

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.04.001

基于网函数插值理论的结构表面风压预测

罗叠峰, 杨 晓, 王 颖, 翟 朗, 马永春

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 影响结构表面风荷载分布特性的因素很复杂, 且具有不确定性, 仅靠风洞试验难以完整地获得和描述其风荷载分布特性。因此, 探讨了基于网函数插值理论的结构表面风压分布预测。首先, 介绍了一种可多方向拟合一次误差调整的网函数插值法, 并基于网函数插值技术对于多个传感器所获得的数据进行数据融合, 提出了结构表面风压分布预测方法, 然后用风洞试验数据进行了验证。实例验证结果表明: 网函数插值法可以根据布置在结构物表面的测点网, 快速计算出相邻位置的表面风压值, 这是作为数据融合手段预测结构表面风压分布特性的一个有效途径, 且该方法稳定性好, 简单实用, 精度较高, 可被应用于风洞试验中减少测点数量和扩充复杂建筑表面风压分布数据等。

关键词: 网函数插值; 数据融合; 风压; 预测

中图分类号: TU312⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2024)04-0001-06

引文格式: 罗叠峰, 杨 晓, 王 颖, 等. 基于网函数插值理论的结构表面风压预测[J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(4): 1-6.

Research on Structural Surface Wind Pressure Prediction Based on Grid Function Interpolation Theory

LUO Diefeng, YANG Xiao, WANG Ying, ZHAI Lang, MA Yongchun

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Due to the complexity and uncertainty of affecting factors on the distribution characteristics of wind loads on the surface of structures, it is difficult to fully obtain and describe their wind load distribution characteristics solely through wind tunnel tests. Therefore, an inquiry has thus been made into the prediction of structural surface wind pressure distribution based on network function interpolation theory. Firstly, with the introduction of a network function interpolation method with multi-directional fitting and one-time error adjustment, based on the network function interpolation technology fused with data obtained from multiple sensors, a method has been proposed for the prediction of the wind pressure distribution on the surface of a structure, which is validated by using wind tunnel test data. The example verification results show that the network function interpolation method can quickly calculate the surface wind pressure values of adjacent positions based on the measurement point network arranged on the surface of the structure, making it an effective way for the prediction of the surface wind pressure distribution characteristics of the structure as a data fusion method. Moreover, this proposed method is characterized with such advantages as fine stability, simple practicality, high accuracy, applicable to reducing the number of measurement points and expanding the wind pressure distribution data of complex building skins in wind tunnel tests.

Keywords: grid function interpolation; data fusion; wind pressure; forecast

收稿日期: 2023-07-08

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40176)

作者简介: 罗叠峰, 男, 湖南工业大学工程师, 博士, 主要研究方向为建筑结构抗风, E-mail: ldf1281@163.com

1 研究背景

风荷载是许多结构物设计的主要控制荷载,由于结构体型的复杂性,现行《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[1]所列出的体形系数未能覆盖全部类型的结构物外形,因此建筑模型的风洞试验研究成为获得结构表面风压分布的主要途径^[2-3]。通常风洞试验时需要布置相当多的测点,即便如此,试验测出的结构表面风压分布仍然是离散化的量,由于测压设备有限以及模型制作中和试验中出现的失效测点,都直接影响了结构表面风压特性分析的准确性。因此,人们通过研究给出了一些结构风压的预测方法,如傅继阳等^[4-5]将神经网络方法应用于结构风工程中,预测了大跨屋盖上的平均风压特性,研究表明预测结果可以很好地逼近屋盖表面风压分布的试验结果;Y. Uematsu^[6]、李方慧^[7]、单文珊^[8]等结合风洞试验同步测量的风压数据,应用本征正交分解(proper orthogonal decomposition, POD)法进行结构表面的风压、风力重构及未布测点处的风压预测,该方法可以提高风洞试验测压孔的分辨率。

数据融合是把来自多传感器的信息和数据进行综合处理,通过对多传感器及其测量值的合理支配与使用,将多传感器的互补与冗余信息根据某种优化规则组合起来,产生对观测目标的一致性解释和描述,以充分利用多传感器的资源。比起只利用单一传感器进行测量获得的结果,它能得到更准确可靠的结论,从而减少在信息处理中可能出现的失误^[9]。在进行多传感器数据融合时,融合方法是非常重要的,现已经有了许多的研究成果,但实际应用中,许多传感器的数据呈现非线性或非高斯分布特性。传统的数据融合方法在处理这类数据时可能性能不佳。

