

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.010



# 空间网架结构损伤程度识别的数值模拟与 试验研究

殷志祥, 王伟明, 焦东

(辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:**空间网架杆件的损伤程度识别是网架结构健康检测中十分重要的环节,对网架结构的安全性和适用性起到决定性作用。在定位损伤杆件的前提下,通过模型试验和数值模拟手段,提出应用瞬态响应动力分析方法对四角锥网架杆件进行损伤程度识别,获得不同损伤程度杆件两端节点的位移-时间历程曲线,应用 Matlab 对该曲线进行拟合分析。结果表明:在不同损伤工况下,损伤杆件两端节点的位移-时间历程曲线可以近似拟合成直线,通过对该直线的斜率与杆件损伤程度的分析,分别得到上弦杆件、腹杆、下弦杆件两端节点的位移-时间历程直线的斜率值与杆件损伤程度的关系式,通过该关系式可以较准确的识别出四角锥网架杆件的损伤程度。

**关键词:**网架结构;损伤程度;时间历程;曲线拟合

**中图分类号:**TU356 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)06-0078-07

## Experiment and simulation analysis of damage of space truss

Yin Zhixiang, Wang Weiming, Jiao Dong

(School of Civil Engineering and Architecture, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, P. R. China)

**Abstract:** The damage extents identification of members in space truss is an important part in health detection of space trusses. It plays a decisive role for the safety and applicability of truss structure. Based on the location of members damage, through experiment and simulation method, the analysis method of use transient dynamic response for the study about the damage extents identification of members in four pyramid space truss is put forward. The displacement-time history curve is educed about the different damage extents of members' node, and the curve-fitting analysis is made using Matlab. It shows that the displacement-time history curve of members' node can approximate synthesis of linear in different damage extents. Through the analysis abut slope of the line and the damage extents of members, it can educe the relation about the slope value, displacement-time history curve about top chord, bottom chord, wed member both ends of the node, and the damage extents of members. It can accurately identified the damage extents of four pyramid space truss members by the relation, which can be referenced in the damage extents identification of members in truss structure of practical engineering projects.

**Keywords:** space truss structures; the damage extents; time history; curve fitting

**收稿日期:**2017-03-28

**基金项目:**国家自然科学基金(U1261122)

**作者简介:**殷志祥(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事大跨度空间结构研究,(E-mail)Lntuyzx@163.com。

**Received:**2017-03-28

**Foundation item:**National Natural Science Foundation of China(No. U1261122)

**Author brief:**Yin Zhixiang (1962-), professor, doctoral supervisor, main research interests:long-span spatial structure, (E-mail) Lntuyzx@163.com.

由于网架结构受初始缺陷、荷载、环境的共同作用,导致网架结构在服役过程中往往会产生不同程度的损伤,甚至会导致网架结构突然倒塌<sup>[1]</sup>。目前,使用中的许多网架结构也急待采用有效的检测方法来评定其损伤程度<sup>[2-11]</sup>。损伤程度识别是健康检测中的最后一步,决定着网架结构的使用年限和安全程度,对人们的生命财产安全极为重要。宋玉等<sup>[12]</sup>对空间网架进行了数值模拟,验证了基于模态应变能与神经网络方法对空间钢结构网架损伤识别的有效性;伍雪南等<sup>[13]</sup>把悬索桥吊索的振动频率数据当做张力指标对悬索桥吊索进行了损伤程度的评估;Seyedpoor等<sup>[14]</sup>提出应用损伤概率指数(FBDPI)和微分进化算法(DEA)相结合的方法对网架结构的损伤程度进行识别。目前对于损伤程度识别的研究大多以桥梁为主,研究方式多以数值模拟为主,试验研究较少。笔者在定位损伤杆件的前提下,通过模型试验和数值模拟相结合的手段,提出应用瞬态响应动力分析方法对四角锥网架杆件进行损伤程度识别。

