

## 温室自然通风量计算中风压系数的研究

侯翠萍<sup>1,2</sup> 马承伟<sup>1,2</sup> 杜尚丰<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 农业部设施农业生物环境工程重点开放实验室, 北京 100083;  
3. 中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要** 针对温室通风量计算中风压系数选用与风载体型系数相同取值而导致通风量计算结果不准确的问题, 采用模拟方法研究风压系数的取值。从物理意义角度阐述了风压系数与风载体型系数的不同; 通过理论分析得到了与计算风载体型系数不同的风压系数计算方法; 对双坡屋面单栋温室采用 Fluent 数值模拟方法, 得到了温室窗口开启及关闭 2 种情况下对应的风压系数和风载体型系数。模拟结果表明: 温室通风窗口关闭时风载体型系数与窗口开启状态下风压系数取值有较大差异; 与风载体型系数相比, 风压系数的绝对值迎风面较小, 背风面较大, 相同部位风压系数和风载体型系数绝对值最大偏差是风载体型系数的 60%。在温室通风量计算中风压系数不宜选取与温室风荷载计算中的风载体型系数相同的值。

**关键词** 温室; 自然通风; 风压系数; 模拟; 风载体型系数

中图分类号 S 625.51

文章编号 1007-4333(2007)05-0073-06

文献标识码 A

### Wind pressure coefficient in natural ventilation rate calculation of a greenhouse

Hou Cuiping<sup>1,2</sup>, Ma Chengwei<sup>1,2</sup>, Du Shangfeng<sup>3</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;  
2. Key Laboratory of Agricultural Bio-Environmental Engineering, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China;  
3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** The wind pressure coefficient used for greenhouse natural ventilation rate is similar to the wind load figure coefficient for greenhouse wind load calculation. In this paper authors differentiated them efficiently through theoretical analysis by which we can find the method of obtaining the wind pressure coefficient. Applying FLUENT software, in condition of window closed and opening to greenhouse of single-span and two-sides, authors simulated the wind pressure coefficient and wind load figure coefficient. Contrasted of two parameters, their values have a big difference; when the wind pressure coefficient is compared to wind load figure coefficient, the value of windward is smaller, the absolute value of leeward is bigger and in the same part the biggest difference is 60%. So, if the value of wind pressure coefficient used in greenhouse ventilation calculation is the same as the value of wind load figure coefficient, the calculation will result in a big error.

**Key words** greenhouse; natural ventilation; wind pressure coefficient; simulation; wind load figure coefficient

通风量的准确计算对温室通风设计具有重要意义。我国现行的《温室通风降温设计规范》中, 总通风设计流量的计算公式为  $Q = f_{\text{温室}} qA$ 。此式过于简单, 许多因素未被考虑, 不能准确描述通风过程所涉及的物理关系, 且系数难以确定, 为此中国农业

大学与农业部规划设计研究院合作研究制定了《温室通风系统设计规范》。该设计规范中, 由于缺少相关资料, 用于通风量计算的温室风压系数的取值暂借用与温室结构荷载计算中的风载体型系数相同的数值, 这势必影响通风量计算结果的准确性。

收稿日期: 2006-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(60374030); 北京市教育委员会都市农业学科群建设项目资助(XK100190553)

作者简介: 侯翠萍, 博士研究生, E-mail: hcp\_2840@126.com; 马承伟, 教授, 博士生导师, 通讯作者, 主要从事设施园艺环境科学与工程研究, E-mail: macwbs@cau.edu.cn

首先,荷载计算和通风量计算的目不同,对应的温室通风窗的启闭状态也不同:通风量计算中通风窗一定是开启的,而荷载计算通常针对关闭状态。通风窗的开启必定会对窗口处的气流流动分布产生影响,所以目前关于风载体型系数的资料不能够满足多种通风窗状态风压通风分析计算的需要。第二,荷载计算中只需要考虑作用于温室建筑表面的静压,而通风量计算中,通过通风窗口的气流不仅取决于窗口处的空气静压,还与窗口处的空气动压有关,从这个意义上讲,温室通风计算中的风压系数与建筑荷载计算中的风载体型系数有不同的含义。

