

Experimental Investigation of Blockage Effects on Mean Pressure of Tall Buildings

Yi Li*, Yonggui Li, Wenjun Tan

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan
Email: *engineerliyi@163.com

Received: Nov. 4th, 2017; accepted: Nov. 19th, 2017; published: Nov. 24th, 2017

Abstract

Based on five groups of different scale wind tunnel test models, this paper researches the effect of turbulence on the blockage effect of mean wind pressure on tall buildings under two different turbulence intensity wind fields. The experimental results show that the effects of the blocking effect on the mean pressure coefficient on windward surface of the model are slight. The difference of the blocking ratio has little effect of the pressure distribution of the windward surface. The increase of the blocking ratio makes the mean pressure coefficient of the side surfaces and leeward surfaces decrease more obviously. However, the increase of the turbulence will reduce the effect of the blocking effect on the mean wind pressure coefficient, and the increase of turbulence intensity has little effect on the blocking effect of the windward surface but the turbulence increase has a great influence on the side surfaces and leeward surfaces of the tall building model. Finally, the correction results of the blocking effect are verified under the low turbulence wind field and the correction formula for mean pressure coefficient is proposed based on the high turbulence.

Keywords

Tall Building, Wind Pressure Coefficient, Turbulence Intensity, Blockage Effect, Blockage Correction

高层建筑平均风压的阻塞效应试验研究

李毅*, 李永贵, 谭文俊

湖南科技大学, 土木工程学院, 湖南 湘潭
Email: *engineerliyi@163.com

收稿日期: 2017年11月4日; 录用日期: 2017年11月19日; 发布日期: 2017年11月24日

摘要

基于5组不同缩尺比的矩形高层建筑风洞试验模型,在两种不同湍流强度风场下研究湍流对高层建筑平均风压的阻塞效应影响。试验结果表明:同种风场下,阻塞效应对模型迎风面平均风压系数的影响较小,阻塞比的不同并没有引起迎风面压力分布的显著变化,阻塞比的增大使模型侧面和背风面平均风压系数降低较为显著。来流湍流增大会降低阻塞效应对平均风压系数的影响,湍流增大对迎风面阻塞效应影响较小,但对高层建筑模型侧面、背面阻塞效应影响较大;最后,对低湍流风场下阻塞效应修正公式进行了检验,并验证了高湍流风场下阻塞效应修正公式的适用性。

关键词

高层建筑, 平均风压系数, 湍流度, 阻塞效应, 阻塞修正

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

风洞试验是研究结构风工程的重要手段之一,模型风洞试验以洞壁为边界,而实际结构在大气中是无边界的,在有界的风洞中模拟无界大气中的流场,必然会伴随洞壁干扰问题,造成建筑气动力和流场方面的差别。风洞边界对模型绕流流场的横向约束称为“实体阻塞”,对模型尾流流场的横向约束称为“尾流阻塞”。上述这两种洞壁干扰即为阻塞效应[1]。风洞试验时,为尽量模拟出高层建筑的细部构造,所以在允许的范围内建筑模型应尽可能大,这也造成高层建筑模型的阻塞比较大,这对于试验段截面较小的风洞而言,阻塞效应则是经常面临的问题。

风工程研究者对建筑阻塞效应的研究已有几十年的历史,Hunt [2]对湍流边界层流场中的立方体模型进行了风洞试验,试验表明 8%的阻塞度对平均风压的影响不足 2%,对脉动风压的影响不足 10%;Jancauskas [3]通过不同来流湍流强度的风洞试验研究了湍流强度对二维方柱的洞壁阻塞效应的影响,得出了来流湍流增大使洞壁阻塞效应干扰量减少的结论。徐永定和吕录勋[4] [5]建筑分别进行了测力以及测压试验,研究不同湍流度下的阻塞效应,试验表明高湍流度气流中的洞壁阻塞干扰值低于低湍流度气流中的干扰值,并且高湍流度情况下的阻塞干扰修正系数低于低湍流度情况下的值;顾明和黄剑[6]对单体矩形高层建筑平均风压的阻塞效应进行了试验研究,发现阻塞效应对模型迎风面平均风压系数的影响较小,阻塞效应对模型侧面、背风面和顶面平均风压系数影响较为显著,但平均风压系数分布规律没有明显变化;苏万林和李正农[7]研究来流湍流强度对高层建筑风压幅值特性的影响;试验表明湍流强度增大时,模型 4 个立面平均风压系数在数值上都是增大的,平均风压系数绝对值在迎风面是增大的,其他 3 个面均是减小的。

在结构抗风设计中,对结构表面分压分布特性的把握是结构风荷载分析的前提[8],对于建筑模型风洞试验平均风压的阻塞效应已经有一定的研究,但至今并没有一个风工程界普遍认可的矩形高层建筑风洞试验阻塞效应的理论及修正方法[6]。本文以 5 组不同缩尺比的单体矩形高层建筑模型为试验对象,在两种不同湍流强度的风场下研究了模型表面平均风压特性。对比了各模型迎风面、侧面、背风面的平均风压系数。在 Peitzman [9]方法的基础上,引入阻塞效应调整因子,提出了适用于本试验的平均风压系数

阻塞效应修正公式，对试验结果进行修正。修正结果表明，此修正方法能很好地适用于本试验。

2. 风洞试验概况

2.1. 风洞试验设备及流场模拟

试验在湖南科技大学风工程试验研究中心的大气边界层风洞中进行。该风洞是一座全钢结构的水平直流吸入式低速风洞，主试验段尺寸为 $4.0 \times 3.0 \times 21.0$ (宽 \times 高 \times 长)，试验风速可调范围为 $0\sim 30$ m/s。压力采集设备为美国 PSI 电子压力扫描阀(512 通道)。试验测点采样频率为 332 Hz，采样长度为 10,000 次。各模型分别在湍流强度为 0.4% 的低湍流度风场以及湍流强度为 10.4% 的高湍流度风场中进行试验。低湍流度风场空风场是指试验段不放置任何装置，而高湍流度风场是利用在试验段入口截面设置木板格栅的办法获得，木板格栅由从上到下等间距分布的等宽度木板组成，调节板距及格栅与模型的距离可以在模型区得到所需要的湍流度。试验模拟的平均风速及湍流度剖面见图 1，试验模型和木板格栅见图 2。

