

梁结构上动载荷位置识别的快速算法

张景 张方 姜金辉 蒋祺

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京 210016)

摘要:将简支梁作为研究对象,通过 PATRAN 软件建立梁的有限元模型,仿真计算出梁的位移响应,再利用 MATLAB 编写算法,识别出作用在梁上的动载荷的位置。在最小判别系数法的基础上提出了一种快速算法,该算法通过逐步逼近的方式来识别动载荷的作用位置。与常规方法相比,该快速算法减少了有限单元的划分,所以有效地减少了计算过程并且缩短了计算时间。通过仿真计算,验证了这一快速算法在保证了识别精度和准确性的前提下,缩短了计算时间,为动载荷识别工作带来了便利。

关键词:简支梁;载荷识别;最小判别系数;快速算法

中图分类号: TB123 V214.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 130.2030

Fast method of the identification of dynamic load location on the beam

Zhang Jing Zhang Fang Jiang Jinhui Jiang Qi

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper used a simply supported beam as a study objective, and set up the finite element model of the beam by PATRAN to obtain the simulating displacement response of the beam. The code was written in MATLAB to identify the location of the dynamic load acting on the beam. This paper proposed a fast method based on the minimum discriminate coefficient method, and it identified the the location of the dynamic load by the way of gradually approach. Compared with the common method, this method cut back the calculation process and time by reduce the division of the finite elements. Simulation showed that this fast method reduced the time of calculation with ensuring the accuracy and exactness of the identification, which brought convenience to the work of identifying dynamic loads.

Keywords: simply supported beam; load identification; minimum discriminate coefficient; fast method

1 引言

近年来,随着结构动力学的逐渐发展、研究的不断深入,出现了越来越多的结构振动问题,因此人们对动态载荷识别技术^[1-2]也越来越重视。随着该技术的不断发展和完善,至今为止,已经形成了一些较为成熟的方法,主要有频域法和时域法^[3],另外一些新型的动载荷识别方法如小波分析技术和基于神经网络技术^[4]及遗传算法的识别方法也逐渐发展了起来。例如,1979年,BARTLETT F D和 FLANNELLY W D首次通过动载荷识别理论识别了直升机桨毂中心所受谐波动载荷的幅值和相位。日本东京工业大学的 INOUE H^[5]等人在1996年以梁为研究对象,通过小波分解技术将散射波作时频变换,并且测量不

同频率下弯曲波的传播时间,由此识别冲击载荷的作用位置。德国斯图加特大学的 GAUI 和 HURLEBAUS 等人^[6]应用小波变换技术,测量了弯曲波在不同频率下的到达时间并将其和优化算法相结合,识别了板上冲击载荷的作用位置。周晚林等人^[7]在神经网络结构的基础上,结合逆向分析方法,首次提出了有限元逆向逼近方法,用于载荷位置的识别。姜忠宇、孙建忠等人^[8]测量了板上多个观测点的弯曲挠度,之后基于遗传算法进行了反复计算,最后较为准确地识别出了载荷作用位置。严刚、周丽^[9]提出了一种利用遗传算法的方法,可以很好地识别作用在加筋复合材料结构上冲击载荷的位置和大小。2009年,对于冲击时刻未知并且缺失测量信息的情况,他们成功地提出了一种方法,可以识别出冲击载荷的冲击时刻和冲击位置

收稿日期:2015-11

并且较为精准地重构了冲击载荷的时间历程。在已知载荷数目的情况下,祝德春^[10]提出了最小判别系数法,采集梁上任意两组不同的动响应,通过计算出的当量动载荷在真实载荷作用位置上量值相等的原则,可以准确地识别出简支梁上动载荷的作用位置。

本文在最小判别系数法的基础上提出一种载荷位置识别的快速算法,通过 MATLAB^[11]编写算法减少有限单元的划分,有效地缩短了计算机识别、计算的时间。

2 最小判别系数法

对于一个简支梁,在载荷数目已知的条件下,假设载荷数目为 M ,在梁上选取 L 个测量点 $L \geq M$ 并测得其动响应作为一组响应向量,则根据频域法可以得出一组当量动载荷,为:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_M \end{Bmatrix}_1 = \begin{Bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1M} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{L1} & H_{L2} & \cdots & H_{LM} \end{Bmatrix}_1^{-1} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_L \end{Bmatrix}_1 \quad (1)$$