风载体型系数有成熟的测试及计算方法,而对风压系数取值方法及测试方法的研究较少<sup>[1]</sup>。采用风洞试验法确定风压系数是一种可靠的方法<sup>[1]</sup>,但测试设备昂贵,需要针对不同温室体型、不同通风窗设置和不同开启状态测定,需要大量模型,试验测试工作量较大。现场实测法也是获得风压系数的方法之一(在实际温室建筑物上,通风窗口处于工作状态时测定),但该方法的试验条件难于控制,测试误差大,不能获得不同温室体型、不同通风窗口设置情况下风压系数的系统结果。随着计算机技术和计算流体力学的发展,目前应用计算流体力学软件对流体问题进行模拟研究的技术已比较成熟<sup>[2-5]</sup>。与试验方法相比,模拟技术具有能够模拟理想条件、容易获得各种工况下系统结果,及研究费用低等优势。

本研究拟采用流体力学商用软件 Fluent 研究温室通风的风压系数,以期温室通风量计算中风压系数的正确取值提供依据。

## 1 风载体型系数和风压系数的试验及模拟

### 1.1 风荷载计算中的风载体型系数

建筑风荷载计算中的风载体型系数大多由试验测试方法得到。测得建筑物各表面的静压,则测点表面风载体型系数为<sup>[6-8]</sup>

$$C_k = \frac{p_j - p}{\frac{1}{2} \bar{v}(z)} \quad (1)$$

式中: $p_j$ 为测点静压,Pa; $p$ 为来流静压,Pa; $\bar{v}$ 为空气密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $\bar{v}(z)$ 为距离建筑物充分远,与建筑物同高度处的风速, $\text{m}/\text{s}$ 。对得到的建筑物某一面各点的风载体型系数值进行加权平均,可得到该表面的风载体型系数

$$C = \frac{\sum_{k=1}^n C_k A_k}{A_k(z)}$$

式中: $A_k$ 为风载体型系数 $C_k$ 的测点所代表的表面积, $\text{m}^2$ ; $A_k(z)$ 为建筑物界面 $k$ 的面积, $\text{m}^2$ 。

### 1.2 通风量计算中的风压系数

通风量计算中温室通风窗是开启的,气流通过窗洞口产生流动。基于流动能量守恒原理,通过通风窗口的气流流动能量,不仅来自窗口处的静压,而且来自动压。以迎风面为例,来流遇到温室的阻挡,动能变小,静压增大;此时虽有一部分动能转化为静压,但来流仍然有一部分动能,这部分动能在温室通风量计算中也是必须要考虑的。因此,在试验或模拟中,通风量计算中风压系数的计算不能采用与风载体型系数相同的方法,即不能只考虑静压。

确定风压系数的目的在于计算风压自然通风量,因此,可根据试验或模拟得出的通风口量进行理论推导。按流体力学的孔口出流理论,孔口空气流速

$$v_k = \sqrt{2 p_f / \rho} = \sqrt{2 |p_f - p_1| / \rho}$$

式中: $p_f$ 为计算风压,包括静压和动压,Pa; $p_1$ 为室内空气压力,Pa; $p_f$ 和 $p_1$ 均以室外未受建筑扰动处来流空气压力为基准确定。所以有 $|p_f - p_1| = \frac{\rho v_k^2}{2}$ ,故

$$p_f = \begin{cases} \frac{1}{2} \rho v_k^2 + p_1 & p_f - p_1 > 0 \\ p_1 - \frac{1}{2} \rho v_k^2 & p_f - p_1 < 0 \end{cases} \quad (2)$$

各通风窗口处的风压为 $p_f = C_p \frac{1}{2} \rho v_0^2$ <sup>[9]</sup>,式中: $v_0$ 为距离温室充分远处的风速; $C_p$ 为风压体型系数

$$C_p = \frac{p_f}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} \quad (3)$$

