

客运架空索道系统动力特性分析方法*

ANALYSIS METHOD FOR DYNAMIC CHARACTERISTIC OF PASSENGER AERIAL ROPEWAY SYSTEM

丁克勤** 陶雪荣

刘玉标 申仲翰

(国家质量监督检验检疫总局 锅炉压力容器检测研究中心, 北京 100013) (中国科学院力学研究所, 北京 100080)

DING Keqin TAO Xuerong

(Center of Boiler & Pressure Vessel Inspection and Research, AQSIQ, Beijing 100013, China)

LIU Yubiao SHEN Zhonghan

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

摘要 客运架空索道系统的固有频率与模态是衡量索道系统固有动力特性的重要指标,固有频率的大小直接关系到结构在各种不同的激励条件下是否会发生动力放大效应与共振。文中首先解决索道系统分析中的有限元建模问题,包括典型柔性索道的模型状态,然后利用 ANSYS 程序的子空间迭代法求出结构最低各阶的特征值与特征向量,并计算出三种工况下的前 40 阶固有频率与振动模态,为客运架空索道系统的动力特性分析提供有效的计算方法。

关键词 索道 动力特性 固有频率 模态 有限元

中图分类号 O347 U18 TB122

Abstract The natural frequency and modal of passenger aerial ropeway system is the important index of weighing natural dynamic characteristic of the ropeway system, the size of natural frequency is direct relation with whether the dynamic amplification effect and sympathetic vibration of the structure will happen under all kinds of different stimulation. The effective analysis method for dynamic characteristic of passenger aerial ropeway system was developed. The finite element model of the ropeway system, including the model of typical flexible rope, firstly was constructed, then sub-space iteration method was proposed to calculate the characteristic value and characteristic vector of the structure, and the results of the former 40 circles of natural frequency and vibration modal under three working conditions were given.

Key words Ropeway; Dynamic characteristic; Natural frequency; Modal; Finite element method

Corresponding author: DING Keqin, E-mail: kqding@sina.com, Fax: +86-10-84276523, Tel: 010-84275588-8162

The project supported by the National "Ninth Five-Year Plan" Research and Technology Key Project of China (No. 96-920-36-09).

Manuscript received 20020401, in revised form 20020815.

1 引言

客运架空索道系统由钢丝绳、抱索器、吊杆及支架等关键性部件组合而成。由于其在运行过程中整体系统始终处于动载荷作用之下,如风对车辆和钢丝绳的动态作用,车辆运动对钢丝绳的动态作用等。这些动态载荷通过各部件的衔接传递到系统的各个部位,从而引起整体及局部的动态响应。其结果可分为两种情况,一是由于动态交变应力所造成的结构疲劳损伤,导致系统安全度下降。二是动载荷的优势频率与结构的动态特性产生耦合而形成超出设计标准的动应力,可能导致结构的严重损伤与破坏。

对于客运架空索道系统而言,为了维护运行中的

安全,必须在设计阶段充分估计出系统的各种动态特性及可能出现的响应状态。但迄今为止,有关索道系统的结构设计仍主要停留于静态的范围,而忽略了结构动态耦合放大的作用。这种设计方式的结果导致两种弊端,一是出于安全保守的原因,将安全系数盲目放大,造成建造价格上升;另外一个是在结构系统动态性能不明的情况下,对耦合共振所致危害不能预测和防治,而形成了极大的不安全隐患。

为了分析客运架空索道系统的动力特性,首先要求解客运架空索道系统的固有频率与模态。结构系统的固有频率的大小直接关系到结构在各种不同激励条件下是否会发生动力放大效应与共振。索道系统固有频率与模态不仅作为衡量索道系统固有动力特性的重