网函数插值技术是一种多方向拟合一次误差调整的方法,其插值函数类似于简单的高价偏微分方程边值问题的解。对于一张曲面,用网函数插值技术可以从曲面边界上的节点来近似计算曲面的内节点,算法简单易行^[10]。因此,本文基于网函数插值技术,提出了一种新的多传感器数据融合方法,应用网函数插值技术,将预测点周边多个测点已获得的实测数据进行融合,进而获得预测点的预测值。该方法可被应用于广泛的科技领域,具有很好的应用潜力和卓越的性能^[11-13]。最后,应用该方法对两个实例进行了预测,并用风洞试验数据进行了验证,结果表明,基于网函数插值技术的数据融合预测方法稳定性较好,简单实用且精度高,是预测结构表面风压分布特性的有效途径,为确定结构的风荷载提供了新的途径。

2 网函数插值基本理论

2.1 网函数插值的结构

在三维空间引进直角坐标系 xyz 。假设在 xOy 平面上有一闭矩形区域 $D=\{(x,y)|x_0\leq x\leq x_1, y_0\leq y\leq y_1\}$,函数 $f(x,y)$ 在 D 上定义,并且属于 $C(D)$ 。需要由 $f(x,y)$ 在 D 的边界上的值,计算它在 D 内任一点的值。从几何学方面看,要在 D 上构造一曲面 $z=F(x,y)$ 作为曲面 $z=f(x,y)$ 的近似,其构造方法分为5个步骤。

第一步,作曲面 $z=F(x,y)$ 的4条边界曲线 λ_0 、 λ_1 、 μ_0 、 μ_1 ,如图1所示。

$\mu_0=\{(x_0,y,f(x_0,y))|y_0\leq y\leq y_1\}$,
 $\mu_1=\{(x_1,y,f(x_1,y))|y_0\leq y\leq y_1\}$,
 $\lambda_0=\{(x,y_0,f(x,y_0))|x_0\leq x\leq x_1\}$,
 $\lambda_1=\{(x,y_1,f(x,y_1))|x_0\leq x\leq x_1\}$ 。

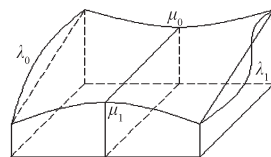


图1 曲面 $z=f(x,y)$ 的4条边界线示意图

Fig. 1 Surface $z=f(x,y)$ and its boundaries

第二步,设平面 $y=y_0$ 与曲线 μ_0 和 μ_1 相交于两点,将这两点用直线段联接起来。对于 $[y_0,y_1]$ 中的任意一数 y_0 ,都如上作直线段。这样得到一张直纹面,如图2所示,记作

$z=F_1(x,y), (x,y)\in D$,并且当 $y_0\leq x\leq y_1$ 时,
 $F_1(x_i,y)=f(x_i,y), i=0,1$ 。也就是说,直纹面 $z=F_1(x,y)$ 以曲线 μ_0 和 μ_1 为它的边界线段,其

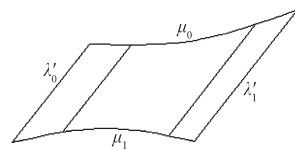


图2 直纹面 $z=F_1(x,y), (x,y)\in D$ 示意图

Fig. 2 Ruled surface $z=F_1(x,y), (x,y)\in D$

他两段边界是直线段,记作 λ'_0 和 λ'_1 。以曲面 $z=F_1(x,y)$ 作为曲面 $z=f(x,y)$ 的近似,只是在曲线 μ_0 和 μ_1 附近差别不大,在其他点差别可能很大。

第三步,设平面 $x=x_0$ 与曲线 λ_0 和 λ_1 相交于两点,将这两点用直线段联接起来。对于 $[x_0,x_1]$ 中任意一数 x_0 ,都如上作直线段。这样得到一张直纹面,如图3所示,记作