由式(2)和(3)得

$$C_p = \begin{cases} \frac{\frac{1}{2} \rho v_k^2 + p_1}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} & p_f - p_1 > 0 \\ \frac{p_1 - \frac{1}{2} \rho v_k^2}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} & p_f - p_1 < 0 \end{cases} \quad (4)$$

因此,试验或模拟中,只要得出室外风速 $v_0$ 、窗口的空气流速 $v_k$ ,以及室内空气静压 $p_1$ ,即可计算得出该窗口处的风压系数。

## 2 温室风压系数的模拟计算

本研究采用区别于传统试验法的 Fluent 模拟法分别模拟研究特定温室类型的风载体型系数和风压系数的取值, 并比较二者之差异。以双坡屋面温室为研究对象, 体型参数及窗口参数见图 1。

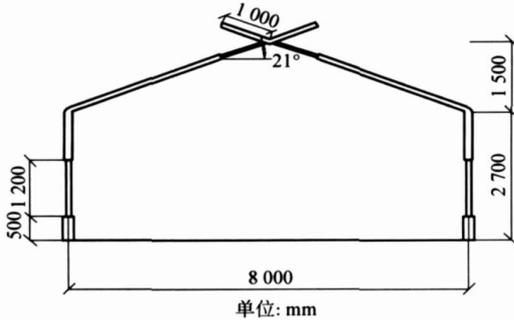


图 1 双坡屋面温室体型参数及窗口参数示意图  
Fig. 1 Building form and window size of a double sides sloping roofs greenhouse

选用二维空间模拟, 以温室地面中点为坐标原点, 地面水平向右方向为  $x$  坐标正方向, 垂直地面向上为  $y$  坐标正方向。假设流动介质空气为不可压缩, 流动为定常的湍流流动, 选用标准  $k-\epsilon$  湍流模型; 由于只是模拟气体的流动, 不涉及传热, 所以控制方程只用到连续方程及动量方程。

为使模拟的流场充分发展, 根据文献[10]-[12]中的模拟经验并经过反复尝试, 窗口关闭模拟中计算域取  $70\text{ m} \times 40\text{ m}$  的长方形, 入口距离温室左边界  $26\text{ m}$ , 出口距离温室右边界  $36\text{ m}$ ; 窗口开启模拟中取计算域为  $56\text{ m} \times 30\text{ m}$  的长方形, 入口距离温室左边界  $12\text{ m}$ , 出口距离温室右边界  $36\text{ m}$ 。

网格划分使用不等密度: 温室内部表面采用密网格, 远场采用较粗网格; 窗口关闭、开启 2 种模拟中网格尺寸分别为  $10$  和  $30\text{ cm}$ ; 非结构网格。

模拟边界条件: 1) 来流边界条件, 采用风速  $5\text{ m/s}$  进口边界条件 (风压系数与风速大小无关), 并设左边界压力为  $1.01325 \times 10^5\text{ Pa}$ ; 2) 出流边界条件, 采用自由出流边界条件; 3) 其他采用壁面边界条件。

连续方程中各计算参数的收敛判断精度为小于  $1 \times 10^{-6}$ , 其他保持默认; 计算域出口边界处的压力发展到与入口处的压力接近, 则证明出口位置的流动是充分发展的; 风速在与风向垂直的出口边界面上的平均速度不再变化。

