

运动雷暴冲击风水平风速时程分析及现象模型

陈勇, 柳国光, 徐挺, 余世策

(浙江大学 结构工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘要: 运动雷暴冲击风属于一种非稳态风场. 为了研究冲击风射流速度、运动速度、射流高度、射流倾角对该流场的影响, 使用壁面射流试验装置进行了运动冲击风流场试验. 经过分析提出了相应的现象模型, 该模型可被用于获得在不同的冲击风参数下的风速时程. 最后, 选择多个文献给出的不同冲击风水平风速横廓线模型, 并结合矢量合成方法获得水平风速时程, 并与该现象模型结果对比. 结果表明, 对于冲击风到达前的风速时程, 现象模型与除了与 Holmes 和 Oliver 所提出模型有所区别外, 与其他模型均较为吻合; 而对于冲击风经过后的风速时程, 该现象模型能更好地描述实际试验情况.

关键词: 雷暴冲击风; 非稳态流场; 水平风速时程; 经验公式
中图分类号: TU392 **文献标识码:** A

Time Histories of Horizontal Wind Velocity of Moving Thunderstorms and Phenomenological Model

CHEN Yong, LIU Guo Guang, XU Ting, YU Shice

(Institute of Structural Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: A moving thunderstorm downburst is a sort of non-stationary flow field. In order to study the effects of inlet velocity, translational velocity of a storm, jet height, and the angle of downburst flow with the ground to the field, an experiment was conducted by an impinging jet device. A phenomenon model was proposed based on the experimental results. Under different parameters of downburst, this model is capable of obtaining various time histories of horizontal wind velocity. Finally, according to the different wind speed profiles, time histories of horizontal wind speed produced by combining vector summation method, were compared with those by phenomenological model. In the duration before the arrival of the downbursts, the comparison states a good

agreement between them except the Holmes & Oliver model, whereas it is found that the phenomenological model proposed herein has a stronger capacity of characterizing the variation of horizontal wind velocity in the duration of the departure of the downbursts.

Key words: thunderstorm downbursts; un-stationary wind field; time history of horizontal wind speed; empirical model

雷暴冲击风会引起极高的近地面风速, 对建筑结构诸如输电塔、屋盖结构、低层房屋等有强烈的破坏作用^[1]. 关于雷暴冲击风风场结构及其对结构作用的研究逐渐被国内外学者重视.

稳态雷暴冲击风风场的研究相对成熟, Oseguera 等^[2], Wood 等^[3], Vicroy^[4]、陈勇等^[5]都提出了平均风速经验模型. 但冲击风具有运动的特征, 平均风速在较短时间尺度内会产生大幅波动及风向改变, 动力效应明显. 考虑非稳态冲击风的风荷载的主要措施包括: ①采用矢量合成方法^[6], 即根据水平风速的横廓线得到水平风速后与运动速度矢量叠加, 获得水平平均风速时程. ②采用混合随机模型^[7], 即在平均风速时程上叠加脉动部分, 得到用于风致振动响应分析的风速时程^[8]. 脉动部分的数值模拟方法已相对较为成熟. 因此研究的热点侧重于如何获得水平平均风速时程, 矢量合成法中可以使用的横廓线模型包括: Oseguera 等^[2]、Vicroy^[4]、陈勇等^[5]提出的平均风速经验模型、Holmes 等提出的横廓线模型^[6]、Chay 等提出的改进的 Oseguera-Bowles-Vicroy (OBV) 模型^[9]. 基于此, Chen 等^[7]采用谐波合成法模拟了脉动风, 再采用矢量合成法和 Holmes-Oliver 横廓线获得了水平平均风速时程, 最终得到了包含脉动部分的非稳态冲击风风速时程. 类似地, Chay 等^[9]采用 ARMA (auto regressive

收稿日期: 2010-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(50708096, 50908208); “十一五”国家科技支撑计划(2006BAJ01B07-04); 浙江省重点创新团队支持计划(2009R50050)

作者简介: 陈勇(1974—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向微风工程、振动控制、健康监测等. E-mail: cecheny@zju.edu.cn

moving average)法模拟脉动部分,平均风速横廓线采用了改进的OBV模型.但基于矢量合成法获得的水平平均风速时程都无法全面考虑冲击风射流速度、射流直径、射流高度和射流倾角的影响.

