

砂性地层盾构掘进撕裂刀磨损规律分析*

王义盛¹ 杨志超² 张 炎³ 赵小鹏¹ 闵凡路² 张建峰⁴

(1. 中交隧道工程局有限公司, 100102, 北京; 2. 河海大学土木与交通学院, 210098, 南京;

3. 山东省枣庄市城乡水务局, 277899, 枣庄; 4. 河海大学力学与材料学院, 211100, 南京//第一作者, 高级工程师)

摘 要 目的: 依托南京和燕路过江通道盾构隧道工程, 针对砂性地层中撕裂刀磨损严重的问题开展研究, 寻找适合砂性地层撕裂刀磨损量预测的方法。方法: 实测砂性地层中盾构撕裂刀的磨损情况, 分析不同换刀区间刀具磨损量; 利用经验公式法对整个砂性地层撕裂刀磨损量进行拟合, 利用实测磨损量反推得到不同切削半径的撕裂刀磨损系数; 利用 BP (反向传播) 神经网络法对撕裂刀磨损量进行拟合; 比较经验公式法和 BP 神经网络法适合的应用条件。结果及结论: 粉细砂地层下全刀盘撕裂刀磨损系数为 1.48×10^{-3} mm/km; 粉细砂-中粗砂地层下刀盘中心刀、正面刀和边缘刀区域撕裂刀的磨损系数分别为 7.84×10^{-3} mm/km、 17.88×10^{-3} mm/km、 28.64×10^{-3} mm/km; 利用 BP 神经网络对砂性地层撕裂刀磨损规律进行拟合, 效果较好, 拟合优度大于 0.95, 误差率为 20.7%。建议砂性地层中撕裂刀的磨损量预测使用经验公式法; 其他地层中经验公式法预测效果较差时, 可使用 BP 神经网络法进行刀具磨损量预测。

关键词 泥水盾构; 砂性地层; 撕裂刀; 磨损规律分析; 神经网络

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.08.014

Tearing Cutter Wear Law Analysis of Shield Excavation in Sandy Stratum

WANG Yisheng, YANG Zhichao, ZHANG Yan, ZHAO Xiaopeng, MIN Fanlu, ZHANG Jianfeng

Abstract Objective: Based on the shield tunnel project of Nanjing Heyan Road river-crossing channel, the problem of tearing cutter severe wear in sandy stratum is studied, and the methods suitable for predicting tearing cutter wear amount in sandy stratum are explored. Method: The wear of shield tunneling tearing cutter in sandy stratum is measured on-site, and the cutter wear amount of different cutter changing intervals is analyzed. EF (empirical formula) method is applied to fit the wear amount of tearing cutters in the entire sandy stratum, and tearing cutter wear coefficients of different cutter radii are de-

rived reversely from the field-measured wear amount. BP (backpropagation) neural network method is applied to fit the tearing cutter wear amount. The application conditions suitable for EF method and BP neural network method are compared. Result & Conclusion: The wear coefficients of full head tearing cutter in fine sand stratum is 1.48×10^{-3} mm/km; the wear coefficients of the tearing cutter in lower disc center cutter, front cutter and edge cutter areas when constructing in the fine sand-medium coarse sand stratum are 7.84×10^{-3} mm/km, 17.88×10^{-3} mm/km and 28.64×10^{-3} mm/km, respectively; the BP neural network is applied to fit the wear law of tearing cutter in sandy stratum, and the results are adequate with goodness of fit greater than 0.95 and error rate of 20.7%. EF method is recommended for tearing cutter wear prediction in sandy stratum, but when the prediction performance of the EF method is poor in other strata, the BP neural network method can be employed.

Key words slurry shield; sandy stratum; tearing cutter; wear law analysis; neural network

First-author's address CCCC Tunnel Engineering Co., Ltd., 100102, Beijing, China

0 引言

近年来, 盾构法施工以其快速、安全等优点已成为城市隧道建设主要的施工方法之一。但在磨蚀性较高的地层中掘进时, 刀具磨损是影响工程施工速度、造价的关键因素之一。在复杂地层中, 偏磨、崩刃等刀具非正常磨损现象甚至会导致盾构被迫停机^[1-2], 如: 南京长江隧道工程, 盾构在穿越粉细砂与砂卵石等上软下硬复合地层时, 因砂性地层石英颗粒含量高, 刀盘刀具磨损严重, 导致盾构停机半年^[3]; 武汉轨道交通 7 号线三阳路越江隧道工程, 右线隧道盾构在进入复合地层后, 外圈换刀频

