

王适存学术论文选编

纪念王适存教授
从事教育和科研五十周年

南京航空航天大学直升机技术研究所
直升机旋翼动力学国防科技重点实验室

一九九九年九月

王适存学术论文选编

纪念王适存教授
从事教育和科研五十周年



二〇〇〇年一月十七日



30801395

南京航空航天大学直升机技术研究所
直升机旋翼动力学国防科技重点实验室

一九九九年九月

801395

耕耘五十載
桃李滿天下

姜澄宇加字

九九年七月

祝贺中国直升机教育创始人、一代宗师

王适存教授从教五十周年

心雨滋润桃李盛开香天下

胸怀大业英才辈出光中华

南京航空航天大学

飞行器系

一九九九年七月



王适存老师简历

王适存,男,1926年9月出生,湖南省邵阳市人,汉族,中共党员,现工作单位:南京航空航天大学直升机技术研究所。

- | | |
|------------------|---|
| 1944.9 ~ 1948.7 | 浙江大学航空工程系本科生 |
| 1949.9 ~ 1952.9 | 浙江大学航空工程系助教 |
| 1952.9 ~ 1956.7 | 前华东航空学院讲师 |
| 1957.10 ~ 1961.2 | 前苏联莫斯科航空学院飞行器系研究生 |
| 1961.2 ~ 1970.12 | 西北工业大学副教授 |
| 1970.12 ~ 1988.4 | 南京航空学院副教授、教授、系主任 |
| 1988.4 ~ 1989.4 | 美国乔治亚理工学院访问教授 |
| 1989.4 ~ 迄 今 | 南京航空航天大学教授、直升机技术研究所名誉所长,旋翼动力学重点实验室学术委员会主任 |

编者的话

王适存教授是国内外著名的直升机专家和学者,我国直升机科教事业的开拓者之一和学术带头人,首批博士生导师和航空部有突出贡献专家,长期从事直升机理论与技术的教学和研究工作,为我国直升机科技事业的发展作出了重大贡献。1999年,正值王适存教授从事航空教育和研究五十周年,为了颂扬他热爱直升机的精神,回顾我国直升机事业的发展,促进国内直升机技术的进步,我们特此编辑了这本《王适存学术论文选编》。

王适存老师1949年在浙江大学航空系参加工作,从此开始了他的航空科教事业的生涯。在五十年代初,王适存老师致力于航空风洞的研究。1951年,他在《中国科学》上发表的“浙大风洞设计制造经过及初步测定报告”是新中国成立后国内第一篇关于航空方面的学术论文。1957年,王适存老师被派往前苏联莫斯科航空学院留学,潜心钻研旋翼涡流理论,并于1961年获副博士学位。他在前苏联发表的“旋翼广义涡流理论”,解决了儒柯夫斯基螺旋桨涡流理论如何从轴流状态推广至直升机旋翼前飞状态的老大难题,被国际直升机界誉为“王适存涡流理论”。这一突破性成果为当时美国AD报告所译载,并编入了俄国直升机设计局米里主编的经典著作“直升机计算和设计”之中。在俄国的科技文献中,以中国人命名的理论是不多见的。旋翼广义涡流理论的创立,达到了当时直升机空气动力学的世界先进水平。

王适存老师留学回国后,立即投身到我国直升机专业的建设中。六十年代前期,他一方面继续进行旋翼涡流理论的研究,一方面撰写了《直升机空气动力学》(上、下册)教材。这是我国直升机技术方面的第一部专著。该教材及以后的修订本在我国直升机界广泛使用,为我国直升机人才的培养和我国直升机专业的建设发挥了重大作用。

1964年,他倡导自行研制轻型直升机“延安二号”,除了文革中受到冲击的初期外,他参与了组织领导和具体研制工作。该直升机是我国第一架自行设计、试飞成功的直升机。

文化大革命后期至改革开放初,王适存教授主要致力于将旋翼涡流理论应用于旋翼设计的研究,他撰写的“旋翼在挥舞平面内的气动载荷计算”等系列论文在我国的型号设计中发挥了很大的作用,并一直成为我国旋翼气动设计的主要方法,被编入了《直升机气动手册》之中。为我国直升机的设计和发展作出了重要贡献。

