

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.025

一种基于 TwIST 稀疏正则化的冲击载荷识别方法

袁哲锋, 缪炳荣, 张盈, 金月皓, 尹兆珂, 胡天祺

(西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要:针对冲击载荷识别精度低的问题,提出一种基于稀疏正则化和两步迭代收缩阈值算法(TwIST)的冲击载荷识别方法。该方法采用稀疏正则化方法构建冲击载荷识别模型,使用 TwIST 算法迭代求解冲击载荷。通过铝合金梁冲击载荷识别试验对该方法进行验证。结果表明:在单源、多源冲击载荷两种工况中,TwIST 稀疏正则化方法能够准确识别冲击载荷,与传统的 Tikhonov 正则化方法相比,该方法的识别准确性、稳定性和抗噪性更优。

关键词:冲击载荷识别;稀疏正则化;TwIST;逆问题

中图分类号: O347.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)03-0126-06

A Method for Impact Load Identification Based on TwIST Sparse Regularization

YUAN Zhefeng, MIAO Bingrong, ZHANG Ying, JIN Yuehao, YIN Zhaoke, HU Tianqi

(State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In view of the low accuracy in impact load identification, a new method for impact load recognition based on sparse regularization method and Two-step Iterative Shrinkage Thresholding (TwIST) algorithm is proposed. The sparse regularization method is used to construct the impact load identification model and the impact load is solved iteratively by the TwIST algorithm. The proposed method is validated through impact load identification experiments on aluminum alloy beams. The results show that the TwIST sparse regularization method can accurately identify impact loads in both single-source and multi-source impact load conditions, and the proposed method, compared with the traditional Tikhonov regularization method, exhibits better accuracy, stability, and noise resistance in load identification.

Keywords: impact load identification; sparse regularization; TwIST; inverse problem

0 引言

近年来,智能运维、结构健康监测等新技术已经在航空、公路、铁路等领域得到广泛应用^[1]。为了实现结构健康监测、结构振动控制等目的,实现对动载荷的量化和可视化具有重要的工程价值。冲击载荷是动载荷中一种特殊的载荷形式,比如动车组运行过程中的轮轨冲击,冰雹对航空发动机风扇叶片的冲击等,长期受到此类冲击载荷的作用会使结构发生损伤和破坏,可能导致重大事故的发生。因此,准确获得结构所承受的冲击载荷十分重要。在实际工程中,直接通过力传感器测量载荷往往无法实现,这使得机械结构冲击载荷识别问题的研究受到极大关注^[2]。

载荷识别属于第二类动力学逆问题,通过在获得结构的响应数据,结合已知的结构模型信息

构建传递矩阵,对动载荷进行反演。然而载荷识别存在不确定问题,这使得测量响应的一个微小误差就会导致动载荷的反演结果不准确^[3]。因此可以使用正则化方法,克服问题的病态特性。基于 L_2 范数的正则化方法在载荷识别领域应用广泛。BOUKRIA 等^[4]通过实验获得的应变测点响应与结构激励点之间的系统传递关系,采用 Tikhonov 正则化方法,通过 L 曲线确定正则化参数,识别了圆板冲击力。QIAO 等^[5]提出了一种用于识别冲击载荷的正则化三次 B 样条配点方法,通过对广义交叉验证准则进行改进,确定该方法的最优正则化参数,取得了良好的效果。卢立勤等^[6]基于共轭梯度最小二乘迭代正则化算法和启发式迭代收敛终止准则,通过仿真和实验验证了所提方法的载荷识别精度和计算效率较传统正则化方法有显著提高。JIANG 等^[7]引入了基于

基金项目:四川省重点研发项目(2023YFG0197);牵引力国家重点实验室自主研发项目(2023TPL_T08);中央高校基本科研业务费-专题研究项目(2682022ZTPY007)

第一作者简介:袁哲锋(1999—),男,浙江绍兴人,硕士研究生,研究方向为载荷识别,yzf957207225@163.com。

贝叶斯原理的增强 Tikhonov 正则化方法,结合 Green 核函数提高了识别载荷的精度。马超等^[8]构造了一种冲击载荷识别模型,采用了一种新的正则化算子来解决冲击载荷识别的病态特性,该方法对于冲击载荷的识别具有更好的精度和抗噪性。 L_2 范数正则化方法能够实现对于动载荷的反演,并取得一定的识别效果,但是也存在自身局限性:首先其容易受噪声影响,抗噪性较差;其次这些方法不适用于在时域上稀疏冲击载荷的求解。

