

doi: 10.7690/bgzd.2013.03.002

十字形伞的实验研究进展及展望

韩雅慧^{1,2}, 杨春信¹, 肖华军³, 徐晓东⁴, 杨雪松⁵, 陈猛⁵

- (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. 空军航空医学研究所第四研究室, 北京 100142; 4. 航空装备研究所第一研究室, 北京 100039;
5. 航宇救生装备有限公司空降空投部, 湖北 襄阳 441022)

摘要: 为了促进我国十字形伞性能的实验研究, 对十字形伞实验方面的研究进展进行了详细讨论, 包括十字形伞的气动参数对其性能的影响, 尤其是伞衣透气性; 介绍了十字形伞周围流场的实验显示技术和气动力特性的测量技术, 并对国内外的研究成果做了介绍。该研究可对我国十字形伞的实验研究和工程设计提供一定的技术参考。

关键词: 十字形伞; 研究进展; 展望; 气动力特性; 流动显示

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Development History and Expectation of Cross Parachute

Han Yahui^{1,2}, Yang Chunxin¹, Xiao Huajun³, Xu Xiaodong⁴, Yang Xuesong⁵, Chen Meng⁵

- (1. School of Aeronautic Science & Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Department of Machinery Engineering, Land Army Aviation Force, Beijing 100123, China;
3. No. 4 Research Room, Research Institute of Air Force Aviation Medicine, Beijing 100142, China;
4. First Research Room, Research Institute of Air Force Aviation Equipment, Beijing 100039, China;
5. Department of Airborne & Airdrop, AVIC Aerospace Life-Support Industries Co., Ltd., Xiangyang 441022, China)

Abstract: To promote experimental research of domestic cross parachute performance, this paper discussed in detail the experimental research progress of the cross parachute systems, including influence factors of the cross parachute aerodynamic characteristics, especially the permeability of the canopy fabric, and which focused on the flow visualization technology around the cross parachute, aerodynamic measurement methods and research achievements of the domestic and foreign research groups. This study can provide technical reference for the experimental research and engineering design of the cross parachute system.

Key words: cross parachute; development; expectation; aerodynamic characteristics; flow visualization

0 引言

十字形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和空投武器的航弹伞等。此外, 十字形伞还用于救生装备, 空降伞兵, 以及无人侦察等领域^[1]。十字形伞作为阻力伞时, 飞机着陆滑跑时依靠阻力伞产生的巨大阻力大大缩短飞机着陆滑跑距离, 保证飞机不会冲出跑道, 从而保证飞行安全; 十字形伞用作载人航天飞船回收伞时, 能使飞船返回地面时减速, 以确保宇航员的生命安全; 十字形伞作为航弹伞时, 主要用于炸弹等攻击性武器和服务性的武器稳定减速, 保证准确的弹道, 增加留空时间和退曳距离, 增大入土或入水角度, 确保载机安全, 达到预定作战效能。

由于十字形伞具有阻力系数大、开伞快、动载小、稳定性好等气动性能, 而且结构简单、成本相对低廉、重量轻、体积小。近几年来, 十字形伞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形

伞伞群系统^[3]; 因此, 笔者主要对十字形伞在实验方面的研究进展, 特别是国外研究小组进行十字形伞的气动力特性和稳定性的研究方法进行介绍。

1 十字形伞性能参数

十字形伞作为阻力伞时的作用效果如图 1。



图 1 苏 34 (鸭嘴兽) 战斗轰炸机^[4]

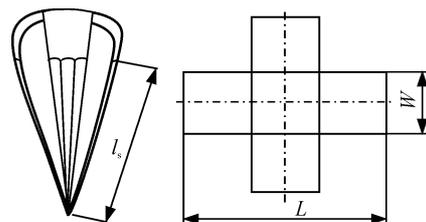


图 2 十字形伞示意图

收稿日期: 2012-09-18; 修回日期: 2012-10-20

作者简介: 韩雅慧(1976—), 女, 陕西人, 博士研究生, 讲师, 从事人机与环境工程系统仿真研究。

目前,对十字形伞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。如图 2 所示,影响十字形伞气动力特性的因素主要有臂长比 A 和伞绳比 R_s , 定义为:

$$A = L / W \quad (1)$$

$$R_s = l_s / L \quad (2)$$

式中: L 为十字形伞长臂; W 为短臂; l_s 为伞绳长^[5]。

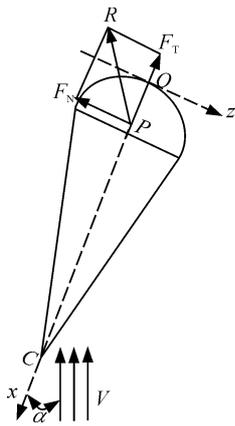


图 3 十字形伞受力

十字形伞受力如图 3 所示, x 轴正向位于伞的对称轴上。气动的合力 R 分解为切向分量 F_T 和法向分量 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 x 轴上。轴向力或切向力 F_T , 法向力或侧向力 F_N , 分别可用下式计算:

$$F_T = \frac{1}{2} \rho v^2 C_T S_0 \quad (3)$$

$$F_N = \frac{1}{2} \rho v^2 C_N S_0 \quad (4)$$

式中: C_T 为轴向或切向力系数; C_N 为侧向或法向力系数; S_0 为十字形伞名义面积, 用式 (5)^[5] 来表示。

$$S_0 = W(2L - W) \quad (5)$$

影响十字形伞性能的主要参数除了臂长比和伞绳比外, 还有透气性参数。伞衣的透气性用 λ 表示, 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。以在规定的试验面积, 压差和时间条件下, 气流垂直通过试样的速率来表示, 即通过单位面积上的体积流量, 单位为 $m^3/(m^2 \cdot s)$ 。透气性的测试是按固定压差作为透气性试验的基准。各国试验标准规定的压差并不一致, 具体见表 1。

我国新标准规定, 根据织物类型选择 50, 100, 200, 500 Pa。不同织物的透气性要求有很大不同, 即使同一织物, 由于使用要求不同, 织物两面压差情况往往是不同的, 故应根据织物自身材料的特性、

使用要求的不同, 而选用不同的压降来进行测试。目前我国降落伞织物的试验压差为 50 Pa, 以降落伞近地稳降阶段的伞衣内外压差为标准^[6]。

表 1 十字形伞透气性^[6]

国家	透气性单位		依据
	Pa	毫米水柱	
美国	127.4	13	ANSI/ASTM. FS191/5450
日本	127.4	13	JISL1096
法国	196.0	20	NF G07-111
英国	98.0	10	BS5636
	160.0	16(降落伞)	
德国	100.0	10(服装织物)	DIN 53387
	200.0	20(工业织物)	

2 国外研究机构

国外十字形伞的研究机构主要包括英国的莱切斯特大学、拉夫伯勒科技大学和美国的圣路易斯大学、赖斯大学、康涅狄格大学以及位于 Natick 的美国陆军士兵中心(US. Army Natick Soldier Center) 等几个研究小组。

2.1 莱切斯特大学

英国莱切斯特大学研究小组主要以风洞和水洞实验为主, 他们实验设备齐全精准, 系统地研究了十字形伞单伞的臂长比 A 、伞绳比 R_s 和伞衣的透气性 λ 对气动力特性和稳定性的影响以及十字形伞流场显示实验测量技术。

Jorgensen 和 Cockrell 在 1981 年通过风洞和水洞试验, 研究了臂长比为 4:1、2:1、3:1、5:1 等几种十字形伞在不同雷诺数范围内 ($1 \times 10^5 \sim 3.7 \times 10^5$) 的气动特性, 得到了十字形伞臂长比对气动特性的影响。其中风洞实验是在莱切斯特大学工程系风洞中进行的, 实验段截面为 1.14 m × 0.84 m; 而水洞实验是在南安普顿大学 61 m × 3.7 m × 1.8 m 水洞中进行^[7-9]。图 4 为风洞实验中的十字形伞, 图 5 为十字形伞的流场显示和压力分布。从图 5 中看出, 不同攻角伞衣形状不对称, 而且随臂长比增大, 这种不对称变化越明显。