改革开放后,王适存老师发起创建了中国航空学会直升机专业分会,历任分会主任、名誉主任。王适存老师多次出国参加国际学术会议和讲学,一方面在国际直升机刊物《Verti-flite》上发表论文向世界介绍我国直升机技术的发展;同时,在国内发表论文将世界直升机技术的最新发展介绍给国内直升机界。1988—89年,王适存教授应乔治亚理工学院、杜克大学、马里兰大学、波音直升机公司、麦道直升机公司、西科斯基直升机公司等单位的邀请,赴美讲学一年,得到了高度赞誉;后来又应邀访问了俄罗斯中央空气流体研究院直升机分部及米里设计局、卡莫夫设计局,促进了我国同国际直升机界的交流与合作。

进入九十年代,他在直升机理论与技术上作出了新的贡献。王适存老师在现代涡流理论和高性能特型桨尖方面进行了深入研究。他和他的博士生们在旋翼自由涡系、桨尖形状、涵道尾桨等方面的研究取得了丰硕的成果,其中“直升机旋翼气动特性分析和自由尾迹研究”获1998年航空工业总公司科技进步一等奖。这里特意收录了他有代表性的论文,最后四篇论文是他的博士生写的,王适存教授作为第二作者,但是论文的学术思想、创新点和方法都

是来自他的见解。近几年来,王适存教授积极参与和指导国防科技重点实验室的筹建工作,并担任重点实验室学术委员会主任,为重点实验室的建设和运行,特别是水洞的建设作出了重要贡献。他还热情支持和参与无人直升机的研制工作、对共轴式直升机双桨干扰问题也做了深入的探讨和研究,论文集中也收入了这方面的研究成果。

王适存教授从事航空教学和研究五十年以来,一直活跃在科研实践和教学工作第一线,严谨治学,辛勤耕耘,成果累累,除论文和著作外,还翻译了《空气螺旋桨》、《涡轮机流体动力学》,主审了“军用直升机飞行品质规范”、“民用直升机适航条例”,主编了“直升机气动力手册”第1~6册和“中国大百科全书”航空航天卷全部有关直升机条目,为我国直升机的发展奠定了基础。王适存教授桃李满天下,他指导培养的学生中有的成为国内外知名学者,有些成长为博士生导师、教授和总设计师、研究员。

让我们衷心地祝愿王适存教授健康长寿,在我国将来的直升机事业发展中作出新的贡献。

南京航空航天大学直升机技术研究所
直升机旋翼动力学国防科技重点实验室
一九九九年九月

浙大风洞设计制造经过及初步测定报告

目 录

1. 浙大风洞设计制造经过及初步测定报告,《中国科学》,第2卷第4期,1951年11月	(1)
2. 共轴式风洞风扇的设计,《航院学报》,华东航空学院,1956年	(17)
3. Обобщенная Вихревая Теория Несущего Винта Вертолета, Оборонгиз(前苏联国防出版社), 1961年	(23)
(同文由美国 NASA 转译) Generalized Vortex Theory of the Lifting Rotor of Helicopter, AD286576, 1961年	(26)
(同文修订本) 直升机升力桨的广义涡流理论,《西北工业大学科学研究资料》,1962年	(27)
4. Аэродинамические Характеристики Несущего Винта Вертолета с Пространственной Вихревой Системой,《Известия ВУЗ, Серия Авиационная Техника》1961 No. 1	(63)
5. Аэридинамическце Характеристики Несущего Винта Вертолета с Учетом Переменности Циркуляции по Азимуту,《Известия ВУЗ, Серия Авиационная Техника》1961 No. 2	(73)
6. 升力螺旋桨在桨盘上的诱导速度分布,《力学学报》,第5卷第3期,1964年9月	(82)
7. 升力桨在斜流中的叶素升力系数随方位角的变化及其影响,《航空学报》,第1卷第1期, 1965年	(93)
8. 直升机空气动力学(教材)上册,西北工业大学出版,1964年10月;	(101)
直升机空气动力学(教材)下册,西北工业大学出版,1965年2月。	(171)
9. “延安二号”小型直升机汇报材料,南京航空学院革命委员会出版,1976年1月。	(296)
10. 旋翼在挥舞平面内的气动载荷,第一部分,诱导速度,南京航空学院科技资料,总编号 065,1975年10月;	(310)
旋翼在挥舞平面内的气动载荷,第二部分,环量方程,南京航空学院科技资料,总编号 087,1976年12月。	(340)
11. A Simplified Method for Predicting Rotor Blade Airloads,《Proceedings of the 7th European Rotorcraft and Powered Lift Aircraft Forum》, 1981年	(371)
(修订本) 旋翼气动特性及载荷的工程估算法,《中国航空科技文献》,HJB 860358,1986	(398)
12. The Helicopter Technology of China,《Vertiflite》, March 1986.	(430)
13. The Prospects of Helicopter Development in China,《Vertiflite》, Sept. 1988.	(435)
14. 旋翼诱导速的横向分布,《航空学报》,第9卷第11期,1988年11月。	(439)

