

随机风速下高速列车的运行安全可靠¹⁾

于梦阁²⁾ 张继业 张卫华

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031)

摘要 基于可靠性理论提出了随机风速作用下高速列车风致安全分析的新方法, 这种方法可以对随机风速作用下高速列车的运行安全可靠进行有效评估. 首先基于 Cooper 理论和谐波叠加法计算随车移动点的脉动风速, 建立随机风速作用下高速列车非定常气动载荷的计算方法, 并通过数值仿真得到气动载荷系数的标准差随侧偏角的变化规律. 然后建立高速列车车辆系统动力学模型, 并对计算模型的正确性进行验证. 最后以随机风速、侧力系数、升力系数、侧滚力矩系数、摇头力矩系数和点头力矩系数为基本随机变量, 研究随机风速作用下高速列车的运行安全可靠性和可靠性灵敏度, 给出随机风速作用下高速列车的概率特征风速曲线. 研究表明: 随着车速和风速的增大, 系统的失效概率增大; 通过可靠性灵敏度分析发现侧力系数和侧滚力矩系数对高速列车的运行安全影响最大, 应该特别注意这两个参数的变化对高速列车运行安全性的影响; 传统确定性方法得到的高速列车的安全域曲线偏于保守, 基于可靠性的方法可得到更合理的安全域曲线.

关键词 随机风速, 可靠性, 失效概率, 灵敏度, 概率特征风速曲线

中图分类号: U270.1 文献标识码: A DOI: 10.6052/0459-1879-12-324

引言

随着世界高速铁路的发展及列车运行速度的日益提高, 作用于列车上的气动力和气动力矩不断增大, 使列车处于“漂浮”状态. 强横风作用下列车的气动性能急剧恶化, 列车受到的升力和横向力迅速增加, 列车脱轨或倾覆的可能性增大, 严重威胁着人民的生命财产安全. 近年来, 因横风导致的行车安全事故在各国时有发生, 横风对列车运行安全的影响不可忽略. 近年来, 各国学者已经开展了多项科研工作, 其目的是研究横风对列车运行状态的影响并提出应对策略^[1-4]. 目前在高速列车风致安全方面所做的工作主要是基于确定性的方法, 即车辆的空气动力学参数、系统动力学参数和环境参数(如自然风)都是确定不变的^[5-7]. 文献[8-9]在列车空气动力学和车辆系统动力学相结合的基础上研究了横向均匀风对高速列车运行安全性的影响, 发现轮重减载率在几个安全指标中最容易超标, 并以轮重减载率为安全指标给出了侧风下高速列车的运行安全域. 采用这种确定性的理想计算模型来描述真实的列车系统是有问题的. 首先, 自然风是个随机过程, 不能

采用确定性的方法建模. 其次, 系统的一些参数, 如气动力系数难以通过试验或仿真准确给出, 需要考虑其不确定性. 传统的确定性分析方法计算得到的列车运行安全域只能给出列车运行安全与危险的分界线, 不能对不同风速下列车运行的风险进行有效评估. 文献[10-11]建立了阵风环境下车辆运行可靠性的分析方法, 给出了不同风速下的失效概率. 在文献[10-11]中, 气动力系数的标准差在各侧偏角下均假定为其均值的固定倍数, 这一假定与实际并不相符, 且理想阵风是对自然风的一种抽象形式, 只考虑自然风速的最大幅值和持续时间, 无法考虑实际自然风的脉动特性. 实际观测纪录表明, 风速总是围绕一稳定值波动, 其稳定值即平均风速, 而绕平均值波动的部分即脉动风速. 脉动风速具有随机性, 它对结构的作用是一种随机载荷. 鉴于以上分析, 在进行高速列车的风致安全分析时, 为得到更符合实际情况的计算结果, 需要考虑风速的随机性, 建立随机风速作用下高速列车非定常气动载荷的计算方法, 并基于可靠性理论, 研究随机风速作用下高速列车的运行安全可靠性及可靠性灵敏度. 目前国内外在此方面尚无相关工作发表.

2012-11-16 收到第 1 稿, 2013-02-26 收到修改稿.

1) 2013 年西南交通大学博士研究生创新基金和中央高校基本科研业务费专项资金、“十一五”国家科技支撑计划(2009 BAG12A01-C09)和高速铁路基础研究联合基金(U1234208)资助项目.

2) 于梦阁, 博士研究生, 主要研究方向: 高速列车侧风安全及可靠性分析. E-mail: yumengge0627@163.com

本文选取随机风速和气动载荷系数为基本随机变量,基于可靠性理论研究随机风速作用下高速列车的运行安全可靠性及可靠性灵敏度.论文的结构安排如下:第1部分在传统确定性方法的基础上,通过考虑系统参数的随机性建立随机风环境下高速列车的运行安全可靠分析模型;第2部分建立高速列车空气动力学模型,给出随机风速作用下高速列车非定常气动载荷的计算方法以及气动载荷系数的均值和标准差的计算方法;第3部分建立高速列车多体系统动力学模型,并验证空气动力学模型和车辆系统动力学模型的正确性;第4部分建立随机可靠性及可靠性灵敏度的计算方法;第5部分利用本文建立的计算模型分析不同车速不同随机风速下高速列车的运行安全可靠性及可靠性灵敏度,给出随机风环境下高速列车的概率特征风速曲线.

