

研
究
开
发大风地区铁路接触网结构的
非线性屈曲分析

马佳骏, 曹树森, 邓 斌, 刘晓红

(西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)



作者简介: 马佳骏 (1987-), 男, 硕士研究生, 从事客运专线道岔设计。

摘 要: 以新疆铁路某大风地区接触网为研究对象, 考虑接触网结构材料非线性和几何非线性效应, 探讨了接触网有限元建模问题。利用有限元分析软件ANSYS的非线性分析功能, 以Budiansky-Roth准则为屈曲失稳判据, 对接触网结构进行非线性屈曲分析。对接触网施加横向风载荷后, 计算并提取在结构高度、跨距、吊弦数3个结构参数不同情况下的屈曲风速值, 根据数据结果分析3种结构参数对结构静态稳定性的影响, 并确定了较为合适的结构参数。计算结果表明: 提高接触网支撑结构的刚度可以获得较好的稳定性; 结构高度和跨距对接触网承载能力影响较大, 高度和跨距越小, 静态稳定性越好; 考虑结构刚度和受压变形, 吊弦数取8个最为适宜。

关键词: 大风地区; 接触网结构; 非线性屈曲分析; 静态稳定性; 结构刚度

中图分类号: U225

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2011)02-0025-03

Nonlinear Buckling Analysis of Railway Catenary Systems in Strong Wind Area

MA Jia-jun, CAO Shu-sen, DENG Bin, LIU Xiao-hong

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Based on catenary systems of Xinjiang railway in strong wind area, the effect of kinematic nonlinearity and material nonlinearity of catenary systems was considered, and the finite model of catenary systems was discussed. It analyzed the catenary systems in nonlinear buckling instability by using the nonlinear analysis module of the software package ANSYS and Budiansky-Roth criterion. The buckling wind velocity in different situations of structure height, span, and the number of hanger was calculated and extracted after loading horizontal wind on catenary systems. Then it analyzed the influence of three parameters on static stability of the structure and confirmed the appropriate structural parameters according to the data results. The calculation result showed that it could obtain preferable stability by increasing the stiffness of the catenary support structure. The structure height and span had a great influence on load bearing properties of catenary systems: the smaller height and span were, the better static stability was; and the most appropriate hanger number was 8 considering structural stiffness and compressive deformation.

Key words: strong wind area; catenary systems; nonlinear buckling analysis; static stability; structural stiffness

0 引言

接触网设备沿铁路线露天布置, 工作环境恶劣且无备用, 受风雪等自然灾害影响较大。我国近几年大风引发弓网故障频发, 大风已成为引起电气化铁路接触网故障的重要因素^[1-2]。

目前, 南疆线、兰新线穿越著名的安西、烟墩、百里、三十里风区及达坂城、阿拉山口, 风区总长度500 km以上, 特别是百里、三十里风区内大风频繁、风

力强劲、风力变化剧烈, 最大瞬时风速超过60 m/s。大风破坏铁路设施、吹翻列车等时有发生, 严重影响旅客出行, 给铁路运输造成了重大损失^[3-4]。统计数据显示, 在风载荷作用下的接触网结构的动态失稳是接触网系统经常发生的破坏形式之一。由于南疆、兰新线电气化改造需要, 开展接触网防风技术研究和工程试验工作迫在眉睫。大风对接触网的动力稳定性影响必须做进一步的研究^[5]。

接触网结构作为接触网的主要受力构件, 承受着整个接触网的悬挂重量、工作张力、水平风载及地震荷载。因接触网结构跨距大, 重量重, 结构柔性大, 所

收稿日期: 2010-07-25

基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目(2008J019)

以风载是接触网结构设计中主要的设计荷载,风载的影响对接触网结构的可靠性起着决定性的作用。多年来,随着我国的设计规范不断完善,逐步形成了符合我国国情的设计体系。但因接触网结构受力的特殊性,现国内的规范无系统规定,有时一些参数的取值要参照某类规范,致使计算结果差异很大^[6]。为此,接触网结构设计应根据结构的具体受力特征,准确地进行荷载响应分析,才能确保结构安全合理。

