

车桥组合状态下列车脉动风压非高斯特性

陈志强

(山东铁路投资控股集团有限公司,山东 济南 250014)

摘要:针对典型高速铁路车-桥系统列车表面风压的非高斯特性,采用基于Hermite级数展开的方法,将高斯变量表示为考虑非高斯变量的Hermite多项式,对列车表面概率密度曲线及峰值因子进行拟合分析。研究表明:基于高斯分布的Davenport峰值因子明显低估了非高斯峰值因子,其概率密度曲线也明显偏离测点实际曲线;基于修正方法的Hermite级数峰值因子法兼顾测点风压的峰度和偏度特性,与观测峰值因子最为接近。

关键词:高速铁路;车桥组合;列车风压;非高斯特性;峰值因子;风洞试验

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

0 引言

近年来,中国高速铁路建设取得了世界瞩目的成就,但高速列车质量轻量化和行驶高速化(运营速度世界第一),使高速列车在大风环境下的运营安全和行车舒适度问题日益突出^[1-2]。国内外学者通过实车试验、数值计算和风洞试验等方法对列车横风作用下的风荷载进行了大量研究^[3-6]。但这些研究大多基于风荷载符合高斯分布的假定,可以证明,在多数情况下,这种假定是合理的。然而,笔者前期风洞试验结果表明,列车顶面分离区和负压极值区域测点风压具有明显的不对称分布和大幅风压脉冲特性,呈现明显的非高斯特性,会大大增加局部风荷载响应甚至破坏。事实上,早有大量学者对大跨度屋盖、大型冷却塔及低矮房屋表面风荷载进行研究^[7-13],在屋盖迎风边缘区域和屋盖拐角区、低矮房屋屋脊迎风端下风侧、冷却塔分离负压区常伴有大幅值的脉冲信号,风荷载带有极强的非高斯特性,若仍采用高斯模型来描述,往往带来较大的误差,对结构荷载的设计十分不利。但目前鲜有学者对高速列车风荷载非高斯特性进行研究,可想而知,忽略风荷载的非高斯特性影响势必低估强风作用对列车的局部破坏能力。因此,开展风荷载

作用下高速列车表面风压分布的概率分布特性研究,不仅有助于了解高速列车表面绕流情况,研究结果也可以为进一步确定高速列车风压极值提供依据。

风洞试验是获得结构物表面风压的常用手段,但由于风压具有明显随机性,获得的结果实际上仅为随机风压的单个样本,如果通过单次风洞试验结果得到具有一定保证率的极值风压对列车风荷载设计具有重要意义。目前大都采用假定风压时程服从高斯分布的峰值因子法来获得风压极值^[14],而此峰值因子法常常低估具有非高斯特性测点的实际极值风压。针对上述问题,Kareem等^[15]在基于高斯风压分布的基础上,将高斯变量考虑为高阶统计量的非高斯随机变量的Hermite多项式,进而将高斯过程的峰值因子法拓展到非高斯过程变量的极值取值;Kwon^[16]提出了非高斯过程的修正Hermite多项式级数表达式,并给出了主要参数取值建议,结果表明:提出的修正Hermite级数对非高斯随机变量具有较佳的拟合效果;Yang^[17]则进一步通过曲面拟合方法得到了改进Hermite级数的参数取值,并认为由此得到的参数拟合非高斯随机变量效果更佳。

本文以高速铁路车-桥组合系统作为研究背景,对位于高速铁路桥梁上的列车顶面风压进行分析,研究风压概率密度分布特性及峰值因子,并结合不

收稿日期:2022-06-01

基金项目:山东省交通运输科技计划项目(编号:2022B90)

作者简介:陈志强,男,硕士,工程师.E-mail:czq217125@163.com

同方法进行比较。

1 研究理论

1.1 风压非高斯特性

在风工程领域,人们通常认为风荷载服从高斯分布,在大多数情况下,这种假设是合理的。然而,随着学者对大跨空间结构的研究发现,在结构的局部区域由于受到气流的分离、再附和涡脱的影响,风压时程具有明显的非高斯分布特征,依据高斯分布假定计算得到的风压极值与实际情况会有较大偏差。此外,具有非高斯特征的风压具有风压分布不对称和大幅值风压脉冲的显著特征,而这些特征与

结构表面绕流的漩涡运动有着密切关系。因此,研究高速列车表面风压的非高斯特性,不仅能为列车表面风压取值提供科学依据,也可以为了解表面绕流情况提供参考。

对于高速铁路车-桥组合系统,由于列车与桥梁的遮挡作用,列车顶面受到气流分离及涡脱的影响,表面风压具有明显的非高斯特征。如图 1 所示,为迎风面典型高斯风压与顶面非高斯风压测点时程及概率分布,可见顶面测点明显偏离了高斯分布,其概率密度分布曲线较之标准的高斯分布表现出尖削及偏态特征,衰减过程也比高斯分布迅速,从而表现出明显的非高斯特性。因此,后续非高斯分析以列车顶面风压为研究对象。