$z=F_2(x,y), (x,y)\in D$,并且当 $x_0\leq y\leq x_1$ 时,
 $F_2(x,y_i)=f(x,y_i), i=0,1$ 。也就是说,直纹面 $z=F_2(x,y)$ 以曲线 λ_0 和 λ_1 为其边界线段,其他两段边界是直线段,记作 μ'_0 和 μ'_1 。以曲面 $z=F_2(x,y)$ 为曲面 $z=f(x,y)$ 的近似,只是在曲线 λ_0 和 λ_1 附近两者较为近似,其他点差别可能很大。

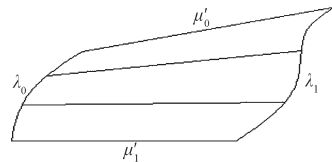


图3 直纹面 $z=F_2(x,y), (x,y)\in D$ 示意图

Fig. 3 Ruled surface $z=F_2(x,y), (x,y)\in D$

如果以曲面 $z=F_1(x,y)+F_2(x,y)$ 作为曲面 $z=f(x,y)$ 的近似,需要对可能的误差进行调整。

第四步, 在第二步作图中, 得到两直线 λ_0' 和 λ_1' , 设平面 $x=x_0$ 和这两线段相交于两点, 把这两点用直线段联接起来。对于区间 $[x_0, x_1]$ 中任一数 x_0 都如上作直线段, 这样得到一张如图 4 所示直纹面, 记作 $z=F_3(x, y)$, $(x, y) \in D$, 其以 4 条直线段 λ_0' 和 λ_1' 及 μ_0' 和 μ_1' 为它的边界, 但未必是空间平面。显然在矩形 D 的 4 个角点上, 有 $F_3(P_i)=f(P_i)$, $i=1, 2, 3, 4$ 。

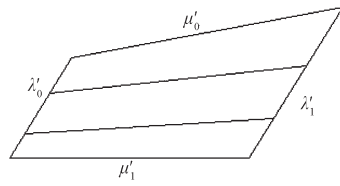


图 4 直纹面 $z=F_3(x, y)$, $(x, y) \in D$ 示意图

Fig. 4 Ruled surface

$z=F_3(x, y)$, $(x, y) \in D$

第五步, 作曲面 $z=F(x, y)$, $(x, y) \in D$, 其中,

$$F(x, y) = F_1(x, y) + F_2(x, y) - F_3(x, y). \quad (1)$$

式中: $F_1(x, y) = \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0} f(x_0, y) + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} f(x_1, y)$;

$$F_2(x, y) = \frac{y_1 - y}{y_1 - y_0} f(x_0, y) + \frac{y - y_0}{y_1 - y_0} f(x, y_1);$$

$$F_3(x, y) = \frac{y_1 - y}{y_1 - y_0} F_1(x, y_0) + \frac{y - y_0}{y_1 - y_0} F_1(x, y_1) =$$

$$\frac{y_1 - y}{y_1 - y_0} \left(\frac{x_1 - x}{x_1 - x_0} f(x_0, y_0) + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} f(x_1, y_0) \right) + \frac{y - y_0}{y_1 - y_0} \left(\frac{x_1 - x}{x_1 - x_0} f(x_0, y_1) + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} f(x_1, y_1) \right).$$

曲面 $z=F(x, y)$ 便是用网函数插值法算得的在区域上 D 的曲面 $z=f(x, y)$ 的近似曲面。用 $F(x, y)=F_1(x, y)+F_2(x, y)-F_3(x, y)$ 作为 $f(x, y)$ 在区域上 D 的近似, 意思是保留 $F_1(x, y)$ 和 $F_2(x, y)$ 在 D 的边界上与 $f(x, y)$ 比较接近的部分, 而用 $F_3(x, y)$ 在区域 D 上整体调整 $F_1(x, y)+F_2(x, y)$ 与 $f(x, y)$ 偏差较大的部分。实际上, 不难见在 D 的边界 N 上 F 与 f 取值相等, 即

$$F(x, y) = f(x, y), \quad (x, y) \in N.$$

2.2 网函数插值的基本方法

$F(x, y)$ 的具体表达式可以写为 Lagrange 插值式的形式。设 D 为二维欧氏空间中的一个矩形区域, $D=\{(x, y)|x_0 \leq x \leq x_1, y_0 \leq y \leq y_1\}$, 将 D 的 4 条边的全体称为 D 的 1-网, 记作 N_1 , 即

$$N_1 = \{(x, y)|x_0 \leq x \leq x_1, y=y_i(i=0, 1) \text{ 或 } x=x_i(i=0, 1), y_0 \leq y \leq y_1\}.$$

