

基于改进 TPDS 长阵列的车辆超偏载检测研究

王萌¹, 苏玉东², 范帆²

(1. 国能铁路装备有限责任公司, 北京 100010; 2. 天津哈威克科技有限公司, 天津 301799)

摘要: 由于车辆超偏载检测过程中, 受天气、路况等因素以及车辆行驶状态影响, 导致信号组成的阵列过短, 利用传统的 TPDS 车辆超偏载检测精度较低、耗时较长; 提出基于改进 TPDS 长阵列的车辆超偏载检测研究; 通过车辆运行品质轨边动态监测系统, 利用测距传感器与数据采集仪将力学信号转换成电压信号, 将其组合为长阵列输入到系统的测距传感器中; 采用 EDM 算法对长阵列中的噪声点实施消除处理; 将 4 个测距传感器安置到货运车辆底部, 采用货运车辆动态称重方法, 计算车辆上各弹簧组承载力的总和, 并结合车辆有用信号, 对车辆的载重情况展开测量, 实现对车辆的超偏载检测; 实验结果表明, 利用长阵列改进 TPDS 系统后, 其去噪效果好, 在载重测量时, 测量误差在 5% 以内, 且平均耗时低、称重合格概率高, 表明所提方法的测量精度、检测效率以及检测稳定性高。

关键词: TPDS; 长阵列; EDM; 测距传感器; 车辆超偏载检测系统

Research on Vehicle Overload and Bias Detection Based on Improved TPDS Long Array

WANG Meng¹, SU Yudong², FAN Fan²

(1. China Energy Railway Equipment Limited Liability Company, Beijing 100010, China;

2. Tianjin Hveic Technologies Co., Ltd., Tianjin 301799, China)

Abstract: Due to the influence of factors such as weather, road conditions, and vehicle driving statuses, it results in the signal array too short during the process of vehicle overloading detection. Traditional truck performance detection systems (TPDS) have the characteristics of low accuracy and long processing time in vehicle overloading detection. On this basis, a vehicle overloading detection system based on an improved TPDS with a long array is proposed. Through the vehicle running quality trackside dynamic monitoring system, the distance measuring sensors and data acquisition devices are used to convert mechanical signals into voltage signals. The output signals are combined to form a long array, which is inputted into the distance measuring sensors of the system. The empirical mode decomposition (EDM) algorithm is applied to eliminate noise points in the long array. Four distance measuring sensors are installed at the bottom of freight vehicle. The dynamic weighing method for freight vehicle is adopted to calculate the total load-bearing capacity of each spring group on the vehicle. By combined with the useful signals of vehicle, the vehicle overloading is measured, achieving the vehicle overloading detection. Experimental results demonstrate that the improved TPDS system with a long array has a good denoising performance, the measurement error is within 5%, with the low average processing time and high probability of weight qualification, the proposed method has a high measurement accuracy, detection efficiency, and detection stability.

Keywords: TPDS; long array; EDM; distance measurement sensor; vehicle overload and unbalanced load detection system

0 引言

由于交通运输的发展, 使得车辆超偏载问题日益突出。超偏载是指车辆在运输过程中货物负荷超过规定限制的情况, 可能导致车辆失控、事故发生以及道路损坏等严重后果。这不仅会对道路安全造成严重威胁, 还会加剧道路损坏和交通拥堵等问题。货运列车的超载、偏载问题已经对行车过程产生显著影响。随着科学技术的飞速发展, 能够利用高科技手段确保货运列车安全运输, 因此研究现代化技术背景下的车辆超偏载检测方法成为国内外研究的热点

课题。目前, 传统的车辆超偏载检测方法普遍存在如精度低、耗时长等问题。由于受到天气、路况、车辆行驶状态等多种因素的影响, 传统方法中使用的信号组成的阵列长度过短, 导致检测结果不准确。因此, 准确、高效地检测和监测车辆的超偏载状态对于保障道路交通安全和运输质量至关重要。

邓俊^[1]等人提出一种基于轨道衡改造的车辆超偏载检测方法。通过非刚性衡量技术替代原始轨道衡的横向连接梁, 优化受力结构; 计算轮子所受的作用力, 传输到传感

收稿日期: 2023-06-02; 修回日期: 2023-07-10。

基金项目: 北京科技厅科技攻关项目 (BJ2022KJA0712)。

作者简介: 王萌 (1992-), 女, 硕士, 工程师。

苏玉东 (1972-), 男, 博士, 高级工程师。

引用格式: 王萌, 苏玉东, 范帆. 基于改进 TPDS 长阵列的车辆超偏载检测研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(5): 53-59.