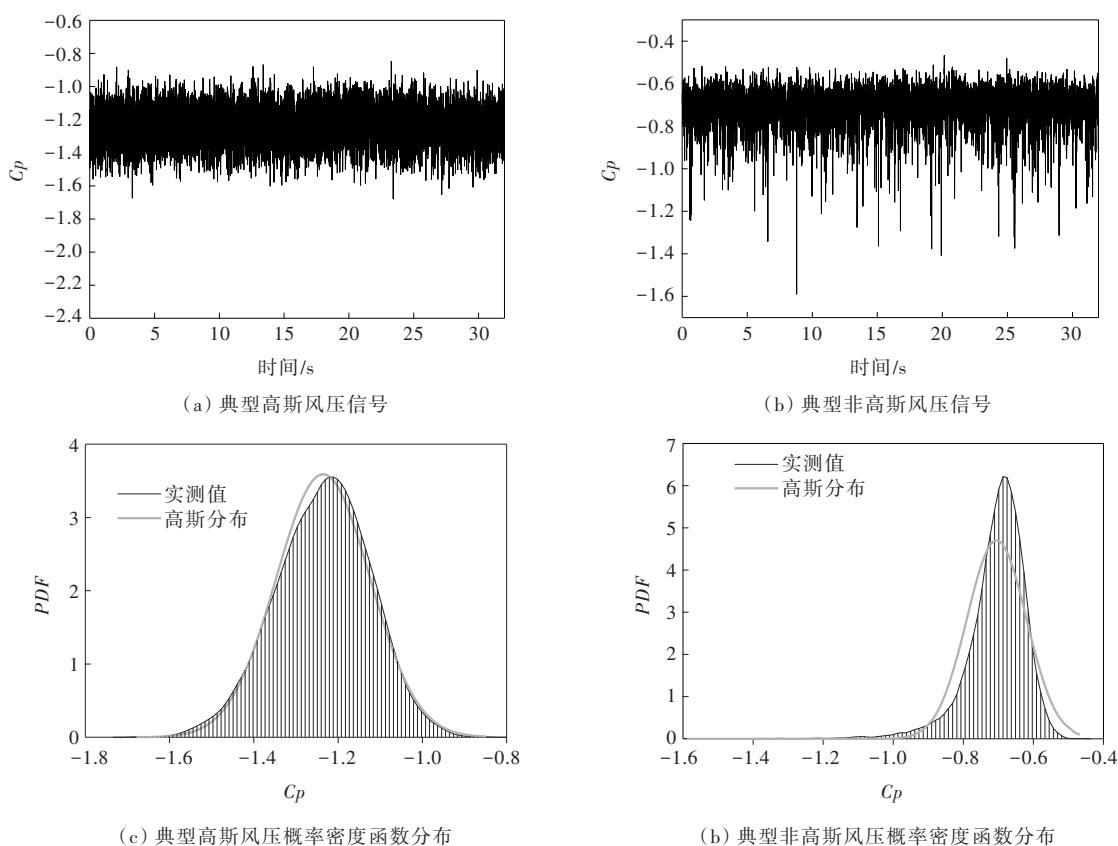


图 1 典型测点风压时程及概率密度分布

1.2 高阶矩统计量

高斯风压信号满足中心极限定理,幅域分布特性可由前 2 阶统计量(期望与方差)完全描述,而对于非高斯风压时程,通常无法直接获得其概率密度函数,而常采用三阶[偏度(Skewness)]和四阶[峰度(Kurtosis)]统计量分别来描述风压时程概率分布的偏离程度和凸起程度^[8]:

$$\gamma_3 = E[(x - \mu)^3] / \sigma^3 \quad (1)$$

$$\gamma_4 = E[(x - \mu)^4] / \sigma^4 \quad (2)$$

式中: x 为随机风压信号; E 为求随机风压的中心矩; μ 为随机风压的均值; σ 为随机风压的均方差;偏度值 γ_3 体现概率分布的对称性;峰度值 γ_4 体现的是随机风压实际概率分布曲线与高斯分布比较,表现的尖削或平坦程度,其中高斯信号的偏度为 0,峰

度为3。

1.3 概率密度函数

(1) 高斯分布(Gaussian分布)

高斯分布风压的概率密度函数 $f(x)$ 可由变量 x 的前2阶矩即均值 μ 和方差 σ 决定,其分布具有对称特性。定义如下^[9]:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

(2) Hermite级数分布

Hermite级数分布是将非高斯随机变量 x 展开成用标准高斯变量 u 表示的Hermite级数,由Winterstein推导得到非高斯随机变量可以表示为^[13]:

$$x = k\{u + h_3(u^2 - 1) + h_4(u^3 - 2u)\} \quad (4)$$

式中: $k = (1 + 2h_3^2 + 6h_4^2)^{-1/2}$, h_3 和 h_4 为概率密度函数的形状因子和位置因子,将在后面给出,将式(4)求反函数,可以得到 $u(x)$ 的表达式:

$$u(x) = \left[\sqrt{\xi^2(x) + c} + \xi(x) \right]^{1/3} - \left[\sqrt{\xi^2(x) + c} - \xi(x) \right]^{1/3} - a \quad (5)$$

