

基于截断 GSVD 方法的桥梁移动荷载识别

陈震¹, 余岭²

(1. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 郑州 450011; 2. 暨南大学 力学与土木工程系, 广州 510632)

摘要: 针对移动荷载识别系统矩阵的病态问题, 通过引入正则化矩阵, 提出采用截断广义奇异值分解法 (TGSVD) 识别桥梁移动荷载, 并与时域法 (TDM) 识别结果比较。两轴移动荷载识别结果表明, TGSVD 具有识别精度高、抗噪能力强、识别结果受响应类型及响应组合影响小等优点。对将 TGSVD 应用于现场移动荷载有重要意义。

关键词: 移动荷载识别; 病态问题; 时域法; 截断广义奇异值分解法

中图分类号: O327; TU311

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.10.019

Identification of dynamic axle loads on a bridge based on truncated generalized singular value decomposition

CHEN Zhen¹, YU Ling²

(1. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China;

2. Department of Mechanics and Civil Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Aiming at ill-posed problems of solving moving force identification system matrix, a truncated generalized singular value decomposition (TGSVD) algorithm for moving force identification was developed by introducing regularization matrix. The numerical simulation of two-axle moving force loads showed that the proposed method TGSVD has many good properties compared with the time domain method (TDM), such as, higher identification accuracy, robust noise immunity and less effect of response type and response combination on its recognition results, it is beneficial to the application of TGSVD in field identification of dynamic axle loads on a bridge.

Key words: moving force identification; ill-posed problem; time domain method (TDM); truncated generalized singular value decomposition (TGSVD)

车辆荷载与桥梁结构的安全性能及使用寿命密切相关, 车辆改装超重导致桥梁垮塌事故时有发生。传统的测量手段测量静载较精确, 但测量移动荷载存在较大误差。因此, 准确识别移动荷载, 对桥梁的合理设计及安全维护具有重要意义。

移动荷载识别属于结构动力学逆问题范畴, 而其结构矩阵求逆过程常为病态, 在动态荷载识别中由于矩阵病态会影响识别精度^[1]。近年出现较多移动荷载识别方法, 如小波有限元法^[2]、形函数拟合法^[3]、结合健康监测系统识别移动荷载^[4]、模糊模式识别方法^[5]、预处理共轭梯度法^[6]、矩量法^[7]、神经网络法^[8]、函数逼近法^[9]等。文献[10]通过对4种移动荷载间接识别方法研究比较结果表明, 该4种方法均能有效识别桥

梁移动荷载且时域法 (TDM)^[11]、频域法 (FTDM)^[12] 识别精度较高、实用性较强。Hansen^[13] 提出广义奇异值分解法 (GSVD) 及截断广义奇异值分解法 (TGSVD)。GSVD 已应用于空间与雷达目标识别等领域^[14], 相关研究表明 GSVD 方法抗噪性能强, 能避免信号失真^[15]。通过引入正则化参数, 奇异值分解法 (SVD) 可改进为截断奇异值分解法 (TSVD)。研究表明 TSVD 正则化方法在求解不适定问题时十分有效^[16]。通过引入正则化矩阵, 提出采用截断广义奇异值分解法 (TGSVD) 识别桥梁移动荷载, 并与时域法 (TDM) 识别结果比较。数值仿真结果表明, TGSVD 方法识别精度较 TDM 有较大提高, 识别结果受噪声干扰小, 受响应类型及响应组合变化影响小, 对将 TGSVD 方法应用于移动荷载现场识别有重要意义。

1 基本理论

1.1 移动荷载识别理论

图1所示, 忽略简支梁桥剪切变形及转动惯量 (即

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51278226); 华北水利水电大学高层次人才科研启动项目 (001331); 国家级大学生创新创业训练计划项目 (201210078047)

