

# 基于振动特性的点阵桁架夹心板 损伤检测数值模拟

田淑侠,陈振茂

(西安交通大学 强度与振动教育部重点实验室,西安 710049)

**摘要:**研究了基于振动特性的点阵桁架夹心板损伤识别。首先,通过与已有的结果对比,验证了点阵桁架夹心板有限元模型的正确性。然后,基于此模型对包含不同位置不同程度脱焊损伤的点阵桁架夹心板的固有频率和模态振型进行了计算和比较,分析了脱焊损伤与结构固有频率、模态振型之间的关系。研究结果为进一步进行点阵桁架夹心板脱焊损伤检测奠定了基础。

**关键词:**点阵桁架夹心板;脱焊损伤;固有频率;模态振型

中图分类号: TG115.28 文献标志码:A 文章编号:1000-6656(2009)12-0928-03

## Numerical Simulation on Damage Identification Using Vibration Signals for Lattice Truss Sandwich Plate

TIAN Shu-Xia, CHEN Zhen-Mao

(MOE Key Laboratory for Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** A numerical study for vibration based lattice truss structural damage identification was presented. Firstly, the validity of the numerical model was verified by comparing the calculated results with those of other researchers. Then, based on this model, vibration behaviors were simulated for delamination damages of different locations and different damage degree, and the relationship between delamination damage and natural frequencies and modal shapes was analyzed. The research results laid a foundation for the further study of the delamination damage inspection of lattice truss sandwich plate.

**Keywords:** Lattice truss sandwich plate; Delamination damage; Natural frequencies; Modal shapes

超轻多孔材料实现了结构材料的轻质多功能化,具有高比强、高比刚度、高能量吸收等优点,又具有减振、吸音、隔热、耐疲劳、电磁屏蔽等特性,已成为 21 世纪前沿热点材料。

超轻多孔材料可分为两大类,一是栅格材料,即金属填料夹层结构,二是泡沫材料。其中栅格材料包括柱形夹心、各类桁架夹心和折板夹心等<sup>[1]</sup>。笔者主要研究金字塔型点阵桁架结构。研究表明,这种结构具有超轻和高韧性的特点,且加工简单快

捷<sup>[2]</sup>、形状规则、受力明确,是一种理想的轻质结构材料,具有替代在交通运输(如高速列车、航天航空器、舰船)、机械(如高档数控机)中广泛应用的铝合金、复合材料、轻金属泡沫材料、蜂窝层夹板等的潜力。近几年,剑桥大学、哈佛大学等研究了材料的力学性能<sup>[3-6]</sup>。

点阵桁架夹心板是点阵桁架结构中的一种,是由两块面板和中间的夹层组成,面板与夹层采用焊接连接,脱焊损伤是点阵桁架结构存在的最大问题。因此,在制备和服役过程中,点阵桁架结构的无损检测(NDT)对结构的安全评定具有十分重要的意义。

一般而言,振动损伤检测方法可分为四个层次,即结构损伤辨识、结构损伤定位、结构损伤程度标定和结构剩余寿命估计。目前,尚无一种有效的方法同时实现四类损伤评估,同时也缺乏点阵桁架结构

收稿日期:2009-08-01

基金项目:国家 973 资助项目(2006CB601206,2007CB707702);自然科学基金资助项目(50677049);教育部新世纪人才资助项目

作者简介:田淑侠(1984—),博士研究生,研究方向为结构动力损伤检测。

损伤评定的有效方法。通过运用有限元软件 ANSYS, 对完好点阵桁架夹心板及其存在脱焊损伤时的状态进行了数值模拟, 通过模态分析结果分析了结构存在脱焊损伤时固有频率和模态振型的变化特点。

## 1 数值计算模型

选用面板尺寸为  $400 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ , 中间夹层胞元几何尺寸如图 1 的金字塔型点阵桁架结构, 其三维离散有限元计算模型如图 2 所示。在有限元软件 ANSYS 中, 面板采用 4 节点正方形壳单元 (Shell63), 桁架杆采用 2 节点欧拉-伯努力梁单元 (Beam4), 然后组装成桁架芯体三明治板; 材料为 304 号不锈钢 (弹性模量  $E=193 \text{ MPa}$ , 泊松比  $\mu=0.3$ , 密度  $\rho=8000 \text{ kg/m}^3$ )。约束条件为上下面板一端固支、另一端自由的悬臂形式<sup>[7]</sup>。

