

(19) 中华人民共和国国家知识产权局



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105004556 A

(43) 申请公布日 2015. 10. 28

(21) 申请号 201510439491. 4

(22) 申请日 2015. 07. 23

(71) 申请人 东南大学

地址 211189 江苏省南京市江宁区东南大学
路 2 号

(72) 发明人 韩玉林 韩佳邑

(74) 专利代理机构 南京瑞弘专利商标事务所

(普通合伙) 32249

代理人 杨晓玲

(51) Int. Cl.

G01M 99/00(2011. 01)

G01B 21/02(2006. 01)

G01L 5/00(2006. 01)

G01K 13/00(2006. 01)

权利要求书9页 说明书17页

(54) 发明名称

精简索力监测受损索载荷线位移识别方法

(57) 摘要

精简索力监测受损索载荷线位移识别方法基于索力监测，通过监测索结构温度和环境温度来决定是否需要更新索结构的力学计算基准模型，得到计入索结构温度和环境温度的索结构的力学计算基准模型，在此模型的基础上计算获得单位损伤被监测量数值变化矩阵。依据被监测量当前数值向量同被监测量当前初始数值向量、单位损伤被监测量数值变化矩阵和待求的被评估对象当前名义损伤向量间存在的近似线性关系算出被评估对象当前名义损伤向量的非劣解，据此可以识别出核心被评估对象的健康状态。

1. 精简索力监测受损索载荷线位移识别方法, 其特征在于所述方法包括:

a. 当索结构承受的载荷虽有变化, 但索结构正在承受的载荷没有超出索结构初始许用载荷时, 本方法适用; 索结构初始许用载荷指索结构在竣工时的许用载荷, 能够通过常规力学计算获得; 本方法统一称被评估的支座线位移分量、支承索和载荷为被评估对象, 设被评估的支座线位移分量的数量、支承索的数量和载荷的数量之和为 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 k 表示这一编号, $k=1, 2, 3, \dots, N$; 本方法用名称“核心被评估对象”专指“被评估对象”中的被评估的支承索和支座线位移分量, 设被评估的支承索和支座线位移分量的数量之和为 P, 即核心被评估对象的数量为 P, 本方法用名称“次要被评估对象”专指“被评估对象”中的被评估的载荷; 设索系统中共有 M_1 根支承索, 索结构索力数据包括这 M_1 根支承索的索力; 本方法在监测全部 M_1 根支承索索力的基础上, 在索结构上人为增加 M_2 根索, 称为传感索, 在索结构健康监测过程中将监测这新增加的 M_2 根传感索的索力; 综合上述被监测量, 整个索结构共有 M 根索的 M 个索力被监测, 即有 M 个被监测量, 其中 M 为 M_1 与 M_2 之和; M 必须大于核心被评估对象的数量, M 小于被评估对象的数量; 新增加的 M_2 根传感索的刚度同索结构的任意一根支承索的刚度相比, 应当小得多; 新增加的 M_2 根传感索的各传感索的索力应当比索结构的任意一根支承索的索力小得多, 这样可以保证即使这新增加的 M_2 根传感索出现了损伤或松弛, 对索结构其他构件的应力、应变、变形的影响微乎其微; 新增加的 M_2 根传感索的横截面上正应力应当小于其疲劳极限, 这些要求可以保证新增加的 M_2 根传感索不会发生疲劳损伤; 新增加的 M_2 根传感索的两端应当充分锚固, 保证不会出现松弛; 新增加的 M_2 根传感索应当得到充分的防腐蚀保护, 保证新增加的 M_2 根传感索不会发生损伤和松弛; 为方便起见, 在本方法中将“索结构的被监测的所有参量”简称为“被监测量”; 给 M 个被监测量连续编号, 本方法用用变量 j 表示这一编号, $j=1, 2, 3, \dots, M$, 该编号在后续步骤中将用于生成向量和矩阵; 在本方法中新增加的 M_2 根传感索作为索结构的一部分, 后文再提到索结构时, 索结构包括增加 M_2 根传感索前的索结构和新增加的 M_2 根传感索, 也就是说后文提到索结构时指包括新增加的 M_2 根传感索的索结构; 因此后文提到按照“本方法的索结构的温度测量计算方法”测量计算得到“索结构稳态温度数据”时, 其中的索结构包括新增加的 M_2 根传感索, 得到的“索结构稳态温度数据”包括新增加的 M_2 根传感索的稳态温度数据, 获得新增加的 M_2 根传感索的稳态温度数据的方法同于索结构的 M_1 根支承索的稳态温度数据的获得方法, 在后文不再一一交代; 测量得到新增加的 M_2 根传感索的索力的方法同于索结构的 M_1 根支承索的索力的测量方法, 在后文不再一一交代; 对索结构的支承索进行任何测量时, 同时对新增加的 M_2 根传感索进行同样的测量, 在后文不再一一交代; 新增加的 M_2 根传感索除了不发生损伤和松弛外, 对新增加的 M_2 根传感索的信息量的要求和获得方法与索结构的支承索的信息量的要求和获得方法相同, 在后文不再一一交代; 在后文建立索结构的各种力学模型时, 将新增加的 M_2 根传感索视同索结构的支承索对待; 在后文中, 除了提到支承索的损伤和松弛的场合外, 当提到支承索时所说的支承索包括索结构的支承索和新增加的 M_2 根传感索; 本方法中对同一个量实时监测的任何两次测量之间的时间间隔不得大于 30 分钟, 测量记录数据的时刻称为实际记录数据时刻; 物体、结构承受的外力可称为载荷, 载荷包括面载荷和体积载荷; 面载荷又称表面载荷, 是作用于物体表面的载荷, 包括集中载荷和分布载荷两种; 体积载荷是连续分布于物体

内部各点的载荷,包括物体的自重和惯性力在内;集中载荷分为集中力和集中力偶两种,在包括笛卡尔直角坐标系在内的坐标系中,一个集中力可以分解成三个分量,同样的,一个集中力偶也可以分解成三个分量,如果载荷实际上是集中载荷,在本方法中将一个集中力分量或一个集中力偶分量计为或统计为一个载荷,此时载荷的变化具体化为一个集中力分量或一个集中力偶分量的变化;分布载荷分为线分布载荷和面分布载荷,分布载荷的描述至少包括分布载荷的作用区域和分布载荷的大小,分布载荷的大小用分布集度来表达,分布集度用分布特征和幅值来表达;如果载荷实际上是分布载荷,本方法谈论载荷的变化时,实际上是指分布载荷分布集度的幅值的改变,而所有分布载荷的作用区域和分布集度的分布特征是不变的;在包括笛卡尔直角坐标系在内的坐标系中,一个分布载荷可以分解成三个分量,如果这分布载荷的三个分量各自的分布集度的幅值发生变化,且变化的比率不全部相同,那么在本方法中把这分布载荷的三个分量计为或统计为三个分布载荷,此时一个载荷就代表分布载荷的一个分量;体积载荷是连续分布于物体内部各点的载荷,体积载荷的描述至少包括体积载荷的作用区域和体积载荷的大小,体积载荷的大小用分布集度来表达,分布集度用分布特征和幅值来表达;如果载荷实际上是体积载荷,在本方法中实际处理的是体积载荷分布集度的幅值的改变,而所有体积载荷的作用区域和分布集度的分布特征是不变的,此时在本方法中提到载荷的改变时实际上是指体积载荷的分布集度的幅值的改变,此时,发生变化的载荷是指那些分布集度的幅值发生变化的体积载荷;在包括笛卡尔直角坐标系在内的坐标系中,一个体积载荷可以分解成三个分量,如果这体积载荷的三个分量各自的分布集度的幅值发生变化,且变化的比率不全部相同,那么在本方法中把这体积载荷的三个分量计为或统计为三个分布载荷;

b. 本方法定义“本方法的索结构的温度测量计算方法”按步骤 b1 至 b3 进行;

b1 :查询或实测得到索结构组成材料及索结构所处环境的随温度变化的传热学参数,利用索结构的设计图、竣工图和索结构的几何实测数据,利用这些数据和参数建立索结构的传热学计算模型;查询索结构所在地不少于 2 年的近年来的气象资料,统计得到这段时间内的阴天数量记为 T 个阴天,在本方法中将白天不能见到太阳的一整日称为阴天,统计得到 T 个阴天中每一个阴天的 0 时至次日日出时刻后 30 分钟之间的最高气温与最低气温,日出时刻是指根据地球自转和公转规律确定的气象学上的日出时刻,不表示当天一定可以看见太阳,能够查询资料或通过常规气象学计算得到所需的每一日的日出时刻,每一个阴天的 0 时至次日日出时刻后 30 分钟之间的最高气温减去最低气温称为该阴天的日气温的最大温差,有 T 个阴天,就有 T 个阴天的日气温的最大温差,取 T 个阴天的日气温的最大温差中的最大值为参考日温差,参考日温差记为 ΔT_r ;查询索结构所在地和所在海拔区间不少于 2 年的近年来的气象资料或实测得到索结构所处环境的温度随时间和海拔高度的变化数据和变化规律,计算得到索结构所在地和所在海拔区间不少于 2 年的近年来的索结构所处环境的温度关于海拔高度的最大变化率 ΔT_h ,为方便叙述取 ΔT_h 的单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$;在索结构的表面上取“R 个索结构表面点”,取“R 个索结构表面点”的具体原则在步骤 b3 中叙述,后面将通过实测得到这 R 个索结构表面点的温度,称实测得到的温度数据为“R 个索结构表面温度实测数据”,如果是利用索结构的传热学计算模型,通过传热计算得到这 R 个索结构表面点的温度,就称计算得到的温度数据为“R 个索结构表面温度计算数据”;从索结构所处的最低海拔到最高海拔之间,在索结构上均匀选取不少于三个不同的海拔高度,在每一个

选取的海拔高度处、在水平面与索结构表面的交线处至少选取两个点,从选取点处引索结构表面的外法线,所有选取的外法线方向称为“测量索结构沿壁厚的温度分布的方向”,测量索结构沿壁厚的温度分布的方向与“水平面与索结构表面的交线”相交,在选取的测量索结构沿壁厚的温度分布的方向中必须包括索结构的向阳面外法线方向和索结构的背阴面外法线方向,沿每一个测量索结构沿壁厚的温度分布的方向在索结构中均布选取不少于三个点,对于支承索沿每一个测量索结构沿壁厚的温度分布的方向仅仅取一个点,仅仅测量支承索的表面点的温度,测量所有被选取点的温度,测得的温度称为“索结构沿厚度的温度分布数据”,其中沿与同一“水平面与索结构表面的交线”相交的、“测量索结构沿壁厚的温度分布的方向”测量获得的“索结构沿厚度的温度分布数据”,在本方法中称为“相同海拔高度索结构沿厚度的温度分布数据”,设选取了 H 个不同的海拔高度,在每一个海拔高度处,选取了 B 个测量索结构沿壁厚的温度分布的方向,沿每个测量索结构沿壁厚的温度分布的方向在索结构中选取了 E 个点,其中 H 和 E 都不小于 3,B 不小于 2,对于支承索 E 等于 1,计索结构上“测量索结构沿厚度的温度分布数据的点”的总数为 HBE 个,后面将通过实测得到这 HBE 个“测量索结构沿厚度的温度分布数据的点”的温度,称实测得到的温度数据为“HBE 个索结构沿厚度温度实测数据”,如果是利用索结构的传热学计算模型,通过传热计算得到这 HBE 个测量索结构沿厚度的温度分布数据的点的温度,就称计算得到的温度数据为“HBE 个索结构沿厚度温度计算数据”;在索结构所在地按照气象学测量气温要求选取一个位置,将在此位置实测得到符合气象学测量气温要求的索结构所在环境的气温;在索结构所在地的空旷无遮挡处选取一个位置,该位置应当在全年的每一日都能得到该地所能得到的该日的最充分的日照,在该位置安放一块碳钢材质的平板,称为参考平板,参考平板与地面不可接触,参考平板离地面距离不小于 1.5 米,该参考平板的一面向阳,称为向阳面,参考平板的向阳面是粗糙的和深色的,参考平板的向阳面应当在全年的每一日都能得到一块平板在该地所能得到的该日的最充分的日照,参考平板的非向阳面覆有保温材料,将实时监测得到参考平板的向阳面的温度;

b2 : 实时监测得到上述 R 个索结构表面点的 R 个索结构表面温度实测数据,同时实时监测得到前面定义的索结构沿厚度的温度分布数据,同时实时监测得到符合气象学测量气温要求的索结构所在环境的气温数据;通过实时监测得到当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的索结构所在环境的气温实测数据序列,索结构所在环境的气温实测数据序列由当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的索结构所在环境的气温实测数据按照时间先后顺序排列,找到索结构所在环境的气温实测数据序列中的最高温度和最低温度,用索结构所在环境的气温实测数据序列中的最高温度减去最低温度得到索结构所在环境的当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的最大温差,称为环境最大温差,记为 ΔT_{emax} ;由索结构所在环境的气温实测数据序列通过常规数学计算得到索结构所在环境的气温关于时间的变化率,该变化率也随着时间变化;通过实时监测得到当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的参考平板的向阳面的温度的实测数据序列,参考平板的向阳面的温度的实测数据序列由当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的参考平板的向阳面的温度的实测数据按照时间先后顺序排列,找到参考平板的向阳面的温度的实测数据序列中的最高温度和最低温度,用参考平板的向阳面的温度的实测数据序列中的最高温度减去最低温度得到参考平板的向阳面的温度的当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的最

