

环 帆 伞 设 计

Ringsail parachute design

AFFDL-TR-72-3, AD745335, 1972

(降落伞技术特刊)

降落伞技术编委会

一九七七年

译者序

当前，美苏两霸的争夺越演越烈，他们在宇宙空间的争夺也毫不例外。美帝国主义为了在宇宙空间保持对另一个超级大国的优势，拼命发展空间技术，飞行器越来越多，越来越大。为了寻找一种可靠的能安全着陆的回收手段，对各种降落伞作了大量的试验和研究。本文——“环帆伞设计”介绍的环帆伞就是其中的一种。它总结了二十多年来美国在环帆伞的研制过程中的经验和教训，从发展历史到目前现状，从伞结构到伞性能，从结构分析到各种试验，从设计程序到具体制造和装配都作了比较详细的介绍。本书具有一定参考价值。希望读者遵照毛主席关于“**洋为中用**”的教导，批判地吸收国外的科学成果，结合我国的具体情况开展设计和研究工作。

本书在翻译过程中，得到南航李锐同志的大力支持和帮助，在此特表谢意。

由于我们翻译水平不高，有错误或不妥之处，请读者批评指正。

降落伞技术编委会

1977年5月于襄樊

目 录

第一节 序言	1
第二节 发展史	2
2.1 历史的回顾	2
2.1.1 环帆船的设计原理	2
2.1.2 第一个样品伞的演变	2
2.1.3 伞衣形状和结构的演变	6
2.1.4 环帆船多伞系统的研制	14
2.1.5 环帆船的总结	24
第三节 性能特性	29
3.1 阻力系数	30
3.1.1 伞衣单位载荷 ($W/S_D S_0$) 的影响	30
3.1.2 比例影响	30
3.1.3 伞绳长度的影响	30
3.1.4 伞衣透气量的影响	31
3.1.5 下降速度的变化	32
3.1.6 多伞系统的影响	32
3.2 开伞动载系数	33
3.2.1 开伞动载—时间特性	37
3.3 充气时间间隔(时间、距离、 k_f)	40
3.3.1 充气时间和 k_f	40
3.3.2 充气距离	41
3.4 稳定性	43
3.5 收口阻力特征	46
3.6 开伞的可靠性和可重复性	47
3.7 破坏的忍耐性	49
第四节 重量和体积	51
4.1 不包括连接绳的降落伞本身的重量	51
4.2 与连接环连接的伞绳	51
4.3 连接绳装配件	51
4.4 整个降落伞系统	51
第五节 设计方法	54
5.1 基本尺寸计算	55
5.2 选用材料	58

5.2.1 伞衣织物	59
5.2.2 伞绳和顶孔绳	60
5.2.3 辐射带	60
5.2.4 连接绳	60
5.2.5 圆周带	60
5.2.6 垂直带和横带	60
5.2.7 各种各样的织物构件	61
5.2.8 金属零件	61
5.3 用计算机设计环帆船	61
第六节 设计分析方法	62
6.1 计算系统的轨迹	63
6.2 环帆船的气动力特性	63
6.2.1 下降速度	63
6.2.2 阻力系数	64
6.2.3 收口阻力特征	64
6.2.4 收口绳长度的计算	65
6.2.5 充气时间	66
6.2.6 无量纲充气时间的推导	67
6.2.7 稳定性	68
6.3 预计开伞动载	69
6.3.1 动载系数法	70
6.3.2 质量——时间法	71
6.3.3 面积——距离法	73
6.4 应力分析	74
6.4.1 结构设计系数	74
6.4.2 简要法	75
6.4.2.1 伞衣	75
6.4.2.2 伞绳	76
6.4.2.3 辐射带	77
6.4.2.4 连接绳	77
6.4.2.5 圆周带	77
6.4.2.6 收口绳	78
6.4.2.7 引导伞连接绳和支绳	79
6.4.3 计算机方法	79
6.5 环帆船重量计算	80
6.5.1 伞衣和伞绳	80
6.5.2 连接绳	81
6.6 计算环帆船的透气量	81
第七节 设计细节	83

7.1 帆的图形	83
7.2 帆边带(横带)	84
7.3 辐射带	84
7.4 垂直带	84
7.5 伞衣幅分组件	84
7.6 辐射缝合部	84
7.7 圆周加强带	84
7.8 伞绳和顶孔绳	84
7.9 引导伞连接绳之支绳	85
7.10 连接绳	85
第八节 制造与装配	86
8.1 铺料和裁剪	86
8.2 帆边带	86
8.3 辐射带	86
8.4 垂直带	86
8.5 伞衣幅分组件	86
8.6 圆周带	87
8.7 伞绳和顶孔绳	87
8.8 连接绳	87
8.9 伞衣装配件	87
8.10 降落伞装配件	87
8.11 尺寸容差	88
8.12 质量控制	88
附录A 出色的环帆伞	90
附录B 环帆伞的特殊用途	135
附录C 样品设计问题	140
附录D 三倍织边物的技术条件	148

环 帆 伞 设 计

第 一 节

序 言

第一具环帆伞是环缝伞的改型,开始,它并不引人注目;但是,在两次验证试验摆脱了一筹莫展的局面后,人们发现它性能理想,优点突出。自从1955年2月的那一天以来,环帆伞在性能方面和设计方法已经得到改进,并大量用于导弹和无人机的回收系统。同时也用于各种宇宙飞行器的回收和着陆系统,包括水星、双子星座和阿波罗的回收和着陆系统。

本文的目的是想为设计者提供成功地设计一种接近最佳性能的环帆伞所需的全部详细资料。文章一开始回顾了环帆伞的发展史,旨在暴露设计道路上的隐患,使设计者避免重蹈复辙。

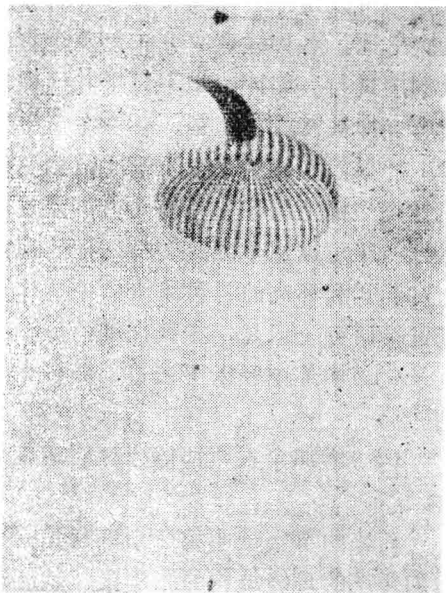
最早设计的环帆伞之一是为海军研制的“天帆”人用伞。1958年,在一次例行的跳伞试验中,由海军跳伞队队长H·W·彼卡得从加利福尼亚州的埃尔·森特罗海军航空站飞出,在索尔顿海海面上进行了天帆伞的首次试跳。自那以后,数百名海军航空兵和一些跳伞员用天帆伞跳伞并没有事故发生。

