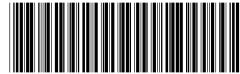


(19) 中华人民共和国国家知识产权局



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102288438 B

(45) 授权公告日 2013. 10. 09

(21) 申请号 201110122710. 8

RU 2324812 C1, 2008. 05. 20, 全文.

(22) 申请日 2011. 05. 13

郭永彩等. 桥梁拉索表面缺陷无损检测系统
设计.《重庆大学学报》. 2010, 第33卷(第8期),
第7-11页.

(73) 专利权人 东南大学

审查员 徐欣歌

地址 210096 江苏省南京市四牌楼2号

(72) 发明人 韩玉林 韩佳邑

(74) 专利代理机构 南京苏高专利商标事务所

(普通合伙) 32204

代理人 柏尚春

(51) Int. Cl.

G01M 99/00(2011. 01)

G01B 21/22(2006. 01)

G01B 21/32(2006. 01)

G01B 21/00(2006. 01)

G01L 5/00(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101788403 A, 2010. 07. 28, 全文.

CN 101319962 A, 2008. 12. 10, 全文.

权利要求书3页 说明书15页

(54) 发明名称

基于混合监测的识别受损索松弛索支座角位移的方法

(57) 摘要

基于混合监测的识别受损索松弛索支座角位移的方法,该方法基于混合监测,根据索结构的设计图、竣工图和索结构的实测数据等建立索结构的力学计算基准模型,在力学计算基准模型的基础上进行若干次力学计算,通过计算获得索结构被监测量单位变化矩阵。依据被监测量的当前数值向量同被监测量初始向量、索结构被监测量单位变化矩阵和待求的被评估对象当前健康状态向量间存在的近似线性关系,可以识别出索结构的健康状态的变化,即识别出支座角位移、受损索和松弛索。

1. 一种基于混合监测的识别受损索松弛索支座角位移的方法,其特征在于所述方法包括:

a. 为叙述方便起见,本方法统一称被评估的支承索和支座角位移分量为被评估对象,设被评估的支承索的数量和支座角位移分量的数量之和为 N,即被评估对象的数量为 N;确定被评估对象的编号规则,按此规则将索结构中所有的被评估对象编号,该编号在后续步骤中将用于生成向量和矩阵;本方法用变量 i 表示这一编号, $i=1, 2, 3, \dots, N$;

b. 确定混合监测时指定的将被监测索力的支承索,设索系统中共有 Q 根索,结构的被监测的索力数据由结构上 M_1 个指定索的 M_1 个索力数据来描述,结构索力的变化就是所有指定索的索力的变化;每次共有 M_1 个索力测量值或计算值来表征结构的索力信息; M_1 是一个不小于 0 的整数;确定混合监测时指定的将被监测应变的被测量点,结构的被监测的应变数据可由结构上 K_2 个指定点的、及每个指定点的 L_2 个指定方向的应变来描述,结构应变数据的变化就是 K_2 个指定点的所有被测应变的变化;每次共有 M_2 个应变测量值或计算值来表征结构应变, M_2 为 K_2 和 L_2 之积; M_2 是不小于 0 的整数;确定混合监测时指定的将被监测角度的被测量点,结构的被监测的角度数据由结构上 K_3 个指定点的、过每个指定点的 L_3 个指定直线的、每个指定直线的 H_3 个角度坐标分量来描述,结构角度的变化就是所有指定点的、所有指定直线的、所有指定的角度坐标分量的变化;每次共有 M_3 个角度坐标分量测量值或计算值来表征结构的角度信息, M_3 为 K_3 、 L_3 和 H_3 之积; M_3 是一个不小于 0 的整数;确定混合监测时指定的将被监测的形状数据,结构的被监测的形状数据由结构上 K_4 个指定点的、及每个指定点的 L_4 个指定方向的空间坐标来描述,结构形状数据的变化就是 K_4 个指定点的所有坐标分量的变化;每次共有 M_4 个坐标测量值或计算值来表征结构形状, M_4 为 K_4 和 L_4 之积; M_4 是一个不小于 0 的整数;综合上述混合监测的被监测量,整个结构共有 M 个被监测量,M 为 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_4 之和,定义参量 K, K 为 M_1 、 K_2 、 K_3 和 K_4 之和,K 和 M 不得小于被评估对象的数量 N;由于 M 个被监测量是不同类型的,所以本方法称为“基于混合监测的识别受损索松弛索支座角位移的方法”;为方便起见,在本方法中将本步所列出的“混合监测时结构的被监测的所有参量”简称为“被监测量”;

c. 利用包括索的无损检测数据在内的能够表达索的健康状态的数据建立初始健康状态向量 d_0 ;如果没有索的无损检测数据及其他能够表达索的健康状态的数据时,向量 d_0 的各元素数值取 0;

d. 在建立初始健康状态向量 d_0 的同时,直接测量计算得到索结构的所有被监测量的初始数值,组成被监测量的初始数值向量 C_0 ;

e. 在建立初始健康状态向量 d_0 和被监测量的初始数值向量 C_0 的同时,直接测量计算得到所有支承索的初始索力,组成初始索力向量 F_0 ;同时,依据结构设计数据、竣工数据得到所有支承索的初始自由长度,组成初始自由长度向量 l_0 ;同时,依据结构设计数据、竣工数据或实测得到索结构的初始几何数据;同时,实测或根据结构设计、竣工资料得到所有索的弹性模量、密度、初始横截面面积;

f. 根据索结构的设计图、竣工图和索结构的实测数据、索的无损检测数据和初始索结构支座坐标数据建立索结构的力学计算基准模型 A_0 ;

g. 在力学计算基准模型 A_0 的基础上进行若干次力学计算,通过计算获得索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC ;

h. 实测得到索结构的所有支承索的当前索力,组成当前索力向量 F ;同时,实测得到索结构的所有指定被监测量的当前实测数值,组成“被监测量的当前数值向量 C ”;实测计算得到所有支承索的两个支承端点的空间坐标,两个支承端点的空间坐标在水平方向分量的差就是两个支承端点水平距离;

i. 定义待求的被评估对象当前健康状态向量 d_c 和当前实际健康状态向量 d ;向量 d_o 、 d_c 和 d 的元素个数等于被评估对象的数量, d_o 、 d_c 和 d 的元素和被评估对象之间是一一对应关系, d_o 、 d_c 和 d 的元素数值代表对应被评估对象的损伤程度或角位移、或与松弛程度力学等效的损伤程度;

j. 依据“被监测量的当前数值向量 C ”同“被监测量的初始数值向量 C_0 ”、“索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC ”和“被评估对象当前健康状态向量 d_c ”间存在的近似线性关系,该近似线性关系可表达为式 1,式 1 中除 d_c 外的其它量均为已知,求解式 1 就可以算出被评估对象当前健康状态向量 d_c ;

$$C = C_0 + \Delta C \cdot d_c \quad \text{式 1}$$

k. 利用式 2 表达的当前实际健康状态向量 d 的元素 d_j 同初始健康状态向量 d_o 的元素 d_{oj} 和被评估对象当前健康状态向量 d_c 的元素 d_{cj} 间的关系,计算得到当前实际健康状态向量 d 的所有元素;

$$d_i = 1 - (1 - d_{oi}) (1 - d_{ci}) \quad \text{式 2}$$

式 2 中 $i=1, 2, 3, \dots, N$;

由于当前实际健康状态向量 d 的元素数值代表对应被评估对象的当前实际健康状态,如果该被评估对象是索系统中的一根索,那么该元素表示其当前实际损伤,如果该被评估对象是一个支座的一个角位移分量,那么该元素表示其当前角位移数值;当前实际健康状态向量 d 的元素数值为 0 时,表示对应的支承索无损伤无松弛、或对应的支座角位移分量为 0,不为 0 的元素对应于有问题的支承索或有角位移的支座;由此确定了有问题的支承索,确定了支座角位移;