* 国家自然科学基金项目(52078189)

率增加至每推进 20 环换 1 次,刮刀和滚刀均出现了不同程度的偏磨或磨损^[4]。因此,有必要依托具体工程开展盾构刀具磨损量实测,明确刀具磨损规律。

针对盾构刀具在不同地层中的磨损问题,文献[5]通过复合地层滚刀磨损量实测及影响因素分析,给出了不同岩层条件下滚刀间距合理范围,提出了合理设置滚刀装配扭矩、数量等减少磨损量的有效措施;文献[6]利用最小二乘法,建立了北京地铁 4 号线砂卵石地层盾构刀具磨损量与掘进参数、掘进距离的关系式,并提出了掘进参数的合理范围;文献[7]通过室内试验发现,砂性地层切刀安装朝向影响其磨损量,同时表面磨损形式、磨损量变化与安装半径、石英颗粒质量分数之间均呈正相关关系;文献[8]研究发现,在砂卵石地层中,设置撕裂刀可以减少刮刀的磨损量,但撕裂刀对刮刀的保护作用随距离的增加迅速减小;文献[9]依托成都地铁盾构工程实例,介绍了保护刀具、减少磨损量的方法,如利用重型撕裂刀替换滚刀、调整启动扭矩等。

在刀具磨损规律方面,文献[10]根据刀盘刀具切削土体受力特性,建立了一套基于受力分析的适用于砂性土深埋泥水盾构刀具磨损量计算的方法;文献[11]依据磨损量计算模型、刀具破岩力模型和实测工程数据推导,得到了盾构滚刀和切刀磨损量预测计算模型,模型计算值与实测磨损量间的误差小于 15%;文献[12]根据滚刀破岩时与岩石相互作用的工作原理和滚刀的磨损机理,提出了基于滚刀破岩摩擦功的磨损量预测模型;文献[13]利用经验公式对盾构刀具的磨损量进行了分析计算,可预测

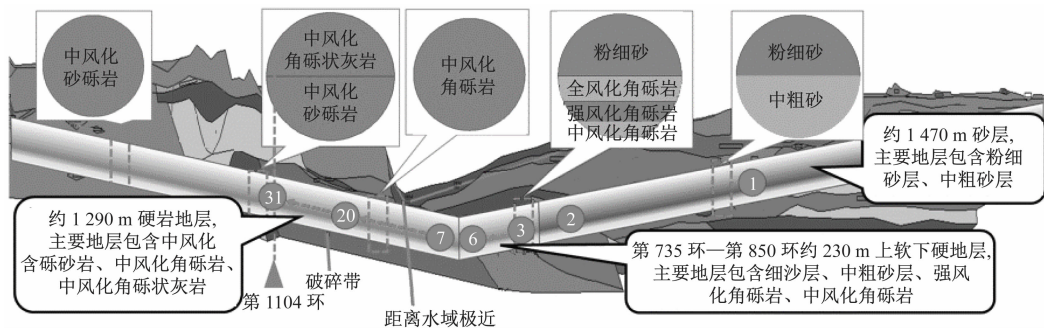
刀具是否需要更换。此外,神经网络的方法也开始用于刀具磨损量预测,文献[14]依托孟买地铁盾构穿越风化岩层滚刀磨损实例,建立了刀盘扭矩和转速、推力、掘进速度、滚刀数量、滚刀直径等参数的 CNN(卷积神经网络)模型,预测效果较好,拟合优度 R 为 0.854。

以上研究多集中于滚刀、切刀在复杂地层特别是岩层中的磨损分析,关于砂性地层中盾构撕裂刀磨损规律的研究关注较少。本文依托南京和燕路过江通道大直径泥水盾构穿越石英颗粒质量分数高的砂性地层工程,开展盾构撕裂刀的磨损量实测,分析撕裂刀在砂性地层中的磨损规律,利用经验公式、BP(反向传播)神经网络对撕裂刀磨损量进行拟合,并探讨两种方法预测撕裂刀磨损规律的适用性,为实际工程中预测刀具磨损量提供参考。

