

# 客运架空索道线路支架的有限元分析

王昱皓<sup>1</sup> 丁克勤<sup>2</sup> 申仲翰<sup>3</sup> 张有忱<sup>1\*</sup>

(1. 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029; 2. 国家质量技术监督局锅炉压力容器检测研究中心, 北京 100013;  
3. 中科院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 客运架空索道线路支架的有限元计算是其结构设计的难点和重点, 文中就线路支架的结构分析中有线元力学模型的简化, 计算工况的确定以及计算方法等进行了讨论。最后给出了分析算例。

**关键词:** 客运架空索道; 线路支架; 有限元分析; 非线性

**中图分类号:** U18; O242.21

## 引言

客运架空索道由于能适应复杂地形、跨越山谷、克服地面障碍物等特点, 在山区和平原、城市和农村、风景区和滑雪场均能发挥作用。随着我国旅游事业的发展, 客运架空索道在我国交通运输业、旅游业等行业中得到日益广泛的应用。客运架空索道普遍存在着一个安全性的问题, 索道的伤亡事故还时有发生。这其中的原因虽然很多, 但线路支架作为客运架空索道的重要组成部分, 它直接关系到架空索道运输的安全性, 因此线路支架的强度、刚度以及其稳定性等的设计计算的准确与否是十分重要的。长期以来, 客运架空索道线路支架的设计计算一直沿用传统的结构设计方法。这种方法只能得到线路支架的局部应力及位移情况, 而无法了解线路支架受载时整体的应力、应变分布规律。设计制造部门迫切需要寻求一种能快速准确反映线路支架受载时的整体应力、应变分布规律的现代设计新方法。同时, 随着线路支架结构的复杂化、大型化, 如果采用传统的方法分析上述问题, 则费时费力, 且计算中引入了一些假设, 使得计算结果与结构的实际受力情况有较大误差。

本文采用将整个线路支架结构简化为理想的数学模型, 用离散化网格代替连续实体结构进行分析计算有限元法来处理客运架空索道线路支架的问题, 计算时考虑了结构的非线性因素。

收稿日期: 2001-09-11

基金项目: 国家“九五”科技攻关项目(96-920-36-09)

第一作者: 男, 1977年生, 硕士生

\* 通讯联系人

## 1 有限元力学模型的建立

### 1.1 坐标系及单位制

采用笛卡儿右手坐标系建立线路支架的模型。坐标原点定义在支架底部中心处, 其  $x$  轴沿索道运载索方向且向上规定为正,  $y$  轴正方向定义为沿支架高度的方向,  $z$  轴正方向则按右手法则确定。为了建模及计算上的方便, 采用 mm 为长度单位, N 为载荷单位, 这样在计算结果中, 位移的单位将是 mm, 应力单位将是 MPa。

### 1.2 实体建模及单元取法

实体建模应以尽可能真实地反映结构的实际几何形状, 并能作合理的简化来建立符合真实力学性质的有限元模型为原则。索道线路支架所使用的材料一般为角钢、扁钢、圆钢以及它们的组合等。由于线路支架在不同的环境条件下, 其结构形式会有所不同, 如自立式支架、拉线支架等。一般由索道运载索施加在支架上的载荷、支架上的侧向风载荷等引起的弯矩较小, 将这种结构形式的支架视为理想的三维空间桁架, 空间桁架的杆元都为二力杆元, 在结构受力中只承受轴向力。而对一些由外载引起的支架内弯矩较大的支架结构形式, 不能当作二力杆元来处理, 相应应按照梁元处理。

索道线路支架在受力后大多都具有大位移、小应变的变形, 同时, 对于存在柔性杆件的复杂支架, 柔性杆件不能承受压力, 其应力-应变关系并不是线性的, 因此, 在结构分析中应采用非线性单元。

### 1.3 材料模型

对无柔性杆件存在的支架, 材料是仅弹性模量确定的线弹性材料。对有柔性杆件存在的复杂支

架,在有限元非线性分析中,将材料分为两种情况考虑:(1)承受拉压的刚性单元,材料是弹性模量确定的线弹性材料;(2)只承受拉力的柔性单元,设定非线性材料模式处理只能承受拉力,不能承受压力的杆件(扁钢、圆钢等)。柔性杆件的材料假设为非线性弹性材料。设定了非线性材料模式,就能够处理存在只能承受拉力,不能承受压力的杆件的支架了<sup>[1]</sup>。

