

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.019

应用 t -SNE 流形学习方法的盾构刀盘磨损信号降维

黄玉华¹, 李峰²

(1. 贺州学院 建筑与电气工程学院, 广西 贺州 532899;

2. 广西科技大学 建筑工程学院, 广西 柳州 545006)

摘要: 为了提高盾构刀盘运行稳定性监测能力, 设计一种基于 t -SNE 流形学习方法的盾构刀盘转矩振动信号降维及性能评估方法。根据盾构装备的实际参数, 通过数据驱动实现对刀盘状态参数识别。研究表明: 与 ISOMap、LLE、KPCA 等方法相比, 利用 t -SNE 流形降维可获得较长的 t -分布, 使低维远端点具有较大低维间隔, 可以对正常和退化样本进行精确分类, 进而对含有低维流形的高维数据进行精确识别; 位于马氏空间内的正常运行条件和故障维修取样间隔变化幅度较小, 利用时间相关马氏距离测度来评价刀具性能时可以获得较高精度, 有效消除不同维度间的相关度, 比欧氏距离具备更优性能。

关键词: 盾构刀盘; 性能评估; t -分布随机邻域嵌入; 信号降维

中图分类号: U455 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)03-0096-04

Dimension Reduction of Shield Cutterhead Wear Signal by t -SNE Manifold Learning Method

HUANG Yuhua¹, LI Feng²

(1. School of Architecture and Electrical Engineering, Hezhou University, Hezhou 532899, China;

2. School of Civil Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: In order to enhance the ability of monitoring the running stability of shield cutterhead, a method for dimensionality reduction and performance evaluation of torque vibration signal of shield cutterhead based on t -SNE manifold learning was designed. According to the actual parameters of shield equipment, the identification of cutter state parameters was realized by data driven. The results show that compared with ISOMap, LLE, KPCA, etc., using t -SNE manifold dimensionality reduction can obtain a longer t -distribution, so that the low-dimensional far end points will have a larger low-dimensional interval, and can accurately classify normal and degenerate samples, and accurately identify high-dimensional data containing low-dimensional manifold. The variation of normal operating conditions and fault maintenance sampling interval in Markov space is small, and the use of time-dependent Markov distance measure to evaluate tool performance can obtain higher precision, effectively eliminate the correlation between different dimensions, and have better performance than Euclidean distance.

Keywords: cutter head of shield tunneling; performance evaluation; t -distributed random neighborhood embedding; signal dimension reduction

0 引言

刀盘在盾构装备中是一个核心受力部件, 能够实现掘进并维持开挖面稳定, 直接影响掘进效率^[1-2]。由于在实际使用过程中的运行工况比较恶劣, 且实际参数也呈现复杂多变的特点, 其中有 50% 以上的失效都是刀盘运行失效的问题所造成, 由此造成掘进效率变慢, 并导致刀盘使用寿命缩短^[3-5]。

现阶段, 大多数研究都是集中在刀具构型设

计和机械特征分析方面, 主要是从刀具运行机制和破坏机制层面开展相关研究^[6-7]。其中, WANG 等^[8]通过对刀体-岩体界面的力学特性指标进行试验, 建立了刀体损伤的数学模型, 为精确预测刀盘磨损量奠定了理论基础。凌静秀等^[9]建立了 TBM 刀盘动力控制模型, 并对其实际运行状态下的动力学特性进行了研究。夏毅敏等^[10]建立了基于刀盘特征的模糊分层算法, 以求取各刀具主要指标的加权系数, 并采用模糊评价和 TOPSIS 评价法对其进行综合评估。上述研究成果表明,

基金项目: 广西壮族自治区自然科学基金项目 (GXNSFBA297163)

