

文章编号: 1000-5013(2011)05-0579-05

低矮建筑屋面风荷载体型系数的数值模拟

彭兴黔, 刘春艳, 徐刚

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 采用剪切应力输运(SST) $k-\omega$ 模型,对门式刚架屋面风场和表面风压进行数值模拟分析. 在不同高宽比、长宽比及不同坡度情况下,研究低矮双坡房屋的屋面风荷载体型系数的变化规律和分布特征. 结果表明,低矮建筑的屋面分压分布与屋面的长宽比、高宽比及主导风向均有很大的关系;随着高宽比和长宽比的增大,屋面分区的风荷载体型系数的变化呈先平缓后增加的趋势,而屋面坡度变化对风荷载体型系数的影响较小. 在门式刚架抗风设计时,高宽比和长宽比最优选择分别为 0.38 和 2.5.

关键词: 低矮建筑; 体型系数; 风荷载; 屋面; 数值模拟

中图分类号: TU 312⁺.1

文献标志码: A

在我国风灾造成的人员伤亡及财产损失中,由于低矮建筑的局部掀落、结构损坏和风毁倒塌而产生的人员伤亡及财产损失占了很大一部分. 历次风灾调查表明^[1],低矮型建筑物特别是轻钢工业厂房,往往是从其薄弱部位如外表面围护结构、屋面结构开始破坏的. 在台风袭击过程中,这些薄弱部位由于没有加强抗风处理而往往先行破坏,且大多源于屋面结构的破坏,导致整个维护结构破坏^[2]. 我国尚未对屋面构造优化以提高结构的抗风性能提出相应的规定,这与美国、加拿大、澳大利亚等国的规范存在着明显的差距^[3]. 因此,深入开展低层房屋风荷载特性的研究,提出有效的抗风措施,具有十分重要的意义. 本文在屋面的细部构造上,以门刚常用的几何尺寸作为影响风荷载体型系数的主要因素,通过结构优化来定量沿海地区轻钢工业厂房的最优尺寸.

1 数值风洞模拟

1.1 数值风洞与计算模型的选择

分别采用 ANSYS ICEMCFD 10.0 软件和计算流体动力学软件 ANSYS CFX 10.0 进行建模和计算. 为适应低矮建筑的体型要求,模拟区域内风的流动特性,要求计算模型附近的网格小,分布密集,而远离模型的网格较大,分布稀疏. 采用具有良好适应性的四面体网格离散单元^[4],每种工况产生约 100~120 万个四面体单元,如图 1 所示.

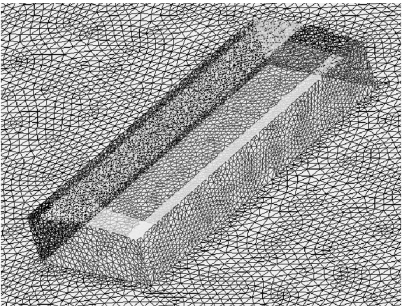


图 1 建筑表面的网格划分

Fig. 1 Grid of building surface

为了便于比较分析,主要对不同屋面坡度、高宽比和长宽比等工况进行数值模拟. CECS 102:2002《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(简称“门刚规程”)对围护结构风荷载体型系数分区的规定是,将门式刚架划分成若干区域. 屋面分区及风向示意,如图 2 所示.

1.2 基本方程及湍流模型的选择

1.2.1 控制方程 采用由湍流模型封闭控制方程进行求解的时均模拟方法,其气流流动控制方程^[5]的

收稿日期: 2010-11-22

通信作者: 彭兴黔(1959-),男,教授,主要从事钢结构抗风抗火的研究. E-mail:pxq@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(E0510022); 福建省泉州市科技计划重点项目(2007G7); 福建省厦门市发改委科技计划项目(2008-70)

通用形式为

$$\frac{\partial (\rho \varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \varphi) = \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad } \varphi) + S.$$

(1)

式(1)中:各项依次为瞬态项、对流项、扩散项和源项; ρ 为空气的质量密度; \mathbf{u} 为速度矢量; φ 为通用变量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项.

