

文章编号:1671-1637(2013)04-0056-07

基于 AR 模型的接触网脉动风场与风振响应

李瑞平,周 宁,张卫华,梅桂明

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘 要:基于 AR 模型和接触网结构特性,建立了具有时间和空间相关的接触网脉动风场,由模拟的风速时程获得作用于接触网的风荷载;建立接触网三维有限元模型,研究了其模态、静态风偏和风振响应,并对位移响应进行了频谱分析。分析结果表明:垂向风速相对顺风向风速较小,采用 Davenport 风速谱可建立接触网脉动风场;接触网在 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的横向平均风和自然风作用时,接触线跨中节点横向位移的最大值分别为 109.11 mm 和 312.49 mm,平均风荷载下计算得到的接触线横向位移减小了 186.40%;接触网在横向自然风作用时,接触线横向和垂向振动位移同时产生,接触网第 1 阶垂向和横向振动频率分别为 0.973 Hz 和 1.384 Hz,在这 2 阶频率处产生了接触网结构与风荷载的峰值共振;接触网在 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的自然风作用时,由风荷载引起的应力分别占接触线和承力索总应力的 10.77% 和 27.40%,因此,需采用脉动风荷载进行接触网的风偏和强度设计。

关键词:接触网;AR 模型;脉动风场;风振响应;频谱分析

中图分类号:U225.7

文献标志码:A

Fluctuating wind field and wind-induced vibration response of catenary based on AR model

LI Rui-ping, ZHOU Ning, ZHANG Wei-hua, MEI Gui-ming

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Based on AR model and the structural characteristics of catenary, the fluctuating wind field of catenary related with time and space was established. The fluctuating wind loads acting on the catenary were calculated by the simulated wind speed time series. A three-dimensional finite element model of catenary was established to calculate the modes, static wind deviations and wind-induced vibration responses of catenary, and the spectrums of the displacement responses were analyzed in details. Analysis result indicates that the fluctuating wind field of catenary can be established by using Davenport wind speed spectrum because the vertical wind speed is lower than the along-wind speed. While the lateral average wind and natural wind with the speed of $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ acting on the catenary, the maximum lateral displacements of mid-span node of contact wire are 109.11 mm and 312.49 mm, respectively. The lateral displacement of catenary calculated by the average wind load acting on the catenary decreases by 186.40% compared with the value calculated by the fluctuating wind loads. The lateral displacement of catenary is generated as well as the vertical displacement of catenary under natural wind, the first order vertical and lateral frequencies are 0.973 Hz and 1.384 Hz, respectively, and the wind-induced responses of catenary exhibit peak resonant vibration in the zone of the two frequencies.

收稿日期:2013-02-18

基金项目:国家 973 计划项目(2011CB711105);“十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAG12A01);国家自然科学基金项目(51075341)

作者简介:李瑞平(1983-),男,江苏宜兴人,西南交通大学工学博士研究生,从事弓网系统动力学研究。

导师简介:张卫华(1961-),男,江苏宜兴人,西南交通大学教授,工学博士。

Under natural wind with a speed of $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the stresses of contact wire and support wire caused by the wind loads are about 10.77% and 27.40% of their total stresses, respectively. Therefore, the fluctuating wind loads should be applied to conduct the wind deviation and strength design of catenary. 3 tabs, 11 figs, 15 refs.

Key words: catenary; AR model; fluctuating wind field; wind-induced vibration response; spectrum analysis

Author resumes: LI Rui-ping(1983-), male, doctoral student, +86-28-87634057, ruiping_lee@126.com; ZHANG Wei-hua(1961-), male, professor, PhD, +86-28-87601068, tpl@home.swjtu.edu.cn.