本文利用可运动、可变冲击风参数的雷暴冲击风试验装置^[10]直接模拟雷暴冲击风的运动流场,研究冲击风运动速度、射流速度、射流高度及射流倾角对风速时程曲线的影响.与Holmes等^[6]、Chay等^[9]采用稳态流场横廓线不同,本文直接基于运动流场试验结果进行相关处理分析获得了经验公式,该经验公式可以考虑不同因素对风速曲线的影响,并采用文献^[6]的运动冲击风参数进行了时程模拟,再现不同因素对冲击风的影响.最后,通过选择多个冲击风水平风速横廓线模型并结合矢量合成方法获得水平风速时程与本文的现象模型结果进行对比.

1 试验装置、试验方法

冲击风试验装置如图1所示,其具体尺寸及各组成部分介绍见文献^[10].该装置通过驱动电机带动平板运动来实现模拟冲击风运动,而平板运动速度即为冲击风的运动速度.该装置射流速率 V_{jet} 、射流高度 h 、射流倾角 ϕ 调节范围分别为 $0\sim 16.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $0.2\sim 2.0\text{ m}$, $0\sim 20^\circ$,平板运动速度 V_Y 调节范围为 $0\sim 2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,射流直径 D_{jet} 有400,500,600 mm三种.取对应于风速剖面最大值的测点(测点高度 $z=0.02D_{jet}$)^[10]及对应于较高位置的测点(测点高度 $z=0.10D_{jet}$)进行试验研究,在考虑冲击风倾角的试验中平板的运动方向如图1所示,图中 x 为冲击风中心线与测点的距离.

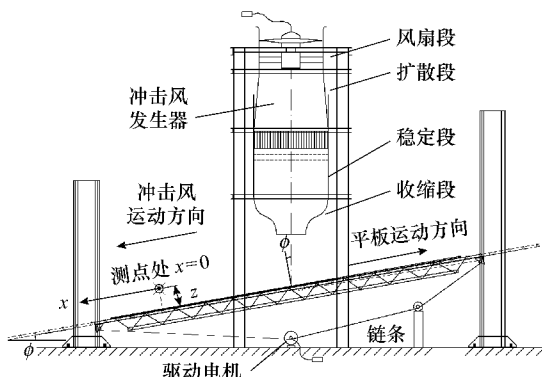


图1 雷暴冲击风装置

Fig.1 Experimental setup for thunderstorm downbursts

2 试验结果

采用测点风速随冲击风中心线离测点距离的改变来表述试验结果,将该距离换算到时间即可获得时程曲线.图2给出了在 $h=1.0D_{jet}$, $V_Y=1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下2个测点在不同射流速度下的风速变化曲线.图中 V_R 为试验测得的风速,且方向与图1中 x 轴方向一致时为正.由图可见在不同射流速度下,曲线的变化规律基本一致.即在距冲击风中心 $x=-1.0D_{jet}$ 附近达到正峰值,之后风速大致呈线性减小,直至减为零,此时测点位于风眼.然后进入负风速区域,并在 $x=0.8D_{jet}$ 附近达到最大值,之后随着距离增加风速降低.

图3给出了在 $V_{jet}=15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $h=1.0D_{jet}$ 时2个测点在不同冲击风运动速度下的风速变化曲线.由图可以看出,冲击风变化趋势与对图2的分析结论相似.随着平板运动速度 V_Y 增大,冲击风的正风速峰值增大、负风速峰值减小.正负峰值的变化可由Holmes和Oliver的矢量合成方法^[6]解释.