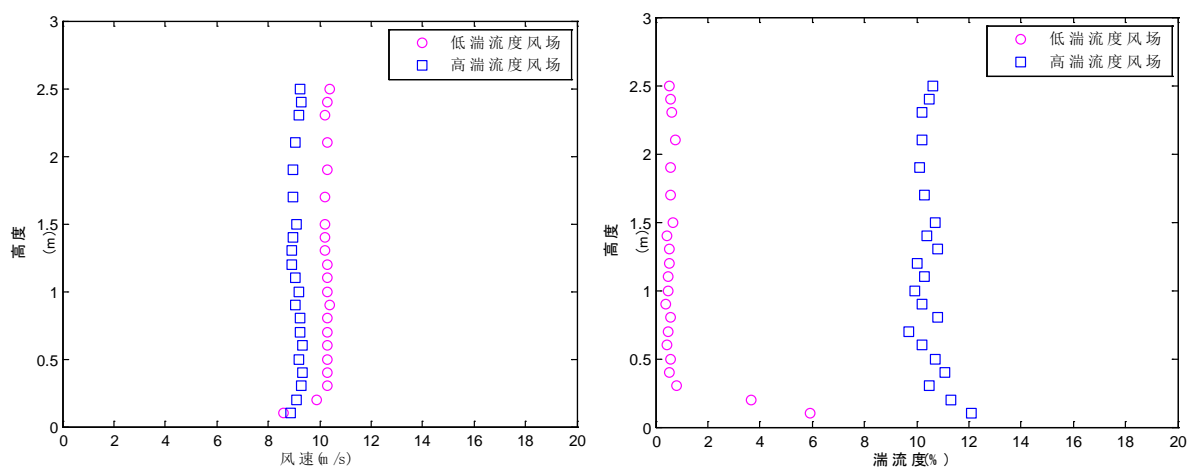


Figure 1. Simulated wind field

图 1. 试验模拟风场



Figure 2. Model in the wind tunnel

图 2. 风洞试验模型

2.2. 试验模型

以 CAARC 高层建筑模型为标准，风洞试验模型采用 5 种缩尺比，阻塞度变化范围 3.1%~10.9%。模型尺寸见表 1。试验模型由 ABS 板制作而成，具有足够的刚度，测点孔直径为 1 mm，测压管与扫描阀之间采用 PVC 管连接，各模型测压管长度均采用 850 mm，以避免测压管长度不同或者管道过长所带来的误差。

2.3. 试验方案及测点布置

为测得建筑结构的外表面压力，在每个模型周围四个立面的外表面上布置了多个测点。各侧面测点层从上至下有 B、C、D、E、F、G、H、J、K、L、M、N、P 层，其中在各模型 1/2H(J 层)和 2/3H(G 层)处分别进行了测点加密处理。5 组模型 13 层测点除测点层 J 层外其他测点层布置方式数量都一致。其中 M1 模型测点共 468 个，J 层有 84 个。M2~M5 模型 J 层分别有 92、104、112、124 个测点。为了方便试验的进行和数据处理，将模型的 4 个立面分别标示为 A 面、B 面、C 面和 D 面，本文仅分析 0° (模型宽面迎风)风向角的情况，模型的测点布置及风向角示意图如图 3。

Table 1. Model size
表 1. 模型尺寸

缩尺比	模型编号	高/mm	宽/mm	厚/mm	阻塞度/%
1:150	M1	1219.2	304.8	203.2	3.1
1:125	M2	1463	365.8	243.8	4.5
1:105	M3	1741.7	435.4	290.3	6.3
1:90	M4	2032	508	338.7	8.6
1:80	M5	2286	571.5	381	10.9

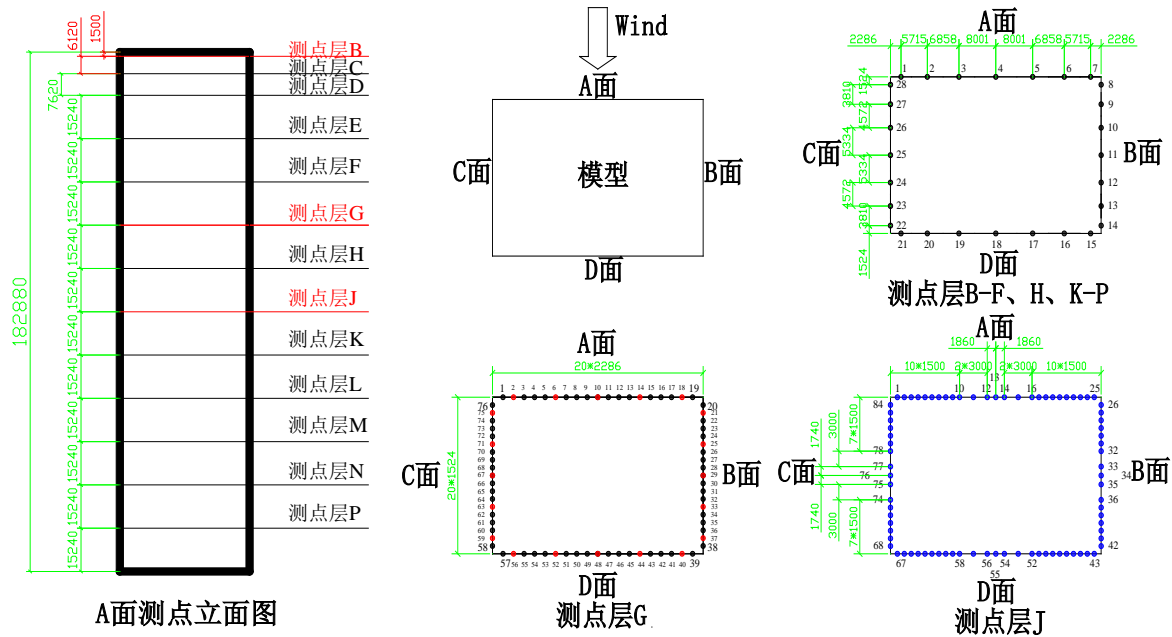


Figure 3. Layout of pressure measurements on test building and wind direction
图 3. 试验模型测点布置及风向角示意图