0 引言

弓网受流是高速铁路系统中的关键技术之一,受电弓滑板与接触线在高速滑动过程中实现取流,接触网、受电弓和列车振动均会影响弓网系统的受流质量。接触网架设在铁路沿线,承受环境因素的干扰较大,其中风荷载引起的弓网故障在弓网系统的总故障数中占有较高比例,因此,研究风荷载作用下接触网的动态响应对接触网设计是非常必要的。接触网设计风速分为风偏设计风速和结构设计风速^[1],前者用于校验正常行车时接触网风偏,后者用于校验支持结构强度。自然风实际包含平均风和脉动风2种成分,但是,在接触网传统设计中,最大跨距基本是通过校验静态风偏来确定,忽略了脉动风对跨距设计与弓网受流质量的影响。对于基本自振周期小于0.25 s的工程结构,一般不考虑脉动风的影响^[2],而接触网属于柔性结构,自重较轻,自振频率较低^[3],属风敏感结构,在风荷载作用下易产生较大的变形和振动,且表现出很强的非线性特征,因此,需要分析考虑脉动风作用时的接触网动态响应,从而使接触网设计风速取值更准确。Pombo等采用多体动力学方法研究了弓网系统在横风下的动态响应,认为横风对弓网受流具有较大影响^[4];Scanlon等为解决接触网产生的驰振现象,对比研究了3种方案:在线路旁修建风屏障,改变接触导线的横截面形状与提高接触网的阻尼系数,最终确定了在接触网支柱处安装摩擦阻尼臂的方案,解决了接触网驰振问题^[5-7];曹树森等基于Davenport功率谱,采用谐波合成法模拟了接触网脉动风场,并且通过有限元法计算了反定位点处的风振位移,分析了接触网张力、跨距和高度对抗风稳定性的影响^[8];赵飞等基于Davenport功率谱,采用谐波合成法模拟了接触网脉动风场,分析了接触网风振位移,并且指出随机风场对弓网接触压力影响较大^[9]。上述研究主要采用

谐波合成法建立接触网脉动风场,然后,计算接触网风振位移,缺少对接触网的风振响应进行详细分析。谐波合成法计算量大,所产生的风速时程不能考虑时间相关性,而线性滤波法用于模拟具有随机性、时间和空间相关性的脉动风场,具有高效与高精度的特点^[10]。本文基于AR模型与接触网结构特性,采用Davenport风速谱建立了具有时间和空间相关的接触网脉动风场,由模拟的风速时程计算了作用于接触网的脉动风荷载;其次,建立接触网三维有限元模型,系统地分析了接触网模态、静态风偏、风振位移和风振应力等,并对风振位移进行了频谱分析,从频谱的角度分析了接触网对风荷载敏感的原因,对于接触网的设计具有重要意义。

1 脉动风速时程曲线模拟

自然风包含周期较长的平均风和周期较短的脉动风,平均风周期一般大于结构的自振周期,通常认为平均风荷载对结构产生静力作用;而脉动风周期一般在几秒至几十秒,脉动风荷载的作用性质可视作动荷载。结构上任一点处的自然风速为^[11]

$$V(x, y, z, t) = \bar{V}(z) + v(x, y, z, t) \quad (1)$$

式中: t 为时间; $V(x, y, z, t)$ 为点 (x, y, z) 的自然风速; $\bar{V}(z)$ 为高度 z 处的平均风速; $v(x, y, z, t)$ 为脉动风速。

平均风速沿高度变化的规律可用指数律来表示,平均风速 $\bar{V}(z)$ 与10 m高度处的平均风速 $\bar{V}(10)$ 的指数律关系为

$$\bar{V}(z) = \bar{V}(10) \left(\frac{z}{10} \right)^{\alpha} \quad (2)$$

式中: α 为地表粗糙度。

采用AR模型模拟脉动风速时程时, M 个点空间相关脉动风速时程 $v(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, t)$ 列向量可表述为^[12]

$$v(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, t) = - \sum_{k=1}^p \boldsymbol{\varphi}_k v(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, t - k\Delta t) + \mathbf{N}(t) \quad (3)$$

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_M)^T$$

$$\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_M)^T$$

$$\mathbf{Z} = (z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_M)^T$$

式中: (x_i, y_i, z_i) 为空间点 i 的坐标; p 为 AR 模型最大阶数; Δt 为模拟风速时程的时间步长; $\boldsymbol{\varphi}_k$ 为 k 阶 AR 模型自回归系数矩阵, 为 $M \times M$ 阶方阵; $\mathbf{N}(t)$ 为独立随机过程向量。

由式(3)可知, 求解脉动风速时程 $v(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, t)$ 需先求得自回归系数矩阵 $\boldsymbol{\varphi}_k$ 和独立随机过程向量 $\mathbf{N}(t)$, 可根据相关函数与随机振动理论进行相应求解^[12-13]。