1 横风下高速列车的运行安全可靠模型

1.1 基于可靠性的高速列车横风安全分析

在传统的高速列车横风安全性分析方法中,所有的参数都假定为固定值,此时高速列车的横风安全性只受车速 v 和风速 w (风速假定为定常风)的影响,高速列车横风安全分析的最终输出是特征风速曲线(CWC),即高速列车以不同车速安全运行时所能承受的最大风速,特征风速曲线可表示为

$$w = CWC(v) \quad (1)$$

在实际情形中,系统参数往往具有不确定性.此时,无法确定系统在给定的条件下是否是安全的,只能估计系统失效的概率 p_F .文中将不确定性参数建模为随机变量,并用 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 表示,从而对于固定的车速 v 和平均风速 \bar{w} (自然风速可由平均风速 \bar{w} 和脉动风速 w' 组成,脉动风速具有随机性,可考虑为随机变量,而平均风速为固定值),高速列车的脱轨或倾覆是以一定的概率 p_F 发生的,即有

$$p_F = p_F(\mathbf{X}; \bar{w}, v) \quad (2)$$

在基于可靠性的分析方法中,车速 v 和平均风速 \bar{w} 是确定性参数.从而,随机变量 \mathbf{X} 影响下的高速列车脱轨或倾覆的概率是关于车速 v 和平均风速 \bar{w} 的函数,即当给定随机变量 \mathbf{X} 时,式(2)可表示为

$$p_F = p_F(v, \bar{w}) \quad (3)$$

这种关系可以调整为

$$\bar{w} = \bar{w}(p_F, v) \quad (4)$$

式(4)给出了在给定失效概率和车速的前提下,高速列车所能承受的最大平均风速.式(4)可以看成传统的特征风速曲线的推广,本文将其定义为概率特征风速曲线(PCWC),即有

$$\bar{w} = PCWC(p_F, v) \quad (5)$$

式(5)即为在基于可靠性的分析方法中,高速列车横风安全分析的最终输出.

1.2 失效概率的计算

可靠性分析的关键是对系统的失效概率进行量化,为实现这一目的,称随机函数 $g \equiv g(\mathbf{X})$ 为系统的功能函数.规定 $g(\mathbf{X}) > 0$ 表示系统处于安全状态, $g(\mathbf{X}) = 0$ 表示系统处于极限状态, $g(\mathbf{X}) < 0$ 表示系统处于失效状态.失效概率可以定义为

$$p_F = P\{g(\mathbf{X}) \leq 0\} = \int_{g(\mathbf{X}) \leq 0} f_g(\mathbf{X}) d\mathbf{g} \quad (6)$$

在高速列车横风安全分析中,轮重减载率是最容易超标的指标^[8-9],功能函数与车轮的轮重减载率相关,轮重减载率是随机变量 \mathbf{X} 、车速 v 和平均风速 \bar{w} 的函数,即有 $Q = Q(\mathbf{X}; v, \bar{w})$.功能函数 $g(\mathbf{X})$ 与车轮的轮重减载率 Q 并不完全相同,假设轮重减载率的限值为 Q_L ,则功能函数可表示为^[11]

$$g \equiv g(\mathbf{X}; Q_L, v, \bar{w}) = Q_L - Q(\mathbf{X}; v, \bar{w}) \quad (7)$$

在传统的高速列车横风安全分析方法中, Q_L 的一个广泛使用的值是0.8,对应的安全余量是20%.在本文中, Q_L 取1,对应于传统可靠性分析方法中高速列车安全运行的极限状态.

2 随机风速下高速列车的空气动力学计算

2.1 移动点的随机风速

风速观测记录表明自然界的瞬时风速包含两种成分:周期在10 min以上的平均风和周期在几秒的脉动风.任一点处的随机风速值 w 可以表示为

$$w = \bar{w} + w' \quad (8)$$

脉动风速具有随机特性,常采用功率谱密度进行描述,大气边界层中固定点处的脉动风速可以采用冯·卡门谱描述,其表达式为

$$\frac{nS_w}{\sigma_w^2} = \frac{4nL_w^x/\bar{w}}{[1 + 70.8(nL_w^x/\bar{w})^2]^{5/6}} \quad (9)$$

式中, nS_w/σ_w^2 表示脉动风速的无量纲功率谱密度; n 表示频率; S_w 表示脉动风速的功率谱密度; σ_w 表示脉动风速的标准差, $\sigma_w = I_z \bar{w}$; I_z 表示湍流强度; L_w^x 表示纵向湍流积分尺度。

高速列车以车速 v 在随机风场中运行, 为计算作用于高速列车上的非定常气动载荷, 需采用相对于列车静止的点的风速, 即需要研究以速度 v 运动的移动点的随机风速, 此时冯·卡门谱不再适用, 需对冯·卡门谱进行修正以获得移动点的随机风速的功率谱密度。Cooper^[12] 基于冯·卡门谱推导了横风环境下随车移动点的脉动风速的功率谱密度的表达式

$$\frac{nS_w}{\sigma_w^2} = \frac{4nL'/\bar{u}}{\left[1 + 70.8(nL'/\bar{u})^2\right]^{5/6}} \cdot \left\{ \left(\frac{\bar{w}}{\bar{u}}\right)^2 + \left[1 - \left(\frac{\bar{w}}{\bar{u}}\right)^2\right] \frac{0.5 + 94.4(nL'/\bar{u})^2}{1 + 70.8(nL'/\bar{u})^2} \right\} \quad (10)$$

其中

$$L' = L_w^x \left\{ \left(\frac{\bar{w}}{\bar{u}}\right)^2 + 4(L_w^y/L_w^x)^2 \left[1 - \left(\frac{\bar{w}}{\bar{u}}\right)^2\right] \right\}^{1/2} \quad (11)$$

式中, \bar{u} 表示平均合成风速, $\bar{u} = \sqrt{v^2 + \bar{w}^2}$; L_w^y 表示横向湍流积分尺度。

湍流强度不仅与离地高度有关, 还与地表粗糙长度有关, 可以通过下式计算^[10]

$$I_z = \frac{1}{\ln(z/z_0)} \left\{ 1 - \frac{5}{10^5} [\lg(20z_0) + 2]^7 \right\} \quad (12)$$

其中 z_0 表示地表粗糙长度。

纵向湍流积分尺度和横向湍流积分尺度可以分别通过下式计算^[13]

$$L_w^x = 50 \times z^{0.35}/z_0^{0.063}, \quad L_w^y = 0.42L_w^x \quad (13)$$

通过数值计算可得到不同离散频率 n_j 下的功率谱密度值, 脉动风速 w' 可通过谐波叠加法得到, 计算公式如下

$$w' = \sum_j (2S_w(n_j)\Delta n_j)^{1/2} \sin(2\pi n_j t + 2\pi r_j) \quad (14)$$

