

文章编号:1000-8055(2012)04-0742-07

十字伞伞群的多节点静力学模型和 气动力特性计算

韩雅慧^{1,2}, 杨春信¹, 徐晓东³

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191;

2. 陆军航空兵学院 机械工程系, 北京 100123;

3. 航空装备研究所 第一研究室, 北京 100039)

摘 要: 为计算某型救灾专用空投系统十字伞伞群的气动特性,建立了多节点静力学模型来计算伞衣充满时的气动外形;对不同臂长比和伞绳比的十字伞进行数值模拟,并与文献中风洞实验结果对比验证;根据建立的模型得到十字伞伞群的气动外形并进行气动力特性研究.结果表明:计算结果和文献结果一致性较好,建立的多节点静力学模型合理可行;十字伞轴向力随臂长比和伞绳比的增大而增大;随攻角增大轴向力先减小后增大,而法向力则增大.建立的模型可用于伞群的气动外形计算,并为降落伞系统的设计提供参考.

关 键 词: 十字伞; 伞群; 多节点静力学模型; 气动力特性; 数值模拟

中图分类号: V244.21

文献标志码: A

Multi-node statics model and aerodynamic characteristics of cross parachute clusters

HAN Ya-hui^{1,2}, YANG Chun-xin¹, XU Xiao-dong³

(1. School of Aeronautic Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Mechanical Engineering Department,

Army Aviation Institute, Beijing 100123, China;

3. First Research Room,

Institute of Aerial Equipment, Beijing 100039, China)

Abstract: To calculate clusters' aerodynamic characteristics for a certain type of disaster relief airdrop system, multi-node statics model of cross parachute system was developed to calculate the aerodynamic shape of canopy. Different cross parachute models were numerically simulated with different canopy arm ratios and suspension line ratios, and the numerical results were compared with test results in literature. According to this model, and aerodynamic shape was obtained for cross parachute clusters, and aerodynamic characteristics were simulated. The results show that: the calculated results and wind tunnel test results in literature are in good agreement, and the multi-node statics model is accurate and feasible. As canopy arm ratio and suspension line ratio of cross parachute increase, the axial

收稿日期:2011-10-28; **修订日期:**2012-02-28

作者简介:韩雅慧(1976—),女,陕西扶风人,博士生,主要研究方向:人机与环境工程系统仿真. E-mail:han_huier@163.com

通信作者:杨春信(1965—),男,湖南靖县人,教授、博士生导师,博士,主要研究方向:多相流传热、飞行器环境控制与安全救生及人机与环境工程等. E-mail:yangchunxin@sina.com

force increases; as the angle of attack increases, the axial force firstly decreases and then increases, whereas the normal force increases. This model can be used for calculating aerodynamic shape of parachute clusters, which is also useful for parachute system design.

Key words: cross parachute; clusters; multi-node statics model; aerodynamic characteristics; numerical simulation

十字伞是一种由柔性纺织材料制成的十字形气动减速装置,可用作飞机着陆滑跑时的阻力伞、各种飞行器的回收伞、空投武器的航弹伞等。此外十字伞还用于救生装备、空降伞兵以及无人侦察等领域^[1]。由于具有阻力系数大、开伞快、动载小、稳定性好、结构简单、成本相对低廉、质量轻、体积小等特点,近几年来,降落伞系统已应用于救灾减灾等非战争军事领域的快速响应^[2]。国内在开展救灾专用空投系统研制时采用了十字伞伞群系统。本文研究工作是某型救灾专用空投系统研制任务的基础,目的是确定十字伞伞群的气动力特性,通过已建立的空投系统仿真框架^[3]对系统性能进行数值计算,以提高救灾专用空投系统的研制周期和经济效益。