图4给出了在 $V_{jet}=15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $V_Y=1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下2个测点在不同射流高度下的风速变化曲线.随着射流高度的增加,风速有所降低,尤其以 $h=0.5D_{jet}$ 到 $h=1.0D_{jet}$ 时变化最为明显.这主要是由于大气的阻力以及气流的扩散, h 增大时射流气体在下降过程中动能损失增大.

图5给出了在 $V_{jet}=15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $V_Y=1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下2个测点在不同射流倾角下的风速变化曲线.倾角增大时,正负风速峰值无明显变化,此时正风速峰值对应的 x 的绝对值增大,风速下降变慢,而负风速峰值对应的 x 的绝对值减小,风速下降加快.这主要是由于冲击风在向测点靠近时,如图1a所示冲击风与地面之间夹角使冲击风前方的气团动能增强、后方的气团动能被削弱.

3 经验公式

运动冲击风下的风速变化曲线对于研究柔性结构在冲击风下的风振具有重要的意义,这就需要有一个实用的经验公式来表征这些曲线.为应用方便,忽略掉一些次要因素的影响,并结合Holmes的矢量合成方法^[6]对试验数据进行拟合,可以获得一个表征运动冲击风下的流场最大风速的经验公式.由文献^[10]可知,最高风速一般出现在 $0.02D_{jet}$ 附近.

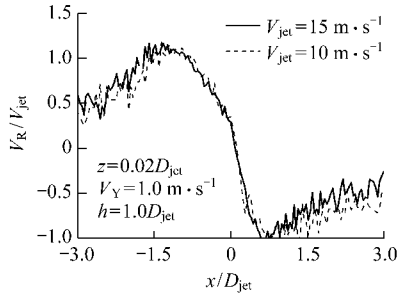
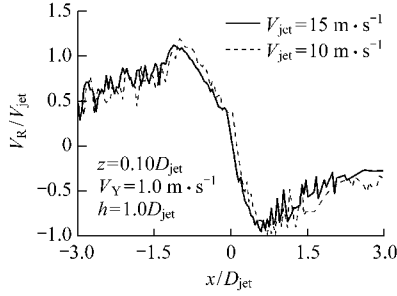
a $z=0.02D_{jet}$ b $z=0.10D_{jet}$

图2 不同射流速度下的风速

Fig.2 Curves of wind speed varied with inlet velocity

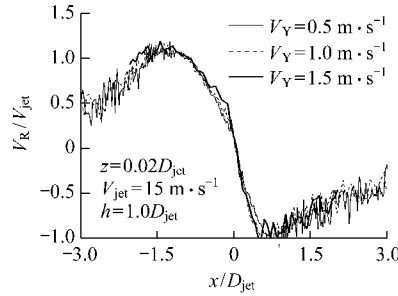
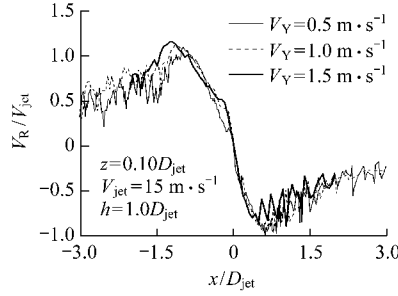
a $z=0.02D_{jet}$ b $z=0.10D_{jet}$

图3 不同运动速度下的风速

Fig.3 Curves of wind speed varied with moving velocity

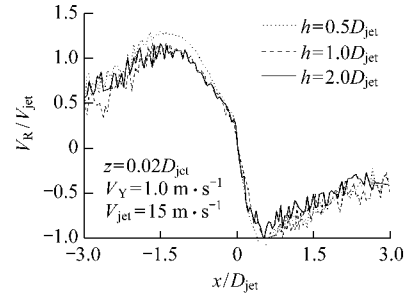
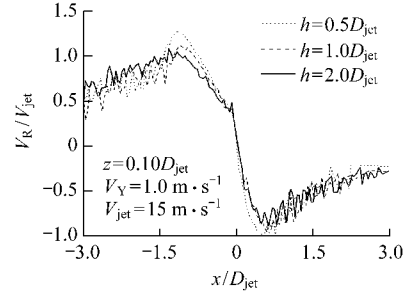
a $z=0.02D_{jet}$ b $z=0.10D_{jet}$