## 1 瞬态响应动力分析基本原理

瞬态响应动力分析也叫时间历程分析<sup>[15]</sup>,通用的方法包括逐步积分法与阵型叠加法。逐步积分法是把任意时刻 $t$ 都必须满足运动方程的位移矢量,用只需要在离散时间点满足动力学方程的时刻来代替。但需要在一定时间间隔内,对位移、速度和加速度的关系采用相应的某种假设,从而,根据初始的条件对响应点的值进行依次求解。振动叠加法则需要把振型矩阵作为变换矩阵,把振动方程组进行简化处理,即把原来相互耦合的多自由度系统振动方程组转化为等数量且相互独立的单自由度振动方程进行单独求解,然后把各阶模态解进行叠加求和,得到结构最终的瞬态响应。笔者通过振动叠加法先求解出一个典型脉冲输入的响应,在利用叠加原理,把相应函数 $F(t)$ 的响应求解出来。

设在初始 $t_0=0$ 时刻,有一单位冲量作用于系统,结构的动力学方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 1 \cdot \delta(t) \quad (1)$$

设结构在激励作用前的初始条件为

$$x(t_0) = 0, \dot{x}(t_0) = 0 \quad (2)$$

在单位脉冲作用到结构上时,质点将获得的速度的大小为 $\frac{1}{m}$ ,由于时间极短,位移来不及变化,此时,问题就相当于在初始激励下的求解响应问题。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

$$\dot{x}(t_0) = 0 \quad (3)$$

$$x(t_0) = 0$$

求解方程组(3)得

$$x(t) = \frac{1}{m\omega_d} e^{-\omega_n t} \sin \omega_d t \quad (4)$$

式中: $\omega_d$ 为结构有阻尼时的振动频率; $\omega_n$ 为结构无阻尼时的振动频率。

当结构受到单位脉冲且其初始条件为零时的响应为式(4)。一般对于发生在 $t=\tau$ 时刻的单位脉冲,其响应一般会有滞后一个相位的情况,即相当于

$$x(t-\tau) = \frac{1}{m\omega_d} e^{-\omega_n(t-\tau)} \sin \omega_d(t-\tau) \quad (5)$$

由线性结构叠加原理可得到,该结构在任意激励 $F(t)$ 作用下结构的瞬时总响应

$$x(t) = \int_0^t F(\tau) \times (t-\tau) d\tau = \frac{1}{m\omega_d} \int_0^t F(\tau) e^{-\omega_n(t-\tau)} \sin \omega_d(t-\tau) d\tau \quad (6)$$

## 2 模型试验研究

### 2.1 四角锥网架实体模型

根据现有试验场地与《空间网格结构技术规程》<sup>[16]</sup>中的相关规定,在实验室制作了一个两向正交正放四角锥网架模型。该网架设计尺寸为700 mm×500 mm×130 mm,上弦横向4个网格,下弦横向3个网格。其中,网架由32个节点,96个杆件组成,上弦、下弦杆件长度均为123 mm,斜腹杆件长为150 mm。球节点采用焊接球节点,杆件均采用 $\phi 12$  mm×1 mm的空心杆。上弦焊接球节点采用 $\phi 40$  mm的实心铁球,下弦焊接球节点采用 $\phi 38$  mm的实心铁球。该网架模型的杆件、节点焊接球均采用钢材Q235,其规格参数为:密度 $\rho=7800$  kN/m<sup>2</sup>;弹性模量为 $2 \times 10^{11}$  Pa;泊松比为0.3;四角锥网架实体模型如图1所示。