1.2.2 湍流模型和边界条件 湍流模型采用剪切应力输运模型(SST $k-\omega$ 模型),在分离流场可以给出较高精度,而且收敛性好.入口边界条件取 $\bar{\mathbf{u}}(Z) = \bar{\mathbf{u}}_b \times (Z/Z_b)^\alpha$. 其中:地面粗糙度指数 α 为 0.22, $\bar{\mathbf{u}}_b = 5.35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $Z_b = 10 \text{ m}$. 入口湍流剖面按湍动能 $k(Z)$ 和耗散率 $\epsilon(Z)$ 的形式输入,其表达式^[6]为

$$\left. \begin{aligned} k(Z) &= \gamma [I(Z) \bar{\mathbf{u}}(Z)]^2, \\ \epsilon(Z) &= \frac{\beta C_\mu^{3/4} k(Z)^{3/2}}{KL_u}. \end{aligned} \right\}$$

(2)

式(2)中:系数 $C_\mu = 0.09$; $\gamma = 1.2$; $\beta = 1$; $K = 0.4$;按文献[7]经验式,湍流积分尺度 $L_u = 100(Z/30)^{0.5}$;按文[8]经验式,湍流强度 $I(Z) = 0.1 \times (Z/Z_G)^{-a-0.05}$. 地面建筑物表面采用非滑移壁面,数值风洞的两侧面和顶面采用自由滑移壁面,出口采用开放式的压力出口,湍流已经充分发展(静压为零).

为保持入口处的边界条件,在内部无扰动的空风洞中进行实验.入口处的边界条件对风场模拟的影响很大^[9],距入口一段距离后,未受扰动新位置的平均风速和湍流剖面不一定与入口保持一致.在数值风洞模拟的稳态计算中,对建筑物表面平均压力起主要作用的是平均风剖面,如图 3 所示.通过修改式(2)中的参数 $\gamma = 0.5$ 和 $\beta = 4$,修正湍流风剖面,重点保证平均风剖面在流场中的保持,同时尽量考虑湍流强度的保持.

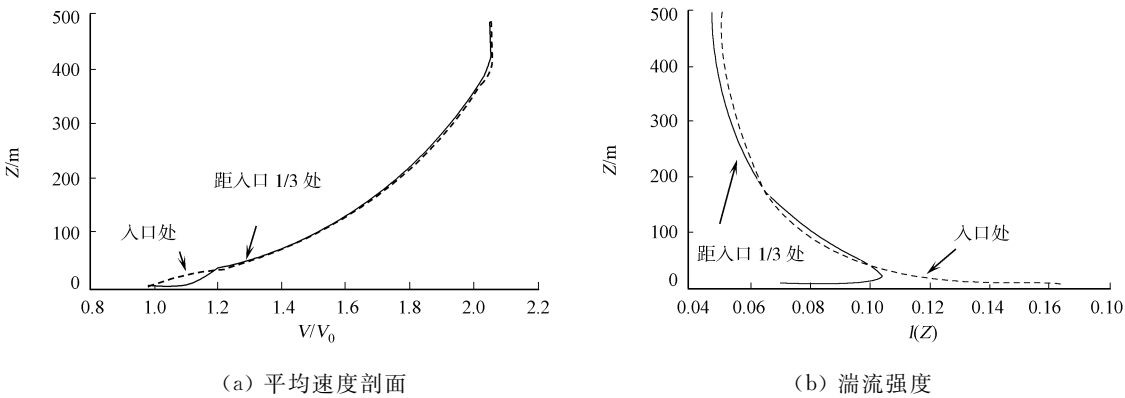


图3 C类地貌入口和距入口1/3风剖面比较

Fig. 3 Wind profile at the entrance and 1/3 away from the entrance of exposure category C

1.3 风速矢量模拟结果

流体的风速矢量图,体现了气体分离和背风面处大涡流的气流流态和相对数量的大小.矢量图中,箭头指向为速度方向,而箭头的大小为风速值.在4.5 m高度处,不同风向角度对应的水平剖面的风速矢量,如图4所示.

从图4(a)可以看出,0°风向与90°风向的情况类似,气流的分离区增多,气流扰动更加剧烈,表现出强烈的分离、附着和回流,在背风面后部均出现了对称的涡流,长度较长而强度却较小.在转角处湍流分离强度增大,沿侧风面对称分布.

