

客运架空索道线路支架的极限承载力分析

王昱皓¹ 丁克勤² 申仲翰³ 张有忱¹

(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. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 给出了用来分析客运架空索道线路支架极限承载力的一种有效的有限元分析方法, 重点讨论使用该方法的具体分析过程, 同时给出了编程框图, 最后通过实例作了进一步的说明。

关键词: 客运架空索道; 线路支架; 极限承载力

中图分类号: U18; O344.5

引言

线路支架作为客运架空索道的重要组成部分, 同时线路支架又是一种重要的工程结构, 其在工程结构设计中, 通常都采用弹塑性极限状态的破坏理论, 按照弹性方法分析其内力, 而没有考虑结构的塑性变形(我国的客运架空索道的线路支架的设计更是如此), 通过这种方法设计出的结构偏于安全但不够合理。如果采用塑性或弹塑性方法进行分析设计, 则与极限状态破坏理论相协调, 就能够更多的发挥结构的潜力, 这样设计出来的结构也就更经济。而且在结构设计中存在许多不确定因素, 如风载荷的确定、结构制作安装的误差、材料的变异等。所以对结构进行极限承载力的研究计算就显得很有必要而且也很重要。通过它既可以指导结构的优化设计, 又可以用于设计结构的应力校核, 还可用于现有结构的整体安全评估。

基于上述考虑, 本文对客运架空索道线路支架的极限承载力的分析方法及分析过程进行了探讨。

1 线路支架的极限承载力的分析方法

从上面知道, 精确计算结构的极限承载力是一个重要的任务。为了获得极限载荷的精确值, 就必须在结构分析中同时考虑材料和几何非线性因素。随着电子计算机在结构分析中越来越广泛地应用, 这种考虑非线性因素的复杂计算可通过矩阵方法在

计算机上即可完成。从国内外文献来看, 目前对工程结构进行极限承载力分析的方法比较多, 比如有三维结构极限下限分析的逐步渐进法、三维结构极限上线分析的分区迭代法、事件追踪分析法、杆件替代法、虚功增量法、线性互补方程法、整体推进法、载荷增量法以及一维增量弹塑性有限元法等等。方法虽然很多, 但各有各的使用范围, 即便同一结构可以使用几种方法, 但其也有优有劣。

由于客运架空索道线路支架的结构形式复杂多样, 而且其极限承载力分析一般是一个非线性分析过程, 因此本文采用了一种分析非线性问题比较有效的方法——载荷增量法来分析线路支架的极限承载力。

2 载荷增量法的基本原理

所谓增量法, 就是将总载荷划分为许多增量, 每次施加一级荷载增量而进行结构分析。用载荷增量法分析线路支架的极限承载力, 必须结合有限元重分析技术, 在每一步增量加载过程中都要重新形成结构系统总体刚度矩阵。基本思路是, 对所分析的线路支架, 作用某一增量载荷, 进行线弹性范围内的有限元分析, 根据结构受力性质和计算模型, 确定第一根杆件(梁)到达变刚点时的载荷增量系数, 以此作为这一级载荷的加载因子, 通过迭加确定支架结构在该级载荷下的受力变形状态, 然后修改变刚杆件(梁)的刚度系数和结构总刚度矩阵, 重复上述过程直至支架结构破坏。载荷增量法的一般表达式^[1]为

$$BR - AS = 0 \quad (1)$$

$$R = [R_1 \quad R_2 \quad \dots \quad R_p]^T \quad (2)$$

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

式中 R_i 为单元 i 的强度随机变量。

$$S = [S_1 \quad S_2 \quad \dots \quad S_p]^T \quad (3)$$

式中 S_i 为单元 i 的载荷增量。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & \dots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{p1} & a_{p2} & \dots & a_{pp} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 a_{ij} 为第 j 级增量载荷 $S_j = 1$ 作用下分配到第 i 个单元的内力；