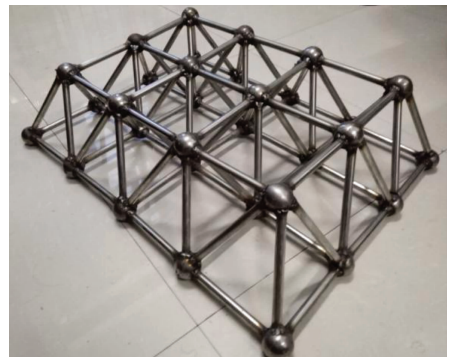


图1 四角锥网架实体模型

Fig. 1 Four pyramid space truss physical model

## 2.2 试验目的及杆件损伤工况

试验在定位损伤杆件的前提下,证明瞬态动力响应分析方法对空间网架杆件损伤程度识别具有可行性。杆件的损伤程度通过改变杆件的管径大小来实现,网架实体模型无损伤时杆件尺寸为 $\phi 12\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ ,当该杆件发生损伤时,损伤杆件用 $\phi 10\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 、 $\phi 8\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 、 $\phi 6\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的面积损伤率来确定杆件的损伤程度。损伤杆件采用相应的杆件来替代。替代杆件的截面尺寸及相对原杆件的损伤程度见表 1。

表 1 替代杆件与损伤程度的关系

Table 1 Alternative members relationship with the damage degree

杆件尺寸	损伤程度/%
$\phi 12\text{ mm}\times 1\text{ mm}$	0
$\phi 10\text{ mm}\times 1\text{ mm}$	18
$\phi 8\text{ mm}\times 1\text{ mm}$	36
$\phi 6\text{ mm}\times 1\text{ mm}$	54
$\phi 0\text{ mm}\times 0\text{ mm}$	100

由于是在定位损伤杆件的前提下对杆件进行损伤程度识别,故多杆同时损伤工况的损伤程度识别即可以分解为对每一个单杆损伤工况进行损伤程度识别。根据网架结构的特点,试验共设计 15 种损伤工况,网架结构损伤工况用编号  $GK_i$  表示。网架结构损伤工况编号和损伤替换杆件如表 2 所示。

表 2 网架损伤工况与损伤杆件信息

Table 2 Truss structures damage cases and damage members information

工况	损伤杆件及节点编号	损伤程度/%	替换杆件规格
GK1	24 单元(10,11)	0	$\phi 12\text{ mm}\times 1\text{ mm}$
上弦杆	GK2 24 单元(10,11)	18	$\phi 10\text{ mm}\times 1\text{ mm}$
单杆损伤	GK3 24 单元(10,11)	36	$\phi 8\text{ mm}\times 1\text{ mm}$
	GK4 24 单元(10,11)	54	$\phi 6\text{ mm}\times 1\text{ mm}$
	GK5 24 单元(10,11)	100	$\phi 0\text{ mm}\times 0\text{ mm}$
	GK6 77 单元(10,25)	0	$\phi 12\text{ mm}\times 1\text{ mm}$
腹杆单杆损伤	GK7 77 单元(10,25)	18	$\phi 10\text{ mm}\times 1\text{ mm}$
	GK8 77 单元(10,25)	36	$\phi 8\text{ mm}\times 1\text{ mm}$
	GK9 77 单元(10,25)	54	$\phi 6\text{ mm}\times 1\text{ mm}$
	GK10 77 单元(10,25)	100	$\phi 0\text{ mm}\times 0\text{ mm}$
	GK11 43 单元(24,25)	0	$\phi 12\text{ mm}\times 1\text{ mm}$
下弦杆	GK12 43 单元(24,25)	18	$\phi 10\text{ mm}\times 1\text{ mm}$
单杆损伤	GK13 43 单元(24,25)	36	$\phi 8\text{ mm}\times 1\text{ mm}$
	GK14 43 单元(24,25)	54	$\phi 6\text{ mm}\times 1\text{ mm}$
	GK15 43 单元(24,25)	100	$\phi 0\text{ mm}\times 0\text{ mm}$