式中, t 为时间, n_j 为离散频率, Δn_j 为频率步长, r_j 为 0~1 之间服从均匀分布的随机数。

2.2 非定常气动载荷的计算方法

准定常假设为, 非定常气动力 F (包括平均值 \bar{F} 和脉动值 F') 与大气来流具有很强的相关性, 作用

于列车上的气动力特性与来流变化特性相一致, 即有^[14-15]

$$F = \bar{F} + F' = 0.5\rho A (\bar{u} + u')^2 C_F(\beta) \quad (15)$$

式中, u' 为合成风速的脉动值, ρ 为空气密度, A 为参考面积, C_F 为气动力系数, β 为侧偏角。

当列车运动时, 侧偏角 β 是始终随时间变化的, 如图 1 所示。此时, 根据泰勒展开, 气动力系数 $C_F(\beta)$ 可以表示为

$$C_F(\beta) = C_F(\bar{\beta}) + C'_F(\bar{\beta})(\beta - \bar{\beta}) \quad (16)$$

式中, $C_F(\bar{\beta})$ 表示 $C_F(\beta)$ 在侧偏角的均值 $\bar{\beta}$ 处的取值, 简记为 \bar{C}_F ; $C'_F(\bar{\beta})$ 表示 $C_F(\beta)$ 的导函数在侧偏角的均值 $\bar{\beta}$ 处的取值, 简记为 \bar{C}'_F ; $\beta - \bar{\beta}$ 表示侧偏角的脉动量, 简记为 β' 。

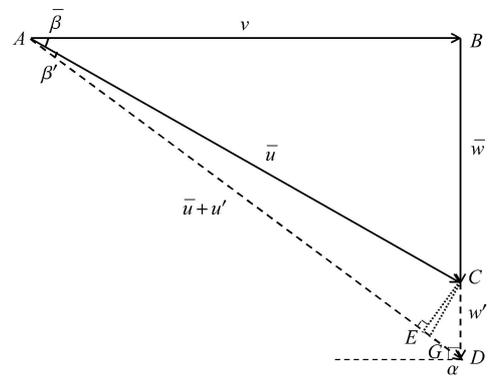


图 1 速度矢量图

Fig. 1 Velocity vector diagram

图 1 中, ΔABC 为平均风速 \bar{w} 下的速度矢量三角形, ΔABD 为任意风速 $\bar{w} + w'$ 下的速度矢量三角形, CE 垂直于 AD , $|AC| = |AG|$ 。

在 ΔABC 和 ΔCDG 中, 根据几何关系可得

$$\bar{u}u' = \bar{w}w' \frac{\sin(\bar{\beta} + \beta'/2)}{\sin\bar{\beta} \cos(\beta'/2)} \quad (17)$$

在 ΔACE 和 ΔCDE 中, 根据几何关系可得

$$\bar{u} \sin\beta' = w' \cos(\bar{\beta} + \beta') \quad (18)$$

对于高速列车, 由脉动风速引起的侧偏角的脉动量 β' 与侧偏角的均值 $\bar{\beta}$ 相比可以忽略不计, 即有 $\beta' \rightarrow 0$ 。此时, 式 (17) 和式 (18) 可以表示为^[14]

$$\bar{u}u' = \bar{w}w' \quad (19)$$

$$\bar{u}\beta' = w' \cos\bar{\beta} \quad (20)$$

将式 (19) 和式 (20) 代入式 (15), 忽略脉动量的高阶量, 注意到

$$\bar{F} = 0.5\rho A\bar{C}_F\bar{u}^2 \quad (21)$$

可得

$$F' = \rho A\bar{C}_F\bar{w}\left(1 + 0.5\bar{C}'_F \cot\bar{\beta}/\bar{C}_F\right)w' \quad (22)$$

然而, 在实际情况下, 准定常假设并不是完全成立的. 这是由于来流中的小尺度涡流与列车附近的流场并不是完全相关的, 气动力的波动与风速的波动并不是完全一致的. 采用空气动力学权重函数可以建立起气动力的波动与脉动风速的波动之间的关系, 此时气动力的脉动值可通过下式计算

$$F' = \rho A\bar{C}_F\bar{w}\left(1 + 0.5\bar{C}'_F \cot\bar{\beta}/\bar{C}_F\right) \cdot \int_0^\infty h_F(\tau)w'(t-\tau) d\tau \quad (23)$$

式中, h_F 为空气动力学权重函数, 其表达式为 [14]

$$h_F(\tau) = (2\pi\bar{n}'\bar{u}/L')^2\tau \exp[-(2\pi\bar{n}'\bar{u}/L')\tau] \quad (24)$$

式中, $\bar{n}' = \lambda \sin\bar{\beta}$. 对于侧力, $\lambda = 2.0$; 对于升力, $\lambda = 2.5$.

侧力和侧滚力矩的空气动力学权重函数相同, 对于摇头力矩和点头力矩, 可认为其波动与风速的波动是一致的 [13].

需要说明的是, 对于气动力矩脉动值的计算, 只需要将式 (23) 中的 \bar{C}_F 替换成气动 \bar{C}_M , \bar{C}'_F 替换成 \bar{C}'_M , 并增加一个乘积因子, 即参考高度 H .

式 (23) 中的 $\bar{C}_F \equiv C_F(\bar{\beta})$ 表示平均侧偏角 $\bar{\beta}$ 下的气动力系数, 即平均风速下的气动力系数. 为获得不同平均侧偏角下的气动力系数 \bar{C}_F 和气动力矩系数 \bar{C}_M , 可以采用数值风洞方法, 具体计算流程如下:

(1) 建立侧风下高速列车空气动力学数值计算模型;

(2) 计算不同平均侧偏角 $\bar{\beta}$ (通过设置不同的车速 v 、平均风速 \bar{w} 和风向角 α , 可以得到不同的平均侧偏角) 下高速列车的平均气动力 \bar{F} 和平均气动力矩 \bar{M} ;

(3) 利用下式计算不同侧偏角 $\bar{\beta}$ 下高速列车的平均气动力系数 \bar{C}_F 和气动力矩系数 \bar{C}_M

$$\bar{C}_F = \frac{\bar{F}}{0.5\rho A\bar{u}^2}, \quad \bar{C}_M = \frac{\bar{M}}{0.5\rho A H \bar{u}^2} \quad (25)$$

侧风下高速列车空气动力学数值计算模型如图 2 所示. 考虑到列车中间部分横截面的形状不变,

气动力的变化在列车中部趋于稳定 [16], 本文高速列车模型采用头车-中间车-尾车三节车编组的列车模型, 其中头车和尾车的形状相同. 为避免网格过多, 列车简化为光滑曲面构成的几何体, 不考虑受电弓、转向架、门把手等细部特征 [17].

