



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 108280294 B

(45)授权公告日 2019.03.19

(21)申请号 201810063707.5

(22)申请日 2018.01.23

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 108280294 A

(43)申请公布日 2018.07.13

(73)专利权人 中冶建筑研究总院有限公司

地址 100088 北京市海淀区西土城路33号

专利权人 中国京冶工程技术有限公司

(72)发明人 曾滨 许庆

(74)专利代理机构 北京双收知识产权代理有限公司

公司 11241

代理人 楼湖斌

(51)Int.Cl.

G06F 17/50(2006.01)

G06F 17/16(2006.01)

(56)对比文件

CN 106768967 A,2017.05.31,

CN 103927414 A,2014.07.16,

US 2002078770 A1,2002.06.27,

审查员 陈恺

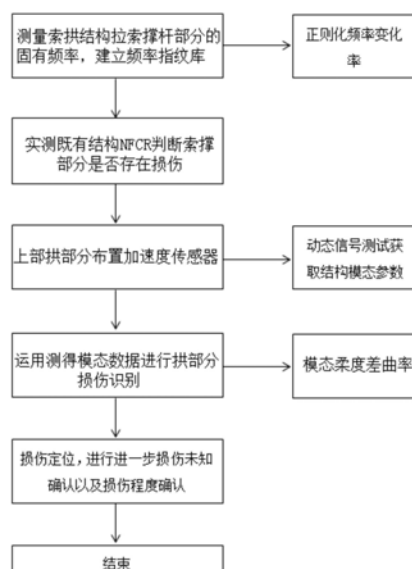
权利要求书1页 说明书6页 附图1页

(54)发明名称

一种基于模态参数的索拱结构损伤组合识别方法

(57)摘要

一种基于模态参数的索拱结构损伤组合识别方法,该方法首先采集布置在索拱结构上的加速度信号,并分别获得损伤前、后的固有频率及结构损伤前后拱结构部分的模态柔度矩阵,接着对索撑部分损伤前、后的固有频率求前五阶正则化频率变化率指标,绘出频率-位置曲线,建立频率指纹库,然后计算出实际损伤情况下的频率指纹参数,在对应频率指纹曲线上进行定位,找出各阶频率指纹对应的损伤位置并进行筛选,接着对索拱部分损伤前、后的模态柔度矩阵分别求前三阶模态柔度差曲率指标,最后根据模态柔度差曲率指标,绘出前三阶模态柔度差曲率-位置曲线,找出曲线突变位置,即为损伤位置,且突变越大,损伤程度越大。本发明不但能有效地对索拱结构进行单损伤、多损伤工况的损伤定位,而且可以较精确地识别损伤程度。



1. 一种基于模态参数的索拱结构损伤组合识别方法,其特征在于:该方法包括以下步骤:

步骤1.通过动态信号采集仪采集布置在索拱结构上的加速度传感器的加速度信号,通过模态测试分别获得索拱结构损伤前、后拉索和撑杆部分的固有频率,以及结构损伤前后拱部分的模态柔度矩阵;

步骤2.对索拱结构索撑部分损伤前、后的固有频率求前五阶正则化频率变化率指标,绘出频率-位置曲线,建立频率指纹库;

步骤3.根据现场测量数据计算出实际损伤情况下的频率指纹参数,在对应的频率指纹曲线上进行定位,找出各阶频率指纹对应的损伤位置并进行筛选,每个识别结果中所包含共有的损伤信息即为最终所求的损伤位置;

步骤4.对索拱结构拱部分损伤前、后的模态柔度矩阵分别求前三阶模态柔度差曲率指标;

步骤5.根据模态柔度差曲率指标,绘出前三阶模态柔度差曲率-位置曲线,找出曲线突变位置,即为损伤位置,且突变越大,损伤程度越大,即能定性判断杆件损伤程度。

2. 根据权利要求1所述的一种基于模态参数的索拱结构损伤组合识别方法,其特征在于:所述步骤1中,所述加速度传感器在索拱结构损伤前后测试点位置布置相同,测试获得的模态阶数不少于五阶。