从图4(b)可知,45°风向角的气流在建筑的背风面形成强烈的回流区,转角处风速达到极值;与0°风向相比,未形成明显的涡流.迎风面风速沿建筑的长边与短边均匀分布,较好地反映出建筑周围平均风速的相对量值大小和流线分布情况.

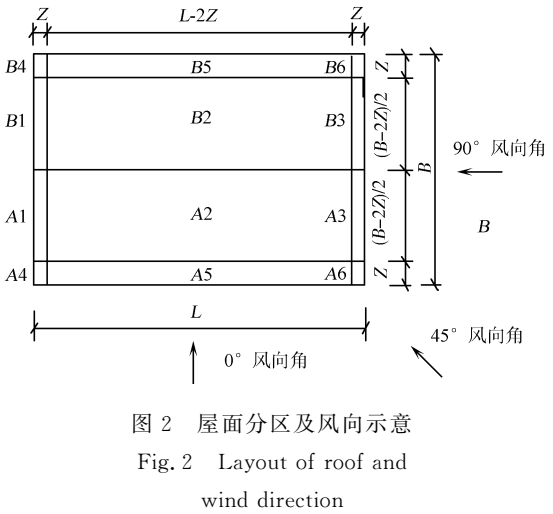


图2 屋面分区及风向示意
Fig. 2 Layout of roof and wind direction

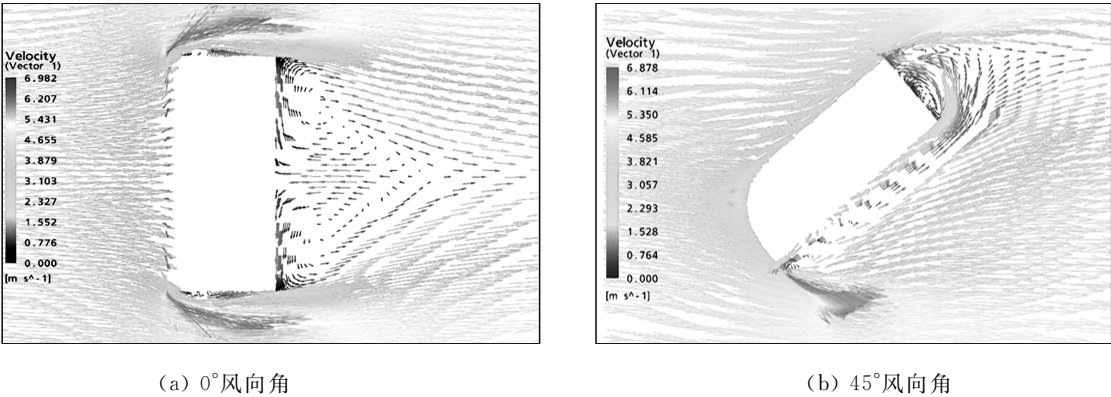


图 4 水平剖面的风速矢量
Fig. 4 Wind velocity vector of the horizontal cross section

2 屋面各分区体型系数的影响因素分析^[10]

2.1 不同高宽比

在长宽比为 2.5,坡度为 1/10 时,考察高宽比对屋面各分区风荷载体型系数的影响,如图 5 所示. 从图 5 可看出,当高宽比在 0.25~0.38 时,各风向角下屋面分区的风荷载体型系数变化幅度很小. 在 0°风向角,迎风面区 A1 面与 A3 面的体型系数近似,取一常数约为-0.65;A2 面体型系数可简单取-0.92;A6 面与 A4 面体型系数近似,可取-1.6;A5 面的体型系数绝对值递增,从 1.46 变化到 1.75;背风面区 B4 面与 B6 面近似,体型系数取-0.35;B1,B2 面及 B3 面的体型系数可简单取为-0.43,而 B5 近似取-0.3. 在 45°风向角,除 A4 面变化比较大,体型系数绝对值从 0.50 增到 0.72,其他分区都可简单取为常数计算. 在 90°风向角,屋面作为侧风面的区域均表现为负压,其体型系数(绝对值)变化较小,A1 面,A2 面,A4 面,A5 面,B1 面,B2 面,B4 面及 B5 面的体型系数可近似取-0.16;A3 面,A6 面,B3 面及 B6 面的体型系数可简单取为-1.0.

