



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109635497 A

(43)申请公布日 2019.04.16

(21)申请号 201811639017.6

(22)申请日 2018.12.29

(71)申请人 浙江广厦建设职业技术学院

地址 322100 浙江省金华市东阳市广福东街1号

(72)发明人 林有智 李天宝 赵冬梅 王春福 金玉珍 廖萍 钱科洋

(74)专利代理机构 福州科扬专利事务所 35001 代理人 严欢

(51)Int.Cl. G06F 17/50(2006.01)

权利要求书3页 说明书8页 附图1页

(54)发明名称

一种基于非线性损伤理论的钢梁桥寿命及可靠度分析方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于非线性损伤理论的钢梁桥寿命及可靠度分析方法,该分析方法包括以下步骤:S1、建模布点:根据钢梁桥各危险点和随机点进行建模布点,测定所布点的频率离散样本,测算所布点指征频率离散样本;S2、根据指征频率离散样本计算钢梁桥结构损伤因子;S3、根据钢梁桥结构损伤因子计算钢梁桥结构损伤量和损伤安全度值;S4、计算钢梁桥动态载荷,得到一个监测周期内钢梁桥的总应力;S5、根据钢梁桥的总应力计算钢梁桥使用寿命及可靠度。



1. 一种基于非线性损伤理论的钢梁桥寿命及可靠度分析方法,其特征在于:该方法包括以下步骤:

S1、建模布点:根据钢梁桥各危险点和随机点进行建模布点,测定所布点的频率离散样本,测算所布点指征频率离散样本;

S2、根据指征频率离散样本计算钢梁桥结构损伤因子;

S3、根据钢梁桥结构损伤因子计算钢梁桥结构损伤量和损伤安全度值;

S4、计算钢梁桥动态载荷,得到一个监测周期内钢梁桥的总应力;

S5、根据钢梁桥的总应力计算钢梁桥使用寿命及可靠度。

2. 如权利要求1所述的一种基于非线性损伤理论的钢梁桥寿命及可靠度分析方法,其特征在于:步骤S1的具体步骤如下:

(1) 建模布点:根据钢梁桥结构和初步的静态载荷分析,利用有限元分析软件或理论计算钢梁桥主体结构及关键构件上各危险点,然后对各危险点和随机点进行布点,测定其结构动力特性;

(2) 测定所布点频率离散样本:车辆载荷对钢梁桥的动力激励是在时间上连续分布、空间上连续移动的随机载荷,对此随机载荷进行离散,每个离散随机脉冲持续时间设为 $1/t$ 秒;设该钢梁桥长 L 米,限速 V 米/秒,则将车辆一次过桥行车离散成 Lt/V 个随机脉冲载荷;对每个 $1/t$ 秒时间微段作频谱分析,得频谱图;对每个微段频谱按幅值大小提取前 n 个频率值,则一次过桥行车激励下采集到的所布点频率值有 nLt/V 个,将这些频率值 I_i 作为一个所布点频率一次离散样本;

(3) 测算所布点指征频率离散样本:钢梁桥结构出现损伤其固有频率会降低,而频谱体现的是结构自振特性,其在结构无损伤或损伤无发展的几何物理特性下保持不变;一次离散样本中多次出现的频率值,即频率稳定点,其对环境参数不敏感;将一次离散样本中这些指示结构损伤情况的频率进行加权平均,得到指征频率 I_c ,有:

$$I_c = \sum_{i=1}^n I_i k_i$$

式中 k_i 为频率点的重复几率, n 为一个周期内对所布点进行连续多次的测定,得到所布点在一个周期内的指征频率离散样本,其数量设为 N_c 个。

3. 如权利要求2所述的一种基于非线性损伤理论的钢梁桥寿命及可靠度分析方法,其特征在于:步骤S2中根据指征频率离散样本计算钢梁桥结构损伤因子,具体步骤如下:

根据所布点指征频率离散样本,设 I_{ci} 为某时域结构损伤状态的指征频率;设 J_c 为所布点在一个周期内指征频率 I_{ci} 的平均值,即

$$J_c = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} I_{ci}$$

为考虑环境各种介质的不确定情况,设 Q_c 为所布点在一个周期内指征频率 I_{ci} 的标准差,即

$$Q_c = \frac{1}{N_c} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_c} (I_{ci} - J_c)^2}$$

利用高斯函数,计算钢梁桥结构损伤因子P,有 $P=f\left(\frac{I_0-J_c}{Q_c}\right)$,其中,f(x)为高斯函数, I_0 为结构无损伤状态指征频率, J_c 为指征频率平均值, Q_c 为指征频率标准差;考虑环境多介质对桥梁的作用,引入与材料弹性模量E和温度T有关的参数 λ ,将高斯函数修正为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\lambda^2}\right), \text{式中的}\lambda\text{有:}\lambda = (1-0.8 \cdot \frac{E-E_0}{E_0}) \times (1-0.495 \cdot \frac{T-T_0}{T_0})$$