1 工程概况

1.1 地层概况

南京和燕路过江通道工程,采用 2 台开挖直径为 15.03 m 的泥水盾构施工,最大水深约为 50 m,最大水压达到 0.79 MPa。图 1 是该工程地质剖面图。盾构机主要穿过粉细砂层、中粗砂层、江底段上软下硬风化岩层、全断面风化岩复合地层等不同程度的风化岩层。隧道盾构段里程为 YK1 + 732.209—YK4 + 708.589,长约 2 976.38 m,其中第 1 环—第 735 环总长度约 1 470 m,主要穿越粉细砂层、粉细砂与中粗砂复合地层。图 2 是盾构穿越 YK3 + 290.000 里程处的隧道横剖面图,砂性地层物理学参数见表 1。



注:圆圈中数字代表道具检查总次序。

图 1 南京和燕路过江通道工程地质剖面图

Fig. 1 Stratigraphical profile diagram of Heyan Road river-crossing channel engineering

1.2 刀具布置

图 3 为本工程泥水盾构机的辐板式刀盘,刀盘

由 6 根主辐条组成,开口率为 29.7%。刀具类型包括滚刀、撕裂刀、刮刀等,其中滚刀与撕裂刀共用一

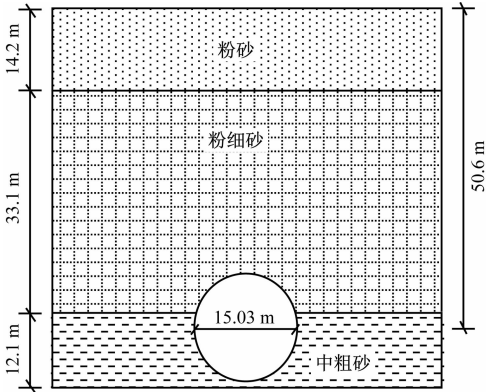


图2 盾构隧道横剖面图(YK3 + 290.000 处)

Fig.2 Diagram of shield tunnel cross-section (at YK3 + 290.000)

表1 砂性地层物理力学参数表

Tab.1 Physical and mechanical parameters of sandy stratum

地层	含水量/ %	密度/ (kg/m ³)	孔隙比	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ kPa	压缩模量/ MPa
粉细砂	22.76	1 970	0.674	31.10	3.65	6.47
粉砂	21.75	1 790	0.656	31.10	3.89	8.38
中粗砂	18.16	1 960	0.614	33.57	4.33	2.61

个刀筒,两种刀具在不同的地层中可以进行互换,在砂性地层中掘进时安装撕裂刀,进入砂-岩复合地层及岩层后,将撕裂刀逐渐更换为滚刀。撕裂刀按切削半径由小到大分为中心刀、正面刀、边缘刀,其在刀盘上的排布情况见图3。中心刀布置在6个常压刀筒中,每个刀筒内置2刃刀具,共12刃;正面刀布置在26个常压刀筒中,每个刀筒内置2刃刀具,共52刃;边缘刀布置在8个常压刀筒中,其中4个刀筒内置2刃刀具,其余刀桶内置1刃刀具,共12刃。按照刀具的切削轨迹由刀盘中心向外依次编为1号到76号。

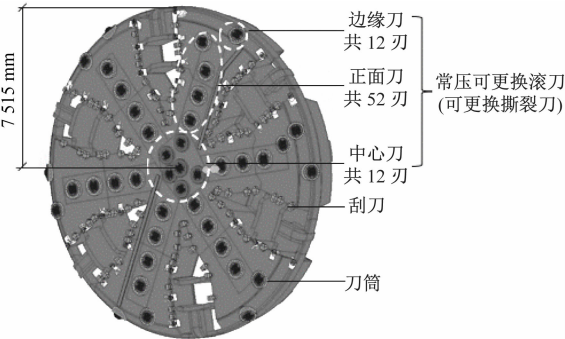


图3 盾构刀盘及撕裂刀布置图

Fig.3 Diagram of shield cutter head and tearing cutter layout

2 砂性地层撕裂刀磨损量实测分析

2.1 刀具磨损量实测

盾构从图1右侧砂性地层开始掘进,在砂性地层掘进过程中,对刀具共检查3次。图4是第410环、第705环与第735环处刀具检查时部分盾构撕裂刀的磨损情况,图5是刀具磨损量统计。根据现场检查实测,第410环处刀具刀齿磨损程度较轻,磨损量较小,所检查的6个位置的刀具中,刀齿磨损量最大为3 mm,3个位置刀具刀齿磨损量为2 mm,2个位置刀具刀齿磨损量仅有1 mm,刀具正常磨损,表面平整无损坏痕迹。对于第705环处刀具,仅检查一处边缘刀的2刃刀具,但此处刀具磨损量远大于第410环处的刀具磨损量,其中65号撕裂刀磨损后刀具高度为11.3 cm,磨损量达到了20 mm。