1. 从第 k 步中识别出的有问题的支承索中,通过无损检测方法鉴别出受损索,剩下的就是松弛索;

m. 从当前实际健康状态向量 d 中取出支承索对应的元素组成支承索当前实际健康状态向量 d^c ,支承索当前实际健康状态向量 d^c 有 Q 个元素,表示 Q 根支承索的当前实际损伤值, d^c 元素的编号规则与向量 F_0 的编号规则相同,即 d^c 和 F_0 相同编号的元素表示相同支承索的信息;

n. 利用在第 m 步获得的支承索当前实际健康状态向量 d^c 得到松弛索的当前实际损伤程度,利用在第 h 步获得的当前索力向量 F ,利用在第 h 步获得的所有支承索的两个支承端点的空间坐标,利用在第 e 步获得的初始自由长度向量 l_0 ,利用在第 e 步获得的所有索的弹性模量、密度、初始横截面面积数据,通过将松弛索同受损索进行力学等效来计算松弛索的、与当前实际损伤程度等效的松弛程度,力学等效条件是:一、两等效的索的无松弛和无损伤时的初始自由长度、几何特性参数、密度及材料的力学特性参数相同;二、松弛或损伤后,两等效的松弛索和损伤索的索力和变形后的总长相同;满足上述两个力学等效条件时,这样的两根支承索在结构中的力学功能就是完全相同的,即如果用等效的松弛索代替受损索后,索结构不会发生任何变化,反之亦然;依据前述力学等效条件求得那些被判定为松弛

索的松弛程度,松弛程度就是支承索自由长度的改变量,也就是确定了那些需调整索力的支承索的索长调整量;这样就实现了支承索的松弛识别;计算时所需索力由当前索力向量 F 对应元素给出;

2. 根据权利要求 1 所述的基于混合监测的识别受损索松弛索支座角位移的方法,其特征在于在步骤 g 中,在力学计算基准模型 A_0 的基础上进行若干次力学计算,通过计算获得索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC 的具体方法为:

g1. 在索结构的力学计算基准模型 A_0 的基础上进行若干次力学计算,计算次数数值上等于 N ;每一次计算假设只有一个被评估对象在原健康状态的基础上再增加有单位损伤或单位角位移,为叙述方便本方法合称单位损伤和单位角位移为单位变化;具体的,如果该被评估对象是索系统中的一根支承索,那么就假设该支承索在原有健康状态的基础上再增加单位损伤,如果该被评估对象是一个支座的一个方向的角位移分量,就假设该支座在该角位移方向在原有健康状态的基础上再增加发生单位角位移,用 D_{ui} 记录这一单位损伤或单位角位移,其中 i 表示发生单位损伤或单位角位移的被评估对象的编号;每一次计算中出现单位损伤或单位角位移的被评估对象不同于其它次计算中出现单位损伤或单位角位移的被评估对象,每一次计算都利用力学方法计算索结构的所有被监测量的当前计算值,每一次计算得到的所有被监测量的当前计算值组成一个被监测量计算当前向量;

g2. 每一次计算得到的被监测量计算当前向量减去被监测量初始向量后再除以该次计算所假设的单位损伤或单位角位移数值,得到一个被监测量变化向量,有 N 个被评估对象就有 N 个被监测量变化向量;

g3. 由这 N 个被监测量变化向量依次组成有 N 列的索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC ;索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC 的每一列对应于一个被监测量变化向量。

基于混合监测的识别受损索松弛索支座角位移的方法

技术领域

[0001] 斜拉桥、悬索桥、桁架结构等结构有一个共同点,就是它们有许多承受拉伸载荷的部件,如斜拉索、主缆、吊索、拉杆等等,该类结构的共同点是以索、缆或仅承受拉伸载荷的杆件为支承部件,为方便起见本发明将该类结构表述为“索结构”。在索结构的服役过程中,索结构的支承系统(指所有承载索、及所有起支承作用的仅承受拉伸载荷的杆件,为方便起见,本专利将该类结构的全部支承部件统一称为“索系统”,但实际上索系统不仅仅指支承索,也包括仅承受拉伸载荷的杆件)会受损,同时索结构的支座也可能出现角位移(例如支座绕坐标轴X、Y、Z的转动,实际上就是支座绕坐标轴X、Y、Z的角位移),这些变化对索结构的安全是一种威胁,本发明基于结构健康监测技术,基于混合监测来识别支座角位移、识别索结构的索系统中的受损索、识别需调整索力的支承索,并给出具体的索长调整量,属工程结构健康监测领域。

背景技术

[0002] 支座角位移对索结构安全是一项重大威胁,同样的,索系统的损伤和松弛也将对结构的安全造成不良影响,严重时将会引起结构的失效,因此准确及时地识别支座角位移、受损索和松弛索(即需调整索力的支承索)是非常必要的。

[0003] 索结构出现支座角位移、受损索和松弛索后会引起结构的可测量参数的变化,例如会引起索力的变化,会影响索结构的变形或应变,会影响索结构的形状或空间坐标,会引起过索结构的每一点的任意假想直线的角度坐标的变化(例如结构表面任意一点的切平面中的任意一根过该点的直线的角度坐标的变化,或者结构表面任意一点的法线的角度坐标的变化),所有的这些变化都包含了索系统的健康状态信息,因此通过对这些不同类型的结构的特征参量的变化的混合监测来判断结构的健康状态,本发明将所有被监测的结构特征参量统称为“被监测量”,由于此时被监测量是由结构的不同类型的可测量参数混合组成,本发明称此为混合监测,也就是说可以利用混合监测来识别支座角位移、受损索和松弛索。

发明内容

[0004] 技术问题:本发明公开了一种基于混合监测的、能够合理有效地识别支座角位移、受损索和松弛索的健康监测方法。

[0005] 依据支承索的索力变化的原因,可将支承索的索力变化分为三种情况:一是支承索受到了损伤,例如支承索出现了局部裂纹和锈蚀等等;二是支承索并无损伤,但索力也发生了变化,出现这种变化的主要原因之一是支承索自由状态(此时索张力也称索力为0)下的索长度(称为自由长度,本发明专指支承索两支承端点间的那段索的自由长度)发生了变化;三是支承索并无损伤,但索结构支座有了角位移,也会引起结构内力的变化,当然也就引起索力的变化。为了方便,本发明将自由长度发生变化的支承索统称为松弛索。

[0006] 技术方案:本发明由两大部分组成。分别是:一、建立用于识别支座角位移、受损

索和松弛索的健康监测系统所需的知识库和参量的方法、基于知识库(含参量)、基于被监测等量的监测的、识别索结构的支座角位移、受损索和松弛索的方法。二、健康监测系统的软件和硬件部分。

[0007] 设索的数量和支座角位移分量的数量之和为 N 。为叙述方便起见,本发明统一称被评估的索和支座角位移为“被评估对象”,给被评估对象连续编号,本发明用用变量 i 表示这一编号, $i=1, 2, 3, \dots, N$,因此可以说有 N 个被评估对象。

[0008] 本发明的第一部分:建立用于识别索结构支座角位移、受损索和松弛索的健康监测系统所需的知识库和参量的方法、基于知识库(含参量)、基于实测索结构支座角位移的、基于被监测等量的监测的、识别索结构的支座角位移、受损索和松弛索的方法。可按如下方法进行,以获得更准确的索结构的健康状态评估。

[0009] 第一步:首先建立索结构初始健康状态向量 d_o 、建立索结构的初始力学计算基准模型 A_o 。(例如有限元基准模型,在本发明中 A_o 是不变的)。

[0010] 索结构“初始健康状态向量记为 d_o ”(如式(1)所示),用 d_o 表示索结构(用索结构的初始力学计算基准模型 A_o 表示)的健康状态。

$$[0011] d_o = [d_{o1} \quad d_{o2} \quad \cdots \quad d_{o3} \quad \cdots \quad d_{oN}]^T \quad (1)$$

[0012] 式(1)中 d_{oi} ($i=1, 2, 3, \dots, N$)表示 A_o 中的索结构的第 i 个被评估对象的初始健康状态,如果该被评估对象是索系统中的一根索(或拉杆),那么 d_{oi} 表示其初始损伤, d_{oi} 为0时表示无损伤,为100%时表示该索彻底丧失承载能力,介于0与100%之间时表示丧失相应比例的承载能力,如果经无损检测查明该索没有损伤,那么 d_{oi} 表示该索与 d_{oi} 损伤值力学等效的松弛,具体松弛量的计算方法在后面说明;如果该被评估对象是一个支座的一个角位移分量,那么 d_{oi} 表示其初始角位移数值。式(1)中 T 表示向量的转置(后同)。