$a_{ij}S_j$ 为载荷增量 S_j 分配到单元 i 的内力，当系统载荷增至 S_j 时单元 i 失效。

$$B = \begin{bmatrix} 1.0 & 0 & \dots \\ -b_{21}(1-\alpha_1) & 1.0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ -b_{p1}(1-\alpha_1) & -b_{p2}(1-\alpha_2) & \dots \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 α_i 为第 i 个单元的卸载系数，对于拉杆 $\alpha_i = 1.0$ ； b_{ij} 为单元 i 在第 j 个单元失效时的内力分配系数。

经变形(1)式可写成：

$$S = DR \quad (6)$$

式中， $D = A^{-1}B$ ，为一下三角阵。

对于上式中确定的相继失效的一系列杆件(或梁) $r_1 \quad r_2 \quad \dots \quad r_p$ 构成系统的一个失效模式 k ，对应于该失效模式的系统极限承载力用 R_{sk} 表示， R_{sk} 由所有累计增量载荷的最大值给出：

$$R_{sk} = \max \left(S_1, \quad \dots, \quad S_i, \quad \dots, \quad S_i, \quad \dots, \quad S_i \right) \quad (7)$$

3 线路支架极限承载力的分析过程及其确定

在具体用载荷增量法分析线路支架的极限承载力时，首先必须确定采用何种材料模型，目前在工程中，常用的材料模型有四种，即弹性线性强化模型、刚性线性强化模型、理想弹塑性模型以及理想刚塑性模型，但在极限分析中一般都选择后两种材料模型。由文献[2]知理想弹塑性材料以及理想刚塑性材料所得的极限承载力是相同的。

确定了材料模型后，就要考虑支架采用什么样的有限元模型。由于索道线路支架的结构形式复杂多样，采用怎样的有限元模型，这要根据结构形式来定，但一般情况，可归纳为两种，一种是将整个支架均理想化为铰结构，而支架中各单杆看成二力杆；另

一种是将支架中各单杆取成空间梁柱单元，整个支架看成是理想刚性联接的。这两种简化有限元模型中，由于后一种具有可以同时考虑结构几何和物理非线性、材料的残余应力和初始缺陷等因素的优点，因此它是一种考虑因素全面，分析准确的结构模型简化方法，目前在结构分析中较多采用。

由于索道线路支架的受力比较复杂，载荷组合情况较多，再加上环境因素的影响。所以用载荷增量法分析线路支架的极限承载力时，在材料模型和支架结构有限元模型确定后，另一个需要着重考虑的是采用何种加载状态。为分析计算上的方便，较多采用简单加载状态，即无论在何种载荷组合下，所有外载荷从一开始便按同一比例系数(即载荷系数)增加。但使用简单加载状态要满足一定条件^[3]的，即：(1)外载荷(包括体积力)按比例增加，变形体处于主动变形过程(即应力强度是处于不断增加的过程，在变形过程中不出现中途卸载的情况)；(2)结构的体积是不可压缩的；(3)材料的应力应变曲线具有幂强化形式；(4)满足小弹塑性变形的各项条件，塑性变形和弹性变形属于同一量级。如果在不能满足上述条件时就要采用其他的加载状态，比如变值加载等。

前文一直提到极限承载力，确定极限承载力就存在一个极限状态，所以最后还要考虑一下支架在什么样的极限状态下即认为其已达到了极限承载力。通过归纳总结，极限状态可以是下列的任何之一^[3]：(1)整个支架或某一部分作为刚体失去平衡；(2)支架构件或连接因超过材料强度而破坏；(3)支架因过度的塑性变形而不适于继续加载；(4)支架转变为机动体系；(5)支架或支架构件丧失稳定性；(6)支架或支架构件因疲劳而破坏。

经过上述各方面的分析之后就可以通过编程进行计算，在 VC++ 环境下流程图如图 1 所示。

4 算例

以文献[4]中的算例为例，对支架进行极限承载力的分析计算。该支架的总体结构见文献[4]。

分析计算时，材料采用理想弹塑性的材料模型。根据该支架的结构特点，将支架中各单杆取成空间梁单元，整个支架看成是理想刚性联接的。加载时采用简单加载状态，载荷系数设为 λ 。最后以支架是否倒塌为极限状态。为分析简便，支架的受力只考虑其受上行侧和下行侧钢丝绳的拉力作用，并将