## 3 模拟结果及分析

### 3.1 模拟结果

窗口关闭及开启条件下, 温室风压云图及风速矢量分布见图 2。窗口关闭时, 温室侧部迎风面均

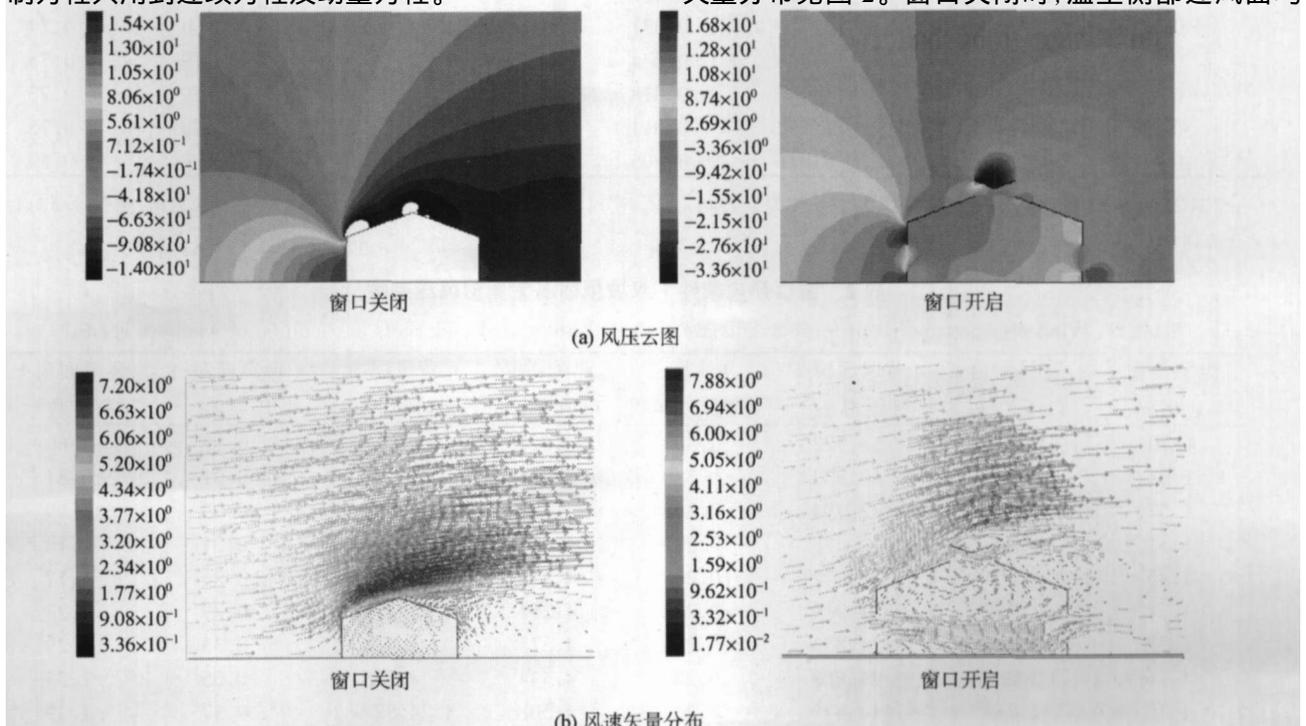


图 2 窗口关闭 \ 开启时温室风压云图 (a) 及风速矢量分布图 (b)

Fig. 2 Distributing of wind pressure and wind speed vector in condition of greenhouse windows opening \ closed

受正压,温室顶部迎风面及背风面均受较大负压;窗口开启后压力分布发生较大变化,温室侧部迎风面依然受正压,但较窗口关闭时小,迎风面地面至侧窗窗台高度上内侧受较大负压,温室内部及温室顶部迎风面受负压力,温室背风面受负压,但较窗口关闭时小(图2(a))。窗口开启后,温室室内空气产生流动,温室侧窗高度上形成从迎风面到背风面方面的

流动,迎风面地面至侧窗窗台高度上内侧形成较小顺时针方向的涡流,温室顶部形成较大的逆时针方向的涡流(图2(b))。

### 3.2 模拟结果分析

对于模拟得到的温室迎、背风面压力以及来流压力,采用式(1)和(4),计算得到窗口关闭及开启条件下温室的风载体型系数和风压系数(表1~表3)。

表1 窗口关闭条件下双坡屋面温室风载体型系数

Table 1 Wind load figure coefficient for a greenhouse with both sides of sloping roofs in condition of windows closed