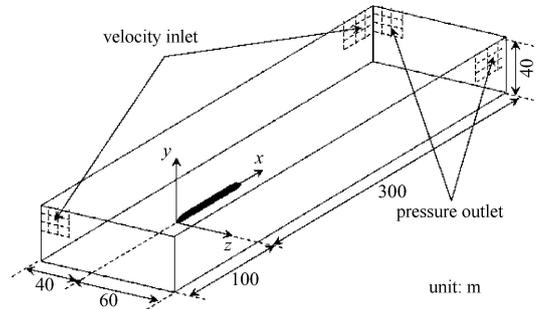


图 2 侧风下高速列车空气动力学数值计算模型
Fig. 2 Numerical computational mode of high-speed train aerodynamics in side wind

数值计算时, 流场设置为定常流场, 空气设置为不可压缩气体, 湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 两方程模型. 列车表面设置为无滑移壁面边界条件. 地面设置为滑移地面, 滑移速度等于列车运行速度, 以模拟地面效应. 计算区域顶端设置为对称边界条件.

本文共计算了 150 个工况, 列车速度分别设置为 200 km/h, 250 km/h, 300 km/h, 350 km/h 和 400 km/h, 平均风速分别设置为 13.8 m/s, 17.1 m/s, 20.7 m/s, 24.4 m/s, 28.4 m/s 和 32.6 m/s, 风向角分别设置为 30°, 60°, 90°, 120°, 和 150°. 由于头车的运行安全性最差 [9], 这里只给出头车的平均侧力系数 \bar{C}_{Fs} 、平均升力系数 \bar{C}_{Fl} 、平均侧滚力矩系数 \bar{C}_{Mr} 、平均摇头力矩系数 \bar{C}_{My} 和平均点头力矩系数 \bar{C}_{Mp} , 如图 3 所示.

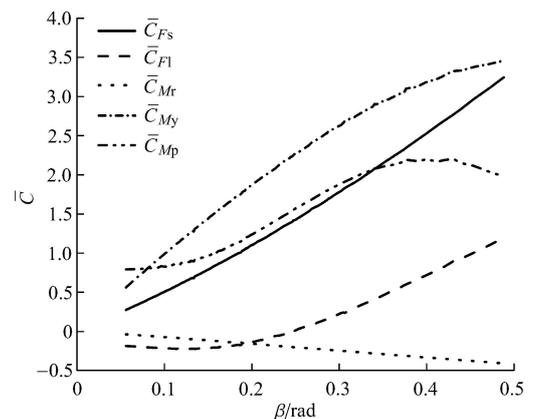


图 3 气动载荷系数
Fig. 3 Aerodynamic coefficients

2.3 基本随机变量

本文选取随机风速和气动载荷系数为基本随机变量. 假设随机风速和气动载荷系数均服从正态分布, 从而需要确定出各随机变量的均值和标准差.

由 2.1 节可知随机风速的均值为 \bar{w} , 标准差为 $I_z \bar{w}$. 气动载荷系数的均值由图 3 得到, 气动载荷系数的标准差采用图 4 的分析方法得到. 首先采用 2.1 节的方法计算出随车移动点的随机风速, 然后采用 2.2 节的方法计算出作用在高速列车上的非定常气动载荷, 由非定常气动载荷的时程曲线和随机风速的时程曲线可以得到气动载荷系数的时程曲线. 进而, 由气动载荷系数的时程曲线可分析出气动载荷系数的标准差. 采用此方法计算得到的气动载荷系数标准差考虑了列车运动的影响, 其标准差随着侧偏角的变化而发生改变, 更贴近工程实际.

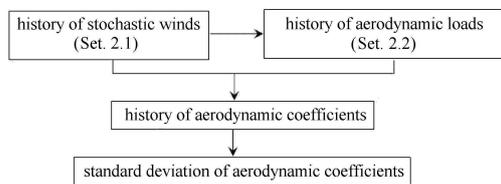


图 4 气动载荷系数标准差的计算流程

Fig. 4 Calculation processes of the standard deviation of aerodynamic coefficients

图 5 给出了当车速为 350 km/h, 平均风速为 20 m/s 时, 某一风速样本下的侧力系数 C_{Fs} 的时程曲线, 由此可以得到该风速样本下, 侧力系数的标准差. 为了得到较为准确的气动载荷系数标准差, 需要多个风速样本. 经计算发现取 200 个风速样本可得到较准确的标准差. 通过对 200 个风速样本下的气动载荷系数标准差取平均, 可以得到较准确的气

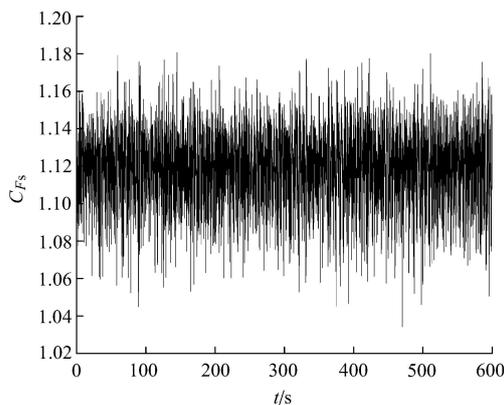


图 5 非定常侧力系数时程曲线

Fig. 5 History of unsteady side force coefficient

动载荷系数标准差.