式中: $\xi(x) = 1.5b\left(a + \frac{x - m_x}{k\sigma_x}\right) - a^3$, $a = \frac{h_3}{3h_4}$, $b = \frac{1}{3h_4}$, $c = (b - 1 - a^2)^3$ 。

非高斯变量的概率密度函数可以表示为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}u^2(x)\right] \frac{du(x)}{dx} \quad (6)$$

概率密度函数式(6)中含有形状和位置参数,可以通过三阶矩和四阶矩的积分表达式求得,其表达式为:

$$\gamma_3 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}u^2(x)\right] \frac{du(x)}{dx} \cdot x^3 dx \quad (7)$$

$$\gamma_4 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}u^2(x)\right] \frac{du(x)}{dx} \cdot x^4 dx \quad (8)$$

形状参数 h_3 和位置参数 h_4 的取值较为困难,传统Hermite方法(HM级数)采用简化方法对式(7)、(8)进行求解,获得 h_3 和 h_4 的估计方法如下:

$$h_3 = \frac{\gamma_3}{4 + 2\sqrt{1 + 1.5(\gamma_4 - 3)}} \quad (9)$$

$$h_4 = \frac{\sqrt{1 + 1.5(\gamma_4 - 3)} - 1}{18} \quad (10)$$

Winterstein^[18]进一步根据偏度和峰度的误差最

小,通过最小二乘法给出了修正Hermite方法(RHM级数) h_3 和 h_4 的简化估计方法:

$$h_3 = \frac{\gamma_3}{6} \left[\frac{1 - 0.015|\gamma_3| + 0.3\gamma_3^2}{1 + 0.2\gamma_4} \right] \quad (11)$$

$$h_4 = h_{40} \left[1 - \frac{1.43\gamma_3^2}{\gamma_4} \right]^{1 - 0.1\gamma_4^{0.8}} \quad (12)$$

$$h_{40} = \frac{[1 + 1.25\gamma_4]^{1/3} - 1}{10} \quad (13)$$

式中:要求的参数取值范围为, $0 < \gamma_4 < 12$, $0 \leq \gamma_3^2 < 2\gamma_4/3$ 。

Tognarelli等^[19]基于非高斯场的积分级数,给出了改进Hermite方法(MHM级数)偏度 γ_3 和峰度 γ_4 的表达式:

$$\gamma_3 = k^3(8h_3^3 + 108h_3h_4^2 + 36h_3h_4 + 6h_3) \quad (14)$$

$$\gamma_4 + 3 = k^4(60h_3^4 + 3348h_4^4 + 2232h_3^2h_4^2 + 60h_3^2 + 252h_4^2 + 1296h_4^3 + 576h_3^2h_4 + 3) \quad (15)$$

当式(14)单调时,式(15)有效且要求:

$$h_3^2 + 3h_4(3h_4 - 1) \leq 0 \quad (16)$$

依据式(16)给出的形状参数 h_3 和位置参数 h_4 的取值范围,由式(14)、(15)可以得到 h_3 和 h_4 估计方法:

$$h_3 = 0.1967\gamma_3 - 0.01646\gamma_3\gamma_4 + 0.01809\gamma_3^3 + 7.438 \times 10^{-4}\gamma_3\gamma_4^2 - 9.209 \times 10^{-4}\gamma_3^3\gamma_4 - 1.366 \times 10^{-5}\gamma_3\gamma_4^3 + 1.527 \times 10^{-4}\gamma_3^5 + 1.07 \times 10^{-5}\gamma_3^3\gamma_4^2 + 8.823 \times 10^{-8}\gamma_3\gamma_4^4 \quad (17)$$

$$h_4 = -0.0721 + 0.03176\gamma_4 - 0.02942\gamma_3^2 - 0.00179\gamma_4^2 + 0.002348\gamma_3^2\gamma_4 + 5.965 \times 10^{-5}\gamma_4^3 - 6.282 \times 10^{-4}\gamma_3^4 - 6.355 \times 10^{-5}\gamma_3^2\gamma_4^2 - 9.692 \times 10^{-7}\gamma_4^4 + 1.497 \times 10^{-5}\gamma_3^4\gamma_4 + 5.457 \times 10^{-7}\gamma_3^2\gamma_4^3 + 6.049 \times 10^{-9}\gamma_4^5 \quad (18)$$

