

曲率模态识别桁架梁损伤位置方法研究

常 军^{1,2}

(1. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092; 2. 苏州科技学院 管理科学与工程系, 江苏 苏州 215011)

摘要: 基于曲率模态识别结构损伤位置的方法具有测试简便, 曲率对损伤的比较敏感等优点. 详细说明了曲率模态识别损伤位置的具体方法: 首先建立了桁架梁的有限元模型, 用以计算正常情况下的动力特性; 其次通过现场布拾振设备, 采集实测数据, 利用模态分析技术, 获得实际结构的自振特性; 再次将无损模型分段, 假设某段破损, 计算出自振特性, 与实测结果相比较, 从而判断出损失位置. 最后作者介绍了一个识别例子.

关键词: 桁架梁; 损伤识别; 曲率模态; 结构检测

中图分类号: TU375. 1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X(2005)06 - 0057 - 03

Methods and Research of Damage Location of Truss Beam by Curvature Model

CHANG Jun^{1,2}

(1. Dept of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Dept of Administration, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou, Jiangsu 215011, China)

Abstract: Truss beam damage detection based on curvature model exhibits a feature that curvature model of structure is sensitive to damage of structure. Detection process is that: first, a finite model is set up so as to calculate the dynamic property of the beam under normal condition. Then, the vibration-picking devices are built up on site to collect experimental data, and the model analysis is employed to gain natural oscillation performances of beam. Third, the undamaged beam model is separated. Suppose every part is damaged respectively, its dynamic property should be calculated, and its dynamic property and the damage beam should be compared to detect the location of the damage. Finally the author illustrates the point by giving a damage detection example.

Key words: steel truss beam; damage detection; curvature mode; structure testing

0 引言

结构检测方法有动力法和静力法, 由于动力损伤监测方法相对于传统的损伤监测方法 (目测及外观检查、非破损伙伴破损试验、现场荷载试验等) 而言可以从总体把握结构的状态, 测试所需加载设备简便、测试速度快、对结构不造成新的损伤、动力检测可以和静力数据形成阶段性对应关系等优点, 越来越多的学者及工程人员致力于结构的动力损伤诊断技术的研究.

早期被用作损伤识别指标的振动模态参数 (如固有频率、阻尼比和模态振型) 对结构的破损反应不敏感, 而且无法准确定位损伤, 已较少被采用. 应力应变参数对损伤的出现、位置和程度则敏感得多, 1980 年以来逐渐受到重视.

对于现场应变的测量, 传统的电阻应变片会受到一定的制约, 例如: 构件具有局部应力集中, 稍远区域应力恢复正常的特点, 只能作点式测量的应变片需要预知损伤部位才能检测损伤, 在大型结构上很不方便. 要解决这种制约可从两个方面: 要么从算法上解决, 用一种与应变模态算法相等效的算法来代替之, 并且, 实际测试更方便; 从检测手段入手, 采用一种比电阻应变片更有效测试应变的测量仪器. 针对后者, 可用分布式光纤应变计直接检测光纤布置区域的任一点的应变变化, 但迄今为止, 由于维护困难、测试系统复杂等原因, 使用范围受

收稿日期: 2004 - 11 - 08 基金项目: 云南省科技攻关项目 (项目编号: 2002 II05, 2001NG45).

作者简介: 常军 (1973 ~), 男, 博士, 讲师. 主要研究方向: 健康监测与振动控制. E-mail: changjun21@sina.com

到限制,这里主要从前者出发,研究一种新的模式:曲率模式来代替应变模式。

桁架梁结构应用非常广泛,特别是在大跨度铁路桥梁结构中应用非常广泛,目前,有许多桁架结构应用时间较长,评估它们的可靠性状况迫在眉睫。

桁架结构的每个杆件的受力都是拉压力,但对于整个桁架结构来说是主要承受竖向荷载,以弯曲为主要变形。本文介绍了通过振动位移测量评估钢桁架梁的曲率模式,通过数值仿真揭示了以曲率模式参数进行损伤识别的性能。

1 结构损伤原理

结构损伤主要包括结构刚度的降低和质量的变化,一般可表示为:

$$K_d = K_0 + K \quad (1)$$

$$M_d = M_0 + M \quad (2)$$

式中: K_0, M_0 为未破损的刚度、质量矩阵; K_d, M_d 为有损伤的刚度、质量矩阵; M, K 为由于损伤引起的结构刚度、质量矩阵的变化。由于实际的损伤一般不引起结构质量的变化,因此结构损伤检测的重点是研究结构刚度的降低,在建立模型时可以用度降低来模拟损伤。

2 应变模式与曲率模式

应变是位移的一阶导数,对于与每一阶位移模式(振型)必有与其对应的固有应变分布状态,这种与位移模式相对应的固有应变分布状态称为应变模式。和位移模式一样,应变模式反映了结构的固有特性,曲率模式测量是一种用位移测量间接检测应力应变,避免应变片测量局限性的方法。由材料力学给出的直梁弯曲静力关系:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{M_m}{E_m I_m} \quad (3)$$

式中: m 指截面位置, M_m 为截面处的弯矩; $E_m I_m$ 是 m 截面处梁的抗弯刚度; ρ_m 为截面处梁的曲率半径; $1/\rho_m$ 为曲率,曲率 $1/\rho_m$ 由直梁弯曲的变形近似方程可得