## 2 边界条件的处理

### 2.1 载荷

客运架空索道线路支架是一种受力比较复杂的

结构,支架体除受自重外,还受到双侧承载索和牵引索的作用合力(含支架处运行摩擦阻力)、线路钢丝绳受水平风力传递到支架顶部的力以及支架自身在风压作用下所受的力等,在索道运行过程中,支架顶部两侧重载和轻载的工况交替出现。对于受到这样复杂力的线路支架,所有工况都进行计算工作量太大,亦没有必要(有些工况下支架受力较小)。在实际计算时只需对一些典型工况(受力较大的情况)进行计算即可。本文根据载荷交替出现情况将载荷分为下列8种组合工况进行分析计算(见表1)。

表1 组合工况表

Table 1 Combined load-state of a passenger ropeway stand

| 载荷情况          | 工况号 | 风向           | 钢丝绳所受风力对支架的影响程度 |
|---------------|-----|--------------|-----------------|
| z轴正方向(上行侧)边重载 | 1   | 沿x轴正方向(上站方向) | 小,可忽略不计         |
| z轴负方向(下行侧)边轻载 | 2   | 沿x轴负方向(下站方向) | 小,可忽略不计         |
|               | 3   | 沿z轴正方向       | 大,要考虑           |
|               | 4   | 沿z轴负方向       | 大,要考虑           |
| z轴正方向(上行侧)边轻载 | 5   | 沿x轴正方向(上站方向) | 小,可忽略不计         |
| z轴负方向(下行侧)边重载 | 6   | 沿x轴负方向(下站方向) | 小,可忽略不计         |
|               | 7   | 沿z轴正方向       | 大,要考虑           |
|               | 8   | 沿z轴负方向       | 大,要考虑           |

注:当风向为顺着钢丝绳方向时,风作用在钢丝绳上的力非常小,如表中所列忽略不计;当风向为垂直于钢丝绳时,其对钢丝绳的作用力要考虑。

另外,根据当地风速的大小,将载荷又分为工作载荷和非工作载荷。工作载荷即风速比较低时(索道可以正常运转)的载荷,非工作载荷即风速比较高时(索道不能正常运转,必须停运或做其它处理时)的载荷。

总之,在对线路支架进行有限元分析时,将载荷分为两组(工作载荷和非工作载荷)各8种工况进行。

### 2.2 约束

只是对索道线路支架进行有限元分析,而不考虑地基等的受力情况,所以为方便起见,将线路支架与地面的连接看成固支,即约束支架支腿底部的6个自由度。

## 3 有限元分析计算

在线路支架的有限元模型及边界条件处理完成以后,就可以对支架进行有限元分析计算了。在分析计算时,对线形问题,可以用一步直接求解的方法进行,而对非线性问题,必须把非线性问题分成若干

个载荷步,分阶段对问题逐步求解,也就是采用载荷增量的求解方法。

## 4 计算工具的选择

现在通用的商业有限元软件发展的比较成熟,本文选择美国的通用ANSYS软件和自己编制的客运架空索道工艺计算软件作为分析计算的工具。

## 5 算例

以江苏宜兴的一条客运架空索道为例,选择该索道的第二个线路支架按照上面所阐述的方法进行有限元分析。

该支架的总体结构如图1所示,4个支架立柱材料上段为 $\Phi 500 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 圆钢,下段为 $\Phi 219 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 圆钢,第一层横杠为 $\Phi 102 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 圆钢,第二层横杠中,外围为方钢,对角线上的横杠为 $120 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ 的等边角钢,支架最上端的横梁为角钢与方钢的组合形式。

这个支架的结构形式比较简单,在同样外载作

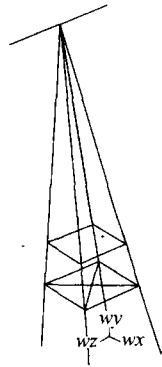


图 1 客运索道支架结构简图

Fig. 1 Schematic of a passenger ropeway stand

用下,其在简单结构内部引起的弯矩较其在复杂结构内部引起的弯矩要大。本文所引用的支架在分析时将其按梁元处理比较合理,同时考虑到非线性因素,确定选用 ANSYS 中的 Beam189 这种非线性梁单元,采用这种单元可以得到梁截面内的应力分布,从而有利于梁截面的设计。在有限元网格划分时,综合考虑结构及受载特性,做到网格划分疏密合理,最后总计 429 个节点,146 个单元。

根据上面分析的组合工况情况,对该支架分析时,将载荷分为两组各 8 种工况,第一组载荷为风速取 5 m/s 的工作载荷;第二组为风速取 25 m/s 的非工作载荷。由该索道的一些原始数据,通过笔者编制的客运架空索道工艺参数计算软件,可以计算出各工况下支架的受力大小。在此为节省篇幅就不一一列出。关于约束情况,就按上面分析的方法去处理。支架受力及约束简图如图 2 所示。

