光纤轴载监测系统及其在沥青路面养护管理中的应用

胡 一[1]，蒋侗军[2]，杨 群[1]

（1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室，上海市 201804；2. 宁波市交通规划设计研究院有限公司，浙江 宁波 315192）

摘 要：为解决传统轴载监测系统安装复杂、维护成本高等问题，介绍了基于光纤微弯传感的轴载监测系统，提出了灵活的传感器部署策略，并采用表面固定法将传感器安装在实际道路上，安装过程简便快捷，对交通干扰小，能够有效提高传感器的耐用性和灵敏度。利用小波去噪技术和“V形”数据归一化方法，提升了轴载信号的质量和分析效率，对实际道路上收集的上万条轴载数据进行统计分析，确定对数正态分布是描述轴载分布的最佳模型。研究结果可为路面养护管理提供关键数据支持，有助于制定更科学、高效的养护策略。

关键词：道路与铁道工程；光纤轴载监测；沥青路面养护管理；小波去噪；对数正态分布

中图分类号：U418 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5497(2026)04-1050-08

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241012

Fiber optic axle load monitoring system and its application in asphalt pavement maintenance management

HU Yi[1], JIANG Ti-jun[2], YANG Qun[1]

(1. *Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai* 201804, *China*; 2. *Ningbo Communications Planning Institute Co., Ltd., Ningbo* 315192, *China*)

Abstract: To address the issues of complex installation and high maintenance costs in traditional axle load monitoring systems, an axle load monitoring system based on fiber-optic micro-bending sensing was introduced. A flexible sensor deployment strategy was proposed, and sensors were deployed on actual roads using a surface-mounting method. The installation process was made simple and quick, minimal traffic disruption was caused, and the durability and sensitivity of the sensors were effectively enhanced. By utilizing wavelet denoising technology and a “V-shaped” data normalization method, the quality of axle load signals and analysis efficiency were improved. Through statistical analysis of tens of thousands of axle load data collected from real roads, the log-normal distribution was determined to be the optimal model for describing axle load distribution. The research results provide critical data support for pavement

收稿日期：2024-09-16.

基金项目：宁波市“科创甬江2035”科创生态育成计划项目(2024Z057)；内蒙古自治区交通运输厅建设科技项目(NJ-2021-17).

作者简介：胡一(1996-)，男，博士研究生.研究方向：智能化道路性能监测与养护决策.E-mail：2010785@tongji.edu.cn

通信作者：杨群(1975-)，男，教授，博士.研究方向：智能化道路性能监测与养护决策.E-mail：quny6667@163.com

maintenance management and contribute to the development of more scientific and efficient maintenance strategies.

Key words: highway and railway engineering; fiber-optic axle load monitoring; asphalt pavement maintenance management; wavelet denoising; log-normal distribution

0　引　言

道路基础设施的完整性对经济发展和社会进步至关重要。随着交通需求的不断增加,部分高龄沥青路面面临的老化问题日益严重,导致结构稳定性下降,并对交通安全构成威胁[1]。因此,准确测量和分析轴载对评估路况[2]和制定养护策略[3]具有重要意义。

轴载监测系统的应用主要分为两大方向:监管执法和基础设施管养。监管执法的重点在于治超执法[4]和计重收费[5];而基础设施管养主要面向沥青路面,更关注于路面设计优化[6]、路面使用寿命的预测[7]等方面。监管执法需要在特定位置获得高精度的数据,而基础设施管养则需要对大范围内的沥青路面状况进行全面评估,以便进行科学决策。尽管现有的动态称重系统[8-10],如石英压电系统和弯板系统等,可以持续且精确地收集轴载数据,但由于其安装复杂、维护成本高以及覆盖范围有限,这些系统的广泛应用仍面临挑战。这表明,当前在轴载监测方面,亟需创新性的技术解决方案,以提升基础设施管理的效果。

近年来,光纤传感技术的进步为路面监测提供了新的解决方案[11]。光纤传感器具备高灵敏度、良好的抗电磁干扰能力,且能够在各种环境条件下稳定工作[12]。这些传感器能够实时、精准地收集数据,使得路面管理更加高效。在众多光纤传感技术中,微弯传感器因其结构简单、成本效益高、部署灵活,在轴载监测应用中展现出广阔的前景[13,14]。