根据表 2 中网架损伤工况进行试验,网架加载试验如图 2 所示。以上弦单杆损伤程度识别试验过程为例(如图 3 所示)进行试验过程说明。在 GK1 下,用压力机对网架 10 号节点施加 5 kN 的竖向压力,通过百分表读取 10、11 号节点的竖向位移,重复 3 次,求得 10、11 号节点竖向位移的平均值,并记为 10、11 号节点在 5 kN 竖向压力作用下的竖向位移。再对网架 10 号节点施加 7.5 kN 的竖向压力,重复 3 次,求得 10、11 号节点竖向位移的平均值,并记为 10、11 号节点在 7.5 kN 竖向压力作用下的竖向位移。再对网架 10 号节点施加 10 kN 的竖向压力,重复 3 次,求得 10、11 号节点竖向位移的平均值,并记为 10、11 号节点在 10 kN 竖向压力作用下的竖向位移。以此类推,给网架 10 号节点施加以 2.5 kN 为增量梯度的竖向压力,一直到给网架 10 号节点施加的竖向压力达到 35 kN 为止。通过给网架 10 号节点施加 13 次竖向压力的试验来模拟网架结构的瞬态响应动力分析。重复 GK1 的试验过程完成 GK2~GK5 的试验。在 GK1 下,上弦 24 单元杆件两端节点试验数据如表 3 所示。



图 2 网架加载试验

Fig. 2 Experiment of the truss structures



图 3 上弦杆件损伤程度识别试验

Fig. 3 Top chord members damage degree identification test

表 3 杆件两端节点位移-时间历程曲线试验数据

Table 3 Both ends of the members node displacement time history curve of the test data

时间/s	10 节点位移/mm	11 节点位移/mm
0.24	-0.52	-0.23
0.48	-0.58	-0.25
0.72	-0.64	-0.27
0.96	-0.70	-0.29
1.20	-0.75	-0.31
1.44	-0.80	-0.33
1.68	-0.86	-0.35
1.92	-0.92	-0.37
2.16	-0.97	-0.39
2.40	-1.02	-0.42
2.64	-1.08	-0.43
2.88	-1.14	-0.46
3.12	-1.17	-0.47

应用 MATLAB 对表 3 中数据进行拟合分析,得到 GK1 下,节点 10、11 的位移-时间历程直线式分别为  $y = -0.232 0x - 0.47$  和  $y = -0.085 2x - 0.21$ 。记下 10、11 节点拟合得到的一次函数的斜率  $k$  值大小。其它损伤工况的试验过程与之类似。

### 3 数值模拟分析

#### 3.1 四角锥网架有限元模型

采用有限元软件 ANSYS 对网架进行建模,其中,杆件采用 link8 单元,通过改变材料的刚度实现杆件不同程度的损伤。网架无损伤时的有限元模型如图 4 所示。

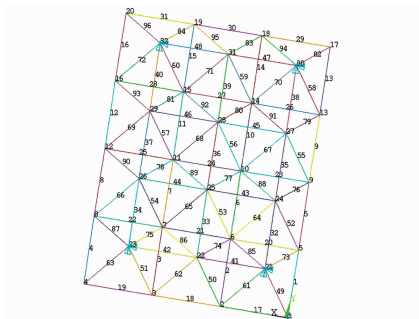


图 4 四角锥网架有限元模型

Fig. 4 Four pyramid space truss finite element model

#### 3.2 模拟过程

模拟过程中,根据表 2 中网架杆件的损伤工况进行模拟分析。以 GK1 为例对网架的瞬态动力分析过程进行描述。首先,用 APDL 语言建立 GK1 时

的网架有限元模型,分析类型选择 Transient(瞬态动力分析),分析方法选择 Full(完全法);然后,以表格的形式给 10 号节点施加  $-5$ 、 $-7.5$ 、 $\dots$ 、 $-35$  kN 荷载,且与  $0.24$ 、 $0.48$ 、 $\dots$ 、 $3.12$  s 一一对应。再进行求解选项的设置,在 analysis options 选项中选择 small Displacement Transient,在 Time control 中的 Time at end of loadstep 中输入  $3.12$  并选择 Number of substeps,在 Number of substeps 中输入  $13$ ,其它控制输入选项都选为全部结果输出,在 Full Transient Options 中选择 Transient effectsh 和 Ramped loading。最后通过 Solution  $\rightarrow$  solve  $\rightarrow$  current LS 完成求解。

应用时间历程后处理(POST26)得到节点 10、11 的  $z$  方向的位移-时间历程曲线图,并保存节点 10、11 的位移-时间历程曲线图的数据(如表 4 所示)。