[0013] 建立索结构初始健康状态向量(依据式(1)记为 d_o)时,利用索结构完工之时或健康监测系统开始工作之时的索结构的支座角位移的实测数据和设计图、竣工图确定索结构初始健康状态向量 d_o 的对应于支座角位移的各元素数值;利用索的无损检测数据等能够表达索的健康状态的数据确定索结构初始健康状态向量 d_o 的对应于索的各元素数值;如果没有索的无损检测数据及其他能够表达索的健康状态的数据时,或者可以认为结构初始状态为无损伤无松弛状态时,向量 d_o 的对应于索的各元素数值取0。

[0014] 建立索结构的力学计算基准模型 A_o 。(例如有限元基准模型)的方法如下:

[0015] 建立 A_o 时,根据索结构完工之时的索结构的实测数据(包括索结构形状数据、索力数据、拉杆拉力数据、索结构支座坐标数据、索结构支座角坐标数据、索结构模态数据等实测数据,对斜拉桥、悬索桥而言是桥的桥型数据、索力数据、桥的模态数据、索的无损检测数据等能够表达索的健康状态的数据)和设计图、竣工图,利用力学方法(例如有限元法)建立 A_o ;如果没有索结构完工之时的结构的实测数据,那么就在建立健康监测系统前对结构进行实测,得到索结构的实测数据(包括索结构形状数据、索力数据、拉杆拉力数据、索结构支座坐标数据、索结构支座角坐标数据、索结构模态数据等实测数据,对斜拉桥、悬索桥而言是桥的桥型数据、索力数据、桥的模态数据、索的无损检测数据等能够表达索的健康状态的数据),根据此数据和索结构的设计图、竣工图,利用力学方法(例如有限元法)建立 A_o 。不论用何种方法获得 A_o ,基于 A_o 计算得到的索结构计算数据(对斜拉桥、悬索桥而言是桥的桥型

数据、索力数据、桥的模态数据)必须非常接近其实测数据,误差一般不得大于 5%。这样可保证利用 A_0 计算所得的模拟情况下的应变计算数据、索力计算数据、索结构形状计算数据和位移计算数据、索结构角度数据等,可靠地接近所模拟情况真实发生时的实测数据。

[0016] 被监测的多类参量可以包括:索力、应变、角度和空间坐标,分别叙述如下:

[0017] 设索系统中共有 Q 根索,结构的被监测的索力数据由结构上 M_1 个指定索的 M_1 个索力数据来描述,结构索力的变化就是所有指定索的索力的变化。每次共有 M_1 个索力测量值或计算值来表征结构的索力信息。 M_1 是一个不小于 0 的整数。

[0018] 结构的被监测的应变数据可由结构上 K_2 个指定点的、及每个指定点的 L_2 个指定方向的应变来描述,结构应变数据的变化就是 K_2 个指定点的所有被测应变的变化。每次共有 M_2 ($M_2=K_2 \times L_2$) 个应变测量值或计算值来表征结构应变。 M_2 是一个不小于 0 的整数。

[0019] 结构的被监测的角度数据由结构上 K_3 个指定点的、过每个指定点的 L_3 个指定直线的、每个指定直线的 H_3 个角度坐标分量来描述,结构角度的变化就是所有指定点的、所有指定直线的、所有指定的角度坐标分量的变化。每次共有 M_3 ($M_3=K_3 \times L_3 \times H_3$) 个角度坐标分量测量值或计算值来表征结构的角度信息。 M_3 是一个不小于 0 的整数。

[0020] 结构的被监测的形状数据由结构上 K_4 个指定点的、及每个指定点的 L_4 个指定方向的空间坐标来描述,结构形状数据的变化就是 K_4 个指定点的所有坐标分量的变化。每次共有 M_4 ($M_4=K_4 \times L_4$) 个坐标测量值或计算值来表征结构形状。 M_4 是一个不小于 0 的整数。

[0021] 综合上述被监测量,整个结构共有 M ($M=M_1+M_2+M_3+M_4$) 个被监测量,定义参量 K ($K=M_1+K_2+K_3+K_4$), K 和 M 不得小于被评估对象的数量 N 。由于 M 个被监测量是不同类型的,所以本发明称为“基于混合监测的识别受损索松弛索支座角位移的方法”。

[0022] 为方便起见,在本发明中将“结构的被监测的所有参量”简称为“被监测量”。

[0023] 本发明中用被监测量初始向量 C_o 表示索结构的所有被监测量的初始值组成的向量(见式(2))。要求在获得 A_0 的同时获得 C_o 。因在前述条件下,基于索结构的计算基准模型计算所得的被监测量可靠地接近于初始被监测量的实测数据,在后面的叙述中,将用同一符号来表示该计算值和实测值。

$$[0024] \quad \mathbf{C}_o = [\mathbf{C}_{o1} \quad \mathbf{C}_{o2} \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \mathbf{C}_{oj} \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \mathbf{C}_{oN}]^T \quad (2)$$

[0025] 式(2)中 C_{oj} ($j = 1, 2, 3, \dots, M; M \geq N$) 是索结构中第 j 个被监测量的初始量,该分量依据编号规则对应于特定的第 j 个被监测量。 T 表示向量的转置(后同)。

[0026] 本发明中用被监测量当前数值向量 C 是由索结构中所有被监测量的当前值组成的向量(定义见式(3))。

$$[0027] \quad \mathbf{C} = [\mathbf{C}_1 \quad \mathbf{C}_2 \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \mathbf{C}_j \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \mathbf{C}_N]^T \quad (3)$$

[0028] 式(3)中 C_j ($j = 1, 2, 3, \dots, M; M \geq N$) 是索结构中第 j 个被监测量的当前值,该分量 C_j 依据编号规则与 C_{oj} 对应于同一“被监测量”。

[0029] 第二步:建立索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC 的方法。

[0030] 在索结构的力学计算基准模型 A_0 的基础上进行若干次计算,计算次数数值上等于 N 。每一次计算假设只有一个被评估对象在原健康状态(用索结构初始健康状态向量 d_0 表示)的基础上再增加有单位损伤或单位角位移(本发明称为健康状态有单位变化,或简称有单位变化),具体的,如果该被评估对象是索系统中的一根支承索,那么就假设该支承索

增加单位损伤(例如取 5%、10%、20% 或 30% 等损伤为单位损伤),如果该被评估对象是一个支座的一个方向的角位移分量,就假设该支座在该角位移方向增加发生单位角位移(例如取十万分之一弧度、十万分之二弧度、十万分之三弧度等为单位角位移),用 D_{ui} 记录这一单位损伤或单位角位移,其中 i 表示假设增加发生单位损伤或单位角位移的被评估对象的编号。用“单位损伤或单位角位移向量 D_u ”(如式(4)所示)记录所有的单位损伤或单位角位移。每一次计算中出现单位损伤或单位角位移的被评估对象,每一次计算都利用力学方法(例如有限元法)计算索结构的所有被监测量的当前计算值,每一次计算得到的所有被监测量的当前计算值组成一个被监测量计算当前向量(当假设第 i 个被监测量有单位损伤或单位角位移时,可用式(5)表示被监测量计算当前向量 C_t^i);每一次计算得到被监测量计算当前向量减去被监测量初始向量后再除以该次计算所假设的单位损伤或单位角位移数值,所得向量就是此条件下(以有单位损伤或单位角位移的被评估对象的编号为标记)的被监测量变化向量(当第 i 个被评估对象有单位损伤或单位角位移时,用 δC_i 表示被监测量变化向量,定义见式(6),式(6)为式(5)减去式(2)所得),被监测量变化向量的每一元素表示由于计算时假定有单位损伤或单位角位移的那个被评估对象的单位变化而引起的该元素所对应的被监测量的改变量;有 N 个被评估对象就有 N 个被监测量变化向量,由于有 M 个被监测量,所以每个被监测量变化向量有 M 个元素,由这 N 个被监测量变化向量依次组成有 $M \times N$ 个元素的被监测量单位变化矩阵 ΔC , ΔC 的定义如式(7)所示。

$$[0031] \quad D_u = [D_{u1} \quad D_{u2} \quad \cdots \quad D_{u3} \quad \cdots \quad D_{uN}]^T \quad (4)$$