图4 不同射流高度下的风速

Fig.4 Curves of wind speed varied with jet heights

因此,在经验模型构建时全部采用 $0.02D_{jet}$ 高度测点的数据。考虑到经验公式用于表达水平平均风速的经验模型,因此首先采用10点平滑技术得到平滑数据,然后对平滑数据进行最小二乘拟合以获得经验公式的各参数。

归一化后的风速 \tilde{V} 及测点距离 \tilde{x} 为

$$\tilde{V} = (V_R - v_m)/V_{Peak}, \quad \tilde{x} = (x - x_0)/D_{jet} \quad (1)$$

式中: V_m 为冲击风运动速度; x_0 为风速为零的点; V_{Peak} 为冲击风风速扣除运动风速后的时程曲线绝对值的最大值。

$$V_{Peak} = \max(|V_R - v_m|) \quad (2)$$

将风速位移曲线按照图6所示分成6段,图中 x_i 为待定值,是第 i 段曲线与第 $i+1$ 段曲线的连接

点横坐标,第 i 段曲线用函数 \tilde{V}_i 来表示。

$$\tilde{V}_i = \lambda_i (e^{\alpha_i \tilde{x}} - \eta_i e^{\beta_i \tilde{x}}) \quad i = 1, 2, 5, 6$$

$$\tilde{V}_i = k_i \tilde{x} + b_i \tilde{x}^2 \quad i = 3, 4 \quad (3)$$

对式(3)中的待定系数进行参数识别时要求满足曲线连续、光滑,即2个函数拼接点处的函数值相等、一阶导数值也相等。

由图7可知,出现最大风速测点($z=0.02D_{jet}$)

获得的不同射流风速、运动速度和射流高度下的 \tilde{V} 重合度较高,可采用同一表达式描述。式(3)各待定系数利用最小二乘法后识别结果如表1所示,对应的 $x_1 \sim x_5$ 的值分别为 -1.400 , -0.040 , 0 , 0.035 , 0.900 。

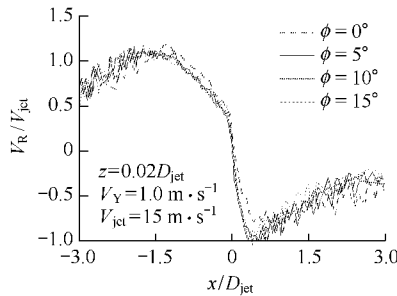
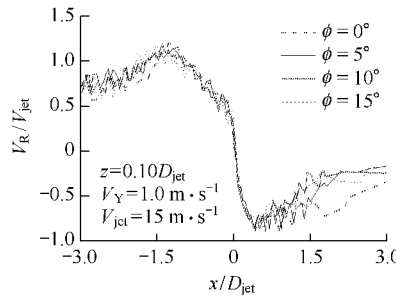
a $z=0.02D_{jet}$ b $z=0.10D_{jet}$

图5 不同倾角下的风速

Fig.5 Curves of wind speed varied with angle of downburst flow

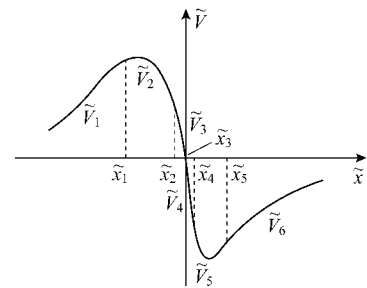


图6 分段拟合示意

Fig.6 Sketch for fitting function

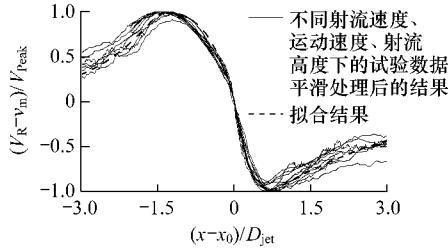
图 7 $z = 0.02D_{jet}$ 测点的数据拟合Fig.7 Fitting curve of the data from the test point at $z = 0.02D_{jet}$