* 20020401 收到初稿,20020815 收到修改稿。“九五”国家重点科技攻关资助项目(96-920-36-09)。

** 丁克勤,男,1968年9月生,安徽枞阳人,汉族。国家质量监督检验检疫总局锅检中心研究开发部主任,副研究员,博士,现主要从事疲劳断裂、可靠性、无损检测,安全评价等研究,发表学术论文45篇。通讯地址:北京市朝阳区和平街西苑2号楼。

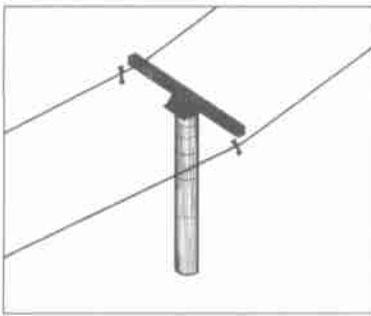


图1 塔架1与索道的实体模型

Fig. 1 Real model of the first trestle and rope

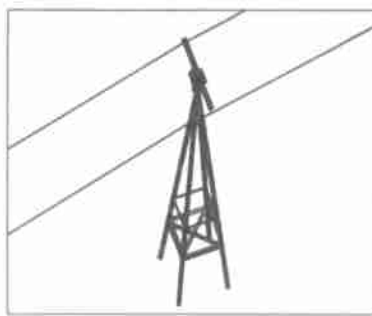


图2 塔架2与索道的实体模型

Fig. 2 Real model of the second trestle and rope

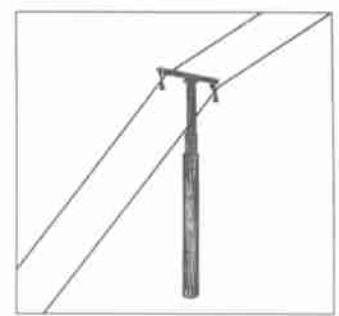


图3 塔架3与索道的实体模型

Fig. 3 Real model of the third trestle and rope



图4 塔架4与索道的实体模型

Fig. 4 Real model of the fourth trestle and rope

要指标,同时在求解结构动力响应方面 also 具有重要意义。

2 客运架空索道系统的有限元建模

在客运架空索道系统整体动力分析中,有限元建模是非常重要的一个环节,关键问题是处理柔索特性,给出建模方法、边界条件以及初始应变的确定等。

2.1 索道系统的几何坐标

客运架空索道系统由4个塔架组成,索道主要跨度的长度的分别为 $L_1 = 160.5 \text{ m}$, $L_2 = 99.8 \text{ m}$, $L_3 = 58.2 \text{ m}$,总跨度 $L_T = L_1 + L_2 + L_3 = 318.5 \text{ m}$,上下索道之间的宽度为 3.6 m ,总高度差为 86.2 m 。定义沿索道运行方向的水平位置为 x 坐标, y 为垂直方向, z 为索道的宽度方向。

2.2 悬索的特性与建模

索道的悬索采用两节点非线性杆单元建模,小应变大变形假定,考虑索单元的几何非线性,单元刚度计及与轴向应变相关的应力刚度矩阵。单元分析公式采用更新的拉格朗日公式,悬索刚度随变形位置而逐步修正。悬索材料采用线弹性假设。柔索的材料与几何特性为,柔索截面积 $A = 3.277 \times 10^{-4} \text{ m}^2$,弹性模量 $E = 9.8 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$,波松比 $\nu = 0.3$,质量密度 $\rho_s = 9300 \text{ kg/m}^3$,外径 $d = 2.0427 \times 10^{-2} \text{ m}$ 。

2.3 塔架与吊篮的建模

塔架相对悬索来说刚度较大,其变形也相对较小,所以采用线性梁单元模拟已经足够,塔架梁单元截面特性根据实际构件的截面形状共分为9种,梁单元弹

性模量 $E = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$,泊松比 $\nu = 0.3$,质量密度 $\rho_s = 7800 \text{ kg/m}^3$ 。

图1~图4为各塔架与索道连接的局部三维实体模型。在索道的整体有限元模型中,吊篮与乘员采用三维质量点单元模拟,每根索道共有19个吊篮,吊篮受风面积 $A = 0.4 \text{ m}^2$,吊篮质量 $m_1 = 102 \text{ kg}$,乘员满员为两人,质量 $m_2 = 140 \text{ kg}$ 。