光纤传感器在路面监测系统中的应用,推动了信号处理技术的发展,使得数据能够得到更为有效的分析和解释。在这一领域,许多研究者做出了重要贡献。例如,Nedoma等[15]利用单模光纤的马赫-曾德干涉仪检测车辆,并通过幅度-频率谱分析信号,识别出不同类型车辆的特征。Huang等[16]则使用支持向量机处理光纤布拉格光栅传感器的应变数据,实现了从小型车辆到大型卡车的高精度分类。Liu等[17]开发了改进的阈值和双阈值算法,用于处理分布式声学传感数据,显著提升了车辆计数和速度估算的准确性。Narisetty等[18]提出了一种名为SpeedNet的神经网络模型,用于从分布式光纤传感数据中估算交通速度,结果显示其精度优于传统传感器。

除了在传感技术和信号处理方面的进展,轴载数据的统计分析也是路面工程研究中的一个关键领域。通过对光纤传感系统收集的大量数据进行有效统计分析,可以为基础设施管理提供更具指导性的建议。Wang等[19]利用聚类分析研究了轴载分布,强调了在分析负载数据时考虑空间和时间变化的重要性。Macea等[20]提出了一种改进的轴载谱表征方法,通过混合多种分布模型,提高了交通负载建模的精度。Oh等[21]通过聚类分析建立了州级范围内的轴载谱数据,为生成具有代表性的交通输入提供了方法支持。Rys等[22]开发了一种修正动态称重系统中由于称重误差导致的轴载谱方法,有效提升了数据的可靠性。

尽管在光纤传感技术、信号处理以及统计分析方面取得了显著的进展,但这些技术在实际应用中仍面临着一些挑战,包括如何开发快速且对交通影响最小的传感器部署方案,既能确保传感器的耐用性和灵敏度,又能实现广泛覆盖;如何在复杂的实际应用场景中系统地处理和分析来自大规模光纤传感器阵列的数据;以及如何对不同道路类型和交通条件下的轴载数据进行全面的统计分析,以支持基础设施管理中的科学决策。

针对这些挑战,本文提出了一种灵活的传感器部署方法,该方法不仅提高了传感器的耐用性和灵敏度,同时也简化了安装过程,减少了对交通的干扰。此外,在实际道路上实施了光纤轴载监测系统,探讨了小波去噪技术,并提出了数据归一化的方法,以提升数据分析的质量和效率。通过全面的统计分析,确定了描述轴载特性的最佳分布模型,为路面维护提供了关键的数据支持。通过这些相互关联的研究目标,本文旨在推动光纤传感技术在路面工程中的应用,以实现更高效、更科学的路面养护管理。

1 数据采集

1.1 传感原理

在光纤传感技术领域,微弯传感器因其独特的功能和广泛应用成为研究的重点。该传感器的基本原理为:当光纤发生微小弯曲时,会出现一种被称为模式耦合的现象,这一过程涉及能量从光纤的芯模态向包层模态转移,光能的重新分布可以作为外部物理扰动的量化指标,从而实现对位移和压力等参数的精确测量。

微弯传感器设计通常包括一些特殊的变形结构,当受到外界刺激时,这些结构会使光纤产生周期性微小弯曲。在保持光源输入光功率恒定的前提下,光电探测器所测得的输出光功率变化,可与外部扰动的大小建立关联。这种关联机制构成了传感器将物理现象转化为可测量光学信号的基础。一个典型的光纤微弯传感系统如图1所示[23]。

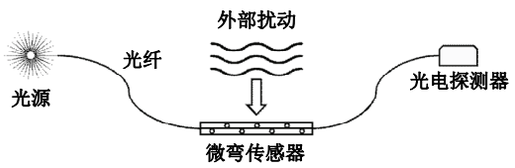

图1 典型光纤微弯传感系统

Fig. 1 Typical fiber optic microbending sensing system

在光纤微弯传感系统中,环境变化所引发的扰动会改变传感器结构施加于光纤的作用力。该作用力的变化会导致光纤结构发生相应形变,进而改变光信号在光纤中的传输系数。这个关系可以通过下式表达:

$$\Delta T=\left(\frac{\Delta T}{\Delta X}\right)D\cdot\Delta E \tag{1}$$

式中:ΔT为光信号传输系数的变化量;ΔX为光纤变形的变化量;D为与环境变化相关的常数;ΔE为外部环境引起的变化。

1.2 传感器灵活部署策略

道路表面监测的一个关键挑战是传感器安装后的维护和更换难题。传统的嵌入式安装方法通常使传感器成为道路结构的一个组成部分,使得传感器的更换或修复过程变得复杂且扰动较大。这一问题尤为突出,因为随着道路结构性能的变化,传感器的准确性和使用寿命会显著降低,进而导致监测数据不可靠。