式中: $\{X\}$ 为响应向量, $\{F\}$ 为当量动载荷向量, $\{H\}$ 为频响函数矩阵。

为了成功建立动载荷位置识别模型,需从梁上选取另外的 L 个测量点并测得其动响应作为一组响应向量,可以得到另一组当量动载荷,为:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_M \end{Bmatrix}_2 = \begin{Bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1M} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{L1} & H_{L2} & \cdots & H_{LM} \end{Bmatrix}_2^{-1} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_L \end{Bmatrix}_2 \quad (2)$$

显然,在不考虑结构对称性影响的情况下,上面两组当量动载荷仅在真实的载荷作用位置上数值才会相等,因此,识别载荷作用位置的问题就可以转换为两个测量点的动态响应在频域下是否满足以下条件:

$$\{\epsilon\} = [H]_1^{-1} \{X\}_1 - [H]_2^{-1} \{X\}_2 \rightarrow \{0\} \quad (3)$$

式中: $\{\epsilon\}$ 即为判别系数,当其最小时所表示的位置即为真实的载荷作用位置。

3 动载荷位置识别的快速算法

通常情况下,都是通过计算机进行动载荷的识别计算,但是对于连续结构,在使用计算机进行编程时,是通过一系列的离散点来表示结构的。对于一个 1 m 的简支梁模型,如果载荷加载在梁上的一个任意位置,例如 $x_a = 0.36759$ m,那么在进行载荷位置的识别计算时,按照常规算法,需要将梁模型划分为 100 000 个等分单元,共有 100 001 个节点需要识别计算,可以看出这个过程是比较繁琐的,同时也是比较浪费时间的。如果梁上作用的动载荷数目不止一个,那么识别计算过程会变得更加复杂,也会花费更多的时间。如图 1 所示为一般算法的流程。

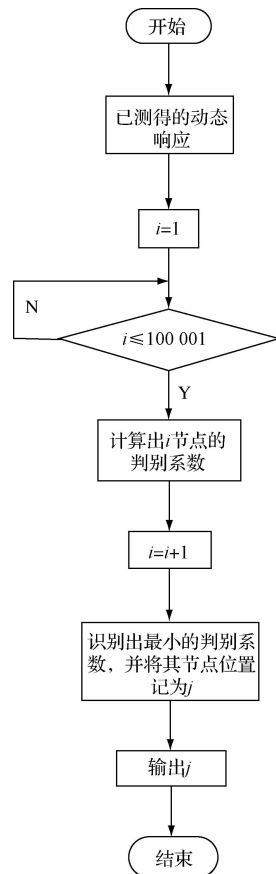


图 1 一般算法流程

为了使动载荷位置识别这一过程变得简单同时节省计算机的计算时间,提出一种载荷识别的快速算法,其原理是:先将结构大致划分为少数的几个单元,识别计算出包含载荷作用位置的那个单元,再将这一单元进一步划分为若干个单元,识别出包含载荷作用位置的单元,之后重复以上的步骤,直至识别出的载荷位置满足规定的精度要求。

同样以一维简支梁为模型,可以先将梁模型划分为 10 个单元,用 1 到 11 按顺序表示各个节点,先识别出包含载荷作用位置的单元,再将这一单元进一步划分为 10 个单元,同样用 1 到 11 按顺序表示各节点,重复以上步骤,就可以逐步逼近真实的载荷加载部位,直至满足精度要求。这一过程可以用图 2 表示。

由图 1 和图 2 可知,对于一个 1 m 的简支梁,若要使识别的载荷位置精确到小数点后的 5 位,那么一般算法要进行 100 001 次循环操作,而快速算法仅需要进行 55 次循环操作。对于更一般的情况,若要精确到小数点后 N 位,那么快速算法需要进行的循环操作次数与一般算法需要进行的操作次数之比为