冲击载荷信号在时域上是一种稀疏信号,随着压缩感知理论发展,稀疏正则化方法为载荷识别提供了新的思路。乔百杰等^[9]提出了一种基于稀疏正则化模型的冲击载荷识别方法,提升了冲击载荷的识别精度,且能有效抑制噪声的影响。PAN 等^[10]使用加权 L_1 范数正则化和冗余字典对移动载荷进行了识别,取得了良好的效果。CHEN 等^[11]提出了一种基于自适应 B 样条基字典和稀疏正则化技术桥梁影响线的识别新方法,提高了桥梁影响线识别的质量。何文博等^[12]通过冗余扩展字典对动载荷进行稀疏表示,利用 $L1$ 范数正则化方法求解载荷识别模型,并通过改进 L 曲线获取正则化参数的最优值,实验结果表明所提方法抗噪性和识别精度显著提高。HUANG 等^[13]基于三次 B 样条曲线和两步迭代收缩-阈值稀疏正则化提出了一种冲击载荷识别方法,通过实验和数值仿真验证了所提方法的有效性和准确性。陈辉等^[14]提出一种基于 $L1$ 范数的稀疏正则化载荷识别方法,通过铝板结构开展试验验证,试验结果表明,相较于 Tikhonov 正则化法, $L1$ 范数正则化能获取更高的识别精度。ZHANG 等^[15]将两步迭代阈值收缩法和多目标蜜獾优化算法相结合,实现了对比例车体车下冲击载荷进行载荷识别,实验表明该方法具备一定的有效性和准确性。

综上所述,结合冲击载荷的稀疏特性,在冲击载荷识别问题上采用稀疏正则化模型,能够有效提升冲击载荷重构的准确性。本文在稀疏正则化模型的基础上,使用两步迭代收缩阈值算法^[16] (two-step iterative shrinkage/thresholding, TwIST) 反演冲击载荷,实现冲击载荷的识别,并将所提方法的可行性通过了铝合金梁冲击载荷试验验证。在铝合金梁冲击载荷试验中探究了单源冲击载荷工况、多源冲击载荷工况以及不同测点对冲击载荷识别结果的影响。

1 理论背景

1.1 基于 Green 核函数的正问题建立

构建载荷识别正问题模型是实现反问题计算的前提,在进行动载荷识别时,首先需要构建输入载荷与输出响应之间的正问题模型。线性系统的输入载荷 $f(t)$ 和振动响应 $y(t)$ 可以表示为

$$y(t) = \int_0^t f(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

式中: $h(t)$ 为载荷作用点与响应点之间的传递函数; $y(t)$ 是系统的输出响应。为了求解式(1),需要对其进行离散处理,简化为

$$y = Hf \quad (2)$$

式中 H 为系统的传递矩阵。如果作用在线性系统上的是多源载荷,产生的响应可以表示为单个载荷所产生响应的线性叠加,其表达式为

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1m} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \cdots & H_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: H_{ij} 表示第 j 个载荷 f_j 的作用点与第 i 个响应点之间的 Green 核函数矩阵; m 表示多源载荷的数目, n 表示响应点的数目,并且满足 $m \leq n$ 。

在实践中,不可避免地会出现干扰响应的系统和测量误差,因此根据式(3),载荷识别的控制方程改写如下:

$$y = Hx + \varepsilon \quad (4)$$

对于载荷识别问题,由于传递矩阵 H 存在病态问题导致矩阵无法求逆,故可以考虑使用正则化方法解决矩阵的病态问题。

1.2 Tikhonov 正则化方法

Tikhonov 正则化方法表示如下:

$$\min_f \|Hf - y\|_2^2 + \lambda \|f\|_2^2 \quad (5)$$

式中 λ 为正则化参数,且 $\lambda > 0$ 。将式(5)展开,关于 f 求偏微分,当偏微分为 0 时:

$$(H^T H + \lambda I)f = H^T y \quad (6)$$

式中 I 为单位矩阵。

则反演载荷的表达式为

$$f = (H^T H + \lambda I)^{-1} H^T y \quad (7)$$

1.3 稀疏正则化方法

稀疏正则化方法表示如下:

$$\min_f \frac{1}{2} \|y - Hx\|_2^2 + \lambda \|x\|_1 \quad (8)$$

式中: $\|y - Hx\|_2^2$ 为残差项; $\|x\|_1$ 为稀疏正则化算

子。式(8)可以改写成凸无约束目标函数 $g(x)$:

$$g(x) = \frac{1}{2} \|y - Hx\|_2^2 + \lambda \|x\|_1 \quad (9)$$

稀疏正则化问题没有具体的数值表达式,因此式(9)无法直接计算得到解析解,但其是一个凸函数,因此可以对其进行优化以获得全局最优解。内点法^[17]、迭代收缩/阈值算法^[18]和投影梯度方法^[19]都是解决稀疏正则化问题的常见算法。

1.4 两步迭代收缩阈值算法

由于两步迭代收缩阈值方法运算不涉及矩阵分解等运算,运行效率高,故本文采用该方法以解决冲击载荷识别中的稀疏正则化问题。

两步迭代收缩阈值算法的公式如下:

$$x_1 = S_T[x_0 + H^T(y - Hx_0)] \quad (10)$$

$$x_{k+1} = (1 - \alpha)x_{k-1} + (\alpha - \beta)x_k + \beta S_T x_k + \beta S_T H^T(y - Hx_k), \quad k \geq 1 \quad (11)$$

式中: $x_0=0$,是初始向量; S_T 是关于 x 的软阈值函数; α 和 β 是 TwIST 算法的两个收敛参数,其表达式如下所示:

$$\alpha = \rho^2 + 1 \quad (12)$$

$$\beta = \frac{2\alpha}{\xi_1 + \xi_m} \quad (13)$$

式中:

$$\rho = \frac{1 - \sqrt{\kappa}}{1 + \sqrt{\kappa}} \quad (14)$$

$$\kappa = \frac{\xi_1}{\xi_m} = \frac{\xi_1}{\max(1, \xi_m)} \quad (15)$$

一般在算法实际计算过程中设定 $\xi_m = 1$,当 $0 < \alpha < 2$ 且 $0 < \beta < 2\alpha$ 时, TwIST 算法被证明可以保证收敛。在解决严重病态问题时 ξ_1 往往远小于1,这导致了参数 β 非常接近保证算法收敛的最大允许值,因此本文中设置 $\xi_1 = 10^{-4}$ 。

2 基于 l_1 -TwIST 稀疏正则化方法的冲击载荷识别流程

为了研究结构冲击载荷识别方法以提高载荷识别精度,本文提出了一种基于 l_1 -TwIST 稀疏正则化方法的冲击载荷识别方法,并提供了一种完整的冲击载荷识别试验方法,主要步骤如下。

1) 测量结构振动响应 y 。搭建试验平台,确定动载荷加载位置,通过力锤对结构施加冲击载荷,冲击载荷的时间历程通过力传感器获取;在测点处布置加速度传感器获取测点位置的振动加速度响应信号。

2) 获取传递函数 H 。通过对结构施加单位脉冲载荷,可以获得在具体实验中脉冲响应函数。在具体实验中,通过数采系统获取频响函数转换为脉冲响应函数,将脉冲响应函数离散获得系统的传递函数 H 。

3) 通过 TwIST 进行迭代解决稀疏正则化问题。用于冲击载荷识别的稀疏正则化方法的目标函数定义为

$$g(f) = \frac{1}{2} \|y - Hf\|_2^2 + \lambda_\tau \|\Phi(f)\|_1 \quad (16)$$

式中: $\Phi(f) = \lambda_1 \|f\|_1$,一般在严重的病态问题中 λ_1 的取值为 $\lambda_1 \in [10^{-4}, 10^{-2}]$; λ_τ 为稀疏正则化参数,在实际分析中 $\lambda_\tau = \alpha \lambda_{\max} = \alpha \|2H^T y\|_\infty$, α 的取值为 $\alpha \in [0.001, 0.1]$ 。TwIST 算法迭代公式如式(10)、式(11)所示,当相对变化小于或等于可接受的相对公差 t_{ol} 时,迭代过程停止,迭代停止标准定义如下:

$$\frac{|g(f_{k+1}) - g(f_k)|}{g(f_{k+1})} \leq t_{ol} \quad (17)$$

在本文中,设置相对公差 $t_{ol} = 10^{-7}$,以确保识别的准确性。

为了对识别的冲击载荷进行定量评价,定义真实载荷与识别载荷的整体相对误差 R_E 和相关系数 C_c 为:

$$R_E = \frac{\|f^\alpha - f\|}{\|f\|} \times 100\% \quad (18)$$

$$C_c = \frac{\sum_{i=1}^m [f_i^\alpha - E(f^\alpha)] [f_i - E(f)]}{\|f^\alpha - E(f^\alpha)\| \|f - E(f)\|} \quad (19)$$