大温差,称为参考平板最大温差,记为 ΔT_{pmax} ;通过实时监测得到当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的所有 R 个索结构表面点的索结构表面温度实测数据序列,有 R 个索结构表面点就有 R 个索结构表面温度实测数据序列,每一个索结构表面温度实测数据序列由一个索结构表面点的当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的索结构表面温度实测数据按照时间先后顺序排列,找到每一个索结构表面温度实测数据序列中的最高温度和最低温度,用每一个索结构表面温度实测数据序列中的最高温度减去最低温度得到每一个索结构表面点的温度的当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的最大温差,有 R 个索结构表面点就有 R 个当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的最大温差数值,其中的最大值称为索结构表面最大温差,记为 ΔT_{smax} ;由每一索结构表面温度实测数据序列通过常规数学计算得到每一个索结构表面点的温度关于时间的变化率,每一个索结构表面点的温度关于时间的变化率也随着时间变化;通过实时监测得到当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的、在同一时刻、HBE 个“索结构沿厚度的温度分布数据”后,计算在每一个选取的海拔高度处共计 BE 个“相同海拔高度索结构沿厚度的温度分布数据”中的最高温度与最低温度的差值,这个差值的绝对值称为“相同海拔高度处索结构厚度方向最大温差”,选取了 H 个不同的海拔高度就有 H 个“相同海拔高度处索结构厚度方向最大温差”,称这 H 个“相同海拔高度处索结构厚度方向最大温差”中的最大值为“索结构厚度方向最大温差”,记为 ΔT_{tmax} ;

b3 :测量计算获得索结构稳态温度数据;首先,确定获得索结构稳态温度数据的时刻,与决定获得索结构稳态温度数据的时刻相关的条件有六项,第一项条件是获得索结构稳态温度数据的时刻介于当日日落时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间,日落时刻是指根据地球自转和公转规律确定的气象学上的日落时刻,能够查询资料或通过常规气象学计算得到所需的每一日的日落时刻;第二项条件的 a 条件是在当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的这段时间内,参考平板最大温差 ΔT_{pmax} 和索结构表面最大温差 ΔT_{smax} 都不大于 5 摄氏度;第二项条件的 b 条件是在当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的这段时间内,在前面测量计算得到的环境最大温差 ΔT_{emax} 不大于参考日温差 ΔT_r ,且参考平板最大温差 ΔT_{pmax} 减去 2 摄氏度后不大于 ΔT_{emax} ,且索结构表面最大温差 ΔT_{smax} 不大于 ΔT_{pmax} ;只需满足第二项的 a 条件和 b 条件中的一项就称为满足第二项条件;第三项条件是在获得索结构稳态温度数据的时刻,索结构所在环境的气温关于时间的变化率的绝对值不大于每小时 0.1 摄氏度;第四项条件是在获得索结构稳态温度数据的时刻, R 个索结构表面点中的每一个索结构表面点的温度关于时间的变化率的绝对值不大于每小时 0.1 摄氏度;第五项条件是在获得索结构稳态温度数据的时刻, R 个索结构表面点中的每一个索结构表面点的索结构表面温度实测数据为当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的极小值;第六项条件是在获得索结构稳态温度数据的时刻,“索结构厚度方向最大温差” ΔT_{tmax} 不大于 1 摄氏度;本方法利用上述六项条件,将下列三种时刻中的任意一种称为“获得索结构稳态温度数据的数学时刻”,第一种时刻是满足上述“与决定获得索结构稳态温度数据的时刻相关的条件”中的第一项至第五项条件的时刻,第二种时刻是仅仅满足上述“与决定获得索结构稳态温度数据的时刻相关的条件”中的第六项条件的时刻,第三种时刻是同时满足上述“与决定获得索结构稳态温度数据的时刻相关的条件”中的第一项至第六项条件的时刻;当获得索结构稳态温度数据的数学时刻就是本方法中实际记录数据时刻中的一个时刻时,获得索

结构稳态温度数据的时刻就是获得索结构稳态温度数据的数学时刻；如果获得索结构稳态温度数据的数学时刻不是本方法中实际记录数据时刻中的任一个时刻，则取本方法最接近于获得索结构稳态温度数据的数学时刻的那个实际记录数据的时刻为获得索结构稳态温度数据的时刻；本方法将使用在获得索结构稳态温度数据的时刻测量记录的量进行索结构相关健康监测分析；本方法近似认为获得索结构稳态温度数据的时刻的索结构温度场处于稳态，即此时刻的索结构温度不随时间变化，此时刻就是本方法的“获得索结构稳态温度数据的时刻”；然后，根据索结构传热特性，利用获得索结构稳态温度数据的时刻的“R个索结构表面温度实测数据”和“HBE个索结构沿厚度温度实测数据”，利用索结构的传热学计算模型，通过常规传热计算得到在获得索结构稳态温度数据的时刻的索结构的温度分布，此时索结构的温度场按稳态进行计算，计算得到的在获得索结构稳态温度数据的时刻的索结构的温度分布数据包括索结构上R个索结构表面点的计算温度，R个索结构表面点的计算温度称为R个索结构稳态表面温度计算数据，还包括索结构在前面选定的HBE个“测量索结构沿厚度的温度分布数据的点”的计算温度，HBE个“测量索结构沿厚度的温度分布数据的点”的计算温度称为“HBE个索结构沿厚度温度计算数据”，当R个索结构表面温度实测数据与R个索结构稳态表面温度计算数据对应相等时，且“HBE个索结构沿厚度温度实测数据”与“HBE个索结构沿厚度温度计算数据”对应相等时，计算得到的在获得索结构稳态温度数据的时刻的索结构的温度分布数据在本方法中称为“索结构稳态温度数据”，此时的“R个索结构表面温度实测数据”称为“R个索结构稳态表面温度实测数据”，“HBE个索结构沿厚度温度实测数据”称为“HBE个索结构沿厚度稳态温度实测数据”；在索结构的表面上取“R个索结构表面点”时，“R个索结构表面点”的数量与分布必须满足三个条件，第一个条件是当索结构温度场处于稳态时，当索结构表面上任意一点的温度是通过“R个索结构表面点”中与索结构表面上该任意点相邻的点的实测温度线性插值得到时，线性插值得到的索结构表面上该任意点的温度与索结构表面上该任意点的实际温度的误差不大于5%；索结构表面包括支承索表面；第二个条件是“R个索结构表面点”在同一海拔高度的点的数量不小于4，且“R个索结构表面点”在同一海拔高度的点沿着索结构表面均布；“R个索结构表面点”沿海拔高度的所有两两相邻索结构表面点的海拔高度之差的绝对值中的最大值 Δh 不大于0.2℃除以 ΔT_h 得到的数值，为方便叙述取 ΔT_h 的单位为°C/m，为方便叙述取 Δh 的单位为m；“R个索结构表面点”沿海拔高度的两两相邻索结构表面点的定义是指只考虑海拔高度时，在“R个索结构表面点”中不存在一个索结构表面点，该索结构表面点的海拔高度数值介于两两相邻索结构表面点的海拔高度数值之间；第三个条件是查询或按气象学常规计算得到索结构所在地和所在海拔区间的日照规律，再根据索结构的几何特征及方位数据，在索结构上找到全年受日照时间最充分的那些表面点的位置，“R个索结构表面点”中至少有一个索结构表面点是索结构上全年受日照时间最充分的那些表面点中的一个点；

c. 按照“本方法的索结构的温度测量计算方法”直接测量计算得到初始状态下的索结构稳态温度数据，初始状态下的索结构稳态温度数据称为初始索结构稳态温度数据，记为“初始索结构稳态温度数据向量 T_0 ”；实测或查资料得到索结构所使用的各种材料的随温度变化的物理和力学性能参数；在实测得到 T_0 的同时，也就是在获得初始索结构稳态温度数据向量 T_0 的时刻的同一时刻，直接测量计算得到初始索结构的实测数据，初始索结构的实测数据是包括索结构集中载荷测量数据、索结构分布载荷测量数据、索结构体积载荷测量

数据、索结构支座初始线位移测量数据、所有被监测量的初始数值、所有支承索的初始索力数据、初始索结构模态数据、初始索结构应变数据、初始索结构几何数据、初始索结构支座空间坐标数据、初始索结构角度数据、初始索结构空间坐标数据在内的实测数据，在得到初始索结构的实测数据的同时，测量计算得到包括支承索的无损检测数据在内的能够表达支承索的健康状态的数据，此时的能够表达支承索的健康状态的数据称为支承索初始健康状态数据；所有被监测量的初始数值组成被监测量初始数值向量 C_0 ，被监测量初始数值向量 C_0 的编号规则与 M 个被监测量的编号规则相同；利用支承索初始健康状态数据、索结构支座初始线位移测量数据和索结构载荷测量数据建立被评估对象初始损伤向量 d_0 ，向量 d_0 表示用初始力学计算基准模型 A_0 表示的索结构的被评估对象的初始健康状态；被评估对象初始损伤向量 d_0 的元素个数等于 N， d_0 的元素与被评估对象是一一对应关系，向量 d_0 的元素的编号规则与被评估对象的编号规则相同；如果 d_0 的某一个元素对应的被评估对象是索系统中的一根支承索，那么 d_0 的该元素的数值代表对应支承索的初始损伤程度，若该元素的数值为 0，表示该元素所对应的支承索是完好的，没有损伤的，若其数值为 100%，则表示该元素所对应的支承索已经完全丧失承载能力，若其数值介于 0 和 100% 之间，则表示该支承索丧失了相应比例的承载能力；如果 d_0 的某一个元素对应的被评估对象是某一个支座的某一个线位移分量，那么 d_0 的该元素的数值代表这个支座的该线位移分量的初始数值；如果 d_0 的某一个元素对应的被评估对象是某一个载荷，本方法中取 d_0 的该元素数值为 0，代表这个载荷的变化的初始数值为 0；如果没有索结构支座初始线位移测量数据或者可以认为索结构支座初始线位移为 0 时，向量 d_0 中与索结构支座线位移相关的各元素数值取 0；如果没有支承索的无损检测数据及其他能够表达支承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_0 中与支承索相关的各元素数值取 0；初始索结构支座空间坐标数据指索结构设计状态下的支座空间坐标数据，索结构支座初始线位移测量数据指在建立初始力学计算基准模型 A_0 时，索结构支座相对于索结构设计状态下的支座所发生的线位移；

d. 根据索结构的设计图、竣工图和初始索结构的实测数据、支承索初始健康状态数据、索结构支座初始线位移测量数据、索结构集中载荷测量数据、索结构分布载荷测量数据、索结构体积载荷测量数据、索结构所使用的各种材料的随温度变化的物理和力学性能参数、初始索结构稳态温度数据向量 T_0 和前面步骤得到的所有的索结构数据，建立计入“索结构稳态温度数据”的索结构的初始力学计算基准模型 A_0 ，基于 A_0 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%；对于 A_0 的“索结构稳态温度数据”就是“初始索结构稳态温度数据向量 T_0 ”；对于 A_0 的被评估对象健康状态用被评估对象初始损伤向量 d_0 表示；对于 A_0 的所有被监测量的初始数值用被监测量初始数值向量 C_0 表示；第一次建立计入“索结构稳态温度数据”的索结构的当前初始力学计算基准模型 A^t_0 、被监测量当前初始数值向量 C^t_0 和“当前初始索结构稳态温度数据向量 T^t_0 ”；第一次建立索结构的当前初始力学计算基准模型 A^t_0 和被监测量当前初始数值向量 C^t_0 时，索结构的当前初始力学计算基准模型 A^t_0 就等于索结构的初始力学计算基准模型 A_0 ，被监测量当前初始数值向量 C^t_0 就等于被监测量初始数值向量 C_0 ； A^t_0 对应的“索结构稳态温度数据”称为“当前初始索结构稳态温度数据”，记为“当前初始索结构稳态温度数据向量 T^t_0 ”，第一次建立索结构的当前初始力学计算基准模型 A^t_0 时， T^t_0 就等于 T_0 ； A^t_0 的被评估对象的初始健康状态与