器；分析传感器所输出信息并准确测算货车轮重、整车重量以及偏载率等数据，完成车辆超偏载检测。该方法检测时间过长，降低货运列车的运行效率。

徐博文^[2]等人采用基于道路“保险丝”概念的车辆超偏载自动识别限行方法。建立装置系统，分析翻转模块和台座之间产生的摩擦力，根据车重产生力矩的平衡特性，构建参数互相关方程，得到车辆摩擦所需的支撑力比值和限载值，自动识别超偏载车辆并实施限行处理。该方法安装过程复杂且成本较大，不利于大规模推广应用。

杜伦平^[3]等人利用单目视觉三维重建方法实现对车辆的超偏载自动检测。收集汽车序列信号建模并形成三维点云模式；对车型实施全局坐标系变换，并得到车辆多个横截面的二维点云图像；根据超偏载检测规定，建立标准的界限图形，整合点云图像，完成对超偏载车辆的识别检测。该方法易受到环境噪声等干扰，导致车辆称重数据不准确，影响检测精度。

为了解决上述方法中存在的问题，提出基于改进 TPDS 长阵列的车辆超偏载检测研究。TPDS 是一种用于检测车辆轮胎气压的系统，通过监测轮胎的气压变化来提供车辆状态的实时信息。该方法引入长阵列和改进的 EDM 算法，提高了车辆超偏载检测的精度和稳定性。通过将多个测距传感器安置在车辆底部，结合动态称重方法，实现对车辆的全面监测和测量，能够更准确地计算车辆上各弹簧组承载力的总和，从而判断车辆是否存在超偏载情况。实验结果表明，利用长阵列改进 TPDS 系统后，在车辆载重测量中，所提方法具有较高的测量精度、检测效率和检测稳定性。

1 改进 TPDS 系统获取长阵列信号

车辆运行状态监测系统 (TPDS, truck performance detection system) 是监测货运列车直线脱轨问题的轨边监测系统，通常由多个传感器、数据采集设备和数据处理单元组成^[4-5]。然而，在 TPDS 系统中，由于存在多个测距传感器，当车辆超偏载检测过程中，受天气、路况等因素以及车辆行驶状态影响，传感信号组成的阵列过短，导致传统的 TPDS 车辆超偏载检测精度较低、耗时较长^[6]。为了解决这一问题，通过改进的 TPDS 系统获取高分辨率长阵列信号，提高信号采集精度，并能够准确地分析和处理车辆信号^[7]。根据改进的 TPDS 系统，可以获取车辆运行时的轨道力学信号，以此实现车辆超偏载监测。改进 TPDS 监测系统结构图，如图 1 所示。

基于改进 TPDS 监测系统，存在多种组成结构，但主要根据利用系统中包含的测距传感器原理与布置方式，获取车辆运行时的轨道力学信号，并按照相应比例将其转换为电压信号，实时传送到数据采集仪^[8-9]中；利用数据采集仪放大信号，完成信号输出，从而组建长阵列信号，基于此，对后续信号实现去噪处理，以此获取有用信号。

1) 测距传感器的应用：

测距传感器是 TPDS 系统中关键的组成部分，测距传

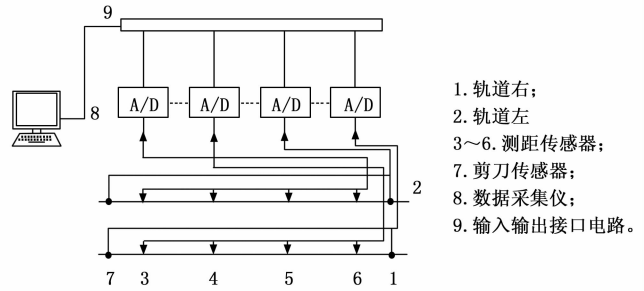


图 1 改进 TPDS 监测系统结构

感器获取的信号质量和准确性会直接影响检测结果的精度。通过改进 TPDS 系统，可以提升测距传感器的性能，使其具有更广泛的测量范围、更稳定的信号输出和更强的抗干扰能力，从而提高系统的检测准确度和稳定性。

在 TPDS 系统中，包含 4 个测距传感器，用于采集车辆运行时的轨道力学信号。这些传感器通过应变片，将力学信号转换成电压信号，其工作原理基于一种应变式补偿电路^[10]，具体而言，传感器中的应变片会受到外界施加在车轮上的力的作用，导致应变片产生形变。应变片的形变会引起其电阻值发生变化，进而改变传感器电路的电流或电压输出。通过测量电流或电压的变化，可以间接计算出施加在车轮上的力，从而实现对车辆运行时的轨道力学信号进行采集和分析。

测距传感器利用应力进行具体的测量，其测距原理是基于应力与距离之间的关系。当车轮受到外界力的作用时，这些力会通过车轮和轨道传递到测距传感器上。根据材料力学的原理，应力（即单位面积上的力）与应变（即单位长度上的形变）之间存在一定的线性关系。通过测量应变片上的应变情况，可以计算出施加在车轮上的力的大小。进而，结合车辆的运行状态和轨道信息，可以推导出车辆与轨道之间的距离。测距传感器原理图如图 2 所示。

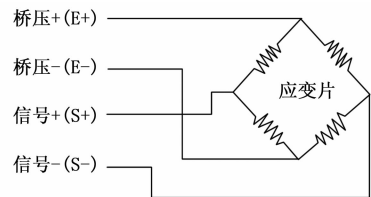


图 2 测距传感器原理图

2) 测距传感器布置的改进：

测距传感器的布置方式会影响长阵列信号的获取，使信号覆盖范围更广，减小信号盲区，提高检测的全面性和精度^[11]。车辆超偏载检测系统测点布置，如图 3 所示。

首先定量描述货运车辆的车体装载位置，建立轨面坐标系，在车辆空载情况下将原点 P 定义为货运车辆车体下方中央轴线与轨面之间的垂直落点。为了描述车辆的长度方向和高度方向，引入水平 X 轴和 Y 轴描述货运车辆的长度方向和高度方向，同时，为了描述车辆的宽度方向，用