最后, 将式(3)按时间步长 Δt 离散化, 并且假定初始时刻之前的风速为 0, 即 $t < 0$ 时, $v(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, t)$ 为 0, 其递推矩阵表达式为

$$\begin{bmatrix} v_1(j\Delta t) \\ v_2(j\Delta t) \\ \vdots \\ v_M(j\Delta t) \end{bmatrix} = - \sum_{k=1}^p \boldsymbol{\varphi}_k \begin{bmatrix} v_1[(j-k)\Delta t] \\ v_2[(j-k)\Delta t] \\ \vdots \\ v_M[(j-k)\Delta t] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1(j\Delta t) \\ N_2(j\Delta t) \\ \vdots \\ N_M(j\Delta t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $v_1(j\Delta t)$ 、 $v_2(j\Delta t)$ 、 \dots 、 $v_M(j\Delta t)$ 为第 j 时间步 M 个模拟点处的脉动风速时程, $j=0, 1, 2, \dots, n$, n 为模拟风速的最大时间步; $N_1(j\Delta t)$ 、 $N_2(j\Delta t)$ 、 \dots 、 $N_M(j\Delta t)$ 为 M 个独立随机过程向量。

由式(4)可求得 M 个时间间隔为 Δt , 且具有时间、空间相关的离散脉动风速时程。

2 接触网脉动风场模拟

建立 10 跨为一锚段的接触网模型, 跨距为 50 m, 沿接触线布置方向, 相距 25 m 取模拟风速点, 见图 1。脉动风实际上是三维的湍流风, 包括顺风向、横风向和垂直向的湍流, 顺向谱主要有与高度无关的 Davenport 谱、与高度相关的 Simiu 谱和 Kaimal 谱等, 横向谱有 Vickery 谱和 Solari 谱等, 竖向谱有 Panosfky 谱等, 当顺风向的平均风速确定后, 根据风速谱便可获得 3 个方向的脉动风速时程。

从接触网抗风设计和受流性能考虑, 其受风荷载影响主要为顺风向(x 向)和垂直向(z 向), 见图 1, 因此, 接触网脉动风场可根据其结构特点和不同方向湍流风速进行合理简化。此外, 接触网

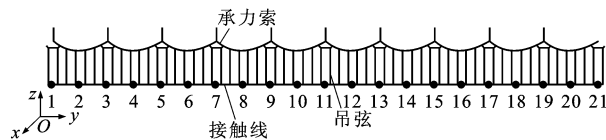


图 1 接触网风场模拟点

Fig. 1 Simulation points of catenary wind field

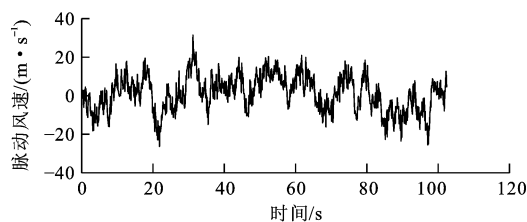
结构高度约为 1.5 m, 由于接触网高度变化引起的风速差异较小, 所以顺向谱可采用与高度无关的 Davenport 谱, 竖向谱可采用 Panosfky 谱。舒新玲等指出 4 阶 AR 模型能足够精确地模拟脉动风速时程^[13], 因此, 模拟风速时程的计算参数, 见表 1。

表 1 风速计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of wind speed

平均风速模型	指数律	计算时间/s	102.4
地面粗糙度系数	0.16	x 向衰减系数	16
模拟点高度/m	5.3	y 向衰减系数	16
AR 模型阶数	4	z 向衰减系数	10
时间步长/s	0.1	模拟点数	21

根据上述风速时程计算方法和参数, 采用 MATLAB 编制了计算程序, 图 2(a) 给出了平均风速为 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 点 10 处的顺风向脉动风速时程, 模拟点处的风速在不同时刻的差异非常大, 这种脉动性将对接触网产生动力作用。为验证模拟得到的脉动风速时程的准确性, 将脉动风速时程变换到频域中, 在双对数坐标系中与目标谱进行比较, 发现模拟谱和目标谱比较一致, 见图 2(b), 因此, 采用 AR 模型模拟得到风速时程是可靠的。