式中: $E(f)$ 为真实载荷的平均值; $E(f^\alpha)$ 为识别载荷的平均值。同时定义峰值误差 P_{RE} 为

$$P_{RE} = \frac{|\max(f) - \max(f^\alpha)|}{\max(f)} \times 100\% \quad (20)$$

式中: f 为真实的载荷值; f^α 为识别载荷值。

3 算例

3.1 实验设备

本文选取铝合金梁为对象,开展实验研究。实验系统的组成包括实验用铝合金梁、DH5923 数据采集系统、力锤、力传感器、加速度传感器和信号输入线等。简支梁的尺寸为:长 1 200 mm,宽 60 mm,厚 4 mm。冲击载荷识别实验通过力锤对试件施加冲击载荷激励,选择简支梁的激励点 F1、F2 和响应点 S1、S2、S3,具体的实验方案示意

如图 1 所示。

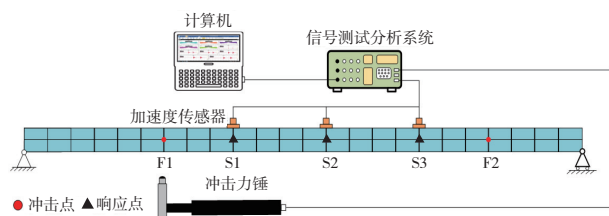


图 1 冲击载荷识别实验示意图

在实际的现场测试过程中,主要考虑了单源冲击载荷工况和多源冲击载荷工况,实验现场及测点布置如图 2 所示。本实验中数采系统采样频率为 2 000 Hz,频响分析点数为 4 096。为了验证 l_1 -TwIST 稀疏正则化方法的有效性和准确性,通过 Tikhonov 方法与 l_1 -TwIST 方法的识别结果进行对比。

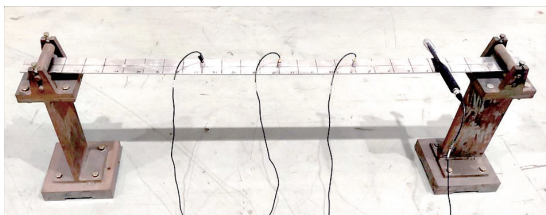


图 2 冲击载荷试验现场

3.2 单源冲击载荷识别实验

在该工况下, F1 点位置为激励点, 通过 IEPE 加速度传感器提取测点 S1、S2 和 S3 的加速度响应, 将信号测试分析系统获取的脉冲响应函数离散得到传递矩阵 $\mathbf{H}$, 在单源冲击载荷识别工况中矩阵的维度为 $4\,096 \times 4\,096$ 。使用 l_1 -TwIST 方法和 Tikhonov 方法对该工况下的载荷进行识别。上述两种方法的识别结果分别如图 3、图 4 所示(本刊为黑白印刷, 如有疑问请咨询作者)。

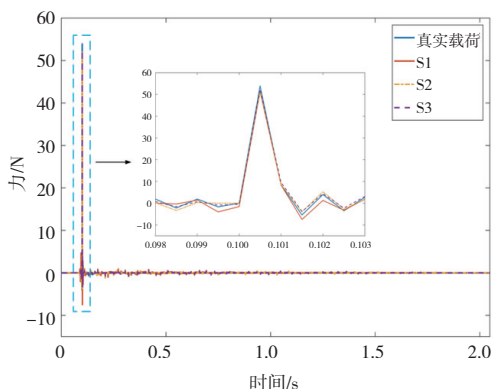


图 3 单源冲击载荷识别结果(l_1 -TwIST 正则化方法)

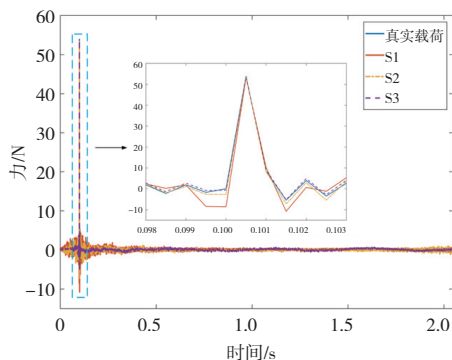


图 4 单源冲击载荷识别结果(Tikhonov 正则化方法)