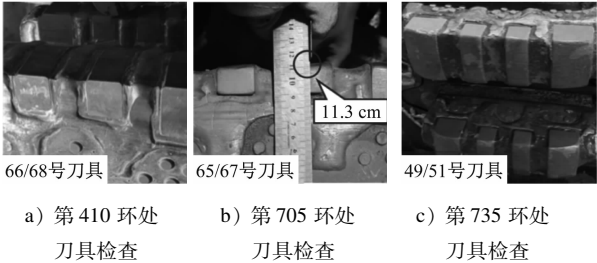


图4 三次刀具检查部分刀具磨损外观图
Fig.4 Wear appearance pictures of some cutters during three cutter inspections

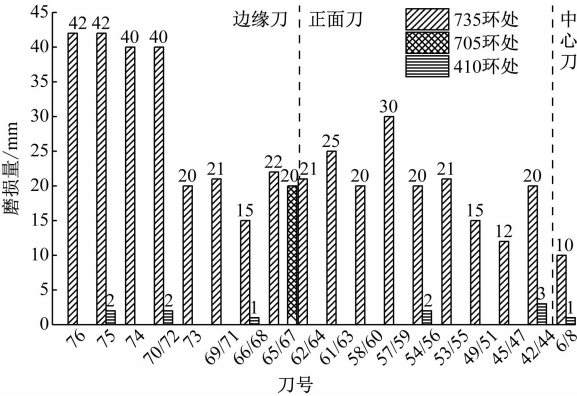


图5 三次刀具检查刀具磨损量统计
Fig.5 Cutter wear statistics during three cutter inspections

第735环处受检刀具的数量远大于第410环和第705环处的受检刀具的数量,刀具磨损面平整,没有出现崩裂等现象。按照刀具的分布区域,刀具的磨损呈现出阶梯状的形态。其中位于刀盘最边缘区域的73号—76号刀具磨损最为严重,这4把刀具的磨损量均大于40 mm,其余撕裂刀磨损量在20

mm 左右;正面刀区域的刀具磨损量大致相同,约为 20 mm,刀具表面磨损平整,未出现偏磨等现象;中心刀区域一处位置的刀具磨损量仅有 10 mm。第 735 环后,盾构机开始进入砂-岩复合地层,撕裂刀不再适用,刀具检查的同时进行了滚刀的更换。总体上来看,砂性地层刀具的磨损面较为平滑,呈明显的打磨状,没有裂纹、断口或其他冲击造成的刀具损坏痕迹。

2.2 不同换刀区间刀具磨损量分析

将所测得的刀具磨损数据进行处理,第 410 环处刀具平均磨损量为 1.83 mm,第 705 环处刀具平均磨损量为 20 mm,第 735 环处刀具平均磨损量为 24.22 mm。将刀具的平均磨损量作为累积磨损量,则可以计算出每一掘进段的刀具平均磨损量。计算得到第 1 环—第 410 环掘进段刀具平均磨损量为 1.83 mm,第 411 环—第 705 环掘进段刀具平均磨损量为 18.17 mm,第 706 环—第 735 环掘进段刀具平均磨损量为 4.22 mm。

为更直观地对比相应地层与掘进参数下刀具的磨损量,将每一段的刀具磨损量除以掘进环数,得到平均每环刀具磨损量(见表 2)。第 1 环—第 410 环掘进段盾构机穿越地层中 95.12% 为粉细砂层,4.88% 为粉细砂与中粗砂复合地层,可认为盾构撕裂刀的磨损主要由粉细砂层造成,石英颗粒质量分数在 50% 以下;第 411 环—第 735 环掘进段盾构机穿越地层中 27.69% 为粉细砂层,72.31% 为粉细砂与中粗砂复合地层,石英颗粒质量分数超过了 50%,石英颗粒质量分数越高,对刀盘的磨损程度影响也越大。

表 2 三次刀具检查的刀具磨损量处理结果表
Tab. 2 Processed data of cutter wear quantity during three cutter inspections