收稿日期: 2013-02-25 修改稿收到日期: 2013-06-27

第一作者 陈震 男, 副教授, 讲师, 1981年生

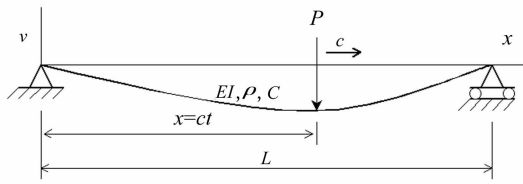


图1 移动荷载识别简支梁模型

Fig. 1 Simply supported beam model for moving force identification

伯努力-欧拉梁),取桥梁跨长 L ,抗弯刚度 EI ,单位长度质量 ρ ,粘性比例阻尼 C ,设动荷载 P 以速度 c 自梁左端向右移动,则运动方程以模态坐标形式可表示为

$$\left. \begin{aligned} \ddot{q}_n(t) + 2\xi_n\omega_n\dot{q}_n(t) + \omega_n^2q_n(t) &= \frac{2}{\rho L}P_n(t) \\ (n = 1, 2, \dots, \infty) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $q_n(t)$, $\omega_n = \frac{n^2\pi^2}{L^2}\sqrt{\frac{EI}{\rho}}$, $\xi_n = \frac{C}{2\rho\omega_n}$, $P_n(t) = P(t)\sin\left(\frac{n\pi ct}{L}\right)$ 分别为梁第 n 阶模态振型、圆频率、阻尼比、模态力。

式(1)在时域通过卷积积分求解,梁 x 处 t 时刻弯矩响应为

$$M(x,t) = -EI \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2EI\pi^1 n^2}{\rho L^3 \omega'_n} \sin \frac{n\pi ct}{L} \times \int_0^t e^{-\xi_n\omega_n(t-\tau)} \sin[\omega'_n(t-\tau)] \sin \frac{n\pi c\tau}{L} P(\tau) d\tau \quad (2)$$

式中: v 为梁 x 处 t 时刻位移; $\omega'_n = \omega_n \sqrt{1-\xi_n^2}$ 。

梁 x 处 t 时刻加速度响应为

$$a(x,t) = \ddot{v}(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\rho L} \sin \frac{n\pi ct}{L} \times \left[p_n(t) + \int_0^t \dot{h}_n(t-\tau) p_n(\tau) d\tau \right] \quad (3)$$

式中 $\dot{h}_n(t) = \frac{1}{\omega'_n} e^{-\xi_n\omega_n t} \{ ((\xi_n\omega_n)^2 - \omega_n^2) \sin(\omega'_n t) + (-2\xi_n\omega_n\omega'_n) \cos(\omega'_n t) \}$ 。

移动荷载识别系统方程为

$$[A]_{N \times N_B} \{x\}_{N_B \times 1} = \{b\}_{N \times 1} \quad (4)$$

式中: $[A]$ 为与车桥参数有关的系统矩阵; $\{b\}$ 为桥面测点弯矩响应、加速度响应或其组合; $\{x\}$ 为移动荷载时间系列向量。下标 $N, N_B = L/c\Delta t$ 分别为移动荷载通过全桥时测点响应及所采样本数。

1.2 广义奇异值分解法(GSVD)

奇异值分解法(SVD)将 $m \times n$ 矩阵 A 分解为

$$A = U\sigma V^T = \sum_{i=1}^n u_i\sigma_i v_i^T \quad (5)$$

式中: $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$, $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ 为正交特征向量,即 $U^T U = V^T V = I_n$; $\sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$ 为对角矩阵且特征值 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0$ 。

SVD 在求解病态矩阵时存在诸多困难,而广义奇

异值分解法(GSVD)通过引入正则化矩阵 L 能较好解决此问题。引入 $p \times n$ ($m \geq n \geq p$) 正则化矩阵 L ,病态矩阵 A 与 L 组成矩阵对 (A, L) ,则其广义特征值为矩阵对 $(A^T A, L^T L)$ 广义特征值的平方根,当 L 为单位矩阵 I_n 时,GSVD 退化为 SVD。

广义奇异值分解可表示为

$$A = U \begin{pmatrix} \sigma & 0 \\ 0 & I_{n-p} \end{pmatrix} X^{-1}, \quad L = V(M, 0) X^{-1} \quad (6)$$