A_o 的被评估对象的健康状态相同,也用被评估对象初始损伤向量 d_o 表示,在后面的循环过程中 A^t_o 的被评估对象的初始健康状态始终用被评估对象初始损伤向量 d_o 表示; T_o 和 d_o 是 A_o 的参数,由 A_o 的力学计算结果得到的所有被监测量的初始数值与 C_o 表示的所有被监测量的初始数值相同,因此也可以说 C_o 由 A_o 的力学计算结果组成; T^t_o 和 d_o 是 A^t_o 的参数, C^t_o 由 A^t_o 的力学计算结果组成;

e. 从这里进入由第 e 步到第 m 步的循环;在结构服役过程中,不断按照“本方法的索结构的温度测量计算方法”不断实测计算获得“索结构稳态温度数据”的当前数据,“索结构稳态温度数据”的当前数据称为“当前索结构稳态温度数据”,记为“当前索结构稳态温度数据向量 T^t ”,向量 T^t 的定义方式与向量 T_o 的定义方式相同;在实测得到当前索结构稳态温度数据向量 T^t 的同时,对新增加的 M_2 根传感索进行无损检测,从中鉴别出出现损伤或松弛的传感索,依据被监测量编号规则,从本方法之前出现的按照被监测量编号规则编号的各向量中去除与鉴别出的出现损伤或松弛的传感索对应的元素,在本方法之后出现的各向量和矩阵中也不再出现与鉴别出的出现损伤或松弛的传感索对应的元素,在本方法之后提到传感索时不再包括这里被鉴别出出现损伤或松弛的传感索,在本方法之后提到被监测量时不再包括这里被鉴别出出现损伤或松弛的传感索的索力;从索结构上鉴别出几根出现损伤或松弛的传感索,就将 M_2 和 M 减小同样的数量;

f. 根据当前索结构稳态温度数据向量 T^t ,按照步骤 f1 至 f3 更新当前初始力学计算基准模型 A^t_o 、被监测量当前初始数值向量 C^t_o 和当前初始索结构稳态温度数据向量 T^t_o :

f1. 比较 T^t 与 T^t_o ,如果 T^t 等于 T^t_o ,则 A^t_o 、 C^t_o 和 T^t_o 保持不变;否则需要按下列步骤对 A^t_o 、 C^t_o 和 T^t_o 进行更新;

f2. 计算 T^t 与 T^t_o 的差, T^t 与 T^t_o 的差就是当前索结构稳态温度数据关于初始索结构稳态温度数据的变化, T^t 与 T^t_o 的差用稳态温度变化向量 S 表示, S 等于 T^t 减去 T^t_o , S 表示索结构稳态温度数据的变化;

f3. 对 A_o 中的索结构施加温度变化,施加的温度变化的数值就取自稳态温度变化向量 S ,对 A_o 中的索结构施加的温度变化后得到更新的当前初始力学计算基准模型 A^t_o ,更新 A^t_o 的同时, T^t_o 所有元素数值也用 T^t 的所有元素数值对应代替,即更新了 T^t_o ,这样就得到了正确地对应于 A^t_o 的 T^t ;更新 C^t_o 的方法是:当更新 A^t_o 后,通过力学计算得到 A^t_o 中所有被监测量的、当前的具体数值,这些具体数值组成 C^t_o ; A^t_o 的支承索的初始健康状态始终用被评估对象初始损伤向量 d_o 表示;

g. 在当前初始力学计算基准模型 A^t_o 的基础上按照步骤 g1 至 g4 进行若干次力学计算,通过计算获得索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 和被评估对象单位变化向量 D_u ;

g1. 索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 是不断更新的,即在更新当前初始力学计算基准模型 A^t_o 、被监测量当前初始数值向量 C^t_o 和当前初始索结构稳态温度数据向量 T^t_o 之后,必须接着更新索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 和被评估对象单位变化向量 D_u ;

g2. 在索结构的当前初始力学计算基准模型 A^t_o 的基础上进行若干次力学计算,计算次数数值上等于所有被评估对象的数量 N,有 N 个评估对象就有 N 次计算;依据被评估对象的编号规则,依次进行计算;每一次计算假设只有一个被评估对象在原有损伤或线位移或载荷的基础上再增加单位损伤或单位线位移或载荷单位变化,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向量 d_o 表示的该支承索已有损伤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线位移分量,就假设该支座在该位移方向再增加单位线位移,如果该被评估对象是一个载荷,就假设该载荷在向量 d_o 表示的该载荷已有变化量的基础上再增加载荷单位变化,用 D_{uk} 记录这一增加的单位损伤或单位线位移或载荷单位变化,其中 k 表示增加单位损伤或单位线位移或载荷单位变化的被评估对象的编号, D_{uk} 是被评估对象单位变化向量 D_u 的一个元素,被评估对象单位变化向量 D_u 的元素的编号规则与向量 d_o 的元素的编号规则相同;每一次计算中增加单位损伤或单位线位移或载荷单位变化的被评估对象不同于其它次计算中增加单位损伤或单位线位移或载荷单位变化的被评估对象,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,被监测量计算当前向量的元素编号规则与被监测量初始数值向量 C_o 的元素编号规则相同;

g3. 每一次计算得到的被监测量计算当前向量减去被监测量当前初始数值向量 C^t ,得到一个向量,再将该向量的每一个元素都除以该次计算所假设的单位损伤或单位线位移或载荷单位变化数值,得到一个被监测量单位变化向量,有 N 个被评估对象就有 N 个被监测量单位变化向量;

g4. 由这 N 个被监测量单位变化向量按照 N 个被评估对象的编号规则,依次组成有 N 列的索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC ;索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 的每一列对应于一个被监测量单位变化向量;索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 的每一行对应于同一个被监测量在不同被评估对象增加单位损伤或单位线位移或载荷单位变化时的不同的单位变化幅度;索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 的列的编号规则与向量 d_o 的元素的编号规则相同,索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 的行的编号规则与 M 个被监测量的编号规则相同;

h. 在实测得到当前索结构稳态温度数据向量 T^t 的同时,实测得到在获得当前索结构稳态温度数据向量 T^t 的时刻的同一时刻的索结构的所有被监测量的当前实测数值,组成被监测量当前数值向量 C ;被监测量当前数值向量 C 和被监测量当前初始数值向量 C^t 与被监测量初始数值向量 C_o 的定义方式相同,三个向量的相同编号的元素表示同一被监测量在不同时刻的具体数值;

i. 定义被评估对象当前名义损伤向量 d ,被评估对象当前名义损伤向量 d 的元素个数等于被评估对象的数量,被评估对象当前名义损伤向量 d 的元素和被评估对象之间是一一对应关系,被评估对象当前名义损伤向量 d 的元素数值代表对应被评估对象的名义损伤程度或名义线位移或名义载荷变化量;向量 d 的元素的编号规则与向量 d_o 的元素的编号规则相同;

j. 依据被监测量当前数值向量 C 同被监测量当前初始数值向量 C^t 、索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 和待求的被评估对象当前名义损伤向量 d 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 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名义损伤向量 d ;

$$C = C_o + \Delta C \bullet d \quad \text{式 1}$$

k. 定义被评估对象当前实际损伤向量 d^a ,被评估对象当前实际损伤向量 d^a 的元素个数

等于被评估对象的数量,被评估对象当前实际损伤向量 d^a 的元素和被评估对象之间是一一对应关系,被评估对象当前实际损伤向量 d^a 的元素数值代表对应被评估对象的实际损伤程度或实际线位移或实际载荷变化量;向量 d^a 的元素的编号规则与向量 d_o 的元素的编号规则相同;

1. 利用式 2 表达的被评估对象当前实际损伤向量 d^a 的第 k 个元素 d_{ok}^a 同被评估对象初始损伤向量 d_o 的第 k 个元素 d_{ok} 和被评估对象当前名义损伤向量 d 的第 k 个元素 d_k 间的关系,计算得到被评估对象当前实际损伤向量 d^a 的所有元素;

$$d_k^a = \begin{cases} 1 - (1 - d_{ok})(1 - d_k), & \text{如果该元素对应于一根支承索} \\ d_{ok} + d_k, & \text{如果该元素不对应于一根支承索} \end{cases} \quad \text{式2}$$

式 2 中 $k=1, 2, 3, \dots, N$, d_k^a 表示第 k 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支承索,那么 d_k^a 表示其当前实际损伤, d_k^a 为 0 时表示无损伤,为 100% 时表示该支承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;如果该被评估对象是一个支座的一个线位移分量,那么 d_k^a 表示其当前实际线位移数值;

m. 回到第 e 步,开始由第 e 步到第 m 步的下一次循环。

精简索力监测受损索载荷线位移识别方法

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,本方法将该类结构表述为“索结构”,并将索结构的所有承载索、承载缆,及所有仅承受轴向拉伸或轴向压缩载荷的杆件(又称为二力杆件),为方便起见统一称为“索系统”,本方法中用“支承索”这一名词指称承载索、承载缆及仅承受轴向拉伸或轴向压缩载荷的杆件,有时简称为“索”,所以在后面使用“索”这个字的时候,对桁架结构实际就是指二力杆件。在结构服役过程中,对支承索或索系统的健康状态的正确识别关系到整个索结构的安全。在环境温度发生变化时,索结构的温度一般也会随着发生变化,在索结构温度发生变化时,索结构支座可能发生线位移,索结构承受的载荷也可能发生变化,同时索结构的健康状态也可能在发生变化,在这种复杂条件下,本方法基于索力监测(本方法将被监测的索力称为“被监测量”)来识别支座线位移和受损索(本方法称之为“核心被评估对象”的健康状态),属工程结构健康监测领域。

背景技术

[0002] 剔除载荷变化、索结构支座线位移和结构温度变化对索结构健康状态识别结果的影响,从而准确地识别结构的健康状态的变化,是目前迫切需要解决的问题;剔除载荷变化、索结构健康状态变化和结构温度变化对索结构支座线位移识别结果的影响,从而准确地识别索结构支座线位移,也是目前迫切需要解决的问题;本方法公开了一种解决这两个问题的有效的、廉价的方法。

发明内容

[0003] 技术问题:本方法公开了一种方法,在造价更低的条件下,实现了两种功能,分别是,一、剔除支座线位移、载荷变化和结构温度变化对索结构健康状态识别结果的影响,从而准确地识别出支承索的健康状态;二、本方法还能够剔除载荷变化、索结构健康状态变化和结构温度变化对索结构支座线位移识别结果的影响,从而准确地识别索结构支座线位移。