3. 试验结果及其分析

3.1. 平均风压系数

各测点平均风压系数表达式[10]为:

$$\bar{C}_{Pi} = \frac{\bar{P}_i - P_0}{0.5\rho V_H^2} \quad (1)$$

式中: \bar{C}_{Pi} 为测点 i 处的平均风压系数; \bar{P}_i 为测点的风压值; P_0 为参考静压, ρ 为空气质量密度(取 1.225 kg/m^3); V_H 为参考点 H 处的平均风速。

为方便分析, 将各模型的平均风压系数与模型 M1 的平均风压系数差值与 M1 的平均风压系数之比称为各模型平均风压系数的相对差值:

$$\Delta S = \frac{S_{Mi} - S_{M1}}{S_{M1}} \quad (2)$$

式中, S_{Mi} 为模型 Mi 的平均风压系数, $i = 2 \sim 5$ 。

图 4 为低湍流度风场下模型各面平均风压系数, 图中横坐标为测点编号。从图中可以看出: 1) 5 个测压模型平均风压系数曲线升降规律较为一致, 说明阻塞度的变化并没有显著引起迎风面平均风压分布

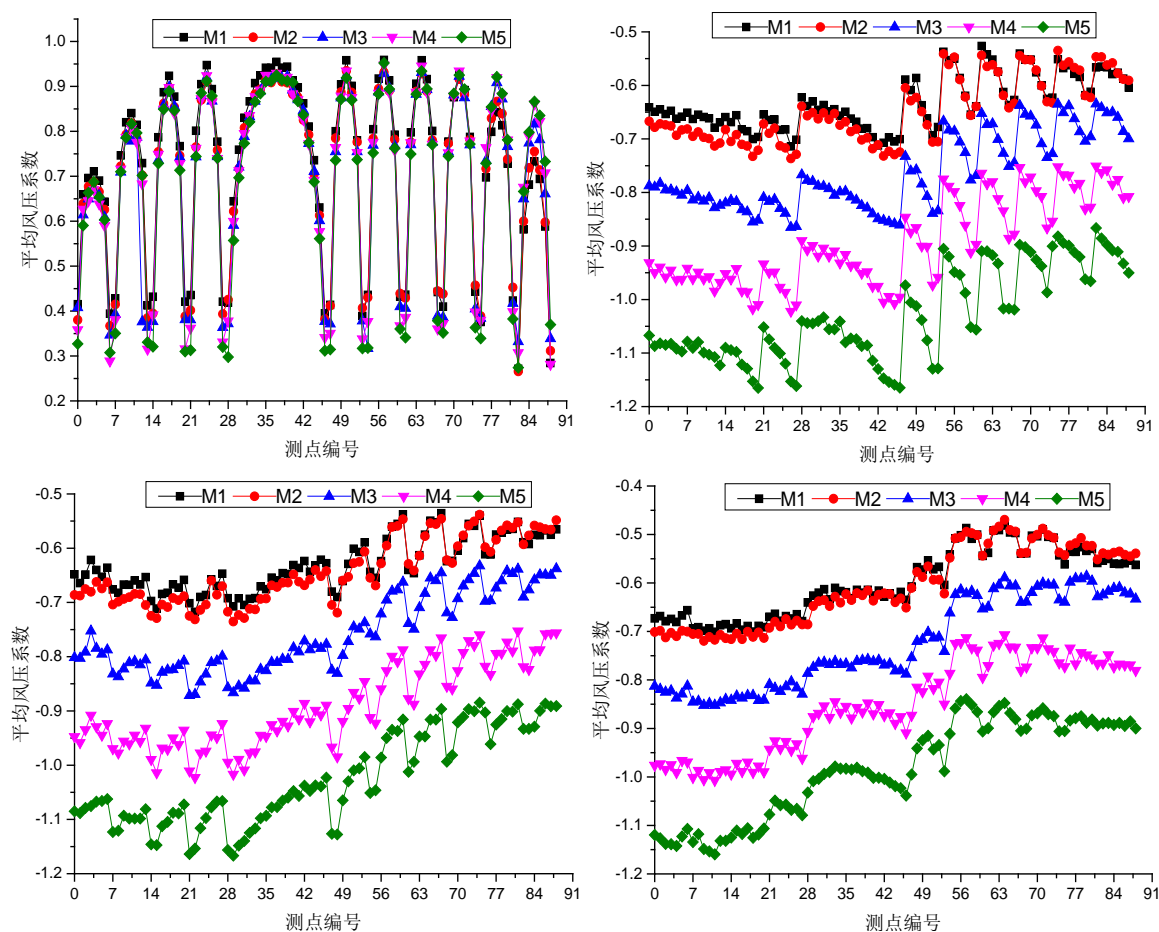


Figure 4. Mean pressure coefficient on model surface under low turbulence intensity wind field

图 4. 低湍流度风场下模型表面平均风压系数

的变化。对于迎风面较低的位置，阻塞度越小，平均风压系数越小，这主要是受边界层的影响；2) 对于侧面和背面，随着阻塞度增加平均风压系数明显下降，但各表面平均风压系数的分布规律并没有改变；3) 对于阻塞比小于 5% 的两组模型，可以发现两组模型平均风压系数相差较小，这也与文献[11] [12]所提出的对于阻塞比控制在 5% 以内就可以忽略阻塞效应结论一致。