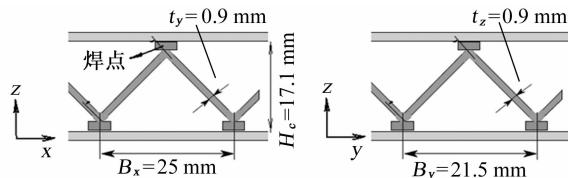


图 1 中间夹层胞元几何尺寸



图 2 金字塔型点阵夹层结构三维离散有限元计算模型

李斌潮等<sup>[8]</sup>针对这一模型, 引入了均一化等效理论, 通过 3D 离散有限元计算以及实验模态分析, 验证了该理论对结构动态响应性能预测的可行性与正确性, 给出了其 3D 离散有限元计算和实验模态分析的频率结果。为了验证设计模型的准确性, 利用 ANSYS 对其进行模态分析, 得出其前 10 阶固有频率, 并与前者进行了比较, 如表 1。

表 1 金字塔型点阵夹层结构模型固有频率比较

阶数	3D 有限元计算频率/Hz		ANSYS 模态分析计算频率/Hz		阶数	3D 有限元计算频率/Hz		ANSYS 模态分析计算频率/Hz			
	频率/Hz	频率/Hz	频率/Hz	频率/Hz		频率/Hz	频率/Hz	频率/Hz	频率/Hz		
1	135	133.82	5	1 315	1 135.3	6	1 419	1 347.5	8	1 729	1 626.1
3	480	447.41									
4	575	556.55									

第 2,7 阶模态是板的面内振动, 考虑到实际试验仅测量面外振动, 因此表 1 中除去了结构第 2,7 阶模态的固有频率。由表 1 可以看出两个结果相差不大, 从而验证了此模型的正确性。

## 2 损伤影响分析

点阵桁架结构脱焊损伤引起结构物理特征参数 (刚度、质量和阻尼) 的变化, 从而引起结构模态参数 (固有频率、模态振型和模态阻尼) 的变化。点阵桁架夹心板损伤主要是由服役过程中焊接部分应力集中引起脱粘造成的, 笔者主要研究这种焊部损伤与结构固有频率和模态振型变化之间的关系。

假设图 3 中 1 点处脱焊, 则表现为与 1 点相连的四根梁损伤, 所用四根梁的弹性模量降低到 0 来近似这种脱焊损伤, 各种损伤位置如图 4 所示 (箭头所指处)。

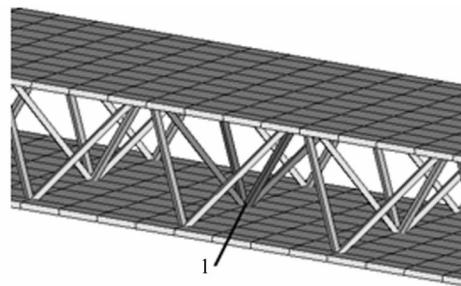


图 3 损伤形式

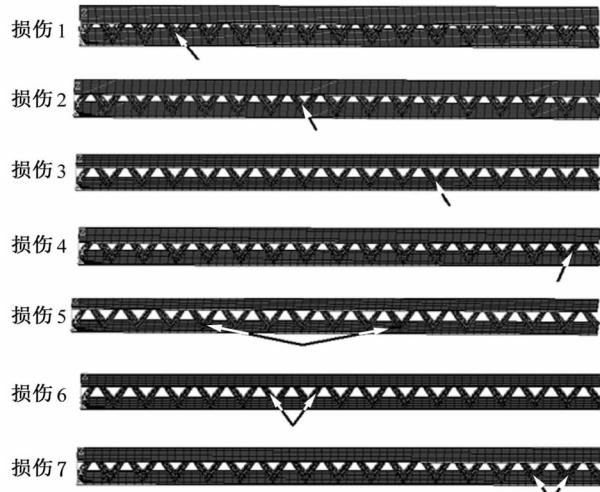


图 4 损伤位置

### 2.1 损伤对固有频率的影响

对模型采取左端固支, 右端自由的悬臂形式进行模态分析, 得出其前 20 阶固有频率。无损和各种损伤模型的前 20 阶固有频率比较如图 5。

由图 5 可以看出, 结构发生脱焊损伤后, 由于局

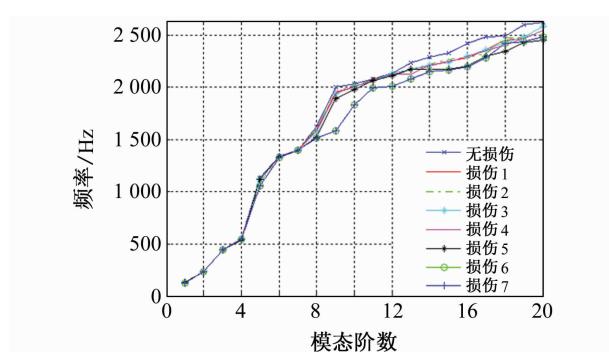


图 5 损伤模型固有频率比较

部刚度的降低,引起整体刚度下降,从而引起结构各阶固有频率下降。损伤程度越高,频率降低得越多。其中高阶固有频率比低阶固有频率下降较为明显,因而更易于进行损伤识别。因此在基于固有频率进