掘进段	地层	石英颗粒 质量分数/%	刀具平均 磨损量/mm	平均每环刀具磨 损量/mm
第 1 环— 第 410 环	粉细砂	49.5	1.83	4.45×10^{-3}
第 411 环— 第 705 环	粉细砂、 中粗砂复合	55.5	18.17	6.16×10^{-2}
第 706 环— 第 735 环	粉细砂、 中粗砂复合	61.1	4.22	1.41×10^{-1}

3 撕裂刀磨损规律分析

3.1 经验公式法拟合撕裂刀磨损量

3.1.1 经验公式

根据工程经验所推导的经验公式进行刀具磨

损量拟合,具有简便、应用广泛等优点,文献[15]记录了一个比较经典的经验公式,见式(1)。

$$\delta = K\pi DNL/(10V) \tag{1}$$

式中:

- δ ——刀具磨损量拟合值,单位 mm;
- K ——磨耗系数,单位 mm/km;
- D ——刀盘直径,单位 m;
- N ——刀盘转速,单位 r/min;
- L ——盾构已经掘进的距离,单位 m;
- V ——盾构掘进的速度,单位 mm/min。

根据式(1)进行第 1 环—第 410 环与第 410 环—第 735 环掘进度刀具平均磨损量拟合,所取掘进参数如表 3 所示。其中磨耗系数取值为砂性地层泥水盾构推荐取值 9×10^{-3} mm/km^[13,15]。由于第 705 环处的刀具检查中只检查了 2 刃刀具,数据样本少,利用经验公式得到的拟合值与实际值有较大偏差,故将第 411 环—第 735 环作为一个掘进段。

表 3 盾构掘进参数取值表
Tab. 3 Parameters used in empirical formula

掘进段	$K/$ (mm/km)	D/m	$N/$ (r/min)	L/m	$V/$ (mm/min)
第 1 环— 第 410 环	9×10^{-3}	15.03	0.97	820	27.0
第 411 环— 第 735 环	9×10^{-3}	15.03	0.97	650	22.8
第 1 环— 第 735 环	9×10^{-3}	15.03	0.97	1 470	25.0

将经验公式拟合值与实际磨损量平均值进行比较。式(2)为拟合误差率的计算公式,计算结果见表 4。

$$C = \left| \frac{\delta - B}{B} \right| \times 100\% \tag{2}$$

式中:

- B ——刀具磨损量实测值,单位 mm;
- C ——拟合误差率,单位%。

表 4 刀具磨损量拟合值与实测值对比表
Tab. 4 Comparison of wear values by empirical formula fitting and field-measurement

掘进段	拟合值/mm	实测平均值/mm	误差率/%
第 1 环—第 410 环	12.52	1.83	584.15
第 411 环—第 735 环	11.75	22.39	47.52
第 1 环—第 735 环	24.24	24.22	0.08

当使用经验公式拟合整个砂性地层撕裂刀磨

损量时,误差率仅有 0.08%。但分别对砂性地层中两个掘进区段的磨损量进行拟合时,误差率分别为 584.15% 和 47.52%,拟合值与实测值差距较大。其原因是经验公式给出的磨耗系数只适用于普通砂质土,而第 1 环—第 410 环掘进段盾构主要穿越的是粉细砂层,第 411 环—第 735 环掘进段盾构穿越粉细砂、中粗砂复合地层,具体到不同类型的复合地层时该经验磨耗系数不再适用,故有必要找到适合不同地层的磨耗系数。

3.1.2 磨耗系数

为了得到适合不同地层的磨耗系数,根据已有掘进参数以及实测磨损量,利用式(1)反向推导第 1 环—第 410 环和第 411 环—第 735 环掘进段刀具磨耗系数 K ,图 6 是刀具磨耗系数反推值。

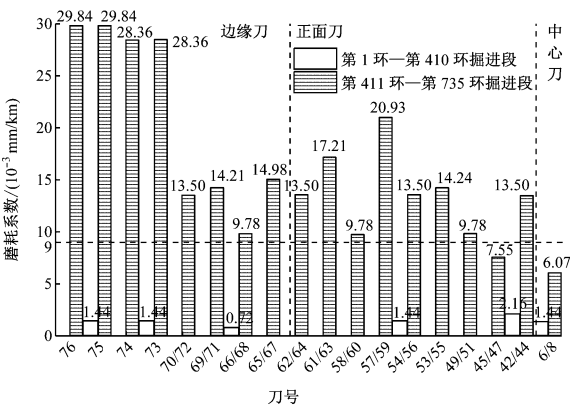


图 6 第 1 环—第 410 环和第 411 环—第 735 环掘进段刀具磨耗系数反推值

Fig. 6 Cutter wear coefficient reverse values of excavation section at 0-410 and 411-735 rings