式中 $E_0=2.0 \times 10^5 \text{MPa}$, $T_0=298^\circ\text{C}$ (绝对温度)。

4.如权利要求3所述的一种基于非线性损伤理论的钢梁桥寿命及可靠度分析方法,其特征在于:步骤S3根据钢梁桥结构损伤因子计算钢梁桥结构损伤量 D_0 和损伤安全度 R_0 值,具体步骤如下:

对钢梁桥结构损伤量 D_0 ,有:

$$D_0 = 2P - 1$$

对钢梁桥结构损伤安全度 R_0 ,有:

$$R_0 = 2 - 2P$$

式中P为钢梁桥结构损伤因子。

5.如权利要求4所述的一种基于非线性损伤理论的钢梁桥寿命及可靠度分析方法,其特征在于:步骤S4计算钢梁桥动态载荷载包含交通载荷、风载荷和雨载荷。

6.如权利要求5所述的一种基于非线性损伤理论的钢梁桥寿命及可靠度分析方法,其特征在于:所述交通载荷通过以下步骤计算:

(1)计算钢梁桥一个周期受到的平均交通载荷 F_{cars} ,则 $F_{\text{cars}} = K_d \cdot \bar{m}g \cdot \bar{S} \cdot L/V$;式中, \bar{m} 为平均汽车重量; \bar{S} 为平均车距;钢梁桥长L米,限速V米/秒,g为重力常数,车辆动载荷系数 K_d 计算公式为:

$$K_d = (1.026 + 0.236 \cdot \Delta Q) \times (1.022 + 0.0076 \cdot \Delta V) \times \left[1 + 0.52 \cdot \exp\left(-\frac{\bar{m}}{5.47}\right) \right]$$

式中,国家将路面等级Q分为1~8级, $\Delta Q=Q-1$;车速V, $\Delta V=V-60\text{km/h}$ 。

7.如权利要求6所述的一种基于非线性损伤理论的钢梁桥寿命及可靠度分析方法,其特征在于:所述风载荷通过以下步骤计算:

(1)计算钢梁桥一个周期受到的平均风载荷 F_{wind} ,则 $F_{\text{wind}} = \beta \cdot \mu_h \cdot \mu_s \cdot P_{\text{wind}} \cdot A$;

式中, β 为表征风载荷脉动激励的风振系数; μ_h 为风压高度变化系数; μ_s 为风载荷体型系数; P_{wind} 为基本风压;A为迎风面积;

对风振系数 β ,其计算式为:

$$\beta = 1 + \mu \cdot \frac{S_2}{|S_1|}$$

其中, μ 为峰值保值因子;S为风载荷引起的桥梁挠度变化,其中 S_1 为所布点测定位移平均值, S_2 为所布点测定位移均方差;

对基本风压 P_{wind} ,其计算式为:

$$P_{\text{wind}} = k \cdot U^2$$

其中,k为常数;U为风速。

8.如权利要求7所述的一种基于非线性损伤理论的钢梁桥寿命及可靠度分析方法,其

特征在于:所述雨载荷通过以下步骤计算:

(1) 计算钢梁桥一个周期受到的平均雨载荷 F_{rain} ,则 $F_{rain}=P_{rain} \cdot A$;式中,雨压 P_{rain} ;桥面面积 A ; $P_{rain}=g \cdot \rho_1 \cdot h$,其中 g 为重力常数, ρ_1 为雨水密度, h 为大暴雨时单位面积平均积水深度。

9.如权利要求8所述的一种基于非线性损伤理论的钢梁桥寿命及可靠度分析方法,其特征在于:根据交通载荷、风载荷、雨载荷计算钢梁桥结构的总应力,计算一个监测周期内,钢梁桥在多载荷作用下的等效应力幅 σ_E 值:

$$\sigma_E = \left[\frac{\sum n_i \cdot (\sigma_i)^k}{\sum n_i} \right]^{\frac{1}{k}}$$

式中, k 为变幅疲劳曲线系数; σ_i 为某一周期钢梁桥应力幅; n_i 为对应 σ_i 应力幅时钢梁桥在一个周期内受载的疲劳循环次数。

10.如权利要求9所述的一种基于非线性损伤理论的钢梁桥寿命及可靠度分析方法,其特征在于:步骤S5计算钢梁桥使用寿命及可靠度的具体步骤如下:

(1) 钢梁桥使用寿命 N_f 为:

$$N_{fi} = 9.384 \cdot K \cdot (1.01 \cdot \sigma_0 - \sigma_i)^{1-A} \cdot R_{i-1}$$

(2) 钢梁桥其使用可靠度 R 为:

$$R_i = R_{i-1} - \frac{n_i}{9.384 \cdot K} \cdot (1.01 \cdot \sigma_0 - \sigma_i)^{A-1}$$