为解决这一问题,本文提出了一种灵活的传感器部署策略,充分利用了光纤微弯传感器的小尺寸和可控成本等优势。该策略的核心创新在于,在道路表面创建与传感器尺寸精确匹配的部署槽。该设计允许在不显著干扰交通流的情况下,快速完成传感器的安装和移除。当检测到数据异常时,可以迅速更换传感器,且无需进行大规模的道路施工,从而将对交通的影响降至最低。随着道路条件的变化,传感器可以轻松调整或更换,以保持最佳监测性能,确保整个监测期间可连续、可靠地收集数据。

这一灵活部署策略可进一步分为两种具体方法(见图2)。第1种方法是内部嵌入法,即通过切割和重建,在道路表面创建一个与传感器尺寸匹配的部署槽;第2种方法为表面固定法,利用膨胀螺栓将垫板固定在道路表面,从而在无需开挖道路的情况下,形成与传感器尺寸一致的部署槽。这两种方法的目标都是为了简化传感器的安装、移除和更换过程,从而在长期使用中保持监测数据的完整性和可靠性。

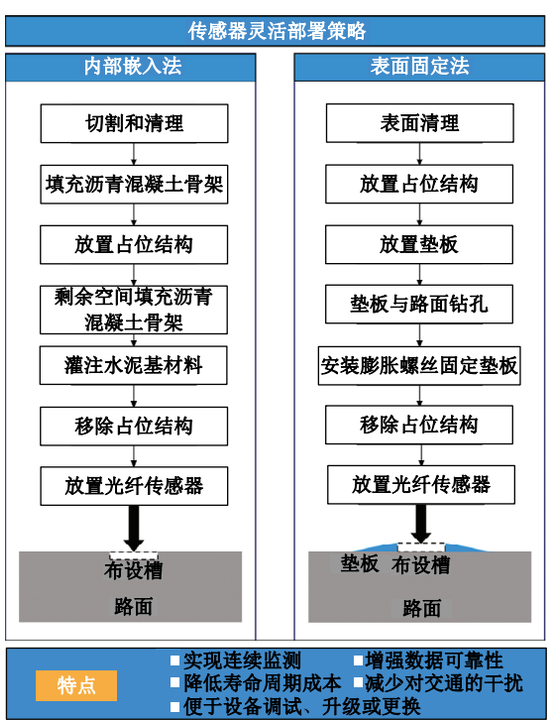

图2 传感器灵活部署策略

Fig. 2 Flexible sensor deployment strategy

为验证所提出的光纤轴载监测系统在实际道路中的有效性,本文在一段城市主干道上进行实地测试。由于本轴载监测系统重点面向养护管理方面的应用,与一般交通监测有所区别,本次测试主要评估传感器在监测重型轴载方面的表现。

1.3 系统部署

本文选取了一个单车道道路作为试验路段,

采用半幅布设的方式，垂直于道路前进方向部署光纤微弯传感器。该传感器的结构经过特殊设计，仅对重型轴载具有敏感性，在小轿车等轻型车辆经过时无响应。该设计使得传感器采集到的轴载数据均来自卡车和其他重型车辆，这些车辆的荷载作用是导致沥青路面损坏的主要因素，大幅简化了后续数据筛选和处理过程。

传感器部署采用表面固定法。两侧垫板形成了尺寸与传感器一致的布设槽，进一步采用专用双面胶带将传感器底部与槽内路面进行粘接固定，以加强其稳定性。该方法使得传感器部署可以迅速完成，整个安装过程不到 10 min，对交通流的干扰极小。图 3 为测试现场的布置情况。

为了确保能够捕捉到快速行驶车辆的详细载荷信息，数据采集系统的采样率设置为 1 000 Hz。此外，为了记录监测过程并验证车辆类型，测试现场还安装了摄像机全程拍摄视频。本次实地测试持续 7 d，旨在全面记录一周内不同交通状况下的轴载情况。



图 3　测试现场

Fig. 3　Test site setup

2　数据处理

2.1　小波去噪

为提升轴载监测数据的质量，采用小波去噪技术[24]。选择 6 种常用的小波函数进行比较，分别为 Daubechies 2、4、6（简写为 db2，db4，db6）和 Symlets 2、4、6（简写为 sym2，sym4，sym6）。这些小波函数在计算效率与信号特征捕捉能力之间达到了良好的平衡。通过选择不同阶数的小波函数，可以评估时间-频率定位与信号对称性之间的权衡关系。