Winterstein等^[20]给出了近似的参数取值范围:

$$3 - \gamma_4 + (1.25\gamma_3)^2 \leq 0 \quad (19)$$

1.4 基于Hermite级数展开的峰值因子计算方法

在工程设计中,通常将随机过程 $x(t)$ 的期望极大值用下式表示^[13]:

$$x_{\max} = m_x + g \cdot \sigma_x \quad (20)$$

式中: m_x 和 σ_x 为随机过程的平均值和根方差; g 为峰值因子,一般随机信号的极大值均转化为峰值因子的计算,以下为基于Hermite级数展开峰值因子的计算方法。

Winterstein在研究响应的非正态分布特性时,提

出可以通过高斯分布变量 $U(t)$ 的单调函数 f 获得非高斯分布变量 $X(t)$:

$$X(t) = f[U(t)] \quad (21)$$

为了得到 f 的表达式, Winterstein 采用比较方便的 Hermite 级数来逼近, 并推导得到:

$$x = \alpha \{u + h_3(u^2 - 1) + h_4(u^3 - 2u)\} \quad (22)$$

式中: $\alpha = (1 + 2h_3^2 + 6h_4^2)^{-1/2}$; u 为标准高斯变量。

由式 (21)、(22) 可以得知高斯过程极大值为:

$$u(x) = \sqrt{2 \ln(1 - \epsilon^2)^{1/2} N - 2 \ln \xi} \quad (23)$$

高斯过程极大值的均值为:

$$\bar{x}_{0\max} = \int_{-\infty}^{\infty} x_0 f_{\max}(x_0) dx_0 = \int_{-\infty}^{\infty} x_0 \exp(-\xi) d\xi \quad (24)$$

将式 (6-37) 和式 (6-38) 代入式 (6-39) 中可以得到非高斯任意带宽的峰值因子:

$$g_{ng} = \alpha \left\{ \left(\beta + \frac{\gamma}{\beta} \right) + h_3(\beta^2 + 2\gamma - 1) + h_4 \left[\beta^3 + 3\beta(\gamma - 1) + \frac{3}{\beta} \left(\frac{\pi^2}{12} - \gamma + \frac{\gamma^2}{2} \right) \right] \right\} \quad (25)$$

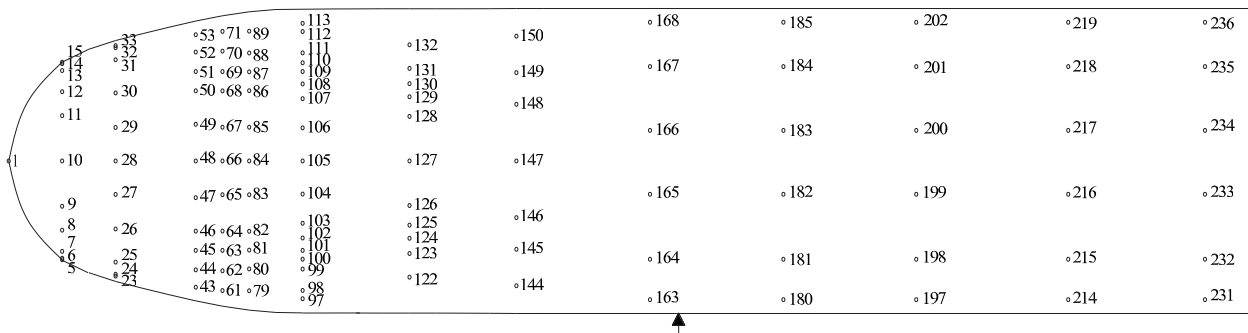


图 2 列车顶面测点位置及编号

对多种车桥组合状态下的车桥气动特性进行分析, 本文仅针对单车位于桥上迎风侧这一典型组合, 并结合紊流风场模拟, 研究列车顶面风压的峰值因子, 将几种研究方法进行对比, 验证本文使用方法的准确性。

2.2 测试方法及数据处理

风洞试验在中南大学高速铁路风洞试验系统高速试验段的均匀流场进行, 该系统拥有高速和低速两个试验段, 其中高速试验段长 \times 宽 \times 高 $= 15.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$, 最高试验风速不低于 95 m/s ; 低速试验段长 \times 宽 \times 高 $= 18.0 \text{ m} \times 12.0 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$, 最高试验风速不低于 20 m/s 。研究表明: 列车在横风作用

式中: $\beta = \sqrt{2 \log(\sqrt{1 - \epsilon^2}) N}$ 。

2 测压试验及数据处理

2.1 试验模型

中国高铁桥梁占线路里程比例大, 多选用预制简支梁作为桥梁主要体系。对于列车而言, 大多为自主研制的 CRH 系列列车。为此, 以中国 32 m 简支梁及 CRH2 型动车组为研究对象, 模型几何缩尺比取 $1:25$, 且试验模型与实物外形满足几何相似要求, 并保证模型的强度和刚度, 在试验风速下不发生明显的变形和振动, 能够真实模拟列车表面的气流绕流。