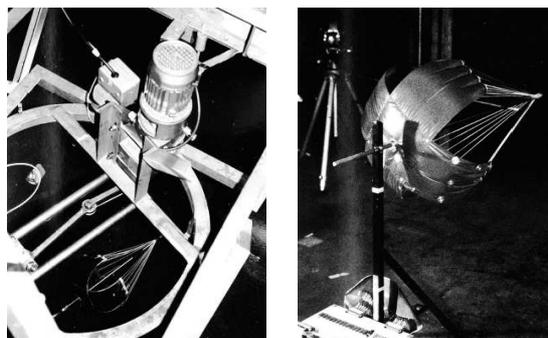
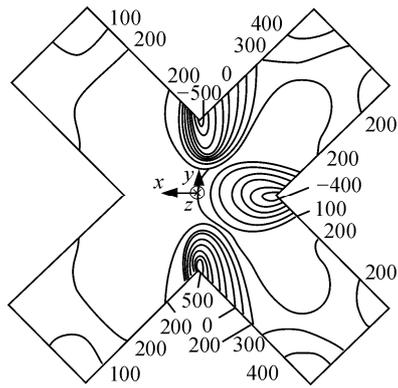


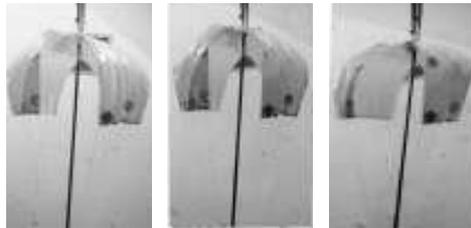
图 4 风洞实验中十字形伞^[9]



(a) 十字形伞压力分布^[7]($A=4, \alpha=10^\circ$)



(b) 烟雾示踪显示流场^[9]($A=3, \alpha=0^\circ, Re=3.9 \times 10^5$)



$\alpha=0^\circ$ $\alpha=10^\circ$ $\alpha=20^\circ$

(c) 不同攻角伞衣的形状^[9]($A=4, Re=6.1 \times 10^5$)

图 5 十字形伞流场显示和压力分布

英国莱切斯特大学的 Shen 和 Cockrell 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、13、23 ($\text{ft}^3/\text{ft}^2 \cdot \text{s}$) 的 27 个柔性十字形伞模型进行不同雷诺数 ($1 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$) 的风洞和水洞实验研究，十字形伞的名义面积都为 0.108 m^2 。该课题组在风洞中对十字形伞进行了大量的力学测量和流场显示实验，并在水槽中进行的阻塞效应实验。文献中共对 27 个柔性的十字形伞模型进行了测试，用丝线法和中性浮力的气泡观察十字形伞周围的流场，分析了十字形伞气动力特性和尾迹流场^[10-12]。

流场实验与力学测量在相同的风洞中进行，实验雷诺数在 $1 \times 10^5 \sim 2 \times 10^5$ 之间。如图 6 所示，伞模型安装在支撑杆上并与三分量天平相连的，三分量天平用来测量气动力。而流场显示是用丝线法和中性浮力的气泡来观察，如图 7 所示。丝线贴在金属

丝网的节点上，节点间距为 25 mm，金属丝网框架置于伞的尾流中，通过丝线在流场中的流动显示出十字形伞周围的尾迹流场。而在气泡实验装置中，充满氦气的中性气泡从一头顺流喷出，气泡随流场流动，在流场的下游有一个带遮板的光源，相机安放在实验段以外，获得实验影像以分析流场。

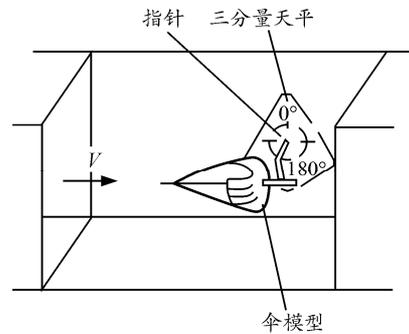
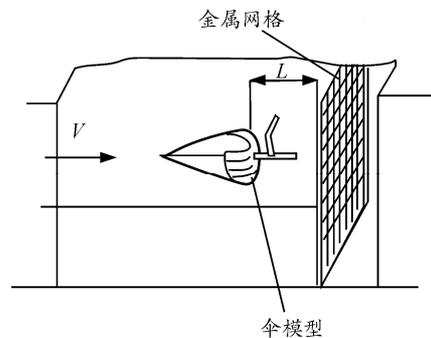
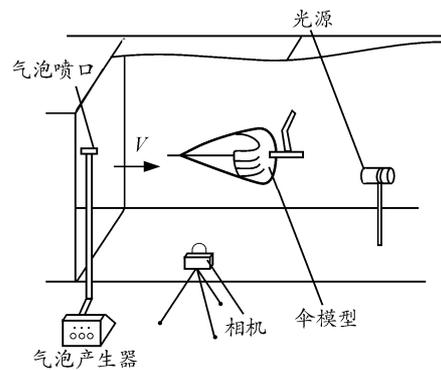