表 4 杆件两端节点位移-时间历程曲线模拟数据

Table 4 Both ends of the members node displacement time history curve of the simulation data

时间/s	10 节点位移/mm	11 节点位移/mm
0.24	-0.171 21	-0.062 46
0.48	-0.226 73	-0.082 71
0.72	-0.282 24	-0.102 97
0.96	-0.337 72	-0.123 22
1.20	-0.393 26	-0.143 48
1.44	-0.448 77	-0.163 70
1.68	-0.504 82	-0.184 00
1.92	-0.559 80	-0.204 25
2.16	-0.615 31	-0.224 50
2.40	-0.670 82	-0.244 76
2.64	-0.726 33	-0.265 01
2.88	-0.781 84	-0.285 27
3.12	-0.836 61	-0.322 40

应用 Matlab 曲线拟合功能对表 4 中数据进行拟合分析,得到 GK1 下,节点 10、11 的位移-时间历程直线式分别为  $y = -0.231 3x - 0.115 7$  和  $y = -0.084 4x - 0.042 2$ 。记下 10、11 节点拟合得到的一次函数的斜率  $k$  值大小,重复 GK1 的模拟过程完成 GK2~GK5 的模拟。其他损伤工况的模拟分析过程与之类似。

## 4 试验及模拟结果分析

通过对四角锥网架单杆损伤的模型试验与数值



模拟研究发现,当单杆发生不同程度的损伤时,对其两端节点位移-时间历程曲线进行拟合得到的一次

函数式的斜率  $k$  值会有不同。具体  $k$  值大小与杆件损伤程度、杆件位置关系如表 5 所示。

表 5 模型试验及数值模拟结果

Table 5 The model test and numerical simulation results

节点	统计值	斜率 $k$ 值				
		损伤程度 0	损伤程度 18%	损伤程度 36%	损伤程度 54%	损伤程度 100%
上弦 24 单元 10 节点(受力 节点)	试验结果	-0.232 0	-0.443 1	-0.444 8	-0.447 4	-0.457 3
	模拟结果	-0.231 3	-0.442 5	-0.443 9	-0.446 5	-0.456 5
	差值	-0.000 7	-0.000 6	-0.009	-0.000 9	-0.000 8
上弦 24 单元 11 节点(不受 力节点)	试验结果	-0.085 2	-0.162 1	-0.163 6	-0.166 8	-0.176 2
	模拟结果	-0.084 4	-0.161 4	-0.162 8	-0.165 4	-0.175 4
	差值	-0.000 8	-0.000 7	-0.000 8	-0.001 4	-0.000 8
腹杆 77 单元 10 节点(受力 节点)	试验结果	-0.232 0	-0.442 2	-0.469 1	-0.508 2	-0.596 3
	模拟结果	-0.231 3	-0.441 6	-0.468 5	-0.507 5	-0.595 8
	差值	-0.000 7	-0.000 8	-0.000 6	-0.000 7	-0.000 5
腹杆 77 单元 25 节点(不受 力节点)	试验结果	-0.120 9	-0.231 4	-0.201 5	-0.159 8	-0.064 0
	模拟结果	-0.120 1	-0.230 8	-0.202 1	-0.160 5	-0.065 4
	差值	-0.000 8	-0.000 6	0.000 6	0.000 7	0.001 4
下弦 43 单元 25 节点(受力 节点)	试验结果	-0.207 2	-0.396 0	-0.399 1	-0.412 0	-0.422 1
	模拟结果	-0.206 7	-0.395 3	-0.398 5	-0.411 2	-0.421 5
	差值	-0.000 5	-0.000 7	-0.000 6	-0.000 8	-0.000 6
下弦 43 单元 24 节点(不受 力节点)	试验结果	-0.083 1	-0.158 1	-0.157 3	-0.1570	-0.156 7
	模拟结果	-0.082 3	-0.157 6	-0.157 5	-0.157 4	-0.157 2
	差值	-0.000 8	-0.000 5	0.000 2	0.000 4	0.000 5