采用测压方法对列车和桥梁同时进行测量, 列车表面共布置 243 个测点, 13 个截面, 由于头车断面沿车长方向变化复杂, 故各截面测点数目及位置不一致。由于桥梁及列车自身的干扰影响, 列车顶面上方经角点分离后形成涡团结构, 空间相关性较强, 信号呈现非高斯特性, 故本文对列车顶面测点进行风压极值研究, 图 2 为顶面测点编号及来流方向。

下的风荷载最不利, 因此试验仅考虑横风工况, 即来流方向与纵桥向、列车行进方向垂直。试验时, 参考点 (不受模型和风洞避免影响) 处的风速为 14 m/s , 由皮托管测量; 模型表面的风压则采用美国 Scanivalve 公司的扫描阀系统测量, 测量时长为 30 s , 采样频率为 310 Hz 。

空气动力学中常用无量纲系数描述气动参数, 其中测点 i 处的风压系数 $C_{pi}(t)$ 定义如下^[5]:

$$C_{pi}(t) = \frac{P_i(t) - P_0}{0.5 \rho U_H^2} \quad (26)$$

式中: $P_i(t)$ 为模型表面测点 i 处的风压时程, 正值表示风压的作用方向指向列车表面, 反之则为负值; P_0

为皮托管测试得到参考点的静压; ρ 为空气密度,取 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$; U_H 为参考点风速。

2.3 风场模拟

紊流风场采用被动格栅装置进行模拟,风场的紊流度为13.12%,紊流积分尺度为0.423 m,大于列车及桥梁的特征尺寸长度,列车模型于风场中具有较好的相关性。风场脉动风谱与Kaimal谱吻合较好(图3),风场及列车模型如图4所示。

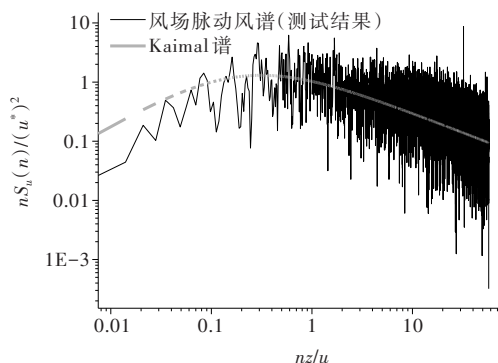


图3 紊流风场脉动风谱



图4 格栅及列车模型

3 试验结果与分析

3.1 高阶矩统计量分布规律

前文对风压的非高斯特性进行了描述,仅从风压时程分析无法具体判断测点是否处于非高斯区域,因此有必要寻找一种非高斯特性的限定方法。对列车顶面所有测点进行高阶矩(偏度和峰度)统计,并将统计结果以散点分布图绘于图5,其中横坐标为各测点的偏度值,纵坐标为相应的峰度值,图中虚线交点(0,3)为区分高斯与非高斯分布的分界点。

从图5可以发现:风压偏度与峰度呈非线性关系,大致服从二次曲线形式,曲线的顶点位置即为虚线交点,偏峰散点大多分布于此处;散点坐标大多位于交点左上侧,说明测点概率密度曲线一般为左偏,

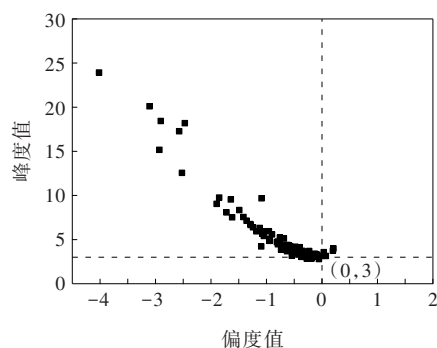
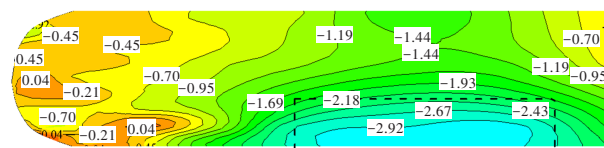


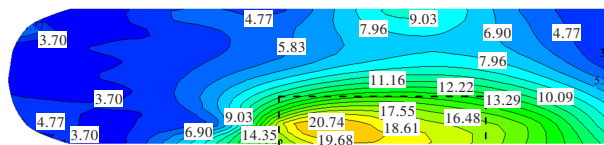
图5 偏、峰度散点图

且形状尖削。

根据高阶矩统计结果,图6给出了列车顶面风压偏度和峰度的等值线分布。当风压偏度绝对值大于0且峰度绝对值大于3时,风压系数时程不再服从高斯分布。



(a) 偏度



(b) 峰度

图6 列车顶面偏、峰度分布

从图6可以看出:风压偏度值在 $-2.92 \sim 0.04$ 范围内波动,峰度值则为 $3.70 \sim 20.74$,并呈现一定的区域性,即车头顶部受三维风场及本身流线的外形影响,对气流的分离作用较弱,干扰了漩涡的形成,故风压时程大多在高斯分布范围内;车身迎风面与顶面为类直角边缘,气流到达顶面处随即发生分离,形成漩涡,漩涡存在较大的逆压梯度,对列车顶面产生较强的吸力作用,列车表面尤其位于直角分离区的负压显著增强,测点风压时程呈现明显的非高斯特性。