1 有限元模型的建立

本文中涉及的接触网结构由13部分组成:平腕臂,斜腕臂,腕臂支撑,套管抱箍,承力索底座,定位管,定位器,定位器支座,支柱,套瓷,承力索,接触线,吊弦。

由于钢材和铜合金材料的应力应变关系的非线性,以及接触网较为复杂的大跨度结构,需考虑材料非线性和几何非线性^[7]。

1.1 材料非线性

考虑材料的非线性,需引入双线性随动强化弹塑性模型(BKIN)来模拟支撑结构的材料非线性,其应力应变关系为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \varepsilon E_s & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ \sigma &= \sigma_s + E_T(\varepsilon - \varepsilon_s) & \varepsilon > \varepsilon_y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: ε_y 为屈服应变; E_s 为弹性模量; σ_s 为屈服应力; E_T 为屈服点后的切线弹性模量,此处取0。

1.2 几何非线性

2个支柱之间的承力索和接触线为柔性索,在自重和附加负载的作用下,几何形状发生改变,形成一个弛度,导致结构刚度改变,这类问题属于几何非线性问题^[8]。为充分考虑接触线和承力索的几何非线性,在建立接触网结构有限元模型过程时,假设承力索和接触线是理想柔性的。

图1中,悬索的曲线形状可由方程 $z = z(x)$ 代表,因为悬索是理想柔性的,其张力只能沿着索的切线方向作用。设索上某点张力的水平分量为 T ,则竖向分量为 $T(dz/dx)$,由该索截出的水平投影长度为 dx 的任意微分单元及作用其上的内力和外力的静力来平衡:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT}{dx} dx &= 0 \\ \frac{d}{dx} \left(T \frac{dz}{dx} \right) dx + q dx &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

设曲线跨中垂度为 f ,则有

$$\left. \begin{aligned} z &= 0 & x &= 0 \\ z &= \frac{c}{2} + f & x &= \frac{l}{2} \\ z &= c & x &= l \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

可求得索内的水平张力 $T^{[9]}$:

$$T = \frac{ql^2}{8f} \quad (4)$$

悬挂导线的曲线方程的另一形式:

$$z = \frac{4fx(l-x)}{l^2} + \frac{c}{l}x \quad (5)$$

1.3 ANSYS 建模

结合接触网各部件在弓网系统中的作用和实际情况,接触网结构模型以杆件形式建立。由于各杆件要承担不同大小的剪切应力和弯矩,且结构有较强的几何非线性,所以腕臂、承力索和接触线等部分采用beam4单元模拟,其他采用可自定义界面的beam188单元模拟。考虑剪切效应和几何大应变效应,导线采用link10单元模拟。

套管抱箍、底座和支座采用Q235A钢材,腕臂、腕臂支撑和定位管采用20#无缝钢管(Q345),定位器采用铝合金,承力索采用JTMH120(高强度铜镁合金),接触线采用CTSH120(高强度铜锡合金),吊弦采用JTM10(铜镁合金)。各材料的材质参数如表1。

表1 材料属性参数

材料	屈服强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
Q235A	235	210	0.3
Q345	345	208	0.3
铝合金	70	70	0.3
JTMH120	490	105	0.3
CTSH120	358	120	0.3
JTM10	430	100	0.3

接触网结构一共6跨,跨距为40 m,有3个正定位和2个反定位结构,吊弦等间距均匀分布。接触网两端全约束,5个支柱底部约束3个方向自由度,释放承力索与承力索支座交接点的 z 方向旋转自由度。有限元模型如图2。