气动载荷系数的标准差在不同侧偏角下的变化规律如图 6 所示. 由图 6 可以看出, 气动力系数标准差和气动力矩系数标准差均可由侧偏角唯一确定. 通过曲线拟合可以得到侧力系数标准差 $\sigma_{C_{Fs}}$ 、升力系数标准差 $\sigma_{C_{Fl}}$ 、侧滚力矩系数标准差 $\sigma_{C_{Mr}}$ 、摇头力矩系数标准差 $\sigma_{C_{My}}$ 、点头力矩系数标准差 $\sigma_{C_{Mp}}$ 与侧偏角的关系分别为

$$\sigma_{C_{Fs}} = 0.0735 - 0.4473\beta + 5.8581\beta^2 \quad (26)$$

$$\sigma_{C_{Fl}} = 0.0965 - 1.9244\beta + 11.0590\beta^2 - 9.2015\beta^3 \quad (27)$$

$$\sigma_{C_{Mr}} = 0.0052 + 0.0241\beta + 0.5065\beta^2 \quad (28)$$

$$\sigma_{C_{My}} = 0.0510 + 2.0536\beta - 0.6390\beta^2 \quad (29)$$

$$\sigma_{C_{Mp}} = |0.1390 - 4.0933\beta + 39.1220\beta^2 - 70.7497\beta^3| \quad (30)$$

各拟合公式的相关系数分别为 0.9987, 0.9997, 0.9990, 0.9996 和 0.9992.

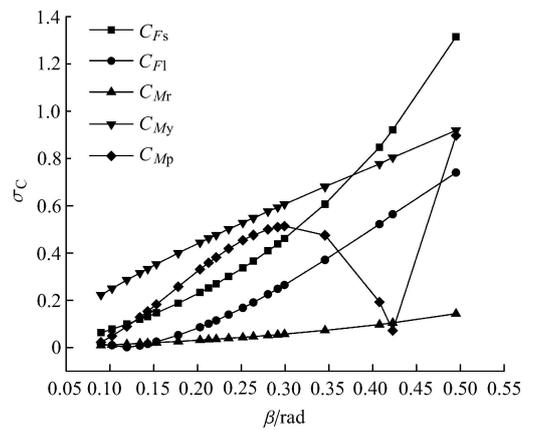


图 6 气动载荷系数标准差随侧偏角的变化

Fig. 6 The standard deviation of aerodynamic coefficients at different slip angles

3 高速列车多体系统动力学

3.1 列车系统动力学方程

列车系统动力学主要包括列车动力学和轮轨关系两个方面. 车体、构架和轮对均假设为刚体, 不考虑弹性变形, 列车系统动力学方程为^[18]

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (31)$$

其中, M, C 和 K 分别为列车系统的质量、阻尼和刚度矩阵; X 为系统的广义位移矢量; \dot{X} 为系统的广义

速度矢量; $\dot{\mathbf{X}}$ 为系统的广义加速度矢量; \mathbf{F} 为系统的广义载荷矢量, 包括轨道激励和气动载荷。

3.2 列车系统动力学建模

利用 SIMPACK 软件建立车辆的多系统动力学模型. 单节车的车辆系统动力学模型是由 1 个车体、2 个构架、4 个轮对和 8 个转臂组成. 其中刚性车体、构架和轮对均有 6 个自由度, 转臂为 1 个自由度. 整个动力学单车模型共有 50 个自由度. 本文中采用“拖-动-拖”的编组方式, 其中拖车和动车在自由度选取、各部件的连接与约束关系、结构及绝大部分悬挂参数等方面完全一致, 但在车体质量、重心高度、车体转动惯量等局部参数上有所差异, 整车模型共有 150 个自由度. 模型中高速列车的车轮踏面外形采用 LMA 踏面, 钢轨采用 T60 钢轨, 轨道不平顺激励采用国内某高速铁路实测轨道谱.

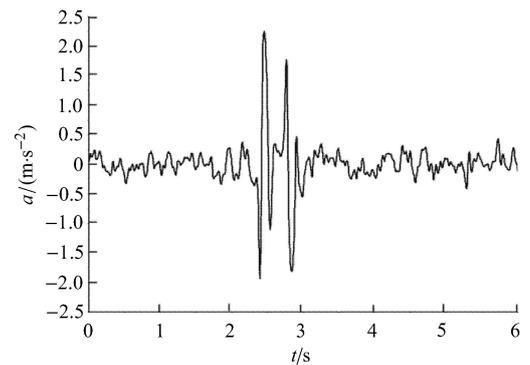
将随机风速下作用于高速列车上的非定常气动载荷加载到高速列车多系统动力学模型中, 以分析高速列车的运行安全性. 本文将各个部件视作刚体, 按照力的平移与等效原则, 将作用于车体表面上的分布压力向车体某一点简化, 得到作用于车体某一点的集中力和力矩. 通过简化可以得到不同风速大小和不同车速下作用于各个车体上的阻力、侧力、升力, 倾覆力矩、摇头力矩和点头力矩.

3.3 高速列车风致安全模型的验证

高速列车风致安全分析模型是研究高速列车侧风运行安全性的重要手段, 需要对计算模型的正确性进行验证. 计算模型验证需要包含两个方面: 高速列车空气动力学计算模型验证和高速列车多系统动力学计算模型验证. 由于高速列车侧风安全性的实车试验非常困难, 国内尚无相关的实车试验.

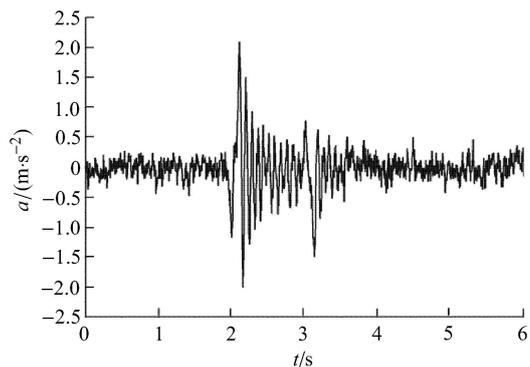
将本文的计算模型应用于列车交会研究, 并与某列车交会试验相比较, 以验证本文计算模型的正确性. 采用本文的列车模型, 计算了两列车以 350 km/h 等速交会时引起的列车振动情况. 图 7 给出了车体横向加速度 a 的计算值与试验值的比较.