图 5 为高湍流度风场下模型各面平均风压系数：1) 随着湍流的增大，5 个测压模型平均风压系数曲线升降规律变化不大，说明湍流度的不同并没有显著引起四个立面压力分布的变化，但局部平均风压系数波动会更明显；2) 湍流度的增大并没有引起迎风面的变化，但对于侧面及背面，随着湍流度增大，5 组模型平均风压系数曲线相互靠近，模型之间平均风压系数差值减小，说明阻塞效应对模型平均风压系数的影响减弱。其中侧面和背面平均风压系数变化的主要原因是沿建筑模型侧面的剪切层以及尾流涡脱落受到湍流度影响。

图 6 为低湍流度风场下模型各面平均风压系数与 M1 的相对差值。对于迎风面 A 面测点，模型 M2~M5 在较低位置、和角部测点的相对差值较大，在其它位置的相对差值较小。在同一阻塞度时，侧面和背风面平均风压系数的相对差值都接近同一数值。对于阻塞度不同的模型，阻塞度越大侧面和背风面相对差值越大，并且平均风压系数波动越大，同时阻塞度越大的模型侧面和背风面的平均风压系数的相对差值的在整个表面上的一致性不如阻塞度小的模型。

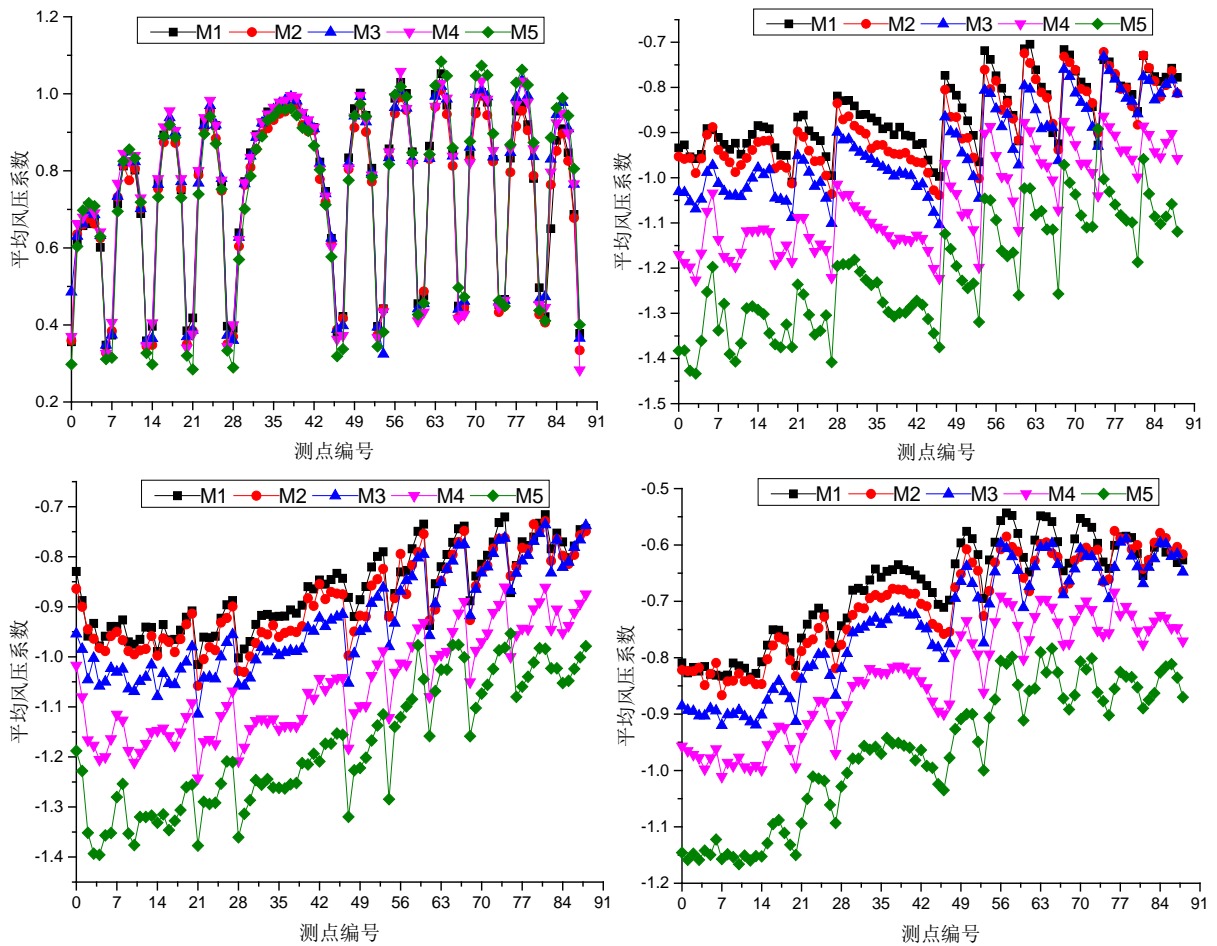


Figure 5. Mean pressure coefficient on model surface under high turbulence intensity wind field