第一作者简介: 黄玉华 (2000—), 男, 广西北流人, 工程师, 本科, 研究方向为工程建设, xzyht1979@163.com。

目前国内外基本都是采用物理模拟方法来建立刀盘构型并对其开展动力特性与开挖荷研究,而进行机制建模的过程受各种环境因素的约束,不能对复杂施工装备进行准确状态反馈。

本研究对盾构设备实际运行工况进行分析,在不考虑模型物理因素制约的条件下,采用 t -SNE 方法构建刀盘性能评估方案。

1 刀盘性能评估方法

1.1 刀盘性能评估流程

在掘进过程中,刀盘转矩主要由驱动刀盘上电机转矩所决定,在工作过程中,当受到土壤挤压的时候,就会在刀盘前后两侧都产生一定压力负荷^[11]。掘进期间,土体对刀盘也会产生一定的摩擦作用,从土层中开挖出的泥块也呈现受压的形态,会在刀背上产生摩擦作用^[12]。刀具是一种需要经常更换的部件,在掘进过程中极易导致刀具弦磨、刀环损耗和断裂现象,从而导致刀具失效。

进行隧道开挖时,将盾构机所获得的各种状态参数组成输入,通过对其特征参数辨识以获得高维几何流形^[13]。之后将马尔科夫试验空间应用于刀具健康状态评估,构建了如图 1 所示的处理步骤。

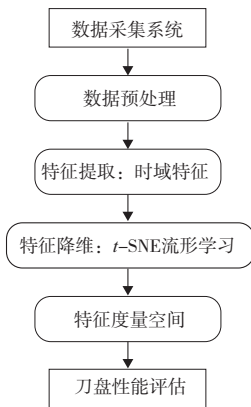


图 1 刀盘性能评估流程

1.2 t -SNE 流形学习

在隧道掘进过程中需要面临各种复杂工作状态,且收集获得的数据也具有显著非线性特性,此时采用流形学习能够精确地从高维空间中抽取包含在低维流形中的数据。在计算流形态时,需保证在高维和低维二个维度上都具备相同的空间结构^[14-15]。针对这一问题,本研究针对高维多尺度 SNE 问题,在考虑高维分布特征、低维分布特征两个特性的前提下,研究了高维多尺度 SNE

方法^[16]。

1) 构建高维空间样本条件概率密度算式

$$p_{j|i} = \frac{\exp[-\|x_i - x_j\|^2 / (2\sigma_i^2)]}{\sum_{k \neq i} \exp[-\|x_i - x_k\|^2 / (2\sigma_i^2)]} \quad (1)$$

式中 σ_i 为高斯方差。

2) 构建联合概率密度函数

$$p_{ij} = \frac{p_{j|i} + p_{i|j}}{2n} \quad (2)$$

初始化空间样本:

$$Z^{(0)} = \{z_1, z_2, \dots, z_n\} \quad (3)$$

3) 构建 t 分布样本概率密度 f_{ij} 和梯度 $\partial C / \partial Z$

$$f_{ij} = \frac{(1 + \|z_i - z_j\|^2)^{-1}}{\sum_{k \neq i} (1 + \|z_i - z_k\|^2)^{-1}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial Z} = 4 \sum_j (p_{ij} - f_{ij})(z_i - z_j)(1 + \|z_i - z_j\|^2)^{-1} \quad (5)$$

式中 C 为高维空间相对熵的空间距离参数。

4) 更新输出参数

$$Z^{(h)} = Z^{(h-1)} + \alpha \frac{\partial C}{\partial Z} + m(h) [Z^{(h-1)} - Z^{(h-2)}] \quad (6)$$

式中: h 为迭代次数; α 为学习率; m 为动量因子; $\partial C / \partial Z$ 为梯度。

2 刀盘试验参数

隧道全长 3.8 km, 位于江底以下 67 m 处, 采用混联盾构机, 在泥水平衡状态下开挖, 共计 1 731 环。刀盘的外径为 15.48 m, 配备了 16 台 250 kW 的驱动马达, 并为其设置了齿轮减速器, 以此驱动刀具完成土壤切割^[17]。通过液压缸产生推力作用, 促使盾构机逐环前进, 各环前进时间均为 3~5 h, 掘进距离为 2 m, 表 1 给出了掘进装备的各项运动参数^[18]。

表 1 盾构机参数和工况条件

参数	数值
型号	海瑞克
刀盘直径/m	15.48
电机额定功率/kW	250
电机数量/个	16
最大推力/kN	203.16
系统最大压力/Pa	6.64×10^5
长度/m	138
隧道深度/m	67
隧道长度/km	3.8