图 6 风洞实验装置^[10]



(a) 金属丝流场显示装置



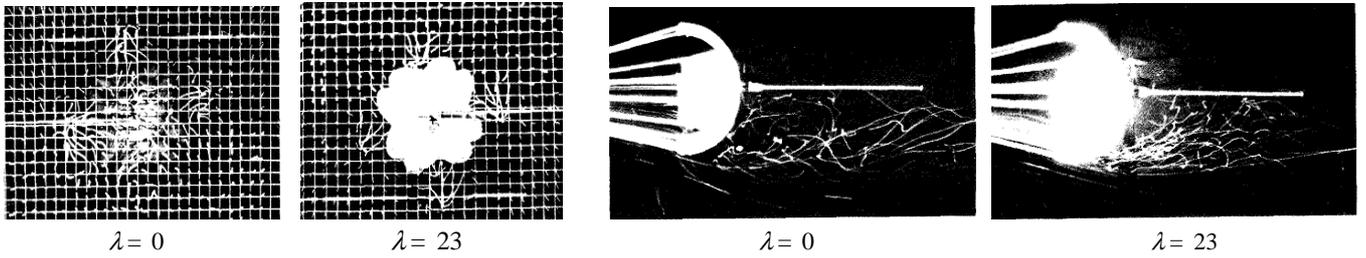
(b) 中性气泡流场显示装置

图 7 流场显示装置^[10]

在风洞实验段中，由于不能忽略降落伞的阻塞效应，所以 Shen 和 Cockrell 又进行了水洞实验。将伞模型置于水中，固定在一个应变仪支架上，支架与拖车相连。拖车以 1.5 m/s 的速度在长 61 m、截面 $3.7 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$ 水池中移动，得到阻力系数的阻塞修正系数，用于修正风洞实验数据^[7]，图 8 和图 9 分别是实验的流场显示结果和气动力特性变化曲线，其中气动力特性曲线是把文献中的数据重新处

理之后的结果。从十字形伞的流场显示和气动力特性可看出，臂长比 A 、伞绳比 R_s 和伞衣的透气性 λ 是影响十字形伞的性能的主要因素。透气性越大，

透过伞衣的气流越多，伞衣面的压力差减小，轴向力系数减小。臂长比的增大，轴向力系数变化不大；伞绳比增大，由于阻力面积增大，轴向力系数变大。



(a) 丝线法流场显示 (伞后 150 mm, $A=3.0$)

(b) 中性气泡流场显示 ($A=3.0$)

图 8 十字形伞尾流流场^[11]