当高宽比在 0.38~0.45 时,各风向角下,屋面体型系数绝对值变化趋势较大,大部分呈递增趋势,可按线性插值来计算.

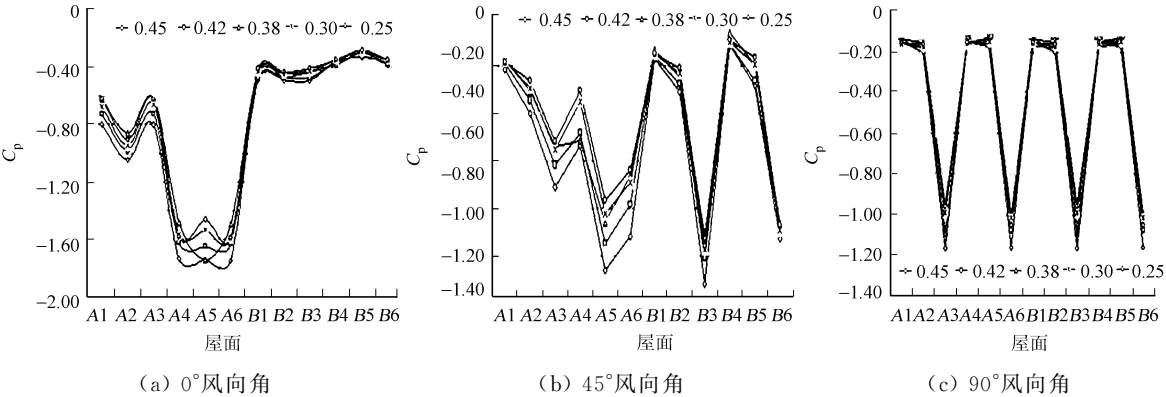


图 5 屋面各分区体型系数随高宽比的变化

Fig. 5 Variation of shape coefficient of the roof section with height and width

2.2 不同长宽比

在高宽比为 0.38,坡度为 1/10 时,考察长宽比对屋面各分区风荷载体型系数的影响,如图 6 所示. 从图 6 可知,当长宽比在 2.0~2.5 时,0°风向角下,迎风面区 A5 面体型系数绝对值先减小后增大,其极值达到-1.83,处于最不利风向角;A1 面与 A3 面近似,体型系数取-0.69;A2 面曲线趋于平缓,体型系数取-0.9;A4 面与 A6 面可简单取为常数,体型系数约-1.6. 背风面区 B1,B2 面及 B3 面的体型系数可近似取-0.45;B5 面变化较小,体型系数可取常数约-0.3;B4 与 B6 面变化趋势较为一致,体型系数可取-0.36. 45°风向角下,屋面各分区的体型系数变化一致,绝对值呈递减趋势,可以按线性

插值来计算. 在 90° 风向角下, A1 面, A2 面, A4 面, B2 面, B4 面的体型系数变化趋势大致相同, 取常数 -0.09 ; A3 面与 B3 面近似, 体型系数取 -1.19 ; A6 面与 B6 面的体型系数为 -1.14 ; A5 面与 B5 面均呈递减趋势变化, 绝对值从 0.21 减小到 0.13 , 可按线性插值来计算.

当长宽比在 $2.5\sim3.0$ 时, 0° 风向角, 屋面迎风面区 A2 面、A4 面及 A6 面体型系数绝对值均先增大后减少, 其余各面均增大. 45° 风向角, 屋面侧风面区除 A4 面体型系数绝对值先减小后基本趋于一致, 达到 -0.52 , 其余分区基本保持递增趋势, 个别在长宽比达到 2.7 时趋于平稳. 90° 风向角, A3 面, B3 面, A6 面及 B6 面体型系数绝对值保持缓慢的递减趋势, 其余各面趋于一致, 可取常数约 -0.15 .