隧道盾构机在开挖的阶段受多种载荷影响^[19],导致 1 112 环的刀盘出现较大的磨损,结果如图 2 所示,刀盘转矩最大值出现在 1 112 环。此外,当刀盘刀具磨损度增大时,其传递转矩也会发生一定程度的改变,从而在掘进过程中产生不同的开挖参数。刀盘驱动装置还表现出了一种新的功率控制特性,其中位于 1 112 环处,刀盘性能表现出不断下降的特征,而其他部分刀盘总体上保持恒定转矩。

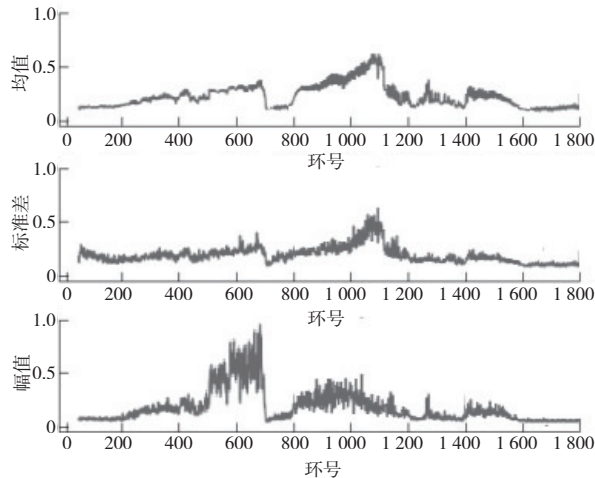
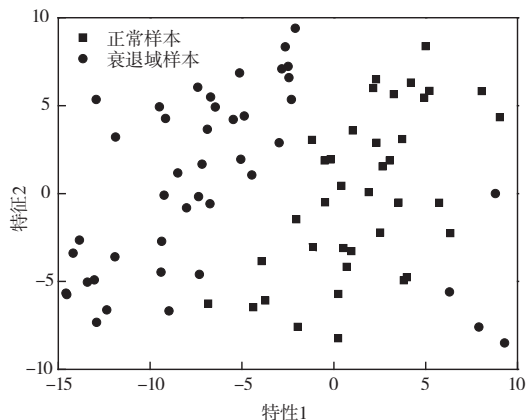


图 2 刀盘转矩变化

3 结果分析

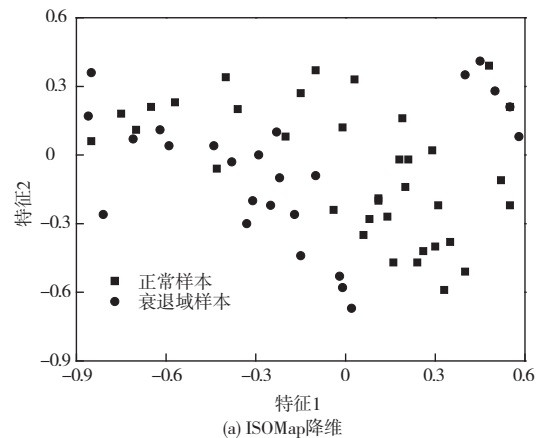
3.1 不同非线性降维方法对比

图 3 是经过 t -SNE 降维后得到的二维特征,利用 prep 组成样本邻域光滑性评价指标。根据上述研究结果,本文提出了一种基于时间序列 SNE 的流形降维方法,可以对正常和退化样本进行精确分类,进而对含有低维流形的高维数据进行精确识别。