车辆轴载信号的主要特征为低频成分，通常为 0～50 Hz[25]。该频率范围涵盖了车辆-路面相互作用中的主要动态响应，包括车辆悬挂系统的基本振动模式以及路面不平度引起的激励频率。

小波分解层级与频带之间的关系可表示为：

$$f_l = f_s / 2^{(l+1)} \tag{2}$$

式中：f_l 为第 l 级分解的频带下限；f_s 为采样频率。

由于信号的采样率为 1 000 Hz，最高可准确表示的频率为 500 Hz。不同分解层级的频带范围由离散小波变换的二进制频率分割特性推导而出[26]，如图 4 所示。

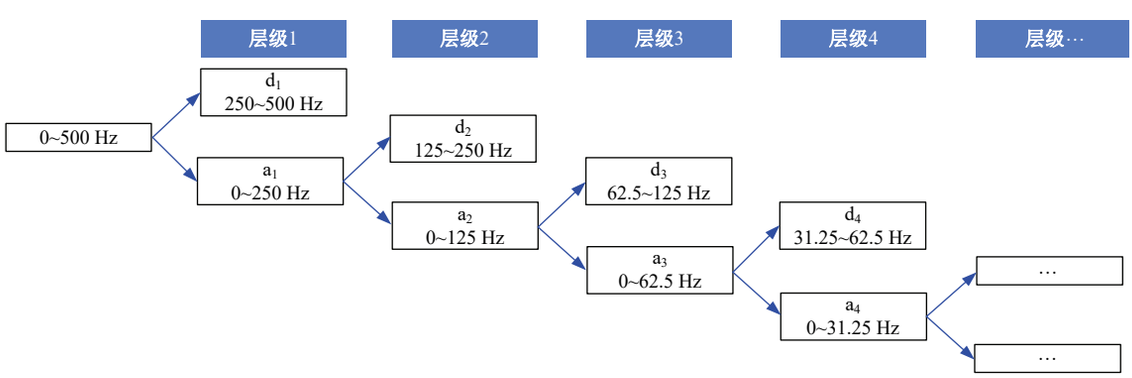

图 4　小波分解层级及其对应的频率范围

Fig. 4　Wavelet decomposition levels and corresponding frequency ranges

根据轴载信号的频率特征，选择了第 4～8 层分解结果进行对比分析，更高层级的分解频带过低，对去噪效果提升有限，且会显著增大计算量、降低计算效率。该分解层级的选择能够确保去噪过程集中在信号的关键频率成分上，同时保证足够的分解粒度，实现高效、可靠的噪声抑制。

在去噪过程中，采用自适应阈值技术。具体而言，使用了 Heursure 阈值选择规则，该规则结合通用阈值和 Stein 无偏风险估计（Stein′s unbiased risk estimate，SURE）阈值的启发式方法。通过软阈值处理，减少了超过阈值的系数幅度，从而保留信号的连续性。

为定量评估去噪效果，计算了均方根误差（Root mean square error，RMSE）和信噪比（Sig-

nal-to-noise ratio,SNR),计算公式分别如下:

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\hat{x}_i)^2} \tag{3}$$

$$\mathrm{SNR}=10\log_{10}\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}x_i^2}{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\hat{x}_i)^2}\right) \tag{4}$$

式中:x_i为原始信号;$\hat{x}_i$为去噪后的信号。

表1和表2分别展示了不同小波函数及分解层级下的RMSE和SNR值,其中,加粗数字表示该指标的最佳值。分析表1和表2可知,不同小波函数和分解层级的去噪效果差异显著。其中,sym4小波在第8层分解时表现出最佳的去噪效果。

表1 不同小波函数和分解层级下的RMSE值

Table 1 RMSE values for different wavelet functions and decomposition levels

层级	db2	db4	db6	sym2	sym4	sym6
4	0.001 920 0	0.001 859 7	0.001 858 2	0.001 920 0	0.001 847 5	0.001 858 5
5	0.001 705 8	0.001 681 0	0.001 693 1	0.001 705 8	0.001 673 9	0.001 683 1
6	0.001 607 5	0.001 588 1	0.001 602 7	0.001 607 5	0.001 577 0	0.001 587 8
7	0.001 566 0	0.001 556 2	0.001 570 8	0.001 566 0	0.001 541 0	0.001 555 1
8	0.001 550 3	0.001 548 9	0.001 561 4	0.001 550 3	**0.001 532 5**	0.001 545 9