从图 3 和图 4 可以看出 l_1 -TwIST 方法和 Tikhonov 方法对于冲击载荷的峰值都能有较好的识别效果。 l_1 -TwIST 方法所识别的载荷与真实载荷在数值和趋势上大致保持一致, 而 Tikhonov 方法所识别的载荷波动较大, 与真实载荷有一定差距。单源冲击载荷工况下 3 个测点识别结果的量化指标如表 1 所示。结合表 1 的量化指标来看, l_1 -TwIST 方法得到识别载荷结果优于 Tikhonov 方法。本实验在强噪声环境下进行, 噪声是造成在冲击载荷识别过程中产生误差的主要原因, l_1 -TwIST 方法能够得到更好的效果, 显示了其良好的稳定性和抗噪性。

表 1 单源冲击载荷识别结果量化指标

测点	正则化方法	$P_{RE}/\%$	$R_E/\%$	C_C
S1	l_1 -TwIST	4.88	17.61	0.985 6
	Tikhonov	6.96	60.39	0.863 7
S2	l_1 -TwIST	3.60	15.44	0.989 2
	Tikhonov	4.62	45.28	0.910 5
S3	l_1 -TwIST	2.75	13.47	0.992 1
	Tikhonov	2.29	30.58	0.953 0

3.3 多源冲击载荷识别实验

在多源冲击载荷识别工况中, 激励点为 F1 和 F2 两点, 力锤首先敲击 F1 点, 然后迅速敲击 F2 点, 使用 S1、S2 和 S3 共 3 个测点的加速度对两次冲击载荷进行反演, 传递矩阵的维度为 $12\,288 \times 8\,192$ 。 l_1 -TwIST 正则化方法和 Tikhonov 正则化方法对于两次冲击载荷的整体识别结果分别如图 5、图 6 所示。第 1 次冲击 F1 和第 2 次冲击 F2 的峰值识别结果分别如图 7、图 8 所示。

从图 5、图 6 可以看出, F1 和 F2 的识别结果存在一定的相互干扰, 这是由于在第 2 次敲击时, 第 1 次冲击的振动并未完全衰减, 导致两个冲击

力的识别结果存在了一定的交叠。结合图 7、图 8 可以发现, l_1 -TwIST 方法识别载荷的交叠情况较小,且良好的抗噪性使其识别结果的数值波动远小于 Tikhonov 方法。

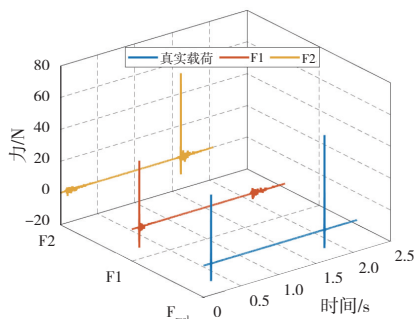


图 5 多源冲击载荷整体识别结果 (l_1 -TwIST 正则化方法)

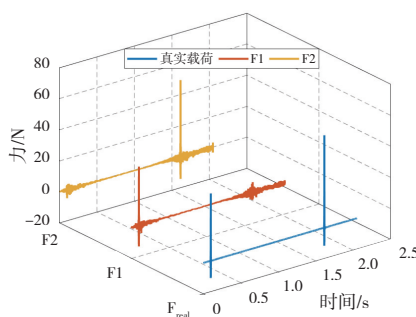


图 6 多源冲击载荷整体识别结果 (Tikhonov 正则化方法)