温室侧部迎、背 风面 $Y$ 坐标	迎风面窗 口压力 $p_{iy}$	背风面窗口 压力 $p_{ib}$	来流压力 $p$	$p_{iy} - p$	$p_{ib} - p$	迎风面风载 体型系数	背风面风载 体型系数
2.70	-12.659	-12.172	-0.174	-12.485	-11.998	-0.82	-0.78
2.56	-2.759	-11.965	-0.165	-2.594	-11.800	-0.17	-0.77
2.43	3.075	-11.863	-0.156	3.231	-11.707	0.21	-0.76
2.29	5.947	-11.804	-0.147	6.094	-11.657	0.40	-0.76
2.15	7.793	-11.758	-0.138	7.931	-11.620	0.52	-0.76
2.02	9.134	-11.718	-0.129	9.263	-11.589	0.61	-0.76
1.88	10.162	-11.681	-0.119	10.281	-11.563	0.67	-0.76
1.74	10.765	-11.644	-0.107	10.872	-11.536	0.71	-0.75
1.61	11.292	-11.602	-0.096	11.389	-11.505	0.74	-0.75
1.47	11.677	-11.566	-0.085	11.762	-11.481	0.77	-0.75
1.33	11.982	-11.532	-0.074	12.057	-11.457	0.79	-0.75
1.19	12.202	-11.495	-0.063	12.265	-11.431	0.80	-0.75
1.06	12.270	-11.458	-0.052	12.322	-11.406	0.81	-0.74
0.92	12.252	-11.440	-0.044	12.296	-11.396	0.80	-0.74
0.78	12.202	-11.424	-0.037	12.240	-11.387	0.80	-0.74
0.65	12.145	-11.421	-0.031	12.176	-11.390	0.80	-0.74
0.51	12.064	-11.440	-0.024	12.088	-11.416	0.79	-0.75
0.37	11.999	-11.486	-0.018	12.017	-11.468	0.79	-0.75
0.24	11.962	-11.532	-0.011	11.974	-11.520	0.78	-0.75
0.10	13.786	-9.016	-0.005	13.791	-9.011	0.90	-0.59

注: 风载体型系数按式(1)计算,其中空气密度为  $1.224 \text{ kg/m}^3$ 。以温室地面中点为坐标原点,水平向右为  $X$  正方向,垂直地面向上为  $Y$  正方向;下同。

表2 窗口开启条件下双坡屋面温室侧窗风压系数

Table 2 Wind pressure coefficient for a greenhouse with both sides of sloping roofs in condition of windows opened

温室侧窗 $Y$ 坐标	迎风面窗 口压力 $p_{iy}$	背风面窗 口压力 $p_{ib}$	来流压 力 $p$	迎风面窗 口风速 $v_{ky}$	背风面窗 口风速 $v_{kb}$	迎风面风 压系数	背风面风 压系数
1.70	9.818	-14.722	-0.333	2.617	1.981	-0.17	-0.60
1.64	7.399	-13.572	-0.320	3.335	3.042	0.01	-0.81
1.57	5.820	-12.794	-0.308	3.783	3.694	0.13	-0.99
1.51	4.845	-12.276	-0.295	4.036	4.063	0.21	-1.10
1.45	4.264	-12.072	-0.284	4.170	4.271	0.26	-1.17
1.38	3.755	-11.919	-0.272	4.284	4.459	0.29	-1.23
1.32	3.336	-11.826	-0.260	4.373	4.621	0.33	-1.29
1.26	3.009	-11.809	-0.249	4.444	4.755	0.35	-1.34
1.19	2.718	-11.829	-0.237	4.508	4.877	0.37	-1.39
1.13	2.477	-11.906	-0.226	4.561	4.980	0.39	-1.43
1.07	2.258	-12.072	-0.215	4.602	5.061	0.41	-1.46