$$\eta = \frac{11 \times N}{10^N + 1} \quad (4)$$

由此可见利用快速算法进行载荷位置识别可以明显

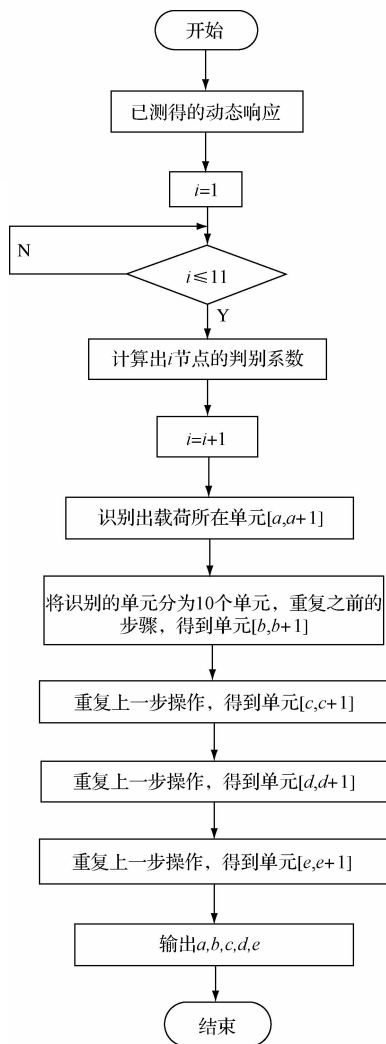


图2 快速算法流程

地缩短计算时间。

4 仿真算例

如图3所示为一简支梁的有限元模型,其中梁的长度为 $L=1\text{ m}$,宽度为 $W=0.02\text{ m}$,高度为 $H=0.03\text{ m}$,弹性模量为 $E=210\text{ GPa}$,泊松比为 $\mu=0.3$,密度为 $\rho=7800\text{ kg/m}^3$ 。

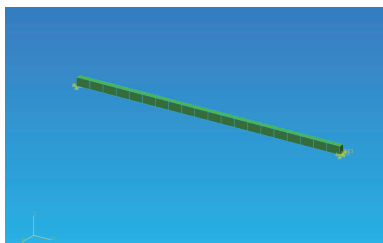


图3 简支梁有限元模型

4.1 单点识别

在 1 m 梁的 $x_a=0.646\text{ m}$ 处施加一个幅值为 100 N 、频率为 10 Hz 的正弦载荷。识别计算时,先将梁模型划分

为10个单元,用1到11按顺序表示各节点,除首尾两个节点外,其他各节点的判别系数如图4所示。

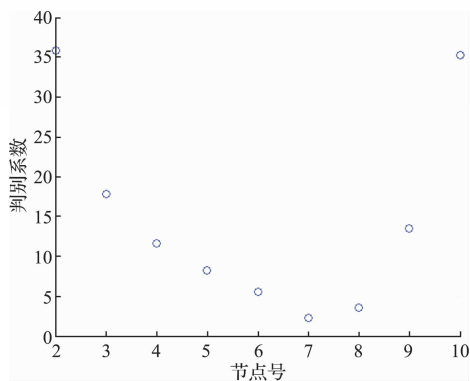


图4 第1次划分单元的判别系数变化节点号

由图4可以看出7号节点和8号节点的判别系数最小,所以载荷的作用位置应该在 $[0.6, 0.7]$ 这一单元内,将这一单元进一步划分为10个单元,同样用1到11按顺序表示各节点,各节点的判别系数如图5所示。

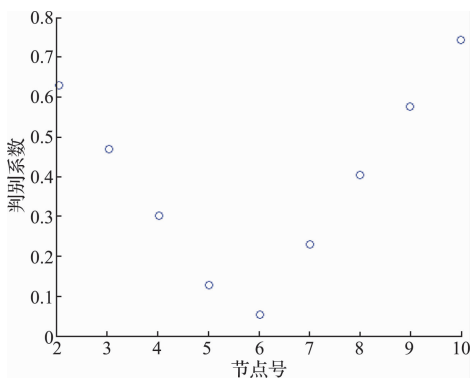


图5 第2次划分单元的判别系数变化

由图5可以看出5号节点和6号节点的判别系数最小,所以载荷的作用位置应该在 $[0.64, 0.65]$ 这一单元内,将这一单元进一步划分为10个单元,同样用1到11按顺序表示各节点,各节点的判别系数如图6所示。

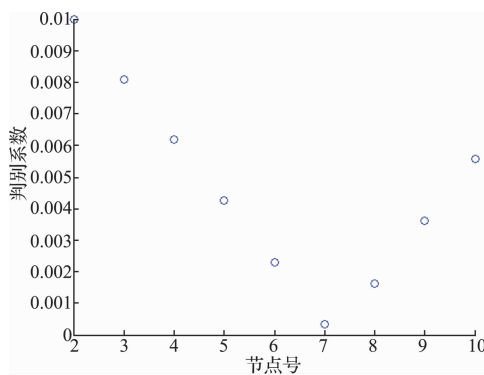


图6 第3次划分单元的判别系数变化

由图6可以看出7号节点的判别系数最小,为

3.3919×10^{-4} ,此节点表示的位置为 $x = 0.646 \text{ m}$,正好是真实的载荷加载部位,识别成功。由此可以看出该快速算法可以准确地识别出梁上的任一载荷位置。