对十字伞系统的研究主要是通过实验(风洞或水洞)和数值模拟方法获得其气动力特性,从而考察几何参数和透气性参数的影响。影响气动力特性的因素主要有:臂长比 A 、伞绳比 R_s 和伞衣的透气性 λ 。臂长比是十字伞长臂 L 和短臂 W 的比值,伞绳比是伞绳长 l_s 和长臂的比值^[4]。透气性 λ 是指伞衣织物两面存在压差的情况下,空气透过织物的性能。以在规定的实验面积、压差和时间条件下,气流垂直通过试样的速率来表示,单位为 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ^[5]。

Jorgensen 等人通过风洞和水洞实验,研究了不同臂长比的十字伞在不同雷诺数范围内的气动特性^[6-7]。英国莱切斯特大学的 Shen 等人对绳长比为 0.67, 1.33, 2, 臂长比为 2.4, 3.0, 4.0 和透气性为 0, 3.97, 7.02 ($\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 的 27 个柔性十字伞模型进行风洞和水洞实验研究,分析了十字伞气动力特性和尾迹流场^[4,8-9]。近 10 年来,国外研究者对十字伞系统的研究由实验开始转向数值模拟。Lafarge 等人通过计算流体动力学(CFD)方法研究了十字伞伞衣压力分布与尾流流场分布^[10]。Stein 和 Leonard 等人基于流固耦合(FSI)方法对十字伞单伞进行数值模拟,准确地计算出充气后伞衣的形状,并研究了十字伞单伞的气动力特性和稳定性^[11-14]。由于流固耦合计算复杂,而且计算量大,因此很难应用到伞群计算

中。在伞群气动力特性方面的研究还很少,Render 等人通过风洞实验研究了小型十字形伞降群的稳定性与气动特性^[15]。国内十字伞气动力特性方面的相关研究甚少。

本文建立了多节点静力学模型,获得十字伞充满时的气动外形;通过计算文献^[4]中十字伞的气动力特性,并与其风洞实验结果进行对比验证;根据建立的模型得到某型救灾专用空投系统的十字伞伞群在稳降阶段的气动外形,通过数值模拟计算得到其气动力特性和绕流流场。

1 多节点静力学模型

多节点动力学模型已用于圆形和锥形降落伞开伞过程中的流固耦合计算并得到验证^[16-17]。本文建立多节点静力学模型,就是通过简单有效的方法准确获得十字伞充满时的气动外形。

1.1 力学假设

十字伞由两个相同矩形织物面组成,这两个矩形织物面彼此呈直角相连接,因此,可以只计算其中一个矩形织物面的形状,再将两个织物面叠加。由于臂长比较大,织物面可以简化为二维曲面模型。

对十字伞模型作如下假设:

- 1) 伞衣和伞绳均具有零弯曲刚度,忽略伞绳的变形,不考虑伞衣的弹性效果。
- 2) 假设十字伞两个矩形织物面受力后形状相同,不考虑短臂方向的变形,伞衣短臂边缘为直线。
- 3) 忽略伞衣的透气性。

1.2 多节点模型

根据十字伞结构特性和上述假设,如图 1 所示,先建立十字伞一个矩形织物长臂方向对称线(简称型线)的多节点静力学模型,不考虑短臂方向的变形;把变形后的长臂型线沿短臂方向拉伸,即可得到一个矩形织物变形后的曲面;再将两个织物面叠加得到十字伞充满时气动外形。

由图 1 看出:十字伞多节点模型由两根伞绳和一段矩形伞衣型线组成,伞衣型线离散为一系列用弹簧连接的质点,不计弹簧阻尼。两根伞绳与

一固定点相连,该点为坐标原点.伞衣型线上质点*i*的受力情况如图 2 所示,其中 G_i 为质点的重力. $F_{i,1}$ 为伞衣内外气动力不同造成的压力,方向为外法向. $F_{i,2}, F_{i,3}$ 分别为与 i 与 $i-1$ 节点, i 与 $i+1$ 节点之间的拉力.