图 5. 高湍流度风场下模型表面平均风压系数

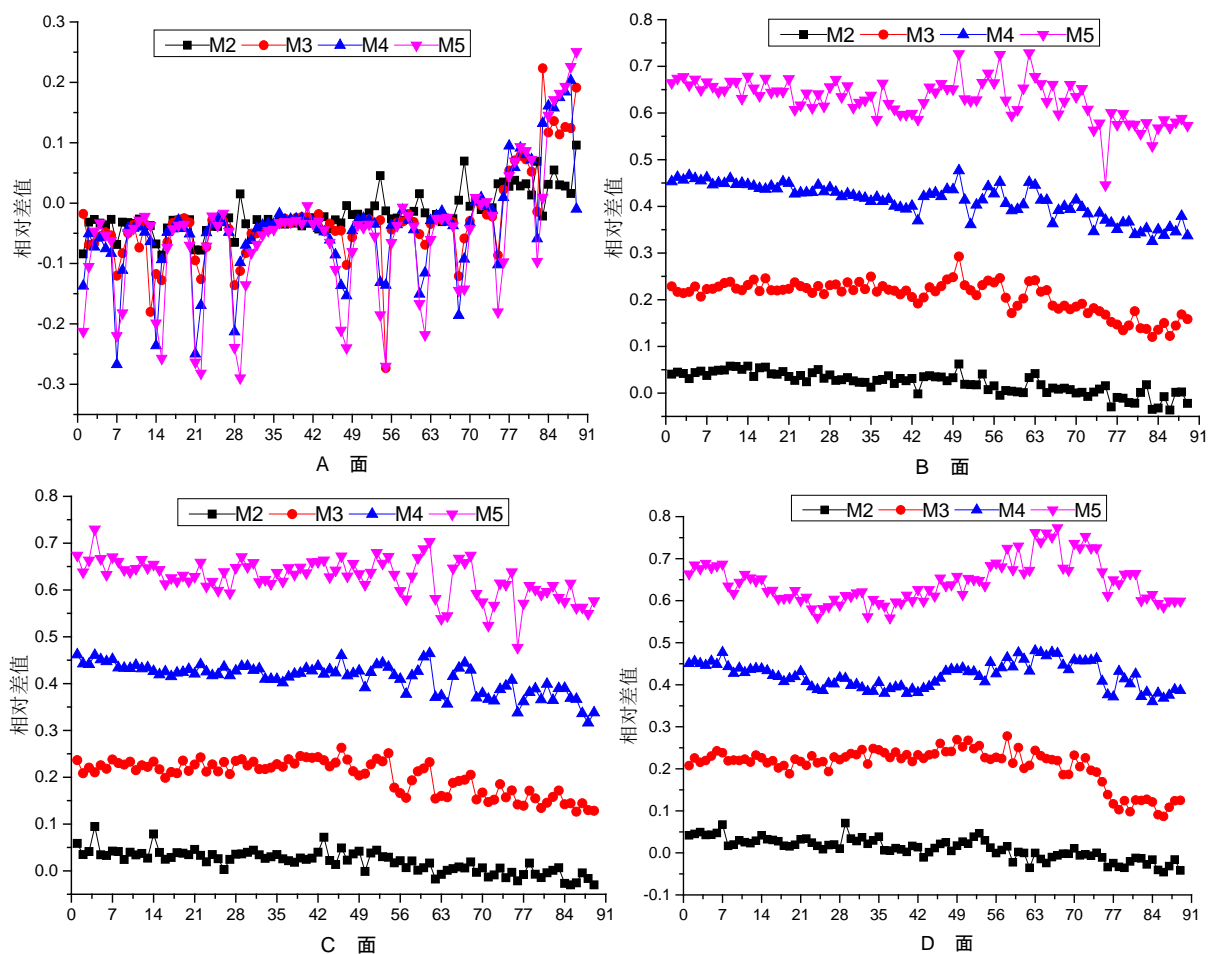


Figure 6. Relative difference of mean pressure coefficient on model surface under low turbulence intensity wind field
图 6. 低湍流度风场下模型表面平均风压系数相对差值

图 7 为高湍流度风场下模型各面平均风压系数与 M1 的相对差值。对于迎风面 A 面测点，与低湍流度风场下比较，可以发现模型 M2~M5 相对差值曲线向相对差值为 0 这条直线靠近，模型 M2~M5 与 M1 的平均风压系数的差值减小，说明湍流增大减弱了阻塞效应对模型的影响。同时随着湍流度的增大，模型的各个面的相对差值曲线都整体向下移动，这也说明来流湍流的增大使阻塞效应的干扰量减少。这与 Jancauskas. E. D [3]关于二维方柱的阻力试验结果是一致的。

3.2. 实验数据修正

基于试验的修正方法

阻塞效应修正方法多采用试验结果的拟合方法，现阶段众多学者分别提出了针对平均风压系数的阻塞效应修正公式，但对修正方法中主要考虑的参数都不一样。对于本试验的矩形结构的风洞试验阻塞效应修正公式主要分为两种：Peitzman 法[9]和 Maskell 法[13]。顾明基于 Peitzman 法，将其进一步修正，引入阻塞效应调整因子 k ，提出了适合实验的阻塞效应修正公式[14]：

$$\bar{C}_p = \bar{C}_{po} \frac{1}{\left(1 - k \frac{S}{A}\right)^2} \quad (3)$$