式中: U 为 $m \times n$ 正交矩阵; V 为 $p \times p$ 正交矩阵; X 为 $n \times n$ 非奇异交矩阵; $\sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_p)$, $M = \text{diag}(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p)$ 为对角矩阵且满足 $1 \geq \sigma_p \geq \dots \geq \sigma_2 \geq \sigma_1 \geq 0, 1 \geq \mu_1 \geq \mu_2 \geq \dots \geq \mu_p \geq 0, \sigma_i^2 + \mu_i^2 = 1$ ($i = 1, 2, \dots, p$),取 $\gamma_i = \sigma_i/\mu_i$ ($i = 1, 2, \dots, p$) 为随 i 值递增的广义特征值。

1.3 截断广义奇异值分解法(TGSVD)

截断奇异值分解法(TSVD)将病态矩阵转化为良态欠秩矩阵,通过将病态矩阵 A 奇异值分解并在 k 列秩截断,即可得 k 秩矩阵为 $A_k = \sum_{i=1}^k u_i \sigma_i v_i^T$ 。最小二乘法求解 $\min \|Ax - b\|_2$ 即转化为求解 $\min \|A_k x - b\|_2$:

$$x_k = \sum_{i=1}^k \frac{u_i^T b}{\sigma_i} v_i \quad (7)$$

截断广义奇异值分解法(TGSVD)通过引入 $\bar{A} = A L_A^+$, $\bar{b} = b - A x_0$ 分别代替截断奇异值分解法(TSVD)中矩阵 A, b ,广义奇异值分解矩阵对 (A, L) 即转化为求解截断广义奇异值分解矩阵对 (\bar{A}_k, L) ,即转化为求解 $\min \|\bar{A}_k \bar{x} - \bar{b}\|_2$ 。其中 L_A^+ 称 L 的加权广义逆,其权为系数矩阵 A :

$$\left. \begin{aligned} L_A^+ &= X \begin{pmatrix} M^{-1} \\ 0 \end{pmatrix} V^T \\ x_{k,L} &= \sum_{i=p-k+1}^p \frac{u_i^T b}{\sigma_i} x_i + \sum_{i=p+1}^n (u_i^T b) x_i \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $x = L_A^+ \bar{x} + x_0$, $\bar{x} = Lx$, $x_0 = \sum_{i=p+1}^n (u_i^T b) x_i$; $\bar{A}_k = \sum_{i=p-k+1}^p u_i \gamma_i v_i^T$ 。

2 数值仿真与分析

2.1 车桥仿真参数

为验证 TGSCD 识别方法的正确性、有效性及全程适用性,采用文献[11]算例识别两轴移动荷载,车辆在桥面行驶全时段均用截断广义奇异值分解法进行识别,并将识别结果与时域法识别结果比较。桥面前轴荷载 $F_1(t)$ 与后轴荷载 $F_2(t)$ 分别为

$$F_1(t) = 20[1 + 0.1\sin(1/4ct) + 0.05\sin(ct)] \quad (\text{kN}) \quad (9)$$

$$F_2(t) = 20[1 - 0.1\sin(1/4ct) +$$

$$0.05\sin(5/4ct)] \quad (\text{kN}) \quad (10)$$

取车辆轴距 $l_s = 8 \text{ m}$, 车速 $c = 40 \text{ m/s}$; 桥梁参数 $EI = 1.27914 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^2$, $\rho = 12000 \text{ kg/m}$, 梁长 $L = 40 \text{ m}$. 桥梁前三阶固有频率为: 3.2 Hz , 12.8 Hz , 28.8 Hz , 分析频段取 $0 \sim 40 \text{ Hz}$, 采样频率取 200 Hz . 由车辆轴载可得桥梁在荷载作用下的弯矩响应、加速度响应. 考虑实际响应测量中噪声影响, 采用模拟噪声干扰后的实际桥梁测量响应:

$$R_{\text{measured}} = R_{\text{calculated}}(1 + E_p N_{\text{oise}}) \quad (11)$$

式中: E_p 为噪声水平 ($0 < E_p < 1$); N_{oise} 为标准正态分布的随机噪声; $R_{\text{calculated}}$ 为计算值响应; R_{measured} 为实测值响应.