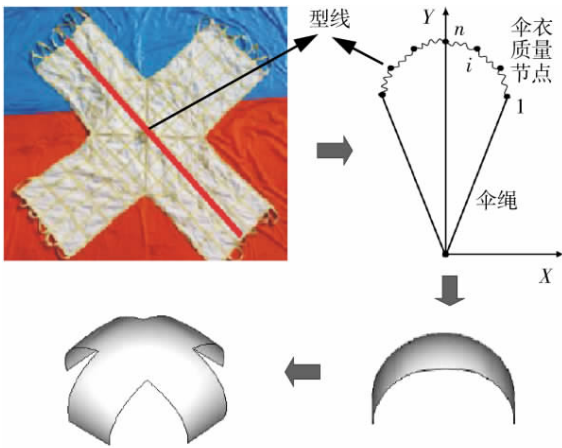


图 1 十字伞的多节点模型
Fig. 1 Multi-node model of cross parachute

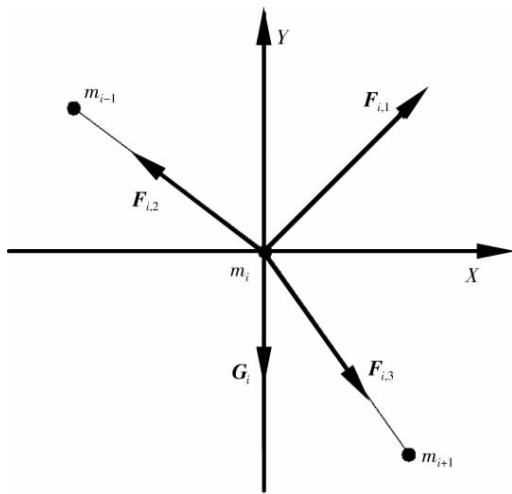


图 2 节点受力图
Fig. 2 Forces of node

根据静力学方程,伞衣质点位置可由如下方程得到,平衡方程为

$$F_{i,1} + F_{i,2} + F_{i,3} + G_i = 0 \quad (3)$$

其中伞衣质点力的大小和方向由式(4)~式(9)来计算

$$n_1 = \begin{bmatrix} \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{d_{i-1,i+1}} & \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{d_{i-1,i+1}} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

$$n_2 = \begin{bmatrix} \frac{x_{i-1} - x_i}{l_{i-1}} & \frac{y_{i-1} - y_i}{l_{i-1}} \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

$$n_3 = \begin{bmatrix} \frac{x_{i+1} - x_i}{l_{i+1}} & \frac{y_{i+1} - y_i}{l_{i+1}} \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$$F_{i,1} = \frac{1}{2} \Delta p_i \cdot W \cdot (l_{i-1} + l_{i+1}) \cdot n_1 \quad (7)$$

$$F_{i,2} = k_c (l_{i-1} - l_{i-1,0}) \cdot n_2 \quad (8)$$

$$F_{i,3} = k_c (l_{i+1} - l_{i+1,0}) \cdot n_3 \quad (9)$$

式中 n_1, n_2 和 n_3 分别为 $F_{i,1}, F_{i,2}$ 和 $F_{i,3}$ 的单位方向向量; k_c 为伞衣弹性系数,和伞衣织物的弹性模量和几何尺寸有关; l_{i-1}, l_{i+1} 为伞衣质点间距; $d_{i-1,i+1}$ 为节点 $i-1$ 和 $i+1$ 之间的距离; W 为十字伞短臂长度; Δp_i 为该节点处的压强. 计算时载荷值的选择是根据文献中的实验数据插值计算得到压力分布,由此编程迭代计算即可.

2 气动力特性

2.1 控制方程

采用 Navier-Stokes(N-S)方程可以较精确地分析降落伞绕流流场的流动特性,且可用于较宽广的速度范围以及中等和较大的迎角范围. 由于十字伞系统速度较小,可以把空气定义为不可压,因此不求解能量方程;空气物性参数取常值. 控制方程见下式:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \right) + g_i \quad (11)$$

式中 u_{ij} 是流速, p 是静压, ρ 是密度, τ_{ij} 是应力张量, g_i 为 i 方向上的重力体积力. 应力张量由下式给出

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (12)$$

这里 μ 为黏度.