通过该快速算法识别出的载荷作用位置正好是载荷的真实加载位置,并且计算得到的最小判别系数也比较小,所以该快速算法在单点载荷识别中有很高的准确性,另外,在计算过程中进行了3次单元的划分,所以在编程识别计算时,共有33次循环操作,而使用一般算法时,要精确到小数点后3位,需要进行1001次循环操作,由此可以看出该快速算法可以有效地缩短计算时间,并且在实际使用计算机进行识别计算时,快速算法的计算时间明显要少于一般算法。

4.2 多点识别

以两个激励为例,假设在梁上的 $x_a = 0.34 \text{ m}$ 和 $x_b = 0.67 \text{ m}$ 两处分别施加幅值为100 N、频率为10 Hz和幅值为50 N、频率为10 Hz的正弦载荷。

在进行识别计算时,先将梁模型划分为10个单元,用1到11按顺序表示各节点,识别的判别系数变化曲线如图7所示。

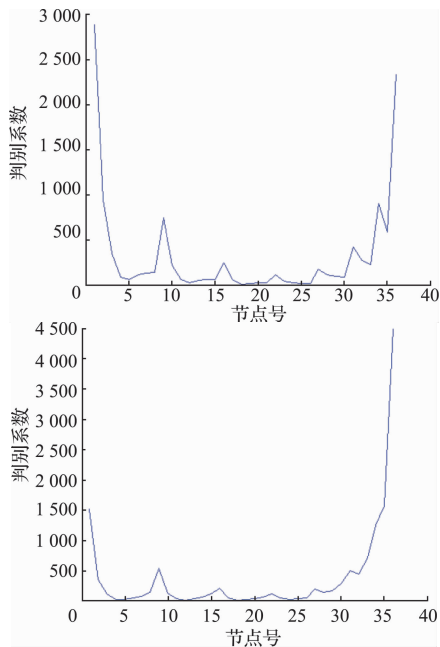


图7 多点第1次划分单元的判别系数变化

最小的判别系数组合为 $[2.7481, 2.3062]$,对应的序号为18,表示的是4号和7号节点,再从图7可以看出18到24之间的波动值最小,而24表示的是5号和8号节点,所以要识别的两个载荷作用位置应该分别在 $[0.3, 0.4]$ 和 $[0.6, 0.7]$ 两个单元内,将这两个单元进一步划分为10个单元,分别用31到41和61到71按顺序表示各节点,识别的判别系数变化曲线如图8所示。

最小的判别系数组合为 $[0.006256, 0.005887]$,对应的序号为76,表示的是37号和70号节点,对应的两个

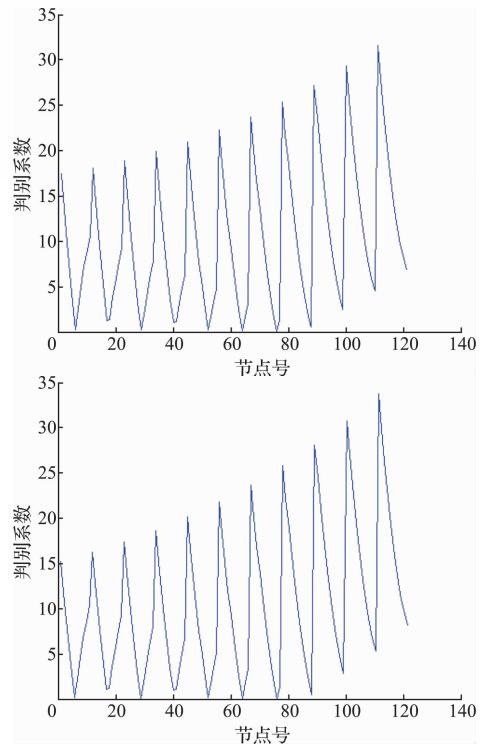


图8 多点第1次划分单元的判别系数变化

位置为 0.36 m 和 0.69 m ,这与真实的载荷作用位置 $x_a = 0.34 \text{ m}$ 和 $x_b = 0.67 \text{ m}$ 较为接近,误差为 0.02 m ,也就是2%,而实际工程中的允许误差范围是5%,所以该算法计算得到的结果满足工程实际的精度要求的。而真实的载荷作用位置对应的节点为35号和68号,由序号52表示,其对应的判别系数组合为 $[0.2369, 0.2077]$,也是比较小的。