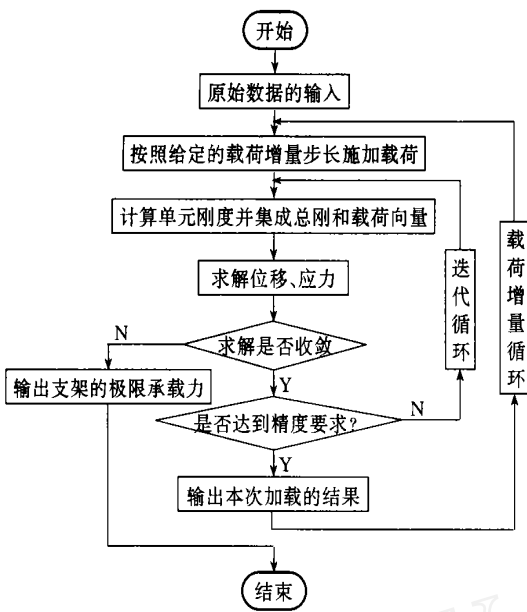


图 1 客运索道线路支架极限承载力分析流程图

Fig.1 Program flow chart for computing limit loads of the passenger ropeway stand

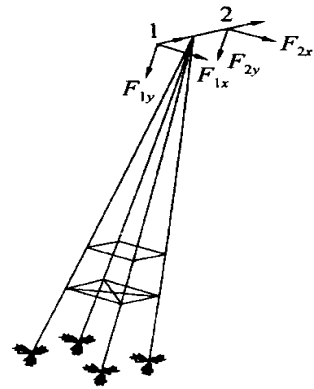


图 2 客运索道支架位移约束及受力简图

Fig.2 Loads and boundary restrictions diagram of the passenger ropeway stand

将上述四个载荷定义成一个载荷向量 F_0 , 即

$$F_0 = \{ F_{1x}, F_{1y}, F_{2x}, F_{2y} \} = \{ -6791.4, 16934.4, -5693.8, 17189.2 \} \text{ (N)}.$$

通过 ANSYS 有限元程序, 逐步增加载荷 ($F = F_0$, F_0 为上面所定义的载荷向量), 直至该索道线路支架达到倒塌这种极限状态。最终计算结果如表 2、图 3 所示。由表 2 及图 3 可以看出该线路支架的极限承载力为 $5.6 F_0$, 即为

$$5.6 \{ -6791.4, 16934.4, -5693.8, 17189.2 \} \text{ (N)}$$

其沿水平和垂直方向分解, 且这些力是同时作用在支架上的。支架位移约束及受力简图如图 2 所示。初始力的大小可以由本课题组开发的客运架空索道工艺参数计算软件得到, 具体值(上行侧与下行侧全满员时)表 1 所示。

表 1 支架受力大小列表

Table 1 List of loads of the passenger ropeway stand

载荷分量	上行侧(图 2 上 1 点)		下行侧(图 2 上 2 点)	
	水平分力 F_{1x}	垂直力 F_{1y}	水平分力 F_{2x}	垂直力 F_{2y}
载荷值/N	- 6791.4	16934.4	- 5693.8	17189.2

注: 负号表示与图 2 所示的方向相反。

表 2 支架载荷系数-位移关系

Table 2 Relations between load coefficient and displacements

载荷系数	1	2	3	4	5	5.4	5.6	5.8
结构顶部位移 s/mm	11.246	22.492	33.738	44.984	55.756	63.036	79.567	发散