由图 6 可知,磨耗系数反推值与经验公式推荐值 9×10^{-3} mm/km 差距较大,因此经验公式磨耗系数推荐值明显不能代表实际磨耗系数的平均水平。为得到更合理的磨耗系数取值,将刀具磨耗系数按切削半径进行分类并取平均值,第 1 环—第 410 环、第 411 环—第 735 环掘进段磨耗系数反推值如表 5 所示。由表 5 可知,第 1 环—第 410 环掘进段刀盘上不同区域刀具磨耗系数相差较小。同时第 1 环—第 410 环掘进段盾构机穿越地层的 95.12% 为粉细砂层,可认为盾构刀具的磨损主要由粉细砂层造成,将刀盘三个区域的磨耗系数反推值平均后,得到粉细砂层磨耗系数 K_{fxs} 为 1.48×10^{-3} mm/km。

第 411 环—第 735 环掘进段盾构机穿越地层的 27.69% 为粉细砂层,72.31% 为粉细砂与中粗砂复

表 5 第 1 环—第 410 环、第 411 环—第 735 环掘进段磨耗系数反推值统计表

Tab. 5 Statistics of wear coefficient reverse average values of excavation section at 0-410 and 411-735 rings

掘进段	磨耗系数反推值/(10^{-3} mm/km)	所属区域
第 1 环—第 410 环	1.20	边缘刀
	1.80	正面刀
	1.44	中心刀
第 411 环—第 735 环	21.11	边缘刀
	13.33	正面刀
	6.07	中心刀

合地层。粉细砂-中粗砂复合地层中的刀具磨耗系数计算公式为:

$$K_{411-735} = 0.276\ 9K_{fxs} + 0.723\ 1K_{fh} \tag{3}$$

式中:

K_{fh} ——粉细砂-中粗砂复合地层刀具磨耗系数;

$K_{411-735}$ ——磨耗系数反推第 411 环—第 735 环掘进段值,参照表 5 选取。

为进一步得出刀盘上不同切削半径刀具所应有的磨耗系数,将 K_{fh} 按照刀具在刀盘上的位置进行分类,即: K_{fh-zxd} 为复合地层中心刀区域刀具磨耗系数; K_{fh-zmd} 为正面刀区域刀具磨耗系数; K_{fh-byd} 为边缘刀区域刀具磨耗系数。将表 5 中刀具磨耗系数反推值代入式(3)中的 $K_{411-735}$,可得: $K_{fh-zxd} = 7.84 \times 10^{-3}$ mm/km, $K_{fh-zmd} = 17.88 \times 10^{-3}$ mm/km, $K_{fh-byd} = 28.64 \times 10^{-3}$ mm/km。

3.2 BP 神经网络法拟合盾构撕裂刀磨损量

3.2.1 BP 神经网络模型建立

BP 神经网络基础结构应包括输入层、隐含层和输出层三部分。建立砂性地层下的 BP 神经网络的刀具磨损量模型,首先应确立与刀具磨损量相关的因素作为输入层。将刀盘扭矩、刀盘转速、盾构推力、平均推进速度和贯入度作为考量因素。刀具的磨损量与其使用的距离有关,掘进环数也应成为输入参数。在掘进相同环数的情况下,与刀盘位置中心距离越近,滚动距离越少,刀具被磨损的程度也就越轻,所以刀具号也应作为神经网络的输入层参数,于是就形成了神经网络的 7 个输入层节点。图 7 是最终形成的神经网络示意图,本网络以磨损量为唯一目标,将砂性地层对应的刀具的磨损数据与相关参数共 20 组进行网络模型训练。