15. Analytical Approach to the Induced Flow of a Helicopter Rotor in Vertical Descent, *《Journal of the American Helicopter Society》*, Vol. 35, No. 1, Jan. 1990 (445)
16. 直升机的发展形势, 南京航空学院《校庆 40 周年学术报告会论文》, NHJB-92-7159, 1992 年 (452)
17. 军用直升机发展评述,《振兴跨世界中国航空》中国航空学会成立 30 周年学术研讨会论文集, 1994 年。 (457)
18. 共轴式直升机的双旋翼气动干扰问题,《第 11 届全国直升机年会学术论文集》, 1995 年。 (462)
19. 双旋翼共轴式与单旋翼常规式直升机及无人直升机的比较,《第 12 届全国直升机年会学术论文集》, 1996 年。 (468)
20. 面向 21 世纪的直升机发展,《南京航空航天大学学报》, 第 29 卷第 6 期, 1997 年 12 月。 (477)
21. 面向 21 世纪的航空教材建设——航空飞行器设计从书的选题及内容研究, 中国航空科技报告, 89628-101, 1997 年 12 月。 (483)
22. 尾涡数值模拟的曲涡元技术, (楼武疆、王适存),《空气动力学报》, Vol. 8, No. 4, 1990 (491)
23. A Method of Rotor Wake Modelling in terms of Circulation Coutours, (楼武疆、王适存),《Journal of Nanjing Aeronautical Institute》, Vol. 7, No. 1, 1990 (496)
24. Analytical Study on Aerodynamic Characteristics of the Helicopter Shrouded Tail Rotor, (徐国华、王适存),《Proceedings of the Twenty First European Rotorcraft Forum》, Russia, Sept. 1995 (506)
(修订本) Aerodynamic Analysis of Helicopter Shrouded Tail Rotor by Momentum Theory, (徐国华、王适存),《Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics》, Vol. 15, No. 2, 1998 (507)
25. Predication of Aerodynamic Characteristics of Helicopter Rotor with Anhedral Tip Shape, (徐国华、王适存),《Proceedings of the 3rd Pacific International Conference on Aerospace Science and Technology》, Sept. 1997 (512)
(修订本) Analytical Approach to Aerodynamic Charateristics of the Helicopter Rotor with Anhedral Tip Shape, (徐国华、王适存),《Chinese Journal of Aeronautics》, Vol. 11, No. 4, 1998 (513)

浙大風洞設計製造經過及初步測定報告*

王適存

(浙江大學工學院航空系)

提 要

本文敘述浙江大學航空系新近所建風洞設計製造的經過, 和初步測定的結果。內容主要地分為三個部份: 第一部份說明浙大風洞各部份在設計上所採用的理論, 以及它們的形狀和尺寸; 第二部份介紹浙大風洞的製造方法, 和在某些製造過程中克服困難的情形; 第三部份報告浙大風洞這次測定的結果, 以供將來建築這類型風洞的參考。

一. 引 言

浙江大學航空系風洞, 在前主任范緒箕教授大力經營之下, 自1946年暑假起, 開始設計和建築, 經過三年多的時間, 到1949年冬季才初步的完成。中間因為缺乏經費的關係, 工作往往陷於停頓。幸而解放以來, 我們已經有了充足的條件, 整個的計劃才能够進一步順利的完成。所以在今天, 浙大風洞之能够運用, 應歸功於人民政府的正確領導。

二. 風洞概述^[1]

浙大風洞的形狀, 與材料的選擇, 在設計的時候, 不僅是根據以後實驗的範圍, 和風洞的效能等因素, 並且考慮到當時經費以及場地等問題; 經過一番研究後, 決定採用單向迴流式。試驗段是直徑3呎封閉式的圓筒形, 它的長度也是3呎。前面收縮比為4.111; 後面擴散角為9度。風洞造成以後測定的結果: 風速最高可達210呎/秒 (230公里/小時)。整個風洞是平臥在航空系實驗室的當中; 風洞外殼