由图 7 可以看出, 计算值与试验值吻合较好, 由于会车冲击波的作用, 加速度在会车过程中会发生瞬时的增大, 车体横向振动加速度最大值的仿真结果和试验结果分别为 2.24 m/s^2 和 2.11 m/s^2 , 数值计算的误差为 6.16%, 满足工程计算要求, 本文所建立的计算模型是正确可靠的. 需要注意的是, 由于计算



(a) 计算值

(a) The calculated value



(b) 试验值

(b) The experimental values

图 7 车体横向振动加速度的计算值与试验值比较

Fig. 7 Comparison of computational and experimental values of the lateral vibration acceleration of car body

模型采用三车编组, 而试验列车是八车编组. 因此图 7 中仿真计算时的交会时间要小于实车试验时的交会时间.

4 可靠性及可靠性灵敏度 Monte Carlo 模拟

Monte Carlo 模拟 (MCS) 是通过随机模拟或者统计试验来进行可靠性分析的. 这种方法在样本量趋于无穷时可得到精确解, 但其计算量非常大, 尤其是针对小失效概率问题, 以至于该方法在实际工程问题中很难应用. 针对小概率问题中 Monte Carlo 模拟计算效率低的问题, 研究人员提出了改进的数字模拟方法, 其中重要抽样法是基于 Monte Carlo 模拟的一种常用的改进数字模拟方法, 其以抽样效率高且计算方差小而得到广泛应用, 其失效概率可表示为^[19]

$$P_F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_F(\mathbf{X}_i) \frac{f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}_i)}{h_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}_i)} \quad (32)$$

式中, $I_F(\mathbf{X}) = \begin{cases} 1, \mathbf{X} \in F \\ 0, \mathbf{X} \notin F \end{cases}$ 表示失效域的指示函数;
 $f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}_i)$ 表示随机变量 \mathbf{X} 的联合概率密度函数; $h_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}_i)$
 表示重要抽样密度函数; $\mathbf{X}_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 表示由重
 要抽样密度函数 $h_{\mathbf{X}}(\mathbf{X})$ 抽取的 N 个样本点, 本文
 中, N 取 5000.

可靠性灵敏度在数学上表示为失效概率 p_F 对
 基本随机变量的分布参数 (均值 μ_{x_i} 、标准差 σ_{x_i} 等)
 的偏导数. 对于重要抽样法, 可靠性灵敏度可表示
 为 [20]

$$\frac{\partial p_F}{\partial \theta_{x_i}^{(k)}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{I_F(\mathbf{X}_j)}{h_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}_j)} \frac{\partial f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X})}{\partial \theta_{x_i}^{(k)}} \Bigg|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_j} \quad (33)$$

式中, $\theta_{x_i}^{(k)}$ 表示第 i 个随机变量 x_i 的第 k 分布
 参数; $\mathbf{X}_j (j = 1, 2, \dots, N)$ 表示由重要抽样密度函数
 $h_{\mathbf{X}}(\mathbf{X})$ 抽取的 N 个样本点.

5 数值计算

本文研究的车速范围是 200~400 km/h, 平均风速
 范围是 10~35 m/s. 当给定车速和平均风速时, 采用
 如下流程可获得高速列车的失效概率及可靠性灵敏度:

- (1) 根据 \mathbf{X} (随机风速和气动载荷系数) 的概率分
 布函数 $f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X})$ 进行抽样, 得到样本点 $\mathbf{X}_i (i = 1, 2, \dots,$
 5000);
- (2) 计算样本点 \mathbf{X}_i 下的高速列车轮重减载率;
- (3) 根据轮重减载率, 由式 (7) 得到 \mathbf{X}_i 下的功能
 函数, 并判断其是否失效;
- (4) 由式 (32) 和式 (33) 计算高速列车的失效概
 率和灵敏度.

图 8 给出不同车速不同平均风速下高速列车的
 失效概率. 在固定车速和风速时, 由图 8 可以得到
 高速列车的失效概率. 当车速一定时, 随着风速的
 增大, 列车的失效概率增大; 当风速一定时, 车速越
 高, 列车的失效概率越大.

图 9 给出了车速为 350 km/h, 风速为 25 m/s 时,
 失效概率对基本变量的分布参数的灵敏度, 其中图
 9(a) 表示失效概率对基本随机变量均值的灵敏度,
 即 $\partial p_F / \partial \mu$, 图 9(b) 表示失效概率对基本随机变量标
 准差的灵敏度, 即 $\partial p_F / \partial \sigma$. 由图 9(a) 可以看出, 失效
 概率对侧滚力矩系数均值的灵敏度最大, 失效概率
 对侧力系数均值的灵敏度次之, 失效概率对随机风
 速、摇头力矩系数和点头力矩系数的均值的灵敏度