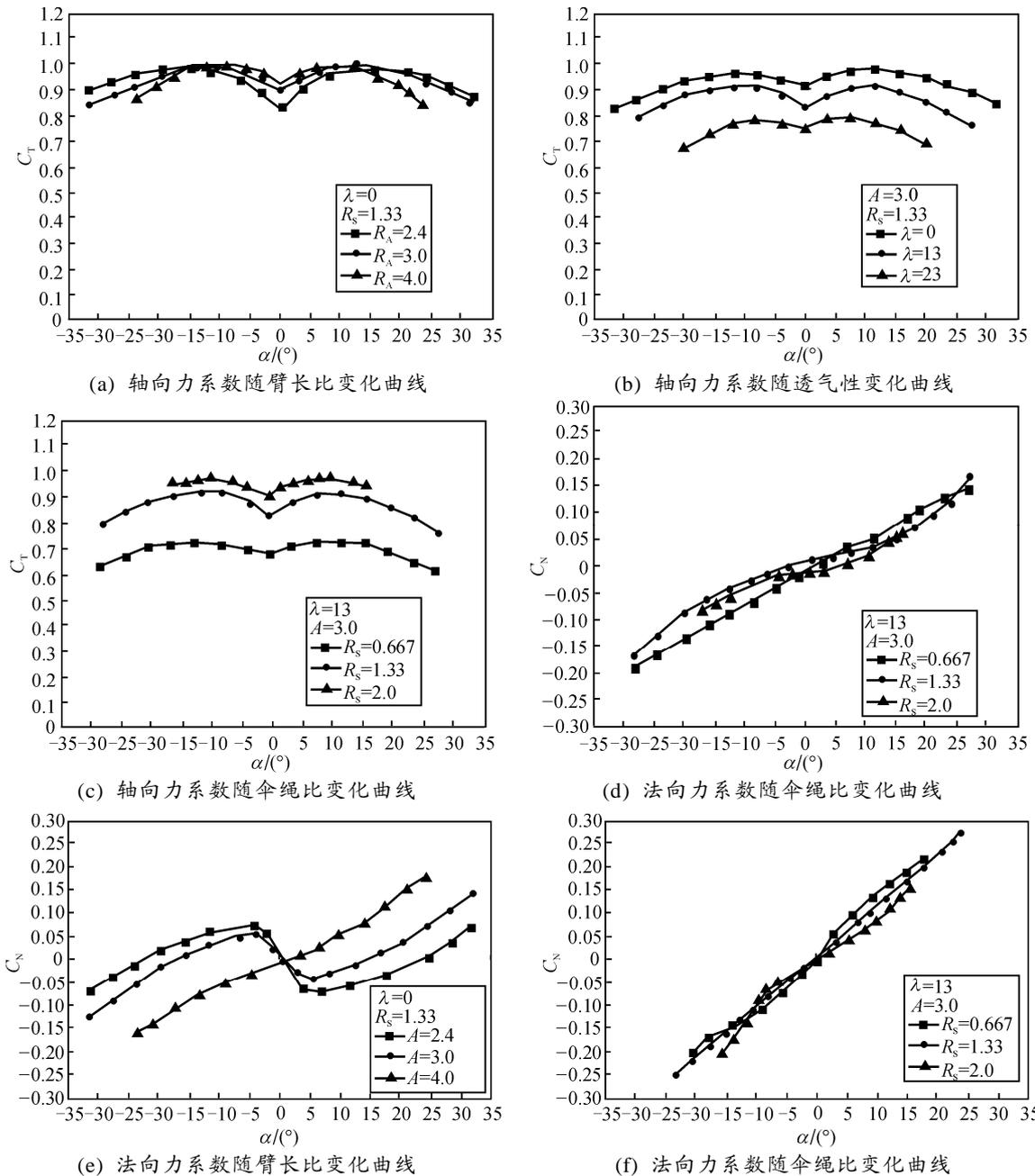


图 9 十字形伞气动力特性^[10]

2.2 拉夫伯勒科技大学

英国拉夫伯勒科技大学研究小组主要是针对十字形伞伞群的稳定性和与单伞气动力特性之间的关系进行研究的, 实验还研究了伞绳长、连接绳长和系留绳长对气动力特性的影响。实验是在一个开式射流风洞中进行, 出口截面尺寸是 1.07 m×0.76 m, 最大的风洞速度为 24 m/s。

拉夫伯勒科技大学的 Render 和 Coulter 在 1993 年通过风洞实验研究了小型十字形伞伞群的稳定性与气动特性^[13-15], 见图 10。该课题组研究了 2 种不同尺寸大小的十字形伞伞群, 得到不同雷诺数范围中十字形伞伞群系统的阻力特性以及伞群和单伞阻力关系, 见式 (6)。

$$C_D^c = \frac{C_D A}{3S_F} \quad (6)$$

式中: C_D^c 为伞群的阻力系数; $C_D A$ 为单个伞的阻力特征; S_F 为单伞稳降面积, 对应于稳降直径。

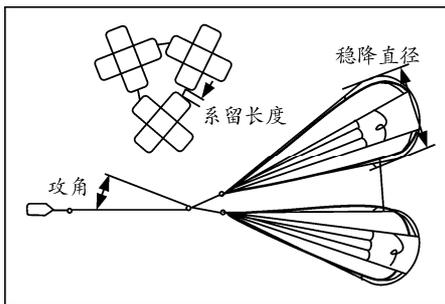


图 10 十字形伞伞群^[13]