表2 不同小波函数和分解层级下的SRN值

Table 2 SRN values for different wavelet functions and decomposition levels

层级	db2	db4	db6	sym2	sym4	sym6
4	49.335 049 7	49.612 566 6	49.619 437 3	49.335 049 7	49.669 495 2	49.618 084 9
5	50.362 430 6	50.489 897 6	50.427 509 6	50.362 430 6	50.526 727 5	50.479 154 7
6	50.878 261 1	50.983 789 6	50.904 012 8	50.878 261 1	51.044 414 1	50.985 453 2
7	51.105 414 3	51.159 977 3	51.079 090 0	51.105 414 3	51.245 118 0	51.165 821 7
8	51.192 743 2	51.200 846 2	51.131 118 8	51.192 743 2	**51.293 214 5**	51.217 523 3

图5为使用最优参数进行去噪后的结果及对应的车辆类型图像。去噪后信号保留了原始信号的关键特征,如车辆轴载通过时的载荷峰值,同时显著降低了高频噪声的干扰。

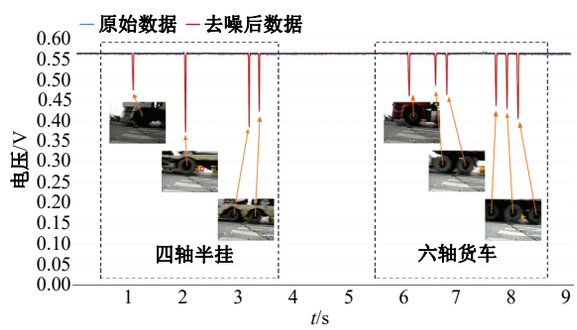

图5 原始数据与去噪数据的对比及车辆类型图像

Fig. 5 Comparison of raw and denoised data with vehicle type images

2.2 数据归一化

数据归一化是光纤轴载监测信号预处理中的关键环节,能够显著提升所收集数据的质量和可比性(见图6)。该方法有效解决了信号漂移和振幅变化等问题,最终生成适用于轴载分析的归一化信号。

首先,通过滑动窗口分析对输入信号进行处理,精确识别出与基线偏离的异常片段。这些片段的标准差超过预设阈值,通常表明可能存在轴载事件。与此同时,算法还识别出基线片段,这些

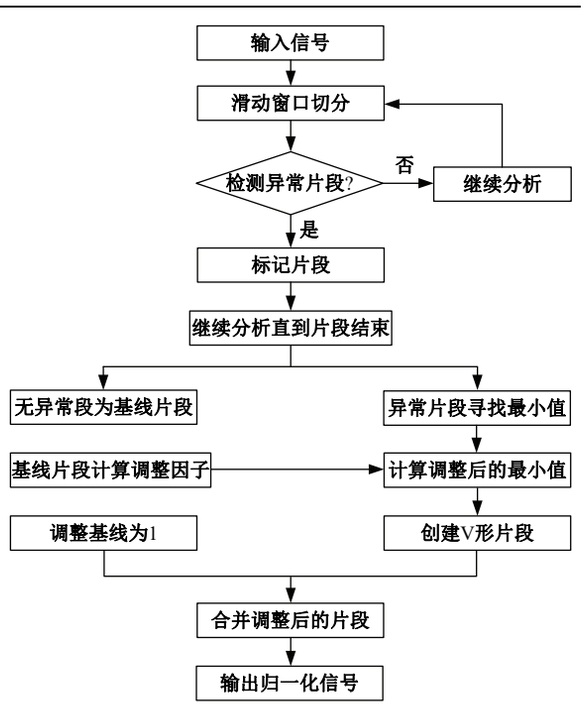

图6 数据归一化步骤

Fig. 6 Data uniformization processes

片段代表信号的正常状态。

识别完成后,基线片段会进行调整,以补偿信号漂移带来的影响。该调整以各基线片段均值的倒数作为调整因子,确保即便传感器响应随时间发生变化,基线仍能保持稳定一致。

归一化的核心步骤在于对异常片段进行V形调整处理。该方法不仅保留了潜在轴载事件的特征形状,还将其缩放至一致范围,便于后续分析比较。V形调整中的最小值在微弯传感器设计中尤为重要,它作为轴载大小的关键指标,最小值越低,意味着传感器中的光功率损失越大,表示轴载越重。

