

文章编号: 1000-5013(2012)01-0069-05

高层建筑屋顶风能利用的数值模拟

杨蓉^{1,2}, 彭兴黔¹

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 南华大学 环境保护与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 为了进一步有效提高屋顶风能利用的效率,在屋面之上加设一架空层,运用 CFD 数值模拟分析不同高度架空层对风能收集产生的影响,探讨其可行性并得出架空高度和风机安装高度最优值. 研究表明:架空层的设置对增大屋顶风速有显著效果;在架空层顶板之上或之下的空间安装风力发电机,并控制架空层高度,比较分析得出合理的架空层高度和风力机的安装高度,以求达到最理想的风能利用效果.

关键词: 风能; 高层建筑; 架空层; 风速比; 数值模拟

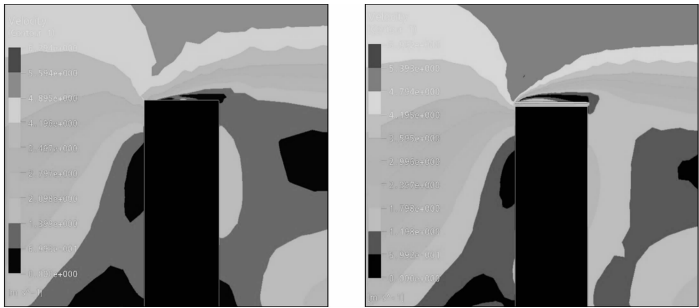
中图分类号: TM 614 **文献标志码:** A

风能作为储量丰富且可再生的绿色能源,已逐渐受到世界各国的重视. 日本已开发出专用于写字楼、商店和家庭的“小型微风风力发电机”,其高度仅为 3~5 m,叶片直径也只有 2~4 m,启动风速可低至 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;加拿大多伦多市安装在国家展览馆的风力发电机至今已经生产了超过 100 万 kW 的电能^[1]. 在我国,风电场基本建于偏远地区,这与城市中巨大的耗电量产生矛盾,因此,将风电引入城市成为能源应用的必然趋势. 目前,风力发电机技术已经相对比较成熟,但与其对应的建筑风能利用方法却相对滞后. S. Mertens 曾提出 3 种可作为风力集中器的建筑形式,其中将风力透平放置于屋顶的建筑称为非流线体型建筑^[2]. 文献[3]的研究表明,屋顶的风力强化效果要比扩散形式稍差. 由于风能大小与风速三次方成正比,即风速的提高是风能增大的决定性因素. 因此,本文主要研究如何采取简便易行的措施来显著提高可利用风能.

1 模拟条件

首先,分析加设架空层对屋顶风能利用有利的区域. 在 0° 风向角下,有无架空层的风速云图对比,如图 1 所示. 从图 1 可以看出:架空层顶板迎风边缘上方风速显著增大,风速等值线下移;空气的再附着发生在顶板上表面;风速较大区域为顶板上方,显然可利用的位置在此区域内.

根据特性布置研究测点. 模拟的建筑尺寸选取高为 50 m,宽为 20 m,长为 50 m,并以面 $50\text{ m}\times 50\text{ m}$ 为 0° 风向角时的迎风面. 顶板平面尺寸与建筑屋面相同. 由于顶板与屋面间有一定距离,且具有对称性,考虑在建筑屋面中心、角点、迎风前缘,以及顶盖的中心、前缘、角点和侧边中点等 7 个代表性位置进行分析研究,如图 2 所示.

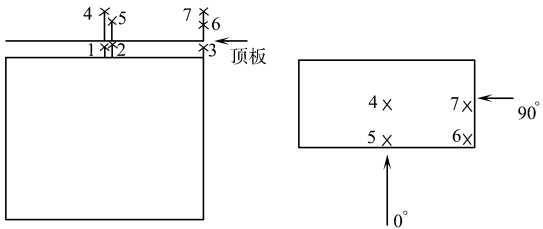


(a) 无架空 (b) 加设 1 m 高架空层

图 1 0° 风向角下架空前后风速云图对比

Fig. 1 Wind velocity comparison at 0° wind direction with or without open storey

数值风洞计算域的设置遵循阻塞率不大于 5% 的要求给予合适的尺寸. 采用 SST $k-\omega$ 模型, 入口风速为 $3.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 湍流强度采用日本 AIJ 规范建议的公式^[4], 梯度风高度为 400 m, C 类地貌粗糙度系数 $\alpha=0.22$; 风剖面采用达文波特的指数率形式^[5]; 计算域壁面为自由滑移壁面, 建筑物表面和地面为无滑移壁面; 出口边界采用压力出口.