垂直于 X 、 Y 轴线上的水平 Z 轴描述其宽度方向, 其三维坐标简化模型如图 3 (a) 所示。

在该布置方式中, 将 4 个测距传感器安装在垂直于货运车辆底面的位置, 货运车辆的轴距用 l 表示, 其中起到支撑作用的摇枕弹簧^[12]所在的直线方向和传感器位置均与 X 轴相互平行; 用 t 表示两者之间的距离, 由此得到两者之间的位置关系, 如图 3 (b) 所示。

这种测点布置方式的优势在于, 通过在不同位置安装测距传感器, 可以获取到更全面的车辆超偏载检测信号, 并提高检测的全面性和精度。此外, 由于传感器位置与车辆轴距平行, 可以更好地捕捉到车辆的装载位置信息, 从而实现对车辆超偏载状态的准确检测。

器件的数字信号。它可以进行数据存储、实时分析和显示等操作, 并输出处理后的最终信号。工业控制计算机通常具有高性能和稳定性, 能够满足实时性要求, 并保证数据的完整性和可靠性。数据采集仪工作原理如图 4 所示。

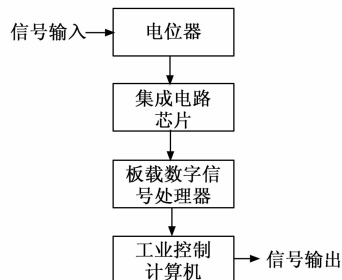


图 4 数据采集仪工作原理

数据采集仪的工作原理是通过测距传感器获取的电压信号进行一系列的处理和转换, 最终将处理后的信号输出到工业控制计算机中。这样可以实现对车辆超偏载检测信号的准确采集和处理, 提高检测的准确性和实时性。

将通过改进 TPDS 系统输出的信号, 组成长阵列, 存放在系统传感器中, 并将其作为车辆超偏载检测的基础数据。

2 车辆超偏载检测方法设计

2.1 EDM 去噪长阵列信号

在车辆行驶过程中, 受路面粗糙度、风力等多种因素干扰, 导致获取到的长阵列中存在不同程度的误差和噪声。因此, 为了准确提取有用的信号, 并降低后续数据处理过程中的误差, 在对车辆超偏载检测之前, 首先可以采用经验模态分解算法 (EMD, empirical mode decomposition) 对其展开去噪处理。经验模态分解算法^[13-14]是一种新型自适应信号分析算法。根据信号本身特征和频率分布, 自动提取信号中的固有模态函数, 这使得该方法可以适应不同类型和复杂度的车辆信号, 无需事先对信号进行假设或模型拟合, 适用于货运列车的长阵列处理。采用 EDM 算法可以有效地去除车辆信号中的噪声, 由于 EMD 算法基于信号本身的特征进行分解和重构, 其可以更好地保留信号的细节信息。相比于其他传统的滤波方法, EMD 算法能够更准确地提取出信号中的局部振动模式, 从而提供更精确的信号重构结果。该算法在后续的数据处理中能够准确提取有用信号, 减小误差, 实现超偏载检测, 提高检测结果精度。其具体实施过程如下所示。

1) 极值点筛选:

在进行极值点筛选时, 可以选择使用局部极大值和局部极小值作为判定条件。设置一个阈值, 当信号的局部极大值或局部极小值超过该阈值时, 将其作为极值点。将 $c(y)$ 表示车辆信号的长阵列进行处理, 筛选出信号中所有极大点和极小点, 以此获得一个新的长阵列 v_1 ; 由于长阵列 v_1 并不是平稳长阵列, 因此基于以上过程, 反复判定 m 次,

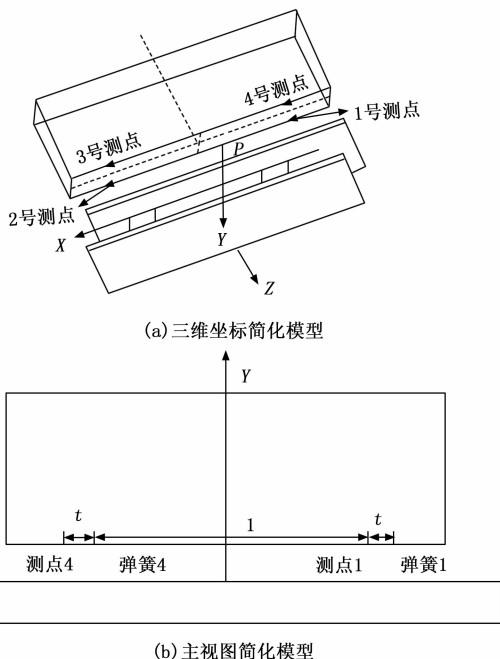


图 3 车辆超偏载检测系统测点布置

3) 长信号数据的采集:

基于测距传感器获取的电压信号, 通过数据采集仪将信号输出并组成长阵列, 可以提高准确性和实时性, 保证数据完整、可靠。

数据采集仪的基本构成有电位器、集成电路芯片、板载数字信号处理器件以及工业控制计算机。电位器和集成电路芯片主要负责对传感器信号进行一系列的处理, 包括放大、滤波、偏移纠正等处理。其中放大功能可以增加信号的幅度, 使得信号更易于被检测和分析。滤波功能可以去除噪声和干扰, 提高信号的质量。偏移纠正功能可以消除由于传感器误差或环境变化引起的信号偏移。板载数字信号处理器主要用于将模拟信号转换为数字信号, 即进行模数转换 (ADC, analog-to-digital converter)。通过 ADC 的转换, 可以将连续的模拟信号转换为离散的数字信号, 以便后续的数字信号处理和分析。工业控制计算机作为数据采集仪的核心, 负责接收和处理来自板载数字信号处理

直到不再能进一步分解为止；

2) 模态分解：

在模态分解过程中，需要确定迭代次数。通常情况下，迭代次数在 3~5 次之间可以获得较好的分解效果。在第一步的基础上，重复实施极值点筛选的步骤，获取若干 v_m 个最终不可分解的长序列 t_m ，并将其表示为 $c(y)$ 固有模态函数的均值及趋势项，具体的计算方法如下：

$$c(y) = \sum_{m=1}^m v_m(y) + t_m(y) \quad (1)$$

3) 高频噪声消除：

为了消除车辆运行信号中的高频噪声点，需要对车辆运行信号 $c(y)$ 中包含高频噪声点进行噪声消除处理。由于随机误差主要表现为高频信号，因此，可以通过滤波处理获得高精度的长阵列信号。选择 2 阶巴特沃斯低通滤波器对其滤波处理，低通滤波器是允许通过低于某个截止频率的信号成分，并抑制高于该频率的信号成分。设置截止频率为 50 Hz，以保留主要频率成分并抑制高频噪声。通过低通滤波器对车辆运行信号 $c(y)$ 中的高频信号噪声点 $\eta(y)$ 进行滤波处理^[15]，其具体表达如式 (2) 所示：

$$g(y) = c(y) - \eta(y), y = 0, 1, 2, \dots, m-1 \quad (2)$$

式中， $g(y)$ 代表有用信号。

2.2 基于动态称重方法实现车辆超偏载检测

由于去噪后的长阵列信号存放在传感器中极易受到环境温度、轨道振动等恶劣因素的影响，降低信号的测量准确度，并且 TPDS 系统的测距传感器^[16-17]仅针对静态环境检测，在动态环境中，车辆运行状态可能引入了诸如振动、冲击和噪声等干扰源，这些干扰源会对测距传感器的工作产生负面影响，降低测量的准确性。因此，若在车辆运行状态检测偏载情况，可以采用货运车辆动态称重方法，实现对车辆超偏载情况的自动检测，该方法利用车辆运行状态下的动态信息，通过数据采集、处理和判断，实时监测车辆的重量和偏载情况。相比静态称重方法，基于动态称重方法实现车辆超偏载检测具有实时性、准确性、适应性、灵活性和提高安全性等优势，可以提供更及时的信息，使得驾驶员或相关人员能够更快地采取必要的措施，以防止超偏载导致的安全问题。其具体过程如下：

首先将 TPDS 系统中 4 个测距传感器的安装位置设定为 $Q_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $Q_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $Q_3(x_3, y_3, z_3)$ 、 $Q_4(x_4, y_4, z_4)$ 。货运车辆的结构是一种刚性结构^[18]，因此，基于 3 点平面方程，利用第 4 个测距传感器的测点测得高度变量 $z_{4测}$ ，对方程求解，并对其结果展开验证，其过 3 点 $Q_l(x_l, y_l, z_l)$ ($l = 1, 2, 3$) 的平面方程表示如下：

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (3)$$

设定车辆加载状态下车底面的坐标方程，如下所示：

$$sX + nY + vZ + f = 0 \quad (4)$$

式中， s 表示车辆车速， n 表示车厢重， v 表示车轮实时压力，

f 表示车辆中心偏移程度。

将 3 点坐标代入到式 (3) 中，得到其参数指标，如公式 (5) ~ (8) 所示：

$$s = y_1 z_2 - y_1 z_3 - y_2 z_1 + y_2 z_3 + y_3 z_1 - y_3 z_2 \quad (5)$$

$$n = -x_1 z_2 + x_1 z_3 + x_2 z_1 - x_2 z_3 - x_3 z_1 + x_3 z_2 \quad (6)$$

$$v = x_1 y_2 - x_1 y_3 - x_2 y_1 + x_2 y_3 + x_3 y_1 - x_3 y_2 \quad (7)$$

$$f = -x_1 y_2 z_3 + x_1 y_3 z_2 + x_2 y_1 z_3 - x_2 y_3 z_1 - x_3 y_1 z_2 + x_3 y_2 z_1 \quad (8)$$