图中框选区域位于迎风边缘与来流方向夹角接近 90° 的位置,气流分离产生漩涡,顺流进而附着产生尾涡,致使位于分离和再附区域的测点风压时程表现为明显的非高斯特性。

3.2 概率密度函数分布特性

上节研究中发现,位于迎风面与顶面迎风边缘测定风压时程非高斯特性最为明显。根据非高斯沿列车顶面的分布特征,选取典型测点 198、200、167、149 分别代表超重度非高斯、重度非高斯、中度非高斯和轻度非高斯特征进行概率密度分布特性研究。本节对各测点的风压概率密度函数曲线进行分析,采用不同的数学表达式来拟合其概率密度函数,主

要包括 Gaussian、传统 Hermite 级数、修正 Hermite 级数及改进 Hermite 级数法,对各概率密度函数曲线进行对比,得到最佳拟合函数曲线。

图 7 给出了典型测点风压系数的概率密度函数拟合曲线对比(图中,Test 为试验数据的概率密度函数;Gaussian 为高斯分布拟合结果;HM 为传统 Hermite 级数拟合结果;RHM 为 Hermite 级数拟合结果;MHM 为改进 Hermite 级数拟合结果)。

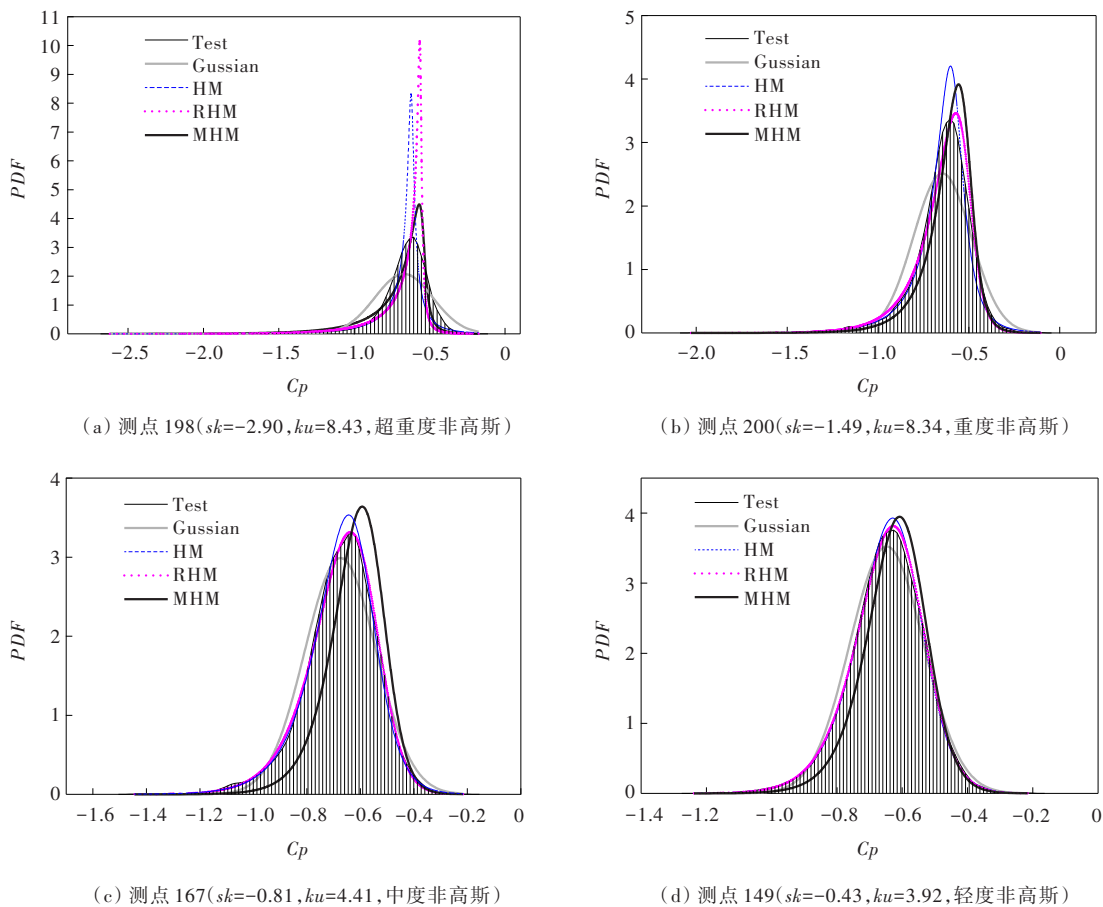


图 7 列车顶面典型测点概率密度分布

从图 7 可以看出:

(1) 位于顶面边缘分离区的测点 198 风压系数时程呈现超重度非高斯特性,极高的偏度和峰度使得测点试验数据概率密度函数曲线明显偏离高斯分布。在改变参数的 3 种 Hermite 级数分布中,改进 Hermite 级数分布的拟合性能最优,其他两种 Hermite 级数在长尾部的拟合结果较好,尖顶部效果较差,其原因主要是极高的偏峰度超出了后两者参数有效范围,故偏差较大。

(2) 位于顶面中部再附区的测点 200 风压系数时程表现为重度非高斯特性,Hermite 级数分布的拟

合性能明显拟合效果较好,其中基于修正方法的 Hermite 级数分布拟合效果显著,与测点的风压概率密度函数最为接近。

(3) 测点 167 位于列车顶面的尾流区,其风压系数时程表现为中度非高斯特性,基于修正方法的 Hermite 级数概率密度函数分布曲线基本与试验数据的概率分布结果重合,效果最佳。

(4) 位于列车头部顶面尾部的测点 149 风压系数时程表现为轻度非高斯特性,Hermite 级数分布的拟合效果较好,其长尾部的拟合性能尤为突出。

由上述分析可以得出:在参数有效范围内,基于

修正方法的 Hermite 级数概率密度函数分布曲线可以兼顾列车顶面测点风压的峰度和偏度,与实际概率密度函数的拟合性能最优,可以代表测点非高斯风压的概率密度函数。

3.3 列车顶面风压峰值因子

上节得知基于 Hermite 级数展开的测点风压系数概率密度函数的拟合性能较好,且 3 种方法各有差异,故基于不同 Hermite 级数系数可以得到相应

的峰值因子。为分析 Hermite 级数参数对风压峰值因子统计结果的影响,图 8 和表 1 分别给出了车头顶面中尾部测点风压的基于观测峰值因子法、Davenport 峰值因子法、改进 Davenport 峰值因子法、传统 Hermite 级数、修正 Hermite 级数及改进 Hermite 级数峰值因子法得到的峰值因子及与观测法的误差对比分析。

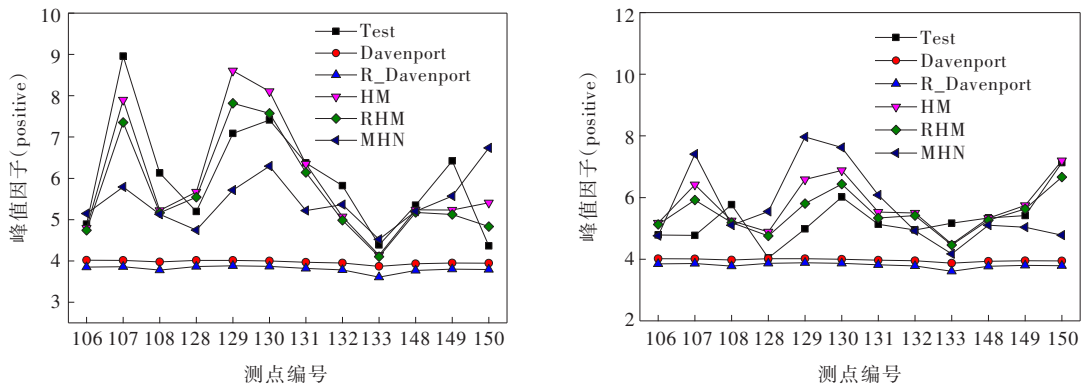


图 8 典型测点风压峰值因子对比

表 1 风压系数峰值因子计算方法误差分析

测点编号	峰值因子计算误差/%									
	Max					Min				
	Davenport	R_Davenport	HM	RHM	MHM	Davenport	R_Davenport	HM	RHM	MHM
106	17.8	21.2	2.0	3.0	5.2	16.0	19.5	8.2	7.2	4.0
107	55.2	56.9	11.8	17.9	35.4	16.0	19.2	34.4	24.0	55.2
108	35.0	38.3	14.7	15.7	16.3	31.1	34.5	9.1	10.1	11.6
128	22.8	25.6	9.1	6.7	8.7	0.6	4.3	21.0	17.8	37.3
129	43.4	45.2	21.4	10.3	19.3	19.5	22.1	32.1	16.4	59.7
130	46.0	47.8	9.3	2.2	15.1	33.5	35.7	14.3	7.0	26.7
131	37.7	40.0	0.4	3.6	18.1	22.7	25.6	7.7	3.9	18.4
132	32.2	35.0	12.9	14.4	7.9	20.2	23.6	11.1	9.4	0.5
133	11.8	17.8	5.7	6.5	3.1	25.1	30.2	13.1	13.7	19.2
148	26.5	29.5	2.1	3.3	2.8	26.3	29.3	0.2	1.2	4.3
149	38.5	40.8	18.5	20.2	13.3	27.1	29.8	6.1	4.0	7.0
150	9.7	13.2	23.9	10.6	54.3	44.8	46.9	0.9	6.6	33.0