由于降落伞是非流线形物体,周围流场非常复杂,湍流模型采用 $k-\epsilon$ 方程的 renormalization group(RNG)模型,计算速度较快,并能准确显示十字伞绕流流场.

十字伞表面上采用固壁边界条件(wall),即无穿透和绝热并且无滑移边界;计算域外边界采用速度进口边界条件和压力出口边界条件,用于模拟不可压流动. 求解时对流项采用二阶迎风格式离散,黏性项采用中心差分格式离散.

2.2 气动力计算

十字伞受力如图 3 所示, Y 轴正向位于伞的对称轴上. 气动合力 R 分解为轴向(或切向)分量 F_t 和法向(或侧向)分量 F_n . 压力中心 p 是气动力的

合力 R 对伞反作用的作用点,它位于 Y 轴上. 轴向力 F_t 和法向力 F_n 大小分别可用下式计算

$$F_t = \frac{1}{2} \rho u^2 C_t S_0 \tag{13}$$

$$F_n = \frac{1}{2} \rho u^2 C_n S_0 \tag{14}$$

式中 C_t 为轴向力系数, C_n 为法向力系数^[4], S_0 为十字伞参考面积.

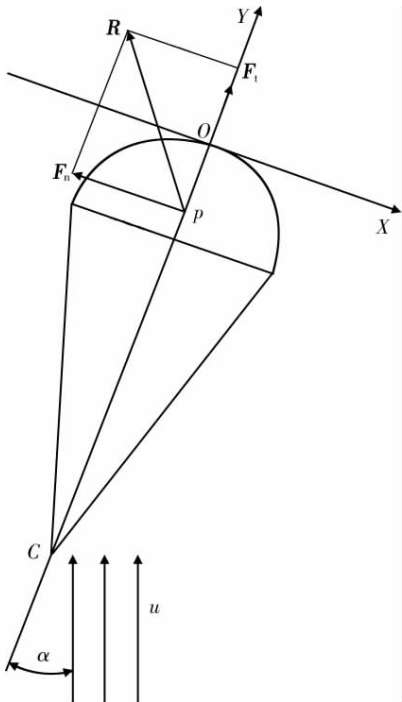


图 3 十字伞受力图
Fig. 3 Forces of cross parachute

3 算例验证

3.1 气动力特性

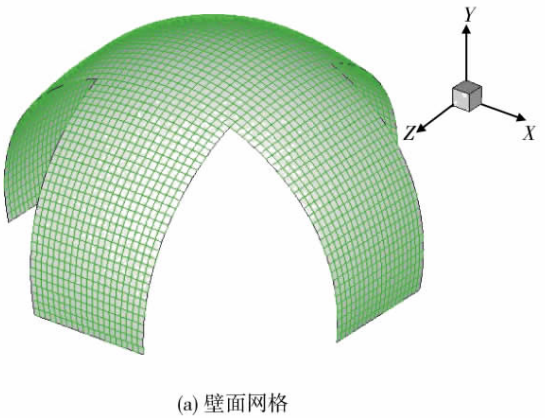
为验证多节点静力学模型计算的气动外形的精度,计算了文献[4]中十字伞充满时的气动外形,以此为基础通过数值计算得到气动力特性,再与文献中的风洞实验结果进行对比验证. 本文对比计算了文献中不同臂长比和伞绳比下的轴向力系数 C_t , 见表 1. 从表可看出,本文计算结果和文献[4]中风洞实验结果基本一致,可见建立的基于多节点模型静力学方程组计算十字伞的气动外形具有较好的精度. 随着伞绳比和臂长比增大,轴向力系数增大,这是由于阻力面积增大的缘故.