(a) 脉动风速时程

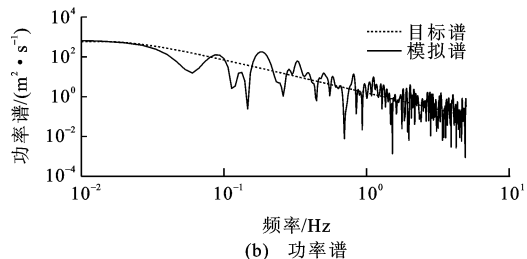


图 2 点 10 脉动风速时程与功率谱

Fig. 2 Wind speed time series and power spectrums at point 10

图 3 和图 4 分别是平均风速为 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 点 15 和点 20 处的顺风向与垂直向的脉动风速时

程。可见,顺风向相同时刻不同点的脉动风速差异较大;垂直向的脉动风速非常小,而且接触网所用线材的截面积为 150 mm^2 左右,从而在模拟接触网脉动风场时,可不计垂向脉动风荷载对接触网的影响。

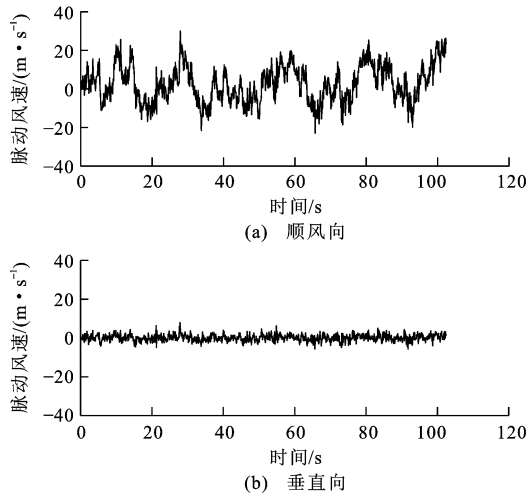


图3 点15脉动风速时程

Fig. 3 Wind speed time series at point 15

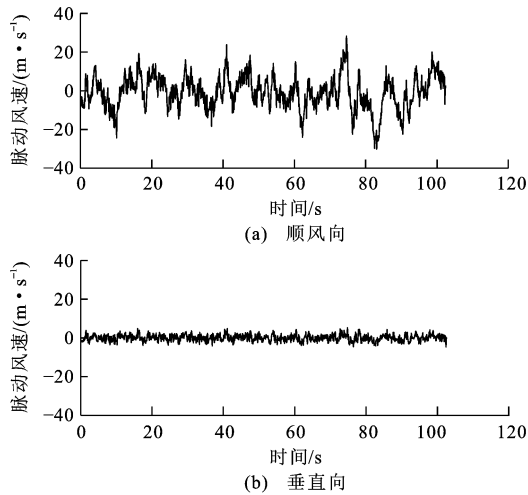


图4 点20脉动风速时程

Fig. 4 Wind speed time series at point 20

3 接触网模态与风振响应分析

3.1 接触网模态

本文建立包括承力索、辅助线、接触线和吊弦4个部件的接触网模型,采用有限元法对结构进行离散。其中,承力索、辅助线和接触线采用梁单元进行模拟,吊弦采用弹簧质量单元模拟,该模型在弓网耦合动力学仿真中得到了验证和应用^[14]。接触网材料和结构参数分别见表2、3。

由于接触网的振动特性决定其对风荷载的响应情况,因此,很有必要对接触网进行模态计算,其前

表2 接触网材料参数

Tab. 2 Material parameters of catenary

名称	材料名称	弹性模量/ GPa	线密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	张力/ kN	截面面积/ mm^2
承力索	JTMH-120	103	1.070	21	120
接触线	CTMH-150	130	1.385	30	150

表3 接触网结构参数

Tab. 3 Structure parameters of catenary

跨数	拉出值/ m	接触网 总长/m	接触网 高度/m	单跨吊 弦数	单跨吊弦间距/m
10	0.3	500	1.6	6	4.0/8.4/8.4/8.4/ 8.4/8.4/4.0

10阶模态振型和固有频率,见图5。由图5可见,接触网的频率呈密集型分布,第1~7阶振型为垂向振动,第8、10阶振型为横向振动,第9阶振型为横向和垂向的耦合振动,由此可知,接触网的振动复杂,垂向和横向振动交替出现,部分振型出现横向和垂向的耦合振动。

3.2 接触网风振位移

根据模拟的风速时程与接触线和承力索截面尺寸,计算了作用于接触线和承力索的风荷载,其中,基本风压和线索的风荷载体型系数采用《铁路电力牵引供电设计规范》(TB 10009—2005)规定值,则有

$$q = \frac{1}{1.6} \mu V^2(x, y, z, t) d \quad (5)$$

式中: q 为线索单位长度风荷载($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$); μ 为线索体型系数; d 为线索截面高度(m)。