注:差值=试验结果-模拟结果

对模型试验结果和数值模拟结果分析发现,对上弦单杆、斜腹单杆、下弦单杆两端节点的位移-时间历程拟合直线的斜率  $k$  值近似相同,而且斜率  $k$  随着杆件损伤程度发生变化的趋势也相同。以上弦 24 单元两端节点(10 节点、11 节点)为例,对其 GK1~GK5 的试验结果与模拟结果进行节点的位移-时间历程拟合直线绘制如图 5~图 9 所示。

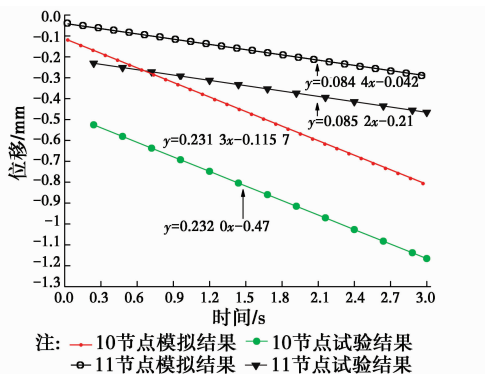


图 5 上弦 24 单元 GK1 两端节点的位移-时间历程拟合直线  
Fig. 5 Top chord 24 element of the node displacement time history straight line of the simulation data under GK1

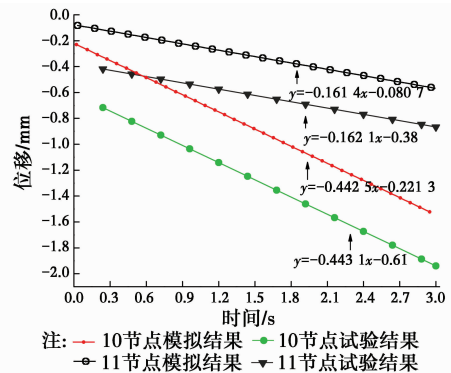


图 6 上弦 24 单元 GK2 两端节点的位移-时间历程拟合直线  
Fig. 6 Top chord 24 element of the node displacement time history straight line of the simulation data under GK2

根据表 5 中的试验结果得出,上弦杆件、斜腹杆件、下弦杆件损伤程度  $x$  与损伤杆件两端节点的位移-时间历程拟合直线斜率  $k$  值的关系式依次如下,其中,  $x$  取值均属于  $(0, 1)$ 。

施加外荷载节点:  $k = -1.883x^3 + 3.221x^2 - 1.559x - 0.2371$ ;

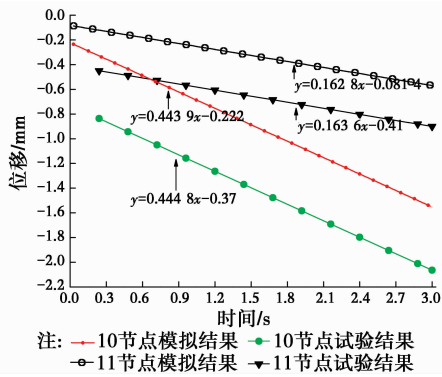


图 7 上弦 24 单元 GK3 两端节点的位移-时间历程拟合直线

Fig. 7 Top chord 24 element of the node displacement time history straight line of the simulation data under GK3

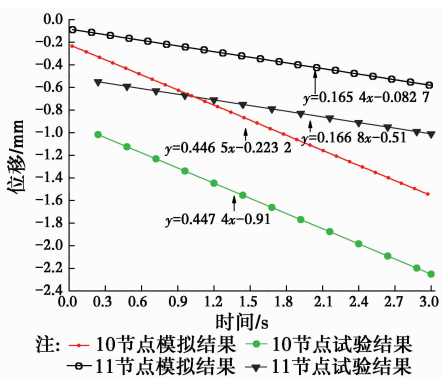


图 8 上弦 24 单元 GK4 两端节点的位移-时间历程拟合直线

Fig. 8 Top chord 24 element of the node displacement time history straight line of the simulation data under GK4