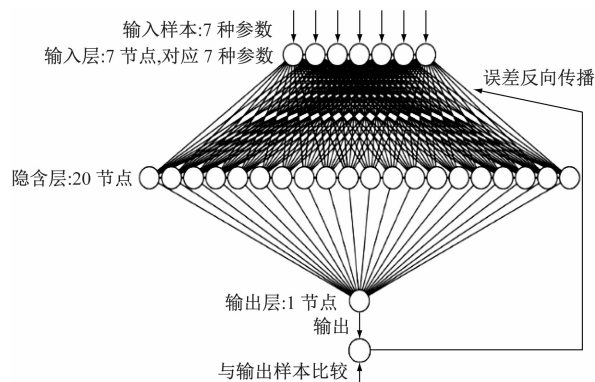


图7 BP神经网络法拟合撕裂刀磨损量网络结构图

Fig.7 Structure diagram of tearing cutter wear fitted by BP neural network

3.2.2 模型拟合效果

图8是BP神经网络训练 R 值图。由图8可见,拟合值与实测值的 R 值约为1。这说明拟合值与实测值几乎一致,该网络的结构较好。使用BP神经网络所形成的模型对第735环处42号刀具磨损量进行检验,实测值是20.00 mm,而拟合值是15.86 mm,误差率为20.7%,其原因是在训练样本较少的情况下,BP神经网络模型的精确度较低。

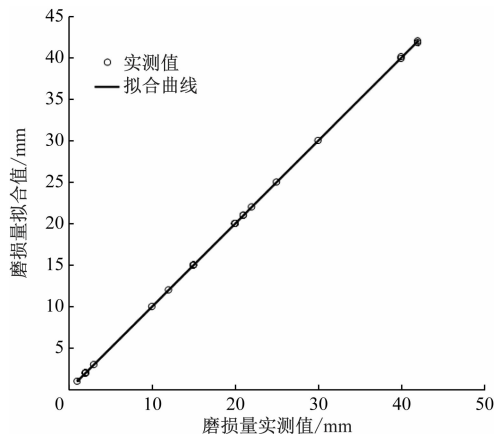


图8 BP神经网络法拟合撕裂刀磨损量训练 R 值图

Fig.8 R value diagram of tearing cutter wear fitted by BP neural network training

3.3 经验公式与BP神经网络法对比

使用经验公式时,经验公式对整个砂性地层的撕裂刀磨损量拟合较为精准,可具体到粉细砂或中粗砂类地层,但使用相同的磨损系数会造成拟合不准确。但利用经验公式拟合盾构撕裂刀磨损量具有简便、所需训练数据少的优点。且大直径泥水盾构撕裂刀在砂性地层中的磨损规律,有着分区变化的特征,在中心刀区域、正面刀区域和边缘刀区域

的刀具磨损规律并不相同,将不同切削半径和不同地层的撕裂刀分类,进一步精细化经验公式的磨损系数,可使准确度、适用性增强。

BP神经网络法的本质是建立数据之间的联系,具有拟合准确度高的优点,但对数据量要求较高。砂性地层刀具检查次数仅有三次,同时检查刀具数量较少,但砂性地层刀具磨损规律较为明确,较少的数据量对神经网络的建立影响不大。但进行预测时的准确度较低,故利用BP神经网络法需要更多的训练数据作为支撑。砂性地层中撕裂刀磨损具有规律较为明显的优点,故建议使用经验公式法;在其他地层中经验公式法预测效果较差时,建议使用BP神经网络法。

4 结论

1) 使用经验公式对整个砂性地层中盾构撕裂刀的磨损量拟合较精准,误差率仅为0.08%;根据实测数据推导出粉细砂性地层全刀盘撕裂刀磨损系数为 1.48×10^{-3} mm/km;粉细砂-中粗砂性地层中刀盘不同区域的撕裂刀磨损系数,中心刀区域为 7.84×10^{-3} mm/km,正面刀区域为 17.88×10^{-3} mm/km,边缘刀区域为 28.64×10^{-3} mm/km。

2) 利用BP神经网络法对盾构撕裂刀磨损量进行拟合效果较好, R 大于0.95,预测误差率为20.7%。

3) 经验公式法预测盾构撕裂刀磨损量具有简便、所需数据量少的优点,但适用性较差;利用BP神经网络法进行刀具磨损预测,适用性广泛,但需要较多的训练数据才能使建立的网格结构更好。建议砂性地层中撕裂刀的磨损量预测使用经验公式法,在更为复杂的地层中经验公式法预测效果较差时,可以考虑使用BP神经网络法进行刀具磨损预测。

参考文献

- [1] 朱连臣. 盾构隧道穿越泉域强富水灰岩地质掘进控制技术[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9):160.
ZHU Lianchen. Excavation control technology of shield tunneling through the geology of water-rich limestone in spring area[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9): 160.
- [2] 金华. 南京地铁3号线新庄站——鸡鸣寺站区间复合地层内盾构掘进控制技术[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(6):117.
JIN Hua. Shield tunneling control technology in complex strata on