设 D 为二维欧氏空间中的一个矩形区域, $D=\{(x, y)|x_0 \leq x \leq x_2, y_0 \leq y \leq y_2\}$, 下列直线段的全体称为 D 的 2-网, 记作 N_2 , 这些直线段为

$$N_2 = \{(x, y)|x_0 \leq x \leq x_2, y=y_i(i=0, 1, 2) \text{ 或 } x=x_i(i=0, 1, 2), y_0 \leq y \leq y_2\}.$$

在 N_1 、 N_2 上分别定义的函数 $f_{N_1}(x, y)$ 和 $f_{N_2}(x, y)$

顺次称为 1-网函数、2-网函数。这里的网函数只要连续, 可处处不可微。

已知 N_1 、 N_2 上网函数 f_{N_1} 、 f_{N_2} , 可用网函数插值技术求得区域 D_1 、 D_2 上的函数 F_1 和 F_2 , 使得

$$F_1(x, y) = f_{N_1}(x, y), (x, y) \in N_1; F_2(x, y) = f_{N_2}(x, y), (x, y) \in N_2.$$

对于 $(x, y) \in D$, F_1 和 F_2 的构造如下:

$$F_1(x, y) = (L_{x_0, x_1}^x + L_{y_0, y_1}^y - L_{x_0, x_1}^x L_{y_0, y_1}^y) f_{N_1}(x, y),$$

$$F_2(x, y) = (L_{x_0, x_1, x_2}^x + L_{y_0, y_1, y_2}^y - L_{x_0, x_1, x_2}^x L_{y_0, y_1, y_2}^y) f_{N_2}(x, y).$$

其中 L 是 Lagrange 一次插值算子, 上角标表示插值作用变元, 下角标表示型点。

2.3 1-网插值的面积加权平均公式

从前面的理论推导可得到以下结论:

1) $F(x, y)$ 与 $f(x, y)$ 具有相同的边值;

2) 在矩形区域 D 内的任一点 $f(x, y)$ 上用 $F(x, y)$ 近似 $f(x, y)$, 设 $f(x, y) \in C^4(D)$, 记

$$A = (x_0 - x_1)(y_1 - y_0), M = \max_{(x, y) \in D} \left| \frac{\partial^4 f(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} \right|,$$

则网函数插值余项的估计式为 $|\gamma(x, y)| \leq (MA^2)/64$ 。

由此可见, 区域 D 面积越小, f 的网函数插值与 f 的逼近程度越高。偏导数的最大值与函数 f 在区域 D 上的起伏大小有关, 对于在 D 上变化平缓的函数 f , 网函数插值与 f 的逼近程度越高。

对于区域 D 内的某点 $f(x, y)$, 用插值公式求值时, 只用到 D 内 8 个点的函数值, 其中 4 个点是矩形区域 D 的 4 个角点 (对于 D 内所有点的计算, 都要用到 4 个角点), 另外 4 个点是计算点 (x, y) 坐标轴的平行线与区域 D 边界的交点。由此, 又可以得到网函数插值的面积加权平均公式。

如图 5 所示, 在以 $P_1(x_0, y_0)$, $P_2(x_1, y_0)$, $P_3(x_1, y_1)$, $P_4(x_0, y_1)$ 为顶点的矩形区域 D 的边界上, 给定连续的网函数 f , 则插值公式可以表示为

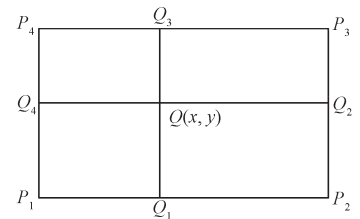


图 5 矩形插值区域 D

Fig. 5 Rectangular interpolating domain D

$$F(Q) = \sum_{i=1}^4 \frac{A_i + A_{i+1}}{A} f(Q_i) - \sum_{i=1}^4 \frac{A_i}{A} f(P_i). \quad (2)$$