这段历史的回顾特别着重于阿波罗地球着陆系统多伞系统的改型环帆伞的研制。在大量发表的文献中,这种伞的名义直径为83.5呎,但这指的是本文中的实际尺寸直径 $D_0 = 85.6$ 呎的伞。83.5呎是从伞衣面积扣除掉宽缝面积计算出来的,所得到 S_0 的值不能用来对性能作比较。

这段历史的回顾包括总结所有现有的环帆伞的显著特点,附录A中附有一整套伞衣幅的图样和张满度分布图,并介绍了最普通的环帆伞样品。附录B提供了若干种改型结构特殊用途的环帆伞重要数据。最后对环帆伞设计和工作理论的现状作了估价。

右图, D_0 为128.8呎双环帆伞多伞系统,在挂重为17,720磅时,以26.1呎/秒当量空速速度下降。

第三节汇集了从装有测量仪器的空投试验中积累的环帆伞的性能数据。虽然删去了一些不规则的数据点,并把数据处理成最有利于设计者的形式,但数据仍然散布很广。尽管对一些环帆伞模型所报导的测量结果显然还有争议,但完全否认这些测量结果将使曲线图留下不合理的空白。另一方面,由于文献不齐



全,性能曲线的品质也值得怀疑。在文献馆里找不到某些重要的试验报告,据推测,这些报告丢了或毁了。其它试验报告实际上也不完全。所知道的关于环帆船性能的全部资料都集中在第三节,以便尽可能准确地为设计者提供可靠的指南。第四节总结了在制造所有环帆船中积累的重量数据。

第五节详细介绍了环帆船设计一步步的程序。这是最终产生原型伞所必需的尺寸数据和材料要求的最简单的程序。附录C用数字实例对设计程序作了说明,并对重量和体积作了初步的估计。第六节介绍了设计的分析方法,通过分析可以改进原型伞的设计,确定收口的要求,预测性能特性和开伞动载,进行精确的应力分析并计算重量、体积和透气量。设计分析通常是空投试验前不可或缺的条件,空投试验的目的是通过检验气动性能和结构的完整性来完成伞的设计研制。只有试验成功,才能准备新伞的制造样板图。

第七节介绍了环帆船独特的结构特点,作为准备制造样板的指南。第八节介绍了环帆船的制造和装配技术,并讨论了控制质量的方法。

第 二 节

发 展 史

2.1 历史的回顾

在这里介绍名叫环帆船“设计手册”的发展史,其目的是使降落伞的设计者(特别是富有创新精神的设计者)了解许多试验过的各种结构和设计方法。特别是那些经过试验证明是不合理而放弃的结构和设计方法。

2.1.1 环帆船的设计原理

1953年,在实施旨在加速研制作作为飞机减速伞的环缝伞工程研究计划的过程中,已经认识到可以用许多环缝和帆交替的方法组成圆形伞。事实上,每幅伞衣幅可能的组合,缝宽与帆宽之比,各种缝宽的分布以及伞衣侧剖面形状,数量之大,以致相当大一部分试验不能在风洞中进行。因此,毫不奇怪,当提出帆的鼓起或“张满度”应该在前缘和后缘间变化时,并没有立即被接受,但是,在参考1中记录如下:

“显然,环缝伞伞衣幅的结构变化范围很广,不仅缝和楔形块的数量和宽度可以变化,而且每一幅上的辐射裁剪角也可以改变。除了通常用改变伞衣幅的宽度来影响整个伞衣的形状外,还可以用单独改变每一环的迎角和张满度的方法来改变伞衣的形状。已经在一定程度上对缝宽和环高的各种组合的影响作了研究,而对单独改变每一环的张满度和迎角的影响还没进行研究。但是,根据仔细验证,结果是很有希望的。可以直接得出两种可能性:

(1)增加中径以下底边部分各个环的平均迎角将对阻力系数和开伞特性产生有利的影响。

(2)增加伞衣顶部部分环的宽度,由于局部的曲率半径减少了,必将减少织物的横向应力。”

后来的事实证明第一个推断是完全正确的。对于第二个推断,只要简单地在环帆船顶部增加传统的环境结构的张满度,就能得到良好的效果。

2.1.2 第一个样品伞的演变

直到1955年才有机会对环帆船的结构进行试验,同时进行了两项不同的试验。这些计划的第一项是在1954年4月开始的,当时提出要航宇局研制环帆人用伞(参考2)。这项试验计划的目的是改进海军航空兵的救生系统,该系统在速度为400哩/小时伞的开伞动载不超过25g,并要求包装重量和体积小。

根据环帆船的设计理论(参考2)中以下几点,图1所示的天帆船结构是合理的。

“尽管存在着这样一种可能性,即逐步改进密织物成形伞伞衣的伞衣幅座标,可以实现所希望的改进;环缝伞的经验说明,但是采用合理分布其结构透气量的方法希望大些。然而,以阻力效率和开伞可靠性为一方,伞的稳定性和开伞动载为另一方之间的平衡是很脆弱的,只要结构开缝的大小和形状不佳,这种平衡很容易受到破坏。核心问题是以适当控制通过伞衣气流,提供满足稳定性要求的结构透气量。对气流的控制应是双重的:

(1)开孔应在充气过程中有良好的排气性,以减少开伞动载。

(2)在稳定下降过程中,开孔的边缘应阻止排气,以提供最大的阻力系数。

仅仅由于在充气过程中和在稳定下降过程中伞衣的形状和流场特性不同,问题的解决是可能的。像环缝伞那样,天帆船的结构透气量分布在许多窄的同心圆环上(图1)。然而,这两种伞之间的相同之处也仅仅在于此。除了主要结构上的差别外,环缝伞与天帆船本质上的差别是……(上面是从参考1中引用的说明)。由此准确地单独控制伞衣上的每一圆环。因此,在充气的过程中,伞衣透气量的绝对值比较大,但充气后突出部分的结构透气量小,通过的气流干扰变为最大。同时,连接在一起各个织物环的前缘以大的迎角面向气流,因而保证了充气的可靠性。