2.3 圣路易大学

美国圣路易大学的 Potivin 课题组和赖斯大学、美国陆军内蒂克士兵中心、康涅狄格大学进行合作对 NWV-PAD (new world vistas-precision aerial delivery) 系统进行了空投实验、风洞实验以及流固耦合计算。NWV-PAD 系统是美国空军设计的低成本和高精度空投系统, 且投放高度可高达 3 048 m。该系统主要采用的关键技术包括: 单个十字形伞系统、滑动收口装置控制开伞、预测气象数据和自主导航控制, 用来提高空投精度。

圣路易大学的 Potivin 等人在 1999 年通过风洞实验研究了 NWV-PAD 系统中十字形伞在不同伞绳长度时的气动外形以及十字形伞缩比模型的表面压力分布和气动特性, 并与流固耦合计算结果进行对比。风洞实验是在圣路易大学的开放式风洞进行的, 速度范围是 13~60 m/s。该课题组 2001 年和 2003 年通过空投实验得到十字形伞的阻力特征、下降速度以及空投轨迹等^[16-20]。

国内开展十字形伞系统的研究甚少, 主要有空军装备研究院航空装备研究所、航宇救生装备有限公司和北京航空航天大学等。航宇救生装备有限公司现有 DFD-03 风洞一座, 是单回流式开口低速风洞。试验段为圆形, 直径 2.5 m, 长 5.6 m, 最大风速 100 m/s, 风速连续可调。该风洞常规测力试验可同步完成 15 个受力分量的测量, 常规测压试验可同步完成 30 个通道试验^[21-23]; 因此, 国内具备十字形伞风洞实验的基础, 可以通过实验和数值计算来研究十字形伞性能。

2.4 小结

对十字形伞系统的实验研究主要包括风洞实验、水洞实验以及空投实验等。空投实验由于费用昂贵, 因此国外各研究小组主要以风洞实验和水洞实验为主, 研究对象是十字形伞单伞和伞群, 针对十字形伞单伞的研究主要是气动力特性、稳定性及其影响气动力特性的主要因素; 而对于十字形伞伞群的研究主要是伞群和单伞气动力特性之间的关系以及伞群系统的稳定性。

3 风洞实验技术

3.1 风洞和水洞

国内外研究小组主要采用风洞实验来进行十字形伞实验研究。除此之外, 英国的莱切斯特大学还进行了水洞实验, 圣路易斯大学和美国陆军士兵中心还进行了空投实验, 各研究小组的风洞如表 2 所示。降落伞风洞测试技术是风洞实验的关键, 主要包括流动显示技术、气动力测量技术和相似缩比模型研究等^[24-25]。

表 2 风洞列表

研究小组	几何尺寸/m	速度范围/(m/s)	开闭式	国家
莱切斯特大学	1.14×0.84	—	回流闭式	英国
拉夫伯勒科技大学	1.07×0.76	0~24	开式射流	英国
圣路易斯大学	16.8×12.2×8.5	13~60	开式	美国
航宇救生装备有限公司	Φ2.5×5.6	0~100	单回流开口低速	中国

3.2 流动显示技术

流动显示技术主要是采用各种方法显示流动情况,便于理解和研究流动特性。流动显示技术所采用的方法可分为传统的流动显示技术和计算机辅助方法。传统的流动显示技术有:壁面显迹法、丝线法、示踪法和光学法,分别适用于不同的速度范围。示踪法通常采用的示踪物有烟雾示踪、染色、悬浮中性粒子、氢气泡、纹影、阴影、酚蓝等^[26-27]。

文献[9]中主要采用了烟雾示踪方法显示了十字形伞尾迹流场,而文献[10-11]则通过丝线法和悬浮中性气泡方法来显示十字形伞周围的流场,见图 5(b)和图 8。

3.3 气动力测量技术

气动力测量技术是风洞实验的主要类型,约占风洞试验的 70%,气动力测量通常有测力法和测压法 2 种。测力法主要是用特殊设计的天平测量模型总体所受的力和力矩,测压法一般是测量模型表面或流场中相应点的压强,然后通过积分得到模型的受力情况^[28]。图 11 是文献[10]中用来测量气动力的三分量天平。