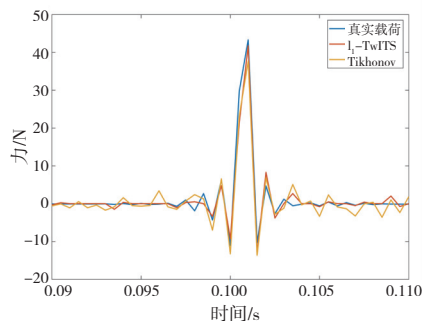


图 7 F1 峰值识别结果

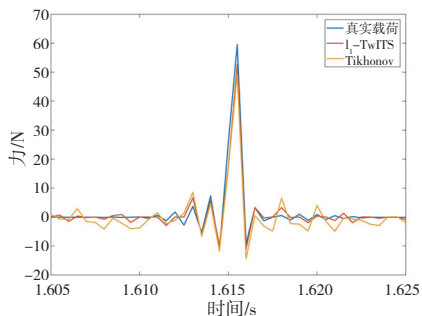


图 8 F2 峰值识别结果

表 2 列出了冲击载荷工况下 3 种方法识别结果的量化指标。需要说明的是由于实验条件的限制,本实验使用了同一个力锤进行了两次冲击,这也导致两次冲击力的信息记录叠加,故在计算表 2 中的 R_E 和 C_C 时,将识别的 F1 和 F2 叠加后再进行计算。根据表 2 的量化指标,显然 l_1 -TwIST 方法识别准确性和稳定性高于 Tikhonov 方法。 l_1 -TwIST 方法识别载荷的峰值相对误差值均小于 10%,相关系数值大于 0.95,但是两种方法的整体相对误差均较高,这主要是由于噪声的原因。Tikhonov 方法抗噪性较差,在单源、多源冲击工况中其整体相对误差均较高;对于 l_1 -TwIST 方法而言,相较于单源冲击工况不同测点的整体相对误差均小于 20%的情况,在多源冲击工况中整体相对误差值达到了 24.62%,除了噪声的原因,两次连续冲击也有一定的影响。对于冲击载荷而言,更应关注其冲击峰值信息,且整体相对误差仍小于 25%,因此该识别结果也可以被接受。

表 2 多源冲击载荷识别结果的量化指标

正则化方法	$P_{RE1}/\%$	$P_{RE2}/\%$	$R_E/\%$	C_C
l_1 -TwIST	7.75	6.69	24.62	0.968 6
Tikhonov	12.99	17.31	69.86	0.806 6

4 结语

针对冲击载荷识别问题的严重病态问题和稀疏特性,本文利用 l_1 -TwIST 稀疏正则化方法来识别施加在铝合金梁上的冲击载荷,通过实验研究得到以下结论:

1) 本文所提 l_1 -TwIST 稀疏正则化方法能够准确识别冲击力,且相较于 Tikhonov 方法具有更好的识别准确性、抗噪性和稳定性;

2) 在铝合金梁单源冲击工况和多源冲击工况中, l_1 -TwIST 稀疏正则化方法所识别的冲击载荷峰值相对误差均小于 10%,相关系数均大于 0.95,整体相对误差均小于 25%,取得了良好的识别效果;

3) 通过试验验证了 l_1 -TwIST 稀疏正则化方法具有一定实际工程应用前景,但是由于铝合金梁结构简单,其对于复杂结构的载荷识别仍有待进一步验证。

参考文献:

- [1] 缪炳荣,张卫华,刘建新,等. 工业 4.0 下智能铁路前沿技术问题综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 115-131.
- [2] 毛玉明,林剑锋,刘靖华,等. 动载荷反演分析技术研究综述[J]. 动力学与控制学报, 2014, 12(2): 97-104.