表 1 识别参数结果

Tab.1 The result for identification of the parameters

函数	γ_i	α_i	η_i	β_i	k_i	b_i
\tilde{V}_1	3.371	0.80	924.793	7.305		
\tilde{V}_2	20.584	0.72	1.000	0.820		
\tilde{V}_3					-2.494	-7.00
\tilde{V}_4					-2.494	-15.00
\tilde{V}_5	-20.975	-1.36	1.001	-1.545		
\tilde{V}_6	-3.137	-0.50	0.606	-0.650		

引入 Heaviside 函数 $H(\cdot)$, 并补充定义其在零点的值为 0.5, 即补充定义

$$H(0) = 0.5 \quad (4)$$

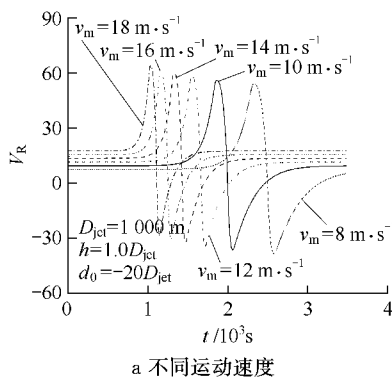
则式(3)可重写为

$$\begin{aligned} \tilde{V}(\tilde{x}) = & H(-\tilde{x}) \{ \tilde{V}_1 H(\tilde{x}_1 - \tilde{x}) + \tilde{V}_2 H(\tilde{x}_2 - \tilde{x}) \\ & H(\tilde{x} - \tilde{x}_1) + \tilde{V}_3 H(\tilde{x} - \tilde{x}_2) \} + H(\tilde{x}) \cdot \\ & \{ \tilde{V}_4 H(\tilde{x}_4 - \tilde{x}) + \tilde{V}_5 H(\tilde{x}_5 - \tilde{x}) H(\tilde{x} - \tilde{x}_4) \\ & + \tilde{V}_6 H(\tilde{x} - \tilde{x}_5) \} \end{aligned} \quad (5)$$

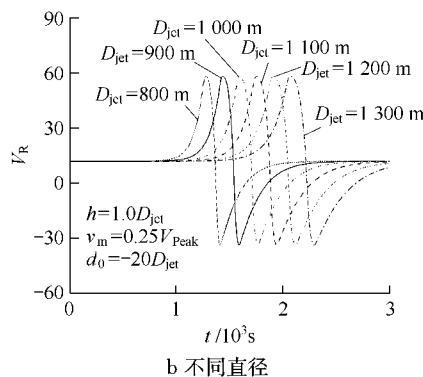
根据式(5)获得的结果和试验结果的比较如图 8 所示, 表明式(5)能较好地代表运动冲击风风速变化曲线. V_{Peak} 与 V_{jet} 之间关系可写为

$$V_{Peak} = \gamma V_{jet} \quad (6)$$

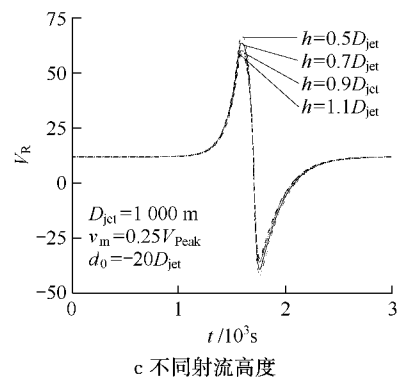
在 $\phi = 0^\circ$ 时, 修正系数 γ 与冲击风运动速度相关性较



a 不同运动速度



b 不同直径



c 不同射流高度

图 8 不同情形风速时程曲线

Fig.8 Time histories of wind speed on different conditions

小, 可写为

$$\gamma = \begin{cases} 1.36 - \frac{0.36 h}{D_{jet}} & 0.5 \leq \frac{h}{D_{jet}} \leq 1.0 \\ 1.0 & 1.0 \leq \frac{h}{D_{jet}} \leq 2.0 \end{cases} \quad (7)$$

在计算雷暴冲击风作用下结构的风致响应时, 主要考虑水平平均风速的变化, 因此 x_0 对风振计算并无影响, 可取为零.