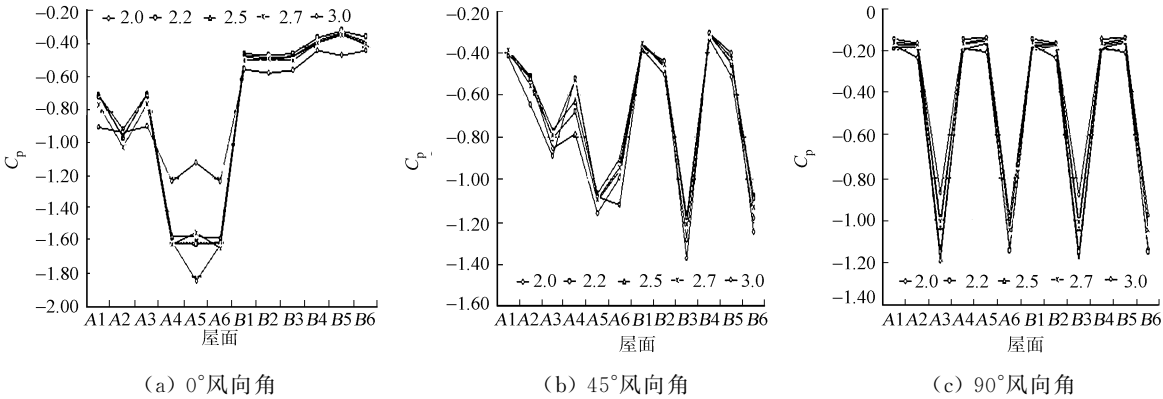


图 6 屋面各分区体型系数随长宽比的变化

Fig. 6 Variation of shape coefficient of the roof section with length and width

2.3 不同坡度

在高宽比为 0.38 , 长宽比为 2.5 时, 考察坡度对屋面各分区风荷载体型系数的影响, 如图 7 所示. 从图 7 可知, 当屋面坡度在 $1/20\sim1/8$ 变化时, 0° 风向角, 屋面迎风面区域除 A4 与 A6 面的体型系数绝对值保持递减的趋势, A5 面先增加后趋于一致, 达到极值 -1.72 , 其余各面可取常数. 45° 风向角, A6 面体型系数绝对值递减, 而 B3 面体型系数绝对值递增, 达到 -1.17 , 其余各面近似不变. 90° 风向角, A3 面与 B3 的体型系数可取常数 -1.08 ; A6 面与 B6 面的体型系数近似取 -1.0 , 其余面呈现基本一致的变化趋势. 总体来说屋面各分区均表现为负压, 且变化幅度很小, 体型系数可简单取为常数.

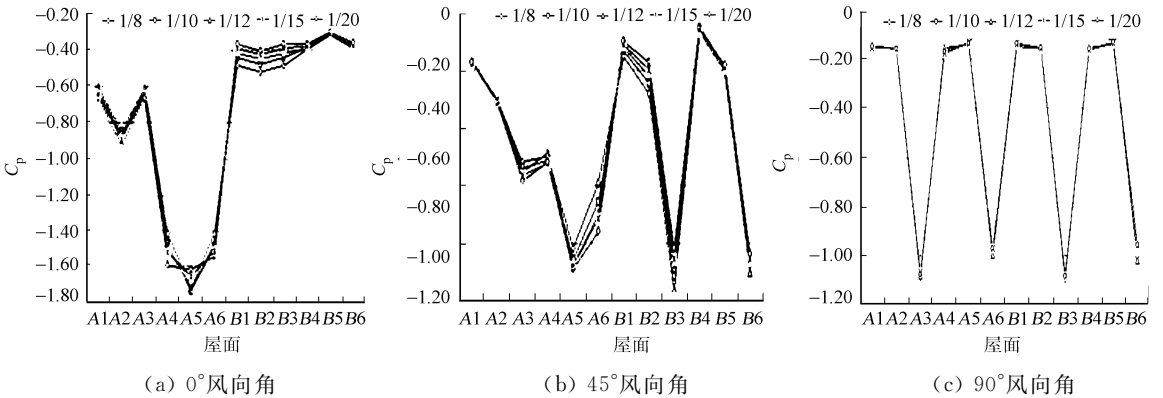


图 7 屋面各分区体型系数随坡度的变化

Fig. 7 Variation of shape coefficient of the roof section with gradient

3 结论

(1) 低矮建筑的屋面分压分布与屋面的长宽比、高宽比及主导风向均有很大的关系. 屋面的局部风压峰值一般出现在迎风屋檐或屋脊附近, 其值大小与屋面的几何尺寸及风向角直接有关. 最大局部风压系数出现在 A5 面, 受湍流旋涡引起, 处在高负压区域, 其值为 -1.9 .