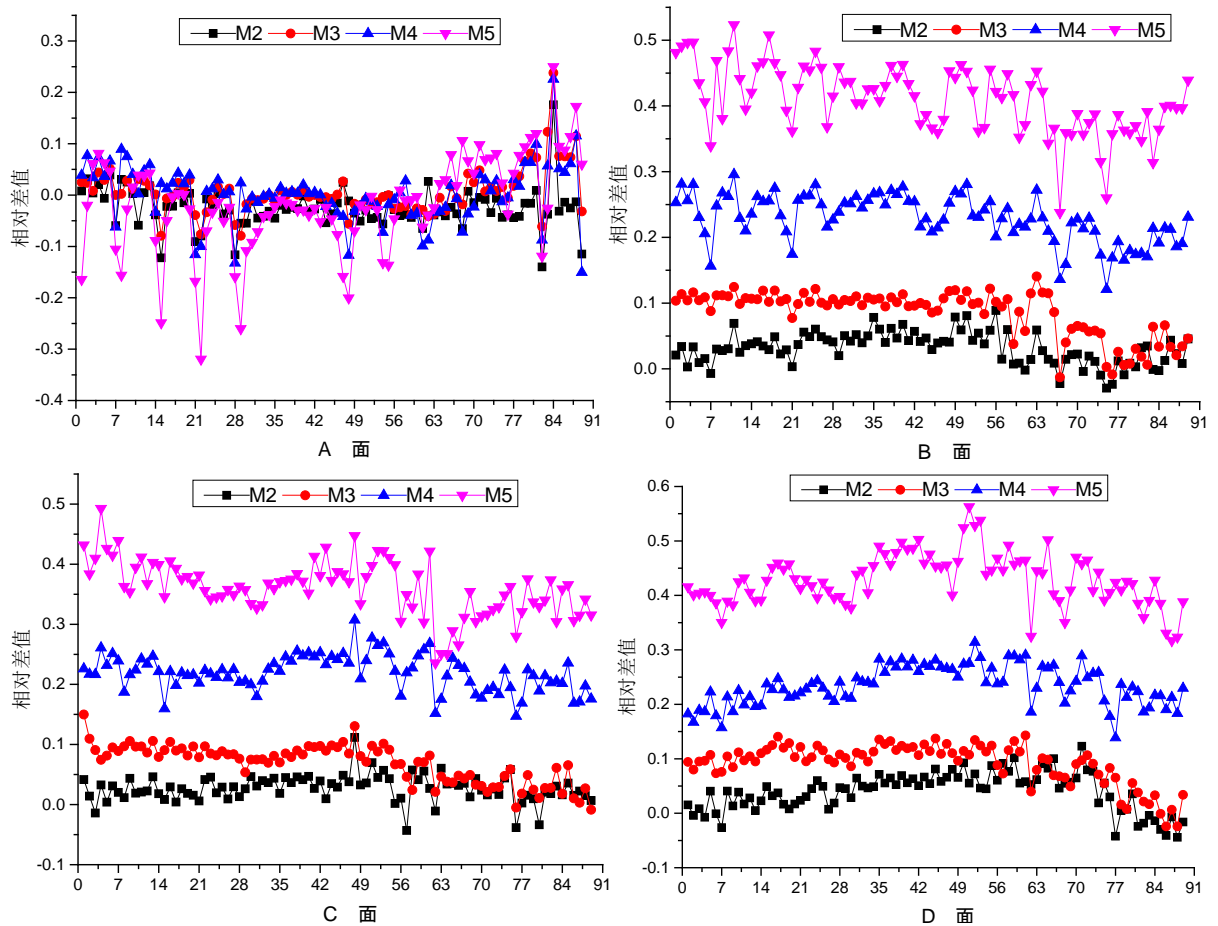


Figure 7. Relative difference of mean pressure coefficient on model surface under high turbulence intensity wind field
图 7. 高湍流度风场下模型表面平均风压系数相对差值

式中, \bar{C}_p 为排除阻塞效应的模型表面平均风压系数, \bar{C}_{p0} 为试验获得的模型表面平均风压系数, k 为修正因子。

对于本试验中低湍流度风场下的阻塞效应修正, 因本文试验低湍流风场与顾明试验风场相同, 并且同为 CAARC 高层建筑模型, 采用公式(3)进行修正, 而对于高湍流度风场, 因为修正方法的本质是阻塞效应引起了模型处的风速增大, 而与湍流强度无关。所以高湍流风场下同样采用公式(3)修正, 并对修正结果进行验证。迎风面测点无需修正, 基于 $1/2H$ 高度以上平均风压系数拟合参数, 结果见于图 8、图 9。由图可见, 各面不同的测点的拟合结果较为接近。对图 8、图 9 相同面上测点的参数拟合结果进行了平均处理, 图中水平直线即为平均处理所得均值, 则模型各面修正公式中的参数 k 即采用各面所对应的均值。

采用式(3)对 G 层测点平均风压系数修正, 本模型测点层 G 层位于 $2/3H$ 处, 且为加密层, 修正结果如图 10 所示, 表格是经过公式(3)修正后 5 组模型各面所有测点相对差值的均值, 通过图 8 和表 2 可见修正结果较为满意, 这同时说明公式(3)可应用于高湍流度风场。

4. 结论

1) 同种风场下, 阻塞效应对模型迎风面平均风压系数的影响较小, 并且阻塞比的不同并没有显著引起迎风面压力分布的变化。阻塞比的增大使模型侧面背风面和顶面平均风压系数降低较为显著, 但各模