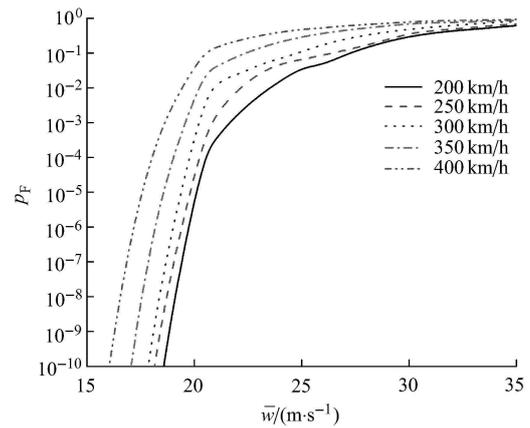
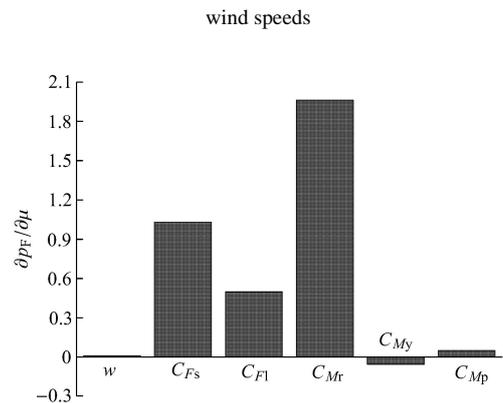
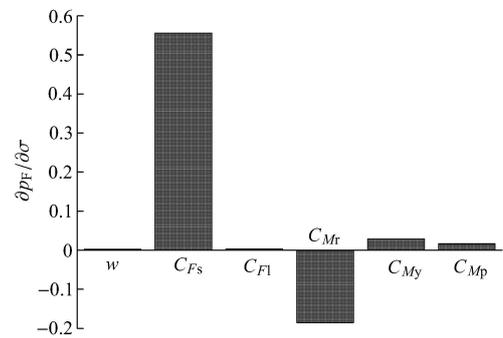


图 8 失效概率随车速和风速的变化规律
 Fig. 8 Probability of failure varying with train speeds and mean



(a) 对均值
 (a) To the mean value



(b) 对标准差
 (b) To the standard deviation

图 9 可靠性灵敏度
 Fig. 9 Reliability sensitivities

较小. 由图 9(b) 可以看出, 失效概率对侧力系数标准
 差的灵敏度最大, 失效概率对侧滚力矩系数标准
 差的灵敏度次之, 对其他随机变量的标准差的灵敏
 度较小. 分析其他工况可知, 失效概率对侧力系数和侧

滚力矩系数的可靠性灵敏度较大, 失效概率对其他基本随机变量的可靠性灵敏度较小. 由此可知, 在分析随机风速下高速列车的运行安全可靠时, 侧力系数和侧滚力矩系数的变化对失效概率的影响最为显著, 应该着重分析这 2 个变量对失效概率的影响.

图 10 给出了横向随机风速作用下高速列车的概率特征风速曲线 PCWC, 为便于比较, 由传统的确定性方法计算得到的 CWC 曲线 ($Q_L = 0.8$) 也在图中标出. 在传统的确定性方法中, 将极值最大风速视为恒速横风, 并作为空气动力学计算的边界条件, 由此得到高速列车的特征风速曲线^[9]. 本文给出的概率特征风速曲线中的风速为平均风速, 为便于比较, 需将确定性方法得到的特征风速曲线中的最大允许极值风速转化为最大允许平均风速. 本文由谐波叠加法计算脉动风速时, 发现风速瞬时最大值与平均值的比值与车速和平均风速基本无关, w_{\max}/\bar{w} 的数值稳定在 1.9172 左右, 由此可将确定性方法得到的最大允许极值风速转化为最大允许平均风速, 即图 10 中的 CWC 曲线. 由图 10 可以看出, 由传统的确定性方法计算得到的安全域曲线偏于保守. 当车速为 200 km/h, 失效概率由 0.001 增加到 0.1 时, 最大允许平均风速约增加 6 m/s; 当车速为 400 km/h, 失效概率由 0.001 增加到 0.1, 最大允许平均风速约增加 2 m/s. 即车速越高, 平均风速的变化对行车安全性的影响越显著. 由图 10 可以得到给定失效概率下, 列车安全运行所允许的最大车速和平均风速的组合. 高速列车运营安全管理者可以选定一个高速列车安全运行所能承受的最大失效概率, 然后根据图 10 的概率特征风速曲线, 给出在一定的平均风速下, 高速列车可以安全运行的最大车速.

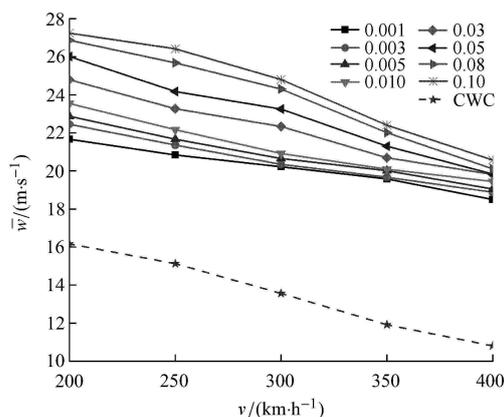


图 10 概率特征风速曲线

Fig. 10 Probabilistic wind characteristic curve

6 结 论

随着高速铁路的发展, 高速列车的风致安全性研究正处在不断发展和完善中. 目前在高速列车风致安全方面所做的研究主要是基于均匀风场的确定性方法, 但确定性的方法太过理想化, 与实际相差甚远. 因此, 开展随机风速下高速列车的运行安全可靠分析具有重要的理论和工程意义. 本文以随机风速和气动载荷系数为基本随机变量, 基于可靠性理论研究了随机风速作用下高速列车的运行安全可靠性和可靠性灵敏度. 主要有以下结论:

(1) 当车速一定时, 随着风速的增大, 列车脱轨或倾覆的概率增大; 当风速一定时, 列车速度越高, 列车脱轨或倾覆的概率越大.

(2) 在分析随机风速下高速列车的运行安全可靠时, 侧力系数和侧滚力矩系数的变化对失效概率的影响最为显著, 在往后的研究中, 可以只考虑侧力系数和侧滚力矩系数这 2 个影响显著的参数, 以提高仿真效率.

(3) 当车速分别为 200 km/h 和 400 km/h, 失效概率由 0.001 增加到 0.1 时, 最大允许平均风速分别增加约 6 m/s 和 2 m/s, 即车速越高, 平均风速的变化对行车安全性的影响越显著.

(4) 传统确定性方法得到的高速列车的安全域曲线偏于保守, 本文给出的概率特征风速曲线可为随机风速环境下高速列车的安全运行提供参考.

