

客运架空索道系统 整体静力特性分析

国家质量监督检验检疫总局锅检中心 丁克勤 孙 亮
中国科学院力学研究所 刘玉标 申仲翰

摘 要: 针对客运索道系统中悬索、塔架、吊篮等特定结构, 着重解决了索道系统分析中的整体有限元建模问题, 并提出了客运索道系统在自重或风力作用下的应力分析方法, 为客运索道系统静强度设计提供了整体性计算方案。

关键词: 索道; 塔架; 悬索张力; 应力; 有限元

Abstract: Model of a passenger aerial ropeway is established after conducting structural analysis of the cable, supporting mast and basket, and stress analysis is respectively performed under passengers or wind loads, providing a method of overall static strength design of passenger aerial ropeways.

Key words: ropeway; supporting mast; cable tension; stress; finite element

客运架空索道系统主要由支架和悬索构成, 对索道系统的安全评估, 除了对单一支架的静力强度进行分析外, 整体系统静力分析也十分必要, 其重要性主要体现在 3 个方面: (1) 确定整体结构应力最大值的位置以及整体结构在极限工况下是否满足强度要求; (2) 确定单一支架所受的极限载荷; (3) 确定整体系统的静平衡位置, 为整体系统的动力特性与响应分析提供初始位形, 并确定整体结构的刚度矩阵。悬索结构作为高度几何非线性结构一直是结构计算中的难点, 本文采用 ANSYS 的非线性索元模拟悬索, 通过非线性大变形逐步增量载荷迭代解法求解系统的静平衡位置。对悬索与支架的连接采用了位移约束方程, 较好地模拟了悬索与支架的接触条件。在悬索的顶端采用了与实际情形相吻合的应力边界条件。本文所述方法为索道系统静动力建模与分析提供了 1 套较为准确的解决方案。

1 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静力分析中, 有限元建模是很重要的环节, 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。

1.1 索道系统的几何坐标

客运架空索道系统由 4 个塔架组成, 索道主要跨度长度分别为 $L_1 = 160.5 \text{ m}$, $L_2 = 99.8 \text{ m}$, $L_3 = 58.2 \text{ m}$, 总跨度为 $L_T = L_1 + L_2 + L_3 = 318.5 \text{ m}$, 上

下行索道之间宽度为 3.6 m , 总高度差为 86.2 m 。定义沿索道运行方向的水平方向为 x 坐标, 垂直方向为 y 坐标, 宽度方向为 z 坐标。悬索起始点、终止点与塔架顶悬索的悬挂点坐标见表 1, 塔架的地面固定点坐标见表 2。

表 1 悬索的悬挂点坐标 m

支点号	x	y	z
1	0.000	3.810	- 1.800
2	0.000	3.810	1.800
3	11.988	3.810	1.800
4	11.988	3.810	- 1.800
5	164.90	51.715	1.800
6	164.90	51.715	- 1.800
7	259.98	84.540	1.800
8	259.98	84.540	- 1.800
9	317.98	90.100	1.800
10	317.98	90.100	- 1.800
11	327.99	90.100	1.800
12	327.99	90.100	- 1.800

1.2 悬索的特性与建模

索道的悬索采用 2 节点非线性杆单元建模，假定为小应变大变形，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 $E = 9.8 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ，泊松比 $\nu = 0.3$ ，质量密度 $\rho_s = 9\ 300 \text{ kg/m}^3$ ，外径 $d = 2.0427 \times 10^{-2} \text{ m}$ 。

表 2 塔架的地面固定点坐标 m

固定点号	x	y	z
1	11.988	0.000	0.000
2	259.983	73.000	0.000
3	317.985	87.400	0.000
4	163.703	36.500	- 1.200
5	163.703	36.500	1.200
6	166.103	36.500	- 1.200
7	166.103	36.500	1.200
8	0.000	3.810	- 1.800
9	0.000	3.810	1.800
10	327.990	90.100	- 1.800
11	327.990	90.100	1.800