式中: Q_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为过插值点 Q 与矩形平行的两条直线在矩形边界上截得的 4 个点; A_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为这两条直线将区域 D 分成 4 个小矩形的面积, 其中 $A_1=A_5=(x_1-x)(y_1-y)$, $A_2=(x-x_0)(y_1-y)$, $A_3=(x-x_0)(y-y_0)$, $A_4=(x_1-x)(y-y_0)$, $A=(x_1-x_0)(y_1-y_0)$, $A=A_1+A_2+A_3+A_4$ 是

矩形区域 D 的总面积。

式 (2) 即为网函数插值法的面积加权平均计算公式, 带负号的项表示误差修正项。由于插值式右端诸量 $f(P_i)$ 、 $f(Q_i)$ 可以看作是物理量, 而它们的系数是一些面积之比, 因此插值式与坐标系的选取无关。

值得提出的是, 网函数插值的区域未必一定是矩形, 它可以是一些矩形区域拼接而成的多边形区域, 也可以是曲边四边形区域。

可以证明对于相当广泛的一类函数 f , 确切的说, 对于函数空间

$$C_{1,2}(D) = \{ \varphi(x) + \psi(y) + y\varphi_1(x) + x\psi_1(y) | \varphi(x), \varphi_1(x) \in C[x_0, x_1]; \psi(y), \psi_1(y) \in C[y_0, y_1] \}$$

中的全体函数, 由式 (1) (2) 给出的是精确值^[9]。特别地, 对任何不高于 3 次的二元多项式, 都能通过网函数插值式 (1) 求得准确函数值。

3 结构表面风压预测实例

3.1 平板结构表面风压预测

选用某平板结构作为应用实例, 该结构为一个 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的平板, 缩尺比为 $1/10$, 风洞试验模型见图 6。

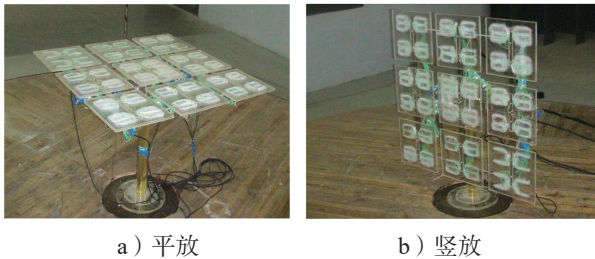


图 6 平板结构试验模型

Fig. 6 Test model of plate structure

模型测点布置见图 7, 采样频率为 330 Hz , 采样样本总长度为 $20\,000$ 个数据。通过调整模型面板与水平方向的夹角 (见图 8), 试验获得其表面在不同的水平角度和仰角条件下部分测点风压数据。