* 1951年12月9日收到。第二次收到此文的修正稿時, 中文的“中國科學”已決定停刊, 故將此文加入已脫刊的本期中發表。

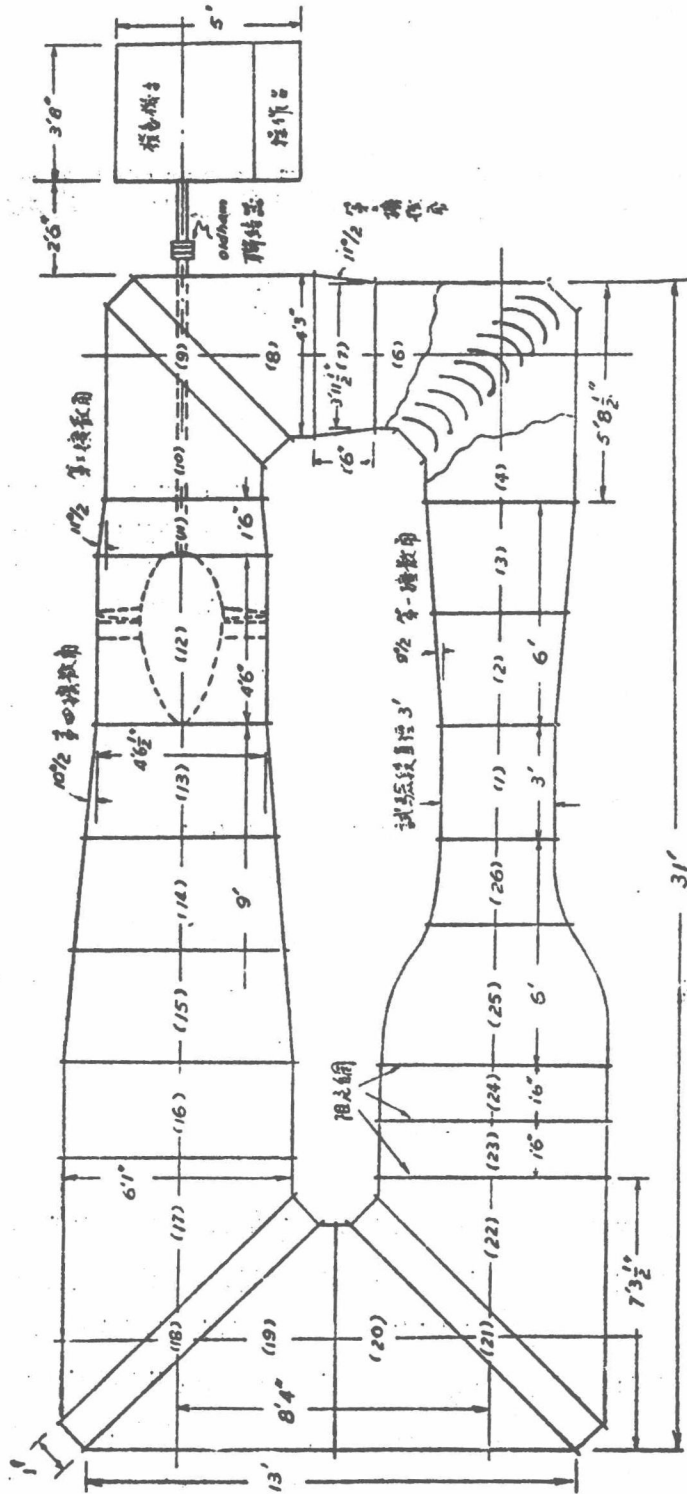


圖 1. 浙大風洞平面剖視總圖 比例尺 1:60

全部以 1/16 吋鐵板做成，共分二十六節，每節外殼的兩旁，均用兩根 I 形鋼樣支架起來，其中心線距地面 5 呎 3 吋。最後，為避免外部生鏽，以及維持內部光滑起見，風洞外面，全部塗了銀白色的粉漆；風洞裏面，除開風扇葉片是用電鍍銀以外，其他各部份，都是塗了乳白色或藍灰色的磁漆。圖 1 所示，為風洞平面剖視總圖。