式中, R_{i-1} 为一个周期开始时其结构既有损伤安全度; σ_i 为一个周期内多载荷作用下结构应力幅; σ_0 为疲劳极限; A 、 K 为常数; n_i 为对应 σ_i 应力幅时钢梁桥在一个周期内受载的疲劳循环次数。

一种基于非线性损伤理论的钢梁桥寿命及可靠度分析方法

技术领域

[0001] 本发明属于结构安全评价领域,主要涉及一种基于非线性损伤理论的钢梁桥使用寿命及可靠度分析方法。

技术背景

[0002] 桥梁的疲劳损伤主要来自于车辆和风等动荷载作用下的交变循环应力,而桥梁结构及主要构件的疲劳损伤累积将引起桥梁结构的退化和安全性降低。由于桥梁构件所采用的材料并非是均匀和连续的,实际上存在许多微小的缺陷,随着服役时间的延长,在荷载和环境因素影响下,这些细微缺陷会逐渐发展、合并形成损伤,并逐步在材料中形成宏观裂纹。这些损伤一方面影响了结构的耐久性,缩短了桥梁结构使用寿命;另一方面可造成结构强度和刚度的削减,为道路运营埋下了安全隐患。

[0003] 虽然现有少数桥梁装备了健康监测系统,对运营状态进行实时监测,但其各类监测数据关联程度很低,难以直接用于评价桥梁运营时的安全状态,无法有效地服务于桥梁的检修管养。而实际运营时,桥梁和行驶车辆是一个耦合系统,其响应均受环境因素影响。目前工程界多用模态类方法来研究基于振动的桥梁结构损伤评估。但模态类方法在实际中难以区分模态观测的改变是由于结构损伤造成的还是由于运行状态或环境因素的改变造成的。这是因为即使结构状态并未发生退化,也会由于环境因素(噪声、温度、湿度等)和运行状态的改变使动力观测响应发生改变。现有基于概率的结构损伤识别研究也多针对确定性激励、白噪声和环境激励等荷载形式,其对动力荷载参数随机性很敏感,无法有效识别损伤。

[0004] 由于桥梁在实际运营中受到车辆和风等动荷载及环境多介质的复杂作用,目前关于桥梁在非连续变幅循环应力下损伤对其长期寿命影响的定量研究还很少。少量的桥梁寿命定量研究也只是基于线性损伤理论,而线性损伤理论对于桥梁非连续受载情况的分析研究存在先天不足,故其对桥梁寿命的定量分析误差较大。而且传统线性损伤理论无法解决“载荷、环境发生变化后,桥梁损伤和剩余寿命如何变化”的问题。

发明内容

[0005] 本发明采用基于改进后性能函数结构损伤识别的非确定性方法,其对动力荷载参数随机性不敏感;同时根据桥梁实际复杂的受载情况,修正现有的非线性损伤理论,对车辆、风、雨等非连续变幅载荷或偶然事件后的桥梁使用寿命进行定量分析,并计算其安全使用可靠度。为实现上述目的,本发明提供如下技术方案:

[0006] 一种基于非线性损伤理论的钢梁桥寿命及可靠度分析方法,该方法包括以下步骤:

[0007] S1、建模布点:根据钢梁桥各危险点和随机点进行建模布点,测定所布点的频率离散样本,测算所布点指征频率离散样本;

[0008] S2、根据指征频率离散样本计算钢梁桥结构损伤因子;

[0009] S3、根据钢梁桥结构损伤因子计算钢梁桥结构损伤量和损伤安全度值；

[0010] S4、计算钢梁桥动态载荷，得到一个监测周期内钢梁桥的总应力；

[0011] S5、根据钢梁桥的总应力计算钢梁桥使用寿命及可靠度。

[0012] 其中，步骤S1的具体步骤如下：

[0013] (1) 建模布点：根据钢梁桥结构和初步的静态载荷分析，利用有限元分析软件或理论计算钢梁桥主体结构及关键构件上各危险点，然后对各危险点和随机点进行布点，测定其结构动力特性；

[0014] (2) 测定所布点频率离散样本：车辆载荷对钢梁桥的动力激励是在时间上连续分布、空间上连续移动的随机载荷，对此随机载荷进行离散，每个离散随机脉冲持续时间设为 $1/t$ 秒；设该钢梁桥长 L 米，限速 V 米/秒，则将车辆一次过桥行车离散成 Lt/V 个随机脉冲载荷；对每个 $1/t$ 秒时间微段作频谱分析，得频谱图；对每个微段频谱按幅值大小提取前 n 个频率值，则一次过桥行车激励下采集到的所布点频率值有 nLt/V 个，将这些频率值 I_i 作为一个所布点频率一次离散样本；