[0032] 式(4)中单位损伤或单位角位移向量 D_u 的元素 D_{ui} ($i=1, 2, 3, \dots, N$) 表示第 i 个被评估对象的单位损伤或单位角位移数值,向量 D_u 中的各元素的数值可以相同也可以不同。

$$[0033] \quad C_t^i = [C_{t1}^i \quad C_{t2}^i \quad \cdots \quad C_{t3}^i \quad \cdots \quad C_{tN}^i]^T \quad (5)$$

[0034] 式(5)中元素 C_{tj}^i ($i=1, 2, 3, \dots, N; j=1, 2, 3, \dots, M; M \geq N$) 表示由于第 i 个被评估对象有单位损伤或单位角位移时,依据编号规则所对应的第 j 个被监测量的当前计算量。

$$[0035] \quad \delta C_i = \frac{C_t^i - C_0}{D_{ui}} \quad (6)$$

$$[0036] \quad \Delta C = \begin{bmatrix} \Delta C_{11} & \Delta C_{12} & \cdots & \Delta C_{1i} & \cdots & \Delta C_{1N} \\ \Delta C_{21} & \Delta C_{22} & \cdots & \Delta C_{2i} & \cdots & \Delta C_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta C_{j1} & \Delta C_{j2} & \cdots & \Delta C_{ji} & \cdots & \Delta C_{jN} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta C_{M1} & \Delta C_{M2} & \cdots & \Delta C_{Mi} & \cdots & \Delta C_{MN} \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0037] 式(7)中 ΔC_{ji} ($i=1, 2, 3, \dots, N; j=1, 2, 3, \dots, M; M \geq N$) 表示仅由于第 i 个被评估对象有单位变化(单位损伤或单位角位移)而引起的、依据编号规则所对应的第 j 个被监测量的计算当前数值的变化(代数值)。被监测量变化向量 δC_i 实际上是

矩阵 ΔC 中的一列, ΔC 也可以用 δC_i 定义, 如式(8)中。

$$[0038] \quad \Delta C = [\delta C_1 \quad \delta C_2 \quad \cdots \cdots \quad \delta C_i \quad \cdots \cdots \quad \delta C_N] \quad (8)$$

[0039] 式(8)中 向量 δC_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) 表示由于第 i 个被评估对象有单位变化 D_{ui} 而引起的、所有被监测量的相对数值变化。矩阵 ΔC 的列(下标 i)的编号规则与前面向量 d_o 的元素的下标 i 的编号规则相同。

[0040] 第三步: 在索结构服役过程中, 不断实测获得索结构被监测量的当前数据, 组成索结构“被监测量的当前(计算或实测)数值向量 C ”。

[0041] 第四步: 识别索结构的当前健康状态(识别支座角位移、受损索和松弛索)。具体过程如下。

[0042] 被监测量当前数值向量 C (计算或实测)同被监测量初始向量 C_o 、被监测量单位变化矩阵 ΔC 和被评估对象当前健康状态向量 d_c 间的近似线性关系, 如式(9)或式(10)所示。

$$[0043] \quad C = C_o + \Delta C \bullet d_c \quad (9)$$

$$[0044] \quad C - C_o = \Delta C \bullet d_c \quad (10)$$

[0045] 式(9)和式(10)中被监测量的当前(计算或实测)数值向量 C 的定义类似于被监测量的初始数值向量 C_o 的定义, 见式(11); 索结构“被评估对象当前健康状态向量 d_c ”的定义见式(12)。

$$[0046] \quad C = [C_1 \quad C_2 \quad \cdots \cdots \quad C_j \quad \cdots \cdots \quad C_N]^T \quad (11)$$

[0047] 式(11)中元素 C_j ($j=1, 2, 3, \dots, M; M \geq N$) 是索结构的、依据编号规则所对应的编号为 j 的被监测量的当前数值。

$$[0048] \quad d_c = [d_{c1} \quad d_{c2} \quad \cdots \cdots \quad d_{ci} \quad \cdots \cdots \quad d_{cN}]^T \quad (12)$$

[0049] 式(12)中 d_{ci} ($i=1, 2, 3, \dots, N$) 是索结构第 i 个被评估对象的当前健康状态。向量 d_c 的元素的下标 i 的编号规则与矩阵 ΔC 的列的编号规则相同。

[0050] 当索实际损伤不太大时, 由于索结构材料仍然处在线弹性阶段, 索结构的变形也较小, 式(9)或式(10)所表示的这样一种线性关系同实际情况的误差较小, 误差可用误差向量 e (式(13)) 定义, 表示式(9)或式(10)所示线性关系的误差。

$$[0051] \quad e = abs(\Delta C \bullet d_c - C + C_o) \quad (13)$$

[0052] 式(13)中 $abs()$ 是取绝对值函数, 对括号内求得的向量的每一个元素取绝对值。

[0053] 由于式(9)或式(10)所表示的线性关系存在一定误差, 因此不能简单根据式(9)或式(10)和“被监测量的当前(实测)数值向量 C ”来直接求解得到“被评估对象当前健康状态向量 d_c ”。如果这样做了, 得到的向量 d_c 中的元素甚至会出现较大的负值, 也就是可能得到负损伤或负松弛, 这明显是不合理的。因此获得向量 d_c 的可接受的解(即带有合理误差, 但可以比较准确地确定支座角位移、确定受损索的位置及其损伤程度、确定松弛索的位置及其松弛程度)成为一个合理的解决方法, 可用式(14)来表达这一方法。

$$[0054] \quad abs(\Delta C \bullet d_c - C + C_o) \leq g \quad (14)$$

[0055] 式(14)中 $abs()$ 是取绝对值函数, 向量 g 描述偏离理想线性关系(式(9)或式

(10))

[0056] 的合理偏差,由式(15)定义。

$$[0057] \quad \mathbf{g} = [g_1 \ g_2 \ \cdots \ \cdots \ g_j \ \cdots \ \cdots \ g_M]^T \quad (15)$$

[0058] 式(15)中 g_j ($j=1, 2, 3, \dots, M$) 描述了偏离式(9)或式(10)所示的理想线性关系的最大允许偏差。向量 g 可根据式(13)定义的误差向量 e 试算选定。

[0059] 在“被监测量的初始数值向量 C_o ”(实测或计算得到)、“索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC ”(计算得到)和“被监测量的当前数值向量 C ”(实测得到)已知时,可以利用合适的算法(例如多目标优化算法)求解式(14),获得“被评估对象当前健康状态向量 d_c ”的可接受的解,然后“当前实际健康状态向量 d ”(定义见式(16))的元素可以根据式(17)计算得到,也就是得到了“当前实际健康状态向量 d ”,当前实际健康状态向量 d 表达了计入初始健康状态的索结构的实际健康状态。

$$[0060] \quad \mathbf{d} = [d_1 \ d_2 \ \cdots \ \cdots \ d_i \ \cdots \ \cdots \ d_N]^T \quad (16)$$

[0061] 式(16)中 d_i ($i=1, 2, 3, \dots, N$) 表示索结构的第 i 个被评估对象的当前实际健康状态,如果该被评估对象是索系统中的一根索(或拉杆),那么 d_i 表示其当前实际损伤, d_i 为 0 时表示无损伤,为 100% 时表示该索彻底丧失承载能力,介于 0 与 100% 之间时表示丧失相应比例的承载能力;确定受损索之后对所有的受损索进行无损检测,经无损检测查明该索没有损伤,那么 d_i 表示该索与 d_i 损伤值力学等效的松弛,由此就确定了松弛索,具体松弛量的计算方法在下面说明;如果该被评估对象是一个支座的一个角位移分量,那么 d_i 表示其当前角位移数值。向量 d 的元素的编号规则与式(1)中向量 d_o 的元素的编号规则相同。

$$[0062] \quad d_i = 1 - (1 - d_{oi})(1 - d_{ci}) \quad (17)$$

[0063] 式(17)中 d_{oi} ($i=1, 2, 3, \dots, N$) 是向量 d_o 的第 i 个元素, d_{ci} 是向量 d_c 的第 i 个元素。