(2) 不同风向角下, 当屋面的坡度在 $1/20\sim1/8$ 时, 屋面各分区均表现为负压, 且变化幅度很小, 实际设计中其体型系数可简单取为常数. 当高宽比增大至 0.38 时, 屋面各分区体型系数(绝对值)大部分

呈递增趋势;当长宽比增大至 2.5 时,屋面分区的体型系数变化明显. 因此,在门式刚架抗风设计时,高宽比和长宽比最优选择分别为 0.38 和 2.5.

(3) 与门式刚架规程相比较,封闭的建筑类型,其门刚屋面风载体型系数极值在角部,达到-2.9. 文中数值模拟在边缘带 A5 面,偏差较其他区域略大. 其主要原因是这些屋檐部位的分离流或回流附着明显,湍流模型不足以精确地反映这种复杂的细部变化. 从整体看,数值模拟能较准确地反映低矮建筑的屋面风载体型系数的分布特性,其计算误差与门刚规程通过反映湍流影响的边界层风洞试验测得的数据误差大约在 15%~35%.

(4) 由于仅对建筑体型确定情况下,改变几何尺寸和双坡屋面坡度进行数值模拟,对于因建筑体型的变化,屋面形式的改变所引起的风荷载体型系数变化将是后续研究的重点.

参考文献:

[1] 孙炳楠,傅国宏. 9417 号台风对温州民房破坏的调查[C]//第七届全国结构风效应学术会议论文集. 重庆:重庆大学出版社,1995.

[2] 贾勇,彭兴黔,许清杭. 轻钢建筑围护结构抗风设计的几个问题[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2006,27(3):270-272.

[3] 张松. 女儿墙对低矮房屋屋面风压影响的数值模拟[D]. 泉州:华侨大学,2006.

[4] STATHOPOULOS T, BASKARAN A. Computer simulation of wind environmental conditions around buildings [J]. Engineering Structures, 1996, 18(11): 876-885.

[5] 陈水福,孙炳楠,唐锦春. 建筑表面风压的三维数值模拟[J]. 工程力学,1997,14(4):38-43.

[6] 王辉,陈水福,唐锦春. 低层双坡屋面房屋表面风压的数值模拟[J]. 浙江大学学报:工学版,2003,37(6):634-638.

[7] 中国建筑金属结构协会建筑钢结构委员会. CECS 102:2002 门式刚架轻型房屋钢结构技术规程[S]. 北京:中国工程建设标准化协会,2003.

[8] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[9] 黄本才. 下游受扰对上游施扰高层建筑的风力的影响[C]//第十二届全国结构风工程会议论文集. 西安:[s. n], 2005:712-717.

[10] RICHARDS A P J, HOXEY B R P, SHORT L J. Wind pressures on a 6 m cube journal of wind engineering and industrial aerodynamics[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(14/15):1553-1564.

Numerical Simulation of Wind Loads Shape Coefficient
on the Roof of Low-Rise Buildings

PENG Xing-qian, LIU Chun-yan, XU Gang

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: SST $k-\omega$ turbulence model was used to numerically simulate the roof wind field and superficial wind pressure of portal frame. The variation and distributed characteristic of wind load shape coefficient on the roof of low-rise buildings were studied, for different parameters of the height-width ratio, the length-width ratio and the pitches. The results indicate that the height-width ratio, the length-width ratio and the direction of dominant wind greatly effect on the distribution of the wind pressure. As the height-width ratio and length-width ratio increase, the wind load shape coefficient increases slowly at initial stage, then increases obviously thereafter. The roof gradient effects slightly on the wind load shape coefficient. The optimal values of the height-width ratio and the length-width ratio for portal frame are 2.5 and 0.38, respectively.

Keywords: low-rise buildings; shape coefficient; wind loads; roof; numerical simulation

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)