(a) 建筑立面图及测点布置 (b) 建筑平面及风向角

图 2 加设架空层后的屋顶风能利用方式

Fig. 2 Wind energy utilization with open storey

2 结果分析

风速在有建筑影响和无任何干扰时同一高度的比值,称为风速比^[6]. 由于风速会不断变化,而风速比值却不随时间而改变,因此利用风速比进行分析更具有实际意义. 其表达式为

$$C_{r,i} = \frac{u_s(z)}{u_1(z)}.$$

通过风速比表达式,可以清楚地知道对风速增大最有利的建筑位置 and 高度.

2.1 0°风向角下架空高度对风速比的影响

在 0°风向角下,加设不同高度(h)架空层的 7 个测点位置风速比($C_{r,i}$)的比较结果,如表 1 所示. 表 1 中:无架空时取图 2(b)所示的 4 个测点位置进行计算,所得结果与加设架空层后的结果进行比较. 从表 1 中数值可以得出如下几点结论.

1) 除顶板下的屋面中心和迎风前缘处的最大风速比小于 1 外,其余位置均大于 1. 这就说明架空层的设置对靠近屋面,尤其是屋面中心处的气流区形成阻碍,降低了风速;同时,对顶板之上区域则起到提高风速的作用,绝大多数都提高 10% 以上.

2) 无论架空层高度为多少,风速比显然比无架空时相应位置处的数值大出不少,提高的程度从小依次为测点 5,6,4,7,即迎风前缘、角点、中心点和侧边中点. 这一比较恰好证明了在 0°风向角下,加设架空层对增大风速是非常有利的,从而验证在屋顶加设架空层来收集风能是可行的.

表 1 0°风向角下不同架空高度的最大风速比

Tab. 1 Maximum wind speed ratio at 0° wind direction with different height of open storey

h/m	测点位置						
	1	2	3	4	5	6	7
0.1	0.315 355	0.805 803	1.209 750	1.104 031	1.033 839	1.183 04	1.097 817
0.2	0.309 707	0.853 942	1.223 280	1.106 452	1.039 629	1.212 766	1.098 253
0.3	0.394 293	0.803 080	1.218 503	1.109 285	1.093 471	1.169 056	1.111 908
0.4	0.361 935	0.787 340	1.118 607	1.104 255	1.069 729	1.126 655	1.096 446
0.5	0.459 518	0.725 337	1.074 748	1.108 253	1.102 951	1.144 495	1.094 520
1.0	0.481 068	0.844 656	1.140 856	1.123 682	1.154 271	1.188 984	1.112 511
2.0	0.726 223	0.876 337	1.082 757	1.134 265	1.219 090	1.191 320	1.104 446
3.0	0.891 088	0.993 493	1.132 053	1.130 195	1.235 288	1.180 506	1.100 803
4.0	0.991 678	0.979 310	1.191 171	1.128 286	1.238 699	1.150 229	1.096 333
5.0	1.091 381	1.0325 41	1.222 806	1.128 129	1.249 201	1.176 522	1.090 610
无架空	—	—	—	1.075 297	1.047 677	1.034 517	1.064 991

3) 测点位置 1 的风速比值很小,最低在 0.31,随着架空高度增加呈波动上升;当高度达到 2.0 m 时,骤然变陡,往后上升的速率也始终较快. 当顶板高度在 4.0 m 时,最大风速比值接近于 1,恰好克服建筑对流场的不利影响;直到高度变为 5.0 m,风速比值才大于 1,达到 1.09,约等于无架空时此位置处的计算结果. 即在 5.0 m 高度时,顶板对板下屋面中心风速的影响可忽略不计.

4) 测点位置 2 的风速比也基本小于测点位置 1,但其走势较缓,在高度为 4.0 m 时,风速比值达到 1;在高度为 5.0 m 时,风速比值大于 1 但变化仍不显著.