[0064] 下面叙述得到了索结构当前实际健康状态向量 d 后,如何确定松弛索的位置和松弛程度。

[0065] 设索系统中共有 Q 根支承索,结构索力数据由 Q 根支承索的索力来描述。可用“初始索力向量 F_o ”表示索结构中所有支承索的初始索力(定义见式(18))。因为基于索结构的计算基准模型计算所得的初始索力可靠地接近于初始索力的实测数据,在后面的叙述中,将用同一符号来表示该计算值和实测值。

$$[0066] \quad \mathbf{F}_o = [F_{o1} \ F_{o2} \ \cdots \ \cdots \ F_{ok} \ \cdots \ \cdots \ F_{oQ}]^T \quad (18)$$

[0067] 式(18)中 F_{ok} ($k=1, 2, 3, \dots, Q$) 是索结构中第 k 根支承索的初始索力,该元素依据编号规则对应于指定支承索的索力。向量 F_o 是常量。在建立索结构的初始力学计算基准模型 A_o 时使用了向量 F_o 。依据定义,向量 C_o 包括了向量 F_o 。

[0068] 本发明中用“当前索力向量 F ”表示实测得到的索结构中所有支承索的当前索力(定义见式(19))。

$$[0069] \quad \mathbf{F} = [F_1 \ F_2 \ \cdots \ \cdots \ F_k \ \cdots \ \cdots \ F_Q]^T \quad (19)$$

[0070] 式(19)中 F_k ($k = 1, 2, 3, \dots, Q$) 是索结构中第 k 根支承索的当前索力。

[0071] 本发明中,在支承索初始状态(无损伤、无松弛)下,且支承索处于自由状态(自由状态指索力为 0,后同)时,支承索的长度称为初始自由长度,用“初始自由长度向量 I_o ”表示索结构中所有支承索的初始自由长度(定义见式(20))。

$$[0072] I_o = [I_{o1} \ I_{o2} \ \dots \ \dots \ I_{ok} \ \dots \ \dots \ I_{oQ}]^T \quad (20)$$

[0073] 式(20)中 I_{ok} ($k=1, 2, 3, \dots, Q$) 是索结构中第 k 根支承索的初始自由长度。向量 I_o 是常量,在开始时确定后,就不再变化。

[0074] 本发明中,用“当前自由长度向量 I ”表示索结构中所有支承索的当前自由长度(定义见式(21))。

$$[0075] I = [I_1 \ I_2 \ \dots \ \dots \ I_k \ \dots \ \dots \ I_Q]^T \quad (21)$$

[0076] 式(21)中 I_k ($k = 1, 2, 3, \dots, Q$) 是索结构中第 k 根支承索的当前自由长度。

[0077] 本发明中,用“自由长度改变向量 ΔI ”(或称支承索当前松弛程度向量)表示索结构中所有支承索的自由长度的改变量(定义见式(22)和式(23))。

$$[0078] \Delta I = [\Delta I_1 \ \Delta I_2 \ \dots \ \dots \ \Delta I_k \ \dots \ \dots \ \Delta I_Q]^T \quad (22)$$

[0079] 式(22)中 ΔI_k ($k = 1, 2, 3, \dots, Q$) 是索结构中第 k 根支承索的自由长度的改变量,其定义见式(23), ΔI_k 不为 0 的索为松弛索, ΔI_k 的数值为索的松弛量,并表示索系统第 k 根支承索的当前松弛程度,也是调整索力时该索的索长调整量。

$$[0080] \Delta I_k = I_k - I_{ok} \quad (23)$$

[0081] 向量 F_o 、 d^f 、 F_k 、 I_o 、 I 、 ΔI 的编号规则相同。

[0082] 确定松弛索之后,在本发明中通过将松弛索同受损索进行力学等效来进行松弛索的松弛程度识别,等效的力学条件是:

[0083] 一、两等效的索的无松弛和无损伤时的初始自由长度、几何特性参数及材料的力学特性参数相同;

[0084] 二、松弛或损伤后,两等效的松弛索和损伤索的索力和变形后的总长相同。

[0085] 满足上述两个等效条件时,这样的两根支承索在结构中的力学功能就是完全相同的,即如果用等效的受损索代替松弛索后,索结构不会发生任何变化,反之亦然。

[0086] 本发明中,同编号为 k 的支承索(其当前松弛程度用 ΔI_k 定义,对应于向量 F_o 、 d^f 、 F_k 、 I_o 、 I 、 ΔI 的第 k 个元素)进行等效的受损的支承索的当前实际健康状态用 d_k^e 表示(d_k^e 是支承索当前实际健康状态向量 d^e 的第 k 个元素)。松弛的第 k 个支承索的当前松弛程度 ΔI_k (ΔI_k 的定义见式(22))同等效的受损索的当前实际健康状态 d_k^e 之间的关系由前述两项力学等效条件确定。 ΔI_k 同 d_k^e 之间的具体关系可以采用多种方法实现,例如可以根据前述等效条件确定(参见式(24)),也可采用基于 Ernst 等效弹性模量代替式(24)中的 E 进行修正后确定(参见式(25)),也可以采用基于有限元法的试算法等其它方法来确定。

$$[0087] \Delta I_k = \frac{d_k^e}{1-d_k^e} \frac{F_k}{EA+F_k} I_{ok} \quad (24)$$

$$[0088] \quad \Delta I_k = \frac{d_k^*}{1-d_k^*} \left[\frac{E_k}{\frac{(\omega_k l_{kx})^2 A_k E_k}{1 + \frac{12(F_k)^3}{l_{kx}}}} \right] A_k + K_k \quad (25)$$

[0089] 式(24)和式(25)中 E_k 是该支承索的弹性模量, A_k 是该支承索的横截面面积, F_k 是该支承索的当前索力, d_k^* 是该支承索的当前实际健康状态, ω_k 是该支承索的单位长度的重量, I_{kx} 是该支承索的两个支承端点的水平距离。式(25)中 [] 内的项是该支承索的 Ernst 等效弹性模量, 由式(24)或式(25)可以就可以确定支承索当前松弛程度向量 ΔI 。式(25)是对式(24)的修正。

[0090] 本发明的第二部分: 健康监测系统的软件和硬件部分。硬件部分包括监测系统(监测被监测量、监测索结构支座角位移、监测索力、监测支承索两支承端点的水平距离)、信号采集器和计算机等。要求实时或准实时监测每一个被监测量、监测每一个支承索的索力、监测每一个支承索两支承端点的水平距离。软件应当具用下列功能: 软件部分应当能够完成本发明的第一部分所设定的过程, 即完成本发明中所需要的、可以用计算机实现的监测、记录、控制、存储、计算、通知、报警等功能。

[0091] 本发明方法具体包括:

[0092] a. 为叙述方便起见, 本发明统一称被评估的支承索和支座角位移分量为被评估对象, 设被评估的支承索的数量和支座角位移分量的数量之和为 N , 即被评估对象的数量为 N ; 确定被评估对象的编号规则, 按此规则将索结构中所有的被评估对象编号, 该编号在后续步骤中将用于生成向量和矩阵; 本发明用变量 i 表示这一编号, $i=1, 2, 3, \dots, N$;

[0093] b. 确定混合监测时指定的将被监测索力的支承索, 设索系统中共有 Q 根索, 结构的被监测的索力数据由结构上 M_1 个指定索的 M_1 个索力数据来描述, 结构索力的变化就是所有指定索的索力的变化; 每次共有 M_1 个索力测量值或计算值来表征结构的索力信息; M_1 是一个不小于 0 的整数; 确定混合监测时指定的将被监测应变的被测量点, 结构的被监测的应变数据可由结构上 K_2 个指定点的、及每个指定点的 L_2 个指定方向的应变来描述, 结构应变数据的变化就是 K_2 个指定点的所有被测应变的变化; 每次共有 M_2 个应变测量值或计算值来表征结构应变, M_2 为 K_2 和 L_2 之积; M_2 是不小于 0 的整数; 确定混合监测时指定的将被监测角度的被测量点, 结构的角度数据由结构上 K_3 个指定点的、过每个指定点的 L_3 个指定直线的、每个指定直线的 H_3 个角度坐标分量来描述, 结构角度的变化就是所有指定点的、所有指定直线的、所有指定的角度坐标分量的变化; 每次共有 M_3 个角度坐标分量测量值或计算值来表征结构的角度信息, M_3 为 K_3 , L_3 和 H_3 之积; M_3 是一个不小于 0 的整数; 确定混合监测时指定的将被监测的形状数据, 结构的被监测的形状数据由结构上 K_4 个指定点的、及每个指定点的 L_4 个指定方向的空间坐标来描述, 结构形状数据的变化就是 K_4 个指定点的所有坐标分量的变化; 每次共有 M_4 个坐标测量值或计算值来表征结构形状, M_4 为 K_4 和 L_4 之积; M_4 是一个不小于 0 的整数; 综合上述混合监测的被监测量, 整个结构共有 M 个被监测量, M 为 M_1 , M_2 , M_3 和 M_4 之和, 定义参量 K , K 为 M_1 , K_2 , K_3 和 K_4 之和, K 和 M 不得小于被评估对象的数量 N ; 由于 M 个被监测量是不同类型的, 所以本发明称为“基于混合监测的识别受损索松弛索支座角位移的方法”; 为方便起见, 在本发明中将本步所列出的“混合监测时