2.4 有限元模型的边界条件与悬索初始应变

本索道模型的边界条件主要分三种:(1)位移边界条件。(2)应力边界条件。(3)位移约束方程。

(1)位移边界条件 悬索起始位置(底部),塔架底部采用固定边界条件, $u_x = u_y = u_z = v_x = v_y = v_z = 0$ 。

(2)应力边界 在悬索的终止位置(顶部),悬索的应力由重锤的重量确定。本索道的重锤质量为 150000 kg ,故悬索的拉力 $T_0 = (150000/2) \text{ N} = 75000 \text{ N}$,悬索的初始应变取为 $\epsilon_0 = T_0/EA = 0.002335$ 。

(3)位移约束方程 塔架与悬索的连接为滑动连接,悬索 y 与 z 方向自由度的位移与塔架一致,而 x 方向的位移互相独立。所以 y 、 z 方向采用约束方程表示 $u_{ty} = u_{sy}$ 、 $u_{tz} = u_{sz}$,其中 t 表示塔架, s 表示悬索。

进行三种工况下客运架空索道系统动力响应分析,工况1表示空载 $m = 0$,工况2表示满载 $m = 140 \text{ kg}$,工况3表示超载 $m = 280 \text{ kg}$,其中 m 为乘员质量。

3 客运架空索道系统固有频率和振动模态求解

3.1 客运架空索道系统的特征值问题

结构系统的固有频率和模态的求解通常是指求解以下的广义特征值问题

$$K\phi = \omega^2 M\phi \quad (1)$$

式中 ω^2 为结构的固有频率, ϕ 为结构的固有振动模态, M 为结构有限元模型的质量矩阵, K 为结构有限元模型的刚度矩阵。对于客运架空索道系统,由于悬索的非线性,刚度矩阵与变形位置有关,一般采用索道系统的静平衡位置的切线刚度矩阵 K 求解系统固有频率和模态,所求解的固有频率和模态是对应系统在静平衡位置的自由振动型态。

3.2 特征值问题的解法

通常求解大型特征值问题低阶部分特征时的有效方法是子空间迭代方法。子空间迭代矢量的基本步骤如下

设前 q 阶初始迭代 Ritz 基矢量已经选好,用它们构成一个 $n \times q$ 阶的矩阵 X_k ,对 $k = 1, 2, \dots$ 循环迭代,第 k 步的迭代公式为

$$K\bar{X}_{k+1} = MX_k \quad (2)$$

显然 \bar{X}_{k+1} 比 X_k 更靠近真实的特征子空间。然后形成子空间投影矩阵

$$K_{k+1} = \bar{X}_{k+1}^T K \bar{X}_{k+1} \quad (3)$$

$$M_{k+1} = \bar{X}_{k+1}^T M \bar{X}_{k+1} \quad (4)$$

求解子空间特征系统的特征值与特征向量

$$K_{k+1} A_{k+1} = M_{k+1} A_{k+1} \quad (5)$$

λ_{k+1} 和 A_{k+1} 是近似的特征值与特征矢量矩阵,可获得改进的前 q 阶 Ritz 基矢量是

$$X_{k+1} = \bar{X}_{k+1} A_{k+1} \quad (6)$$

由于 A_{k+1} 是子空间上的特征向量,是关于 M_{k+1} 正交归一的,则 X_{k+1} 必然是关于 M 正交归一的。因为

$$X_{k+1}^T M X_{k+1} = A_{k+1}^T \bar{X}_{k+1}^T M \bar{X}_{k+1} A_{k+1} = A_{k+1}^T M_{k+1} A_{k+1} = I \quad (7)$$