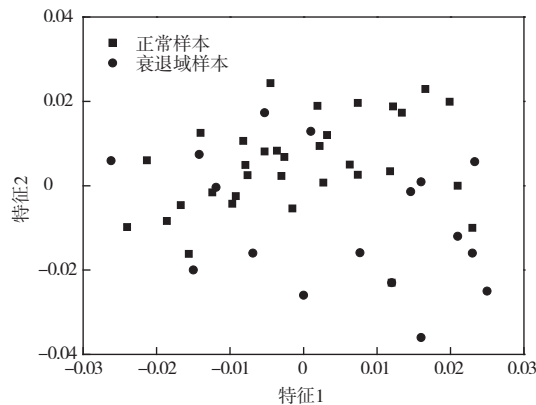
图 3 t -SNE 低维特征分布

根据以上分析,本文选取 ISOMap、LLE、KPCA 3 种典型非线性降维算法开展测试,完成上述非线性降维算法的处理性能检验,并对其进行相应的低维化处理。

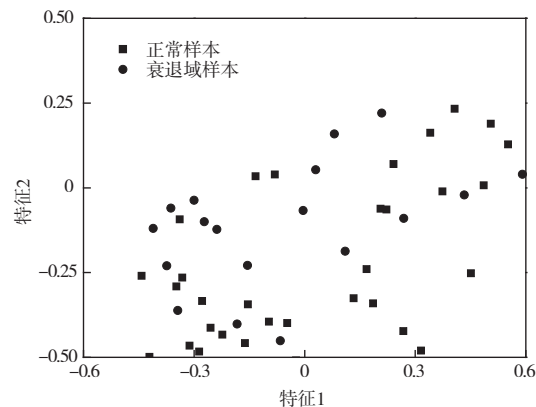
图 4(a) 是 ISOMap 降维后产生的低维特征结果,通过对其整体分析可以看出 ISOMap 是经过学习后得到整体特性。图 4(b) 是 LLE 降维后形成的低维特征参数,从中可以发现采用局部线性嵌入方法只能获得局部特征指标,无法获得全局特性。图 4(c) 是以高斯核-KPCA 降维处理得到的特征此时整体与局部特征能够被准确获取。



(a) ISOMap降维



(b) LLE降维



(c) KPCA降维

图 4 不同降维方法下低维特征分布

根据以上试验可知,与 ISOMap、LLE、KPCA 等方法相比,利用 t -SNE 进行流形降维可获得较长的 t -分布,从而使低维远端点具有较大低维间隔,而在靠近衰退域的大曲率流形保持低维的水平。

3.2 多尺度空间分析

图 5 是对马氏空间进行 t -SNE 降维后的欧氏空间度量结果。根据以上分析,对各测量空间残差和参考参数位置进行对比。 $N1$ 表示政策状态样本, $N2$ 表示故障状态, $N3$ 是经过维护后的工具状态。

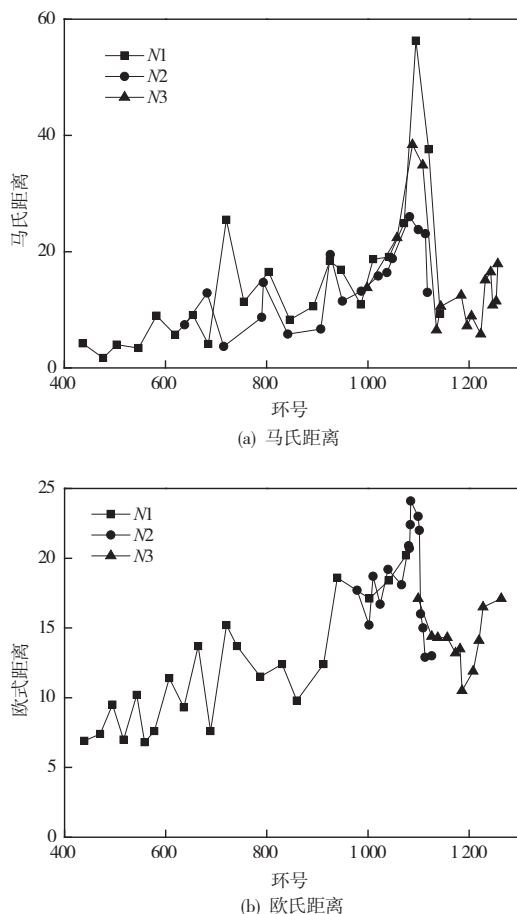


图 5 t -SNE 低维度量比较

根据图 5(a) 和表 2 试验结果可知,位于马氏空间内的正常运行条件和故障维修取样间隔变化幅度较小,但在衰竭阶段的取样间隔则会发生改变,这与实际运行工况下的变化规律相吻合^[20],表明将马氏空间应用于工具特性分析具备可行性。从图 5(b) 结果可以看出,在正常预先状态以及故障维修之后,取样间隔都有较大幅度的波动,而在衰退区域的取样结果则呈现微小波动的特点,无法达到工具体系的评定要求。