- [3] 杨智春,贾有. 动载荷的识别方法[J]. 力学进展, 2015,45(0):33-58.
- [4] BOUKRIA Z, PERROTIN P, BENNANI A. Experimental impact force location and identification using inverse problems: application for a circular plate [J]. International Journal of Mechanics, 2011,5(1):48-55.
- [5] QIAO B J, CHEN X F, XUE X F, et al. The application of cubic B-spline collocation method in impact force identification [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015,64:413-427.
- [6] 卢立勤,乔百杰,张兴武,等. 共轭梯度最小二乘迭代正则化算法在冲击载荷识别中的应用[J]. 振动与冲击, 2016,35(22):176-182,196.
- [7] JIANG J H, TANG H Z, MOHAMED M S, et al. Augmented Tikhonov regularization method for dynamic load identification [J]. Applied Sciences, 2020,10(18):6348.
- [8] 马超,华宏星. 一种基于新的正则化技术的冲击载荷识别法[J]. 振动与冲击, 2015,34(12):164-168,181.
- [9] 乔百杰,陈雪峰,刘金鑫,等. 机械结构冲击载荷稀疏识别方法研究[J]. 机械工程学报, 2019,55(3):81-89.
- [10] PAN C D, HUANG Z J, YOU J D, et al. Moving force identification based on sparse regularization combined with moving average constraint [J]. Journal of Sound and Vibration, 2021,515:116496.
- [11] CHEN Z W, YANG W B, LI J, et al. Bridge influence line identification based on adaptive B-spline basis dictionary and sparse regularization [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019,26(6):e2355.
- [12] 何文博,许步锋,冯振宇,等. 利用冗余扩展余弦字典的复杂动载荷识别研究[J]. 振动工程学报, 2024,37(3):512-521.
- [13] HUANG C, JI H L, QIU J H, et al. TwIST sparse regularization method using cubic B-spline dual scaling functions for impact force identification[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022,167:108451.
- [14] 陈辉,缪炳荣,赵浪涛,等. 基于 L1 范数正则化和最小二乘优化的冲击载荷识别研究[J]. 噪声与振动控制, 2023,43(1):62-67,99.
- [15] ZHANG Y, MIAO B R, ZHANG W H, et al. Impact load identification of high-speed train scale carbody based on multi-objective optimisation and TwIST sparse regularisation [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2025,40(1):365-385.
- [16] BIOUCAS-DIAS J M, FIGUEIREDO M A T. A new twIST: two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007,16(12):2992-3004.
- [17] KOH K, KIM S J, BOYD S. An interior-point method for large-scale l1-regularized logistic regression[J]. Journal of Machine Learning Research, 2007,8(8):1519-1555.
- [18] DAUBECHIES I, DEFRISE M, DE MOL C. An iterative thresholding algorithm for linear inverse problems with a sparsity constraint [J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 2004,57(11):1413-1457.
- [19] FIGUEIREDO M A T, NOWAK R D, WRIGHT S J. Gradient projection for sparse reconstruction: application to compressed sensing and other inverse problems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007,1(4):586-597.

收稿日期:2023-08-18

(上接第 109 页)

- [7] ATTARAN M, CELIK B G. Digital Twin: benefits, use cases, challenges, and opportunities [J]. Decision Analytics Journal, 2023,6:100165.
- [8] 陶飞,张贺,戚庆林,等. 数字孪生十问:分析与思考[J]. 计算机集成制造系统, 2020,26(1):1-17.
- [9] 成正勇,李爱冉,黎亮,等. 基于 TECNOMATIX 的机器人点焊离线编程技术应用[J]. 汽车科技, 2020(5):73-79.
- [10] 周丹,管佳燕,凌雯雯,等. Tecnomatix 虚拟仿真在智能生产线教学中的应用[J]. 科技与创新, 2024(7):179-181,184.
- [11] 潘思羽. 基于数字孪生技术的制造业生产线智能化建设研究[J]. 互联网周刊, 2024(21):37-39.
- [12] FANG Y L, PENG C, LOU P, et al. Digital-twin-based job shop scheduling toward smart manufacturing [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019,15(12):6425-6435.
- [13] 刘亮,姚春琦,贺禹铭. 基于精益数字孪生体的智能制造系统设计[J]. 机械设计, 2023,40(9):59-66.
- [14] 曹家勇,吴沛华,吕文壮,等. 汽车车身多机器人焊接路径规划和 Tecnomatix 虚拟仿真[J]. 机械设计与研究, 2021,37(5):21-26,40.
- [15] 赵为鑫,张文超,王明伟,等. 面向抓取任务的机器人离线编程优化[J]. 制造技术与机床, 2023(2):34-39.
- [16] 田富君,张红旗,陈帝江,等. 基于 Tecnomatix 的三维装配工艺设计与仿真技术研究[J]. 制造业自动化, 2013,35(15):11-13,16.
- [17] 李伟,周杨智,陆玉娇. 基于 Tecnomatix 的数字化工厂软件在汽车焊装车间的应用[J]. 通讯世界, 2018,25(1):311-312.
- [18] 陈甦欣,程智攀. 基于 Tecnomatix 的变速箱壳体部装人机工程仿真分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021,44(11):1441-1444.
- [19] 林巨广,黄晓丹,任永强. 基于 Tecnomatix 的变速箱虚拟装配技术研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(12):94-97.
- [20] 陈浩,王体金,刘毅,等. 基于 PDPS 的设备工装干涉验证及机器人路径优化[J]. 机械研究与应用, 2021,34(6):178-181.

收稿日期:2023-07-18