[0004] 技术方案:在本方法中,用“支座空间坐标”指称支座关于笛卡尔直角坐标系的X、Y、Z轴的坐标,也可以说成是支座关于X、Y、Z轴的空间坐标,支座关于某一个轴的空间坐标的具体数值称为支座关于该轴的空间坐标分量,本方法中也用支座的一个空间坐标分量表达支座关于某一个轴的空间坐标的具体数值;用“支座角坐标”指称支座关于X、Y、Z轴的角坐标,支座关于某一个轴的角坐标的具体数值称为支座关于该轴的角坐标分量,本方法中也用支座的一个角坐标分量表达支座关于某一个轴的角坐标的具体数值;用“支座广义坐标”指称支座角坐标和支座空间坐标全体,本方法中也用支座的一个广义坐标分量表达支座关于一个轴的空间坐标或角坐标的具体数值;支座关于X、Y、Z轴的坐标的改变称为支座线位移,也可以说支座空间坐标的改变称为支座线位移,本方法中也用支座的一个线位移

分量表达支座关于某一个轴的线位移的具体数值；支座关于 X、Y、Z 轴的角坐标的改变称为支座角位移，本方法中也用支座的一个角位移分量表达支座关于某一个轴的角位移的具体数值；支座广义位移指称支座线位移和支座角位移全体，本方法中也用支座的一个广义位移分量表达支座关于某一个轴的线位移或角位移的具体数值；支座线位移也可称为平移位移，支座沉降是支座线位移或平移位移在重力方向的分量。

[0005] 物体、结构承受的外力可称为载荷，载荷包括面载荷和体积载荷。面载荷又称表面载荷，是作用于物体表面的载荷，包括集中载荷和分布载荷两种。体积载荷是连续分布于物体内部各点的载荷，如物体的自重和惯性力。

[0006] 集中载荷分为集中力和集中力偶两种，在坐标系中，例如在笛卡尔直角坐标系中，一个集中力可以分解成三个分量，同样的，一个集中力偶也可以分解成三个分量，如果载荷实际上是集中载荷，在本方法中将一个集中力分量或一个集中力偶分量称为一个载荷，此时载荷的变化具体化为一个集中力分量或一个集中力偶分量的变化。

[0007] 分布载荷分为线分布载荷和面分布载荷，分布载荷的描述至少包括分布载荷的作用区域和分布载荷的大小，分布载荷的大小用分布集度来表达，分布集度用分布特征（例如均布、正弦函数等分布特征）和幅值来表达（例如两个分布载荷都是均布，但其幅值不同，可以均布压力为例来说明幅值的概念：同一个结构承受两个不同的均布压力，两个分布载荷都是均布载荷，但一个分布载荷的幅值是 10MPa，另一个分布载荷的幅值是 50MPa）。如果载荷实际上是分布载荷，本方法谈论载荷的变化时，实际上是指分布载荷分布集度的幅值的改变，而分布载荷的作用区域和分布集度的分布特征是不变的。在坐标系中，一个分布载荷可以分解成若干个分量，如果这分布载荷的若干个分量各自的分布集度的幅值发生变化，且变化的比率不全部相同，那么在本方法中把这若干个分布载荷的分量看成同样数量的独立的分布载荷，此时一个载荷就代表一个分布载荷的分量，也可以将其中分布集度的幅值变化比率相同的分量合成为一个分布载荷或称为一个载荷。

[0008] 体积载荷是连续分布于物体内部各点的载荷，如物体的自重和惯性力，体积载荷的描述至少包括体积载荷的作用区域和体积载荷的大小，体积载荷的大小用分布集度来表达，分布集度用分布特征（例如均布、线性函数等分布特征）和幅值来表达（例如两个体积载荷都是均布，但其幅值不同，可以自重为例来说明幅值的概念：同一个结构的两个部分的材料不同，故密度不同，所以虽然这两个部分所受的体积载荷都是均布的，但一个部分所受的体积载荷的幅值可能是 10kN/m^3 ，另一个部分所受的体积载荷的幅值是 50kN/m^3 ）。如果载荷实际上是体积载荷，在本方法中实际处理的是体积载荷分布集度的幅值的改变，而体积载荷的作用区域和分布集度的分布特征是不变的，此时在本方法中提到载荷的改变时实际上是指体积载荷的分布集度的幅值的改变，此时，发生变化的载荷是指那些分布集度的幅值发生变化的体积载荷。在坐标系中，一个体积载荷可以分解成若干个分量（例如在笛卡尔直角坐标系中，体积载荷可以分解成关于坐标系的三个轴的分量，也就是说，在笛卡尔直角坐标系中体积载荷可以分解成三个分量），如果这体积载荷的若干个分量各自的分布集度的幅值发生变化，且变化的比率不全部相同，那么在本方法中把这若干个体积载荷的分量看成同样数量的独立的载荷，也可以将其中分布集度的幅值变化比率相同的体积载荷分量合成为一个体积载荷或称为一个载荷。

[0009] 当载荷具体化为集中载荷时，在本方法中，“载荷单位变化”实际上是指“集中载荷

的单位变化”,类似的,“载荷变化”具体指“集中载荷的大小的变化”,“载荷变化量”具体指“集中载荷的大小的变化量”,“载荷变化程度”具体指“集中载荷的大小的变化程度”,“载荷的实际变化量”是指“集中载荷的大小的实际变化量”,“发生变化的载荷”是指“大小发生变化的集中载荷”,简单地说,此时“某某载荷的某某变化”是指“某某集中载荷的大小的某某变化”。

[0010] 当载荷具体化为分布载荷时,在本方法中,“载荷单位变化”实际上是指“分布载荷的分布集度的幅值的单位变化”,而分布载荷的分布特征是不变的,类似的,“载荷变化”具体指“分布载荷的分布集度的幅值的变化”,而分布载荷的分布特征是不变的,“载荷变化量”具体指“分布载荷的分布集度的幅值的变化量”,“载荷变化程度”具体指“分布载荷的分布集度的幅值的变化程度”,“载荷的实际变化量”具体指“分布载荷的分布集度的幅值的实际变化量”,“发生变化的载荷”是指“分布集度的幅值发生变化的分布载荷”,简单地说,此时“某某载荷的某某变化”是指“某某分布载荷的分布集度的幅值的某某变化”,而所有分布载荷的作用区域和分布集度的分布特征是不变的。

[0011] 当载荷具体化为体积载荷时,在本方法中,“载荷单位变化”实际上是指“体积载荷的分布集度的幅值的单位变化”,类似的,“载荷变化”是指“体积载荷的分布集度的幅值的变化”,“载荷变化量”是指“体积载荷的分布集度的幅值的变化量”,“载荷变化程度”是指“体积载荷的分布集度的幅值的变化程度”,“载荷的实际变化量”是指“体积载荷的分布集度的幅值的实际变化量”,“发生变化的载荷”是指“分布集度的幅值发生变化的体积载荷”,简单地说,“某某载荷的某某变化”是指“某某体积载荷的分布集度的幅值的某某变化”,而所有体积载荷的作用区域和分布集度的分布特征是不变的。

[0012] 本方法具体包括:

[0013] a. 当索结构承受的载荷虽有变化,但索结构正在承受的载荷没有超出索结构初始许用载荷时,本方法适用;索结构初始许用载荷指索结构在竣工时的许用载荷,能够通过常規力学计算获得;本方法统一称被评估的支座线位移分量、支承索和载荷为被评估对象,设被评估的支座线位移分量的数量、支承索的数量和载荷的数量之和为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k表示这一编号,k=1,2,3,...,N;本方法用名称“核心被评估对象”专指“被评估对象”中的被评估的支承索和支座线位移分量,设被评估的支承索和支座线位移分量的数量之和为P,即核心被评估对象的数量为P,本方法用名称“次要被评估对象”专指“被评估对象”中的被评估的载荷;设索系统中共有M₁根支承索,索结构索力数据包括这M₁根支承索的索力,本方法在监测全部M₁根支承索索力的基础上,在索结构上人为增加M₂根索,称为传感索,在索结构健康监测过程中将监测这新增加的M₂根传感索的索力;综合上述被监测量,整个索结构共有M根索的M个索力被监测,即有M个被监测量,其中M为M₁与M₂之和;M必须大于核心被评估对象的数量,M小于被评估对象的数量;新增加的M₂根传感索的刚度同索结构的任意一根支承索的刚度相比,应当小得多;新增加的M₂根传感索的各传感索的索力应当比索结构的任意一根支承索的索力小得多,这样可以保证即使这新增加的M₂根传感索出现了损伤或松弛,对索结构其他构件的应力、应变、变形的影响微乎其微;新增加的M₂根传感索的横截面上正应力应当小于其疲劳极限,这些要求可以保证新增加的M₂根传感索不会发生疲劳损伤;新增加的M₂根传感索的两

端应当充分锚固,保证不会出现松弛;新增加的 M_2 根传感索应当得到充分的防腐蚀保护,保证新增加的 M_2 根传感索不会发生损伤和松弛;为方便起见,在本方法中将“索结构的被监测的所有参量”简称为“被监测量”;给 M 个被监测量连续编号,本方法用用变量 j 表示这一编号, $j = 1, 2, 3, \dots, M$, 该编号在后续步骤中将用于生成向量和矩阵;在本方法中新增加的 M_2 根传感索作为索结构的一部分,后文再提到索结构时,索结构包括增加 M_2 根传感索前的索结构和新增加的 M_2 根传感索,也就是说后文提到索结构时指包括新增加的 M_2 根传感索的索结构;因此后文提到按照“本方法的索结构的温度测量计算方法”测量计算得到“索结构稳态温度数据”时,其中的索结构包括新增加的 M_2 根传感索,得到的“索结构稳态温度数据”包括新增加的 M_2 根传感索的稳态温度数据,获得新增加的 M_2 根传感索的稳态温度数据的方法同于索结构的 M_1 根支承索的稳态温度数据的获得方法,在后文不再一一交代;测量得到新增加的 M_2 根传感索的索力的方法同于索结构的 M_1 根支承索的索力的测量方法,在后文不再一一交代;对索结构的支承索进行任何测量时,同时对新增加的 M_2 根传感索进行同样的测量,在后文不再一一交代;新增加的 M_2 根传感索除了不发生损伤和松弛外,对新增加的 M_2 根传感索的信息量的要求和获得方法与索结构的支承索的信息量的要求和获得方法相同,在后文不再一一交代;在后文建立索结构的各种力学模型时,将新增加的 M_2 根传感索视同索结构的支承索对待;在后文中,除了提到支承索的损伤和松弛的场合外,当提到支承索时所说的支承索包括索结构的支承索和新增加的 M_2 根传感索;本方法中对同一个量实时监测的任何两次测量之间的时间间隔不得大于 30 分钟,测量记录数据的时刻称为实际记录数据时刻;物体、结构承受的外力可称为载荷,载荷包括面载荷和体积载荷;面载荷又称表面载荷,是作用于物体表面的载荷,包括集中载荷和分布载荷两种;体积载荷是连续分布于物体内部各点的载荷,包括物体的自重和惯性力在内;集中载荷分为集中力和集中力偶两种,在包括笛卡尔直角坐标系在内的坐标系中,一个集中力可以分解成三个分量,同样的,一个集中力偶也可以分解成三个分量,如果载荷实际上是集中载荷,在本方法中将一个集中力分量或一个集中力偶分量计为或统计为一个载荷,此时载荷的变化具体化为一个集中力分量或一个集中力偶分量的变化;分布载荷分为线分布载荷和面分布载荷,分布载荷的描述至少包括分布载荷的作用区域和分布载荷的大小,分布载荷的大小用分布集度来表达,分布集度用分布特征和幅值来表达;如果载荷实际上是分布载荷,本方法谈论载荷的变化时,实际上是指分布载荷分布集度的幅值的改变,而所有分布载荷的作用区域和分布集度的分布特征是不变的;在包括笛卡尔直角坐标系在内的坐标系中,一个分布载荷可以分解成三个分量,如果这分布载荷的三个分量的各自的分布集度的幅值发生变化,且变化的比率不全部相同,那么在本方法中把这分布载荷的三个分量计为或统计为三个分布载荷,此时一个载荷就代表分布载荷的一个分量;体积载荷是连续分布于物体内部各点的载荷,体积载荷的描述至少包括体积载荷的作用区域和体积载荷的大小,体积载荷的大小用分布集度来表达,分布集度用分布特征和幅值来表达;如果载荷实际上是体积载荷,在本方法中实际处理的是体积载荷分布集度的幅值的改变,而所有体积载荷的作用区域和分布集度的分布特征是不变的,此时在本方法中提到载荷的改变时实际上是指体积载荷的分布集度的幅值的改变,此时,发生变化的载荷是指那些分布集度的幅值发生变化的体积载荷;在包括笛卡尔直角坐标系在内的坐标系中,一个体积载荷可以分解成三个分量,如果这体积载荷的三个分量的各自的分布集度的幅值发生变化,且变化的比率不全部相同,那么在本方法中把这