设定车辆加载后的平面，其坐标方程表达式如下所示：

$$s_1 X + n_1 Y + v_1 Z + f_1 = 0 \quad (9)$$

基准平面表达式为：

$$s_2 X + n_2 Y + v_2 Z + f_2 = 0 \quad (10)$$

根据式 (9) 和式 (10) 求出两者之间存在的夹角，如下所示：

$$\cos\theta = (s_1 s_2 + n_1 n_2 + v_1 v_2) / \sqrt{s_1^2 + n_1^2 + v_1^2} \cdot \sqrt{s_2^2 + n_2^2 + v_2^2} \quad (11)$$

$z_{m测}$ 为测距传感器的实际测量值，在得到各测点坐标位置之前，必须对其与测点距轨面垂向距离之间的关系展开分析研究^[19]。在偏载状态下，得出货运车辆各测点的垂向坐标 z_1 、 z_2 、 z_3 以及 z_4 ，其表达式如下：

$$z_m = z_{m测} \cos\theta \quad (12)$$

基于此，通过三角形相似关系^[20-21]描述各测点垂向坐标和弹簧位置垂向坐标之间包含的相互关系，三角形相似关系是指两个三角形具有相似的内角和对应边长比例的性质。利用三角形相似关系来推导出各个测点的垂向坐标和弹簧的坐标高度。这样可以更好地理解和分析车辆超偏载状态下的测量结果，以便更准确地分析和判断车辆的超偏载情况。

在得到车辆子称重情况下，各测点的垂向坐标 z_1 、 z_2 、 z_3 以及 z_4 的弹簧的坐标高度 j_1 、 j_2 、 j_3 以及 j_4 ，其数学表达式如下，测点和弹簧位置垂向坐标偏载状态关系图如图 5 所示。

$$j_1 = \frac{z_4 - z_1}{l + 2t} t + z_1 \quad (13)$$

$$j_2 = \frac{z_3 - z_2}{l + 2t} t + z_2 \quad (14)$$

$$j_3 = \frac{z_3 - z_2}{l + 2t} (1 + t) + z_2 \quad (15)$$

$$j_4 = \frac{z_4 - z_1}{l + 2t} (1 + t) + z_1 \quad (16)$$

式中， t 表示垂向坐标 z_1 、 z_2 之间的距离； l 表示垂向坐标 z_2 、 z_3 之间的距离。

在货运车辆在运输过程中，通过车辆上各弹簧组承载力的总和得出车厢总重量的标准称重。因此，为了获取车辆的载重信号，将 4 组承载弹簧压缩力大小与各弹簧刚度系数作为计算指标，得到车辆载重信号 $G_{总}$ ，如下所示：

$$G_{总} = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 = g(y) \cdot (j_1 + j_2 + j_3 + j_4) \quad (17)$$

式中， G_1 、 G_2 、 G_3 以及 G_4 表示 j_1 、 j_2 、 j_3 、 j_4 的车辆载重信号。

通过上述计算，获得车辆的载重信号，即可高精度地

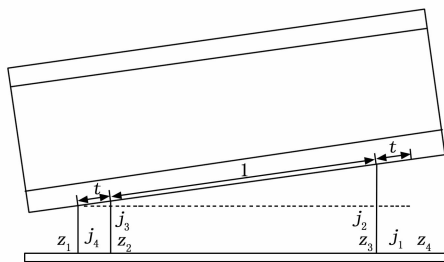


图 5 测点和弹簧位置垂向坐标偏载状态关系图

获取车辆的超偏载信息, 该信号反映了车辆在运输过程中承受的总载荷大小, 实现了对车辆超偏载的自动检测。基于动态称重方法实现车辆超偏载检测方法具体实施的步骤如下:

1) 设置测距传感器安装位置: 在车辆上安装了 4 个测距传感器, 分别安装在指定的位置 1、位置 2、位置 3 和位置 4。

2) 建立车辆平面方程: 通过测距传感器测量得到的数据, 可以建立车辆在正常状态下的基准平面方程和在偏载状态下的平面方程。

3) 求解参数指标: 根据车辆平面方程, 可以计算得到参数 1、参数 2、参数 3 和参数 4 的数值, 这些参数用于描述车辆的偏载情况。

4) 计算测距传感器实际测量值与测点距离关系: 通过三角形相似关系, 将测距传感器实际测量值与测点距离之间的关系进行计算, 得到测距传感器的垂向坐标和弹簧位置的垂向坐标。

5) 获取车辆载重信号: 将各个弹簧组的承载力求和, 得到车辆的总承载力。根据总承载力和预先设定的弹簧刚度系数, 计算出车辆的总重量标准称重值。

6) 实现车辆超偏载自动检测: 通过比较车辆的总重量标准称重值与预设的合法负载范围, 判断车辆是否存在超偏载情况, 并触发相应的警报机制。

3 实验与分析

3.1 实验测试

为了验证基于改进 TPDS 长阵列的车辆超偏载检测研究(简称“所提方法”)的整体有效性, 实验以车辆在噪声环境下行驶为背景。选择一条具有噪声环境的道路作为实验场景, 选择运输车辆作为实验对象, 在该道路上实地采集 10 组不同车速下车辆通过该路段时产生的称重信号, 选择的称重传感器的型号为 HBM PW15C3, 将其安装在车辆底盘或悬挂系统上, 以获取准确的载荷数据, 每组数据都包含车辆行驶过程中的多个测点的称重信息。设置实验中的车速范围为 20 km/h 至 60 km/h, 包括不同的车速档位, 预设的合法负载范围为 1 000 kg 至 5 000 kg。