一种基于模态参数的索拱结构损伤组合识别方法

技术领域：

[0001] 本发明涉及大跨钢结构损伤识别与诊断技术领域，特别是涉及一种基于模态参数的索拱结构损伤组合识别方法。

背景技术：

[0002] 大跨钢结构是衡量一个国家建筑科技水平的重要标志之一。大跨钢结构因其形态优美、经济合理以及跨越能力强等优点，在我国得到了快速发展。其中，张弦梁结构是由上部刚性拱桁架与下部柔性拉索通过撑杆组合而成的一种空间杂交结构形式，在哈尔滨体育会展中心、广州国际会展中心、深圳会展中心、上海世博会主题馆、国家体育馆等多项重大工程中得到成功应用，成为我国应用最为广泛的一种大跨预应力钢结构形式之一。

[0003] 大跨钢结构一般规模大、服役期限长，但往往会在低温、压力、振动碰撞以及腐蚀等荷载与环境的共同作用下，出现不同程度的局部损伤，难以用肉眼分辨，因此往往就会使得损伤构件得不到及时处理和加固。在这种情况下损伤会持续对结构的正常使用产生影响，严重的甚至引发连续倒塌，产生较大的社会经济损失。

[0004] 损伤识别与诊断是实现大型结构全寿命周期设计和维护的有效手段。针对不同结构形式和结构特性，对在役结构进行损伤诊断，能为在役结构的维修加固提供有力支持，具有极其重要的工程实践意义。

[0005] 传统的损伤识别方法中，往往采用单一方法对结构进行损伤识别，但是单一的损伤识别方法往往不能满足结构各部位的损伤识别，尤其用于大跨度空间结构，每种方法都存在一些局限性，从而对损伤识别的精度产生影响，

[0006] 比如：基于固有频率的损伤识别方法虽然获取频率精度较高，但是无法进行多损伤精确定位，受噪声影响大。

[0007] 基于曲率模态以及柔度矩阵的损伤识别方法，虽然可以进行多损伤定位以及定性判断损伤程度，但是振型数据获取精度不高，而且计算相对复杂，而且实际工程中需要较多传感器才能获取精确的模态数据。

[0008] 基于应变模态的损伤识别方法，由于应变是位移的一阶导数，应变模态的损伤识别效果也优于位移模态。但是，在实际应用中，应变模态的测量精度是损伤识别的关键，通常的应变测量方法精度不高，离散性大，当损伤发生在应变模态的节点处时，应变模态的变化不明显，就无法判别结构损伤与否。

[0009] 基于刚度矩阵的损伤识别方法，与柔度矩阵方法相似，不仅可以识别出损伤的位置，而且也可以较准确判断损伤程度，但是此方法的前提是以损伤单元刚度矩阵的各个元素按相同比例变化，有时这种假设并不能严格成立，用刚度矩阵方法进行损伤识别和定位的效果会有一定的偏差。并且，仅有当损伤程度较大时，刚度矩阵才会发生明显的变化，由此看来此方法不适用于微小的结构损伤识别。

[0010] 基于频响函数的损伤识别方法，由于不需要对结构进行建模分析，因此避免了模态分析所带来的误差，但是由于设备测试误差和环境噪声影响等，该方法对较小的结构损

伤识别不是非常敏感。

[0011] 基于小波分析的损伤识别方法,搜集信号的好坏直接影响到损伤识别的效果,因此小波分析对传感器数量和最优布置,以及信号搜集都有着严格的要求。

[0012] 利用环境振动测试,获取结构模态参数,进而进行基于模态参数的损伤识别,在桥梁结构和多高层结构中已被证明有效,因此,基于模态参数的损伤识别是大跨钢结构实现早期损伤诊断的理想方法。

[0013] 大跨钢结构规模较大、杆件繁多,尤其是预应力张弦梁结构中存在拉索、撑杆和桁架等不同类型杆件,受力机理更加复杂,其损伤识别与常规桥梁式结构或多高层建筑结构存在明显差异。为此,针对张弦梁结构特点,研究分别适用于下部索撑体系和上部桁架体系的损伤识别指标,提出基于模态参数的损伤组合识别方法,开展张弦梁结构在不同类型损伤工况下的损伤识别试验,为在役张弦梁结构的损伤诊断与性能维护提供理论方法与技术支撑。

发明内容:

[0014] 本发明要解决的技术问题是,提供一种不但能有效地对索拱结构进行单损伤、多损伤工况的损伤定位,而且可以较精确地识别损伤程度的基于模态参数的索拱结构损伤组合识别方法。

[0015] 本发明的技术解决方案是,提供一种基于模态参数的索拱结构损伤组合识别方法,该方法包括以下步骤:

[0016] 步骤1.通过动态信号采集仪采集布置在索拱结构上的加速度传感器的加速度信号,通过模态测试分别获得索拱结构损伤前、后拉索和撑杆部分的固有频率,以及结构损伤前后拱部分的模态柔度矩阵;

[0017] 步骤2.对索拱结构索撑部分损伤前、后的固有频率求前五阶正则化频率变化率指标,绘出频率-位置曲线,建立频率指纹库;

[0018] 步骤3.根据现场测量数据计算出实际损伤情况下的频率指纹参数,在对应的频率指纹曲线上进行定位,找出各阶频率指纹对应的损伤位置并进行筛选,每个识别结果中所包含共有的损伤信息即为最终所求的损伤位置;

[0019] 步骤4.对张索拱结构拱部分损伤前、后的模态柔度矩阵分别求前三阶模态柔度差曲率指标;

[0020] 步骤5.根据模态柔度差曲率指标,绘出前三阶模态柔度差曲率-位置曲线,找出曲线突变位置,即为损伤位置,且突变越大,损伤程度越大,即能定性判断杆件损伤程度。

[0021] 优选地,所述步骤1中,所述加速度传感器在索拱结构损伤前后测试点位置布置相同,测试获得的模态阶数不少于五阶。

[0022] 优选地,所述步骤2具体是指,

[0023] ①根据步骤1中测得的损伤前后各阶的固有频率得到频率变化率 FFC_i ,

$$[0024] \quad FFC_i = \frac{f_{ui} - f_{di}}{f_{ui}}$$

[0025] 其中, f_{ui} 和 f_{di} 分别为索拱结构在健康和损伤状态下的频率;

[0026] ②频率变化率与损伤位置和损伤程度均有关, FFC_i 可以表示成:

[0027] $FFC_i = g_i(r) f_i(\Delta K, \Delta M)$

[0028] 其中, ΔK 和 ΔM 分别为损伤前后结构刚度改变量和质量改变量, $g_i(r)$ 为位置函数;

[0029] ③将频率变化函数 f_i 在 $\Delta K=0$ 和 $\Delta M=0$ 上作级数展开并忽略高阶项, 简化可得:

[0030] $FFC_i = \Delta K q_i(r) + \Delta M p_i(r)$

[0031] ④近似认为质量不变 $\Delta M \approx 0$, 故正则化频率变化率 $NFCR_i$ 可以表示为:

$$[0032] \quad NFCR_i = \frac{FFC_i}{\sum_{j=1}^m FFC_j} = \frac{\Delta K q_i(r)}{\Delta K \sum_{j=1}^m q_j(r)} = l_i(r)$$

[0033] ⑤根据各工况下索撑损伤得到的 $NFCR_i$ 数据指标, 绘出结构频率-位置曲线, 建立频率指纹库。

[0034] 优选地, 所述步骤4具体是指,

[0035] ①根据现场测量的位移模态参数和固有频率, 得到结构的刚度矩阵 K :

$$[0036] \quad K = M \Phi \Lambda \Phi^T M = M \left(\sum_{i=1}^N f_i^2 \Phi_i \Phi_i^T \right) M / 4\pi^2$$

[0037] 式中, $\Phi = [\Phi_1 \Phi_2 \dots \Phi_n]$ 为结构的位移模态矩阵, 构成该矩阵的 Φ_i 是第 i 阶位移模态向量, $\Phi_i = (\phi_1, \phi_2 \dots \phi_n)$, ϕ_i 为位移模态, Λ 为结构的频率矩阵, 即为 $\Lambda = \text{diag}(\omega_i^2)$, ω_i 是结构的第 i 阶固有圆频率, $f_i = 2\pi \omega_i$;

[0038] ②对刚度矩阵两边同时求逆可以得到结构柔度矩阵 F :

$$[0039] \quad F = \Phi \Lambda^{-1} \Phi^T = \sum_{i=1}^N \frac{\Phi_i \Phi_i^T}{\omega_i^2}$$

[0040] ③令结构损伤前、后的柔度矩阵分别为 F^d 和 F^u , 可得到模态柔度差矩阵 ΔF :

$$[0041] \quad \Delta F = F^u - F^d$$

[0042] ④将模态柔度差矩阵对角线元素 δ_j 组成损伤识别数列, 其中

$$[0043] \quad \delta_j = |\delta_{ij}| \quad (j=1, 2 \dots n; i=j)$$

[0044] ⑤运用差分法求得其曲率绝对值作为损伤识别指标, 即模态柔度差曲率指标 $MFDC_j$:

$$[0045] \quad MFDC_j = \left| \frac{\delta_{j+1} - 2\delta_j + \delta_{j-1}}{2\Delta l^2} \right|$$