- Nanjing Metro line: a section from Xinzhuang Station to Jimingsi Station[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(6): 117.
- [3] 郭信君, 闵凡路, 钟小春, 等. 南京长江隧道工程难点分析及关键技术总结[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 2154.
- GUO Xinjun, MIN Fanlu, ZHONG Xiaochun, et al. Summaries of key technologies and difficulties in Nanjing Yangtze River tunnel project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 2154.
- [4] 李波, 包纂. 武汉轨道交通 7 号线三阳路越江隧道施工关键技术[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(5): 820.
- LI Bo, BAO Zhen. Key techniques for construction of Sanyang Road cross-river tunnel of Wuhan Rail Transit Line 7[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(5): 820.
- [5] 竺维彬, 王晖, 鞠世健. 复合地层中盾构滚刀磨损原因分析及对策[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(4): 72.
- ZHU Weibin, WANG Hui, JU Shijian. Analysis of the abrasion of disc cutters of shields in composite ground and countermeasures[J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 43(4): 72.
- [6] 张明富, 袁大军, 黄清飞, 等. 砂卵石地层盾构刀具动态磨损分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 397.
- ZHANG Mingfu, YUAN Dajun, HUANG Qingfei, et al. Analysis of dynamic abrasion of shield cutters in sandy cobble stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 397.
- [7] 陈焱, 王宇皓, 方勇, 等. 砂性地层土压平衡盾构切刀磨损室内试验研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(5): 159.
- CHEN Yan, WANG Yuhao, FANG Yong, et al. Laboratory experimental study on the wear of EPB shield cutting tools in sandy stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(5): 159.
- [8] 江华, 张晋勋, 李继东, 等. 砂卵石地层撕裂刀布置对刮刀磨损的影响研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(1): 103.
- JIANG Hua, ZHANG Jinxun, LI Jidong, et al. Research on the influence of the tearing knife layout on the scraper wear in sandy gravel stratum[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(1): 103.
- [9] 郭家庆. 砂卵石地层盾构掘进的刀具磨损和改善措施[J]. 城市轨道交通研究, 2010, 13(8): 87.
- GUO Jiaqing. Cutting tool wear and improvement measures in sand and gravel strata shield tunneling[J]. Urban Mass Transit, 2010, 13(8): 87.
- [10] 赵峻. 全断面砂性地层泥水平衡盾构刀具磨损理论分析[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(3): 124.
- ZHAO Jun. Theoretical analysis of the cutter wear of a slurry shield driving in full-face sandy strata[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(3): 124.
- [11] 吴俊, 袁大军, 李兴高, 等. 盾构刀具磨损机理及预测分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 109.
- WU Jun, YUAN Dajun, LI Xinggao, et al. Analysis on wear mechanism and prediction of shield cutter[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 109.
- [12] 张斌. 全断面岩石掘进机刀具磨损研究及刀具布局优化[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- ZHANG Bin. Research on tool wear and tool layout optimization of full-face rock roadheader[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [13] 管会生, 高波. 盾构切削刀具寿命的计算[J]. 工程机械, 2006, 37(1): 161.
- GUAN Huisheng, GAO Bo. Calculation for service life of cutting tools of shields[J]. Construction Machinery and Equipment, 2006, 37(1): 161.
- [14] YU H G, TAO J F, HUANG S, et al. A field parameters-based method for real-time wear estimation of disc cutter on TBM cutterhead[J]. Automation in Construction, 2021, 124: 103603.
- [15] 张凤祥, 朱合华, 傅德明. 盾构隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 827.
- ZHANG Fengxiang, ZHU Hehua, FU Deming. Shield tunnelling method[M]. Beijing: China Communications Press, 2004: 827.

(收稿日期: 2022-11-09)

(上接第 81 页)

- DING Zhi, ZHANG Mengya, WEI Xinjiang, et al. Study on pore pressure and microstructure of frozen and thawed soft soil under subway cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2328.
- [7] 胡雷鸣. 某地铁联络通道沉降治理案例分析[J]. 山西建筑, 2015, 41(7): 70.
- HU Leiming. A metro connected aisle settlement management case analysis[J]. Shanxi Architecture, 2015, 41(7): 70.
- [8] 何山. 盾构区间联络通道融沉注浆施工对管片沉降的影响[J]. 城市道桥与防洪, 2016(9): 192.
- HE Shan. Influence of melting and grouting construction on segment settlement in shield tunnel[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2016(9): 192.

(收稿日期: 2020-12-15)