估计5%到10%之间的结构透气量将满足所有的要求,但是,任何新的伞衣幅结构的气动弹性中所固有的不可靠因素,只有通过充分的实验才能解决。同样道理,不能设想帆的结构(图1所示)一定最好,但依照理论上的推断,成功的可能是大的。

1954年12月,在签订研制天帆船的合同之前,XQ-4A无人机上所需要的高性能回收伞促进了第一具环帆船的设计,制造和试验。1955年2月试验的第一具环帆船(参考3),其伞衣名义直径(D_0)为64.7呎,48幅、10环帆,帆的尺寸是根据成形伞衣幅座标推算出来的(如图2所示)。为了寻求计算在结构上比较保守的帆宽的方法,取平面伞衣幅的座标作为主要基准,取接近张满形状旋转面的座标作下边界的基准。其结果是一种成形的伞衣幅在辐射带之间鼓起的修正量,比实际上为减少应力所需的修正量大得多。

1955年2月,在加利福尼亚州的埃尔·森特罗空投试验了 D_0 为64.7呎的原型环帆船,它的一般特性与后来观察到的 D_0 为84.2呎双子座环帆船的特性是一样的——完全

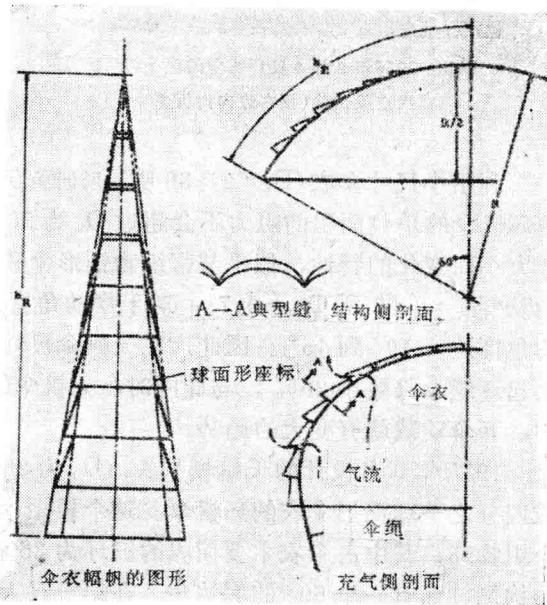


图1 天帆船的结构

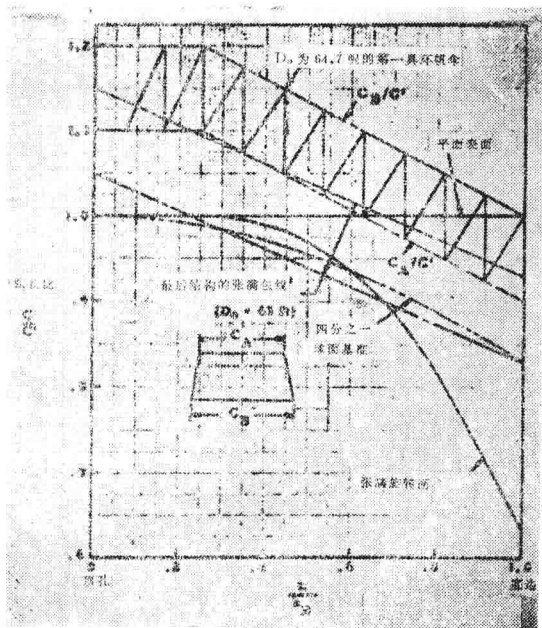


图2 第一具环帆伞帆张满度的分布

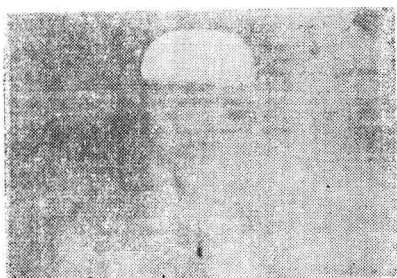


图3a 1955年2月4日环帆伞的第一次空投试验(帆右边向内折叠)

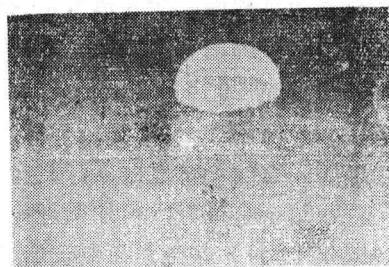


图3b 从48幅中取掉两幅后的环帆伞

张满的伞衣是松弛的而且喘振，在伞衣的一边有几幅向内折叠(图3a)。

为了尽快地继续这项试验方案，从现有试验样品伞的伞衣去掉两幅，克服伞衣向内折叠的现象(图3b)。46幅($D_0 = 63$ 呎)的改型环帆伞，直到制造出新的，48幅、帆的尺寸作了修改(如图2所示帆宽减少了10%左右)的模型伞才停止使用。

在后来的研制和鉴定试验的过程中，从测量的近似的下降速度推算出来的阻力系数平均为 $C_{D0} = 0.73$ ，比新伞更换的 D_0 为 56 呎的环缝伞伞衣的阻力系数增加 30%。然而，平均摆动角增加了 40%，即从 $\pm 5^\circ$ 增加到 $\pm 7^\circ$ 。对于装有气囊缓冲系统的回收系统，既然稳定性还可以接受，其阻力效率的增益几乎完全是净得的，因此，可以断定，环帆伞的设计原理被证明是完全成功的。

利用小尺寸伞衣($D_0 = 27-30$ 呎)来研究天帆伞，工作更难进展。 D_0 为 18—41 呎范围内的环帆伞的单位面积的阻力不会超过 D_0 为 56 呎环帆伞。在这方面，环帆伞的阻力系数随尺寸大小而变化的特性，似乎与密织物锥形伞和底边延伸伞相似。平均阻力系数的变化范围大约从 $C_{D0} = 0.67$ 到 $C_{D0} = 0.71$ ，对于摆动角度为 $\pm 7^\circ$ 的稳定性并没有什么改进，而有时平均角度达 $\pm 10^\circ$ 到 15° 。因此，在天帆伞尺寸范围内，稳定性相同的伞，其阻力系数的增益比起环缝伞来要小 20%。与此同时，天帆伞的开伞动载也不小。而且，只要帆的迎角一增加，开伞动载就有变大的趋势。