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (4)$$

式中: x 为沿直梁长度方向坐标, y 为梁弯曲挠度,式(4)在截面 m 处写成差分方程,代入式(3),对沿梁的3个等距连续测得有

$$\frac{y_{m+1} - 2y_m + y_{m-1}}{h^2} = \frac{M_m}{E_m I_m} \quad (5)$$

式中: y_m 为截面处梁的弯曲挠度, y_{m+1} 和 y_{m-1} 为与 m 截面相邻的左右两个测点的弯曲挠度,此外,梁的弯曲变形和应变相对应,应变可表示为

$$\epsilon = -\frac{h}{\rho} = -h \frac{y_{m+1} - 2y_m + y_{m-1}}{h^2} \quad (6)$$

式中: h 为梁上测点离中性线的距离。式(4)表明梁的曲率模式直接和应变模式相联系。显然,在位移模式测量的基础上,由差分计算可得到曲率模式,继而评估量的截面抗弯刚度的变化,即可确定损伤。

3 钢桁架梁损伤定位过程

- 1) 根据设计资料建立梁的有限元模型,称为原模型或未损模型;
- 2) 通过在现场布置拾振设备,采集试验数据,利用模态分析技术,获得实际结构的自振特性;
- 3) 将原模型进行分段,假设各段发生损坏的各种情况,计算出他们的自振特性;
- 4) 比较各段破坏的自振特性与实际结构的自振特性,找出最接近病态的假设情况,则损伤位置与该情况一致。

比较自振特性是采用上面提出的曲率模态,具体做法:

对于第 j 阶模态,第 i 段曲率模态的指标:

$$k_{ij} = \frac{\int_a^b \int_0^l \dot{y}_j(x)^2 dx / \int_0^l \dot{y}_j(x)^2 dx}{\int_a^b \int_0^l \dot{y}_j(x)^2 dx / \int_0^l \dot{y}_j(x)^2 dx} \quad (7)$$

式中: \dot{y}_j 为对于第 j 阶模态 x 点曲率,可按下式近似计算:

$$\dot{y}_j = \frac{y_{m+1} - 2y_m + y_{m-1}}{2 \cdot \Delta x^2} \quad (8)$$

5) 式中平方是为了消除掉正负号的影响, \dot{y}_j 和 \dot{y}_j 分别为假设损伤结构的曲率与实际结构的曲率,为了包含更多的信息,应多取几阶振型的,求平均值,一般取 6 阶左右,则

$$k_j = \left(\sum_{i=1}^n k_{ij} \right) / n \quad (9)$$

式中: n 为所取的振型阶数 i 为所分段落号 j 为振型的阶.

6) 计算偏离指标

$$d_i = \sqrt{(k_i - 1)^2} \quad (10)$$

比较,找出偏离指标 d_i 最接近 0 的情况,则损伤位置与该种情况一致.

4 算例

有一跨度为 12m 长的桁架梁,各截面面积为 0.5 m^2 ,两端简支,采用 ANSYS 程序建模,将其分为 6 段,将其中一个模型的第二段的一根腹杆用刚度折减模拟损伤,刚度为原来的 50%,另一个模型分别假设各段破损,取前 5 阶振型,计算结构如表 1.

表 1 各段曲率模态指标

Tab 1 Curvature model indices of every sect on truss beam

	假设第一段损伤	假设第二段损伤	假设第三段损伤	假设第四段损伤	假设第五段损伤	假设第六段损伤
第一段 $_1$	2.540 432	0.143 102	0.284 412	0.151 141	0.288 880	0.241 051
第二段 $_2$	0.223 431	0.521 416	0.220 779	0.605 347	0.608 490	0.539 001
第三段 $_3$	0.354 951	0.059 326	1.314 764	0.026 841	0.326 506	0.275 471
第四段 $_4$	0.313 459	0.183 578	0.021 274	1.781 613	0.147 615	0.315 105
第五段 $_5$	0.330 209	0.219 754	0.342 325	0.019 191	2.261 963	0.026 114
第六段 $_6$	0.165 588	0.276 214	0.247 464	0.327 091	0.164 525	3.259 451

从表中看出,总体最接近 0 的段在第二段,即损伤在第二段,与实际假设相符.

5 结论

采用有限元方法建立结构的模型,并通过曲率模态可以检测桁架梁的损伤位置,通过实例进一步证明了这种损伤识别方法比较准确,可以应用.该方法也可作为检测大型结构的整体结构损伤的方法.

参考文献:

- [1] 常军,白羽.钢筋混凝土梁的损伤识别方法研究[J].昆明理工大学学报(理工版),2003,28(2):105~107.
- [2] 常军.曲率模态识别结构损伤位置方法研究:[硕士学位论文][D].昆明:昆明理工大学,2002.
- [3] 曹树谦,张文德,萧龙翔.振动结构模态分析——理论、实验与应用[M].2001.3.
- [4] 姜海波.带边界条件的简支梁、连续梁损伤识别:[博士后出站报告][D].长沙:湖南大学,1999.
- [5] 万小朋,李小聪,等.利用振型变化进行结构损伤诊断的研究[J].航空学报,2003,(9):422~426.
- [6] Kirenidjian A S, Straer E C, Meng T, et al. Structural damage monitoring for civil structures[C]. Proceedings of the International Workshop of Structural Health Monitoring Technologic Publishing Company, 1997. 371~382.