2.2 荷载识别及分析

为对识别结果进行评价, 采用识别误差计算公式:

$$\text{RPE} = \frac{\|F_{\text{true}} - F_{\text{identified}}\|}{\|F_{\text{true}}\|} \times 100\% \quad (12)$$

式中: $\|\cdot\|$ 为向量范数; F_{true} 为真实荷载; $F_{\text{identified}}$ 为识别荷载.

据 $1/4$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ 桥跨处的实测弯矩响应及加速度响应, 选 8 种组合响应工况分别采用 TDM, TSVD, TGSVD 识别两轴车, 识别结果见表 1, 其中 TSVD 为无加权截断奇异值分解识别结果, TGSVD 为加权后截断奇异值分解识别结果. 图 2 为只采用弯矩响应识别两轴车时, TDM 与 TGSVD 识别结果比较. 图 3 为只采用加速度响应识别两轴车时, TDM 与 TGSVD 识别结果比较. 图 4 为采用弯矩与加速度组合响应识别两轴车时, TDM 与 TGSVD 识别结果比较.

表 1 TDM、TSVD 与 TGSVD 两轴移动荷载识别结果 RPE 值比较

Tab. 1 Comparison on RPE values between two-axle moving load results identified by TDM, TSVD and TGSVD

测点布置	1% 噪声						10% 噪声					
	前轴			后轴			前轴			后轴		
	TDM	TSVD	TGSVD	TDM	TSVD	TGSVD	TDM	TSVD	TGSVD	TDM	TSVD	TGSVD
1/4m&1/2m&3/4m	50.8	30.0	3.5	118.0	31.4	3.8	509.2	32.5	28.7	1186.1	33.1	28.7
1/4a&1/2a	19.2	13.6	10.6	29.7	11.5	8.8	192.1	22.3	10.7	297.0	22.2	10.4
1/2m&1/2a	86.3	23.8	9.5	94.7	20.9	6.8	862.5	31.6	18.8	947.0	30.3	12.3
1/4m&1/2m&1/2a	54.6	17.2	8.2	48.5	16.0	4.0	545.9	22.3	17.7	484.3	18.6	10.7
1/4m&1/4a&1/2m&1/2a	11.7	10.5	8.0	15.0	10.3	7.1	117.0	12.3	8.5	149.5	12.0	7.8
1/4m&1/4a	683.2	25.1	11.4	552.3	21.3	7.6	6824.3	33.2	15.5	5514.4	32.8	11.4
1/4a&1/2m&1/2a	11.9	10.9	10.0	14.9	9.8	8.0	118.9	16.8	11.1	149.0	14.2	9.9
1/4m&1/4a&1/2m	44.3	15.3	12.9	71.0	12.1	8.3	442.7	26.6	19.4	708.6	25.3	13.7

注: RPE 表示识别结果与真实移动荷载间的相对百分误差; 识别误差大于 100%, 判定为无法识别移动荷载; ‘m’ 和 ‘a’ 分别表示弯矩及加速度响应; $1/4$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ 代表测点所处桥跨位置.

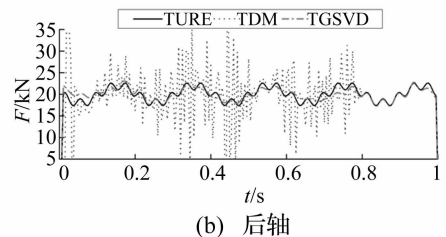
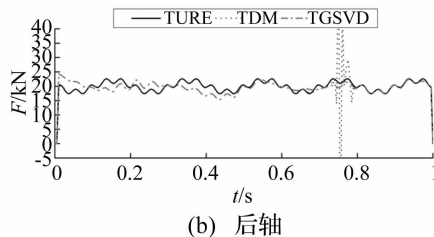
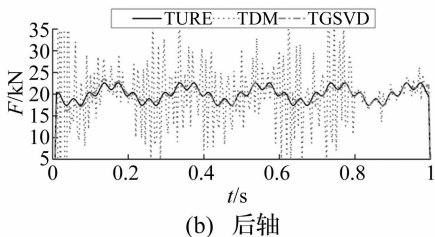
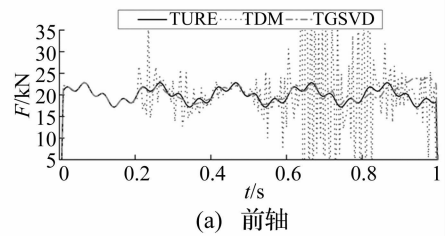
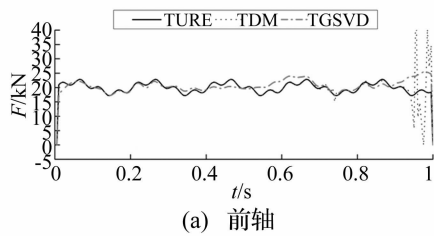
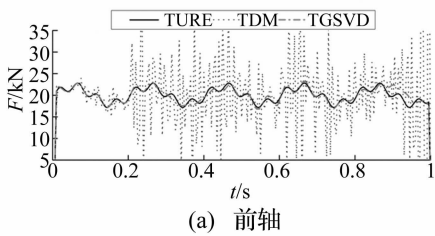