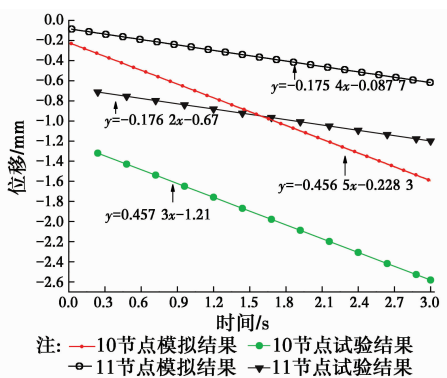


图 9 上弦 24 单元 GK5 两端节点的位移-时间历程拟合直线

Fig. 9 Top chord 24 element of the node displacement time history straight line of the simulation data under GK5

未施加外荷载节点:  $k = -0.673x^3 + 1.146x^2 - 0.563x - 0.087$ ;

施加外荷载节点:  $k = -1.561x^3 + 2.67x^2 - 1.468x - 0.237$ ;

未施加外荷载节点:  $k = -1.336x^3 + 2.306x^2 - 0.911x - 0.124$ ;

施加外荷载节点:  $k = -1.561x^3 + 2.706x^2 -$

$1.356x - 0.212$ ;

未施加外荷载节点:  $k = -0.679x^3 + 1.162x^2 - 0.556x - 0.085$ 。

根据表 5 中的模拟结果得出,上弦杆件、斜腹杆件、下弦杆件损伤程度  $x$  与损伤杆件两端节点的位移-时间历程拟合直线斜率  $k$  值的关系式依次如下,其中,  $x$  取值均属于  $(0, 1)$ 。

施加外荷载节点:  $k = -1.885x^3 + 3.224x^2 - 1.560x - 0.2364$ ;

未施加外荷载节点:  $k = -0.682x^3 + 1.159x^2 - 0.566x - 0.086$ ;

施加外荷载节点:  $k = -1.564x^3 + 2.67x^2 - 1.470x - 0.236$ ;

未施加外荷载节点:  $k = -1.332x^3 + 2.303x^2 - 0.913x - 0.123$ ;

施加外荷载节点:  $k = -1.561x^3 + 2.706x^2 - 1.356x - 0.212$ ;

未施加外荷载节点:  $k = -0.676x^3 + 1.161x^2 - 0.558x - 0.084$ 。

对比分析由试验结果与模拟结果得出的损伤程度  $x$  与斜率  $k$  的关系,并考虑试验与模拟误差。得出上弦单杆损伤程度  $x$  与损伤杆件两端节点的位移-时间历程拟合直线斜率  $k$  值的关系式。施加外荷载节点:  $k = -1.884x^3 + 3.223x^2 - 1.56x - 0.2367$ ; 未施加外荷载节点:  $k = -0.678x^3 + 1.153x^2 - 0.565x - 0.087$ 。斜腹单杆损伤程度  $x$  与损伤杆件两端节点的位移-时间历程拟合直线斜率  $k$  值的关系式。施加外荷载节点:  $k = -1.563x^3 + 2.67x^2 - 1.469x - 0.237$ ; 未施加外荷载节点:  $k = -1.334x^3 + 2.305x^2 - 0.912x - 0.124$ 。下弦单杆损伤程度  $x$  与损伤杆件两端节点的位移-时间历程拟合直线斜率  $k$  值的关系式。施加外荷载节点:  $k = -1.561x^3 + 2.706x^2 - 1.356x - 0.212$ ; 未施加外荷载节点:  $k = -0.678x^3 + 1.162x^2 - 0.557x - 0.085$ 。其中  $x$  取值均属于  $(0, 1)$ 。

## 5 结论

在定位损伤杆件的前提下,通过模型试验和数值模拟手段对四角锥网架杆件损伤程度进行研究,得出以下结论:

1) 提出了适用于四角锥网架结构杆件损伤程度识别方法。利用损伤杆件两端节点的位移-时间历程直线的斜率  $k$  值对杆件损伤程度进行识别,通过模型试验与数值模拟分析证明了该方法的可行性,

且该方法较为简单精确。

2) 损伤杆件的刚度发生变化, 导致杆件传力的能力改变, 所以, 不同损伤杆件在相同荷载作用下, 两端节点的位移-时间历程直线的斜率  $k$  值不同。

3) 损伤杆件两端节点的位移-时间历程直线的斜率  $k$  值大大提高了杆件损伤识别中的容错率, 即便一端节点存在数据误差的情况下, 仍可综合考虑另一端节点数据对结构损伤程度较准确的识别。

#### 参考文献:

- [1] 李慧民. 土木工程安全生产与事故案例分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
- [2] ALAMDARI M M, SAMALI B, LI J C. Damage localization based on symbolic time series analysis [J]. Structural Control & Health Monitoring, 2015, 22(2): 374-393.
- [3] ZHU X, RIZZO P. Sensor array for the health monitoring of truss structures by means of guided ultrasonic waves [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2014, 4(3): 221-234.
- [4] KIM N I, KIM H, LEE J. Damage detection of truss structures using two-stage optimization based on micro genetic algorithm [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(9): 3687-3695.
- [5] KIM N I, LEE S, AHN N, et al. Damage identification of truss structures based on force method [J]. Advances in Applied Mathematics and Mechanics, 2015, 7(2): 229-244.
- [6] HE C F, YANG S, LIU Z H, et al. Damage localization and quantification of truss structure based on electromechanical impedance technique and neural network [J]. Shock and Vibration, 2014, 21(2): 218-317.
- [7] MONTAZER M, SEYEDPOOR S M, PARK G. A new flexibility based damage index for damage detection of truss structures [J]. Shock and Vibration, 2014, 21(2): 167-172.
- [8] KIM N I, LEE J. Damage identification of trusses with elastic supports using FEM and genetic algorithm [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013, 5(2): 584-901.
- [9] OSORNIO-RIOS R A, AMEZQUITA-SANCHEZ J P, ROMERO-TRONCOSO R J, et al. MUSIC-ANN analysis for locating structural damages in a truss-type structure by means of vibrations [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2012, 27(9): 687-698.
- [10] VIOLA E, BOCCHINI P. Non-destructive parametric system identification and damage detection in truss structures by static tests [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2013, 9(5): 231-239.
- [11] MAJUMDAR A, MAITI D K, MAITY D. Damage assessment of truss structures from changes in natural frequencies using ant colony optimization [J]. Applied Mathematics and Computation, 2012, 218(19): 9759-9772.
- [12] 宋玉普, 刘志鑫, 纪卫红. 基于模态应变能与神经网络的钢网架损伤检测方法[J]. 土木工程学报, 2007, 40(10): 13-18.
- SONG Y P, LIU Z X, JI W H. Based on modal strain energy and steel rack damage detection method of neural network [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(10): 13-18. (in Chinese)
- [13] 伍雪南, 孙宗光, 毕波, 等. 基于吊索局部振动与神经网络技术的悬索桥损伤定位[J]. 振动与冲击, 2009, 28(10): 203-207.
- WU X N, SONG Z G, BI B, et al. Based on local vibration and sling suspension bridge damage localization of neural network technology [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(10): 203-207. (in Chinese)
- [14] SEYEDPOOR S M, MONTAZER M. A damage identification method for truss structures using a flexibility-based damage probability index and differential evolution algorithm [J]. Inverse Problems in Science and Engineering, 2016, 24(8): 1303-1322.
- [15] 张艳艳. 利用时间历程法分析钻机井架的瞬态响应[J]. 油气田地面工程, 2014, 33(5): 5-6.
- ZHANG Y Y. Time history method is used to analyze the transient response of drill derrick [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2014, 33(5): 5-6. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 空间网格结构技术规程: JGJ 7—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for space frame structures: JGJ 7-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)