表 2 不同状态下距离标准差

度量空间	$N1$	$N2$	$N3$
马氏距离	2.56	4.66	2.38
欧氏距离	3.85	1.87	2.44

根据以上试验结果可知,利用时间相关马氏距离测度来评价刀具性能时可以获得较高精度。在评价性能时有效消除不同维度间的相关度,并且比欧氏距离具备更优性能。

4 结语

1) 与 ISOMap、LLE、KPCA 等方法相比,利用 t -SNE 流形降维可获得较长的 t -分布,使低维远端点具有较大低维间隔,可以对正常和退化样本进行精确分类,进而对含有低维流形的高维数据进行精确识别。

2) 位于马氏空间内的正常运行条件和故障维修取样间隔变化幅度较小,利用时间相关马氏距离测度来评价刀具性能时可以获得较高精度,有效消除不同维度间相关度,比欧氏距离具备更优性能。

参考文献:

- [1] 赵帅,黄亦翔,王浩任,等. 基于拉普拉斯特征马氏距离的滚珠丝杠健康评估[J]. 机械工程学报,2017,53(15):125-130.
- [2] 孙伟,朱晔,霍军周,等. 基于裂纹失效区域划分的 TBM 刀盘裂纹位置预估及分析[J]. 机械工程学报,2018,54(1):27-35.
- [3] 李雪,龚子邦,黄琦,等. 砂卵石地层盾构刀具磨损预测模型及刀具参数敏感性分析[J]. 城市轨道交通研究,2024,27(2):63-68.
- [4] 段文军,张蒙祺,勾斌,等. 刃形对硬岩地层中 TBM 滚刀磨损行为的影响研究[J]. 摩擦学学报,2023,43(7):738-749.
- [5] 毋焱磊,张磊,李怀,等. 盾构机前盾翻身吊装静力学分析与研究[J]. 机械制造与自动化,2025,54(1):95-103,174.
- [6] 孔凡超,刘懿晗,刘士吉,等. 基于智能优化算法和 Bi-LSTM 神经网络的盾构隧道刀盘扭矩智能预测方法[J]. 中国科学:技术科学,2025,55(1):171-186.
- [7] 吴忧,周小雄,曹玉新,等. 基于刀盘振动特征的双模盾构掘进地层识别模型[J]. 地下空间与工程学报,2024,20(增刊2):629-637,645.
- [8] WANG L H, LI H P, ZHAO X J, et al. Development of a prediction model for the wear evolution of disc cutters on rock TBM cutterhead[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 67: 147-157.

(下转第 104 页)

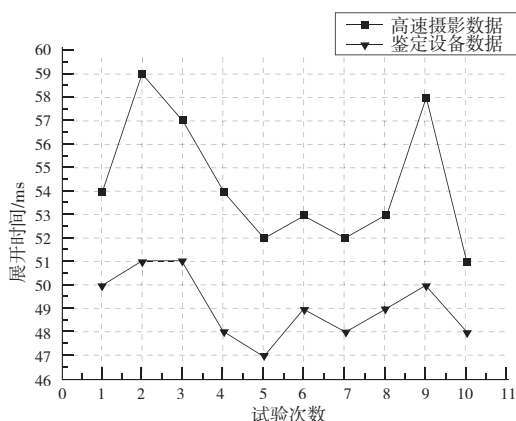


图9 同一产品连续测量10次结果

5 结语

为实现折叠舵舵面展开时间的高效、高精度测量,克服传统人工测量存在的效率低、不可靠等问题,根据产品被测结构特征,本文基于单片机开发设计了一种折叠舵舵面展开时间自动化测量装置。采用自动化测量装置进行测量不仅减少了测量前的准备工作,而且其仅需一人就可完成测量任务,并且受人为因素影响极小,这极大地提高了折叠舵舵面展开时间的测量质量和效率。

参考文献:

- [1] 丛霄九. 高速飞行器折叠舵面结构非线性动响应与颤振分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [2] 李智,杨雷,段丽华,等. 组合扭杆式折叠舵展开性能研究[J]. 兵器装备工程学报,2022,43(8):164-169.