[0046] 其中, Δl 为两个计算点之间的距离,

[0047] $MFDC_j$ 指标中的元素与结构节点一一对应, 将 $MFDC_j$ 指标绘制成曲线, 曲线峰值处认为是结构发生损伤的位置, 从而起到损伤定位的效果。

[0048] 本发明的有益效果是:

[0049] 单一损伤识别指标较难进行索拱结构全方位的损伤识别研究。作为典型的大跨空间结构体系, 索拱结构包含了预应力拉索、竖向撑杆和上部拱三大部分, 每一部分对于结构动力特性指标的影响机制不一样, 难以采用一种统一的理论或方法进行全面的损伤识别;

[0050] 索拱结构相对复杂, 杆件繁多, 可能发生损伤的位置较多, 在实际运用损伤识别方法时无法一次检测出结构各处的健康程度。因此, 提出针对索拱结构的损伤组合识别方法,

利用不同损伤识别指标对结构不同部位进行损伤识别。

[0051] 在此前提下,按索拱结构单元的敏感性,将上部部分与下部撑杆拉索部分分成索拱结构的两部分,分别运用不同的损伤识别方法进行结构损伤诊断。

[0052] 本发明结合国内外损伤识别研究,针对索拱结构进行了系统全面的损伤识别分析,选取了正则化频率变化率、模态柔度差曲率等指标针对结构不同部分进行损伤识别方法研究,提出针对索拱结构的损伤组合识别方法。该方法能有效的对预应力索拱结构进行单损伤、多损伤工况的损伤定位,以及较精确的识别损伤程度,为预应力索拱结构无损检测与评估提供了一种有效的新方法。

附图说明:

[0053] 图1为本发明一种基于模态参数的张弦结构损伤组合识别方法的流程示意图;

[0054] 图2为内凹式索拱结构示意图。

具体实施例:

[0055] 下面结合附图和具体实施例对本发明一种基于模态参数的索拱结构损伤组合识别方法作进一步说明:

[0056] 如图1和图2所示,本发明一种基于模态参数的索拱结构损伤组合识别方法主要包括以下步骤:

[0057] 步骤1.通过动态信号采集仪采集布置在索拱结构上的加速度传感器的加速度信号,通过模态测试分别获得索拱结构损伤前、后拉索和撑杆部分的固有频率,以及结构损伤前后拱部分的模态柔度矩阵;

[0058] 步骤2.对索拱结构索撑部分损伤前、后的固有频率求前五阶正则化频率变化率指标,绘出频率-位置曲线,建立频率指纹库;

[0059] 步骤3.根据现场测量数据计算出实际损伤情况下的频率指纹参数,在对应的频率指纹曲线上进行定位,找出各阶频率指纹对应的损伤位置并进行筛选,每个识别结果中所包含共有的损伤信息即为最终所求的损伤位置;

[0060] 步骤4.对张索拱结构拱部分损伤前、后的模态柔度矩阵分别求前三阶模态柔度差曲率指标;

[0061] 步骤5.根据模态柔度差曲率指标,绘出前三阶模态柔度差曲率-位置曲线,找出曲线突变位置,即为损伤位置,且突变越大,损伤程度越大,即能定性判断杆件损伤程度。

[0062] 具体的,步骤(1)中,根据结构的形态尺寸布置相应的加速度传感器,并且损伤前后测点位置布置相同。

[0063] 具体的,步骤(1)中,测试获得的模态阶数不少于5阶。

[0064] 具体的,步骤(1)中,模态参数测试采用可测激励的方法,测得结构损伤前后各阶的固有频率 f_i 及各杆件单元节点的位移模态 Φ_i 。

[0065] 具体的,步骤(2)中,根据步骤(1)中测得的损伤前后各阶的固有频率得到频率变化率 FFC_i :

$$[0066] \quad FFC_i = \frac{f_{ui} - f_{di}}{f_{ui}}$$

[0067] 其中, f_{ui} 和 f_{di} 分别为结构在健康和损伤状态下的频率。

[0068] 具体的, 步骤 (2) 中, 频率变化率与损伤位置和损伤程度均有关, 可以表示成:

[0069] $FFC_i = g_i(r) f_i(\Delta K, \Delta M)$

[0070] 其中, ΔK 和 ΔM 分别为损伤前后结构刚度改变量和质量改变量, $g_i(r)$ 为位置函数。

[0071] 具体的, 步骤 (2) 中, 将频率变化函数 f_i 在 $\Delta K=0$ 和 $\Delta M=0$ 上作级数展开并忽略高阶项, 简化可得:

[0072] $FFC_i = \Delta K q_i(r) + \Delta M p_i(r)$

[0073] 进一步, 步骤 (2) 中, 近似认为质量不变 $\Delta M \approx 0$, 故正则化频率变化率 $NFCR_i$ 可以表示为:

$$[0074] \quad NFCR_i = \frac{FFC_i}{\sum_{j=1}^m FFC_j} = \frac{\Delta K q_i(r)}{\Delta K \sum_{j=1}^m q_j(r)} = l_i(r)$$

[0075] 由上式可看出, 正则化频率变化率仅与损伤位置有关, 与损伤程度无关。

[0076] 进一步, 步骤 (2) 中, 根据各工况下索撑损伤得到的 $NFCR_i$ 数据指标, 绘出结构频率-位置曲线, 建立频率指纹库。

[0077] 具体的, 步骤 (3) 中, 根据现场测量数据带入步骤 (2), 计算出实际损伤情况下的频率指纹参数。

[0078] 进一步, 步骤 (3) 中, 在步骤 (2) 中建立的频率指纹曲线上进行定位, 找出各阶频率指纹对应的损伤位置并进行筛选, 每个识别结果中所包含共有的损伤信息即为最终所求的损伤位置。

[0079] 具体的, 步骤 (4) 中, 根据现场测量的位移模态参数和固有频率, 得到结构的刚度矩阵 K :

$$[0080] \quad K = M \Phi \Lambda \Phi^T M = M \left(\sum_{i=1}^N f_i^2 \Phi_i \Phi_i^T \right) M / 4\pi^2$$

[0081] $\Phi = [\Phi_1 \Phi_2 \dots \Phi_n]$ 为结构的位移模态矩阵, 构成该矩阵的 Φ_i 是第 i 阶位移模态向量, $\Phi_i = (\phi_1, \phi_2 \dots \phi_n)$, ϕ_i 为位移模态; Λ 为结构的频率矩阵, 即为 $\Lambda = \text{diag}(\omega_i^2)$, 该式中 ω_i 是结构的第 i 阶固有圆频率, $f_i = 2\pi \omega_i$ 。

[0082] 进一步, 步骤 (4) 中, 结构的柔度矩阵与结构刚度矩阵互为逆矩阵, 因此, 对步骤 (4) 中的刚度矩阵两边同时求逆可以得到结构柔度矩阵 F :

$$[0083] \quad F = \Phi \Lambda^{-1} \Phi^T = \sum_{i=1}^N \frac{\Phi_i \Phi_i^T}{\omega_i^2}$$

[0084] 具体的, 步骤 (4) 中, 令结构损伤前、后的柔度矩阵分别为 F^d 和 F^u , 可得到模态柔度差矩阵 ΔF :

$$[0085] \quad \Delta F = F^u - F^d$$

[0086] 具体的, 步骤 (4) 中, 将模态柔度差矩阵对角线元素 δ_j 组成损伤识别数列, 其中

$$[0087] \quad \delta_j = |\delta_{ij}| \quad (j=1, 2 \dots n; i=j)$$

[0088] 进一步, 步骤 (4) 中, 运用差分法求得其曲率绝对值作为损伤识别指标, 即模态柔度差曲率指标 $MFDC_j$:

$$[0089] \quad MFDC_j = \left| \frac{\delta_{j+1} - 2\delta_j + \delta_{j-1}}{2\Delta l^2} \right|$$

[0090] 其中, Δl 为两个计算点之间的距离。

[0091] MFDC_j指标中的元素与结构节点一一对应,将MFDC_j指标绘制成曲线,曲线峰值处认为是结构发生损伤的位置,从而起到损伤定位的效果。

[0092] 具体的,步骤(5)中,根据现场测量数据带入步骤(4),计算出实际损伤情况下的前3阶模态柔度差曲率MFDC_j,并绘制成曲线。

[0093] 进一步,步骤(5)中,观察上部桁架结构部分损伤情况下各阶模态柔度差曲率曲线,找出曲线的突变的峰值位置,即为结构损伤位置,且突变越大,损伤程度越大,即能定性判断杆件损伤程度。