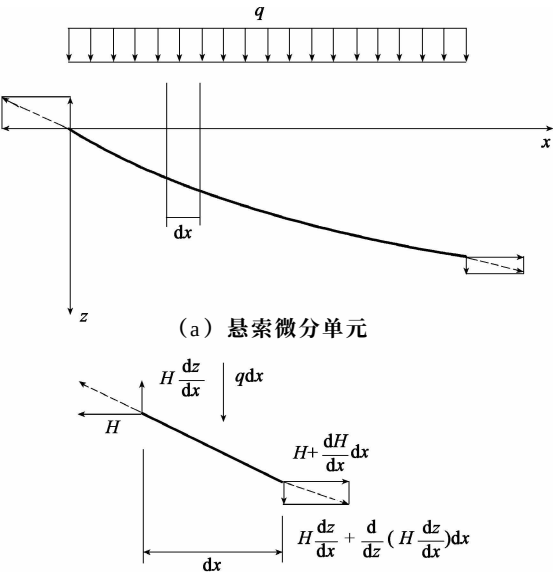


图1 悬索静力分析示意图

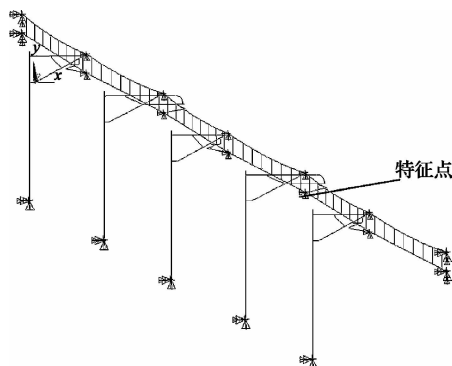


图2 接触网有限元模型

2 接触网结构的非线性屈曲分析

用ANSYS作几何非线性屈曲分析时,需要引入初始缺陷来“激起”非线性分析^[10]。在有限元模型单元上施加一阶模态屈曲变形为初始缺陷和横向风载荷,然后对结构进行非线性屈曲分析。按照B-R准则,如果结构在微小荷载增量下引起剧烈响应变化,则认为结构屈曲,可判断结构已经进入失稳状态^[11]。由于篇幅所限,以结构高度为1 500 mm为例,非线性屈曲分析后提取的特征点(反定位接触点)的风载荷-位移数据如图3所示。

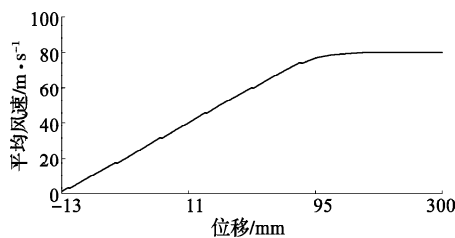


图3 特征点的风载荷-位移曲线

由图3曲线可明显看出,当平均风速达到80 m/s时,荷载-位移曲线出现水平段,根据B-R准则,此时接触网结构已发生失稳。提取此处的位移为 1.25×10^2 m,显然结构此时确实发生失稳。

接触网参数主要指跨距、吊弦布置和导线高度等。这些参数的变化将影响接触网的稳定性。下面从结构高度变化、跨距变化和吊弦数变化3个方面,分析各个结构参数对接触网结构稳定性的影响。

2.1 接触网结构高度变化

结构参数:跨距为40 m,吊弦数为8。

随着结构高度的增大,发生屈曲的风荷载变小,曲线呈下降趋势,没有太大波幅,其曲线变化如图4。由于目前统计的新疆大风地区最大脉动风速为62 m/s,所以结构设计可承受的静态风荷载要高于此数值。从图4中可以看出,结构高度为1 500 mm和1 600 mm时,发生屈曲的风荷载为70 m/s左右,说明此结构高度下接触网系统偏于不安全。