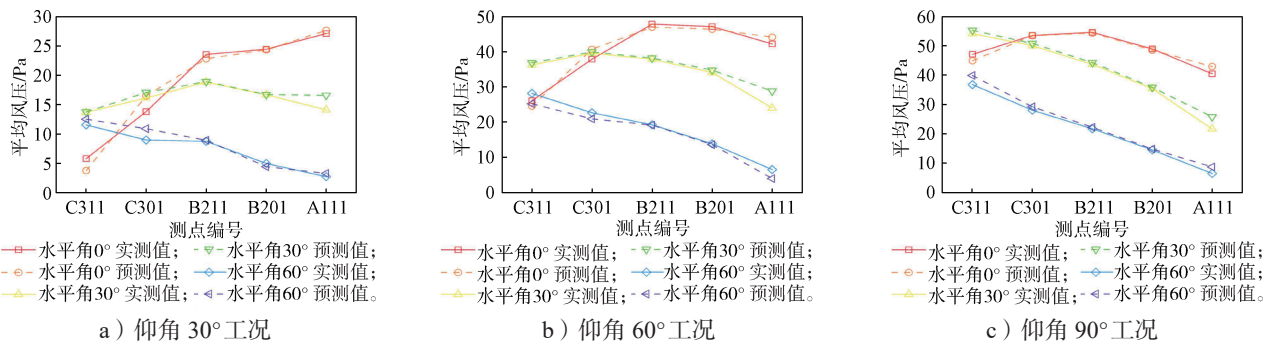


图 9 典型测点的平均风压

Fig. 9 Mean wind pressure of typical measuring points

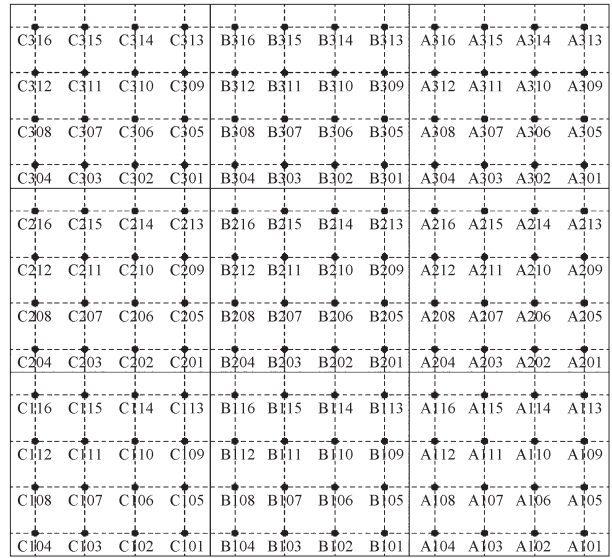


图 7 测点布置图

Fig. 7 Layout of measuring points

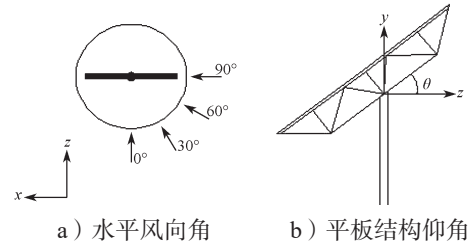


图 8 风向角与平板结构仰角示意图

Fig. 8 Schematic diagram of wind direction angle and elevation angle of the flat plate structure

该平板结构选择 25 个预测点, 同其周边测点形成节点网, 并以预测点周边 8 个节点试验值为输入值, 通过网函数插值技术编程计算获得预测点的风压数值。当风从结构表面绕流 (仰角大于 0° , 水平角小于 90°) 时结构表面为迎风面, 图 9 给出了水平角为 0° , 30° , 60° 和仰角为 30° , 60° , 90° 时, 6 个典型测点实测平均风压与采用网函数插值技术的预测结果。

由图 9 可知, 预测值与实测值间误差较小, 最大误差在 10% 以内, 表明该方法可有效对平板结构在风荷载作用下的迎风面风压进行准确预测。

图 10 给出了在水平角为 0° 、仰角为 90° 时, 两个典型测点的实测风压时程与网函数插值预测时程的风压功率谱对比曲线。结果表明, 典型测点的实测风压功率谱与插值预测的风压功率谱比较吻合。因此, 用基于网函数插值理论的数据融合方法对结构表面的风压预测具有很好的精度, 可满足一般工程需要。

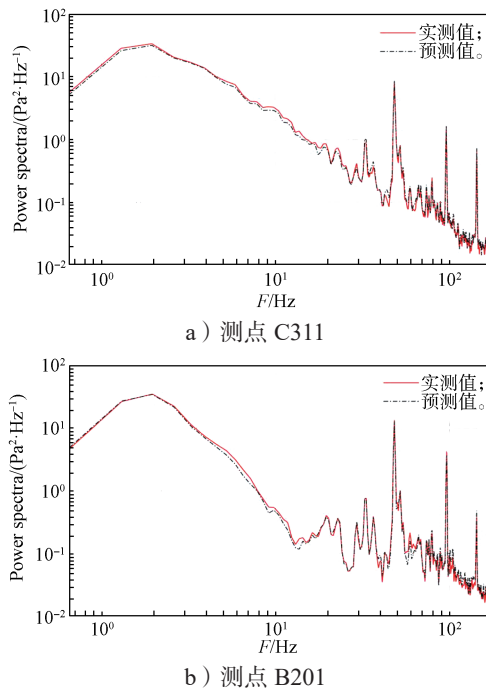


图 10 典型测点的风压功率谱对比

Fig. 10 Comparison of wind pressure power spectra of typical measurement points

2.2 高层建筑结构表面风压预测

选用某矩形截面高层建筑模型风洞试验数据作为基本的计算数据, 试验模拟 C 类地貌风场, 模型的 4 个立面上分 15 层共布置 360 个测点, 顶面布置 32 个测点。风洞试验结果表明, 高层建筑模型上部对风荷载更敏感, 且模型具对称性, 故以模型上部为主要分析对象, 模型尺寸及其上部测点布置见图 11, 图中尺寸单位为 mm。