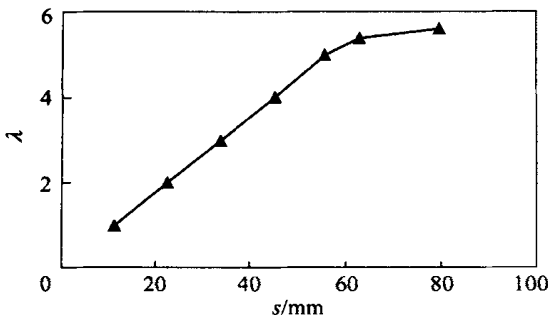


图 3 支架位移-载荷系数间的关系

Fig. 3 Curves of displacements vs. load coefficients

参 考 文 献

- [1] 邓洪洲, 王肇民. 输电铁塔结构系统极限承载力及可靠性研究[J]. 电力建设, 2000(2): 12 - 14
- [2] 王仁, 熊祝华, 黄文彬编. 塑性力学基础[M]. 北京: 科学技术出版社, 1982
- [3] 徐秉业, 陈森灿编. 塑性理论简明教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1981
- [4] 王昱皓, 丁克勤, 申仲翰, 等. 客运架空索道线路支架的有限元设计分析[J]. 北京化工大学学报, 2002, 29(3): 57 - 59

(下转第 58 页)

- 992 - 1001
- [4] Kakiuchi F, Sekine S, Tanaka Y, *et al.* Catalytic addition of aromatic carbon-hydrogen bonds to olefins with the aid of ruthenium complexes[J]. *Bull Chem Soc Jpn*, 1995, 68(1) :62 - 83
- [5] Goldman A S. Ruthenium route to reaction[J]. *Nature*, 1993, 366 :514
- [6] Borman S. Aromatics added to alkenes in one step [J]. *Chem Eng News*, 1993, 71(50) :6 - 7
- [7] Kakiuchi F, Tanaka Y, Sato T, *et al.* Catalytic addition of olefinic C—H bonds to olefins[J]. *Chem Lett*, 1995 (8) :679 - 680
- [8] Kakiuchi F, Yamamoto Y, Chatani N, *et al.* Catalytic addition of aromatic C—H bonds to acetylenes[J]. *Chem Lett*, 1995(8) :681 - 682
- [9] Sonoda M, Kakiuchi F, Kamatani A, *et al.* Ruthenium catalyzed addition of aromatic esters at the ortho C—H bonds to olefins[J]. *Chem Lett*, 1996(2) :109 - 110
- [10] 杜洪光,王涛,张喆,等. 一羰基二氢三(三苯基膦)合钌催化二茂铁乙烯与取代苯乙酮反应的研究[J]. *北京化工大学学报*, 1999, 26(4) :75 - 78
- [11] Du Hongguang, Liu Qun, Shi Shujian, *et al.* Catalytic addition of ferrocenyl ketones to olefins with the aid of $\text{Ru}(\text{H})_2(\text{CO})(\text{PPh}_3)_3$ [J]. *J of Organometallic Chemistry*, 2001, 627:127 - 131

Synthesis, characterization and crystal structure of 3-(2-ferrocenylethyl)-2-ferrocenoylfuran

DU Hong-guang¹ HAN Ke-fei¹ WANG Tao¹ LI Zheng-he¹ SHI Shu-jian¹
LIU Qun² ZHANG Shi-wei²

(1. College of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Institute of Physical Chemistry, Department of Chemistry, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: 3-(2-ferrocenylethyl)-2-ferrocenoylfuran was synthesized by the catalytic addition reaction of 2-furoylferrocene with vinylferrocene in the presence of $\text{RuH}_2(\text{CO})(\text{PPh}_3)_3$ as catalyst. The detailed ¹H-NMR and MS data and figure of the product were given, and the elemental analysis result was also given. The crystal structure of the product was determined by single crystal X-ray diffraction, belonging to a monoclinic crystal system with space group $\text{P}2_1/\text{C}$, $a = 1.7166(3)$ nm, $b = 0.9462(2)$ nm, $c = 1.4801(3)$ nm, $\beta = 115.44(3)^\circ$ and $Z = 4$.

Key words: ferrocene; $\text{RuH}_2(\text{CO})(\text{PPh}_3)_3$; C—H bond cleavage; catalytic addition; crystal structure

(上接第 45 页)

Analysis of limit loads of a passenger ropeway stand

WANG Yu-hao DING Ke-qin SHEN Zhong-han ZHANG You-chun

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

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

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

Abstract: An effective method, which was used for analyzing the limit loads of a passenger ropeway stand, was discussed. How to use this method was discussed principally. The program flow chart for computing the limit loads of the passenger ropeway stand was given too. In addition, an example was given.

Key words: passenger ropeway; stand; limit loads