5)测点位置 3 的风速比随着顶板高度的变化呈现两起两落的趋势. 在架空高度为 0.5,2.0 m 时较小,在 0.2,5.0 m 时最大,但总的来看,其波动不大且风速比值始终大于 1.若架空层达到一定高度也可在此处放置风机.

6)测点位置 4,7 的风速比受架空层高度变化的影响几乎可忽略不计,基本呈水平直线的走势,且两位置的风速比值非常接近,大都在 1.1 左右,比无架空的情况高出大约 6%.

7)测点位置 5 的风速比受架空高度变化影响较明显,从 0.1 m 到 5.0 m 不断增大,并在 5.0 m 时达到最大值;同时值得注意的是,从 2.0 m 开始,其值变化很小,且都在 1.2 以上,这比无架空时的相应位置风速比要大约 18%.

8)测点位置 6 的风速比值绝大部分都在 1.5 以上,但随高度变化不断起伏.在 0.2 m 和 2 m 时达到最大,约为 1.2,比无架空层时高出大概 17%.

以上分析除表明架空层的设置对收集风能明显有利之外,也表明测点位置 5,6 两处是风能利用的最佳位置.

2.2 90°风向角下架空高度对风速比的影响

类似于 0°风向角时的分析,在 90°风向角下,各测点位置的风速比如表 2 所示.从表 2 可以看出:与 0°风向角时相比,90°风向角的风速比大部分减小,只有测点位置 6,7 处的风速比值相应变大.对照 0°风向角的情况,这一现象表明迎风面的屋面边缘对提高风速是有利的,以及短边迎风时对角点处的风速提高是更有利的.

与无架空层时此风向的结果相比,测点位置 4,5 的风速比值只有非常微小的提高,而测点位置 6,7 的风速比值提高很显著,多达 20%以上.也就是说无论风向角如何,加设架空层始终对增大屋顶可利用风能是有利的,再一次验证了加设架空层的可行性及成效.测点位置 4,5 的风速比值随着架空高度变化几乎无影响,且其值相差无几;测点位置 6,7 的风速比值不断波动,不同的是测点位置 6 处的风速比值在 0.5 m 高架空值时达到最大,而测点位置 7 处的风速比值在 4.0 m 高时达到最大.根据表 2 中的风速比值的比较可知,选择 0.1~2.0 m 高的架空层都是合理的.

表 2 90°风向角下不同架空高度的最大风速比

Tab.2 Maximum wind speed ratio at 90° wind direction with different height of open storey

h/m	测点位置						
	1	2	3	4	5	6	7
0.1	0.176 946	0.755 011	1.266 781	1.047 745	1.046 616	1.235 648	1.118 685
0.2	0.289 425	0.774 013	1.237 830	1.047 500	1.047 161	1.222 273	1.134 663
0.3	0.117 467	0.712 140	1.174 222	1.049 512	1.047 064	1.193 978	1.136 012
0.4	0.074 025	0.653 228	1.133 441	1.052 308	1.048 491	1.125 111	1.125 308
0.5	0.215 427	0.683 010	1.065 014	1.050 391	1.047 570	1.266 081	1.141 800
1.0	0.428 561	0.717 351	1.058 252	1.044 632	1.044 352	1.163 575	1.181 223
2.0	0.664 903	0.838 446	1.124 469	1.042 963	1.042 839	1.151 539	1.225 142
3.0	0.759 094	0.890 532	1.083 864	1.040 620	1.041 259	1.127 373	1.260 914
4.0	0.830 176	0.932 185	1.122 873	1.038 440	1.039 944	1.112 166	1.284 915
5.0	0.899 757	0.966 265	1.114 66	1.037 377	1.038 674	1.094 309	1.217 789
无架空	—	—	—	1.038 533	1.041 038	1.028 949	1.032 25

2.3 风机安装高度对风速比的影响

若风机安装高度太大,不利于安装和维护,可行性不高;而风机安装高度太小,又无法正常放置和使用风机.对于屋顶加设了架空层的高层建筑,风力机显然应该放置在顶板之上.在 0°和 90°风向角下,风力机安装的最佳高度如表 3 所示.