V形轮廓还提供了关于交通分析的更多关键信息。下降段的起始点标志着载荷开始作用于传感器,而斜率的变化则反映载荷的增加速度。相应地,上升段代表载荷移除速度。这些参数为轴载大小的估算、车辆分类和速度测定提供了重要参考。V形轮廓可以通过以下公式进行描述:

$$V(x)=\begin{cases}1-(1-S_{\min})\cdot\dfrac{x}{x_{\min}}, & x\leqslant x_{\min}\\ S_{\min}+(1-S_{\min})\cdot\dfrac{x-x_{\min}}{x_{\text{end}}-x_{\min}}, & x>x_{\min}\end{cases} \tag{5}$$

式中:$S_{\min}$为调整后的异常片段;$x_{\min}$为调整后异常片段的最小值;x_{end}为异常片段的终点。

最后,所有基线片段被调整为1,以建立信号中的统一参考点。通过上述步骤,可以将每次轴载引起的信号响应进行统一对比分析,同时消除基线水平的差异,有助于更精确地解释轴载情况。

图7为去噪信号与归一化信号的对比结果。可以看出,归一化后的信号具有一致的基线水平和标准化的事件幅值表征,有效解决了光纤传感数据尺度不一的问题,为不同路况及长期监测场景提供了更可靠且可对比的轴载监测依据。信号归一化后,轴载分析的准确性和效率得到了显著提升。

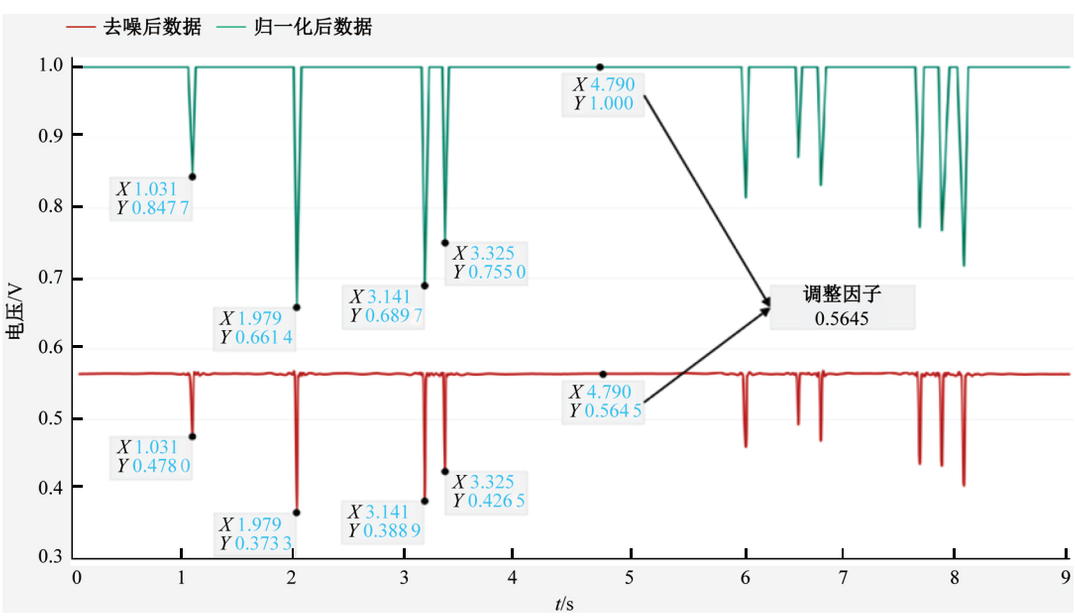

图7　去噪信号与归一化信号对比

Fig. 7　Comparison of denoised data and normalized data

3　轴载分布统计分析

在路面工程中,准确理解轴载分布特征,对制定科学的维护和设计策略具有至关重要的意义。本文基于光纤传感系统在实际道路采集的实测数据,开展了全面的统计分析,旨在优选出最适用于描述轴载分布特征的概率分布模型。经过数据筛选后,共得到10 717条有效的轴载测量值,这些数据被归一化到0~1内,归一化后的数值越小,表示轴载越大。由于本文未使用已知轴载的车辆进行校准,因此这些归一化的轴载值主要表示相对大小,而非绝对值。为了更清晰地展示轴载分布情况,根据式(6)计算特定载荷范围内的概率密度$f(x)$,结果如表3所示。

$$f(x)=\frac{n_i}{N\cdot\Delta x} \tag{6}$$

式中:n_i为该区间的观测次数;N为总观测次数;Δx为区间宽度。

表3 轴载范围对应的概率密度

Table 3 Probability densities for axle load ranges

1—归一化轴载	观测次数	概率密度
0.0～0.1	2 041	1.904 5
0.1～0.2	2 656	2.478 3
0.2～0.3	1 533	1.430 4
0.3～0.4	1 057	0.986 2
0.4～0.5	709	0.661 5
0.5～0.6	658	0.614 0
0.6～0.7	584	0.544 9
0.7～0.8	519	0.484 3
0.8～0.9	535	0.499 1
0.9～1.0	425	0.396 6