由图 8、表 1 可以看出:对于正负峰值因子,基于高斯分布的 Davenport 峰值因子法及改进 Davenport 峰值因子法得到的峰值因子均为 4 左右,而观测风压正负峰值因子极大值均大于 8,最大误差达到 56.9%,严重低估了观测风压的峰值因子。相反地,基于非高斯分布得到的 Hermite 级数峰值因子与观

测各点峰值因子变化趋势完全一致,数值上也严格接近观测峰值因子。效果最优的修正 Hermite 级数得到的峰值因子最小误差仅为 1.2%,最大误差为 24%,远小于基于高斯分布的 Davenport 峰值因子,能够兼顾风压的非高斯特性,较好地估计风压的峰值因子。

4 结 论

以典型高速铁路车-桥系统作为研究背景,对列车顶面非高斯分布风压极值进行研究。基于 Hermite 级数展开的分析方法,研究了列车表面风压的概率密度函数和峰值因子,得出以下结论:

(1) 列车顶面测点的风压时程大多不符合高斯分布,重度非高斯区域为迎风前缘来流分离区,伴随气流顺向的再附及尾流影响,风压的非高斯特性逐渐减弱。

(2) 基于修正方法的 Hermite 级数概率密度函数分布曲线可以兼顾高速列车顶面测点风压的峰度和偏度,与实际概率密度函数分布曲线的拟合效果最佳,可以作为测点非高斯风压的概率密度函数的拟合函数。

(3) 基于高斯分布的 Davenport 峰值因子法严重低估了非高斯测点的峰值风压,最大偏差达 56.9%,存在一定的安全隐患,而基于非高斯分布得到的 Hermite 级数峰值因子法能够较好地估计测点峰值风压,其中以修正 Hermite 级数峰值因子法效果最优。

参考文献:

- [1] 金学松,郭俊,肖新标,等.高速列车安全运行研究的关键科学问题[J].工程力学,2009,26(S2):8-22,105.
- [2] 李永乐,向活跃,侯光阳,等.车桥组合状态下 CRH2 客车横风气动特性研究[J].空气动力学学报,2013,31(5):579-582.
- [3] 梁习锋,张健.动车车体表面压力分布试验研究[J].长沙铁道学院学报,2002,20(4):89-93.
- [4] BAKER C J, JONES J, LOPEZ-CALLEJA F, et al. Measurements of the cross wind forces on trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(7/8):547-563.
- [5] COOPER R K. The effect of cross-winds on trains[J]. Journal of Fluids Engineering, 1981, 103(1):170-178.
- [6] BAKER C, CHELI F, ORELLANO A, et al. Cross-wind effects on road and rail vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(8):983-1022.
- [7] KO N H, YOU K P, KIM Y M. The effect of non-Gaussian local wind pressures on a side face of a square building[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93(5):383-397.
- [8] 孙瑛,武岳,林志兴,等.大跨屋盖结构风压脉动的非高斯特性[J].土木工程学报,2007,40(4):1-5,12.
- [9] 叶继红,侯信真.大跨屋盖脉动风压的非高斯特性研究[J].振动与冲击,2010,29(7):9-15,232.
- [10] 柯世堂,葛耀君,赵林.大型双曲冷却塔表面脉动风压随机特性:非高斯特性研究[J].实验流体力学,2010,24(3):12-18.
- [11] KUMAR K S, STATHOPOULOS T. Wind loads on low building roofs: A stochastic perspective[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(8):944-956.
- [12] 全涌,顾明,陈斌.双坡低矮建筑风压系数的概率统计特性分析[J].土木工程学报,2011,44(7):22-28.
- [13] SADEK F, SIMIU E. Peak non-Gaussian wind effects for database-assisted low-rise building design[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(5):530-539.
- [14] DAVENPORT A G. Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1964, 28(2):187-196.
- [15] KAREEM A, ZHAO J. Analysis of non-Gaussian surge response of tension leg platforms under wind loads[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1994, 116(3):137-144.
- [16] KWON D K, KAREEM A. Peak factors for non-Gaussian load effects revisited[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(12):1611-1619.
- [17] YANG L, GURLEY K R, PREVATT D O. Probabilistic modeling of wind pressure on low-rise building[C]// Proceedings of 13th International Conference on Wind Engineering. Amsterdam, Holland: International Wind Engineering Association Press, 2011: 1053-1062.
- [18] WINTERSTEIN S R, KASHEF T. Moment-based load and response models with wind engineering applications[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2000, 122(3):122-128.
- [19] GURLEY K R. Modelling and simulation of non-Gaussian processes[D]. Notre Dame, IN, USA: University of Notre Dame, 1997.
- [20] WINTERSTEIN S R. Nonlinear vibration models for extremes and fatigue[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1988, 114(10):1772-1790.