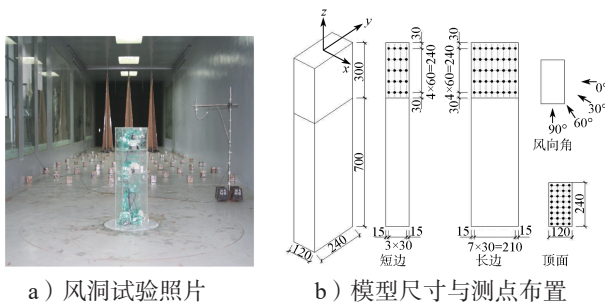


图 11 风洞试验照片及模型尺寸与测点布置

Fig. 11 Wind tunnel test photos, model dimensions, and measurement point arrangement

以顶面的测点作为 1-网函数插值节点, 通过计算得到了不同风向角下顶面 12 个测点 (除边界点外的测点) 的预测值, 并与实测值进行对比, 结果如图 12 所示。建筑顶面为负压区, 图中结果表明, 在不同来流风向的工况下, 通过网函数插值得到的预测值与风洞试验值均比较吻合, 根据数据的误差统计分析, 其相对误差在 5% 以内。因此, 网函数插值方法可以对建筑顶面的风荷载进行准确而有效地预测。

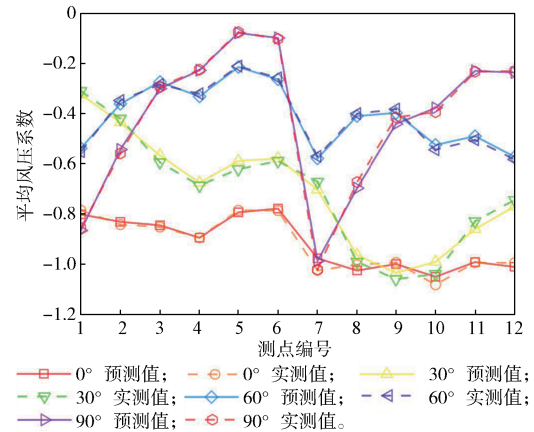


图 12 0° 至 90° 风向角下顶面平均风压系数对比

Fig. 12 Comparison of the mean wind pressure coefficients on the top surface at wind angles of 0° to 90°

选取结构在 0° 风向角下的风压系数试验数据, 以模型上部测点为 1-网函数插值节点, 计算可得模型上部表面除边界点外各测点的预测值, 图 13 中给出了模型高 850 mm 时各表面测点平均风压系数值。

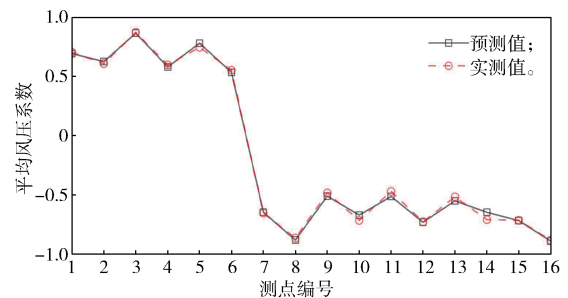


图 13 0° 风向角下各面测点平均风压系数对比

Fig. 13 Comparison of the mean wind pressure coefficients at all facades' measuring points at 0° wind direction angle

图 13 中, 1~6 号测点位于迎风面, 7~8 号和 15~16 号测点分别位于两侧面, 9~14 号测点位于背风面。可看出, 无论在建筑表面的迎风面还是侧面及背风面, 通过网函数插值计算出来的结果均与风洞试验值较接近。数据误差分析结果表明, 迎风面的预测效果较好, 误差比基本上可控制在 5% 以内, 侧面及背风面误差相对较大, 但其误差比基本上也可控制在 10% 以内。因此, 网函数插值方法可对建筑立面 (包

括侧面和背风面)上的风压进行有效预测。

3 结论

本文介绍了网函数插值的结构及其算法过程,并预测结构表面风压及风压时程,通过两个实例进行计算,得出以下结论:

1) 对于平板结构,应用网函数插值法计算得到的风压值与实测值差异较小,对仰角时的风荷载都能进行准确而有效的预测,最大误差在 10% 以内。

2) 对高层建筑表面及顶面上的风压系数的预测计算结果表明,应用网函数插值法计算得到迎风面风压系数预测结果的最大误差在 5% 以内,侧面和背风面预测结果的最大误差在 10% 以内。