图 4 给出臂长比 $A=4.0$, 伞绳比 $R_s=1.33$ 的十字伞壁面网格. 计算网格采用结构网格, 网格数量为 48 万多. 为确保计算结果具有网格独立

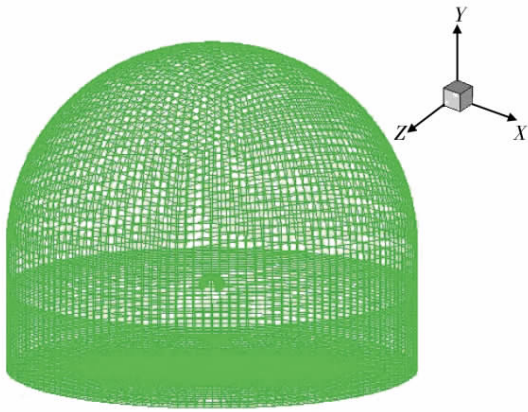
性,对网格进行加密,加密后的网格数量约为 85 万,对比两者计算结果,加密前的网格数量足以满足精度要求.

表 1 计算和实验结果对比
Table 1 Calculation and test results comparison
($\alpha=0^\circ, u=10\text{ m/s}$)

臂长比 $A=L/W$	伞绳比 $R_s=l_s/L$	本文 计算	风洞 实验 ^[4]	相对 误差/%
2.4	1.33	0.803	0.83	3.2
3.0	0.67	0.812	0.81	0.27
3.0	1.33	0.918	0.91	0.88
3.0	2.00	0.967	0.96	0.78
4.0	1.33	0.965	0.92	4.6



(a) 壁面网格



(b) 体网格

图 4 十字伞网格 ($A=4.0, R_s=1.33$)
Fig. 4 Cross parachute canopy surface mesh
($A=4.0, R_s=1.33$)

3.2 绕流场分布

十字伞的绕流场不同于圆伞和翼伞, 本文对臂长比为 4.0, 伞绳比为 1.33 的十字伞进行了不同攻角的数值计算.

图 5 是十字伞绕流流场图,可看到气流在十字伞的伞幅间产生了强烈的旋涡,这是由于十字伞伞幅之间有气流流过而引起的.图 6 是十字伞 $X=0\text{ mm}$ 剖面不同攻角的流线图.图中十字伞上表面流动出现明显的分离,形成一定负压区,在伞衣上表面出现脱体旋涡;随气流攻角的不同,脱体涡的位置和大小也不同.还有一部分气流在十字伞包围的区域内,流速很低,接近滞止,使伞内部包围区域的压力很大.