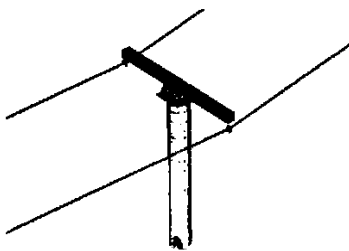


图 2 塔架 1 与索道的实体模型

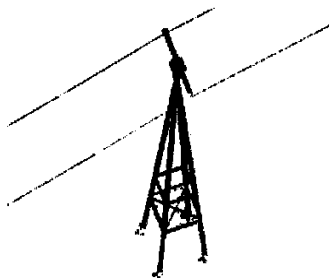


图 3 塔架 2 与索道的实体模型

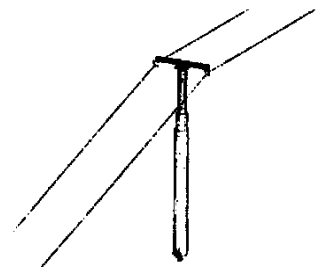


图 4 塔架 3 与索道的实体模型

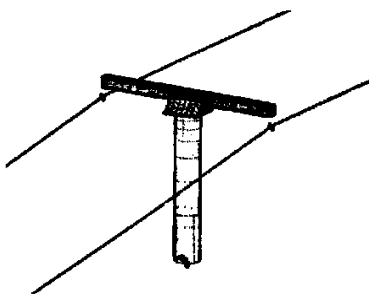


图 5 塔架 4 与索道的实体模型

1.3 塔架与吊篮的建模

塔架相对悬索来说刚度较大，其变形相对较小，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 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 $\rho_s = 7\ 800 \text{ kg/m}^3$ 。

索道的整体有限元模型见图 1，其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 $A = 0.4 \text{ m}^2$ ，吊篮质量为 $m_1 = 102 \text{ kg}$ ，乘员满员为 2 人，质量为 $m_2 = 140 \text{ kg}$ 。图 2~5 为各塔架与索道连接的局部三维实体模型。



图 1 索道的整体有限元模型
(图中 * 表示吊篮质量单元)

1.4 有限元模型的边界条件与悬索初始应变

索道模型的边界条件主要分 3 种：位移边界条件、应力边界条件和位移约束方程。

(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为 $u_x = u_y = u_z = v_x = v_y = v_z = 0$

(2) 应力边界条件

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 $150\ 000 \text{ kg}$ ，故悬索的拉力 $T_0 = 75\ 000 \text{ N}$ ，悬索的初始应变取为

$$\sigma_0 = T_0 / (EA) = 0.002\ 335。$$

(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相一致，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为 $u_{ty} = u_{sy}$ ， $u_{tz} = u_{sz}$ ，其中 t 表示塔架， s 表示悬索。

2 客运架空索道的非线性静力分析

根据上述方法采用 ANSYS 软件建模形成的非线性有限元平衡方程为

$${}^+R - {}^+F = 0 \quad (1)$$

式中 ${}^+R$ ——外加载荷节点力向量
 ${}^+F$ ——等效单元节点力向量
 ${}^+u^{(i-1)}$ ——前一载荷步对应的平衡位置
 ${}^+u^{(i)}$ ——表示当前平衡位置

由于 ${}^+F$ 中存在材料和几何非线性，所以方程 (1) 不能直接求解。根据牛顿迭代法将方程 (1) 写成增量形式

$$K^{(i-1)} \Delta u^{(i)} = {}^+R - {}^+F^{(i-1)} \quad (2)$$

$${}^+u^{(i)} = {}^+u^{(i-1)} + \Delta u^{(i)} \quad (3)$$

式中 K ——切线刚度矩阵
 Δu ——当前载荷增量步的位移增量
 ${}^+u$ ——总体位移向量
 i ——迭代步

首先根据典型位置的坐标形成初始的有限元模型，悬索初始位形为直线，悬索初始应变假设为 $\sigma_0 = T_0 / (EA) = 0.002\ 335$ ，然后逐步将自重和悬索自重加载于初始的有限元模型，通过求解增量平衡方程，并每步进行平衡迭代直至收敛，最终获得索道系统的静平衡位置。

3 客运架空索道系统在乘员自重作用下的应力分析

3.1 在乘员自重作用下的应力分析

本文计算了 3 种工况下的索道系统的整体应力。

工况 1：空载（索道自重与吊篮自重 $m = 102$ kg）

工况 2：满载（索道自重与吊篮自重 + 2 人 $m = 242$ kg）

工况 3：超载（索道自重与吊篮自重 + 4 人 $m = 382$ kg）

利用上述客运架空索道的非线性静力分析方法，可以得到不同工况下悬索与塔架的最大最小应力及悬索最大位移，见表 3、表 4。

表 3 不同工况下悬索与塔架的应力

工况	悬索应力/MPa		塔架应力/MPa	
	最大	最小	最大	最小
1	247.0	229.0	1.87	- 3.76
2	256.0	229.0	1.04	- 4.58
3	265.0	229.0	0.227	- 5.41