设在零时刻冲击风以 v_m 的速度向测点匀速运动, 冲击风中心距测点距离为 d_0 , 则

$$\tilde{x} = (v_m t - d_0) / D_{jet} \quad (8)$$

式中, t 为时间. 将式(8)代入式(5)得

$$\begin{aligned} \tilde{V}(t) = & H\left(\frac{d_0 - v_m t}{D_{jet}}\right) \left\{ \tilde{V}_1 H\left(\tilde{x}_1 - \frac{v_m t - d_0}{D_{jet}}\right) + \right. \\ & \tilde{V}_2 H\left(\tilde{x}_2 - \frac{v_m t - d_0}{D_{jet}}\right) H\left(\frac{v_m t - d_0}{D_{jet}} - \tilde{x}_1\right) + \\ & \tilde{V}_3 H\left(\frac{v_m t - d_0}{D_{jet}} - \tilde{x}_2\right) \left. \right\} + \\ & H\left(\frac{v_m t - d_0}{D_{jet}}\right) \left\{ \tilde{V}_4 H\left(\tilde{x}_4 - \frac{v_m t - d_0}{D_{jet}}\right) + \right. \\ & \tilde{V}_5 H\left(\tilde{x}_5 - \frac{v_m t - d_0}{D_{jet}}\right) H\left(\frac{v_m t - d_0}{D_{jet}} - \tilde{x}_4\right) + \\ & \left. \tilde{V}_6 H\left(\frac{v_m t - d_0}{D_{jet}} - \tilde{x}_5\right) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

则由式(1)及式(6)可以推出 V_R 随时间演化的表达式

$$V_R = \gamma V_{jet} \tilde{V} + v_m \quad (10)$$

根据 Holmes 等的例子^[6]取冲击风射流风速 $V_{jet} = 47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 由式(10)及式(9)可得到在不同运动速度、不同直径及不同射流高度下的风速时程曲线, 如图 8 所示.

4 与其他模型的比较

在已知冲击风水平风速横廓线后, 通过矢量合

成方法就可以得到没有考虑脉动部分的平均风速时程. Oseguera 等通过解析方法给出的雷暴冲击风水平风速横廓线为^[2]

$$V_R(r) = \frac{\lambda R_{\text{eig}}^2}{2r} [1 - e^{-(r/R_{\text{eig}})^2}] \cdot (e^{-z/z^*} - e^{-z/\varepsilon}) \quad (11)$$

式中: r 为稳态风场下测点与冲击风中心的距离; λ 为比例因子, 且 $\lambda = \frac{V_{\text{Peak}}}{0.2375 R_{\text{eig}}}$, R_{eig} 为风暴的特征半径; z^* 为边界层外的特征高度; ε 为边界层内的特征高度; Oseguera 等建议取 $z/z^* = 0.22$, $z^*/\varepsilon = 12.5$.

Holmes 等给出的水平风速横廓线为^[6]

$$\frac{V_R(r)}{V_{\text{Peak}}} = \begin{cases} \frac{r}{r_{\text{max}}} & r < r_{\text{max}} \\ \exp\left[-\left(\frac{r-r_{\text{max}}}{R_{\text{outter}}}\right)^2\right] & r \geq r_{\text{max}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: r_{max} 为最大风速对应位置与冲击风风眼之间距离; R_{outter} 为径向长度范围, Holmes 等指出当 $R_{\text{outter}} = 0.5r_{\text{max}}$ 时, 该水平风速横廓线与 Hjelmfelt 的实测结果^[1]比较吻合.