[0015] (3) 测算所布点指征频率离散样本：钢梁桥结构出现损伤其固有频率会降低，而频谱体现的是结构自振特性，其在结构无损伤或损伤无发展的几何物理特性下保持不变；一次离散样本中多次出现的频率值，即频率稳定点，其对环境参数不敏感；将一次离散样本中这些指示结构损伤情况的频率进行加权平均，得到指征频率 I_C ，有：

$$[0016] \quad I_C = \sum_{i=1}^n I_i k_i$$

[0017] 式中 k_i 为频率点的重复几率， n 为一个周期内对所布点进行连续多次的测定，得到所布点在一个周期内的指征频率离散样本，其数量设为 N_C 个。

[0018] 其中，步骤S2中根据指征频率离散样本计算钢梁桥结构损伤因子，具体步骤如下：

[0019] 根据前述所布点指征频率离散样本，设 I_{Ci} 为某时域结构损伤状态的指征频率；设 J_C 为所布点在一个周期内指征频率 I_{Ci} 的平均值，即

$$[0020] \quad J_C = \frac{1}{N_C} \sum_{i=1}^{N_C} I_{Ci}$$

[0021] 为考虑环境各种介质的不确定情况，设 Q_C 为所布点在一个周期内指征频率 I_{Ci} 的标准差，即

$$[0022] \quad Q_C = \frac{1}{N_C} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_C} (I_{Ci} - J_C)^2}$$

[0023] 利用高斯函数，计算钢梁桥结构损伤因子 P ，有 $P = f\left(\frac{I_0 - J_C}{Q_C}\right)$ ，其中， $f(x)$ 为高斯函数， I_0 为结构无损伤状态指征频率， J_C 为指征频率平均值， Q_C 为指征频率标准差；考虑环境多介质对桥梁的作用，引入与材料弹性模量 E 和温度 T 有关的参数 λ ，将高斯函数修正为：

$$[0024] \quad f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\lambda^2}\right) \quad , \text{式中的}\lambda\text{有: } \lambda = (1 - 0.8 \cdot \frac{E - E_0}{E_0}) \times (1 - 0.495 \cdot \frac{T - T_0}{T_0})$$

[0025] 式中 $E_0 = 2.0 \times 10^5 \text{MPa}$ ， $T_0 = 298^\circ\text{C}$ （绝对温度）。

[0026] 其中，步骤S3根据钢梁桥结构损伤因子计算钢梁桥结构损伤量 D_0 和损伤安全度 R_0

值,具体步骤如下:

[0027] 对钢梁桥结构损伤量 D_0 ,有:

[0028] $D_0 = 2P - 1$

[0029] 对钢梁桥结构损伤安全度 R_0 ,有:

[0030] $R_0 = 2 - 2P$

[0031] 式中 P 为钢梁桥结构损伤因子。

[0032] 其中,步骤S4计算钢梁桥动态载荷包含交通载荷、风载荷和雨载荷。

[0033] 其中,所述交通载荷通过以下步骤计算:

[0034] (1) 计算钢梁桥一个周期受到的平均交通载荷 F_{cars} ,则 $F_{cars} = K_d \cdot \bar{m} \cdot \bar{S} \cdot L / V$; 式中, \bar{m} 为平均汽车重量; \bar{S} 为平均车距;钢梁桥长 L 米,限速 V 米/秒, g 为重力常数,车辆动载荷系数 K_d 计算公式为:

[0035]
$$K_d = (1.026 + 0.236 \cdot \Delta Q) \times (1.022 + 0.0076 \cdot \Delta V) \times \left[1 + 0.52 \cdot \exp\left(-\frac{\bar{m}}{5.47}\right) \right]$$

[0036] 式中,国家将路面等级 Q 分为1~8级, $\Delta Q = Q - 1$;车速 V , $\Delta V = V - 60$ km/h。

[0037] 其中,所述风载荷通过以下步骤计算:

[0038] (1) 计算钢梁桥一个周期受到的平均风载荷 F_{wind} ,则 $F_{wind} = \beta \cdot \mu_h \cdot \mu_s \cdot P_{wind} \cdot A$;

[0039] 式中, β 为表征风载荷脉动激励的风振系数; μ_h 为风压高度变化系数; μ_s 为风载荷体型系数; P_{wind} 为基本风压; A 为迎风面积;

[0040] 对风振系数 β ,其计算式为:

[0041]
$$\beta = 1 + \mu \cdot \frac{S_2}{|S_1|}$$

[0042] 其中, μ 为峰值保值因子; S 为风载荷引起的桥梁挠度变化,其中 S_1 为所布点测定位移平均值, S_2 为所布点测定位移均方差;

[0043] 对基本风压 P_{wind} ,其计算式为:

[0044] $P_{wind} = k \cdot U^2$

[0045] 其中, k 为常数; U 为风速。

[0046] 其中,所述雨载荷通过以下步骤计算:

[0047] (1) 计算钢梁桥一个周期受到的平均雨载荷 F_{rain} ,则 $F_{rain} = P_{rain} \cdot A$; 式中,雨压 P_{rain} ;桥面面积 A ; $P_{rain} = g \cdot \rho_l \cdot h$,其中 g 为重力常数, ρ_l 为雨水密度, h 为大暴雨时单位面积平均积水深度。

[0048] 其中,根据交通载荷、风载荷、雨载荷计算钢梁桥结构的总应力,计算一个监测周期内,钢梁桥在多载荷作用下的等效应力幅 σ_E 值:

[0049]
$$\sigma_E = \left[\frac{\sum n_i \cdot (\sigma_i)^k}{\sum n_i} \right]^{\frac{1}{k}}$$

[0050] 式中, k 为变幅疲劳曲线系数; σ_i 为某一周期钢梁桥应力幅; n_i 为对应 σ_i 应力幅时钢梁桥在一个周期内受载的疲劳循环次数。

[0051] 其中,步骤S5计算钢梁桥使用寿命及可靠度的具体步骤如下:

[0052] (1) 钢梁桥使用寿命 N_f 为:

[0053] $N_{fi} = 9.384 \cdot K \cdot (1.01 \cdot \sigma_0 - \sigma_i)^{1-A} \cdot R_{i-1}$

[0054] (2) 钢梁桥其使用可靠度R为:

$$[0055] \quad R_i = R_{i-1} - \frac{n_i}{9.384 \cdot K} \cdot (1.01 \cdot \sigma_0 - \sigma_i)^{A-1}$$

[0056] 式中, R_{i-1} 为一个周期开始时其结构既有损伤安全度; σ_i 为一个周期内多载荷作用下结构应力幅; σ_0 为疲劳极限; A、K 为常数; n_i 为对应 σ_i 应力幅时钢梁桥在一个周期内受载的疲劳循环次数。

[0057] 具体的, 关于计算一个监测周期内钢梁桥受到多介质作用时的总应力, 将上述分析得到的交通载荷、风载荷、雨载荷输入有限元软件既有模型进行分析, 按第四强度理论, 计算钢梁桥结构的总应力(即疲劳应力幅)。对等效应力幅 σ_E 有:

$$[0058] \quad \sigma_E = \left[\frac{\sum n_i \cdot (\sigma_i)^k}{\sum n_i} \right]^{\frac{1}{k}}$$

[0059] 式中, k 为变幅疲劳曲线系数; σ_i 为某一周期构件应力幅; n_i 为对应 σ_i 应力幅时构件循环次数。

[0060] 具体的, 关于计算钢梁桥使用寿命及可靠度, 根据钢梁桥在承受车辆、风、雨等非连续变幅载荷等复杂等的实际情况, 对现今国际主流的 CHABOCHE 非线性损伤模型 $dD = f(D, \sigma) dn$ 进行修正, 并应用如下:

[0061] (1) 钢梁桥使用寿命 N_f 为:

$$[0062] \quad N_{fi} = 9.384 \cdot K \cdot (1.01 \cdot \sigma_0 - \sigma_i)^{1-A} \cdot R_{i-1}$$

[0063] (2) 钢梁桥其使用可靠度R为:

$$[0064] \quad R_i = R_{i-1} - \frac{n_i}{9.384 \cdot K} \cdot (1.01 \cdot \sigma_0 - \sigma_i)^{A-1}$$

[0065] A、K 值是材料属性。由其疲劳试验得到初步数据后, 带入上述公式, 用 Origin 等软件进行函数拟合得到其 A、K 值。

[0066] 与现有技术相比, 本发明的有益效果是: 本发明在充分地考虑各种实际复杂载荷和环境介质对桥梁的非连续作用, 基于修正的非线性损伤模型对正常运营或偶然事件后的桥梁使用寿命进行较为精确的定量分析和可靠度计算; 且本发明方法不会中断和干扰交通, 其损伤识别和寿命分析结果更为接近桥梁结构在运营状态下的真实状态。

附图说明

[0067] 图1是本发明预测钢梁桥使用寿命及其安全可靠度的流程图;

[0068] 图2是钢梁桥在不同等效应力幅、不同预期服役年限下的可靠度数据。

具体实施方式

[0069] 下面结合附图和具体实施例, 进一步阐明本发明技术方案, 应理解实施例仅用于说明本发明而并不用于限制本发明的范围, 在阅读了本发明之后, 本领域技术人员对本发明的各种等价形式的修改均落于本申请所附权利要求所限定的范围。

[0070] 一种基于非线性损伤理论的钢梁桥寿命及可靠度分析方法, 该方法包括以下步骤:

[0071] S1、建模布点：根据钢梁桥各危险点和随机点进行建模布点，测定所布点的频率离散样本，测算所布点指征频率离散样本；

[0072] S2、根据指征频率离散样本计算钢梁桥结构损伤因子；

[0073] S3、根据钢梁桥结构损伤因子计算钢梁桥结构损伤量和损伤安全度值；

[0074] S4、计算钢梁桥动态载荷，得到一个监测周期内钢梁桥的总应力；

[0075] S5、根据钢梁桥的总应力计算钢梁桥使用寿命及可靠度。

[0076] 其中，步骤S1的具体步骤如下：

[0077] (1) 建模布点：根据钢梁桥结构和初步的静态载荷分析，利用有限元分析软件或理论计算钢梁桥主体结构及关键构件上各危险点，然后对各危险点和随机点进行布点，安装监测设备测定其结构动力特性；

[0078] (2) 测定所布点频率离散样本：车辆载荷对钢梁桥的动力激励是在时间上连续分布、空间上连续移动的随机载荷，对此随机载荷进行离散，每个离散随机脉冲持续时间设为 $1/t$ 秒；设该钢梁桥长 L 米，限速 V 米/秒，则将车辆一次过桥行车离散成 Lt/V 个随机脉冲载荷；对每个 $1/t$ 秒时间微段作频谱分析，得频谱图；对每个微段频谱按幅值大小提取前 n 个频率值，则一次过桥行车激励下采集到的所布点频率值有 nLt/V 个，将这些频率值 I_i 作为一个所布点频率一次离散样本；

[0079] (3) 测算所布点指征频率离散样本：钢梁桥结构出现损伤其固有频率会降低，而频谱体现的是结构自振特性，其在结构无损伤或损伤无发展的几何物理特性下保持不变；一次离散样本中多次出现的频率值，即频率稳定点，其对环境参数不敏感；将一次离散样本中这些指示结构损伤情况的频率进行加权平均，得到指征频率 I_C ，有：

$$[0080] \quad I_C = \sum_{i=1}^n I_i k_i$$

[0081] 式中 k_i 为频率点的重复几率， n 为一个周期内对所布点进行连续多次的测定，得到所布点在一个周期内的指征频率离散样本，其数量设为 N_C 个。

[0082] 其中，步骤S2中根据指征频率离散样本计算钢梁桥结构损伤因子，具体步骤如下：

[0083] 根据前述所布点指征频率离散样本，设 I_{Ci} 为某时域结构损伤状态的指征频率；设 J_C 为所布点在一个周期内指征频率 I_{Ci} 的平均值，即

$$[0084] \quad J_C = \frac{1}{N_C} \sum_{i=1}^{N_C} I_{Ci}$$

[0085] 为考虑环境各种介质的不确定情况，设 Q_C 为所布点在一个周期内指征频率 I_{Ci} 的标准差，即

$$[0086] \quad Q_C = \frac{1}{N_C} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_C} (I_{Ci} - J_C)^2}$$

[0087] 利用高斯函数，计算钢梁桥结构损伤因子 P ，有 $P = f\left(\frac{I_0 - J_C}{Q_C}\right)$ ，其中， $f(x)$ 为高斯函数， I_0 为结构无损伤状态指征频率， J_C 为指征频率平均值， Q_C 为指征频率标准差；考虑环境多介质对桥梁的作用，引入与材料弹性模量 E 和温度 T 有关的参数 λ ，将高斯函数修正为：

[0088] $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\lambda^2}\right)$, 式中的 λ 有: $\lambda = (1 - 0.8 \cdot \frac{E - E_0}{E_0}) \times (1 - 0.495 \cdot \frac{T - T_0}{T_0})$

[0089] 式中 $E_0 = 2.0 \times 10^5 \text{MPa}$, $T_0 = 298^\circ\text{C}$ (绝对温度)。

[0090] 其中, 步骤S3根据钢梁桥结构损伤因子计算钢梁桥结构损伤量 D_0 和损伤安全度 R_0 值, 具体步骤如下:

[0091] 对钢梁桥结构损伤量 D_0 , 有:

[0092] $D_0 = 2P - 1$

[0093] 对钢梁桥结构损伤安全度 R_0 , 有:

[0094] $R_0 = 2 - 2P$

[0095] 式中 P 为钢梁桥结构损伤因子。

[0096] 其中, 步骤S4计算钢梁桥动态载包含交通载荷、风载荷和雨载荷。

[0097] 其中, 所述交通载荷通过以下步骤计算:

[0098] (1) 计算钢梁桥一个周期受到的平均交通载荷 F_{cars} , 则 $F_{\text{cars}} = K_d \cdot \bar{m}g \cdot \bar{S} \cdot L/V$; 式中, \bar{m} 为平均汽车重量; \bar{S} 为平均车距; 钢梁桥长 L 米, 限速 V 米/秒, g 为重力常数, 车辆动载荷系数 K_d 计算公式为:

[0099] $K_d = (1.026 + 0.236 \cdot \Delta Q) \times (1.022 + 0.0076 \cdot \Delta V) \times \left[1 + 0.52 \cdot \exp\left(-\frac{\bar{m}}{5.47}\right) \right]$

[0100] 式中, 国家将路面等级 Q 分为1~8级, $\Delta Q = Q - 1$; 车速 V , $\Delta V = V - 60 \text{km/h}$ 。

[0101] 其中, 所述风载荷通过以下步骤计算:

[0102] (1) 计算钢梁桥一个周期受到的平均风载荷 F_{wind} , 则 $F_{\text{wind}} = \beta \cdot \mu_h \cdot \mu_s \cdot P_{\text{wind}} \cdot A$;

[0103] 式中, β 为表征风载荷脉动激励的风振系数; μ_h 为风压高度变化系数; μ_s 为风载荷体型系数; P_{wind} 为基本风压; A 为迎风面积;

[0104] 对风振系数 β , 其计算式为:

[0105] $\beta = 1 + \mu \cdot \frac{S_2}{|S_1|}$

[0106] 其中, μ 为峰值保值因子; S 为风载荷引起的桥梁挠度变化, 其中 S_1 为所布点测定位移平均值, S_2 为所布点测定位移均方差;

[0107] 对基本风压 P_{wind} , 其计算式为:

[0108] $P_{\text{wind}} = k \cdot U^2$

[0109] 其中, k 为常数; U 为风速。

[0110] 其中, 所述雨载荷通过以下步骤计算:

[0111] (1) 计算钢梁桥一个周期受到的平均雨载荷 F_{rain} , 则 $F_{\text{rain}} = P_{\text{rain}} \cdot A$; 式中, 雨压 P_{rain} ; 桥面面积 A ; $P_{\text{rain}} = g \cdot \rho_1 \cdot h$, 其中 g 为重力常数, ρ_1 为雨水密度, h 为大暴雨时单位面积平均积水深度。

[0112] 其中, 根据交通载荷、风载荷、雨载荷计算钢梁桥结构的总应力, 计算一个监测周期内, 钢梁桥在多载荷作用下的等效应力幅 σ_E 值:

[0113] $\sigma_E = \left[\frac{\sum n_i \cdot (\sigma_i)^k}{\sum n_i} \right]^{\frac{1}{k}}$

[0114] 式中, k 为变幅疲劳曲线系数; σ_i 为某一周期钢梁桥应力幅; n_i 为对应 σ_i 应力幅时钢梁桥在一个周期内受载的疲劳循环次数。

[0115] 其中, 步骤S5计算钢梁桥使用寿命及可靠度的具体步骤如下:

[0116] (1) 钢梁桥使用寿命 N_f 为:

$$[0117] \quad N_{fi} = 9.384 \cdot K \cdot (1.01 \cdot \sigma_0 - \sigma_i)^{1-A} \cdot R_{i-1}$$

[0118] (2) 钢梁桥其使用可靠度 R 为:

$$[0119] \quad R_i = R_{i-1} - \frac{n_i}{9.384 \cdot K} \cdot (1.01 \cdot \sigma_0 - \sigma_i)^{A-1}$$

[0120] 式中, R_{i-1} 为一个周期开始时其结构既有损伤安全度; σ_i 为一个周期内多载荷作用下结构应力幅; σ_0 为疲劳极限; A 、 K 为常数; n_i 为对应 σ_i 应力幅时钢梁桥在一个周期内受载的疲劳循环次数。

[0121] 为了说明本发明的技术效果, 本发明以厦门海沧大桥为分析对象。厦门海沧大桥是一座双向六车道的三跨连续全漂浮钢箱梁悬索桥, 兼具城市桥梁功能, 全长约6000米, 东航道桥为悬索主桥长1108米, 主跨648米, 桥面宽度36.6米, 设计通行能力为50000辆/日, 行车时速为80公里/时, 1997年动土, 1999年竣工通车。钢箱梁材料为Q345钢, 钢箱梁与海面净高55米。大桥有140米高的双塔, 上架两根主缆, 由吊杆把主缆和钢箱梁拉住。所处区域气候温和, 雨量充沛, 全年平均风速约3.4米/秒, 为亚热带季风海洋性气候。2017年5月-10月对海沧大桥进行了分段集中监测, 每次 24×7 小时, 检测六个时间段。

[0122] 如图1所示, 本发明的一种基于非线性损伤理论的钢梁桥寿命及可靠度分析方法主要包括如下几步骤:

[0123] 根据海沧大桥结构和载荷的有限元初步分析进行建模布点以监测得到钢梁桥所布点指征频率离散样本。计算钢梁桥所布点指征频率离散样本, 得到其结构损伤因子 P 值(0.50139)。