表 4 不同工况下悬索最大位移

工况	悬索最大位移/m
1	0.219 1
2	2.747
3	5.572

3.2 客运架空索道系统在静风力作用下的应力分析

风力采用我国建筑结构规范^[1,2]的风力公式。

(1) 悬索单位长度风力

$$f_s = \frac{C_d}{1.6} \bar{u}^2 d$$

式中 \bar{u} ——极限风速

$$C_d = 2.0$$

(2) 吊篮风力

$$f_m = \frac{C_d}{1.6} \bar{u}^2 A$$

式中 A ——吊篮受风面积， $A = 0.4$ m²

如取极限风速 $\bar{u} = 33.0$ m/s

悬索上各节点的等效节点风力 f_{NS} 为

$$f_{NS} = f_s L_T / N = 50.9$$

悬索上有吊篮节点的风力 f_{Nm} 为

$$f_{Nm} = f_m + f_{NS} = 595.4$$

本节中不变的载荷还包括悬索自重及吊篮自重 + 2 人的自重 $m = 242$ kg。利用上述客运架空索道的非线性静力分析方法，可以得到索道自重 ($m = 242$ kg) 与风载荷 ($\bar{u}_c = 33.0$ m/s) 作用下索道系统的变形图、悬索张力图及悬索应力图，见图 6、7、8。表 5 和 6 分别给出了不同风速作用下悬索与塔架的最大最小应力、不同风速作用下悬索的最大位移。

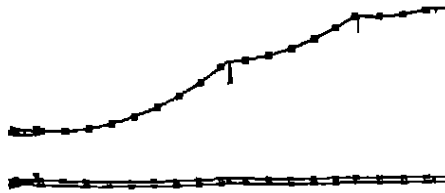


图 6 索道自重与风载荷作用下索道系统的变形图

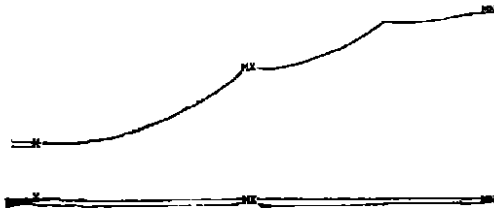


图 7 索道自重与风载荷作用下悬索张力图

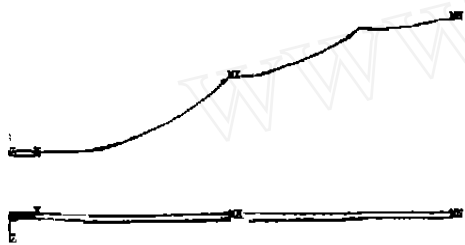


图 8 索道自重与风载荷作用下悬索应力图

表 5 不同风速作用下悬索与塔架的应力

风速/ (m s^{-1})	悬索应力/MPa		塔架应力/MPa	
	最大	最小	最大	最小
10.0	256.0	229.0	1.04	- 4.58
25.0	256.0	229.0	3.22	- 8.04
33.0	256.0	229.0	7.08	- 12.2

表 6 不同风速作用下悬索的最大位移

风速/ (m s^{-1})	悬索最大位移/m
10.0	2.755
25.0	3.044
33.0	3.571

4 结论

通过本文的研究工作，建立了客运索道结构系统力学分析的有限元计算模型。根据悬索与塔架结构的不同力学特性进行了不同处理：对悬索采用了 2 节点非线性杆单元模型，应用小应变大变形假定，考虑了索单元的几何非线性；对于塔架结构，鉴于其刚度较大，变形相对较小，故选用线性梁单元，并给定 9 种不同截面特性；塔架模型共 4 种，分别与索道一起完成实体建模。在具体计算中，分别针对乘员自重作用与静风力作用的不同工况完成了客运索道系统的静力计算，给出了索道的变形、张力及应力状态，并给出不同工况下的最大、最小应力及悬索最大位移。上述工作为客运索道系统的静强度设计提供了整体性计算方案，为系统的动强度分析打下了基础。

参 考 文 献

- 1 陈基发，沙志国．建筑结构荷载设计手册．北京：中国建筑工业出版社
- 2 张相庭．高层建筑抗风抗震设计计算．上海：同济大学出版社

作 者：丁克勤

地 址：北京朝阳区和平街西苑 2 号楼研究开发部

邮 编：100013

电动叉车将取代内燃叉车吗？

美国工业车辆协会 (ITA) 空气质量分技术委员会最近讨论了 1 项加利福尼亚空气资源署 (CARB) 的提议，该提议是作为南岸空气质量管理局实施计划 (SCAQMD SIP) 的一部分提出的。提议要求 2005 年 1 月 1 日以后购买 8000 磅或以下吨位的叉车必须是电动叉车；2005~2010 年期间逐步停止起重量为 8000 磅或以下内燃叉车的租用。若此提议被批准作为 SCAQMD SIP 的一部分，则其之后可能成为 CARB 的法规。ITA 成员一致认为 ITA 应当反对此提议及任何类似建议，认为用法规限制某系列起重叉车只允许是电动叉车将不能满足用户多样化的需求，对短期租赁用户影响更大（他们需配备充电站及一些针对电动叉车的专用设施）。参加讨论的人员还列举了助功 CARB 反对此项提议的其他理由。ITA 空气质量分技术委员会还将对影响 IC 叉车销售和使用的另外 2 项提议进行讨论，详见 WWW.indtrk.org。（滕凯芝）

摘译自：[刊，英] Material Handling Management. —2003, 58 (4). —5