1955 年 6 月设计的天帆模型 A (D_0 为 26.9 呎，20 幅)，是第一具可以按伞衣幅座标做成四分之一球面形伞衣的环帆伞。这个模型伞各方面的性能都是欠佳的，这是由于只用了 6 个织物环，其中占伞衣主要面积的三环为 36 吋宽，而且底边环没有张满度，即如图 1 所示，结构侧剖面有一个 60° 的底边角。在第一具天帆伞所采用的张满度分布如图 5 所示。该模型伞帆展开的迎角不合适，而且，其结树透气量低。

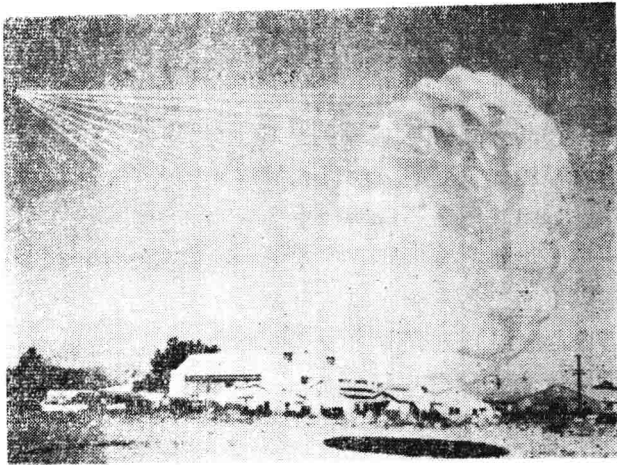


图4 天帆模型A在风中

设计文献引伸来的收紧带安在伞衣上，经过一些试验之后，发现开伞特性并无显著的改善，就把它放弃了以简化结构。但是现在可以认为，试验的测试太粗糙了，不足以作为结论的证据。环帆上的收紧带的效果应与其它伞上的收紧带的效果一样。

(3)XB-3: 把伞衣底边环(*9)从伞衣上去掉，将伞衣底边夹角从 60° 减至 54° ，这一变更同时使名义直径减少到 $D_0 = 26.8$ 呎，但更重要的是，它使伞衣在底边帆(*8)上产生一个张满度为 17.5% 的外张底边。然而，帆前缘的平均张满度为 13% 左右，则伞衣完全张满时的半月形缝较大，而且由于结构透气量过大 ($\lambda_g = 13.5\%$, $\lambda_T = 16.6\%$)，获得的阻力系数小。

为了克服模型B性能差的缺点，设计了天帆模型C (D_0 为 28.3 呎，24 幅)：幅窄了，24 幅 (代替 20 幅)，幅前缘平均的张满度减至 9% (代替 13%)。然而，伞衣又做成四分之一球面形状，伞衣底边夹角为 60° 。其理由是模型B张满底边没张紧容易颤动，但这一退步是综合因素造成的，况且模型C的阻力系数并不比模型B大。

天帆模型D伞 (D_0 为 29.6 呎，24 幅) 是按照航宇局的合同研制出来的最后结构，也是用来做定型试验的结构 (图7)。它综合了模型B和C优点：

a) 基本形状是伞衣底边夹角为 54° 的球面。^{*}

b) 帆前缘的平均张满度为 8.8%。

c) 共 9 环，每环宽 18 吋，顶部有 4 环缝。

d) 根据摄影测量计算的透气量

结构透气量 10.9%

总透气量 14.2%

^{*}在图1中，应将球面高 $\frac{1}{2}$ 改为 0.43 尺。

天帆模型B (D_0 为 29.4 呎，20 幅) 是由 9 个织物环做成的，所有环的宽度约 18 吋，但底边环也没有张满度。该模型伞经历了三次改型，旨在获得可以接受的阻力系数。

(1)XB-1: 限紧带穿过伞衣底边上面四环缝，缝在伞衣幅的中心线上。这样使月牙形缝变成图6上所示的双缝。后来试验表明，充气时间过长，这种修改就放弃了，但给人以重要的启发是，环帆伞的充气既通过底边进气口，也通过侧缝。

(2)XB-2: 曾经把从平面带条伞

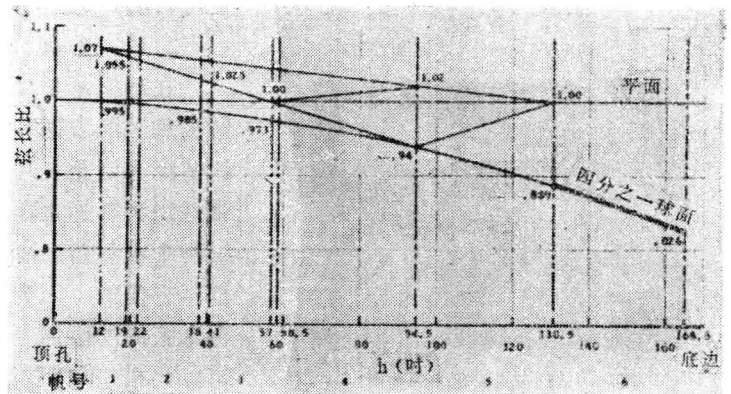


图5 天帆人用伞的座标

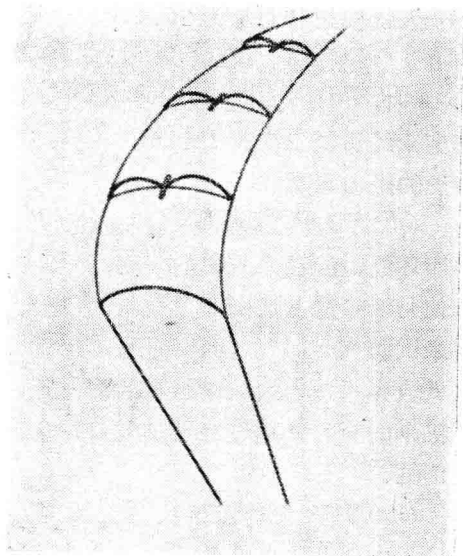


图6 限紧带对天帆模型 XB—1 开缝的影响



图7a 美国海军试跳员乘 D_0 为 29.6 呎天帆模型 D 着陆

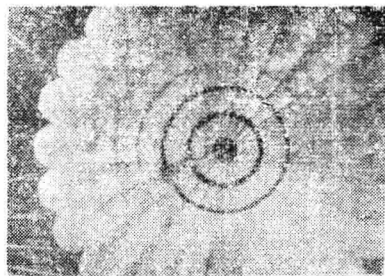


图7b 试跳员对天帆伞的视图

应力区域的防撕能力。(一般只有在伞衣圆周区域,即辐射带之间帆鼓起的地方,织物的织边有足够的强度。)其次,把帆粗缝在一起成为伞衣幅组件。然后,以一般方法用1吋平缝在四针缝纫机上把伞衣幅连起来。最后也是用一般的方法装配成伞,包括伞绳通过辐射缝的中心通道绕过伞衣。