在实验中, 以平均耗时作为试验指标, 检测车辆超偏载情况, 对 60 个测点检测车辆超偏载检测的称重合格概率。为了进行对比分析, 实验分别选择文献 [1] 基于轨道

衡的超偏载检测系统研究方法(以下简称“文献 [1] 方法”)和文献 [2] 摩擦翻转式路桥防超载装置及参数分析方法(以下简称“文献 [2] 方法”)作为对比方法进行实验测试, 以验证所提方法的优势和有效性, 并通过仿真软件 MATLAB 输出实验结果。

截取传感器采集到的原始数据中部分含噪信号, 将其作为测试对象。采用所提方法对该信号实施去噪处理, 由此得到的结果, 如图 6 所示。

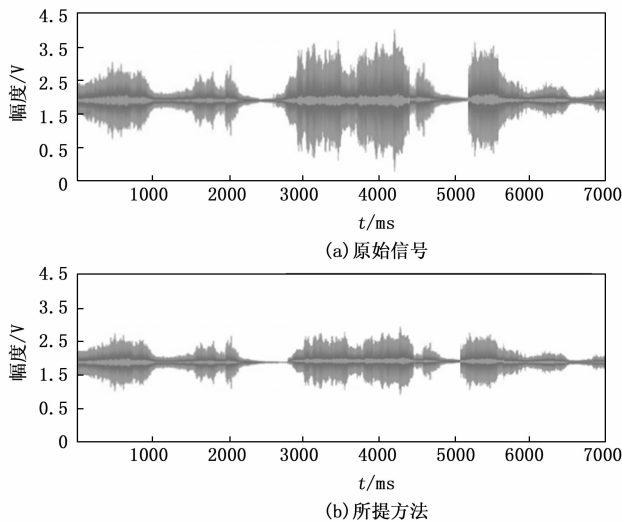


图 6 所提方法去噪效果

为体现所提方法的有效性, 实验实地采集 10 组不同车速下车辆通过该路段时产生的称重信号, 采用所提方法和文献 [1] 方法、文献 [2] 方法分别展开载重测量, 得到的对比结果如图 7 所示。

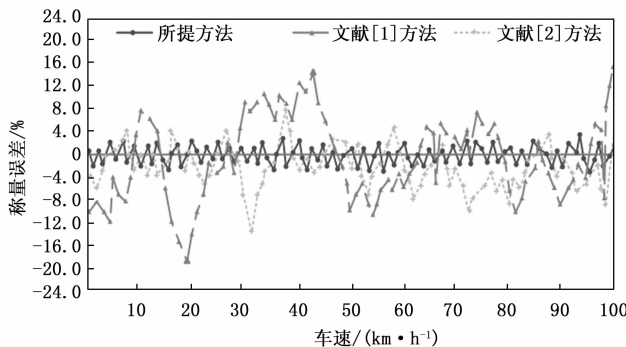


图 7 载重测量对比图

为进一步验证所提方法的可行性, 实验在测试条件相同的前提下, 将平均耗时作为车辆超偏载检测的指标之一。利用上述 3 种方法对车辆展开超偏载检测, 对比 3 种方法的耗时情况, 如表 1 所示。

车辆超偏载检测的称重合格概率是准确掌握车辆运行稳定性的关键, 因此实验以各个测点检测车辆载重数据为基础数据, 将车辆超偏载检测的称重合格概率作分级处理, 用合格概率 $A \geq 85\%$ 、 $85\% > A \geq 65\%$ 、 $A < 65\%$ 分别设定

为优、良、差，统计利用所提方法对车辆展开超偏载检测时的称重合格概率，称重合格概率结果如图 8 所示。

表 1 平均耗时情况对比

实验次数	车速/ (km · h ⁻¹)	耗时/ms		
		所提方法	文献[1]方法	文献[2]方法
1	10	32.51	42.11	50.11
2	20	35.45	45.77	54.23
3	30	36.88	48.02	56.88
4	40	38.41	50.21	59.47
5	50	39.99	52.08	62.88
6	60	42.25	53.99	67.01
7	70	42.99	55.23	69.58
8	80	43.58	56.77	72.55
9	90	45.11	58.43	78.41
10	100	46.66	60.25	81.05
平均耗时/ms		40.38	52.29	65.22

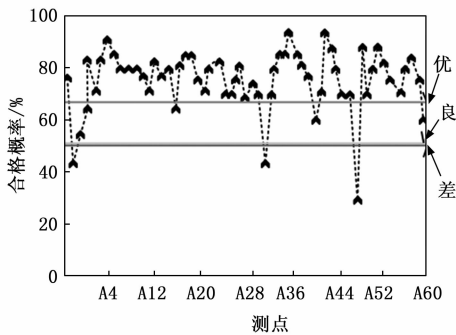


图 8 称重合格概率结果

3.2 实验结果与分析

3.2.1 去噪处理效果

所提方法去噪效果好，由图 6 的实验结果可知，原始信号在未经处理状态下波动较大，分布杂乱，难以分辨其是否为有用信号；经所提方法实施去噪处理后，能够在保留原始有用信号分布的情况下，有效地去除信号中包含的噪声，提高后续检测精度。这是因为所提方法通过经验模态分解算法对车辆信号进行去噪处理。EMD 算法能够自适应地提取信号中的固有模态函数，有效地去除信号中的噪声成分。