[0094] 以上所述的实施例仅仅是对本发明的优选实施例进行描述,并非对本发明的范围进行限定,在不脱离本发明设计精神的前提下,本领域普通技术人员对本发明的技术方案做出的各种变形和改进,均应落入本发明权利要求书确定的保护范围内。

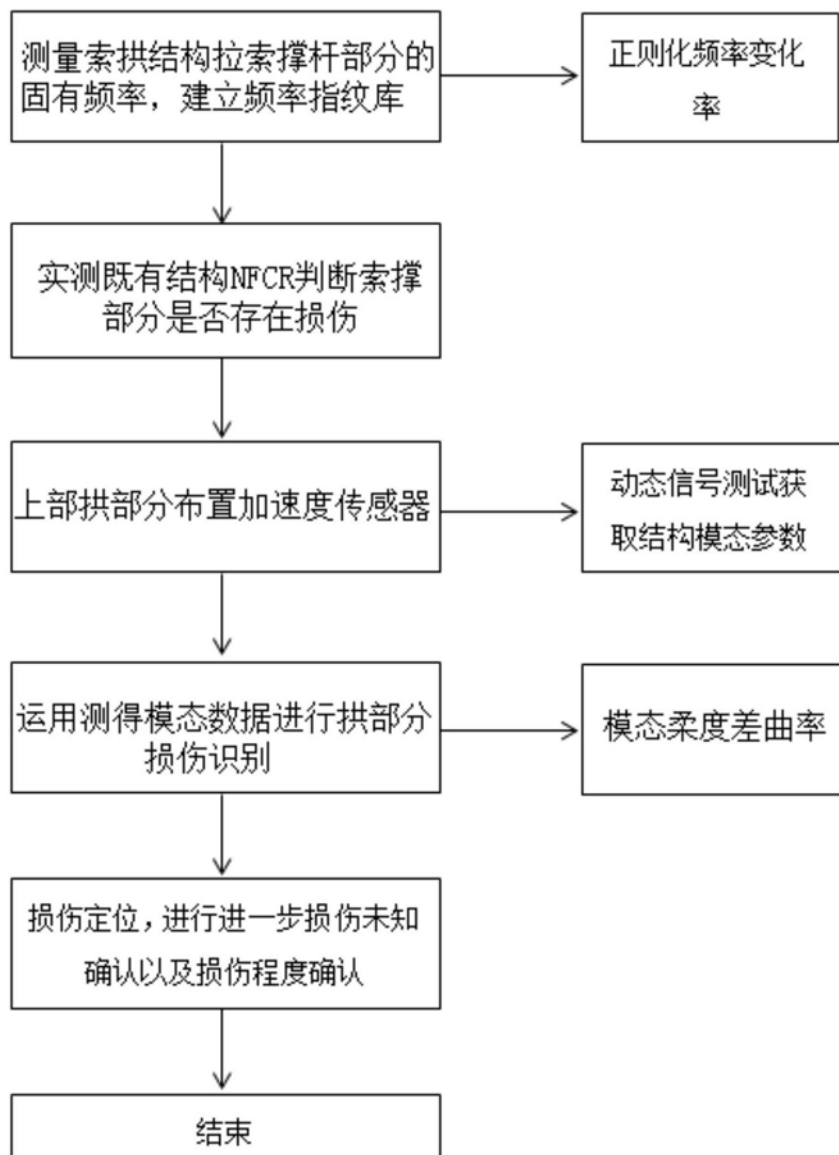


图1

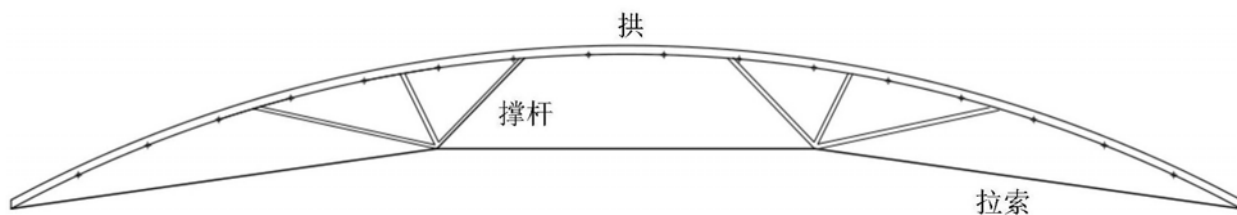


图2