图6给出了 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 自然风和平均风分别作用于接触网时,计算得到的第5跨跨中节点的接触线横向位移时程。可见,自然风作用时接触线横向位移波动性较大, $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 自然风作用时,横向位移的最大值达到 312.49 mm ,而平均风作用时的横向位移为 109.11 mm 。由计算结果可知,根据平均风荷载计算得到的接触线横向位移相对较小,而自然风包含平均风和脉动风2种成分,因此,需考虑脉动风荷载校核接触网设计风速。图7给出了 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 自然风分别作用于接触网时,第5跨跨中节点接触线的垂向位移时程,其最大值分别为 23.10 mm 和 59.43 mm 。接触线垂向振动位移主要是由于接触线和承力索的张力和横截面有一定差异,虽然接触网只受到横向风荷载的作用,但是,接触线和承力索产生的横向位移不一致,从而引起了吊弦力的改变,最终使得接触线产生了垂向振动。接触线产生横向位移容易引发刮弓

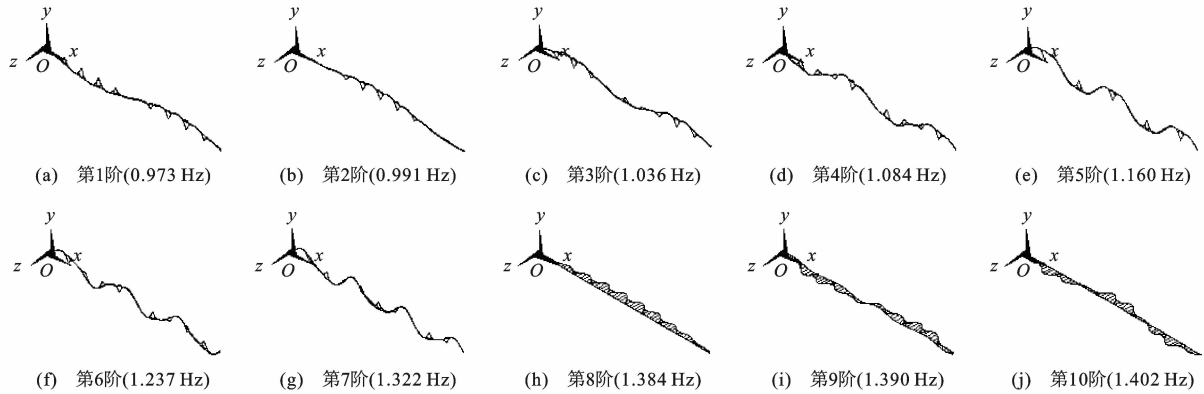


图5 接触网模态

Fig. 5 Modes of catenary

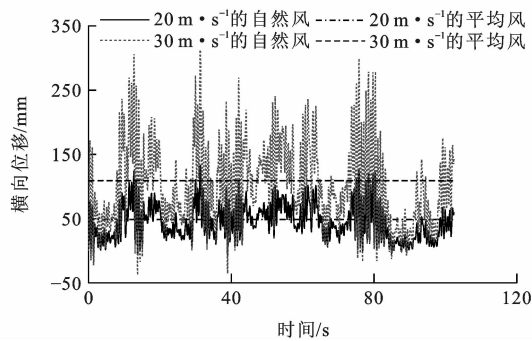


图6 接触线横向位移

Fig. 6 Lateral displacements of contact wire

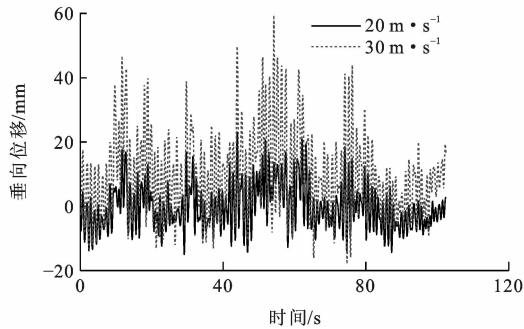


图7 接触线垂向位移

Fig. 7 Vertical displacements of contact wire

事故,而垂向位移波动将直接影响受电弓和接触线的良好接触,从而影响弓网受流质量。

图8、9给出了 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 自然风作用时,第5跨接触线跨中节点的横向和垂向位移频谱,可见,接触线横向和垂向位移主要发生在2个区域,即自然风的卓越频率区与接触网横向和垂向振动的低频区。由接触网模态分析可知,第1阶垂向振动频率和横向振动频率分别为 0.973 Hz 和 1.384 Hz ,贡献较大,因此,接触网在横向自然风作用时,横向和垂向振动同时存在,既有受迫振动又有明显的峰值共振。