行损伤检测时,高阶频率更能反映损伤程度。

## 2.2 损伤对模态振型的影响

考虑到实际试验,模态振型结果只保留面外振动结果。比较损伤与无损模型各阶模态振型结果知,前几阶模态振型对损伤不敏感,高阶相对比较明显,取第 5,8,9 阶模态振型比较如图 6。

由图 6 可知,当结构包含一个脱焊点或两脱焊点不连续时,结构前 10 阶整体模态振型不变,但在损伤处有局部变化,可通过模态振型看出。当两脱焊点连续时(图 4 中损伤 6 和 7),图 6 可见,损伤 6 的前几阶整体模态振型不变,但第 8,9 阶开始出现局部模态;图 7 可见,损伤 7 从第 8 阶开始出现局部模态。同时,由图 5 可以看出,当出现局部模态时,损伤 6 和 7 在第 8,9,10 阶固有频率急剧下降。

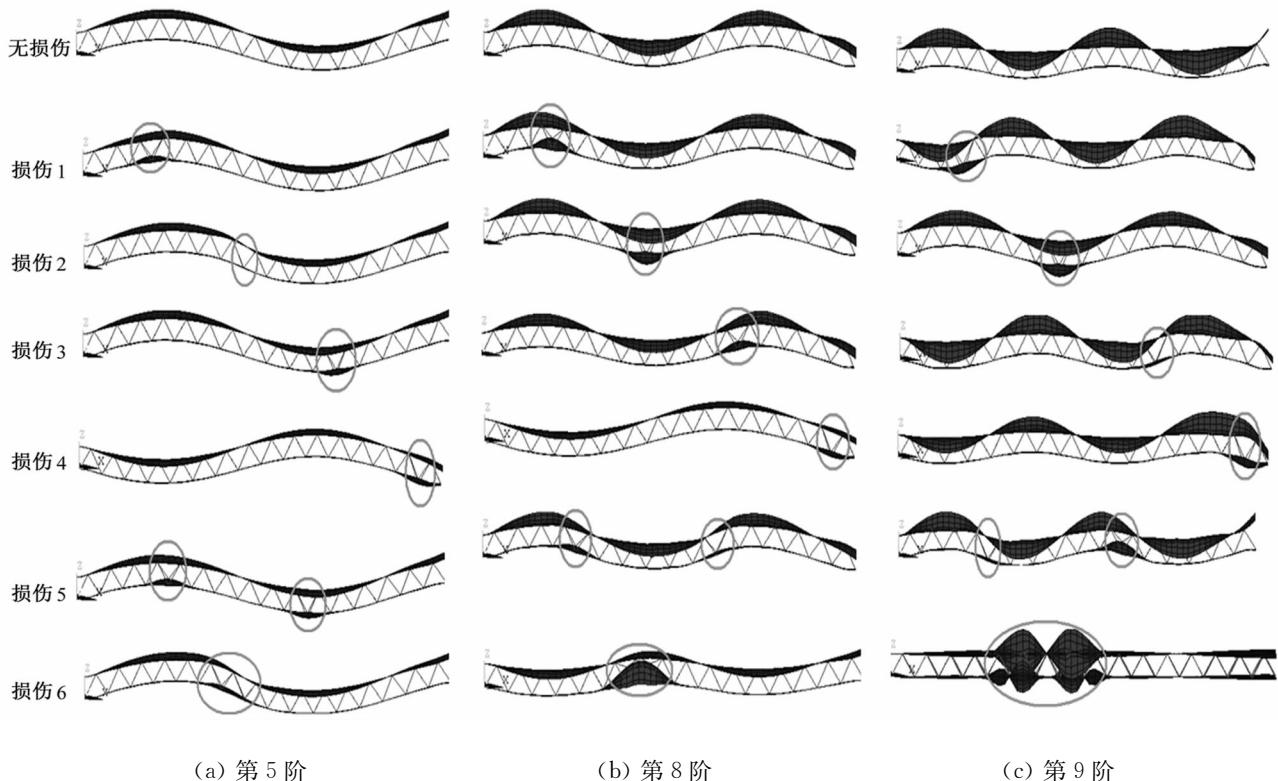
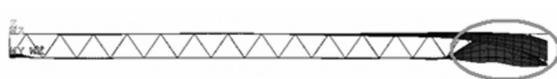