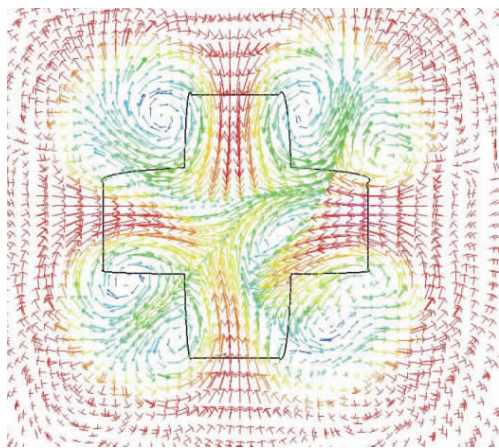


图 5 十字伞绕流流场图

Fig. 5 Flow around and downstream of cross panopy

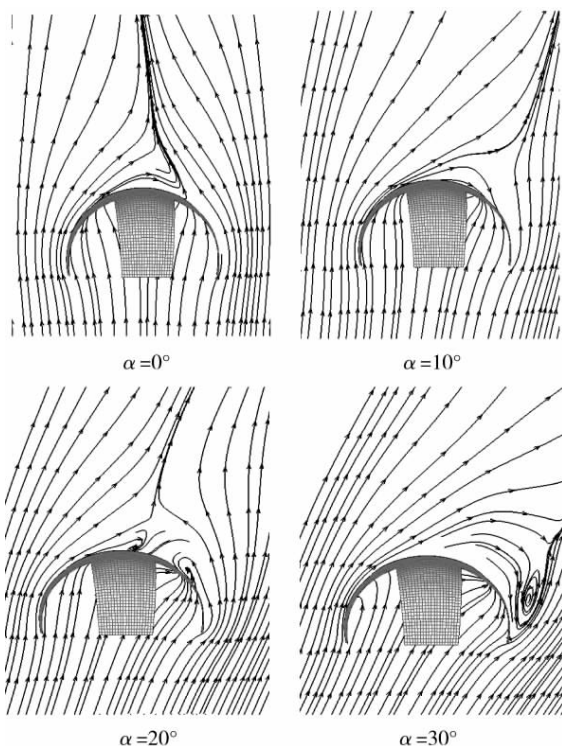


图 6 $X=0\text{ mm}$ 剖面流线图

Fig. 6 Downstream around cross canopy on $X=0\text{ mm}$ section with angle of attack

图 7 给出本文计算的气动力特性和文献[4]中风洞实验结果的对比,可看到轴向力系数计算和实验结果基本一致,而法向力系数有一定的误差,尤其是随攻角增大,误差增大.误差原因主要有两个方面:一是随攻角增大,伞衣上的压力分布不对称,影响十字伞周围的流场和形状,进而影响气动力.本文计算时使用了与 0° 攻角下同样的伞形和网格,没有考虑气动外形随攻角的变形,因此法向力产生了较大的误差,后续工作将考虑这些因素.二是由于十字伞的特殊结构,来流方向和中心轴向有夹角时,气流方向可能正对伞幅或者正对着两个伞幅之间的缝隙,使计算条件无法和实验条件一致.

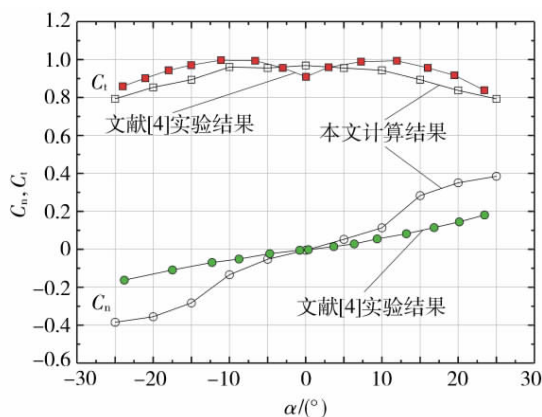


图 7 十字伞气动力特性

Fig. 7 Aerodynamics characteristics of cross parachute versus angle of attack

4 十字伞群气动力特性

本部分计算所采用的十字伞群为某型救灾专用空投系统的十字伞模型,伞群系统由 3 具十字伞组成,每具伞长臂 $L=8.42\text{ m}$,短臂 $W=4.21\text{ m}$,伞绳 $l_s=8.2\text{ m}$,十字伞群的参考面积为 134.8 m^2 .首先基于多节点静力学模型计算出十字伞单伞的气动外形,再得到伞群模型,见图 8 所示.气流方向和中心轴的夹角为攻角.

4.1 十字伞群绕流流场

取伞群稳降速度为 7.0 m/s ,图 9 分别为十字伞伞群 $X=0\text{ mm}$ 剖面流线图和 $Y=8000\text{ mm}$ 剖面压力等值线图.从图中可看出气流在流过伞群时,一部分气流从伞衣之间的侧缝流过,一部分从两个伞之间的缝隙流过,气流在流过伞衣后汇合向后流去,并逐渐转回来流的方向.在十字伞上