体积载荷的三个分量计为或统计为三个分布载荷；

[0014] b. 本方法定义“本方法的索结构的温度测量计算方法”按步骤 b1 至 b3 进行；

[0015] b1 : 查询或实测得到索结构组成材料及索结构所处环境的随温度变化的传热学参数,利用索结构的设计图、竣工图和索结构的几何实测数据,利用这些数据和参数建立索结构的传热学计算模型;查询索结构所在地不少于 2 年的近年来的气象资料,统计得到这段时间内的阴天数量记为 T 个阴天,在本方法中将白天不能见到太阳的一整日称为阴天,统计得到 T 个阴天中每一个阴天的 0 时至次日日出时刻后 30 分钟之间的最高气温与最低气温,日出时刻是指根据地球自转和公转规律确定的气象学上的日出时刻,不表示当天一定可以看见太阳,能够查询资料或通过常规气象学计算得到所需的每一日的日出时刻,每一个阴天的 0 时至次日日出时刻后 30 分钟之间的最高气温减去最低气温称为该阴天的日气温的最大温差,有 T 个阴天,就有 T 个阴天的日气温的最大温差,取 T 个阴天的日气温的最大温差中的最大值为参考日温差,参考日温差记为 ΔT_r ;查询索结构所在地和所在海拔区间不少于 2 年的近年来的气象资料或实测得到索结构所处环境的温度随时间和海拔高度的变化数据和变化规律,计算得到索结构所在地和所在海拔区间不少于 2 年的近年来的索结构所处环境的温度关于海拔高度的最大变化率 ΔT_h ,为方便叙述取 ΔT_h 的单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$;在索结构的表面上取“R 个索结构表面点”,取“R 个索结构表面点”的具体原则在步骤 b3 中叙述,后面将通过实测得到这 R 个索结构表面点的温度,称实测得到的温度数据为“R 个索结构表面温度实测数据”,如果是利用索结构的传热学计算模型,通过传热计算得到这 R 个索结构表面点的温度,就称计算得到的温度数据为“R 个索结构表面温度计算数据”;从索结构所处的最低海拔到最高海拔之间,在索结构上均匀选取不少于三个不同的海拔高度,在每一个选取的海拔高度处、在水平面与索结构表面的交线处至少选取两个点,从选取点处引索结构表面的外法线,所有选取的外法线方向称为“测量索结构沿壁厚的温度分布的方向”,测量索结构沿壁厚的温度分布的方向与“水平面与索结构表面的交线”相交,在选取的测量索结构沿壁厚的温度分布的方向中必须包括索结构的向阳面外法线方向和索结构的背阴面外法线方向,沿每一个测量索结构沿壁厚的温度分布的方向在索结构中均匀选取不少于三个点,对于支承索沿每一个测量索结构沿壁厚的温度分布的方向仅仅取一个点,仅仅测量支承索的表面点的温度,测量所有被选取点的温度,测得的温度称为“索结构沿厚度的温度分布数据”,其中沿与同一“水平面与索结构表面的交线”相交的、“测量索结构沿壁厚的温度分布的方向”测量获得的“索结构沿厚度的温度分布数据”,在本方法中称为“相同海拔高度索结构沿厚度的温度分布数据”,设选取了 H 个不同的海拔高度,在每一个海拔高度处,选取了 B 个测量索结构沿壁厚的温度分布的方向,沿每个测量索结构沿壁厚的温度分布的方向在索结构中选取了 E 个点,其中 H 和 E 都不小于 3,B 不小于 2,对于支承索 E 等于 1,计索结构上“测量索结构沿厚度的温度分布数据的点”的总数为 HBE 个,后面将通过实测得到这 HBE 个“测量索结构沿厚度的温度分布数据的点”的温度,称实测得到的温度数据为“HBE 个索结构沿厚度温度实测数据”,如果是利用索结构的传热学计算模型,通过传热计算得到这 HBE 个测量索结构沿厚度的温度分布数据的点的温度,就称计算得到的温度数据为“HBE 个索结构沿厚度温度计算数据”;在索结构所在地按照气象学测量气温要求选取一个位置,将在此位置实测得到符合气象学测量气温要求的索结构所在环境的气温;在索结构所在地的空旷无遮挡处选取一个位置,该位置应当在全年的每一日都能得到该地所能得

到的该日的最充分的日照，在该位置安放一块碳钢材质的平板，称为参考平板，参考平板与地面不可接触，参考平板离地面距离不小于 1.5 米，该参考平板的一面向阳，称为向阳面，参考平板的向阳面是粗糙的和深色的，参考平板的向阳面应当在全年的每一日都能得到一块平板在该地所能得到的该日的最充分的日照，参考平板的非向阳面覆有保温材料，将实时监测得到参考平板的向阳面的温度；

[0016] b2 : 实时监测得到上述 R 个索结构表面点的 R 个索结构表面温度实测数据，同时实时监测得到前面定义的索结构沿厚度的温度分布数据，同时实时监测得到符合气象学测量气温要求的索结构所在环境的气温数据；通过实时监测得到当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的索结构所在环境的气温实测数据序列，索结构所在环境的气温实测数据序列由当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的索结构所在环境的气温实测数据按照时间先后顺序排列，找到索结构所在环境的气温实测数据序列中的最高温度和最低温度，用索结构所在环境的气温实测数据序列中的最高温度减去最低温度得到索结构所在环境的当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的最大温差，称为环境最大温差，记为 $\Delta T_{e\max}$ ；由索结构所在环境的气温实测数据序列通过常规数学计算得到索结构所在环境的气温关于时间的变化率，该变化率也随着时间变化；通过实时监测得到当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的参考平板的向阳面的温度的实测数据序列，参考平板的向阳面的温度的实测数据序列由当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的参考平板的向阳面的温度的实测数据按照时间先后顺序排列，找到参考平板的向阳面的温度的实测数据序列中的最高温度和最低温度，用参考平板的向阳面的温度的实测数据序列中的最高温度减去最低温度得到参考平板的向阳面的温度的当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的最大温差，称为参考平板最大温差，记为 $\Delta T_{p\max}$ ；通过实时监测得到当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的所有 R 个索结构表面点的索结构表面温度实测数据序列，有 R 个索结构表面点就有 R 个索结构表面温度实测数据序列，每一个索结构表面温度实测数据序列由一个索结构表面点的当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的索结构表面温度实测数据按照时间先后顺序排列，找到每一个索结构表面温度实测数据序列中的最高温度和最低温度，用每一个索结构表面温度实测数据序列中的最高温度减去最低温度得到每一个索结构表面点的温度的当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的最大温差，有 R 个索结构表面点就有 R 个当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的最大温差数值，其中的最大值称为索结构表面最大温差，记为 $\Delta T_{s\max}$ ；由每一索结构表面温度实测数据序列通过常规数学计算得到每一个索结构表面点的温度关于时间的变化率，每一个索结构表面点的温度关于时间的变化率也随着时间变化；通过实时监测得到当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的、在同一时刻、HBE 个“索结构沿厚度的温度分布数据”后，计算在每一个选取的海拔高度处共计 BE 个“相同海拔高度索结构沿厚度的温度分布数据”中的最高温度与最低温度的差值，这个差值的绝对值称为“相同海拔高度处索结构厚度方向最大温差”，选取了 H 个不同的海拔高度就有 H 个“相同海拔高度处索结构厚度方向最大温差”，称这 H 个“相同海拔高度处索结构厚度方向最大温差”中的最大值为“索结构厚度方向最大温差”，记为 $\Delta T_{t\max}$ ；

[0017] b3 : 测量计算获得索结构稳态温度数据；首先，确定获得索结构稳态温度数据的时刻，与决定获得索结构稳态温度数据的时刻相关的条件有六项，第一项条件是获得索结

构稳态温度数据的时刻介于当日日落时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间,日落时刻是指根据地球自转和公转规律确定的气象学上的日落时刻,能够查询资料或通过常规气象学计算得到所需的每一日的日落时刻;第二项条件的 a 条件是在当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的这段时间内,参考平板最大温差 ΔT_{pmax} 和索结构表面最大温差 ΔT_{smax} 都不大于 5 摄氏度;第二项条件的 b 条件是在当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的这段时间内,在前面测量计算得到的环境最大温差 ΔT_{emax} 不大于参考日温差 ΔT_r ,且参考平板最大温差 ΔT_{pmax} 减去 2 摄氏度后不大于 ΔT_{emax} ,且索结构表面最大温差 ΔT_{smax} 不大于 ΔT_{pmax} ;只需满足第二项的 a 条件和 b 条件中的一项就称为满足第二项条件;第三项条件是在获得索结构稳态温度数据的时刻,索结构所在环境的气温关于时间的变化率的绝对值不大于每小时 0.1 摄氏度;第四项条件是在获得索结构稳态温度数据的时刻,R 个索结构表面点中的每一个索结构表面点的温度关于时间的变化率的绝对值不大于每小时 0.1 摄氏度;第五项条件是在获得索结构稳态温度数据的时刻,R 个索结构表面点中的每一个索结构表面点的索结构表面温度实测数据为当日日出时刻到次日日出时刻后 30 分钟之间的极小值;第六项条件是在获得索结构稳态温度数据的时刻,“索结构厚度方向最大温差” ΔT_{tmax} 不大于 1 摄氏度;本方法利用上述六项条件,将下列三种时刻中的任意一种称为“获得索结构稳态温度数据的数学时刻”,第一种时刻是满足上述“与决定获得索结构稳态温度数据的时刻相关的条件”中的第一项至第五项条件的时刻,第二种时刻是仅仅满足上述“与决定获得索结构稳态温度数据的时刻相关的条件”中的第六项条件的时刻,第三种时刻是同时满足上述“与决定获得索结构稳态温度数据的时刻相关的条件”中的第一项至第六项条件的时刻;当获得索结构稳态温度数据的数学时刻就是本方法中实际记录数据时刻中的一个时刻时,获得索结构稳态温度数据的时刻就是获得索结构稳态温度数据的数学时刻;如果获得索结构稳态温度数据的数学时刻不是本方法中实际记录数据时刻中的任一个时刻,则取本方法最接近于获得索结构稳态温度数据的数学时刻的那个实际记录数据的时刻为获得索结构稳态温度数据的时刻;本方法将使用在获得索结构稳态温度数据的时刻测量记录的量进行索结构相关健康监测分析;本方法近似认为获得索结构稳态温度数据的时刻的索结构温度场处于稳态,即此时刻的索结构温度不随时间变化,此时刻就是本方法的“获得索结构稳态温度数据的时刻”;然后,根据索结构传热特性,利用获得索结构稳态温度数据的时刻的“R 个索结构表面温度实测数据”和“HBE 个索结构沿厚度温度实测数据”,利用索结构的传热学计算模型,通过常规传热计算得到在获得索结构稳态温度数据的时刻的索结构的温度分布,此时索结构的温度场按稳态进行计算,计算得到的在获得索结构稳态温度数据的时刻的索结构的温度分布数据包括索结构上 R 个索结构表面点的计算温度,R 个索结构表面点的计算温度称为 R 个索结构稳态表面温度计算数据,还包括索结构在前面选定的 HBE 个“测量索结构沿厚度的温度分布数据的点”的计算温度,HBE 个“测量索结构沿厚度的温度分布数据的点”的计算温度称为“HBE 个索结构沿厚度温度计算数据”,当 R 个索结构表面温度实测数据与 R 个索结构稳态表面温度计算数据对应相等时,且“HBE 个索结构沿厚度温度实测数据”与“HBE 个索结构沿厚度温度计算数据”对应相等时,计算得到的在获得索结构稳态温度数据的时刻的索结构的温度分布数据在本方法中称为“索结构稳态温度数据”,此时的“R 个索结构表面温度实测数据”称为“R 个索结构稳态表面温度实测数据”,“HBE 个索结构沿厚度温度实测数据”称为“HBE 个索结构沿厚度稳态温度实测数据”;在索