通过该快速算法识别出的载荷作用位置较为接近载荷的真实加载位置,而计算得到的真实加载位置的判别系数也比较小,所以该快速算法在多点载荷识别中也有很好的准确性,同样在两点识别过程中,快速算法中的循环操作步骤远少于一般算法,所以该快速算法可以节省大量的计算时间,而这也在实际操作过程中得到了验证。

5 结论

本文在最小判别系数法的基础上提出了一种快速算法,其原理就是先将结构划分为少数几个单元,通过最小判别系数法识别计算出真实的载荷作用位置所在的单元,再将这一单元进一步划分为若干个单元,识别计算出判别系数最小的单元,重复以上操作,就可以逐步逼近真实的载荷作用位置。

与常规算法相比,该快速算法通过逐步提高识别精度,直至计算结果达到所需的精度要求,避免了盲目计算较高的精度,为识别工作带来了很大的便利。

仿真计算的结果证明,该算法得到的结果误差小于5%,满足工程实际的精度要求,所以这一快速算法是可取

的,在可以准确地识别出载荷的作用位置的同时,因为减少了有限单元的划分,所以大大缩短了计算机的计算时间。

参考文献

- [1] 张方,秦远田. 工程结构动载荷识别方法[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
- [2] 殷海涛,姜金辉,张方,等. 分布动载荷识别的并行算法研究[J]. 国外电子测量技术,2012,31(8):21-25.
- [3] 俞一鸣. 时频分析简介及应用[J]. 国外电子测量技术,2015,34(6):12-15.
- [4] 江华丽. 神经网络混合算法的应用研究[J]. 电子测量技术,2014,37(10):59-61.
- [5] INOUE H, KISHIMOTO K, SHIBUYA T. Experimental wavelet analysis of flexural waves in beams[J]. Experimental Mechanics,1996,36(3):212-217.
- [6] GAUL L, HURLEBAUS S. Identification of the impact location on a plate using wavelets[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,1997,12(6):783-795.

- [7] 周晚林,王鑫伟,胡自立. 压电智能结构载荷识别方法的研究[J]. 力学学报,2004,36(4):491-495.
- [8] 姜忠宇,孙建忠,赵常要. 弹性薄板载荷反问题分析[J]. 安徽工程科技学院学报,2006,21(1):61-63.
- [9] 严刚,周丽. 加筋复合材料结构的冲击载荷识别[J]. 航空学报,2008,29(5):1150-1156.
- [10] 祝德春,张方,姜金辉. 动态载荷激励位置识别技术研究[J]. 振动与冲击,2012,31(1):20-23.
- [11] 丁硕,张放,巫庆辉. 基于 MATLAB/ Simulink 的正弦稳态电路建模与仿真[J]. 国外电子测量技术,2015,34(4):68-72.

作者简介

张景,博士研究生,主要研究方向为工程力学。
E-mail:609356721@qq.com.

张方,教授,主要研究方向为工程力学。

姜金辉,副教授,主要研究方向为工程力学。

蒋祺,博士研究生,主要研究方向为工程力学。

(上接第41页)

参考文献

- [1] 丁万霞. 高频无极灯的技术现状与应用研究[J]. 中国西部科技,2010,27(9):18.
- [2] 胡邦南,刘德玉. 汽车 HID 前灯电子镇流器的智能控制方法[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(1):61-67.
- [3] 陈鹏,朱月华,黄如喜. 高频无极灯耦合效率的分析[J]. 南京师范大学学报,2010,10(2):27-29.
- [4] 杨一平,郭玉萍. 高频无极灯高频电源的研究[J]. 照明工程学报,2010,21(1):82-85.
- [5] LEE R, WANG Z. 2.65 MHz self-oscillating electronic ballast with constant-lamp-current control for metal halide lamp [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2007,22(3):839-844.
- [6] 李震. 高频无极灯电源电路分析[D]. 沈阳:东北大学,2010.

- [7] 邵明松,黄松岭,赵伟,等. 2.65 MHz 无极灯电子镇流器的参数优化[J]. 清华大学学报:自然科学版,2011(7):928-932.
- [8] 王博,董威. 高频无极灯谐振电路的建模和仿真分析[J]. 国外电子测量技术,2015,34(5):27-30.
- [9] 刘帅,韦莉,张逸成,等. 耦合电感式新型交错 Boost 软开关变换器研究[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(12):1340-1347.
- [10] 刘喜梅,贺瑞,张鹏. 直流微电网电压平衡器的控制策略[J]. 电子测量技术,2015,38(10):32-35,40.

作者简介

刘冲,1990年7月出生,硕士研究生,主要研究方向为光电测试计量技术及仪器。
E-mail:1138598907@qq.com