[0124] 由公式计算钢梁桥结构损伤量 D_0 值(0.278%)和结构损伤安全度 R_0 值(99.722%)。

[0125] 计算交通载荷。由监测交通流量得到每个周期内在高峰期时间段, 经过钢梁桥所有汽车的平均车距 S , 取多次平均得 S 为58.374米; 由检测得到每个周期内经过钢梁桥所有汽车平均重量 m 为4.217吨。将相关参数代入车辆动载系数 K_d 公式, 如下式:

$$[0126] \quad K_d = (1.026 + 0.236 \times 1) \times (1.022 + 0.0076 \times 20) \times [1 + 0.52 \cdot \exp(-4.217/5.47)]$$

[0127] 计算得到 K_d 值为1.838。将上述参数代入交通载荷公式, $F_{cars} = K_d \cdot \bar{m}g \cdot \bar{S} \cdot L/V$, 得钢梁桥在高峰期时间段的平均交通载荷为1442kN。

[0128] 计算风载荷。由位移监测传感器测定计算所布点测定位移平均值 S_1 , 位移均方差 S_2 , 取风振保值因子 μ 为2.08。代入公式, 计算其风振系数 β 为1.741。由风速风向传感器在风速较大的10月某个周期监测的数据, 其平均风速 U 为6.796米/秒, 将相关参数代入公式, 有:

$$[0129] \quad P_{wind} = 0.613 \times 6.796^2$$

$$[0130] \quad F_{wind} = 1.741 \times 1.22 \times 1.08 \times 28.312 \times 16195;$$

[0131] 通过计算得钢梁桥风载荷 F_{wind} 为1051.8kN。

[0132] 计算雨载荷。由仪器监测下雨时, 桥梁单位面积平均积水深度 h 为2.73mm, 雨水密度设为 $1\text{kg}/\text{m}^3$, 计算下雨时该桥梁平均雨载荷为:

$$[0133] \quad F_{rain} = g \cdot \rho \cdot h \cdot A = 9.8\text{N}/\text{kg} \times 1\text{kg}/\text{m}^3 \times 0.00273\text{m} \times 40553\text{m}^2$$

[0134] 计算,得雨载荷 F_{rain} 为1.085kN。故对排水顺畅的桥梁,其雨载荷影响甚微,可以不计入总应力中。

[0135] 根据第四强度理论,将上述分析的交通载荷、风载荷、雨载荷输入有限元分析软件既有模型中进行计算,得到其疲劳应力幅(即总应力) σ 为54.203MPa。由全部6个时间段监测的数据,计算其5-10月等效应力幅 σ_E 为37.525MPa。

[0136] 疲劳循环周次以经过的车辆数计算;若因暴风雨等恶劣天气导致无车行驶时,以桥梁自振频率来计算其疲劳循环周次。经测算该钢梁桥自振频率平均值为2.13HZ。

[0137] 计算钢梁桥在既有损伤、多种动态载荷作用,及未来设计服役年限下,其安全使用的可靠度 R ,计算方法为:

$$[0138] \quad R_i = R_{i-1} - \frac{n_i}{682.13} \cdot \left(\frac{1 \times 10^{-6}}{58.58 - \sigma_i} \right)^{0.9698}$$

[0139] 式中, σ_i 为桥梁在一个周期内构件平均应力幅; n_i 为钢梁桥在一个周期内受载循环次数; R_0 为初始损伤安全度(99.722%)。

[0140] 计算钢梁桥在既有损伤及多种动态载荷作用下的使用寿命 N_f ,计算方法为:

$$[0141] \quad N_{fi} = 682.13 \cdot (58.58 \times 10^6 - \sigma_i)^{0.9698} \cdot R_{i-1}$$

[0142] 参见图2,图2示出了钢梁桥在不同等效应力幅、不同预期服役年限下的可靠度数据,在初始损伤和年均车流量一致的情况下,不同等效应力幅在不同预期服役年限下的可靠度数据变化也不同,在相同的预期服役年限下,等效应力幅越大,可靠度下降的速度越快,在相同的等效应力幅下,随着预期服役年限的增加,可靠度呈非线性下降。

[0143] 以上所述仅为本发明的实施例,并非因此限制本发明的专利范围,凡是利用本发明说明书内容所作的等效结构或等效流程变换,或直接或间接运用在其他相关的技术领域,均同理包括在本发明的专利保护范围内。



图1

等效总应力 σ /MPa	初始损伤 D_0 /%	年均车流量 (次)	可靠度/%			
			服役 30 年	服役 40 年	服役 50 年	服役 60 年
10	0.278	5.42×10^7	91.499	88.758	86.017	83.276
20	0.278	5.42×10^7	89.435	86.007	82.578	79.149
30	0.278	5.42×10^7	85.953	81.363	76.773	72.183
40	0.278	5.42×10^7	78.788	71.810	64.832	57.854
50	0.278	5.42×10^7	55.241	40.414	25.586	10.759

图2