3.2.2 载重测量

所提方法的测量精度高，通过分析图 7 可得，文献 [1] 方法受环境影响较严重，称重误差较大，影响车辆超偏载检测结果；文献 [2] 方法误差相对小一些，但是测量波动较大，稳定性较差；所提方法的测量精度明显突出，测量误差在 5% 以内，能够更好地判断出车辆是否出现超偏载现象。这是因为所提方法采用动态称重方法对车辆的载重情况进行测量，通过安装传感器或称重装置在车辆的关键位置，实时监测车辆在运行过程中的载荷变化，能够更好地模拟车辆在实际运行条件下的载荷变化，提供更准确的载重测量结果。

3.2.3 平均耗时对比

所提方法的耗时短，根据表 1 中的数据可得，相比文献 [1] 方法与文献 [2] 方法，所提方法耗时最低，平均耗时分别低于两种检测方法 11.91% 和 24.84%，且耗时较平均，无明显差异，稳定性和检测效率相对较高。

3.2.4 称重合格概率分析

所提方法的称重合格率高，通过分析图 8 可知，可以得出以下结论：所提方法检测到的 60 个测点中有 52 个测点称重合格概率在优秀区间内，占比 87%；5 个测点称重合格概率在良好区间内，占比 8%；3 个较差，占比 5%；大部分测点的超偏载检测称重合格概率较高，能够较好地检测出车辆的载重状态，充分说明所提方法对车辆超偏载状态检测方面具有较高的稳定性和可行性。这是因为所提方法采用了传感器或称重装置在关键位置进行实时监测。这些传感器具有高精度和高灵敏度，能够准确地测量车辆受力情况。通过精确的测量技术，所提方法能够获取到准确的载重数据，并准确地判断车辆的载重情况，提高称重合格概率。

综上所述，实验结果与分析表明，所提方法在去噪处理、测量精度、耗时和称重合格概率等方面都表现出优越性。它能够有效地去除信号中的噪声，提高检测精度；相比其他方法，具有更低的耗时、更高的稳定性和可靠性。因此，所提方法在车辆超偏载检测领域具有重要的应用前景。

4 结束语

针对目前车辆超偏载检测方法在测量精度和检测效率等方面存在的缺陷和不足之处，提出基于改进 TPDS 长阵列的车辆超偏载检测研究。这项研究旨在通过改进传感器系统和采用先进的算法来提高测量精度和检测效率。利用改进 TPSD 系统采集车辆运行状态下的信号，改进 TPSD 系统具有更高的采样速率和更广泛的测量范围，能够捕捉到更多细微的信号变化。通过该方法可以获取到更全面和准确的车辆运行状态信息。将采集到的信号组成长阵列输入到测距传感器中。通过使用长阵列数据，能够获得更丰富的信息，从而提高测量的准确性。长阵列的输入可以增加系统对信号的分辨率和灵敏度，能够更准确地检测车辆的载重情况；为了进一步提高测量精度，采用 EDM 算法，去除长阵列中的噪声点；结合货运车辆动态称重方法，实现对车辆超偏载状态下的精确检测。经验证，所提方法具有较高的测量精度和检测效率。然而，这项研究仍然存在一些局限性。首先，长阵列的信号采集过程可能受到环境因素的影响，如噪声、振动等，这会影响信号质量和超偏载检测的准确性。其次，系统的标定和校准过程可能会受到环境条件和操作人员的影响，需要进一步研究标定和校准方法，以提高测量结果的可靠性和精度。因此，未来的研究中，针对存在的问题进行深入探索，以进一步提升车辆超偏载检测方法的准确性和可行性。