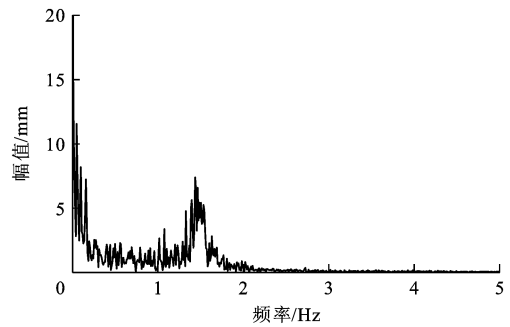


图8 接触线横向位移频谱

Fig. 8 Lateral displacement spectrum of contact wire

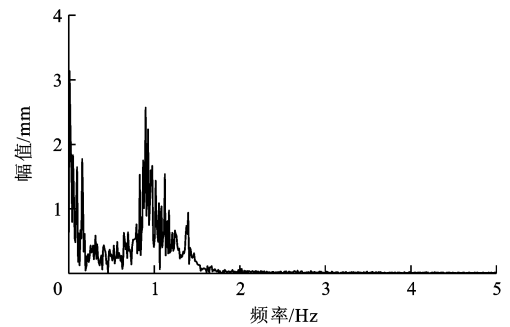


图9 接触线垂向位移频谱

Fig. 9 Vertical displacement spectrum of contact wire

3.3 接触网风振应力

为满足列车高速运行需求,通常采用增大接触网张力以提高其波动传播速度,但同时也加大了接触线和承力索的应力,对接触网的安全性和可靠性造成不利影响。接触网普遍采用全补偿链形悬挂,在外载荷作用下一般认为接触线和承力索的轴向应力不随时间变化,而由弓网接触压力引起的弯曲应力变化较明显^[15]。接触网在风荷载作用时,同样使得接触线和承力索产生较大的弯曲应力,文中称为风振应力。由接触网风振位移的计算结果可知,风荷载作用下接触线和承力索将产生横向和垂向位移,因此,其总应力可表示为

$$\sigma_1 = \sigma_2 + \sigma_3 \quad (6)$$

式中: σ_1 为横截面上总的正应力; σ_2 为张力引起的轴向应力,称为静应力; σ_3 为弯矩引起的最大正应力,由风荷载引起,称为风振应力。

由接触网参数可知,接触线和承力索的静应力分别为200 MPa和175 MPa,图10、11分别为自然风作用时接触线和承力索的总应力时程。可见,风荷载引起的风振应力十分显著,风速为 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,接触线和承力索的总应力最大值分别为224.13 MPa和241.05 MPa,风振应力最大值分别占总应力的10.77%和27.40%,因此,相比弓网接触压力引起的接触网动应力而言,风振应力更显著。此外,风振应力在时间历程上波动性较大,所以,在接触网设计时,风荷载引起的接触网零部件强度和风振疲劳问题应给予足够的重视。