结构的表面上取“R个索结构表面点”时，“R个索结构表面点”的数量与分布必须满足三个条件，第一个条件是当索结构温度场处于稳态时，当索结构表面上任意一点的温度是通过“R个索结构表面点”中与索结构表面上该任意点相邻的点的实测温度线性插值得到时，线性插值得到的索结构表面上该任意点的温度与索结构表面上该任意点的实际温度的误差不大于5%；索结构表面包括支承索表面；第二个条件是“R个索结构表面点”中在同一海拔高度的点的数量不小于4，且“R个索结构表面点”中在同一海拔高度的点沿着索结构表面均匀；“R个索结构表面点”沿海拔高度的所有两两相邻索结构表面点的海拔高度之差的绝对值中的最大值 Δh 不大于 0.2°C 除以 ΔT_b 得到的数值，为方便叙述取 ΔT_b 的单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ，为方便叙述取 Δh 的单位为 m ；“R个索结构表面点”沿海拔高度的两两相邻索结构表面点的定义是指只考虑海拔高度时，在“R个索结构表面点”中不存在一个索结构表面点，该索结构表面点的海拔高度数值介于两两相邻索结构表面点的海拔高度数值之间；第三个条件是查询或按气象学常规计算得到索结构所在地和所在海拔区间的日照规律，再根据索结构的几何特征及方位数据，在索结构上找到全年受日照时间最充分的那些表面点的位置，“R个索结构表面点”中至少有一个索结构表面点是索结构上全年受日照时间最充分的那些表面点中的一个点；

[0018] c. 按照“本方法的索结构的温度测量计算方法”直接测量计算得到初始状态下的索结构稳态温度数据，初始状态下的索结构稳态温度数据称为初始索结构稳态温度数据，记为“初始索结构稳态温度数据向量 T_0 ”；实测或查资料得到索结构所使用的各种材料的随温度变化的物理和力学性能参数；在实测得到 T_0 的同时，也就是在获得初始索结构稳态温度数据向量 T_0 的时刻的同一时刻，直接测量计算得到初始索结构的实测数据，初始索结构的实测数据是包括索结构集中载荷测量数据、索结构分布载荷测量数据、索结构体积载荷测量数据、索结构支座初始线位移测量数据、所有被监测量的初始数值、所有支承索的初始索力数据、初始索结构模态数据、初始索结构应变数据、初始索结构几何数据、初始索结构支座空间坐标数据、初始索结构角度数据、初始索结构空间坐标数据在内的实测数据，在得到初始索结构的实测数据的同时，测量计算得到包括支承索的无损检测数据在内的能够表达支承索的健康状态的数据，此时的能够表达支承索的健康状态的数据称为支承索初始健康状态数据；所有被监测量的初始数值组成被监测量初始数值向量 C_0 ，被监测量初始数值向量 C_0 的编号规则与M个被监测量的编号规则相同；利用支承索初始健康状态数据、索结构支座初始线位移测量数据和索结构载荷测量数据建立被评估对象初始损伤向量 d_0 ，向量 d_0 表示用初始力学计算基准模型 A_0 表示的索结构的被评估对象的初始健康状态；被评估对象初始损伤向量 d_0 的元素个数等于N， d_0 的元素与被评估对象是一一对应关系，向量 d_0 的元素的编号规则与被评估对象的编号规则相同；如果 d_0 的某一个元素对应的被评估对象是索系统中的一根支承索，那么 d_0 的该元素的数值代表对应支承索的初始损伤程度，若该元素的数值为0，表示该元素所对应的支承索是完好的，没有损伤的，若其数值为100%，则表示该元素所对应的支承索已经完全丧失承载能力，若其数值介于0和100%之间，则表示该支承索丧失了相应比例的承载能力；如果 d_0 的某一个元素对应的被评估对象是某一个支座的某一个线位移分量，那么 d_0 的该元素的数值代表这个支座的该线位移分量的初始数值；如果 d_0 的某一个元素对应的被评估对象是某一个载荷，本方法中取 d_0 的该元素数值为0，代表这个载荷的变化的初始数值为0；如果没有索结构支座初始线位移测量数据或者可以

认为索结构支座初始线位移为0时,向量 d_0 中与索结构支座线位移相关的各元素数值取0;如果没有支承索的无损检测数据及其他能够表达支承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_0 中与支承索相关的各元素数值取0;初始索结构支座空间坐标数据指索结构设计状态下的支座空间坐标数据,索结构支座初始线位移测量数据指在建立初始力学计算基准模型 A_0 时,索结构支座相对于索结构设计状态下的支座所发生的线位移;

[0019] d. 根据索结构的设计图、竣工图和初始索结构的实测数据、支承索初始健康状态数据、索结构支座初始线位移测量数据、索结构集中载荷测量数据、索结构分布载荷测量数据、索结构体积载荷测量数据、索结构所使用的各种材料的随温度变化的物理和力学性能参数、初始索结构稳态温度数据向量 T_0 和前面步骤得到的所有的索结构数据,建立计入“索结构稳态温度数据”的索结构的初始力学计算基准模型 A_0 ,基于 A_0 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%;对应于 A_0 的“索结构稳态温度数据”就是“初始索结构稳态温度数据向量 T_0 ”;对应于 A_0 的被评估对象健康状态用被评估对象初始损伤向量 d_0 表示;对应于 A_0 的所有被监测量的初始数值用被监测量初始数值向量 C_0 表示;第一次建立计入“索结构稳态温度数据”的索结构的当前初始力学计算基准模型 A^t_0 、被监测量当前初始数值向量 C^t_0 和“当前初始索结构稳态温度数据向量 T^t_0 ”;第一次建立索结构的当前初始力学计算基准模型 A^t_0 和被监测量当前初始数值向量 C^t_0 时,索结构的当前初始力学计算基准模型 A^t_0 就等于索结构的初始力学计算基准模型 A_0 ,被监测量当前初始数值向量 C^t_0 就等于被监测量初始数值向量 C_0 ; A^t_0 对应的“索结构稳态温度数据”称为“当前初始索结构稳态温度数据”,记为“当前初始索结构稳态温度数据向量 T^t_0 ”,第一次建立索结构的当前初始力学计算基准模型 A^t_0 时, T^t_0 就等于 T_0 ; A^t_0 的被评估对象的初始健康状态与 A_0 的被评估对象的健康状态相同,也用被评估对象初始损伤向量 d_0 表示,在后面的循环过程中 A^t_0 的被评估对象的初始健康状态始终用被评估对象初始损伤向量 d_0 表示; T_0 和 d_0 是 A_0 的参数,由 A_0 的力学计算结果得到的所有被监测量的初始数值与 C_0 表示的所有被监测量的初始数值相同,因此也可以说 C_0 由 A_0 的力学计算结果组成; T^t_0 和 d_0 是 A^t_0 的参数, C^t_0 由 A^t_0 的力学计算结果组成;

[0020] e. 从这里进入由第e步到第m步的循环;在结构服役过程中,不断按照“本方法的索结构的温度测量计算方法”不断实测计算获得“索结构稳态温度数据”的当前数据,“索结构稳态温度数据”的当前数据称为“当前索结构稳态温度数据”,记为“当前索结构稳态温度数据向量 T^t ”,向量 T^t 的定义方式与向量 T_0 的定义方式相同;在实测得到当前索结构稳态温度数据向量 T^t 的同时,对新增加的 M_2 根传感索进行无损检测,从中鉴别出出现损伤或松弛的传感索,依据被监测量编号规则,从本方法之前出现的按照被监测量编号规则编号的各向量中去除与鉴别出的出现损伤或松弛的传感索对应的元素,在本方法之后出现的各向量和矩阵中也不再出现与鉴别出的出现损伤或松弛的传感索对应的元素,在本方法之后提到传感索时不再包括这里被鉴别出出现损伤或松弛的传感索,在本方法之后提到被监测量时不再包括这里被鉴别出出现损伤或松弛的传感索的索力;从索结构上鉴别出几根出现损伤或松弛的传感索,就将 M_2 和 M 减小同样的数量;

[0021] f. 根据当前索结构稳态温度数据向量 T^t ,按照步骤f1至f3更新当前初始力学计算基准模型 A^t_0 、被监测量当前初始数值向量 C^t_0 和当前初始索结构稳态温度数据向量 T^t_0 ;

[0022] f1. 比较 T^t 与 T^t_o , 如果 T^t 等于 T^t_o , 则 A^t_o 、 C^t_o 和 T^t_o 保持不变; 否则需要按下列步骤对 A^t_o 、 C^t_o 和 T^t_o 进行更新;

[0023] f2. 计算 T^t 与 T^t_o 的差, T^t 与 T^t_o 的差就是当前索结构稳态温度数据关于初始索结构稳态温度数据的变化, T^t 与 T^t_o 的差用稳态温度变化向量 S 表示, S 等于 T^t 减去 T^t_o , S 表示索结构稳态温度数据的变化;

[0024] f3. 对 A_o 中的索结构施加温度变化, 施加的温度变化的数值就取自稳态温度变化向量 S , 对 A_o 中的索结构施加的温度变化后得到更新的当前初始力学计算基准模型 A^t_o , 更新 A^t_o 的同时, T^t_o 所有元素数值也用 T^t 的所有元素数值对应代替, 即更新了 T^t_o , 这样就得到了正确地对应于 A^t_o 的 T^t_o ; 更新 C^t_o 的方法是: 当更新 A^t_o 后, 通过力学计算得到 A^t_o 中所有被监测量的、当前的具体数值, 这些具体数值组成 C^t_o ; A^t_o 的支承索的初始健康状态始终用被评估对象初始损伤向量 d_o 表示;

[0025] g. 在当前初始力学计算基准模型 A^t_o 的基础上按照步骤 g1 至 g4 进行若干次力学计算, 通过计算获得索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 和被评估对象单位变化向量 D_u ;

[0026] g1. 索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 是不断更新的, 即在更新当前初始力学计算基准模型 A^t_o 、被监测量当前初始数值向量 C^t_o 和当前初始索结构稳态温度数据向量 T^t_o 之后, 必须接着更新索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 和被评估对象单位变化向量 D_u ;

[0027] g2. 在索结构的当前初始力学计算基准模型 A^t_o 的基础上进行若干次力学计算, 计算次数数值上等于所有被评估对象的数量 N , 有 N 个评估对象就有 N 次计算; 依据被评估对象的编号规则, 依次进行计算; 每一次计算假设只有一个被评估对象在原有损伤或线位移或载荷的基础上再增加单位损伤或单位线位移或载荷单位变化, 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向量 d_o 表示的该支承索已有损伤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线位移分量, 就假设该支座在该位移方向再增加单位线位移, 如果该被评估对象是一个载荷, 就假设该载荷在向量 d_o 表示的该载荷已有变化量的基础上再增加载荷单位变化, 用 D_{uk} 记录这一增加的单位损伤或单位线位移或载荷单位变化, 其中 k 表示增加单位损伤或单位线位移或载荷单位变化的被评估对象的编号, D_{uk} 是被评估对象单位变化向量 D_u 的一个元素, 被评估对象单位变化向量 D_u 的元素的编号规则与向量 d_o 的元素的编号规则相同; 每一次计算中增加单位损伤或单位线位移或载荷单位变化的被评估对象不同于其它次计算中增加单位损伤或单位线位移或载荷单位变化的被评估对象, 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, 被监测量计算当前向量的元素编号规则与被监测量初始数值向量 C_o 的元素编号规则相同;

[0028] g3. 每一次计算得到的被监测量计算当前向量减去被监测量当前初始数值向量 C_o 得到一个向量, 再将该向量的每一个元素都除以该次计算所假设的单位损伤或单位线位移或载荷单位变化数值, 得到一个被监测量单位变化向量, 有 N 个被评估对象就有 N 个被监测量单位变化向量;

[0029] g4. 由这 N 个被监测量单位变化向量按照 N 个被评估对象的编号规则, 依次组成有

N列的索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC ;索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 的每一列对应于一个被监测量单位变化向量;索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 的每一行对应于同一个被监测量在不同被评估对象增加单位损伤或单位线位移或载荷单位变化时的不同的单位变化幅度;索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 的列的编号规则与向量 d_o 的元素的编号规则相同,索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 的行的编号规则与 M 个被监测量的编号规则相同;