结构的被监测的所有参量”简称为“被监测量”；

[0094] c. 利用索的无损检测数据等能够表达索的健康状态的数据建立初始健康状态向量 d_o 。如果没有索的无损检测数据及其他能够表达索的健康状态的数据时, 向量 d_o 的各元素数值取 0。

[0095] d. 在建立初始健康状态向量 d_o 的同时, 直接测量计算得到索结构的所有被监测量的初始数值, 组成被监测量的初始数值向量 C_o ；

[0096] e. 在建立初始健康状态向量 d_o 和被监测量的初始数值向量 C_o 的同时, 直接测量计算得到所有支承索的初始索力, 组成初始索力向量 F_o ; 同时, 依据结构设计数据、竣工数据得到所有支承索的初始自由长度, 组成初始自由长度向量 I_o ; 同时, 依据结构设计数据、竣工数据或实测得到索结构的初始几何数据; 同时, 实测或根据结构设计、竣工资料得到所有索的弹性模量、密度、初始横截面面积；

[0097] f. 根据索结构的设计图、竣工图和索结构的实测数据、索的无损检测数据和初始索结构支座坐标数据建立索结构的力学计算基准模型 A_o ；

[0098] g. 在力学计算基准模型 A_o 的基础上进行若干次力学计算, 通过计算获得索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC ；

[0099] h. 实测得到索结构的所有支承索的当前索力, 组成当前索力向量 F ; 同时, 实测得到索结构的所有指定被监测量的当前实测数值, 组成“被监测量的当前数值向量 C ”; 实测计算得到所有支承索的两个支承端点的空间坐标, 两个支承端点的空间坐标在水平方向分量的差就是两个支承端点水平距离；

[0100] i. 定义待求的被评估对象当前健康状态向量 d_c 和当前实际健康状态向量 d ; 向量 d_o 、 d_c 和 d 的元素个数等于被评估对象的数量, d_o 、 d_c 和 d 的元素和被评估对象之间是一一对应关系, d_o 、 d_c 和 d 的元素数值代表对应被评估对象的损伤程度或角位移、或与松弛程度力学等效的损伤程度；

[0101] j. 依据“被监测量的当前数值向量 C ”同“被监测量的初始数值向量 C_o ”、“索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC ”和“被评估对象当前健康状态向量 d_c ”间存在的近似线性关系, 该近似线性关系可表达为式 1, 式 1 中除 d_c 外的其它量均为已知, 求解式 1 就可以算出被评估对象当前健康状态向量 d_c ；

$$C = C_o + \Delta C \cdot d_c \quad \text{式 1}$$

[0103] k. 利用式 2 表达的当前实际健康状态向量 d 的元素 d_j 同初始健康状态向量 d_o 的元素 d_{oj} 和被评估对象当前健康状态向量 d_c 的元素 d_{cj} 间的关系, 计算得到当前实际健康状态向量 d 的所有元素。

$$d_j = 1 - (1 - d_{oj})(1 - d_{cj}) \quad \text{式 2}$$

[0105] 式 2 中 $j=1, 2, 3, \dots, N$ ；

[0106] 由于当前实际健康状态向量 d 的元素数值代表对应被评估对象的当前实际健康状态, 如果该被评估对象是索系统中的一根索, 那么该元素表示其当前实际损伤, 如果该被评估对象是一个支座的一个角位移分量, 那么该元素表示其当前角位移数值; 当前实际健康状态向量 d 的元素数值为 0 时, 表示对应的支承索无损伤无松弛、或对应的支座角位移分量为 0, 不为 0 的元素对应于有问题的支承索或有角位移的支座; 由此确定了有问题的支承

索,确定了支座角位移;

[0107] 1. 从第 k 步中识别出的有问题的支承索中通过无损检测方法鉴别出受损索,剩下的就是松弛索;

[0108] m. 从当前实际健康状态向量 d 中取出支承索对应的元素组成支承索当前实际健康状态向量 d^e , 支承索当前实际健康状态向量 d^e 有 Q 个元素, 表示 Q 根支承索的当前实际损伤值, d^e 元素的编号规则与向量 F_o 的编号规则相同, 即 d^e 和 F_o 相同编号的元素表示相同支承索的信息;

[0109] n. 利用在第 m 步获得的支承索当前实际健康状态向量 d^e 得到松弛索的当前实际损伤程度, 利用在第 h 步获得的当前索力向量 F , 利用在第 h 步获得的所有支承索的两个支承端点的空间坐标, 利用在第 e 步获得的初始自由长度向量 I_o , 利用在第 e 步获得的所有索的弹性模量、密度、初始横截面面积数据, 通过将松弛索同受损索进行力学等效来计算松弛索的、与当前实际损伤程度等效的松弛程度, 等效的力学条件是:一、两等效的索的无松弛和无损伤时的初始自由长度、几何特性参数、密度及材料的力学特性参数相同;二、松弛或损伤后, 两等效的松弛索和损伤索的索力和变形后的总长相同;满足上述两个等效条件时, 这样的两根支承索在结构中的力学功能就是完全相同的, 即如果用等效的松弛索代替受损索后, 索结构不会发生任何变化, 反之亦然;依据前述力学等效条件求得那些被判定为松弛索的松弛程度, 松弛程度就是支承索自由长度的改变量, 也就是确定了那些需调整索力的支承索的索长调整量;这样就实现了支承索的松弛识别;计算时所需索力由当前索力向量 F 对应元素给出;

[0110] 在步骤 g 中, 在力学计算基准模型 A_o 的基础上进行若干次力学计算, 通过计算获得索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC 的具体方法为:

[0111] g1. 在索结构的力学计算基准模型 A_o 的基础上进行若干次力学计算, 计算次数数值上等于 N ;每一次计算假设只有一个被评估对象在原健康状态的基础上再增加有单位损伤或单位角位移, 为叙述方便本发明合称单位损伤和单位角位移为单位变化;具体的, 如果该被评估对象是索系统中的一根支承索, 那么就假设该支承索在原有健康状态的基础上再增加单位损伤, 如果该被评估对象是一个支座的一个方向的角位移分量, 就假设该支座在该角位移方向在原有健康状态的基础上再增加发生单位角位移, 用 D_{ui} 记录这一单位损伤或单位角位移, 其中 i 表示发生单位损伤或单位角位移的被评估对象的编号;每一次计算中出现单位损伤或单位角位移的被评估对象不同于其它次计算中出现单位损伤或单位角位移的被评估对象, 每一次计算都利用力学方法计算索结构的所有被监测量的当前计算值, 每一次计算得到的所有被监测量的当前计算值组成一个被监测量计算当前向量;

[0112] g2. 每一次计算得到的被监测量计算当前向量减去被监测量初始向量后再除以该次计算所假设的单位损伤或单位角位移数值, 得到一个被监测量变化向量, 有 N 个被评估对象就有 N 个被监测量变化向量;

[0113] g3. 由这 N 个被监测量变化向量依次组成有 N 列的索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC ;索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC 的每一列对应于一个被监测量变化向量。

[0114] 有益效果:本发明公开的系统和方法在索结构支座出现角位移的情况下、在有较多的索同步受损或松弛的条件下可以非常准确地监测评估出索结构的健康状态(包括所有支座角位移、所有松弛索和受损索的位置、及其松弛程度或损伤程度)。本发明公开的系统

和方法对索结构的有效健康监测是非常有益的。

具体实施方式

[0115] 本发明公开了一种能够合理有效地监测索结构的支座角位移、识别受损索松弛索的系统和方法。本发明的实施例的下面说明实质上仅仅是示例性的，并且目的绝不在限制本发明的应用或使用。