于是 X_{k+1} 可作为新的迭代矩阵。只要矩阵 X_k 的各列不正交于所要求的特征矢量,则当 k 时

$$X_{k+1} \phi$$

为了减少运算量和存储,通常采用以下更有效的迭代格式

首先,假设 q 个初始矢量,取 $Y_1 = M X_1$,并设 $q = \min\{2p, p + 8\}$,对刚度阵 K 作三角分解

$$K = LDL^T \quad (8)$$

然后对于 $k = 1, 2, \dots$ 作如下迭代运算

$$LDL^T \bar{X}_{k+1} = Y_k \quad (9)$$

$$K_{k+1} = \bar{X}_{k+1}^T Y_k \quad (10)$$

$$\bar{Y}_{k+1} = M \bar{X}_{k+1} \quad (11)$$

$$M_{k+1} = \bar{X}_{k+1}^T \bar{Y}_{k+1} \quad (12)$$

$$K_{k+1} A_{k+1} = M_{k+1} A_{k+1} \quad (13)$$

$$Y_{k+1} = \bar{Y}_{k+1} A_{k+1} \quad (14)$$

对于已给定的收敛误差 Tol ,若

$$\frac{|x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)}|}{|x_i^{(k+1)}|} \leq Tol \quad (i = 1, 2, \dots, q) \quad (15)$$

达到满足,则停止迭代,这时 λ_k 与 X_k 即为结构系统前 q 阶特征值和特征向量。

4 客运架空索道系统固有频率与工况的关系

根据上述客运架空索道系统的模型,利用 ANSYS

软件求解客运架空索道在三种工况下的前 40 阶固有频率与振动模态。由于索道系统的非线性性质,首先必须求解索道系统在某一工况下的静平衡位置,从而获得索道系统在平衡位置的切刚度矩阵 K ,进而通过子空间迭代方法求解索道系统在静平衡位置的固有频率和振动模态。表 1 为前 40 阶固有频率在不同工

表 1 索道系统固有频率和工况的关系

频率阶数	频率(工况 1)	频率(工况 2)	频率(工况 3)
1	0.292 151	0.209 445	0.166 818
2	0.292 37	0.209 511	0.166 886
3	0.296 591	0.214 64	0.177 197
4	0.296 744	0.214 758	0.177 332
5	0.467 159	0.338 581	0.279 026
6	0.468 352	0.339 479	0.279 746
7	0.474 052	0.344 38	0.283 041
8	0.474 471	0.344 697	0.283 249
9	0.582 818	0.419 547	0.343 309
10	0.583 074	0.419 779	0.343 53
11	0.584 933	0.423 39	0.349 229
12	0.585 23	0.423 69	0.349 501
13	0.782 025	0.563 379	0.462 968
14	0.784 414	0.565 077	0.464 342
15	0.785 613	0.566 585	0.465 99
16	0.786 268	0.567 208	0.466 506
17	0.865 912	0.621 327	0.507 89
18	0.866 586	0.621 451	0.508 096
19	0.867 815	0.623 871	0.513 143
20	0.868 4	0.624 388	0.513 614
21	0.915 641	0.655 653	0.537 383
22	0.916 965	0.656 179	0.537 662
23	0.917 943	0.657 764	0.539 728
24	0.918 971	0.658 974	0.540 844
25	1.132 573	0.806 13	0.659 501
26	1.133 263	0.806 72	0.660 031
27	1.135 355	0.809 661	0.663 84
28	1.136 102	0.810 247	0.664 331
29	1.314 799	0.932 631	0.761 325
30	1.315 974	0.934 248	0.762 707
31	1.322 664	0.935 337	0.763 355
32	1.324 789	0.935 959	0.763 569
33	1.374 785	0.969 161	0.789 799
34	1.375 386	0.969 977	0.790 593
35	1.383 053	0.975 672	0.796 827
36	1.384 514	0.976 79	0.797 718
37	1.404 805	1.026 161	0.845 555
38	1.405 943	1.027 567	0.847 645
39	1.487 345	1.043 736	0.849 381
40	1.490 651	1.047 573	0.852 388