[0030] h. 在实测得到当前索结构稳态温度数据向量 T^t 的同时,实测得到在获得当前索结构稳态温度数据向量 T^t 的时刻的同一时刻的索结构的所有被监测量的当前实测数值,组成被监测量当前数值向量 C ;被监测量当前数值向量 C 和被监测量当前初始数值向量 C^t 。与被监测量初始数值向量 C_o 的定义方式相同,三个向量的相同编号的元素表示同一被监测量在不同时刻的具体数值;

[0031] i. 定义被评估对象当前名义损伤向量 d ,被评估对象当前名义损伤向量 d 的元素个数等于被评估对象的数量,被评估对象当前名义损伤向量 d 的元素和被评估对象之间是一一对应关系,被评估对象当前名义损伤向量 d 的元素数值代表对应被评估对象的名义损伤程度或名义线位移或名义载荷变化量;向量 d 的元素的编号规则与向量 d_o 的元素的编号规则相同;

[0032] j. 依据被监测量当前数值向量 C 同被监测量当前初始数值向量 C^t 、索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 和待求的被评估对象当前名义损伤向量 d 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 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名义损伤向量 d ;

$$C = C_o^t + \Delta C \bullet d \quad \text{式 1}$$

[0034] k. 定义被评估对象当前实际损伤向量 d^a ,被评估对象当前实际损伤向量 d^a 的元素个数等于被评估对象的数量,被评估对象当前实际损伤向量 d^a 的元素和被评估对象之间是一一对应关系,被评估对象当前实际损伤向量 d^a 的元素数值代表对应被评估对象的实际损伤程度或实际线位移或实际载荷变化量;向量 d^a 的元素的编号规则与向量 d_o 的元素的编号规则相同;

[0035] 1. 利用式 2 表达的被评估对象当前实际损伤向量 d^a 的第 k 个元素 d_{ak}^a 同被评估对象初始损伤向量 d_o 的第 k 个元素 d_{ok} 和被评估对象当前名义损伤向量 d 的第 k 个元素 d_k 间的关系,计算得到被评估对象当前实际损伤向量 d^a 的所有元素;

$$[0036] d_{ak}^a = \begin{cases} 1 - (1 - d_{ok})(1 - d_k), & \text{如果该元素对应于一根支承索} \\ d_{ok} + d_k, & \text{如果该元素不对应于一根支承索} \end{cases} \quad \text{式 2}$$

[0037] 式 2 中 $k = 1, 2, 3, \dots, N$, d_{ak}^a 表示第 k 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支承索,那么 d_{ak}^a 表示其当前实际损伤, d_{ak}^a 为 0 时表示无损伤,为 100% 时表示该支承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;如果该被评估对象是一个支座的一个线位移分量,那么 d_{ak}^a 表示其当前实际线位移数值;

[0038] m. 回到第 e 步,开始由第 e 步到第 m 步的下一次循环。

[0039] 有益效果:结构健康监测系统首先通过使用传感器对结构响应进行长期在线监

测,获得监测数据后对其进行在线(或离线)分析得到结构健康状态数据,由于结构的复杂性,结构健康监测系统需要使用大量的传感器等设备进行结构健康监测,因此其造价通常相当的高,可以说造价问题也是制约结构健康监测技术应用的一个主要问题。另一方面,核心被评估对象(例如斜拉索)的健康状态的正确识别是结构健康状态的正确识别的不可或缺的组成部分,甚至是其全部,而次要被评估对象(例如结构承受的载荷)的变化(例如通过斜拉桥的汽车的数量和质量的变化)的正确识别对索结构的健康状态的正确识别的影响是微乎其微的,甚至是不需要的。但是次要被评估对象的数量与核心被评估对象的数量通常是相当的,次要被评估对象的数量还常常大于核心被评估对象的数量,这样被评估对象的数量常常是核心被评估对象的数量的多倍。在次要被评估对象(载荷)发生变化时,为了准确识别核心被评估对象,常规方法要求被监测量(使用传感器等设备测量获得)的数量必须大于等于被评估对象的数量,当发生变化的次要被评估对象的数量比较大时(实际上经常如此),结构健康监测系统所需要的传感器等设备的数量是非常庞大的,因此结构健康监测系统的造价就会变得非常高,甚至高得不可接受。幸好发明人研究发现,在次要被评估对象(例如结构承受的正常载荷,结构的正常载荷是指结构正在承受的载荷不超过按照结构设计书或结构竣工书所限定的结构许用载荷)变化较小时(对于载荷而言就是结构仅仅承受正常载荷,结构承受的载荷是否是正常载荷,能够通过肉眼等方法观察确定,如果发现结构承受的载荷不是正常载荷,那么人为去除、移除非正常载荷后,结构就只承受正常载荷了),它们所引起的结构响应的变化幅度(本说明书称其为“次要响应”)远小于核心被评估对象的变化(例如支承索受损)所引起的结构响应的变化幅度(本说明书称其为“核心响应”),次要响应与核心响应之和是结构响应的总变化(本说明书称其为“总体响应”),显然核心响应在总体响应中占据主导地位,基于此发明人研究发现在确定被监测量数量时即使选取稍大于核心被评估对象数量、但远小于被评估对象数量的数值(本方法就是这样做的),也就是说即使采用数量相对少很多的传感器等设备,仍然可以准确获得核心被评估对象的健康状态数据,满足结构健康状态监测的核心需求,因此本方法所建议的结构健康监测系统的造价显而易见地比常规方法所要求的结构健康监测系统的造价低很多,也就是说本方法能够以造价低得多的条件实现对索结构的核心被评估对象的健康状态的评估,这种益处是对结构健康监测技术能否被采用是举足轻重的。

具体实施方式

[0040] 本方法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方法的应用或使用。具体实施时,下列步骤是可采取的各种步骤中的一种。

[0041] 第一步:首先确认索结构承受的可能发生变化的载荷的数量。根据索结构所承受的载荷的特点,确认其中“所有可能发生变化的载荷”,或者将所有的载荷视为“所有可能发生变化的载荷”,设共有 JZW 个可能发生变化的载荷,即共有 JZW 个次要被评估对象。

[0042] 设索结构的支座线位移分量的数量、索结构的支承索的数量和 JZW 个“所有可能发生变化的载荷”的数量之和为 N ,即共有 N 个被评估对象。给被评估对象连续编号,该编号在后续步骤中将用于生成向量和矩阵。

[0043] 设被评估的支承索和支座线位移分量的数量之和为 P ,即核心被评估对象的数量为 P ,设被评估的支座线位移分量的数量为 Z ,设被评估的支承索的数量为 M_1 ,结构索力数据

包括这 M_1 根支承索的索力, 本方法在监测全部 M_1 根支承索索力的基础上, 增加 M_2 个其他被监测量。

[0044] 增加的 M_2 个其他被监测量仍然是索力, 叙述如下:

[0045] 在结构健康检测系统开始工作前, 先在索结构上人为增加 M_2 (M_2 不小于 $Z+4$) 根索, 称为传感索, 新增加的 M_2 根传感索的刚度同索结构的任意一根支承索的刚度相比, 应当小很多, 例如小 20 倍, 新增加的 M_2 根传感索的索力应当较小, 例如其横截面正应力应当小于其疲劳极限, 这些要求可以保证新增加的 M_2 根传感索不会发生疲劳损伤, 新增加的 M_2 根传感索的两端应当充分锚固, 保证不会出现松弛, 新增加的 M_2 根传感索应当得到充分的防腐蚀保护, 保证新增加的 M_2 根传感索不会发生损伤和松弛, 在结构健康监测过程中将监测这新增加的 M_2 根传感索的索力。

[0046] 还可以采用多增加传感索的方式来保证健康监测的可靠性, 例如使 M_2 不小于 $Z+8$, 在结构健康监测过程中只挑选其中的完好的传感索的索力数据 (称为实际可以使用的被监测量, 记录其数量为 K , K 不得小于 $Z+4$) 和对应的索结构被监测量单位变化矩阵 ΔC 进行健康状态评估。在结构健康监测过程中将监测这新增加的 M_2 根传感索的索力。新增加的 M_2 根传感索应当安装在结构上、人员易于到达的部位, 便于人员对其进行无损检测。

[0047] 在本方法中新增加的 M_2 根传感索作为索结构的一部分, 后文再提到索结构时, 索结构包括增加 M_2 根传感索前的索结构和新增加的 M_2 根传感索, 也就是说后文提到索结构时指包括新增加的 M_2 根传感索的索结构。因此后文提到按照“本方法的索结构的温度测量计算方法”测量计算得到“索结构稳态温度数据”时, 其中的索结构包括新增加的 M_2 根传感索, 得到的“索结构稳态温度数据”包括新增加的 M_2 根传感索的稳态温度数据, 获得新增加的 M_2 根传感索的稳态温度数据的方法同于索结构的 M_1 根支承索的稳态温度数据的获得方法, 在后文不再一一交代; 测量得到新增加的 M_2 根传感索的索力的方法同于索结构的 M_1 根支承索的索力的测量方法, 在后文不再一一交代; 对索结构的支承索进行任何测量时, 同时对新增加的 M_2 根传感索进行同样的测量, 在后文不再一一交代; 新增加的 M_2 根传感索除了不发生损伤和松弛外, 新增加的 M_2 根索的信息量与索结构的支承索的信息量相同, 在后文不再一一交代; 新增加的 M_2 根传感索的索力就是增加的 M_2 个其他被监测量。在后文建立索结构的各种力学模型时, 将新增加的 M_2 根传感索视同索结构的 M_1 根支承索对待, 除了提到支承索的损伤和松弛的场合, 在其他场合提到支承索时包括新增加的 M_2 根索。

[0048] 综合上述被监测量, 整个索结构共有 M ($M = M_1 + M_2$) 个被监测量, M 不小于 P 加 4。

[0049] 为方便起见, 在本方法中将“索结构的被监测的所有参量”简称为“被监测量”。给 M 个被监测量连续编号, 该编号在后续步骤中将用于生成向量和矩阵。本方法用用变量 j 表示这一编号, $j = 1, 2, 3, \dots, M$ 。

[0050] 按照技术方案和权利要求书中给出的方法, 采用包括常规温度测量计算方法在内的常规方法, 确定“本方法的索结构的温度测量计算方法”。

[0051] 第二步: 建立初始力学计算基准模型 A_0 。

[0052] 在索结构竣工之时, 或者在建立健康监测系统前, 按照“本方法的索结构的温度测量计算方法”测量计算得到“索结构稳态温度数据”(可以用常规温度测量方法测量, 例如使用热电阻测量), 此时的“索结构稳态温度数据”用向量 T_0 表示, 称为初始索结构稳态温度数据向量 T_0 。在实测得到 T_0 的同时, 使用常规方法直接测量计算得到索结构的所有被监

测量的初始数值,组成被监测量初始数值向量 C_o 。

[0053] 本方法中可以具体按照下列方法在获得某某(例如初始或当前等)索结构稳态温度数据向量的时刻的同一时刻,使用某某方法测量计算得到某某被测量量被监测量(例如索结构的所有被监测量)的数据:在测量记录温度(包括索结构所在环境的气温、参考平板的向阳面的温度和索结构表面温度)的同时,例如每隔10分钟测量记录一次温度,那么同时同样也每隔10分钟测量记录某某被测量量被监测量(例如索结构的所有被监测量)的数据。一旦确定了获得索结构稳态温度数据的时刻,那么与获得索结构稳态温度数据的时刻同一时刻的某某被测量量被监测量(例如索结构的所有被监测量)的数据就称为在获得索结构稳态温度数据的时刻的同一时刻,使用某某方法测量计算方法得到的某某被测量量被监测量的数据。