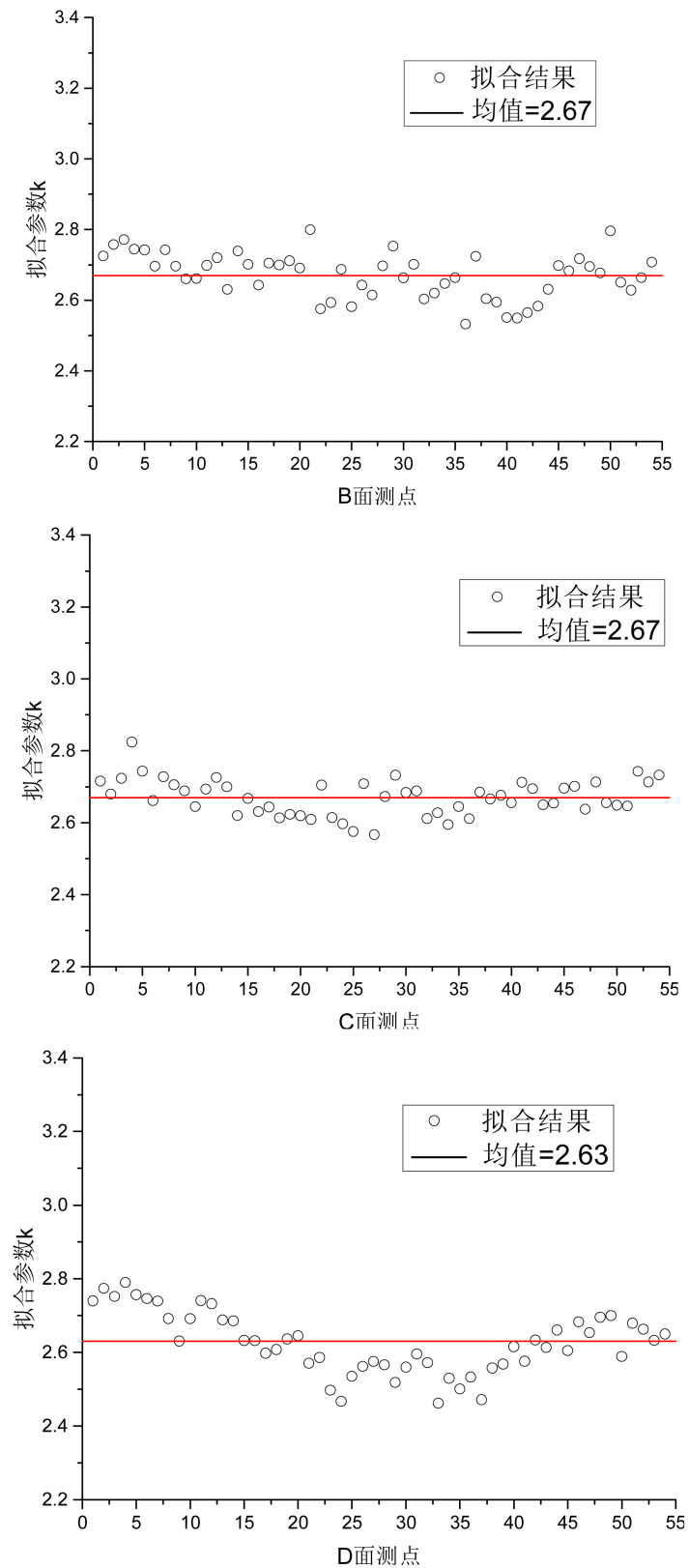


Figure 8. Parameter fitting of k under low turbulence intensity wind field
图 8. 低湍流度风场下参数 k 的拟合结果

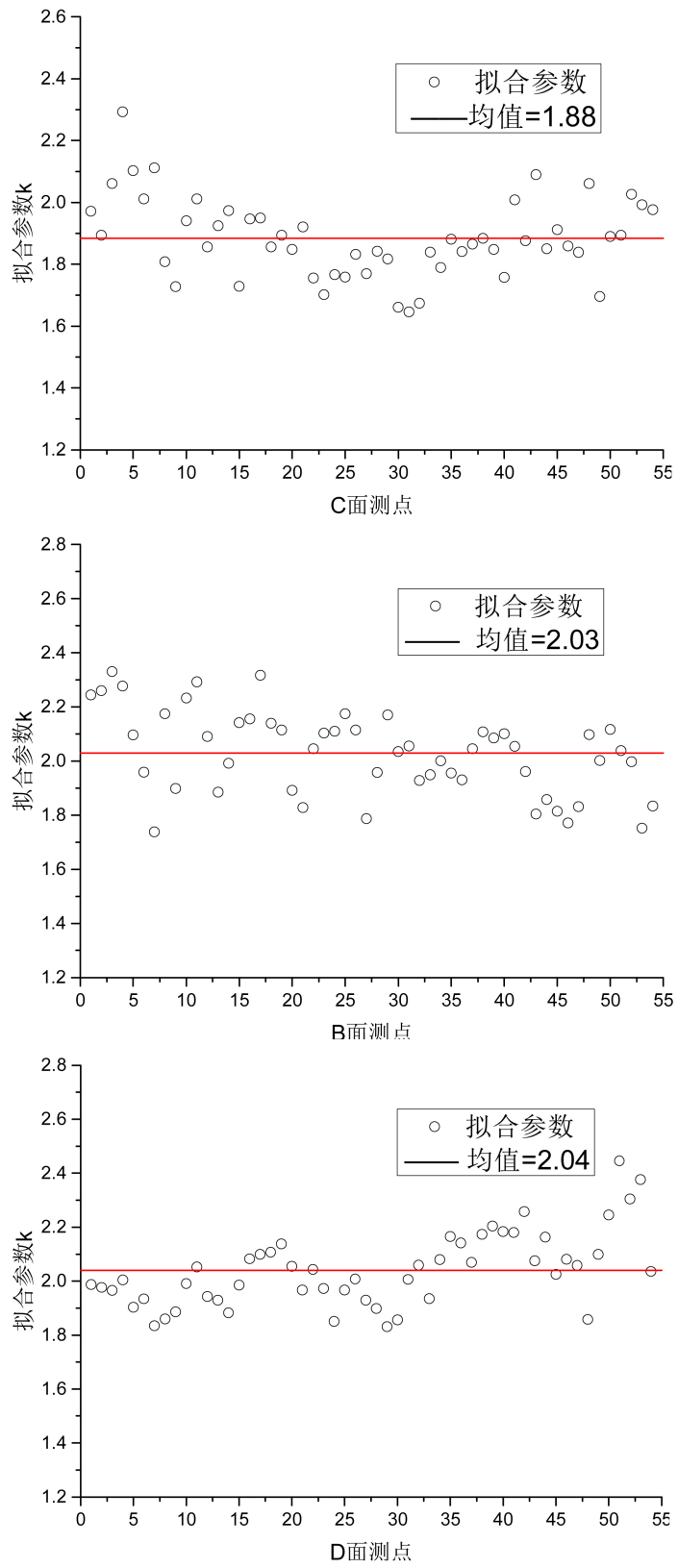


Figure 9. Parameter fitting of k under high turbulence intensity wind field
图 9. 高湍流度风场下参数 k 的拟合结果