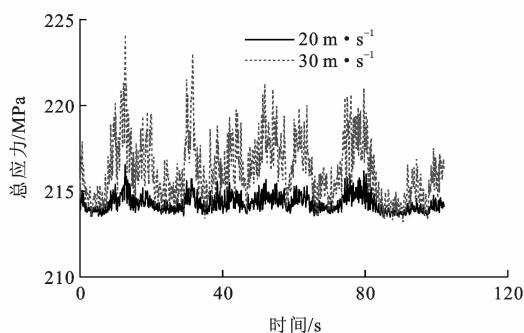


图10 接触线总应力

Fig. 10 Total stresses of contact wire

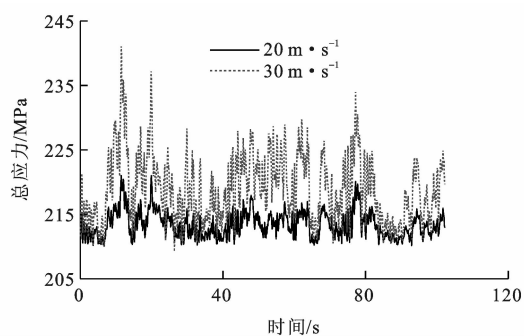


图11 承力索总应力

Fig. 11 Total stresses of support wire

综上所述,接触网在脉动风作用下产生了较大的风振位移和风振应力,有效控制风荷载引起的接触网位移和应力对列车运行安全性十分重要。相关研究表明^[5-8],在铁路沿线修建风屏障,减小接触网跨距与增加接触网导线的张力,均可减小接触网风振位移,但文中计算表明增加导线张力的同时也提高了导线的应力水平,因此,需要在综合考虑接触网导线位移和应力前提下,对接触网进行抗风设计。

4 结 语

(1)基于AR模型可建立时空相关的接触网脉动风场;相比顺风向风荷载,接触网垂向风荷载可不予考虑,并且接触网高度较低,脉动风速在接触网高度方向差异性较小,可采用与高度无关的Davenport风速谱建立接触网脉动风场,。

(2)接触网在 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的横向平均风和自然风作用时,接触线跨中节点横向位移的最大值分别达到109.11 mm和312.49 mm,因此,由平均风荷载计算得到的接触线横向位移相对较小,需考虑脉动风荷载校核接触网设计风速。

(3)接触网在横向自然风作用时,同时产生横向和垂向位移。接触网第1阶垂向和横向振动频率分别是0.973 Hz和1.384 Hz,这2阶频率成分在风振位移频谱中占有较大比重,接触网在自然风作用下既有受迫振动又有明显的峰值共振。

(4)接触网在 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的自然风作用时,接触线和承力索的总应力最大值分别为224.13 MPa和241.05 MPa,风振应力最大值分别占总应力的10.77%和27.40%,接触网设计时,应充分考虑风荷载引起的接触网零部件强度和风振疲劳问题。

参考文献:

References:

- [1] TB 10009—2005, 铁路电力牵引供电设计规范[S].
TB 10009—2005, design code of railway electric traction feeding[S]. (in Chinese)
- [2] GB 50009—2001, 建筑结构荷载规范[S].
GB 50009—2001, load code for the design of building structures[S]. (in Chinese)
- [3] 李瑞平,周宁,梅桂明,等. 初始平衡状态的接触网有限元模型[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(5): 732-737.
LI Rui-ping, ZHOU Ning, MEI Gui-ming, et al. Finite element model for catenary in initial equilibrium state[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(5): 732-737. (in Chinese)
- [4] POMBO J, AMBRÓSIO J, PEREIRA M, et al. Influence of the aerodynamic forces on the pantograph-catenary system for high-speed trains[J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(11): 1327-1347.
- [5] SCANLON T J, STICKLAND M T, OLDROYD A B. An investigation into the attenuation of wind speed by the use of windbreaks in the vicinity of overhead wires[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2000, 214(3): 173-182.
- [6] STICKLAND M T, SCANLON T J. An investigation into the aerodynamic characteristics of catenary contact wires in a