续表 2

温室侧窗 $Y$ 坐标	迎风面窗 口压力 $p_{iv}$	背风面窗 口压力 $p_{ib}$	来流压 力 $p$	迎风面窗 口风速 $v_{kv}$	背风面窗 口风速 $v_{kb}$	迎风面风 压系数	背风面风 压系数
1.01	2.047	- 12.296	- 0.203	4.637	5.131	0.42	- 1.49
0.94	1.838	- 12.660	- 0.192	4.664	5.177	0.43	- 1.51
0.88	1.617	- 13.155	- 0.180	4.687	5.195	0.44	- 1.52
0.82	1.388	- 13.755	- 0.168	4.705	5.190	0.45	- 1.52
0.75	1.134	- 14.666	- 0.156	4.675	5.028	0.43	- 1.45
0.69	0.962	- 15.700	- 0.144	4.594	4.696	0.40	- 1.32
0.63	1.087	- 16.953	- 0.132	4.349	4.028	0.32	- 1.09
0.56	2.145	- 18.141	- 0.118	3.737	2.763	0.12	- 0.74
0.50	4.082	- 19.389	- 0.101	2.779	1.469	- 0.13	- 0.53

注：风压系数按式(4)计算，其中空气密度为  $1.224 \text{ kg/m}^3$ ，表 3 同；室内侧窗中部高度上平均压力为  $- 6.730 \text{ Pa}$ 。

表 3 窗口开启条件下双坡屋面温室顶窗风压系数

Table 3 Wind pressure coefficient of the transom window for a greenhouse with both sides of sloping roofs in condition of windows opened

温室顶窗 $Y$ 坐标	迎风面窗 口压力 $p_{iv}$	背风面窗 口压力 $p_{ib}$	来流压 力 $p$	迎风面窗 口风速 $v_{kv}$	背风面窗 口风速 $v_{kb}$	迎风面风 压系数	背风面风 压系数
4.56	- 13.363	- 19.457	- 1.163	0.668	0.169	- 0.67	- 0.66
4.52	- 5.736	- 17.802	- 1.149	0.874	1.180	- 0.63	- 0.71
4.48	- 0.194	- 16.478	- 1.135	2.118	2.859	- 0.48	- 0.98
4.45	4.889	- 15.247	- 1.121	3.276	4.429	- 0.23	- 1.44
4.41	3.712	- 15.287	- 1.108	3.278	4.518	- 0.23	- 1.47
4.37	2.534	- 15.328	- 1.094	3.280	4.607	- 0.23	- 1.51
4.33	1.445	- 15.444	- 1.080	3.322	4.621	- 0.22	- 1.51
4.29	0.449	- 15.639	- 1.067	3.404	4.556	- 0.19	- 1.49
4.26	- 0.547	- 15.834	- 1.053	3.487	4.491	- 0.17	- 1.46
4.22	- 1.507	- 15.975	- 1.039	3.543	4.349	- 0.15	- 1.41
4.18	- 2.462	- 16.108	- 1.026	3.595	4.195	- 0.14	- 1.36
4.14	- 3.349	- 16.253	- 1.013	3.635	4.030	- 0.13	- 1.31
4.11	- 3.957	- 16.452	- 1.000	3.625	3.815	- 0.13	- 1.24
4.07	- 4.566	- 16.650	- 0.987	3.615	3.600	- 0.13	- 1.17
4.03	- 5.113	- 16.943	- 0.974	3.537	3.359	- 0.16	- 1.11
3.99	- 5.610	- 17.321	- 0.960	3.401	3.096	- 0.19	- 1.04
3.95	- 6.106	- 17.698	- 0.947	3.264	2.833	- 0.23	- 0.98
3.92	- 6.600	- 16.147	- 0.934	2.175	1.911	- 0.47	- 0.80
3.88	- 7.094	- 14.337	- 0.921	0.989	0.901	- 0.62	- 0.69
3.84	- 7.565	- 12.420	- 0.909	0.111	0.181	- 0.66	- 0.66