e)伞绳的有效长度为 $0.91 D_0$ 。

1956年5月15日,我们申请美国专利,并于1960年3月22日以专利号2,929,588发表。同时,1956年6月天帆伞的结构冻结,把计算环帆伞伞衣幅座标宽度的方法以无量纲的形式标准化了(见图8)。图8还说明标准环帆伞和天帆模型D在圆周区域帆的宽度间存在的差别。弦长比(C/C')是以平面三角形伞衣幅宽度 C' 为基准的,因为对沿中心线从顶孔到伞衣底边的高为 h_R' ,由N个幅组成的伞衣来说,任何辐射高度的 C' 值可按式计算:

$$C' = 2h \tan(360^\circ/2N)$$

实际上,缝和帆上下缘相应的辐射高度 h 以及 h/h_R 的值均是计算出来的。然后,按照 h/h_R 的每一个值,可以从曲线图中求出 C_A/C' 和 C_B/C' 的值,再根据这些值计算出上下缘的长度。可以看出,在 $h_R = 0.65$ 以下伞衣圆周区域内,用帆的上缘可以精确地控制球面侧剖面。在这点之上,在帆的上下缘引进了消除应力的张满度使伞衣形状略有改变。图9是伞衣幅上帆的布局的示意图。

这就是计算伞衣幅座标和帆宽的方法,在1965年9月以前,包括阿波罗在内的所有环帆伞的设计都采用这种方法。在阿波罗地球着陆系统的研制过程中,尽管对几种改型方案作了试验,但没有一个是可行的,这些情况在2.1.4节作了介绍。

2.1.3 伞衣形状和结构的演变

在环帆伞早期气动力研究过程中,曾经对伞的结构和装配方法作了许多种改革试验。环缝伞传统的装配方法是一环接一环组成圆环,然后再用辐射带把织物环连接起来。对于采用一幅一幅地组成密织物伞衣和带条伞衣的程序的工厂来说,这种方法是不方便的。因为第一具环帆伞没有大的开缝,而在伞张满的表面上相邻帆之间形成月牙形缝,所以可以用搭接和粗缝的方法把伞衣幅装配起来,如图10所示。首先,把帆卷边或缝上加强带提高最大

只要帆上横带又轻又薄,这种装配方法是相当合理的。但是,横带与辐射缝合部的接头具有足够大的环向强度,一般容易引起误解,以为横带也起到加强带的作用。在试验的过程中 D_0 为63呎环帆船在顶部受到开伞动载的破坏,曾经用强度更高的横带代替加强带缝在帆的边缘上。由于带头与平缝的接头处层数多厚度大,材料很难通过缝纫机,一般缝合部的导向装置也不能使用。

由于搭接帆的伞衣幅结构上不够合理难于装配,而且不能保证伞衣顶部有适当的透气量,因此为天帆船寻求一种比较好的装配方法。为了使用带子加强的辐射缝合部能克服伞绳在通道里结构的缺点,产生了图11所示的方法;同时,为了减少缝合部的修正量,迫切要求设计一种窄的辐射缝合部满足最小重量和体积的需要。这些方法成为目前所制造的环帆船的标准,但也有个别例外,例如,早期一些轻的模型伞的辐射缝合部不是在三针缝纫机而是在双针缝纫机上缝的,1962年又增加了垂直带条,一年后将伞绳接头缩小。帆和辐射带的装配是按照带条伞传统的装配

方法组装起来的,但是把1吋宽的辐射带卷入平缝的一半宽度是一种创新;这样把由于缝下的或卷上引起的伞衣幅宽的误差缩小到可以忽略不计的程度。这对于环帆船辐射带之间各个帆张满度均匀分布这一基本原则是重要的。

这种平叠辐射带还有其它优点,其下端延伸到伞衣底边以下,为形成一个小的好伞绳接头提供了一种简便的方法,这样就不需要通常使用的“蝴蝶”片的额外加强带。最近,NASA也用改型环帆船做了实验,用单搭接缝合部一环一环地装配成伞衣,辐射缝合部用辐射加强带加强,这种装配方法又一次间接地证实了结构上的优点。这种改型伞帆缘的耐撕能力很差,有必要在跨过每条辐射缝合部的帆缘上增加数百条短的加强带。一种似是而非的解释

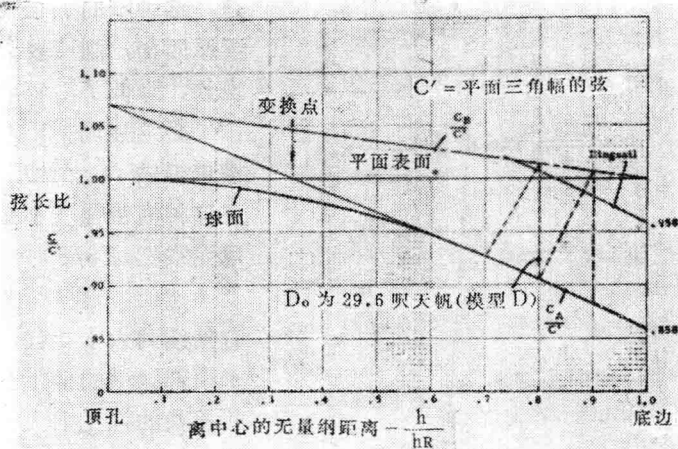


图8 环帆船一天帆船的座标

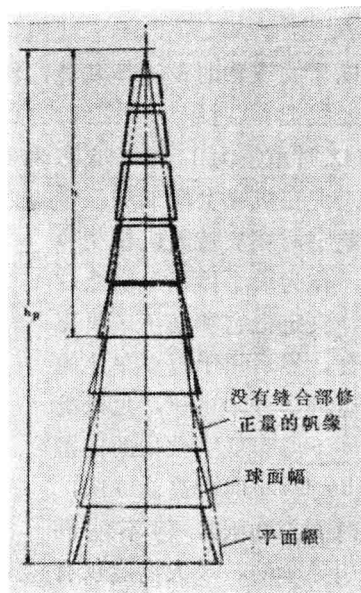


图9 根据标准方法绘的典型环帆船伞衣幅的设计图(草图)