图 2 弯矩响应 TDM 与 TGSVD 识别结果比较

Fig. 2 Comparison on identified results from three bending moment responses by TDM and TGSVD

图 3 加速度响应 TDM 与 TGSVD 识别结果比较

Fig. 3 Comparison on identified results from two acceleration responses by TDM and TGSVD

图 4 弯矩与加速度组合响应 TDM 与 TGSVD 识别结果比较

Fig. 4 Comparison on identified results from bending moment and acceleration response by TDM and TGSVD

无噪声时,三种方法均可准确识别移动荷载,表明三种方法均正确有效。由表1知,三种方法识别误差均随噪声干扰增加而增大。采用TDM识别移动荷载识别误差随噪声水平线性增加,噪声水平大于10%时,所有工况均不能有效识别移动荷载(识别误差大于100%即认为无法识别移动荷载)。采用TGSVD识别移动荷载时,由弯矩响应识别较由加速度响应识别受噪声影响大。工况1为采用三个弯矩响应测点识别结果,噪声水平从1%增加到10%,TGSVD前轴识别误差从3.5%增加到28.7%;工况2为采用两个加速度响应测点识别结果,噪声水平从1%增加到10%,TGSVD前轴识别误差从10.6%增加到10.7%;当采用无加权截断奇异值分解(TSVD)识别移动荷载,识别精度介于TDM与TGSVD之间。相对于TDM与TSVD,TGSVD识别误差受噪声干扰影响较小,鲁棒性较好。TDM由加速度响应识别移动荷载识别精度较高,由弯矩响应识别时精度较低,识别结果随响应类型不同差异较大。工况1仅采用弯矩响应识别、噪声水平为1%时,TDM前轴识别误差为50.8%,后轴识别误差为118.0%;TGSVD前轴识别误差为3.5%,后轴识别误差为3.8%。由图2~图4看出,TGSVD识别结果受响应类型不同影响较小。

三种方法识别精度均随响应数量增加而提高,尤其增加加速度响应时,识别精度提高更明显。TDM识别精度随响应组合工况不同差异较大,工况6采用1/4桥跨处弯矩及加速度响应识别移动荷载、噪声水平为1%时,TDM前轴识别误差高达683.2%,后轴识别误差为552.3%。8种工况下TGSVD均能有效识别移动荷载,噪声水平为10%时最大识别误差仅为28.7%。

在车辆前轴下桥与后轴上桥时刻,由系统方程不适应导致该时刻识别误差激增,图2~图4表明TDM在该时刻识别误差较大;TGSVD由于引入正则化矩阵能较好降低系统矩阵的不适应性,在车辆前轴下桥及后轴上桥时刻识别精度有较大提高,但相对车辆在桥面正常行驶区段识别精度仍偏低。

3 结论

针对移动荷载识别系统矩阵病态问题,提出截断GSVD识别方法,经数值仿真研究,结论如下:

(1) TDM识别误差随噪声水平线性增加,TSVD与TGSVD识别精度较高,且引入正则化矩阵加权后TGSVD识别误差受噪声干扰影响较小,鲁棒性较好。

(2) 仅采用弯矩响应识别移动荷载时,TGSVD识别精度较TDM提高明显,TGSVD受响应类型及响应组合变化影响较小。

(3) TGSVD具有的抗噪能力强、识别精度高、识

别结果受响应类型及响应组合影响小等优点,对将TGSVD用于现场移动荷载有重要意义。

(4) TGSVD在车辆前轴下桥及后轴上桥时刻识别精度较TDM有较大提高,但相对车辆在桥面正常行驶区段识别精度仍偏低,尚待深入研究。

参考文献

- [1] 张青霞,段忠东,Lukasz Jankowski,等.基于形函数方法快速识别结构动态荷载的试验验证[J].振动与冲击,2011,30(9):98-102.
ZHANG Qing-xia, DUAN Zhong-dong, Lukasz Jankowski, et al. Experimental validation of a fast dynamic load identification method based on load shape function [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(9): 98-102.
- [2] 尤琼,史治宇.基于区间B样条小波有限元的移动荷载识别[J].工程力学,2011,28(5):35-40.
YOU Qiong, SHI Zhi-yu. Moving force identification based on b-spline wavelet on the interval [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(5): 35-40.
- [3] 王蕾,侯吉林,欧进萍.基于荷载形函数的大跨桥梁结构移动荷载识别[J].计算力学学报,2012,29(2):153-158.
WANG Lei, HOU Ji-lin, OU Jin-ping. Moving force identification based on load shape function for a long-span bridge structure [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(2): 153-158.
- [4] 夏樟华,宗周红,李嘉维,等.基于健康监测系统的长跨度连续刚构桥移动荷载识别[J].中国公路学报,2012,25(5):95-103.
XIA Zhang-hua, ZONG Zhou-hong, LI Jia-wei, et al. Moving load identification of long span continuous rigid frame bridges based on health monitoring system [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(5): 95-103.
- [5] 瞿伟廉,王仪.根据响应识别桥上列车荷载的模糊模式识别方法[J].噪声与振动控制,2010,30(1):86-103.
QU Wei-lian, WANG Yi. Fuzzy pattern recognition technique for moving train loads identification according to bridge responses [J]. Journal of Noise and Vibration Control, 2010, 30(1): 86-103.
- [6] 余岭,陈震.桥梁移动荷载识别的不适应性及其试验研究[J].振动与冲击,2007,26(12):6-9.
YU Ling, CHEN Zhen. Experimental study on ill-conditioning problem in identification of moving vehicle loads on bridges [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(12): 6-9.
- [7] 余岭,朱军华,陈敏中,等.基于矩量法的桥梁移动荷载识别试验研究[J].振动与冲击,2007,26(1):16-20.
YU Ling, ZHU Jun-hua, CHEN Min-zhong, et al. Moving force identification based on method of moments [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(1): 16-20.
- [8] 李忠献,陈锋,王波.基于BP神经网络的桥上移动荷载分阶段识别方法[J].工程力学,2008,25(9):85-92.
LI Zhong-xian, CHEN Feng, WANG Bo. A BP neural network based stage identification method for moving loads on bridges [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(9): 85-92.

表2 各物理量相似度计算值及权重系数

Tab.2 Similarity result and weight coefficient of each physical quantity

	后坐位移	后坐速度	后坐加速度
相似度	0.870 2	0.851 2	0.871 9
权重	0.2	0.3	0.5

4 结 论

(1) 基于 ADAMS/ATV 软件,建立某自行火炮虚拟样机模型,并采用后坐主要动态参数对模型进行验证;结合波形发生器,建立火炮动力后坐试验台虚拟样机模型,获得炮口强冲击条件下后坐位移、速度及加速度仿真曲线。

(2) 通过用所提基于曲线数值相似度与形状相似度的射击模拟准确度评估方法评估表明,火炮动力后坐试验台能较准确模拟火炮实弹射击的动态过程。并获得火炮后坐动力后坐试验台对实弹射击的模拟准确度为 0.865 4。该方法可广泛用于火炮装备试验及验收。

参 考 文 献

[1] 张福三. 火炮定型试验中的理论与实践[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.