- [3] 刘断尘. 舵机折叠舵展开性能分析及试验[D]. 北京:中国科学院大学,2015.
- [4] 刘昊鹏. 舰上弹射模拟系统设计与折叠舵展开动力学分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [5] 王国超,李瑞,程迁,等. 某型导弹折叠舵动力学仿真与可靠性分析[J]. 弹箭与制导学报,2018,38(5):1-4,8.
- [6] 刘飞. 弹翼折叠展开机构工作可靠性分析的研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2012.
- [7] 赵志强,谢里阳. 舵翼展开机构可靠性分析与试验研究[J]. 失效分析与预防,2017,12(3):195-202.
- [8] 张苗苗. 折叠翼面展开机构设计及其力学性能研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2012.
- [9] 陈克,王洪波,周国峰,等. 内埋式发射导弹折叠舵结构设计与分析研究[J]. 强度与环境,2018,45(5):52-57.
- [10] 唐宏. 折叠舵面动力学建模和非线性颤振分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [11] 刘森,蒋坤,潘晓军,等. 折叠舵展开过程气动特性分析[C]. 中国航空学会. 北京:2017年(第三届)中国航空科学技术大会论文集(下册),2017:197-200.
- [12] 李东,李斌,刘仙名. 空空导弹折叠舵展开过程气动载荷分析[J]. 弹箭与制导学报,2014,34(3):154-156.
- [13] 王强,马志赛,张欣,等. 基于模态综合法的含间隙折叠舵面动态特性分析[J]. 航空学报,2020,41(5):223507.
- [14] 章斌. 折叠翼展开机构工作可靠性仿真与试验研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2015.
- [15] 朱益均. 折叠舵面结构接触非线性动响应分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [16] 马巧梅. 基于STC89C52的智能门禁系统的设计[J]. 机械制造与自动化,2017,46(5):235-238.

收稿日期:2023-09-04

(上接第99页)

- [9] 凌静秀,孙伟,杨晓静,等. 复杂应力状态下TBM刀盘裂纹应力强度因子分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2017,38(4):633-639.
- [10] 夏毅敏,卞章括,胡承欢,等. 复合式土压平衡盾构机刀盘性能综合评价方法[J]. 机械工程学报,2014,50(21):1-9.
- [11] 杨帆. 超大直径泥水盾构刀盘安装焊缝疲劳寿命预测[J]. 中国工程机械学报,2024,22(6):784-789.
- [12] 刘浩,段怿欣,张爽,等. 复杂地层盾构刀盘损伤分析及既有刀盘结构改造研究[J]. 土木工程学报,2024,57(增刊2):32-38.
- [13] 真嘉捷,赖丰文,黄明,等. 基于LightGBM-Informer的盾构隧道管片上浮时间序列预测模型[J]. 岩土力学,2024,45(12):3791-3801.
- [14] 王义盛,杨志超,张炎,等. 砂性地层盾构掘进撕裂刀磨损规律分析[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(8):82-88.

- [15] 刘尧,陈改革,刘振国,等. 关联规则挖掘驱动的盾构机刀盘健康评估方法[J]. 中国机械工程,2023,34(11):1326-1334,1342.
- [16] 茹华莎. 基于t-SNE流形学习的盾构刀盘施工磨损后性能评估[J]. 工程机械文摘,2024(2):53-55.
- [17] 张永,龚众望,郑英,等. 工业设备的健康状态评估和退化趋势预测联合研究[J]. 中国科学:技术科学,2022,52(1):180-197.
- [18] 王伯芝,丁爽,黄永亮,等. 基于WaveNet网络的盾构刀盘扭矩超前预测方法[J]. 城市轨道交通研究,2024,27(7):27-33,42.
- [19] 刘泉维,邵小康,纪明涛,等. 复合地层加强型盾构对比选型技术与滚刀磨损特征研究[J]. 铁道标准设计,2024,68(7):154-161,170.
- [20] 冯通,胡锦健,李研,等. 基于TCN-LSTM的盾构刀盘扭矩实时预测研究[J]. 现代隧道技术,2024,61(5):120-128,166.

收稿日期:2024-02-06