图 6 无损与有损模型第 5,8,9 阶模态振型比较



(a) 8 阶局部模态



(b) 10 阶局部模态

图 7 损伤 7 局部模态振型

由此可推理,包含脱焊损伤时结构模态振型的变化不仅与其损伤程度有关系,与其位置也有很大关系;同时,当出现更多损伤时,模态振型出现局部模态的阶数将提前。

## 3 结论

(1) 包含脱焊损伤时,结构固有频率下降,且损伤程度愈高,频率下降速度愈快。

(下转第 936 页)

表 8 钢管提离试验数据

规格/mm	提离高度/mm																			
	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	110	120	128	136	146	154
20G $\phi 325 \times 10$	102	100	100	99	99	100	100	102	104	105	108	111	114	—	—	—	—	—	—	—
20G $\phi 219 \times 10$	102	101	99	98	98	98	100	100	102	103	105	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20G $\phi 133 \times 10$	103	100	99	98	98	99	100	101	102	103	106	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20 号 $\phi 89 \times 4$	119	111	106	101	99	99	100	101	101	102	103	102	102	103	101	101	—	—	—	—
20 号 $\phi 57 \times 3.5$	127	118	108	102	100	100	100	100	100	102	101	102	100	98	99	—	—	—	—	—
X70 $\phi 810 \times 25$	108	106	104	103	102	101	100	100	99	99	99	99	99	99	100	100	102	102	104	—

表 9 钢管提离试验关系

材料	规格/mm	基准提离/mm	误差区间	误差关系
	$\phi 325 \times 10$	48	[48, 96]	$\Delta = 0.0026t^2 + 0.1607t + 0.2619$
20G	$\phi 219 \times 10$	48	[48, 80]	$\Delta = 0.0033t^2 + 0.0554t - 0.1714$
	$\phi 133 \times 10$	48	[48, 80]	$\Delta = 0.0045t^2 + 0.0321t + 0.1714$
20 号	$\phi 89 \times 4$	48	[0, 48]	$\Delta = 0.0141t^2 + 0.2946t + 0.4524$
	$\phi 57 \times 3.5$	48	[0, 48]	$\Delta = 0.0192t^2 + 0.3616t + 0.5952$
X70	$\phi 810 \times 25$	48	[0, 48]	$\Delta = 0.0019t^2 - 0.0714t + 0.1667$

## 5 结论

对于 16MnR 钢板而言, 在一定范围内的提离对检测结果影响不大; 与减小提离相比, 增加提离对检测结果影响相对较小; 在基准提离以下范围内补偿曲线为线性函数, 且系数同板厚大致成正比。

不同材料的钢管具有不同的误差补偿关系; 同

(上接第 930 页)

(2) 包含脱焊损伤时, 根据其损伤程度, 结构前几阶模态整体振型不变, 但损伤处有局部变化, 当损伤达到一定程度时, 将较早出现局部模态。

(3) 结构模态振型的变化及其局部模态的出现不仅与损伤程度有关, 与其位置也有关。

(4) 当结构出现局部模态时, 在频率图中可见, 相应的频率会急剧下降。

## 参考文献:

- 王展光, 单建, 何德坪. 金字塔栅格夹心夹层板动力响应分析[J]. 力学季刊, 2006, 27(4): 707—713.
- Gregory W Kooistra, Wadley Haydn N G. Lattice-truss structures from expanded metal sheet[J]. Materials and Design, 2007, 28(2): 507—514.
- Liu J S, Lu T J, Torquato S. Simulated properties of

种材料不同规格的钢管具有不同的误差补偿关系; 材料不同误差区间也不同; 钢管的误差补偿函数是一个与基准提离差值  $t$  (即  $LO - LO_r$ ) 有关系的二次函数; 二次补偿函数的二次系数与钢管的管径有关, 管径越大, 曲率越小, 二次系数也越小。当曲率接近零时, 补偿函数为线性函数, 即为金属板的误差补偿函数。

## 参考文献:

- 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- 任吉林, 林俊明, 高春法. 电磁检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- Sophian A, Tian G Y, Talyor D, et al. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulse eddy current NDT[J]. NDT & E International, 2003, 36(1): 37—41.
- Kagome and tetragonal truss core panels[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, (41): 619—635.
- Wicks N, Hutchinson J W. Mechanical behavior of a three-dimensional truss material [J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, (41): 5105—5124.
- Valdevit L, Hutchinson J W, Evans A G. Structurally optimized sandwich panels with prismatic cores[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, (41): 619—635.
- Sugimura Y. Mechanical response of single-layer tetrahedral trusses under shear loading[J]. Mechanics of Materials, 2004, (36): 715—721.
- 李斌潮, 张钱城, 卢健健. 基于实验模态分析的点阵夹层结构动态性能预测[J]. 固体力学学报, 2008, 29(4): 373—278.