- cross-wind[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2001, 215(4): 311-318.
- [7] STICKLAND M T, SCANLON T J, CRAIGHEAD I A, et al. An investigation into the mechanical damping characteristics of catenary contact wires and their effect on aerodynamic galloping instability[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2003, 217(2): 63-71.
- [8] 曹树森,柯 坚,邓 斌,等.强风地区接触网动力稳定性分析[J]. 中国铁道科学,2010,31(4):79-84.
CAO Shu-sen, KE Jian, DENG Bin, et al. The dynamic stability analysis of the catenary systems in strong wind area[J]. China Railway Science, 2010, 31(4): 79-84. (in Chinese)
- [9] 赵 飞,刘志刚,韩志伟.随机风场对弓网系统动态性能影响研究[J]. 铁道学报,2012,34(10):36-42.
ZHAO Fei, LIU Zhi-gang, HAN Zhi-wei. Simulation study on influence of stochastic wind field to dynamic behavior of pantograph-catenary system[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(10): 36-42. (in Chinese)
- [10] 张希黔,葛 勇,严春风,等.脉动风场模拟技术的研究与进展[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(6):206-212.
ZHANG Xi-qian, GE Yong, YAN Chun-feng, et al. Advances in research of simulation technology of fluctuation wind loading[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(6): 206-212. (in Chinese)
- [11] 王之宏.风荷载的模拟研究[J]. 建筑结构学报,1994,15(1): 44-52.
WANG Zhi-hong. Simulation of wind loading[J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(1): 44-52. (in Chinese)
- [12] 胡雪莲,李正良,晏致涛.大跨度桥梁结构风荷载模拟研究[J]. 重庆建筑大学学报,2005,27(3):63-67.
HU Xue-lian, LI Zheng-liang, YAN Zhi-tao. Simulation of wind loading for large-span bridge structures[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2005, 27(3): 63-67. (in Chinese)
- [13] 舒新玲,周 岱.风速时程 AR 模型及其快速实现[J]. 空间结构, 2003,9(4):27-32,46.
SHU Xin-ling, ZHOU Dai. AR model of wind speed time series and its rapid implementation[J]. Spatial Structures, 2003, 9(4): 27-32, 46. (in Chinese)
- [14] 周 宁,张卫华.基于直接积分法的弓网耦合系统动态性能仿真分析[J]. 中国铁道科学,2008,29(6):71-76.
ZHOU Ning, ZHANG Wei-hua. Dynamical performance simulation of the pantograph-catenary coupled system based on direct integration method[J]. China Railway Science, 2008, 29(6): 71-76. (in Chinese)
- [15] 刘 怡,张卫华,梅桂明.受电弓/接触网垂向耦合运动中接触网动应力研究[J]. 铁道学报,2003,25(4):23-26.
LIU Yi, ZHANG Wei-hua, MEI Gui-ming. Study of dynamic stress of the catenary in the pantograph/catenary vertical coupling movement[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(4): 23-26. (in Chinese)
-
- (上接第 55 页)
- ZHAO Na, CAO Deng-qing. Nonlinear dynamical model with fault parameters for railway vehicles[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(6): 122-125, 199. (in Chinese)
- [4] LI P, GOODALL R, KADIRKAMANATHAN V. Estimation of parameters in a linear state space model using a Rao-Blackwellised particle filter[J]. IEE Proceedings—Control Theory and Application, 2004, 151(6): 727-738.
- [5] LI P, GOODALL R, WESTON P, et al. Estimation of railway vehicle suspension parameters for condition monitoring[J]. Control Engineering Practice, 2006, 15(1): 43-55.
- [6] KADIRKAMANATHAN V, LI P, JAWARD M H, et al. Particle filtering-based fault detection in nonlinear stochastic systems[J]. International Journal of Systems Science, 2002, 33(4): 259-265.
- [7] HAYASHI Y, TSUNASHIMA H, MARUMO Y. Fault detection of railway vehicle suspension systems using multiple-model approach[J]. Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, 2008, 1(1): 88-99.
- [8] MEI T X, DING X J. A model-less technique for the fault detection of rail vehicle suspensions[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(S): 277-287.
- [9] BRUNI S, GOODALL R, MEI T X, et al. Control and monitoring for railway vehicle dynamics[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(7/8): 743-779.
- [10] NEWLAND D E. Harmonic wavelet analysis[J]. Proceedings: Mathematical and Physical Sciences, 1993, 443(10): 203-225.
- [11] YAN R Q, GAO R X. An efficient approach to machine health diagnosis based on harmonic wavelet packet transform[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2005, 21(4/5): 291-301.
- [12] 丁建明,林建辉,任 愈,等.基于谐波小波能量熵的轴承故障实时诊断[J]. 机械强度,2011,33(4):483-487.
DING Jian-ming, LIN Jian-hui, REN Yu, et al. Real-time diagnosis of bearing faults based on harmonic wavelet energy entropy[J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(4): 483-487. (in Chinese)
- [13] 陈 果.一种改进的谐波小波及其在转子故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报,2011,47(1):8-16.
CHEN Guo. An improved harmonic wavelet and its application to rotor faults diagnosis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1): 8-16. (in Chinese)
- [14] 翟婉明.车辆-轨道垂向系统的统一模型及其耦合动力学原理[J]. 铁道学报,1992,14(3):10-21.
ZHAI Wan-ming. The vertical model of vehicle-track system and its coupling dynamics[J]. Journal of the China Railway Society, 1992, 14(3): 10-21. (in Chinese)