参 考 文 献

- Hemida H, Baker CJ. Large-eddy simulation of the flow around a freight wagon subjected to a crosswind. *Computers & Fluids*, 2010, 39(10): 1944-1956
- Krajnović S, Ringqvist P, Nakade K, et al. Large eddy simulation of the flow around a simplified train moving through a crosswind flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 110: 86-99
- Hoppmann U, Koenig S, Tielkes T, et al. A short-term strong wind prediction model for railway application: Design and verification. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(10): 1127-1134
- Li T, Zhang J Y, Zhang W H. An improved algorithm for fluid-structure interaction of high-speed trains under crosswind. *Journal of Modern Transportation*, 2011, 19(2): 75-81.
- Suzuki M, Tanemoto K, Maeda T. Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(1-2): 209-218
- Diedrichs B, Sima M, Orellano A, et al. Crosswind stability of a high-speed train on a high embankment. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2007, 221 (2): 205-225

- 7 崔涛, 张卫华. 高速列车侧风安全域计算方法. 交通运输工程学报, 2011, 11(5): 42-48 (Cui Tao, Zhang Weihua. Calculation method of cross wind security domain for high-speed train. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2011, 11(5): 42-48 (in Chinese))
- 8 任尊松, 徐宇工, 王璐雷等. 强侧风对高速列车运行安全性影响研究. 铁道学报, 2006, 28(6): 47-50 (Ren Zunsong, Xu Yugong, Wang Lulei, et al. Study on the running safety of high-speed trains under strong winds. *Journal of the China Railway Society*, 2006, 28(6): 46-50 (in Chinese))
- 9 于梦阁, 张继业, 张卫华. 平地上高速列车的风致安全特性. 西南交通大学学报, 2011, 46(6): 989-995 (Yu Mengge, Zhang Jiye, Zhang Weihua. Wind-induced security of high-speed trains on the ground. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2011, 46(6): 989-995 (in Chinese))
- 10 Wetzel C, Proppe C. Crosswind stability of high-speed trains: a stochastic approach. BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications, Milano, Italy, July, 20-24, 2008.
- 11 Carrarini A. Reliability based analysis of the crosswind stability of railway vehicles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(7): 493-509
- 12 Cooper RK. Atmospheric turbulence with respect to moving ground vehicles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1984, 17(2): 215-238
- 13 Standards Policy and Strategy Committee. EN 14067-6: 2010 Railway applications-Aerodynamics-Part6: Requirement and test procedures for cross wind assessment. Brussels: CEN, 2010
- 14 Baker CJ. The simulation of unsteady aerodynamic cross wind forces on trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98(2): 88-99
- 15 Xu YL, Ding QS. Interaction of railway vehicles with track in crosswinds. *Journal of Fluids and Structures*, 2006, 22(3): 295-314
- 16 Minoru S, Katsuji T, Tatsuo M. Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(1): 209-218
- 17 刘加利, 于梦阁, 张继业等. 基于大涡模拟的高速列车横风运行安全性研究. 铁道学报, 2011, 33(4): 13-21 (Liu Jiali, Yu Mengge, Zhang Jiye, et al. Study on running safety of high-speed train under crosswind by large eddy simulation. *Journal of the China Railway Society*, 2011, 33(4): 13-21 (in Chinese))
- 18 翟婉明. 车辆 - 轨道耦合动力学. 第 3 版. 北京: 科学出版社, 2007 (Zhai Wanming. *Vehicle-Track Coupling Dynamics*. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese))
- 19 张明. 结构可靠度分析 —— 方法与程序. 北京: 科学出版社, 2009.144-148 (Zhang Ming. *Structural Reliability Analysis: Methods and Procedures*. Beijing: Science Press. 2009. 144-148 (in Chinese))
- 20 宋述芳, 吕震宙. 基于子集模拟和重要抽样的可靠性灵敏度分析方法. 力学学报, 2008, 40(5): 654-662 (Song Shufang, Lü Zhenzhou. Reliability sensitivity analysis based on subset simulation and importance sampling. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2008, 40(5): 654-662 (in Chinese))

(责任编辑: 刘希国)

OPERATIONAL SAFETY RELIABILITY OF HIGH-SPEED TRAINS UNDER STOCHASTIC WINDS¹⁾

Yu Mengge²⁾ Zhang Jiye Zhang Weihua

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

Abstract A new method of analyzing the crosswind stability of high-speed trains is proposed based on reliability theory, which can be the effective assessment of operational safety reliability of high-speed trains under stochastic crosswinds. Firstly, the fluctuating winds of a moving point shifting with high-speed trains are calculated in this paper based on Cooper theory and harmonic superposition method, and the method of the unsteady aerodynamic loads of high-speed trains under stochastic crosswind winds are presented. The standard deviation of the aerodynamic load coefficients varying with the slip angles are obtained by numerical simulation. Then the vehicle system dynamics model of high-speed trains is established, and the result computed by the model in this paper is compared with the test data to verify the correctness of the model. Finally, the stochastic winds, side fore coefficient, lift force coefficient, roll moment coefficient, yaw moment coefficient and pitch moment coefficient are dealt with as basic random variables, and the operational safety reliability and reliability sensitivity of high-speed trains under stochastic winds are calculated in this paper. This finally leads to the probabilistic characteristic wind curve. The results show that, the probability of failure increases as the vehicle speed or wind speed increases. The side force coefficient and roll moment coefficient cause the greatest impact on the operational safety of high-speed trains. Thus, when assessing the crosswind stability of high-speed trains, special attention should be paid to the variation of these two parameters. The operational safety domain computed by the traditional deterministic method is too conservative, and a more reasonable safety domain curve can be obtained using the method based on the reliability theory.

Key words stochastic wind, reliability, probability of failure, sensitivity, probabilistic characteristic wind curve

Received 16 November 2012, revised 26 February 2013.

1) The project was supported by the 2013 Doctoral Innovation Funds of Southwest Jiaotong University and the Fundamental Research Funds for Central Universities, the National Key Technology R & D Program of China (2009BAG12A01-C09) and the High-Speed Railway Basic Research Fund Key Project (U1234208).

2) Yu Mengge, PhD candidate, research interests: crosswind stability of high-speed winds and reliability based analysis.

E-mail: yumengge0627@163.com