2.3.1 0°风向角 1) 测点位置 3 的风速比值较大,且当架空层较高时也可以在此处放置风机,所以将其考虑在内.从表 3 中可以看到,这个位置的风机安装高度是随着架空高度增加也不断变大的,而且不论对于何种架空高度风机安装的最佳高度都距离顶板非常近.由于风机本身尺寸的原因,无法正确合理的放置,因此,可在不过多减小风速比的前提下适当降低风机安装高度.

2) 对于顶板之上的 4 个放置风机的位置,与无架空的情况相比,风力机安装的最佳高度都大幅度降低,尤其是测点位置 6,这是非常突出的一个优点. 测点位置 4 的风机安装高度随着架空高度变化波动较大,在架空为 2.0 m 以下时,风机高度都达到十几米,而在之后都在十米以下. 综合考虑施工难度,原料用量和表中所得风机高度大小,选择 2.0 m 高的架空层为宜. 测点位置 5 处的风机安装高度随着架空高度增加逐渐减小,到高度为 3.0 m 后则保持不变. 测点位置 6 的风机安装高度计算结果都很小,对于安装风机是非常有利的. 测点位置 7 处的风机高度基本不受架空层高度影响,都在 8.8 m 左右,但比无架空层时的风机安装高度已减小将近 50%.

2.3.2 90°风向角 与无架空时的情况相比,各个位置的风机安装最佳高度均有所减小,特别是测点位置 6,7. 对于无架空一栏中的“无”表示此位置的风机高度总是随架空高度增加不断增加,无所谓最优. 虽然 0.1~0.5 m 的风速比值比较理想,但其风机安装高度相对较高,因此仅需再比较 1.0,2.0 m 的情况. 显然,在测点位置 4,5,6 的风速比值基本相等,而测点位置 7 在 1.0 m 时的风速比值还小于 2.0 m 时的风速比值. 另外,从风机安装高度来看,由于测点位置 6,7 的高度都非常小,可不加以比较,而测点位置 4,5 处 1.0 m 时风速比值均高于 2.0 m 时的风速比值. 因此,仍选取 2.0 m 高的架空层为宜.

表 3 不同风向角下的风力机安装最佳高度

Tab. 3 Optimal height of wind generator at different wind direction															m
h/m	0°风向角的测点位置							90°风向角的测点位置							
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	
0.1	0.10	0.01	0.08	13.70	9.70	0.50	8.70	0.01	0.10	0.08	17.70	13.70	0.10	1.70	
0.2	0.08	0.01	0.20	13.60	4.60	0.30	8.60	0.14	0.20	0.02	17.60	13.60	0.10	1.60	
0.3	0.02	0.01	0.30	15.50	3.50	1.50	8.50	0.04	0.30	0.30	15.50	12.50	0.10	1.50	
0.4	0.34	0.01	0.40	14.40	3.40	1.40	8.40	0.34	0.18	0.40	15.40	14.40	1.40	3.40	
0.5	0.20	0.10	0.50	14.30	3.30	0.10	9.30	0.20	0.30	0.10	15.30	14.30	0.10	2.30	
1.0	0.80	0.10	1.00	13.80	3.80	0.20	8.80	0.80	0.80	0.20	14.80	13.80	0.20	0.20	
2.0	1.90	0.40	1.82	9.80	2.80	0.40	8.80	1.60	1.80	0.10	13.80	12.80	0.40	0.40	
3.0	2.90	0.80	2.71	8.80	1.80	0.40	8.80	2.70	2.50	2.00	12.80	12.80	0.40	0.10	
4.0	3.80	1.60	3.80	7.80	1.80	0.30	7.80	3.70	3.60	0.10	17.80	13.80	0.40	0.10	
5.0	4.80	1.80	4.80	9.80	1.80	0.40	8.80	4.60	4.40	1.80	17.80	12.50	0.40	0.10	
无架空	—	—	—	17.00	5.00	9.00	17.00	—	—	—	—	19.00	15.00	14.00	

2.4 顶板所受风压分析

由于顶板上、下均有气流通过,为避免出现被掀翻的现象,需考虑其所受风压大小,以保证正常使用功能. 在 0°和 90°风向角下,顶板所受风压测试结果如表 4 所示. 表 4 中: p_{up} , p_{down} 分别表示上、下表面的风压; $p_{tot}=p_{down}-p_{up}$.