[0116] 在索结构支座出现角位移、出现受损索、松弛索的情况下，本发明采用一种算法，该算法用于监测索结构的健康状态(包括识别支座角位移、受损索、松弛索)。具体实施时，下列步骤是可采取的各种步骤中的一种。

[0117] 第一步：为叙述方便起见，本发明统一称被评估的支承索和支座角位移分量为被评估对象，设被评估的支承索的数量和支座角位移分量的数量之和为 N ，即被评估对象的数量为 N ；确定被评估对象的编号规则，按此规则将索结构中所有的被评估对象编号，该编号在后续步骤中将用于生成向量和矩阵；本发明用变量 i 表示这一编号， $i=1, 2, 3, \dots, N$ 。

[0118] 确定混合监测时指定的将被监测索力的支承索，设索系统中共有 Q 根索，结构的被监测的索力数据由结构上 M_1 个指定索的 M_1 个索力数据来描述，结构索力的变化就是所有指定索的索力的变化。每次共有 M_1 个索力测量值或计算值来表征结构的索力信息。 M_1 是一个不小于 0 的整数。实际选定被监测索力的索时，可以选择那些索力易于测量的索为被监测索。

[0119] 确定混合监测时指定的将被监测应变的被测量点，结构的被监测的应变数据可由结构上 K_2 个指定点的、及每个指定点的 L_2 个指定方向的应变来描述，结构应变数据的变化就是 K_2 个指定点的所有被测应变的变化。每次共有 M_2 个应变测量值或计算值来表征结构应变， M_2 为 K_2 和 L_2 之积。 M_2 是一个不小于 0 的整数。每一个将被监测应变的被测量点可以就是每一根索的固定端点(例如是斜拉桥的拉索在桥梁上的固定端)附近的一个点，该指定点还可以是结构支座附近的一个点，该点一般不应当是应力集中点，以避免出现过大的应变测量值，这些点一般也不应当全部是混合监测时指定的被监测索力的索的固定端点或在其附近。

[0120] 确定混合监测时指定的将被监测角度的被测量点，结构的被监测的角度数据由结构上 K_3 个指定点的、过每个指定点的 L_3 个指定直线的、每个指定直线的 H_3 个角度坐标分量来描述，结构角度的变化就是所有指定点的、所有指定直线的、所有指定的角度坐标分量的变化。每次共有 M_3 个角度坐标分量测量值或计算值来表征结构的角度信息， M_3 为 K_3, L_3 和 H_3 之积。 M_3 是一个不小于 0 的整数。每一个指定点可以就是每一根索的固定端点(例如是斜拉桥的拉索在桥面上的固定端)或其附近的一个点，该指定点还可以是结构支座附近的一个点，被监测角度数据的点一般不应该全部选择为“混合监测中指定的被监测索力的索的固定端点或在其附近的点”和“混合监测中指定的被监测应变的点或在其附近的点”；在每一指定点可以仅仅测量一个指定直线的一个角度坐标，例如测量过指定点的结构表面法线或切线相对于重力加速度方向的角度坐标，这里实际上就是倾角测量。

[0121] 确定混合监测时指定的将被监测的形状数据，结构的被监测的形状数据由结构上 K_4 个指定点的、及每个指定点的 L_4 个指定方向的空间坐标来描述，结构形状数据的变化就是 K_4 个指定点的所有坐标分量的变化。每次共有 M_4 个坐标测量值或计算值来表征结构形

状, M_4 为 K_4 和 L_4 之积。 M_4 是一个不小于 0 的整数。每一个指定点可以就是每一根索的固定端点(例如是斜拉桥的拉索在桥梁上的固定端),该指定点还可以是结构支座附近的一个点,或者直接就是结构支座支点;这里选定的被监测点不应该全部选用“混合监测中指定的被监测索力的索的固定端点或在其附近的点”、“混合监测中指定的被监测应变的点或在其附近的点”和“混合监测中指定的被监测角度数据的点或在其附近的点”。

[0122] 综合上述被监测量,整个结构就混合监测而言共有 M 个被监测量, M 为 M_1, M_2, M_3 和 M_4 之和,定义参量 K , K 为 M_1, K_2, K_3 和 K_4 之和, K 和 M 不得小于被评估对象的数量 N 。为方便起见,在本发明中将本步所列出的“混合监测时结构的被监测的所有参量”简称为“被监测量”。

[0123] 第二步:利用索的无损检测数据等能够表达索的健康状态的数据建立初始健康状态向量 d_o 。如果没有索的无损检测数据及其他能够表达索的健康状态的数据时,或者可以认为结构初始状态为无损伤、无松弛状态时,向量 d_o 的各元素数值取 0。

[0124] 第三步:在建立初始健康状态向量 d_o 的同时,直接测量计算得到索结构的所有被监测量的初始数值,组成“被监测量的初始数值向量 C_o ”;同时,直接测量计算得到索结构的所有支承索的初始索力,组成“初始索力向量 F_o ”;同时,依据结构设计数据、竣工数据得到所有索的初始自由长度,组成“初始自由长度向量 I_o ”;同时,实测或根据结构设计、竣工资料得到所有索的弹性模量、密度、初始横截面面积。

[0125] 第四步:在建立初始健康状态向量 d_o 的同时,可以采用成熟的测量方法进行索力测量、应变测量、角度测量和空间坐标测量。直接测量或测量后计算得到索结构初始几何形状数据(对于斜拉桥就是其初始桥型数据),索结构的初始几何形状数据可以是所有索的端点的空间坐标数据加上结构上一系列的点的空间坐标数据,目的在于根据这些坐标数据确定索结构的几何特征。对斜拉桥而言,初始几何形状数据可以是所有索的端点的空间坐标数据加上桥梁两端上若干点的空间坐标数据,这就是所谓的桥型数据。依据索结构竣工之时的索结构的实测数据,该实测数据包括索结构形状数据、索力数据、拉杆拉力数据、索结构支座坐标数据、索结构支座角坐标数据、索结构模态数据、所有索的弹性模量、密度、初始横截面面积等实测数据,索的无损检测数据等能够表达索的健康状态的数据,依据设计图和竣工图,利用力学方法建立索结构的初始力学计算基准模型 A_o ;如果没有索结构竣工之时的结构的实测数据,那么就在建立健康监测系统前对该索结构进行实测,同样得到索结构的实测数据,根据此数据和索结构的设计图、竣工图,同样利用力学方法建立索结构的初始力学计算基准模型 A_o ;不论用何种方法获得 A_o ,基于 A_o 计算得到的索结构计算数据必须非常接近其实测数据,其间的差异不得大于 5%; A_o 是不变的; A_o 对应的索结构的健康状态由 d_o 描述;

[0126] 第五步:安装索结构健康监测系统的硬件部分。硬件部分至少包括:被监测量监测系统(例如含角度测量分系统、索力测量分系统、应变测量分系统、空间坐标测量分系统、信号调理器等)、索力监测系统(例如含加速度传感器、信号调理器等)、各支承索两支承端点的水平距离监测系统、信号(数据)采集器、计算机和通信报警设备。每一个被监测量、每一个支承索的索力和每一根支承索两支承端点的水平距离都必须被监测系统监测到,监测系统将监测到的信号传输到信号(数据)采集器;信号经信号采集器传递到计算机;计算机则负责运行索结构的索系统的健康监测软件,包括记录信号采集器传递来的信号;当监测

到索结构健康状态有变化时,计算机控制通信报警设备向监控人员、业主和(或)指定的人员报警。

[0127] 第六步:编制并在监控计算机上安装运行索结构的健康监测系统软件。该软件将完成本发明“基于混合监测的识别受损伤索松弛索支座角位移的方法”任务所需要的监测、记录、控制、存储、计算、通知、报警等功能(即本具体实施方法中所有可以用计算机完成的工作),并能定期或由人员操作健康监测系统生成索结构健康情况报表,还能依据设定的条件(例如损伤达到某一值),自动通知或提示监控人员通知特定的技术人员完成必要的计算工作。