本文重点分析了3种常见的概率分布模型:正态分布、对数正态分布和极值Ⅰ型分布,并使用最大似然估计法对归一化的轴载数据进行拟合。图8为实际测量轴载分布与这3种拟合分布的对比。由图8可以看出:对数正态分布对数据的拟合效果最佳,尤其是在捕捉数据右偏(重载车辆较少但存在)方面表现尤为突出。

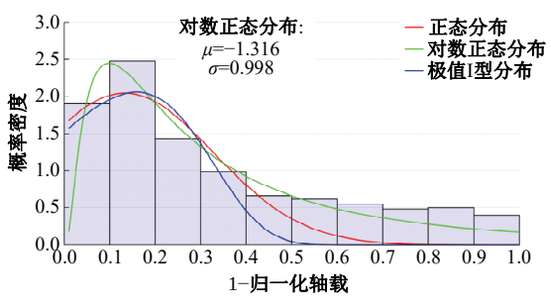

图8 轴载分布及拟合的概率分布

Fig. 8 Axle load distribution and fitted probability distributions

进一步的定量分析证实了对数正态分布的优越性。对数正态分布模型(均值μ=-1.316,方差σ=0.998)相比其他模型表现更好,其决定系数(R^2=0.941 4)和均方根误差(RMSE=0.182 4)都优于正态分布(R^2=0.708 5,RMSE=0.406 8)和极值Ⅰ型分布(R^2=0.589 8,RMSE=0.482 5)。这种对数正态分布揭示了轴载具有明显的"长尾"特征,即大多数轴载集中在中低范围,但偶尔会出现极高的轴载,虽然这些情况不频繁,但会对路面结构和材料产生显著的非线性累积效应,加速结构损伤、裂缝、车辙和其他病害的发展。

这种长尾分布对路面工程设计和维护有重要的指导意义。尽管重载车辆出现频率较低,但其对路面的磨损作用却超过普通载荷。因此,了解并考虑这些重载车辆的影响,有助于更精准地预测路面疲劳、车辙形成等问题。基于该分布模型,路面设计者可以优化结构设计,制定针对性的维护计划,从而延长路面寿命并减少维护成本。此外,该模型可为道路载重限制政策的制定提供数据支撑,确保基础设施不受超载车辆的过度损坏。

4 结束语

本文通过对光纤传感技术的创新性应用,推动了轴载监测技术的发展,尤其是在传感器部署、数据去噪及统计分析方面取得了显著成果:①提出灵活的光纤微弯传感器部署策略,通过精准设计布设槽,解决了传感器安装、维护和更换的难题,实现了快速布设并减少对交通的干扰。②采用优化的小波去噪技术,选用第8层分解的sym4小波函数,显著去除高频噪声,保留轴载信号关键特征,实现高精度检测。③提出创新的V形数据归一化方法,为不同环境和位置下的监测数据提供了统一的分析基础。④确定对数正态分布为轴载分布的最佳模型,揭示了轴载分布中存在"长尾效应",强调养护决策时需重点考虑重载车辆对路面造成的显著影响。实际工程应用结果表明,光纤传感系统在真实道路环境下具有良好可行性,有力推动了沥青路面养护管理技术的发展。

参考文献:

[1] 徐希忠, 韦金城, 张晓萌, 等. 基于力学响应的全厚式高模量沥青路面结构组合及优化[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(11): 4581-4587.
Xu Xi-zhong, Wei Jin-cheng, Zhang Xiao-meng, et al. Full-depth high modulus asphalt pavement structure combination and optimization based on mechanical response[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(11): 4581-4587.

[2] Pais J C, Amorim S I R, Minhoto M J C. Impact of traffic overload on road pavement performance[J]. Journal of Transportation Engineering, 2013, 139(9): 873-879.

[3] Zhao J, Wang H, Lu P. Impact analysis of traffic loading on pavement performance using support vector regression model[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(11): 3716-3728.

[4] 陈广华, 孟庆贺. 公路超限运输行为的认定标准[J]. 中国公路, 2018(10): 38-41.
Chen Guang-hua, Meng Qing-he. Recognition standards for highway overloading transport behavior[J]. China Highway, 2018(10): 38-41.

