1	11.11
3	0.31	25.5	23.6	8.05
4	0.32	26.0	26.6	-2.26
5	0.12	16.0	15.6	2.56

在 5 组尾盾变形预测结果中, BP 神经网络预测值与实际值的最大误差为 11.11%, 在可接受范围内; 3 组工况的预测值大于实测值, 说明 BP 神经网络预测值偏于保守, 更有利于实际施工中尾盾变形预警和防控。综上所述, 大直径盾构深埋地层掘进纠偏尾盾变形 BP 神经网络预测模型的预测性能非常高, 可用于本项目左线河底 1km 掘进过程的尾盾变形预测。

4 结语

某海外大直径盾构隧道在河底深埋段全断面铁板砂地层纠偏掘进时, 尾盾发生一次严重变形, 影响盾构掘进, 经过尾盾矫正技术完成了变形矫正。为了控制盾构复推纠偏掘进过程尾盾变形量, 对大直径盾构尾盾变形原因进行了分析, 并总结分析出尾盾变形控制的有效措施, 成功利用 BP 神经网络对后续在深埋段、全断面铁板砂地层纠偏掘进尾盾变形值进行了预测, 具体得出以下结论。

1) 盾构掘进过程中, 尾盾大变形主要有地层和盾构操作两方面原因。在深埋、富水铁板砂地层中, 尾盾易产生较大变形; 盾构由于外包体的存在导致姿态失控, 盾构机头尾水平姿态差、左右分区压力差与贯入度较大是导致尾盾大变形的盾构操作类原因。

2) 大直径盾构在深埋、全断面铁板砂地层纠偏掘进时, 控制尾盾变形的有效措施包括盾构机径向

孔开孔放砂减小外部土体压力、开启仿形刀等。

3) 用于尾盾变形 BP 神经网络预测模型的因素有: 尾盾向地层偏移量、上下区压力差、左右区压力差、贯入度、径向孔放砂、仿形刀开启行程。

4) 用于尾盾变形 BP 神经网络模型的基本构架: 6 个神经元(尾盾变形影响因素), 2 个隐藏层, 每个隐藏层 13 个神经元, 1 个输出神经元(尾盾变形量), 采用 newff 前向 BP 网络, 隐藏层传递函数为 tansig, logsig, 输出层传递函数为 purelin, 训练函数为 traingdm。

5) 本文中的 BP 神经网络尾盾变形预测模型经过检验, 平均误差控制在 10% 以内, 预测值偏于保守, 更有利于实际施工中尾盾变形预警和防控。大直径盾构深埋地层掘进纠偏尾盾变形 BP 神经网络预测模型的预测性能非常高, 可用于本项目左线河底 1km 纠偏掘进过程的尾盾变形预测, 同时为本项目右线掘进提供有效参考和借鉴。

6) 实际施工过程中, 尾盾产生变形影响因素较多, 地质情况复杂多变, 本文所述尾盾变形预测方法在应用方面还有待进一步优化和改进, 尤其是在尾盾变形原因和防控方面的探索和研究需进一步加强。

参考文献:

- [1] 李策, 王士民, 王承震, 等. 基于实测内力的大直径水下盾构隧道荷载反演分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(3): 103-113.
LI C, WANG S M, WANG C Z, et al. Back analysis of load of large underwater shield tunnel based on measured internal force [J]. China civil engineering journal, 2020, 53(3): 103-113.
- [2] 张斌. 基于应力释放的大直径盾构隧道地表沉降分析[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(1): 137-141.
ZHANG B. Surface settlement analysis of large-diameter shield tunnel based on stress release rate [J]. Railway standard design, 2020, 64(1): 137-141.
- [3] 岳岭, 刘方, 刘辉, 等. 基于人工神经网络的大直径盾构隧道施工地层变形预测分析[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(1): 122-126.
YUE L, LIU F, LIU H, et al. Prediction and analysis of ground deformation in large diameter shield tunnel construction based on artificial neural network [J]. Railway standard design, 2020, 64

- (1):122-126.
- [4] 陈桥,孙振川,张兵,等. 超大直径盾构在海域软土地层掘进推进系统参数控制方法研究——以汕头海湾隧道工程为例[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(1):126-133.
CHEN Q,SUN Z C,ZHANG B,et al. Parameters control method for thrust system of super-large diameter shield boring in soft soil layer of sea area;a case study of Shantou Bay tunnel project[J]. Tunnel construction,2020,40(1):126-133.
- [5] 徐冲. 砂卵石地层泥水平衡盾构隧道掘进参数控制[J]. 铁道建筑,2019,59(2):94-97.
XU C. Control of tunnel driving parameters of slurry balance shield in sandy gravel stratum[J]. Railway engineering,2019,59(2):94-97.
- [6] 张晓峰. 基于神经网络的盾构土压平衡控制模型的研究[D]. 大连:大连理工大学,2009.
ZHANG X F. Control model of earth pressure for shield tunneling based on neural network [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2009.
- [7] 潘屹,马安震,孙海东,等. 下穿黄河强透水砂卵石地层盾构隧道施工技术[J]. 施工技术(中英文),2025,54(3):28-35.
PAN Y,MA A Z,SUN H D,et al. Construction technology of shield tunnel crossing the Yellow River under strong permeable sandy pebble strata[J]. Construction technology,2025,54(3):28-35.
- [8] 营升. 盾构连续上跨下穿既有有线变形规律及控制技术研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(7):96-103.
YING S. Research on deformation characteristics and control technology of shield continuous crossing existing line [J]. Construction technology,2024,53(7):96-103.
- [9] 管会生,黄俊文. 盾构盾尾强度计算分析[J]. 工程机械,2008,39(8):34-37,65,76-77.
GUAN H S,HUANG J W. Calculation and analysis of a shield tail strength[J]. Construction machinery and equipment,2008,39(8):34-37,65,76-77.
- [10] 邵成猛. 软土地层土压平衡式盾构盾尾有限元分析及优化对策[J]. 隧道建设,2017(S1):26-31.
SHAO C M. Finite element analysis and optimization countermeasures for shield tail of earth pressure balanced shield in soft stratum[J]. Tunnel construction,2017(S1):26-31.
- [11] 张雪辉,白云,徐晓扉,等. 大深度超大直径盾构盾尾受力性能探究[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(S1):100-106.
ZHANG X H,BAI Y,XU X F,et al. Mechanical property analysis of super-large-diameter shield tailskin under deep ground load [J]. Chinese journal of underground space and engineering,2017,13(S1):100-106.
- [12] 张子新,胡文. 黏性土地层中盾构隧道开挖面支护压力计算方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(3):606-614.
ZHANG Z X,HU W. Investigation on excavation face support pressure calculation methods of shield tunnelling in clayey soil [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2014,33(3):606-614.
- [13] 郭子奇,杨双锁,李彦斌,等. 基于 PSO-BP 神经网络的地铁盾构场地土体参数反演[J]. 太原理工大学学报,2020,51(2):171-176.
GUO Z Q,YANG S S,LI Y B,et al. Back analysis of soil parameters of metro shield site based on PSO-BP neural network [J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2020,51(2):171-176.
- [14] 邹今检. 盾构土压平衡动态神经网络逆控制技术研究[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(7):1104-1109.
ZOU J J. Inverse control technology of dynamic neural network of EPB shield[J]. Tunnel construction,2019,39(7):1104-1109.
- [15] 方基飞. 基于人工神经网络的地铁施工项目成本与工期延误预测研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(7):57-63.
FANG J F. Research on cost and schedule delay prediction for subway construction projects based on artificial neural networks [J]. Construction technology,2025,54(7):57-63.