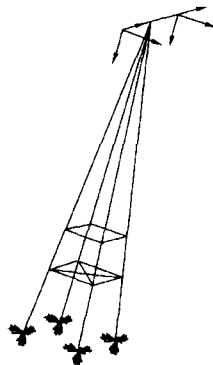


图 2 客运索道支架受力及约束简图

Fig. 2 Schematic of load and boundary restrictions of the passenger ropeway stand

最后通过 ANSYS 软件对该支架进行有限元分析计算,得到各种不同工况下的应力及变形情况。

图 3、图 4 所示为某工况下经 ANSYS 软件后处理而得的应力图和位移图。表 2、表 3 给出了各种不同工况下的应力、变形的比较。

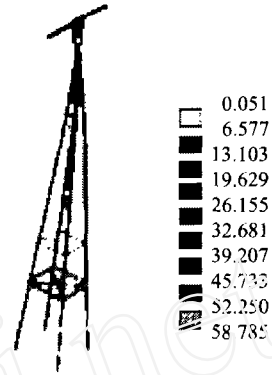


图 3 支架在某一工况下的应力图

Fig. 3 Stresses diagram of the stand in a certain load-state

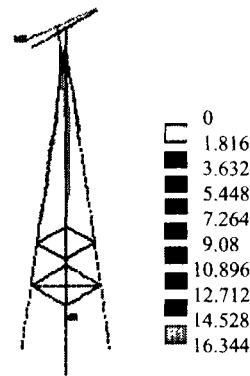


图 4 支架在某一工况下的位移图

Fig. 4 Displacements diagram of the stand in a certain load-state

表 2 工作载荷各工况下的有限元分析计算结果

Table 2 Finite element results of the stand with working load

| 工况 | $S_{max}/mm$ | $\sigma_{max}/MPa$ |
|----|--------------|--------------------|
| 1  | 5.874        | 40.421             |
| 2  | 5.874        | 40.421             |
| 3  | 16.387       | 58.719             |
| 4  | 16.304       | 58.891             |
| 5  | 6.066        | 41.05              |
| 6  | 6.066        | 41.05              |
| 7  | 13.024       | 56.529             |
| 8  | 13.131       | 56.356             |

表3 非工作载荷各工况下的有限元分析计算结果

Table 3 Finite element results of the stand with abnormal load

| 工况 | $S_{max}/mm$ | $\sigma_{max}/MPa$ |
|----|--------------|--------------------|
| 1  | 5.909        | 40.421             |
| 2  | 5.91         | 40.421             |
| 3  | 18.241       | 57.132             |
| 4  | 16.291       | 61.451             |
| 5  | 6.1          | 41.05              |
| 6  | 6.101        | 41.05              |
| 7  | 12.956       | 59.086             |
| 8  | 15.426       | 54.769             |

## 6 结束语

本文对客运架空索道线路支架的有限元分析进行了较为详细的讨论,给出了切实可行的分析方案。通过算例不难发现,风载荷对线路支架的受力影响较大,尤其是当风向垂直于线路方向吹时影响更大。相信本文将对工程中线路支架的结构设计、在役支架的安全评估等都有很大的帮助。

## 参 考 文 献

- [1] 杨万里,龙小乐,鲍务均.输电杆塔的结构设计分析[J].武汉水利电力大学(宜昌)学报,1999,21(1):58~61

## Finite element analysis of a passenger ropeway stand

WANG Yu-hao<sup>1</sup> DING Ke-qin<sup>2</sup> SHEN Zhong-han<sup>3</sup> ZHANG You-chen<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Centre of Boiler & Pressure Vessel Inspection and Research, Beijing 100013;

3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Finite element analysis is a difficult and focal point in designing and analyzing configuration of a passenger ropeway stand. In this paper, the predigested mechanical model, the different and complex boundary restrictions and the calculation method for the passenger ropeway stand were discussed. In addition, an example was given.

**Key words:** passenger ropeway; stand; FEM; nonlinear

(上接第59页)

## 参 考 文 献

- [1] Ruan B. Finite element analysis of the spiral groove gas face seal at the slow speed and the low pressure condi-

tions—slip flow consideration [J]. Tribology Transactions, 2000, 43(3):411~418

- [2] Gabriel R P. Fundamentals of spiral groove noncontacting face seals [J]. Lubrication Engineering, 1994, 50(2): 215~224

## Finite element analysis of the spiral groove dry gas seals

LIN Pei-feng ZHANG Qiu-xiang CAI Ji-ning LIU Bin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** A finite element analysis scheme using a Galerkin weighted residual method for the spiral groove dry gas seals was designed based on Reynolds Equation of compressible gases. And a software was designed for computing the spiral groove dry gas seals on the Visual C++ 6.0 environment. By comparing the computed results with the experiment results, it is proved that the computed results is satisfied.

**Key words:** spiral groove; dry gas seals; finite element; Reynolds Equation