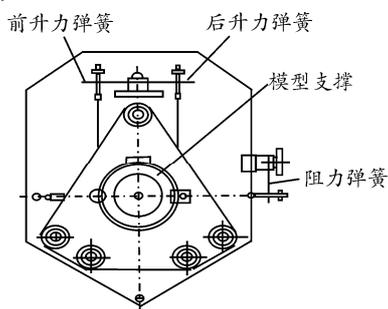


图 11 三分量测力天平^[10]

3.4 缩比模型

由于受风洞几何尺寸的限制,很多实验都是通过研究缩比模型来研究降落伞系统的气动特性。根据流场相似性原理,将实验件固定在试验段内,当气体以一定的速度流过模型时,测量记录流场的参数和缩比模型的气动力响应,即可推算到与模型对应的原型降落伞气动特性。美国圣路易大学在通过风洞实验研究 NWV-PAD 系统中的十字形伞系统的性能时,则采用缩比模型来研究。

4 总结与展望

十字形伞是一种制造简单、成本低廉,且减速稳定效果非常良好的一种气动力减速装置。通过借鉴国外实验研究技术研究可以看出:透气性越大,

透过伞衣的气流越多,伞衣面的压力差减小,轴向力系数减小。臂长比的增大,轴向力系数变化不大;伞绳比增大,由于阻力面积增大,轴向力系数变大。该研究可为我国进行十字形伞性能的实验研究提供一定的技术参考。

由于十字形伞工作过程的气动复杂性,基于流固耦合计算方法在国内目前的工作中尚不成熟,且因其过于复杂,还不能应用到伞群计算中,十字形伞风洞实验与测试技术在近一段时期仍将是十字形伞发展的主要手段;因此,笔者下一步将主要对以下 2 个方面进行研究:1) 考虑透气性等因素对气动力特性的影响,通过风洞实验研究伞衣的气动外形变化,并结合数值模拟计算十字形伞从开伞过程的伞衣变形、过载以及受力等问题;2) 考虑研究十字形伞群和单个十字形伞的气动力之间的关系。

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]. <http://www.chinanews.com/gj/gj-bm/news/2010/01-19/2080016.shtml>, 2010-01-19.
- [3] 韩雅慧, 杨春信, 等. 十字形伞伞群的多节点静力学模型和气动力特性研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(4): 742-748.
- [4] <http://news.xinmin.cn/rollnews/2011/10/24/12467636.html>.
- [5] Shen C Q, Cockrell D J. Aerodynamic Characteristics and Flow Round Cross Parachutes in Steady Motion[R]. AIAA-86-2458. Albuquerque, New Mexico, U.S.: AIAA, 1986.
- [6] 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.
- [7] Jorgensen D S, Cockrell D J. Aerodynamics and Performance of Cruciform Parachute Canopies[R]. AIAA-81-1919, San Diego, California, U.S.: AIAA, 1981.
- [8] Jorgensen D S. Experimental Determination of the Input Parameters to the Parachute Equations of Motion[R]. AIAA-84-0798, Hyannis, MA, U.S.: AIAA, 1984.
- [9] Jorgensen D S. Cruciform Parachute Aerodynamics[D]. University of Leicester, 1982.
- [10] Shen C Q. Flow Field Characteristics around Bluff Parachute Canopies[D]. University of Leicester, 1987.
- [11] Shen C Q, Cockrell D J. Aerodynamic Characteristics and Flow Round Cross Parachutes in Steady Motion[J]. Aircraft, 1988, 25(4): 317-323.
- [12] Shen C Q, Cockrell D J. Flow Field Characteristics Around Cup-like Bluff Bodies, Parachute Canopies[R]. AIAA-91-0855-CP. San Diego, CA, U.S.: AIAA, 1991.
- [13] Render P M, Coulter P R. The Stability and Aerodynamic Performance of Clusters of Small Cruciform Parachutes[R]. AIAA-93-1242. London, England: AIAA, 1993.