注：室内顶窗中部高度上平均压力为  $- 10.051 \text{ Pa}$ 。

计算得到的风压系数中，为计算选用方便，对靠近通风窗口中部的系数取平均值，得到双坡屋面温室的风载体型系数和风压系数(表 4)。可见，除顶窗迎风面风压系数为负值外，风载体型系数与风压系数都是迎风面为正值，背风面为负值；风载体型系数与风压系数二者的模拟值有较大差异，迎风面风压系数比风载体型系数小 50%，背风面风压系数比风载体型系数绝对值大 60%；风载体型系数中，迎风面系数大于背风面系数的绝对值，并且相差不大，而风压系数中，迎风面系数绝对值小于背风面系数

绝对值，侧窗相差 68%，顶窗相差 81%。

表 4 双坡屋面温室的风压系数与风载体型系数

Table 4 Wind pressure coefficient and wind load figure coefficient of a greenhouse with both sides of sloping roofs

屋 面	风载体 型系数	风压系数	
		侧窗	顶窗
迎风面	0.76	0.38	- 0.22
背风面	- 0.75	- 1.20	- 1.15

#### 4 结束语

本研究对风载体型系数和风压系数的概念进行了明确界定;采用理论推导的方法得到了风压系数的计算公式;针对特定尺寸的双坡屋面温室,采用数值模拟的方法,利用推导得到的公式对模拟结果进行处理,得到了该温室形式下迎、背风面的风载体型系数分别为 0.76 和 - 0.75,侧窗迎、背风面的风压系数为 0.38 和 - 1.20,顶窗迎、背风面的风压系数为 - 0.22 和 - 1.15;对计算结果比较分析表明,风载体型系数和风压系数取值有较大差异,迎风面风压系数小于风载体型系数 50%,背风面风压系数大于风载体型系数,相同部位 2 个系数取值最大相差 60%。所以在温室通风量计算中,风压系数采用与温室风荷载计算中的风载体型系数相同取值时,会产生较大误差。

因此,为了满足温室风压自然通风的通风量计算的需要,应该系统研究各种情况下的风压系数取值。笔者只研究了 1 种温室形式下通风窗口对风压系数的影响,由于风压系数还可能与温室体型、温室尺寸、通风窗口开启位置、开启角度和窗口相对大小等因素有关,因此还需要研究探明上述因素对风压系数大小影响的规律性,以及各种情况下风压系数的具体计算取值。

#### 参 考 文 献

- [1] 张相庭. 结构风压和风振计算[M]. 上海:同济大学出版社, 1985
- [2] Mistriotis A, Jong T, Wagemans M J M, et al. Computational fluid dynamics (CFD) as a tool for the analysis of ventilation and indoor microclimate in agricultural buildings[J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1997, 45: 81-96
- [3] Mistriotis A, Bot G P A. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 118: 217-228
- [4] Lee I B, Shot T H. Two-dimensional numerical simulation of natural ventilation in a multi-span greenhouse[J]. *Transactions of the ASAE*, 2000, 43(3): 745-753
- [5] Bartzanas T, Boulard T. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse[J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 88(4): 479-490
- [6] 张亮亮, 宋小斌, 吴云芳, 等. 不规则外型高耸建筑物的体型系数研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2005, 27(4): 52-54
- [7] 李庆祥, 孙炳楠. 高耸异型烟囱结构风压和风振系数试验研究[J]. *试验力学*, 2005, 20(4): 615-622
- [8] 符永正. 关于热压系数与风压系数的思考和建议[J]. *暖通空调*, 2001, 31(3): 21-23
- [9] 马承伟, 苗香雯. 农业生物环境工程[M]. 北京:中国农业出版社, 2005
- [10] Reichrath S, Davies T W. Applications of computational fluid dynamics in glasshouse research[J]. *Agribuilding*, 2001: 91-111
- [11] Roy J C, Boulard T. CFD prediction of the natural ventilation in a tunnel-type greenhouse: influence of wind direction and sensibility to turbulence models[C]. Academic Committee. Collection of extent abstracts 2004 CIGR International Conference. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004
- [12] Fatnassi H, Boulard T, Bouirden L. Simulation of climatic conditions in full-scale greenhouse fitted with insect-proof screens[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 118: 97-111