况下的数值。索道系统的最低固有频率在三种不同工况作用下分别为 0.29 Hz、0.21 Hz 和 0.16 Hz, 乘员质量对系统固有频率有相当大的影响, 乘员质量越大, 固有频率越低。研究表明, 最低阶固有频率为第一跨的垂直振动。第一跨的水平振动模态为第三阶, 高于索道的垂直振动模态。索道支架由于刚度较大, 基本上不与索道的整体模态发生耦合, 相当于刚性支撑点。固有频率主要由分割索道之间跨长决定, 简化的单根索道固有频率的计算公式如下

$$f_n = \frac{n}{2L} \left(\frac{T}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (16)$$

其中 n 为频率阶数, T 为静平衡位置的悬索张力, m 为等效的悬索单位长度质量。

5 小结

本文利用结构动力学理论, 提出一种客运架空索道系统动力特性分析方法, 通过对实际索道系统进行建模和分析, 给出索道系统在某一工况下的静平衡位置, 获得索道系统的在平衡位置的切刚度矩阵 K ,

进而利用子空间迭代方法求解得到索道系统在静平衡位置的固有频率。文中提出的分析方法为客运架空索道系统的结构设计提供了一种新的思路, 为实际运行的客运架空索道的动力评估提供一种有效的计算方法。

References

- 1 Dhotara M S, Ganesan N. Transmission line vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 1978, 60(2): 217 ~ 237.
- 2 Robert D Blevins. Flow-induced vibration. New York: Van Nostrand Reinhold Company, c 1977.
- 3 Henglzold W M, Russell J J, Morgan J D. Free vibration of cable in three dimensions. *Journal of the Structural Division*, 1977, 103: 1 127 ~ 1 136.
- 4 Peruis N C, Mote C D. Three-dimension vibration of traveling elastic cable. *Journal of Sound and Vibration*, 1987, 114(2): 325 ~ 340.
- 5 Fried I. Large deformation static and dynamic finite element. *Computer and Structure*, 1982, 15: 315 ~ 319.
- 6 SHEN Zhonghan, WANG Danfeng. Vibration analysis and vibration-reduction of Beijing weather tower. *Mechanics and Practice*, 1980, (2): 50 ~ 51 (In Chinese) (申仲翰, 王丹峰. 北京气象塔的振动分析及减振. *力学与实践*, 1980, (2): 50 ~ 51).

失效案例

美官方首次公布哥伦比亚航天飞机解体原因

<http://www.sina.com.cn> 2003年05月07日05:18 人民网



正在进行复原的“哥伦比亚”号残骸

人民网5月7日讯 负责调查美国“哥伦比亚”号航天飞机解体之谜的独立委员会6日首次宣布, 对种种数据进行综合分析后, 各方一致认为, 这架航天飞机左翼在起飞时遭到从燃料箱上脱落的泡沫绝缘材料撞击, 结果造成机体表面隔热保护层出现了大面积松动和破损, 最终导致“哥伦比亚”号于今年2月1日在返

航途中因超高温空气入侵而彻底解体, 七名宇航员全部遇难。此前, 虽然不断有专家通过上述理论来解释和推测“哥伦比亚”号失事的直接原因, 但该调查委员会一直呼吁有关部门“保持冷静, 不要过早下结论”。

从“哥伦比亚”号左翼传感器上获得的最后阶段数据显示, 这架航天飞机在返航途中进入大气层后, 在经过夏威夷上空时, 超高温空气开始从遭到撞击部位形成的缝隙中入侵机体内部“娇嫩的部位”, 并直接从里面完全摧毁了“哥伦比亚”号。美国国家航空航天局(NASA)当天也首次承认, 这架失事航天飞机在起飞过程中的确因遭到外物撞击而在表面形成了可让“热气进入的洞”。数据显示, 飞机发射后84秒钟, 左侧机翼上传回来的数据即发生异常。电视画面显示, 此前两秒, 一个保险柜大小的泡沫材料刚刚击中了飞机。

随后, 机翼前端传感器送回的数据显示, 这里的温度稍有升高, 而在此前发射过程中从未出现过这种现象。虽然这种“升温现象”看上去非常普通, 但是综合其他数据进行分析, 专家指出, 这时 (下转第289页)