[0128] 第七步:在力学计算基准模型 A_o 的基础上进行若干次力学计算,通过计算获得索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC ;具体方法为:在索结构的力学计算基准模型 A_o 的基础上进行若干次力学计算,计算次数数值上等于 N ;每一次计算假设只有一个被评估对象在原健康状态(用索结构初始健康状态向量 d_o 表示)的基础上再增加有单位损伤或单位角位移,为叙述方便本发明合称单位损伤和单位角位移为单位变化,具体的,如果该被评估对象是索系统中的一根支承索,那么就假设该支承索在原有健康状态的基础上再增加单位损伤,如果该被评估对象是一个支座的一个方向的角位移分量,就假设该支座在该角位移方向在原有健康状态的基础上再增加发生单位角位移,用 D_{ui} 记录这一单位损伤或单位角位移,其中 i 表示发生单位损伤或单位角位移的被评估对象的编号;每一次计算中出现单位损伤或单位角位移的被评估对象不同于其它次计算中出现单位损伤或单位角位移的被评估对象,每一次计算都利用力学方法计算索结构的所有被监测量的当前计算值,每一次计算得到的所有被监测量的当前计算值组成一个被监测量计算当前向量(当假设第 i 个被监测量有单位损伤或单位角位移时,可用被监测量计算当前向量 C_t^i 表示);每一次计算得到的被监测量计算当前向量减去被监测量初始向量后再除以该次计算所假设的单位损伤或单位角位移数值,得到一个被监测量变化向量,有 N 个被评估对象就有 N 个被监测量变化向量;由这 N 个被监测量变化向量依次组成有 N 列的索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC ;索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC 的每一列对应于一个被监测量变化向量。在本步骤中及其后给各向量的元素编号时,应同本发明中其它向量使用同一编号规则,这样可以保证本步骤中各向量中的任意一个元素,同其它向量中的、编号相同的元素,表达了同一被监测量或同一被评估对象的相关信息。

[0129] 第八步:建立线性关系误差向量 e 和向量 g 。利用前面的数据(“被监测量的初始数值向量 C_o ”、“索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC ”),在第七步进行每一次计算的同时,即在每一次计算假设只有一个被评估对象在原健康状态 d_o 的基础上再增加有单位损伤或单位角位移,计算得到一个被监测量计算当前向量(当假设第 i 个被监测量有单位损伤或单位角位移时,用被监测量计算当前向量 C_t^i 表示)的同时,每一次计算组成一个“健康状态向量 d_t ”,健康状态向量 d_t 的元素个数等于被评估对象的数量,健康状态向量 d_t 的所有元素中只有一个元素的数值取每一次计算中假设增加单位变化的被评估对象的单位变化值, d_t 的其它元素的数值取 0; C_t^i 、 C_o 、 d_t 的编号规则相同,也与 ΔC 的行的编号规则相同;将 C_t^i 、 C_o 、 ΔC 、 d_t 带入式(13)(需注意的,式(13)中 C 用 C_t^i 带入, d_c 用 d_t 带入),得到一个线性关系误差向量 e ,每一次计算得到一个线性关系误差向量 e ;有 N 个被评估对象就有 N 次计算,就有 N 个线性关系误差向量 e ,将这 N 个线性关系误差向量 e 相加后得到一个向量,将此向量

的每一个元素除以 N 后得到的新向量就是最终的线性关系误差向量 e 。向量 g 等于最终的误差向量 e 。将向量 g 保存在运行健康监测系统软件的计算机硬盘上,供健康监测系统软件使用。

[0130] 第九步:将“初始索力向量 F_0 ”、“被监测量的初始数值向量 C_0 ”、“初始自由长度向量 L_0 ”、“索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC ”和所有索的弹性模量、初始横截面面积、索的单位长度重量等参数以数据文件的方式保存在运行健康监测系统软件的计算机硬盘上。

[0131] 第十步:实测得到索结构的所有支承索的当前索力,组成当前索力向量 F ;同时,实测得到索结构的所有指定被监测量的当前实测数值,组成“被监测量的当前数值向量 C ”。实测计算得到所有支承索的两个支承端点的空间坐标,两个支承端点的空间坐标在水平方向分量的差就是两个支承端点水平距离。

[0132] 第十一步:依据“被监测量的当前(计算或实测)数值向量 C ”同“被监测量的初始数值向量 C_0 ”、“索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC ”和“被评估对象当前健康状态向量 d_c ”间存在的近似线性关系(见式(9)),按照多目标优化算法计算索系统被评估对象当前健康状态向量 d_c 的非劣解。

[0133] 可以采用的多目标优化算法有很多种,例如:基于遗传算法的多目标优化、基于人工神经网络的多目标优化、基于粒子群的多目标优化算法、基于蚁群算法的多目标优化、约束法(Constrain Method)、加权法(Weighted Sum Method)、目标规划法(Goal Attainment Method)等等。由于各种多目标优化算法都是常规算法,可以方便地实现,本实施步骤仅以目标规划法为例给出求解被评估对象当前健康状态向量 d_c 的过程,其它算法的具体实现过程可根据其具体算法的要求以类似的方式实现。

[0134] 按照目标规划法,式(9)可以转化成式(26)和式(27)所示的多目标优化问题,式(26)中 γ 是一个实数, R 是实数域,空间区域 Ω 限制了向量 d_c 的每一个元素的取值范围(本实施例要求向量 d_c 的对应于支承索每一个元素不小于 0,不大于 1;对应于支座角位移的每一个元素根据支座约束范围选定)。式(26)的意思是寻找一个绝对值最小的实数 γ ,使得式(27)得到满足。式(27)中 $G(d_c)$ 由式(28)定义,式(27)中加权向量 W 与 γ 的积表示式(27)中 $G(d_c)$ 与向量 g 之间允许的偏差, g 的定义参见式(15),其值在第八步计算得到。实际计算时向量 W 可以与向量 g 相同。目标规划法的具体编程实现已经有通用程序可以直接采用。按照目标规划法就可以求得当前名义损伤向量 d_c^* 。

$$\begin{aligned} &\text{minimize}_{\gamma} \\ &\gamma \in R, d_c \in \Omega \end{aligned} \tag{26}$$

$$G(d_c) - W \gamma \leq g \tag{27}$$

$$G(d_c) = \text{abs}(\Delta C \cdot d_c - C + C_0) \tag{28}$$

[0138] 求得被评估对象当前健康状态向量 d_c 后,可依据式(17)得到的当前实际健康状态向量 d 每一个元素,当前实际健康状态向量 d 就是带有合理误差、但可以比较准确地识别有问题的索(可能是受损也可能是松弛)、可以比较准确地确定所有支座角位移的解。若解得的当前实际健康状态向量 d 的每一个元素对应于一个被评估对象的健康状态,如果该被评估对象是索系统中的一根索(或拉杆),那么该元素的数值表示其当前损伤或松弛,如果该被评估对象是一个支座的一个角位移分量,那么该元素的数值表示其当前角位移数值。

[0139] 第十二步：识别受损索和松弛索。由于当前实际健康状态向量 d 的元素数值代表对应被评估对象的当前实际健康状态，如果 d 的一个元素 d_i 对应于索系统中的一根索（或拉杆），那么 d_i 表示其当前可能的实际损伤， d_i 为 0 时表示无损伤，为 100% 时表示该索彻底丧失承载能力，介于 0 与 100% 之间时表示丧失相应比例的承载能力，但这根索究竟是发生了损伤还是发生了松弛，需进行鉴别。鉴别的方法多种多样，可以通过去除支承索的保护层，对支承索进行目视鉴别，或者借助光学成像设备进行目视鉴别，也可以通过无损检测方法对支承索是否受损进行鉴别，超声波探伤就是一种目前广泛使用的无损检测方法。鉴别后那些没有发现损伤且 d_i 数值不为 0 的支承索就是发生了松弛的索，就是需调整索力的索，依据式(24)或式(25)可以求得这些索的松弛程度（即索长调整量）。这样就实现了受损索识别和松弛索识别。

[0140] 第十三步：识别支座角位移。当前实际健康状态向量 d 的对应于支座角位移的元素数值就是支座角位移量。

[0141] 第十四步：健康监测系统中的计算机定期自动或由人员操作健康监测系统生成索系统健康情况报表。

[0142] 第十五步：在指定条件下，健康监测系统中的计算机自动操作通信报警设备向监控人员、业主和（或）指定的人员报警。