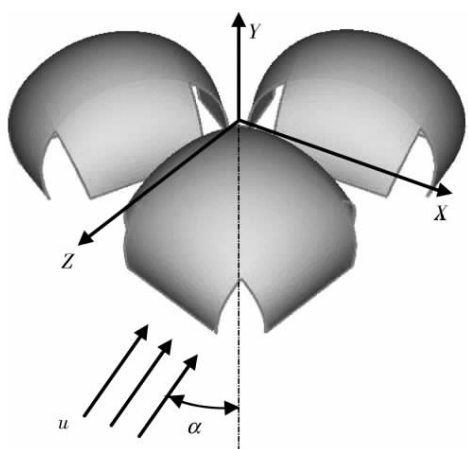


图8 十字伞伞群

Fig. 8 Clusters of cross parachute

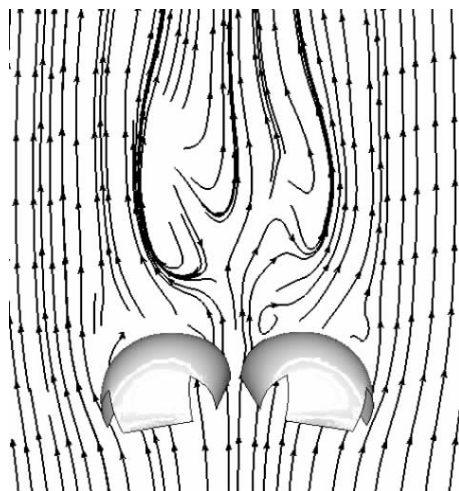
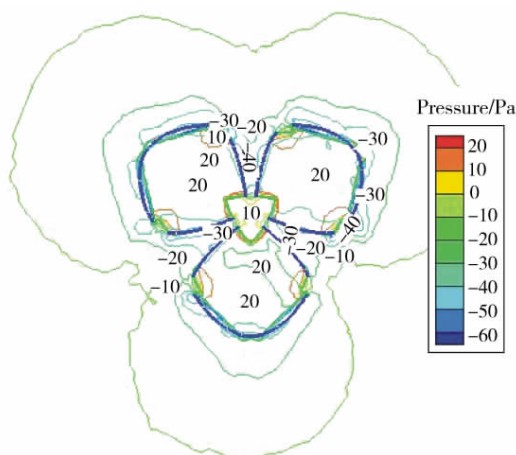
(a) $X=0$ mm剖面流线图(b) $Y=8000$ mm剖面压力等值线图

图9 十字伞伞群流场分布

Fig. 9 Flow around cross canopy of clusters

表面流动出现明显的分离,形成一定负压区,出现大的脱体旋涡,而且伞幅间产生了强烈的涡旋。还有一部分气流在十字伞包围的内部区域内,流速很低接近滞止,从而达到很高的压力值,图中压力值以1个大气压作为参考压力。

4.2 十字伞群气动力特性

图10是不同攻角下十字伞群气动力系数曲线。可以看出,随着攻角增大,轴向力系数先增大后再减小,但值变化不大,法向力系数随攻角增大而增大。

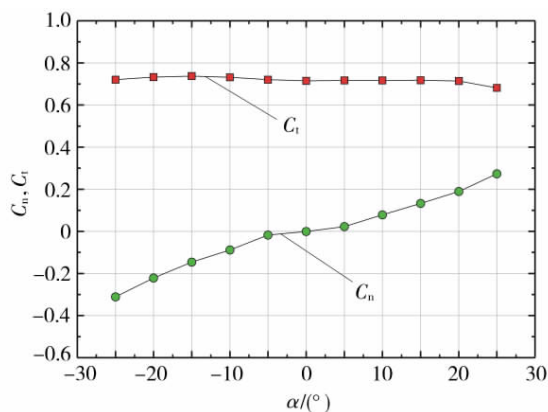


图10 十字伞伞群气动力随攻角变化曲线

Fig. 10 Aerodynamics characteristics of cross parachute clusters versus angle of attack

5 结论

本文建立了多节点静力学模型计算十字伞充满时的气动外形;对不同臂长比和不同伞绳比的十字伞进行数值模拟,与文献中风洞实验结果对比;并应用于某型救灾专用空投系统的十字伞伞群气动外形计算中,最后对伞群的气动力特性进行数值模拟。结果表明:计算结果和文献结果一致性较好,验证了建立的多节点静力学模型合理可行,可用于伞群的气动外形计算,即通过多节点静力学简单模型解决了伞群的复杂气动外形计算问题,从而得到流场和气动力特性;随着伞绳比和臂长比增大,轴向力系数增大;随着攻角增大,轴向力系数先减小后增大,法向力系数则增大。

本文对十字伞伞群进行数值计算时,未考虑织物透气性、非定常效应等因素对气动力特性及伞衣表面压力分布的影响;本课题组建立了伞群系统的多刚体动力学模型^[18],后续研究将进一步考虑织物透气性和非定常效益等这些影响因素并

计算伞群和单伞之间的气动力关系.