[0054] 使用常规方法(查资料或实测)得到索结构所使用的各种材料的随温度变化的物理参数(例如热膨胀系数)和力学性能参数(例如弹性模量、泊松比)。

[0055] 在实测得到 T_o 的同时,使用常规方法实测计算得到索结构的实测计算数据。索结构的实测计算数据包括支承索的无损检测数据等能够表达索的健康状态的数据、索结构初始几何数据、索力数据、拉杆拉力数据、初始索结构支座广义坐标数据(初始索结构支座广义坐标数据包括初始索结构支座空间坐标数据和初始索结构支座角坐标数据)、索结构支座初始线位移测量数据、索结构集中载荷测量数据、索结构分布载荷测量数据、索结构体积载荷测量数据、索结构模态数据、结构应变数据、结构角度测量数据、结构空间坐标测量数据等实测数据。初始索结构支座空间坐标数据指索结构设计状态下的支座空间坐标数据,索结构支座初始线位移测量数据指在建立初始力学计算基准模型 A_o 时,索结构支座相对于索结构设计状态下的支座所发生的线位移。索结构的初始几何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。利用支承索的无损检测数据等能够表达支承索的健康状态的数据、索结构支座初始线位移测量数据以及索结构载荷测量数据建立被评估对象初始损伤向量 d_o (如式(1)所示),用 d_o 表示索结构(用初始力学计算基准模型 A_o 表示)的被评估对象的初始健康状态。如果没有支承索的无损检测数据及其他能够表达支承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 中与支承索相关的各元素数值取0;如果没有索结构支座初始线位移测量数据或者可以认为索结构支座初始线位移为0时,向量 d_o 中与索结构支座线位移相关的各元素数值取0;如果 d_o 的某一个元素对应的被评估对象是某一个载荷,本方法中取 d_o 的该元素数值为0,代表这个载荷的变化的初始数值为0。利用索结构的设计图、竣工图和初始索结构的实测数据、支承索的无损检测数据、索结构所使用的各种材料的随温度变化的物理和力学性能参数和初始索结构稳态温度数据向量 T_o ,利用力学方法(例如有限元法)计入“索结构稳态温度数据”建立初始力学计算基准模型 A_o 。

[0056] 不论用何种方法获得初始力学计算基准模型 A_o ,计入“索结构稳态温度数据”(即初始索结构稳态温度数据向量 T_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,误差一般不得大于5%。这样可保证利用 A_o 计算所得的模拟情况下的索力计算数据、应变计算数据、索结构形状计算数据和位移计算数据、索结构角度数据、索结构空间坐

标数据等,可靠地接近所模拟情况真实发生时的实测数据。模型 A_o 中支承索的健康状态用被评估对象初始损伤向量 d_o 表示,索结构稳态温度数据用初始索结构稳态温度数据向量 T_o 表示。由于基于 A_o 计算得到所有被监测量的计算数值非常接近所有被监测量的初始数值(实测得到),所以也可以用在 A_o 的基础上、进行力学计算得到的、 A_o 的每一个被监测量的计算数值组成被监测量初始数值向量 C_o 。对应于 A_o 的“索结构稳态温度数据”就是“初始索结构稳态温度数据向量 T_o ”,对应于 A_o 的被评估对象健康状态用被评估对象初始损伤向量 d_o 表示,对应于 A_o 的所有被监测量的初始数值用被监测量初始数值向量 C_o 表示, T_o 和 d_o 是 A_o 的参数, C_o 由 A_o 的力学计算结果组成。

[0057] 第三步:第一次建立当前初始力学计算基准模型 A^t 、被监测量当前初始数值向量 C^t 和“当前初始索结构稳态温度数据向量 T^t ”,具体方法是:在初始时刻,即第一次建立当前初始力学计算基准模型 A^t 和被监测量当前初始数值向量 C^t 时, A^t 就等于 A_o , C^t 就等于 C_o , A^t 对应的“索结构稳态温度数据”记为“当前初始索结构稳态温度数据向量 T^t ”,在初始时刻(也就是第一次建立 A^t 时), T^t 就等于 T_o ,向量 T^t 的定义方式与向量 T_o 的定义方式相同。 A^t 的评估对象的健康状态与 A_o 的评估对象的健康状态(被评估对象初始损伤向量 d_o 表示)相同,在循环过程中 A^t 的评估对象的健康状态始终用被评估对象初始损伤向量 d_o 表示。 T^t 和 d_o 是 A^t 的参数, C^t 由 A^t 的力学计算结果组成。

[0058] 第四步:在索结构服役过程中,按照“本方法的索结构的温度测量计算方法”不断实测计算获得“索结构稳态温度数据”的当前数据(称为“当前索结构稳态温度数据向量 T^t ”,向量 T^t 的定义方式与向量 T_o 的定义方式相同)。在实测得到 T^t 的同时,实测得到索结构的所有被监测量的当前实测数值,组成“被监测量当前数值向量 C ”。

[0059] 在实测得到当前索结构稳态温度数据向量 T^t 的同时,对新增加的 M_2 根传感索进行无损检测,例如超声波探伤、目视检查、红外成像检查,从中鉴别出出现损伤或松弛的传感索,依据被监测量编号规则,从本方法之前出现的按照被监测量编号规则编号的各向量中去除与鉴别出的出现损伤或松弛的传感索对应的元素,在本方法之后出现的各向量和矩阵中也不再出现与鉴别出的出现损伤或松弛的传感索对应的元素,在本方法之后提到传感索时不再包括这里被鉴别出出现损伤或松弛的传感索,在本方法之后提到被监测量时不再包括这里被鉴别出出现损伤或松弛的传感索的索力;从索结构上鉴别出几根出现损伤或松弛的传感索,就将 M_2 和 M 减小同样的数量。

[0060] 第五步:根据当前索结构稳态温度数据向量 T^t ,在必要时更新当前初始力学计算基准模型 A^t 、被监测量当前初始数值向量 C^t 和当前初始索结构稳态温度数据向量 T^t 。在第四步实测得到当前索结构稳态温度数据向量 T^t 后,比较 T^t 和 T_o ,如果 T^t 等于 T_o ,则不需要对 A^t 、 C^t 和 T^t 进行更新,否则需要对 A^t 、 C^t 和 T^t 进行更新,更新方法按技术方案中规定的步骤进行。

[0061] 第六步:在当前初始力学计算基准模型 A^t 的基础上进行若干次力学计算,通过计算获得索结构单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 和被评估对象单位变化向量 D_u 。具体方法按技术方案中规定的步骤进行,其中可以取 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线位移分量,就假设该支座在该位移方向在向量 d_o 表示的该支座已有线位移的基础上再发生单位线位移(例如 2mm, 5mm, 10mm 等为单位线位移),如果该被评估对象是一个载荷,就假设该载荷在向量 d_o 表示的该载荷已有变化量

的基础上再增加载荷单位变化（如果该载荷是分布载荷，且该分布载荷是线分布载荷，载荷单位变化可以取 $1\text{kN}/\text{m}$ 、 $2\text{kN}/\text{m}$ 、 $3\text{kN}/\text{m}$ 或 $1\text{kNm}/\text{m}$ 、 $2\text{kNm}/\text{m}$ 、 $3\text{kNm}/\text{m}$ 等为单位变化；如果该载荷是分布载荷，且该分布载荷是面分布载荷，载荷单位变化可以取 1MPa 、 2MPa 、 3MPa 或 $1\text{kNm}/\text{m}^2$ 、 $2\text{kNm}/\text{m}^2$ 、 $3\text{kNm}/\text{m}^2$ 等为单位变化；如果该载荷是集中载荷，且该集中载荷是力偶，载荷单位变化可以取 1kNm 、 2kNm 、 3kNm 等为单位变化；如果该载荷是集中载荷，且该集中载荷是集中力，载荷单位变化可以取 1kN 、 2kN 、 3kN 等为单位变化；如果该载荷是体积载荷，载荷单位变化可以取 $1\text{kN}/\text{m}^3$ 、 $2\text{kN}/\text{m}^3$ 、 $3\text{kN}/\text{m}^3$ 等为单位变化），用 D_{uk} 记录这一单位损伤或载荷单位变化，其中 k 表示发生单位损伤或单位线位移或发生载荷单位变化的被评估对象的编号。

[0062] 第七步：建立线性关系误差向量 e 和向量 g 。利用前面的数据（被监测量当前初始数值向量 C^t 、单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC ），在第六步进行每一次计算的同时，即在每一次计算假设被评估对象中只有一个被评估对象的增加单位损伤或单位线位移或载荷单位变化 D_{uk} ，每一次计算中增加单位损伤或单位线位移或载荷单位变化的被评估对象不同于其它次计算中增加单位损伤或单位线位移或载荷单位变化的被评估对象，每一次计算都利用力学方法（例如采用有限元法）计算索结构中所有被监测量的当前数值，每一次计算组成一个被监测量计算当前向量 C 的同时，每一次计算组成一个损伤向量 d ，本步出现的损伤向量 d 只在本步使用，损伤向量 d 的所有元素中只有一个元素的数值取 D_{uk} ，其它元素的数值取 0，损伤向量 d 的元素的编号规则与向量 d_o 的元素的编号规则相同；将 C 、 C^t 、 ΔC 、 D_u 、 d 带入式（1），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 。

$$[0063] e = \text{abs}(\Delta C \bullet d - C + C^t) \quad (1)$$

[0064] 式（1）中 $\text{abs}()$ 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。

[0065] 第八步：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（例如含索力测量系统、信号调理器等）、索结构温度监测系统（含温度传感器、信号调理器等）和索结构环境温度测量系统（含温度传感器、信号调理器等）、信号（数据）采集器、计算机和通信报警设备。每一个被监测量、每一个温度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被评估对象的健康监测软件，包括记录信号采集器传递来的信号；当监测到被评估对象健康状态有变化时，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。

[0066] 第九步：将被监测量当前初始数值向量 C^t 、单位损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 、被评估对象单位变化向量 D_u 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。

[0067] 第十步：编制并在计算机上安装运行本方法系统软件，该软件将完成本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）

[0068] 第十一步：依据被监测量当前数值向量 C 同被监测量当前初始数值向量 C^t 、单位

损伤被监测量数值变化矩阵 ΔC 、被评估对象单位变化向量 D_u 和被评估对象当前名义损伤向量 d (由所有索当前名义损伤量组成) 间存在的近似线性关系 (式 (2)), 按照多目标优化算法计算被评估对象当前名义损伤向量 d 的非劣解, 也就是带有合理误差、但可以比较准确地反映被评估对象的健康状态的变化的解。可以采用多目标优化算法中的目标规划法 (Goal Attainment Method) 求解式 (2) 得到当前损伤向量 d , 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。

$$[0069] \quad C = C_o^t + \Delta C \bullet d \quad (2)$$

[0070] 被评估对象当前名义损伤向量 d 的元素个数等于被评估对象的数量, 被评估对象当前名义损伤向量 d 的元素和被评估对象之间是一一对应关系, 被评估对象当前名义损伤向量 d 的元素数值代表对应被评估对象的名义损伤程度或名义线位移或名义载荷变化程度; 向量 d 的元素的编号规则与向量 d_o 的元素的编号规则相同。

[0071] 第十二步: 定义被评估对象当前实际损伤向量 d^a , 被评估对象当前实际损伤向量 d^a 的元素个数等于被评估对象的数量, 被评估对象当前实际损伤向量 d^a 的元素和被评估对象之间是一一对应关系, 被评估对象当前实际损伤向量 d^a 的元素数值代表对应被评估对象的实际损伤程度或实际线位移或实际载荷变化程度; 向量 d^a 的元素的编号规则与向量 d_o 的元素的编号规则相同。利用被评估对象当前实际损伤向量 d^a 的第 k 个元素 d_{k}^a 同被评估对象初始损伤向量 d_o 的第 k 个元素 d_{ok} 和被评估对象当前名义损伤向量 d 的第 k 个元素 d_k 间的关系, 计算得到被评估对象当前实际损伤向量 d^a 的所有元素。

[0072] d_{k}^a 表示第 k 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支承索, 那么 d_{k}^a 表示其当前实际损伤, d_{k}^a 为 0 时表示无损伤, 为 100% 时表示该支承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。

[0073] d_{k}^a 表示第 k 个被评估对象的当前实际健康状态, 如果该被评估对象是一个支座的一个线位移分量, 那么 d_{k}^a 表示其当前实际线位移数值。

[0074] 第十三步: 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。

[0075] 第十四步: 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。

[0076] 第十五步: 回到第四步, 开始由第四步到第十五步的循环。