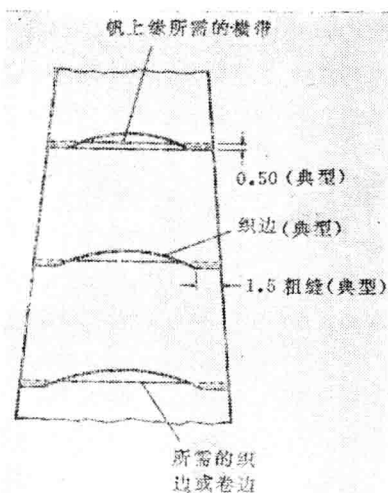


图10 D₀为64.7呎的第一具环帆船
搭接帆的伞衣幅的装配方法

“Doupe”强度新的织物的设计，从此，便出现了专有名词“三倍”织边织物。沿织物每边缘，用外加经线把 $\frac{1}{2}$ 吋织物加强到比原织物强度大三倍，成为三倍织边。使用了宽为18、24、36和42吋重量为1.1、1.6和2.25盎司/码²的尼龙织物。勿容置疑，三倍织边的出现，将大大减少在帆缘上增加加强带的必要。

1960年，航宇局在支持天帆模型D的研制和定型，作为最小体积的高速应急救生伞之后，决定把它和马丁·贝克弹射座椅相配套，然后用于海军单座的飞机上。尽管这种伞开伞迅速，足以满足通常飞行速度下海军低空救生的定型要求(速度为100哩/小时时高200呎，伞绳已经扭绞时高500呎)，但不能满足配有串连式引导伞的，最大高度仅有70到120呎的马丁·贝克系统离开甲板的弹射试验。因此，设计了D₀=29.7呎的天帆模型E，作为模型D的最小改型。

当时，跨过顶部环缝的垂直带对促进环帆船的可靠和重复开伞的有效性还不清楚，但根据早期记载，收紧带被认为有点价值，然而对模型仍没有明显的影响。因此，与模型D相比，天帆模型E由7环宽为24吋的帆组成，代替9环宽为18吋的帆；前缘张满度为5%的

是，这种窄的加强带至少比标准结构的环帆船的加强带要厚四倍，刚度要大得多，产生了一种应力集中的物理现象，降低了沿辐射缝合部帆的撕裂强度。

必须强调指出，在平缝里一端接着一端的帆缘上的横带提供了一个增加织物织边耐撕强度的有效方法，而且这种横带强度不必太大；用两行“B”型或“C”型尼龙线把每 $\frac{5}{8}$ 吋宽强度为70到90磅的带条缝上就行了。然而，这些带条也能承受环向应力这种错误判断一直持续到六十年代，因此，1965年前制造的大部分环帆船顶部区域的横带强度都过大，即辐射缝合部中横带衔接接头的强度很大。有时，在产生过大的环向载荷处，用连续加强带代替这种横带。

环帆船的结构也搬用环缝伞早期的研制方法，生产带有特殊加强边符合预定宽度的织物。一些“Doupe”织边织物能满足这种要求，但天帆船的需要促使有三倍

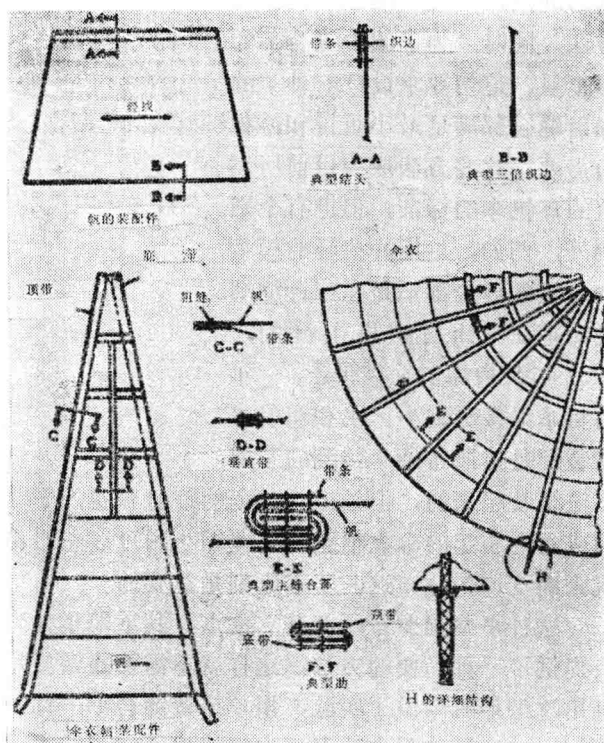


图11 环帆船的结构

外张底边环,代替底边夹角为 54° 的球面形底边环,并用11.5%左右的总透气量代替14.2%的总透气量。

尽管天帆模型E能满足离开甲板的弹射试验,且装配在海军的马丁·贝克座椅系统上,但是它说明环帆伞的发展倒退了一步,因为,与被替换的服役的标准平面伞相比,其性能并不突出。就质量来说,其稳定性虽然好得多,开伞动载或多或少低一些,但其阻力系数并不大($C_D = 0.7$ 对 0.76)。

环帆伞这段历史是值得注意的,因为几年后(1962),天帆模型D通过增加两级收口来回收有升力设备的ASSET再入飞行器。当观察到在第一级收口期间,伞衣充气缓慢而且反复无常时,沿每幅的中心线跨过伞衣顶部的环缝缝上一条垂直带便纠正这种缺陷。垂直带在充气的初始阶段,当伞衣还很松弛时,可防止缝开得过大,因而消除了随意延迟充气并大大改善了充气时间的重复性。如果1960能进行同样的改革,天帆模型D也许能满足马丁·贝克弹射座椅离开甲板的试验,也不至于倒退到模型E。

继天帆模型XB-2之后,直到1963年2月阿波罗风洞试验时(参考15)才再次在环帆伞上试验收紧带。风洞模型同样有跨过顶部环缝的垂直带。尽管这两种装置收效相似,但它们不互相排斥,而且一起使用可以从总的开伞时间要求很严的任何环帆伞找到理论基础。当伞衣底边帆开始对着气流时,由于收紧带能限制它们向内吸,从而加速了空气从进气口进入伞衣。顶部的缝由于缝上垂直带条,阻止首先进入伞衣的空气过多外流,从而把伞衣拉长。其结果是开始有效充气时可大大减少随意延迟充气,使总的充气时间在给定的工作条件下更具有重复性。

1965年9月,修正了环帆伞的主要尺寸,伞衣幅座标和帆型尺寸的计算方法,其目的是:

- a) 使环帆伞的结构以先进的形式标准化。
- b) 简化计算程序和提高确定伞衣幅座标和帆尺寸的准确性。
- c) 减少新做环帆伞可能出现的不良特性,如完全张满时出现松弛,内折现象(D_0 为84呎双子座伞),或者在开伞过程中出现应力过度集中的现象(D_0 为127呎双锥伞)。

汇总在图12中新的尺寸图解是许多双子座、阿波罗和百呎环帆伞研制方案的产物。根据Q-4无人机计划, D_0 为84.2呎的双子星座环帆伞是作为备份回收伞于1959年设计的。几年后,迫切需要研制双子座翼伞导致了用环帆伞作为备份伞,最后又用作双子座主要着陆系统(图13)。如上所述,完全张满的伞衣是松弛的而且有内折的趋势,尽管为此在伞衣上增加许多“紧的”圆周带,这种现象绝不能完全克服。这种缺陷曾追溯到在计算伞衣幅座标过程中计算尺的误差,这种误差把帆的平均张满度从4.42%幅宽增加到4.71%,即实际上织物圆周增加6.1%。在72幅的伞衣上,由于每幅的宽仅是周长的1.39%,在完全张满的伞衣上有几幅内折是毫不足奇的。另一方面,这种环帆伞的主要尺寸图与 D_0 为63.1呎的水星伞衣,以及发展为阿波罗主伞的 D_0 为88.1呎的伞衣是一致的。这两种伞都不内折,但后者很松弛,在三伞衣多伞系统中很难保持多向对称的形状(图4)。

在阿波罗地球着陆系统发展计划的早期,发现在双伞或三伞多伞系统中, D_0 为88.1呎环帆伞的阻力比当时的设计要求大得多。迫切要求减少伞的重量和体积的呼声很高促使从伞衣上去掉四幅,而不是重新设计一个新伞。显然,从以前的经验知道,这一变化也能纠正完全张满的伞衣的松弛现象。改进后的伞衣 D_0 为85.6呎,68幅、 19° 的锥形顶部(在水平线

面测量)。伞衣的结构侧剖面形状是一个底部夹角为 57° 的“截断尖拱形”(见图 15b)。

1963 年 5 月, 两项“百呎”环帆船计划的头一项是用名义直径为 124.5 呎的实验模型伞开始的。设计思想保守是必要的(因为缺乏设计 D_0 大于 88.1 呎环帆船的经验), 这在参考 5 的附录 A 中作了介绍。援引关于伞衣形状的结构说明:

“使伞衣张紧可以把内折减少到最小程度, 将球面形的侧剖面变成截断尖拱形就能立即生效。换句话说, 从一个完整的伞衣中去掉若干幅可达到此种目的。按照这种道理, 可将一个伞设计为由 116 幅组成的大点的伞衣, 但在最后装配时只用 112 幅。这样可以把球面形伞衣的圆周张满度减少 3.4%”。

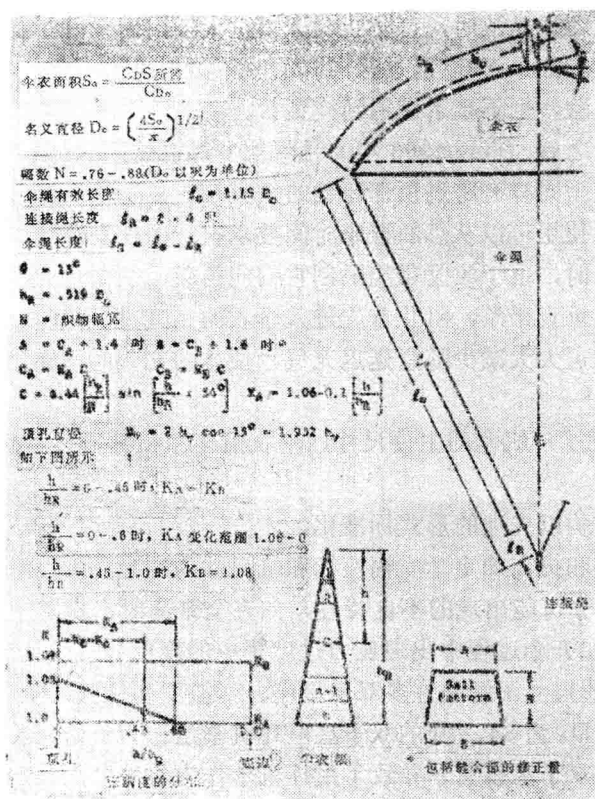


图 12 环帆船的基本尺寸

所介绍的这种方法产生了一种顶角为 15° , 底部夹角为 55° 的尖拱形侧剖面(图 15c)。通过用总重量为 9650 磅的五次空投试验, 这种新环帆船所有的性能指标都格外好, 所以决定用这种结构作为设计全部新环帆船的基础(见图 6)。

现援引参考 6 中的一段: “分析 124.5 呎环帆船的伞衣形状, 产生图 12 中的修正主要尺寸图的伞衣幅座标公式。为了进一步简化结构, 根据 124.5 呎模型伞得到的保守修正量, 简化了圆周张满度的分布, 增加了 0.5% 到 3% (各点上) 的顶部区域张满度以进一步消除应力, 并将主要区域(环帆)逐级变化的张满度从平均的 9.83% 减至平均的 8%。后种措施是期望在解除收口时, 通过减少帆的平均迎角来削弱伞衣底边向外张开的趋势, 张满度差为 5%—6%, D_0 为 87 呎的模型伞的性能(见表 2 及图 94 (附录 A)说明, 目前采用的方法的效

果实际上是不明显的。”必须指出，张满度差的这种再分布同时使伞衣底边附近的月牙形缝的面积略为减少，而增加了幅的中间区域月牙形缝的面积，但这是另一种次要的影响。这种变化的最大方面是把帆的总平均张满度从 4.91% 幅宽减至 4% 幅宽，或将最大充气直径附近织边的周长纯减少了 18.4%。变化的相对量尽管很大，但影响甚微，圆周拉紧度的增加仅仅使辐射带之间帆向外鼓起的量减少。这种使伞衣维持多向对称形状的气动弹性力的进一步增加，反映了继续对克服伞衣松弛和内折，尤其是大的环帆船的关心。