根据结构的非线性屈曲分析结果分析可知,由于接触网结构高度增加,容易发生屈曲,其主要原因是高度值越大,结构的刚度就越小,所以越容易发生屈

曲。实际需求中,可以提高接触网支撑结构的刚性,从而获得良好的稳定性能。

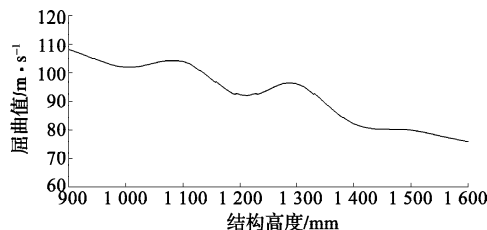


图4 屈曲值与结构高度的关系曲线

2.2 跨距变化

结构参数:结构高度为1 400 mm,吊弦数为8个。

当跨距分别为40、45、50、55和60 m,其发生屈曲的临界

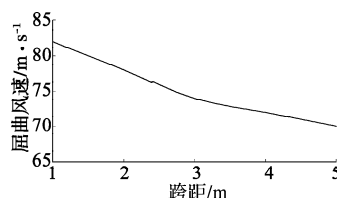


图5 屈曲值与跨距的关系曲线

风速分别为82、78、74、72和70 m/s,其曲线变化如图5。由曲线可看出,随着跨距的变化,结构抗风性能逐渐减弱,原因是跨距越大,结构在风载荷作用下的变形越大,刚度就越小,越容易发生屈曲。另外考虑其经济性,跨距在40~50 m时,可行度比较高。

2.3 吊弦数变化

结构参数:结构高度为1 300 mm,跨距为40 m。

接触网每跨间的吊弦个数为5、8、12和16时,其屈曲风速分别为84、88、88和84 m/s。其曲线变化如图6。吊弦个数在5、8、12和16时,发生屈曲时的风速有所增减,但幅度很小,因此吊弦数对整个接触网结构几何组成刚度影响较小,抗风稳定性增幅较小^[12]。从经济性方面考虑,吊弦数采用8个最为适宜。

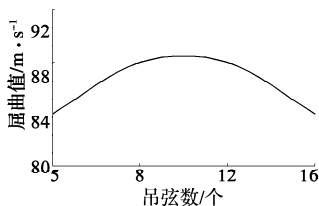


图6 屈曲值与吊弦数的关系曲线

3 结论

本文利用有限元分析软件ANSYS的非线性屈曲分析功能,对我国新疆铁路地区某处的接触网结构进行了非线性屈曲分析,采用Budiansky-Roth准则,对大风地区接触网结构的非线性屈曲失稳进行了分析。得出下面几点结论:

①从本文数据分析看出,接触网支撑结构的刚度对结构的稳定性有很大的影响。提高支撑结构的刚度可以获得良好的稳定性能,减免屈曲破坏。

②结构高度和跨距对接触网承载能力影响较大,高度和跨距越小,静态稳定性能越好。考虑结构刚度和经济性,吊弦数取8个最为适宜。

③通过非线性屈曲分析结果数据,总结出接触网

(下转第52页)

工作环境：检测装置能够在白昼、夜晚条件下，以及接触网带电或不带电状态下正常工作。

3.2 检测项目及检测精度

在刚性接触网^[4]动态检测方面，由于受电弓在刚性接触网上将会承受更大的振动及冲击作用力，硬点检测是该装置的重点检测项目。

装置主要检测接触网和受电弓运行状态关系中的3个重要参数，并对检测数据进行记录和超限故障录像，具备非正常降弓录像和全程录像功能。如表2所示，该装置检测内容及精度满足轨道交通接触网检测要求。

表2 检测项目及精度

检测项目	测量范围	精度
拉出值	$\pm 600\text{ mm}$	$\pm 1\text{ mm}$
硬点和冲击	$0\sim 100\text{ g}$	$\pm 3\%$
导线高度	$3\ 900\sim 5\ 500\text{ mm}$	$\pm 3\text{ mm}$

3.3 检测装置适应性改进

为了方便地铁车辆安装，对检测装置进行了适应性改进。

1) 传感器安装

拉出值和硬点传感器安装在受电弓滑板支架侧面，用其原有螺栓对支架进行固定。传感器的安装对受电弓结构没有任何影响，受电弓的升弓压力、受流性能和空气动力学性能也没有任何改动。