陈勇等对通过 CFD 模拟获得了水平风速横廓线经验公式^[5], 考虑连接点处连续性后修正的经验函数为

$$\frac{V_R(r)}{V_{\text{Peak}}} = \begin{cases} \mu r \kappa & r \leq L_0 - W \\ [-\eta(r - L_0)^2 + 1] \kappa & L_0 - W \leq r \leq L_0 + W + 0.175 \\ 0.8 \exp\left[-\left(\frac{r - \alpha}{\beta}\right)^{2.06}\right] \kappa & r \geq L_0 + W + 0.175 \end{cases} \quad (13)$$

式中: κ 为风高系数; 式中的其他待定参数 $\mu, \eta, \alpha, \beta, L_0, W$ 则根据文献^[5]的建议分别取 1.07, 0.47, 1.34, 2.14, 1.40, 0.65.

Oseguera 等提出的水平风速横廓线中的 R_{eig} 可近似取为冲击风直径 $D_{\text{jet}} = 1\,000\text{ m}$, Holmes 等的横廓线中的 r_{max} 也可近似取为 $D_{\text{jet}} = 1\,000\text{ m}$, 且 $R_{\text{outter}} = 0.5r_{\text{max}}$. 根据这 3 种模型再结合矢量合成方法可以获得相应的风速时程, 这些风速时程按照式(1)、式(2)处理后与本文式(10)结果的对比如图 9 所示. 可以发现, 当冲击风向测点靠近时, 陈勇等由 CFD 得到的经验公式^[5]、Oseguera 等基于解析方法给出的模型^[2]以及本文给出的现象模型结果均较为接近. 根据 Holmes 等给出的经验模型^[6]得到的结果则与它们有较大差别, 主要表现在非停滞区域的衰

减与其他曲线相比较快. 这可能是由于 Holmes 等模型直接对实测数据采用平均拟合获得, 而实测数据由于测试手段等限制往往不能捕捉到峰值, 另外实测数据波动区间很大^[6], 并且无法排除实际冲击风有可能出现消散现象从而导致曲线下降过快的可能, 因此根据该模型计算的结果会偏小. 由于矢量合成方法采用了对称性的思想, 即冲击风向测点运动及经过测点后风速时程均采用相同的横廓线, 所以图 9 中分别根据 Holmes 等、Oseguera 等及陈勇等所给出的各个模型而获得的曲线均具有反对称的特点. 本文试验结果揭示了运动冲击风的风速时程并不满足对称性, 即当冲击风经过测点后的风速时程从零到达峰值点的时间明显小于冲击风向测点运动时从峰值下降到零的时间.

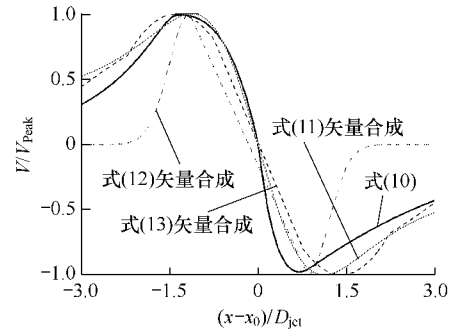


图9 各种模型的比较

Fig.9 Comparison of various models

5 结论

在雷暴冲击风试验装置上研究了冲击风射流速度、运动速度、射流高度和射流倾角对运动雷暴冲击风的影响. 将风速与射流速度相比以获得量纲一化的风速位移曲线. 通过参数敏感性分析发现: 射流风速对曲线峰值和峰值出现位置没有大的影响; 运动速度、射流高度对峰值影响较大; 射流倾角对曲线峰值大小影响不大但是对峰值点出现位置的影响明显.

直接基于最大风速所在测点处的试验数据, 进行归一化等处理得到了运动冲击风水平平均风速一位移的经验公式. 通过该经验公式可以反算出一定雷暴冲击风参数下的风速时程, 另外该公式能考虑冲击风射流速度、射流直径、射流高度和运动速度对流场的影响, 且举例给出了不同运动速度、射流直径和射流高度下的风速时程.

(下转第44页)