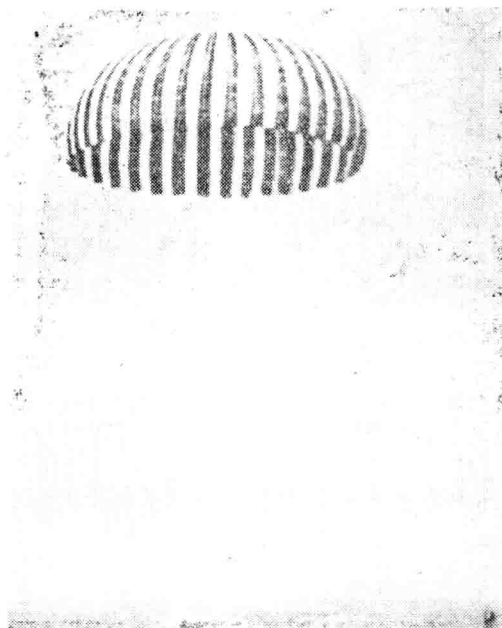


图13 双子座 $D_0 = 84.2$ 呎环帆船—金属试验模型座舱溅落在加利福尼亚州的索尔顿海上。

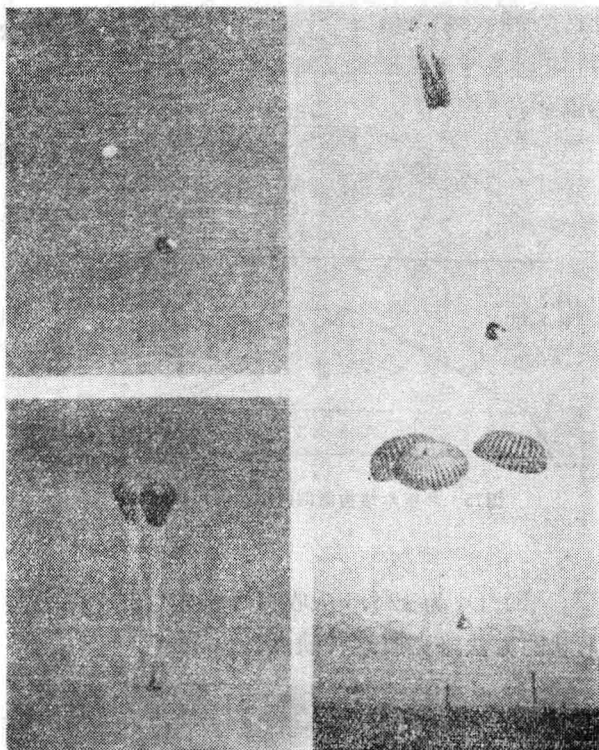


图14 模拟阿波罗离开发射后应急情况的试验最后阶段，在第一次试验的地球着陆系统中采用 D_0 为 88.1 呎环帆船。

图 12 所给的 $1.15D_0$ 的伞绳有效长度，对轻的大伞效果最佳，同参考 5 的分析一样，是一具重量 W_p 最小或阻力面积比最大 $(C_D S_0 / w_p)^*$ 的伞。帆图形的缝合部修正量，就是构成典型的 0.5 吋锁缝缝合部所需要的部分，在图 11 中，用两条 1.0—1.06 吋宽的辐射带折在一起而成。

第二项百呎环帆船的研制计划于 1964 年 9 月开始，伞的结构是一具双锥形侧剖面（如图 15b 所示） D_0 为 127 呎的伞衣。改变 124.5 呎模型验证结构这种作法，出于下面两点考虑：

a) 经证明，密织物锥形伞的阻力效率比密织物平面伞高，因此锥形环帆船的阻力效率比原型环帆船高。

* 证明这种结构的阻力系数 $C_{D0} = 0.81$ 是最小值（见 3.1.1 节）

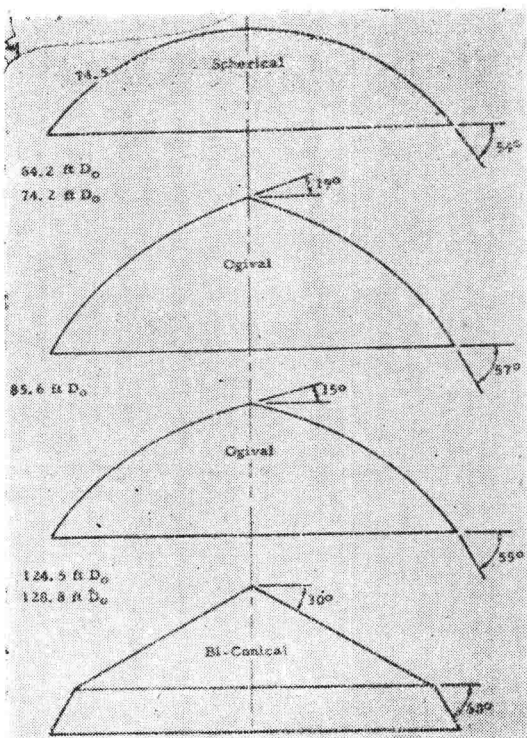


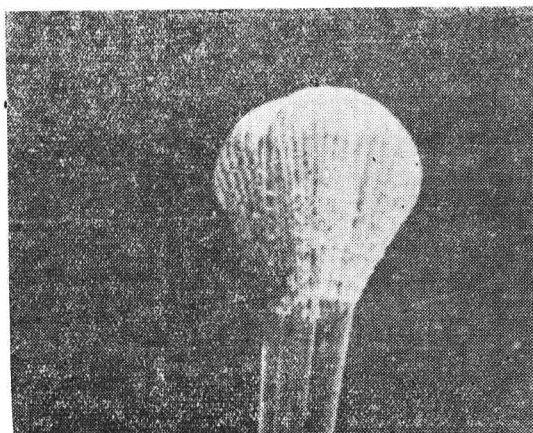
图15 环帆船结构剖面形状的比较。



图16a. D_0 为124.5呎环帆船开伞的形状——“软”的开伞情况

图16b. D_0 为124.5呎环帆船带着9650磅挂重稳定下降

b) D_0 为124.5呎收口环帆船(图17)的不对称内折形状是不理想的,但可用改变伞衣形状的方法来克服这种缺点。



在最大收口载荷后0.2秒时的伞衣形状



解除收口时的伞衣形状

图17. D_0 为124.5呎的环帆船在收口期间的两个阶段呈典型不规则形状。

45°斜裁结构的密织物伞衣和织物经线水平的环形伞衣之间,在力学上的差别十分明显,无需细辨。在锥形伞衣上,斜裁织物以近似零应力自由伸长形成一种椭球形张满形状,