[5] 韩大章, 周军勇, 朱荣, 等. 基于计重收费数据的大跨径桥梁荷载效应评估[J]. 桥梁建设, 2018, 48(4): 27-32.
Han Da-zhang, Zhou Jun-yong, Zhu Rong, et al. Load effect assessment of long-span bridges based on weigh-in-motion data[J]. Bridge Construction, 2018, 48(4): 27-32.

[6] Timm D H, Bower J M, Turochy R E. Effect of load spectra on mechanistic-empirical flexible pavement design[J]. Transportation Research Record, 2006, 1947(1): 146-154.

[7] Morovatdar A, Ashtiani R S, Licon Jr C. Development of a mechanistic framework to predict pavement service life using axle load spectra from Texas overload corridors[C]//International Conference on Transportation and Development, Reston, VA, USA, 2020: 114-126.

[8] 秦树伟, 马丙辉, 陈洁. 动态称重系统在超载超限非现场执法中的应用研究[J]. 衡器, 2019, 48(11): 11-14.
Qin Shu-wei, Ma Bing-hui, Chen Jie. Application research of dynamic weighing system in non-site law enforcement of overloading and over-limit[J]. Weighing Apparatus, 2019, 48(11): 11-14.

[9] Sujon M, Dai F. Application of weigh-in-motion technologies for pavement and bridge response monitoring: State-of-the-art review[J]. Automation in Construction, 2021, 130: No. 103844.

[10] Yu Y, Cai C S, Deng L. State-of-the-art review on bridge weigh-in-motion technology[J]. Advances in Structural Engineering, 2016, 19(9): 1514-1530.

[11] Kara De Maeijer P, Luyckx G, Vuye C, et al. Fiber optics sensors in asphalt pavement: state-of-the-art review[J]. Infrastructures, 2019, 4(2): No. 36.

[12] 廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感40年[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 10-28.
Liao Yan-biao, Yuan Li-bo, Tian Qian. Forty years of optical fiber sensing in China[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 10-28.

[13] Ma B, Zou X G. Study of vehicle weight-in-motion system based on fiber-optic microbend sensor[C]// 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Changsha, China, 2010: 458-461.

[14] Jargus J, Kepak S, Cubik J, et al. Optical fibre bending sensor for vehicle weight detection[C]//4th International Conference on Civil, Structural and Transportation Engineering, Ottawa, ON, Canada, 2019: No. 194.

[15] Nedoma J, Zboril O, Fajkus M, et al. Fiber optic system design for vehicle detection and analysis[C]// Optical Modelling and Design, Brussels, Belgium, 2016: 500-507.

[16] Huang Y, Lu P, Tolliver D. Vehicle classification system using in-pavement fiber Bragg grating sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(7): 2807-2815.

[17] Liu H, Ma J, Xu T, et al. Vehicle detection and classification using distributed fiber optic acoustic sensing [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 69(2): 1363-1374.

[18] Narisetty C, Hino T, Huang M F, et al. Overcoming challenges of distributed fiber-optic sensing for highway traffic monitoring[J]. Transportation Research Record, 2021, 2675(2): 233-242.

[19] Wang Y, Hancher D E, Mahboub K. Axle load distribution for mechanistic-empirical pavement design [J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(8): 469-479.

[20] Macea L F, Márquez L, LLinás H. Improvement of axle load spectra characterization by a mixture of three distributions[J]. Journal of Transportation Engineering, 2015, 141(12): No. 04015030.

[21] Oh J, Walubita L F, Leidy J. Establishment of statewide axle load spectra data using cluster analysis[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 19: 2083-2090.

[22] Rys D, Burnos P. Study on the accuracy of axle load spectra used for pavement design[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(11): 3706-3715.

[23] Lagakos N, Cole J H, Bucaro J A. Microbend fiber-optic sensor[J]. Applied Optics, 1987, 26(11): 2171-2180.

[24] 钟建军, 宋健, 由长喜, 等. 基于信噪比评价的阈值优选小波去噪法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2014, 54(2): 259-263.
Zhong Jian-jun, Song Jian, You Chang-xi, et al. Wavelet denoising method with optimal threshold based on SNR evaluation[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, 54(2): 259-263.

[25] Cebon D. Handbook of Vehicle-road Interaction[M]. Lisse: Swets & Zeitlinger Publishers, 1999.

[26] Addison P S. The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.