致谢:

感谢北京航空航天大学王亚伟博士对论文提出的宝贵意见.感谢航宇救生装备有限公司的张芃高工、陈猛高工和刘兰徽等人给予的支持.

参考文献:

- [1] 王利荣. 降落伞理论与应用[M]. 北京: 宇航出版社, 1997.
- [2] 中国新闻网. 地面交通阻碍严重, 美军开始向海地空投救灾物资[EB/OL]. (2010-01-19)[2011-10-28]. <http://www.chinanews.com/gj/gj-bm/news/2010/01-19/2080016.shtml>.
- [3] 柯鹏. 降落伞系统动力学建模和综合仿真[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.
KE Peng. Dynamics modeling and synthetic simulation of parachute system[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [4] Shen C Q, Cockrell D J. Aerodynamic characteristics and flow round cross parachutes in steady motion[R]. AIAA-86-2458, 1986.
- [5] 国家技术监督局. GB/T5453-1997. 纺织品织物透气性的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [6] Jorgensen D S, Cockrell D J. Aerodynamics and performance of cruciform parachute canopies[R]. AIAA-81-1919, 1981.
- [7] Jorgensen D S. Experimental determination of the input parameters to the parachute equations of motion[R]. AIAA-84-00798, 1984.
- [8] Shen C Q, Cockrell D J. Aerodynamic characteristics and flow round cross parachutes in steady motion[J]. Aircraft, 1988, 25(4): 317-323.
- [9] Shen C Q, Cockrell D J. Flow field characteristics around cup-like bluff bodies, parachute canopies [R]. AIAA-91-0855-CP, 1991.
- [10] Lafarge R A, James M N, Wgwin K. A novel CFD/structural analysis of a cross parachute[R]. AIAA-94-0752, 1994.
- [11] Stein K, Benney R, Tezduyar T, et al. Fluid-structure interaction action simulation of a cross parachute: comparison of numerical predictions with wind tunnel data[R]. AIAA-99-1725, 1999.
- [12] Accorsi M, Leonard J, Benney R, et al. Structural modeling of parachute dynamics[J]. AIAA Journal, 2000, 38(1): 139-146.
- [13] Stein K, Benney R, Tezduyar T, et al. Fluid-structure interactions of a cross parachute: numerical simulation[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001, 191(6/7): 673-687.
- [14] Sathe S, Benney R, Charles R, et al. Fluid-structure interaction modeling of complex parachute designs with the space-time finite element techniques[J]. Computer & Fluids, 2007, 36(1): 127-135.
- [15] Render P M, Coulter P R. The stability and aerodynamic performance of clusters of small cruciform parachutes[R]. AIAA-93-1242, 1993.
- [16] 吴卓, 曹义华, 宋乾福. 锥形降落伞开伞过程流动结构相互作用的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2009, 24(7): 1585-1593.
WU Zhuo, CAO Yihua, SONG Qianfu. Numerical simulation of fluid-structure interaction in conical parachute's opening process[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1585-1593. (in Chinese)
- [17] 潘星, 曹义华. 降落伞开伞过程的多结点模型仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(2): 188-192.
PAN Xin, CAO Yihua. Simulation of parachute's opening process with multi-node model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(2): 188-192. (in Chinese)
- [18] Ke P, Yang C X, Wang Y W. The investigation on a multi-body parachute cluster model[R]. AIAA-2009-2937, 2009.