表 4 不同风向角下的顶板所受风压

Tab. 4 Wind pressure on roof at different wind direction						
h/m	0°风向角			90°风向角		
	p_{down}/Pa	p_{up}/Pa	p_{tot}/Pa	p_{down}/Pa	p_{up}/Pa	p_{tot}/Pa
0.1	-4.663 08	-8.196 18	3.533 10	-3.540 43	-3.693 55	0.153 12
0.2	-4.809 31	-8.381 43	3.572 12	-3.733 74	-3.666 96	-0.066 78
0.3	-5.065 40	-8.853 98	3.788 58	-3.561 97	-3.579 47	0.017 50
0.4	-4.414 65	-8.258 53	3.843 88	-3.618 60	-3.592 31	-0.026 29
0.5	-4.540 62	-8.780 50	4.239 88	-3.588 76	-3.546 99	-0.041 77
1.0	-4.840 31	-9.947 13	5.106 82	-3.498 79	-3.394 82	-0.103 97
2.0	-4.473 30	-9.868 23	5.394 93	-3.374 11	-3.110 81	-0.263 30
3.0	-4.257 12	-9.800 57	5.543 45	-3.234 77	-2.884 71	-0.350 06
4.0	-4.186 65	-9.658 53	5.471 88	-3.063 94	-2.698 13	-0.365 81
5.0	-4.069 06	-9.482 80	5.413 74	-2.869 84	-2.518 64	-0.351 20

明显地,不论 0°还是 90°风向角,顶板上下表面均受负压,即上下表面都受风吸力,这样顶板所受合力的方向便取决于各面吸力大小. 从表 5 可以看出,总风压为正,顶板受向上的力. 随着顶板高度的增

加,上表面吸力越来越大导致总风压越大. 由于下表面的吸力以及顶板自身重力,能够平衡一部分向上的吸力,若要保证足够安全可靠,可适当加大顶板自重,以防止大风时被掀翻.

90°风向角时,除架空层为 0.1 m 和 0.3 m 高度外,其余高度下的总风压均是负值,表明总风压向下,对顶板自身可靠性是非常有利的. 而且,随架空高度增加,总风压值越大,越为有利.

3 结论

通过上述讨论分析,加设架空层对屋顶风能收集的帮助是不容忽视的,不仅大大降低了风力机可安装的高度,还显著提高了风速比. 经过反复模拟比较,选择 2 m 高的顶板. 风机放置在顶板之上中点,角点,迎风前缘和侧边中点处,效果都是良好的.

如果从经济效益方面进行讨论,可根据局地气候条件,使用风电机类型和用电收费情况得出收益大小,成果显著.

此方法事实上不受建筑高度限制,可应用于任何地区、任何类型的建筑之上,并能随着风电机技术的不断完善进一步获得更为满意的发电效果. 它的普适性和易操作性可使城市小区住宅、商业办公等用电紧张问题得到大大缓解.

参考文献:

[1] 田蕾,秦佑国. 可再生能源在建筑设计中的利用[J]. 建筑学报,2006(2):13-17.

[2] MERTENS S. Wind energy conversion in the built environment[C]//1st SWH International Conference on Renewable Energies. Segovia:[s. n.],2003:7-10.

[3] 潘雷. 建筑环境中的风能利用[D]. 济南:山东建筑大学,2006.

[4] Architechtrual Institute of Japan. AIJ recommendations for loads on building[S]. AIJ:[s. n.],2004.

[5] 黄本才,汪从军. 结构抗风分析原理及应用[J]. 上海:同济大学出版社,2008.

[6] MERTENS S. The energy yield of roof mounted wind turbines[J]. Wind Engineering, 2003,27(6):507-517.

Numerical Simulation of Wind Energy Utilization on the Roof of High-Rise Building

YANG Rong^{1,2}, PENG Xing-qian¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. School of Environment Protection and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of wind energy utilization, an open storey is added on the roof, the influence of various open storey height to wind energy was analyzed by CFD numerical model. It's shown: the open storey can increase remarkably the wind speed. Installing Wind generator above or on the open storey, the influence of open storey height and wind generator height was analyzed, then the optimal heights of open storey and wind generator are obtained to achieve the maximum wind energy collection.

Keywords: wind energy; high-rise building; open storey; wind speed ratio; numerical simulation

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)