2) 摄像机安装

由于地铁车辆对车顶设备要求非常严格，车顶设备的安装首先必须满足车体的限界要求，其次再考虑设备功能的实现。因此地铁车辆的摄像机被放置在车顶空调侧面，距离受电弓大约10 m位置。该位置摄像机能够清晰监测接触网和受电弓位置关系，其视场范围适应接触网高度4 000~5 500 mm区间的变化。

3) 补光灯安装

由于车辆限界的重要性，补光灯的安装将会与摄

像机安装遭遇同样的难题，车顶补光灯被安放在车顶空调侧面，距离受电弓大约0.5 m位置。该位置安装的补光灯对受电弓进行全面补光，以便在夜间或在隧道内实时动态检测弓和网的状态，提高视频质量和检测装置对环境的适应能力。

4) 列车基础信息获取

机务系统中，列车时速、站点、公里标等信息通过TAX箱获取；在轨道交通车辆中，列车基本信息也通过列车对应的CAN-OPEN接口获取，然后将获取的列车信息与检测数据进行整合、分析和处理。

装置通过以上适应性改进后，适应城市轨道交通车辆和接触网环境，满足检测项目和检测精度要求，并能够运用到城市轨道交通领域进行接触网检测。

4 结语

弓网状态动态检测装置通过实时在线动态检测的方式检测弓和网的相对关系，为接触网检测发挥了应有的效果，对预防弓网事故起到了很好的作用。从该系统的运用效果来看，检测准确率高，检测数据使用时效性高。装置本身也适用于轨道交通领域接触网环境，可以在轨道交通接触网动态检测中推广使用。

参考文献：

- [1] 于万聚. 高速电气化铁路接触网 [M]. 成都：西南交通大学出版社，2003.
- [2] 安孝廉. 我国电气化铁路弓网故障及对策综述 [J]. 机车电传动，1995(6)：7-9.
- [3] GB/T 20908-2007，城市轨道交通接触网检测车通用技术条件 [S].
- [4] 曹秀峰，许晓勤，李 军. 成都地铁1号线车辆受电弓研制 [J]. 城市轨道交通研究，2009(11)：82-85.

(上接第27页)

结构屈曲失稳的规律和特性，为进一步地研究接触网的稳定性和可靠性提供了依据和参考。

参考文献：

- [1] 蔡成标，翟婉明. 高速铁路受电弓-接触网系统动态性能仿真研究 [J]. 铁道学报，1997，19(5)：38-43.
- [2] 于万聚. 高速电气化铁路接触网 [M]. 成都：西南交通大学出版社，2002.
- [3] 今井 俊昭. 急激な風速増加が生じる確率をどの用にして知るか [J]. 時代をリードする鉄道技術の情報誌，2003(8)：10-13.
- [4] 田志军. 电气化铁路接触网防风技术研究 [J]. 建设机械技术与管理，2007(7)：100-103.
- [5] 郭金平，姜汉登，杨学军，等. 电气化铁路接触网的防风改造 [J]. 中国铁路，2001(9)：38-39.

- [6] 刘 怡，张卫华，黄 标. 高速铁路接触网动力学响应实验及仿真 [J]. 中国铁道科学，2005(3)：106-109.
- [7] 冷纪桐，陈 罕. 几何非线性 and 材料非线性 [J]. 北京化工学院学报，1989，16(3)：50-58.
- [8] 王开强，李国强，杨涛春. 考虑悬链线效应的约束钢梁在分布荷载作用下的性能(I)——理论模型 [J]. 土木工程学报，2010，43(1)：1-7.
- [9] 完海鹰，黄炳生. 大跨空间结构 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2000.
- [10] Salvatori L, Borri C. Frequency-and Time-Domain Methods for the Numerical Modeling of Full-Bridge Aero Elasticity [J]. Computers and Structures, 2007, 85：675-687.
- [11] 李支军，李爱群，韩晓林. 润扬大桥悬索桥动力特性分析与实测变异性研究 [J]. 土木工程学报，2010，43(4)：92-98.
- [12] 王述超，张 行，叶志雄，等. 超限高层建筑地震作用下的动力稳定性分析 [J]. 振动与冲击，2009，28(4)：149-172.