3) 实例验证表明,基于网函数插值理论的数据融合方法可有效预测结构表面风压,在风洞试验中用于减少测点数量和和扩充复杂建筑表面风压分布数据方面有一定实用价值。

4) 网函数插值法可根据区域周边节点上的数值对内部节点处进行预测,易于以节点网的形式预测,精度较高,且易于编程计算。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 34—53.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load Code for the Design of Building Structures: GB 50009—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 34—53.
- [2] 沈国辉, 罗蒋皓, 钱 涛, 等. 长宽比对矩形截面高层建筑表面风压分布的影响研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(13): 67—72, 78.
SHEN Guohui, LUO Jianghao, QIAN Tao, et al. Research on Influence of Length-to-Width Ratios on Wind Pressure Distribution of Rectangular-Sectioned High-Rise Buildings[J]. Building Structure, 2015, 45(13): 67—72, 78.
- [3] 邵远航, 崔会敏, 刘庆宽, 等. 某超高层建筑表面风压分布研究[J]. 工程力学, 2021, 38(增刊 1): 26—30, 38.
SHAO Yuanhang, CUI Huimin, LIU Qingkuan, et al. Study on Wind Pressure Distribution on the Surface of a Super High-Rise Building[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(S1): 26—30, 38.
- [4] FU J Y, LIANG S G, LI Q S. Prediction of Wind-Induced Pressures on a Large Gymnasium Roof Using Artificial Neural Networks[J]. Computers & Structures, 2007, 85(3/4): 179—192.
- [5] 傅继阳, 谢壮宁, 倪振华. 大跨屋盖结构风压分布特性的模糊神经网络预测[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(1): 62—67.
FU Jiyang, XIE Zhuangning, NI Zhenhua. Prediction of Wind Load on Large Span Roof Using Fuzzy Neural Networks[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(1): 62—67.
- [6] UEMATSU Y, KURIBARA O, YAMADA M, et al. Wind-Induced Dynamic Behavior and Its Load Estimation of a Single-Layer Latticed Dome with a Long Span[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(14/15): 1671—1687.
- [7] 李方慧, 倪振华, 沈世钊. POD 方法在双坡屋盖风压场预测中的应用[J]. 工程力学, 2007, 24(2): 68—73, 79.
LI Fanghui, NI Zhenhua, SHEN Shizhao. Application of Pod to Prediction of Wind Pressure Fields of Pitched Roof[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(2): 68—73, 79.
- [8] 单文姗, 杨庆山, 田村幸雄, 等. 基于 POD 方法的高层建筑表面脉动风压场分解与重构[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(5): 47—57.
SHAN Wenshan, YANG Qingshan, TAMURA Yukio, et al. Decomposition and Reconstruction of Fluctuating Wind Pressure Fields on High-Rise Buildings Based on POD Method[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(5): 47—57.
- [9] LI H J, YANG S H. Using Range Profiles as Feature Vectors to Identify Aerospace Objects[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 41(3): 261—268.
- [10] 邱佩璋, 陈启宏. 网函数插值理论及其应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2007: 15—24.
QIU Peizhang, CHEN Qihong. Network Function Interpolation Theory and Its Application[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2007: 15—24.
- [11] WANG Z, CAI J J. Inversion of Radiation Field on Nuclear Facilities: A Method Based on Net Function Interpolation[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2018, 153: 27—34.
- [12] 王振宇, 黄伟奇, 孙 健, 等. 插值算法在辐射场重构中的应用现状[J]. 兵工自动化, 2022, 41(7): 29—35.
WANG Zhenyu, HUANG Weiqi, SUN Jian, et al. Application Status of Interpolation Algorithm in Radiation Field Reconstruction[J]. Ordnance Industry Automation, 2022, 41(7): 29—35.
- [13] 杨陈东, 曹盼盼, 杨慧慧, 等. 基于网函数插值的图像修复算法[J]. 计算机与数字工程, 2022, 50(3): 625—630.
YANG Chendong, CAO Panpan, YANG Huihui, et al. Image Inpainting Algorithm Based on Net Function Interpolation[J]. Computer & Digital Engineering, 2022, 50(3): 625—630.

(责任编辑: 廖友媛)