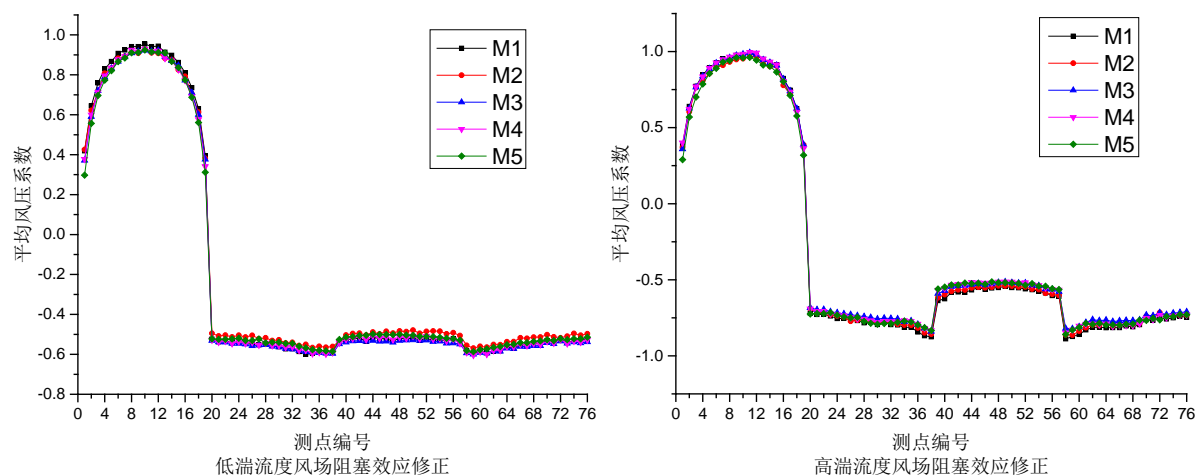


Figure 10. Corrected mean pressure coefficient on G layer of the model

图 10. 模型 G 层处平均风压系数修正结果

Table 2. Relative difference of mean pressure coefficient correction result

表 2. 相对差值修正结果

模型(阻塞比)	B面(修正后的相对差值)		C面(修正后的相对差值)		D面(修正后的相对差值)	
	上: 低湍流度风场	下: 高湍流度风场	上: 低湍流度风场	下: 高湍流度风场	上: 低湍流度风场	下: 高湍流度风场
M2 (4.5%)	2.2% (-6.0%) 3.1% (-3.0%)		2.0% (-6.1%) 2.7% (-2.5%)		1.0% (-6.9%) 4% (-3.5%)	
M3 (6.3%)	20.7% (-0.7%) 8.5% (-6.0%)		20.2% (-1.1%) 7% (-6.3%)		20.8% (-0.3%) 9.1% (-8.2%)	
M4 (8.6%)	41.2% (-0.4%) 22.9% (-4.7%)		41.3% (-0.3%) 22% (-3.4%)		42.2% (1.0%) 23.5% (-9.2%)	
M5 (10.9%)	63.0% (-2.7%) 40.7% (-2.8%)		62.6% (-2.8%) 35.9% (-3.2%)		64.5% (-0.7%) 42.9% (-9.0%)	

型平均风压系数曲线升降规律较为一致。对于阻塞度不同的模型，阻塞度越大侧面和背风面相对差值越大，并且平均风压系数波动越大。

2) 来流湍流增大将会降低阻塞效应对平均风压系数的影响，但对阻塞比小于 5% 的模型，湍流增大对模型没有显著的影响。湍流增大对迎风面阻塞效应影响较小，湍流增大对矩形建筑模型侧面、背面阻塞效应影响较大。湍流度的不同并没有显著引起四个立面压力分布的变化，但局部平均风压系数波动会更明显。

基于本试验两种风场的试验数据，利用单体矩形高层建筑模型表面平均风压的阻塞效应修正公式对两种不同风场进行修正，修正结果显示公式能正确有效地修正阻塞效应造成的试验误差。

项目基金

国家自然科学基金(51708207, 51508183); 湖南省教育厅开放基金资助(15K044)。

参考文献 (References)

- [1] 程厚梅. 风洞实验干扰与修正[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

- [2] Hunt, A. (1982) Wind Tunnel Measurements of Surface Pressures on Cubic Building Models at Several Scales. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **10**, 137-163. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(82\)90061-7](https://doi.org/10.1016/0167-6105(82)90061-7)
- [3] Jancauskas, E.D. (1984) The Dragon Two-Dimensional Rectangular Cylinder in Smooth Flow and Turbulence. PhD Thesis, James Cook University, Townsville,
- [4] 徐永定, 吕录勋. 切角三角形柱体模型的洞壁阻塞干扰研究[J]. 气动实验与测量控制, 1987, 1(2): 21-26.
- [5] 徐永定, 吕录勋. 多角柱体表面压力洞壁阻塞干扰的试验研究[J]. 气动实验与测量控制, 1989, 3(3): 21-25.
- [6] 黄剑, 顾明. 矩形高层建筑平均风压的风洞阻塞效应试验研究[J]. 空气动力学报, 2015, 33(3): 414-419.
- [7] 苏万林, 李正农. 湍流对高层建筑风压幅值特性影响的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(3): 118-126.
- [8] 李元齐, 田村幸雄, 沈祖炎. 球面壳体表面风压分布特性风洞试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(5): 104-111.
- [9] Peitzman, F.W. (1978) Low Speed Wind Tunnel Investigation to Develop High Attitude Wall Correction in the Northrop 7×10-Foot Low Speed Wind Tunnel. NOR 78-20.
- [10] 黄本才, 汪从军. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海: 同济出版社, 2008.
- [11] Hlomes, J.D. (2001) Wind Loading of Structures. Taylor & Francis, New York. <https://doi.org/10.4324/9780203301647>
- [12] 日本风洞实验指南研究委员会. 建筑风洞实验指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [13] Maskell, E.C. (1963) A Theory for the Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel. ARC R&M 3400.
- [14] 黄剑, 顾明. 均匀风场中高层建筑平均风力的阻塞效应[J]. 同济大学学报(自然科学版), 42(6): 853-859.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0557, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: ijfd@hanspub.org