[2] 姚养无. 火炮后坐仿真试验系统及其动力学数值仿真[J]. 兵工学报, 2001, 22(2): 152-155.
YAO Yang-wu. Simulation test system of gun recoil and numerical calculations [J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(2):152-155.

[3] Cast M. Army test move to 'virtual proving ground' [J]. National defence, 2001, 11:62-64.

[4] 狄长春, 刘林, 郑坚, 等. 炮口冲击式火炮后坐模拟试验的数值分析[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(3): 323-327.
DI Chang-chun, LIU Lin, ZHENG Jian, et al. Numerical simulation on dynamic recoil test with gun muzzle subjected to high-velocity impact[J]. Explosive and Shock Waves, 2012, 32(3): 323-327.

[5] 李伟, 马吉胜, 李志强, 等. 履带车辆紧急制动动力学仿真分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(7): 179-182.
LI Wei, MA Ji-sheng, LI Zhi-qiang, et al. Dynamic simulation analysis for emergent braking of a tracked vehicle [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(7): 179-182.

[6] 吴大林, 马吉胜, 董自卫. 基于 ADAMS 的自行火炮悬挂装置振动分析[J]. 振动与冲击, 2005, 24(5): 39-41.
WU Da-lin, MA Ji-sheng, DONG Zi-wei. Vibration analysis of suspension system of self-propelled gun based on adams [J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(5): 39-41.

[7] 冯国华. ASQ700 跌落冲击试验机的半正弦跌落冲击试验模型分析[D]. 苏州:苏州大学, 2007.

[8] 周成. 电力系统动态仿真模型及参数有效性评估[D]. 北京:华北电力大学, 2010.

[9] 高松, 贺仁睦, 马进. 电力系统动态仿真误差评定准则研究[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 6-10.
GAO Song, HE Ren-mu, MA Jin. Error criteria on power system dynamic simulation validation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 6-10.

[10] 周成, 贺仁睦, 王吉利, 等. 电力系统元件模型仿真准确度评估[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 12-15.
ZHOU Cheng, HE Ren-mu, WANG Ji-li, et al. Assessment on simulation accuracy of power system component model [J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 12-15.

(上接第 100 页)

[9] 袁向荣, 卜建清, 满红高, 等. 移动荷载识别的函数逼近法[J]. 振动与冲击, 2000, 19(1): 58-60.
YUAN Xiang-rong, BU Jian-qing, MAN Hong-gao, et al. Function approximation in moving force identification [J]. Journal of Vibration and Shock, 2000, 19(1): 58-60.

[10] 余岭, Chan T H T. 桥梁时变移动车载的间接识别[J]. 振动工程学报, 2005, 18(1): 99-102.
YU Ling, Chan T H T. Indirect identification of time-varying moving vehicle loads on bridges [J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(1): 99-102.

[11] Law S S, Chan T H T, Zeng Q H. Moving force identification: a time domain method[J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 201(1): 1-22.

[12] Law S S, Chan T H T, Zeng Q H. Moving force identification: a frequency-time domain method [J]. Journal of Dynamic System, Measure Control, ASME, 1999, 121: 394-401.

[13] Hansen P C. Regularization, GSVD and truncated GSVD[J]. BIT, 1989, 29(3): 491-504.

[14] 刘华林, 杨万麟. 基于 GSVD 的核不相关辨别子空间与雷

达目标识别[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5): 1095-1098.
LIU Hua-lin, YANG Wan-lin. Radar target recognition based on kernel uncorrelated discriminant subspace of GSVD[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(5):1095-1098.

[15] 宋辉, 刘加. 基于广义奇异值分解的通用旁瓣消除算法[J]. 数据采集与处理, 2011, 26(3): 241-246.
SONG Hui, LIU Jia. GSVD-based generalized sidelobe canceller [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2011, 26(3): 241-246.

[16] 黄小为, 吴传生, 李卓球. TSVD 正则化方法的参数选取及数值计算[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2006, 40(2): 154-157.
HUANG Xiao-wei, WU Chuan-sheng, LI Zhuo-qiu. The choice of the TSVD regularization parameter and numerical computation for ill-posed problems [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2006, 40(2): 154-157.