参考文献：

[1] 邓俊, 范众维, 孙勇, 等. 基于轨道衡的超偏载检测系统

- 研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (9): 2452-2460.
- [2] 徐博文, 吴二军, 蒋 勇, 等. 摩擦翻转式路桥防超载装置及参数分析 [J]. 公路, 2021, 66 (12): 252-257.
- [3] 杜伦平, 朱天赐, 刘期柏, 等. 基于单目视觉三维重建的货运列车超限检测方法研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (4): 1009-1016.
- [4] 吴文福, 张 娜, 李妹峣, 等. 5T 智慧农场管理系统构建与应用探索 [J]. 农业工程学报, 2021, 37 (9): 340-349.
- [5] 谢尊贤, 郝 聪, 张志远, 等. 基于 FTA-BN 的矿井安全监控系统运行可靠性分析 [J]. 工业安全与环保, 2023, 49 (2): 64-68.
- [6] 李改灵, 赵祥君, 于坤炎, 等. 融合多源监测信息的重载车辆安全性评估方法 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (11): 203-207.
- [7] 马春波, 石俊杰, 王 莹, 等. 一种自由空间光通信中自适应光电阵列信号处理算法 [J]. 电子学报, 2021, 49 (10): 1908-1912.
- [8] 王彦斌. 基于无线通信的煤与瓦斯突出数据采集仪的研制 [J]. 煤矿安全, 2022, 53 (12): 101-106.
- [9] 谈超鹏, 姚佳蓉, 唐克双. 基于抽样车辆轨迹数据的信号控制交叉口排队长度分布估计 [J]. 中国公路学报, 2021, 34 (11): 282-295.
- [10] 李海滨, 张 民, 韦正怡, 等. 全桥谐振电路混合控制 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2021, 40 (1): 56-63.
- [11] 李 强. 基于超声测距的工业机器人避障控制系统设计 [J].
- (上接第 52 页)
- [6] FAN L, LI J, ZHANG X P. Load prediction methods using machine learning for home energy management systems based on human behavior patterns recognition [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6 (3): 563-571.
- [7] MENG P C. A short-term power load prediction algorithm of based on power load factor deep cluster neural network [J]. Wireless Personal Communications: An International Journal, 2018, 102 (2): 1-9.
- [8] 范国松, 齐 正. PSO-BP 神经网络的电力负荷预测研究 [J]. 微型电脑应用, 2022, 38 (10): 130-133.
- [9] 王诗涵, 周法国. 基于支持向量机的电网负荷预测 [J]. 现代信息科技, 2020, 4 (24): 120-122.
- [10] 段明明, 杨 捷, 李沛霖. 基于小波和径向基函数神经网络的电力负荷预测研究 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2020, 42 (S2): 18-25.
- [11] 王 旭. 基于 GWO-LSTM 的短期电力负荷预测 [J]. 兰州文理学院学报 (自然科学版), 2023, 37 (1): 66-69.
- [12] LI R, ZHAO Z, ZHENG J, et al. Learning and prediction of application-level traffic data in cellular networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2017, 16 (6): 3899-3912.
- [13] 汪 炎, 高 昕, 方 亮. 布谷鸟算法优化 BP 网络的电力负荷预测 [J]. 哈尔滨商业大学学报 (自然科学版), 2022, 38 (1): 109-114.
- [12] 张玉磊, 张 纯, 孟少峰, 等. K6 摇枕铸造工艺设计与数值模拟 [J]. 铸造技术, 2021, 42 (6): 502-505.
- [13] 张凤奎, 张 宏, 兰海鹏, 等. 基于 CFD-EDM 耦合的气吸式红枣捡拾机气力输送装置仿真分析 [J]. 中国农业科技导报, 2021, 23 (7): 107-116.
- [14] 瞿红春, 贾柏谊, 郑剑青, 等. 面向滚动轴承的自适应 NAMVMD 融合 GADF 故障诊断方法 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023 (3): 99-103.
- [15] 何陈程, 王文波, 喻 敏. 基于品质可调小波去噪的低速滚动轴承故障诊断 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (4): 16-23.
- [16] 李跃鹏, 凌烈鹏, 周 游, 等. 轮轨压力测试传感器表面位移精密测量 [J]. 铁道建筑, 2021, 61 (10): 126-129.
- [17] 张高明, 胡 健, 申朝旭, 等. 高铁站房承轨层传感器布置及损伤识别研究 [J]. 建筑科学, 2021, 37 (5): 133-142.
- [18] 熊春宝, 白洪志, 王 猛. 基于 wMPS 测量刚性结构振动频率的可行性研究 [J]. 振动与冲击, 2021, 40 (19): 41-47.
- [19] 崔建弘, 杨静宜, 包丽媛, 等. 复杂光照背景下机器人激光测距姿态自动控制方法 [J]. 激光杂志, 2023, 44 (1): 194-198.
- [20] 方智敬, 陈 媛, 王俊杰, 等. 基于最小三角形算法的室内可见光三维定位方法 [J]. 光通信技术, 2023, 47 (1): 68-72.
- [21] 陆 涵, 林宝军, 张永合, 等. 小视场星敏感器的三角形改进算法 [J]. 计算机科学, 2022, 49 (s2): 537-541.
- [14] LIU J, YIN Y. Power load forecasting considering climate factors based on IPSO-elman method in china [J]. Energies, 2022, 15-22.
- [15] QI C, ZHANG Q, TIAN X, et al. Power load prediction method based on kernel extreme learning machine with t-distribution variation bat algorithm [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 631 (2): 42-49.
- [16] XUE J K, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm [J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8 (1): 22-34.
- [17] ZHANG S, ZHANG L, GAI T, et al. Aberration analysis and compensate method of a BP neural network and sparrow search algorithm in deep ultraviolet lithography [J]. Applied Optics, 2022 (20): 61-72.
- [18] 吕 鑫, 慕晓冬, 张 钧. 基于改进麻雀搜索算法的多阈值图像分割 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43 (2): 318-327.
- [19] 尹德鑫, 张达敏, 张琳娜, 等. 认知工业物联网中基于麻雀搜索算法的频谱分配策略 [J]. 数据采集与处理, 2022, 37 (2): 371-382.
- [20] CHEN Y. Short-term traffic flow prediction based on improved wavelet neural network [J]. Neural Computing & Applications, 2021, 33 (14): 20-29.