三. 設計經過

風洞設計最主要的問題有二：第一，如何使得試驗段內流速分佈均勻穩定；第二，如何增大風洞的能量比；換句話說，就是如何提高風洞的效能。此外尚須注意實際構造的情況，如何方能施工容易，材料經濟，達到事半功倍的效率。浙大風洞各段的設計，都是本着這三點原則來進行的。現在分別敘述如後：

(一) 擴散段

擴散段是在試驗段後面，它的功用是減低氣流速度，增高壓力，以減小摩擦損失。但是空氣經過擴散，又必然發生擴散損失；因此，選擇一個適當的擴散角，就成了風洞設計中主要的一個問題。根據 Wattendorf^[2] 計算的結果，以採取擴散角 6 度為最相宜。不過在迴流式的風洞中，為了顧全整個風洞長度的關係，就可能需要採取一個較大的角度。所以浙大風洞擴散段第一部份為 9 度，第二部份及第三部份為 11 度，第四部份為 10 度。（見圖 1。）

(二) 導流板

當空氣流過轉角時，因為離心力的作用，氣流速度不僅分佈不均，而且產生副流，增大能量損失。因此在轉角的四隅，各裝有導流板一列，以減少能量損失，並保持流速分佈的均勻。但是關於風洞導流板的設計，至今沒有絕對切合方法可以利用。對於 90 度的圓形轉角情形，根據 Patterson^[3] 實驗結果，以板間距離與弦長的比值為 0.47，能量損失最小。浙大風洞的導流板，就是依照上面的結果來設計的，它的弦長為 $11\frac{3}{4}$ 吋，板間距離為 $5\frac{1}{2}$ 吋。（見圖 2。）

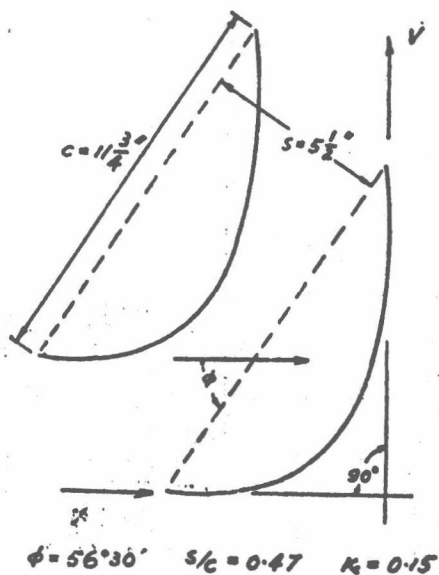


圖 2. 導流板的形狀圖 比例尺 1:5

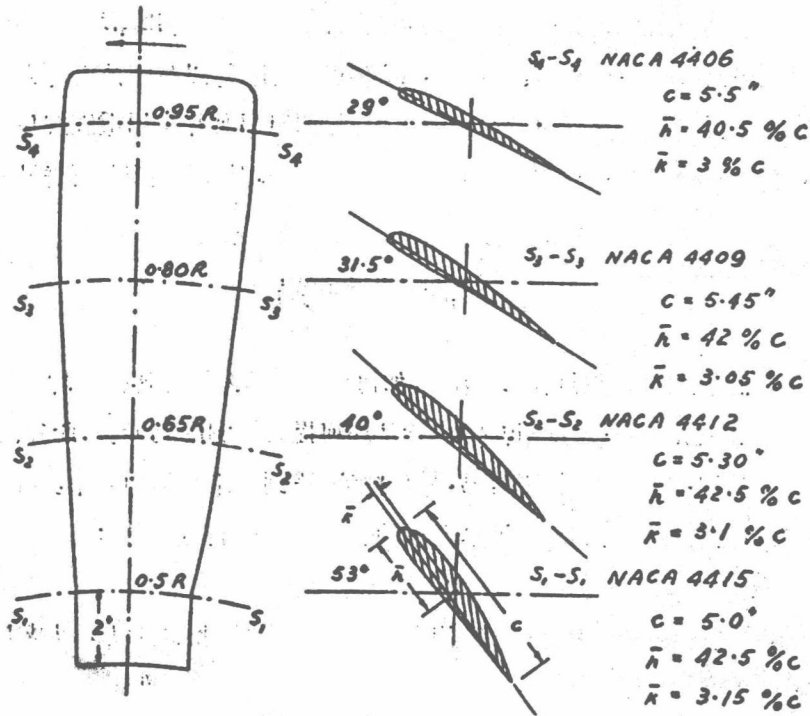


圖 3. 風扇葉片的形狀圖 比例尺 1:5

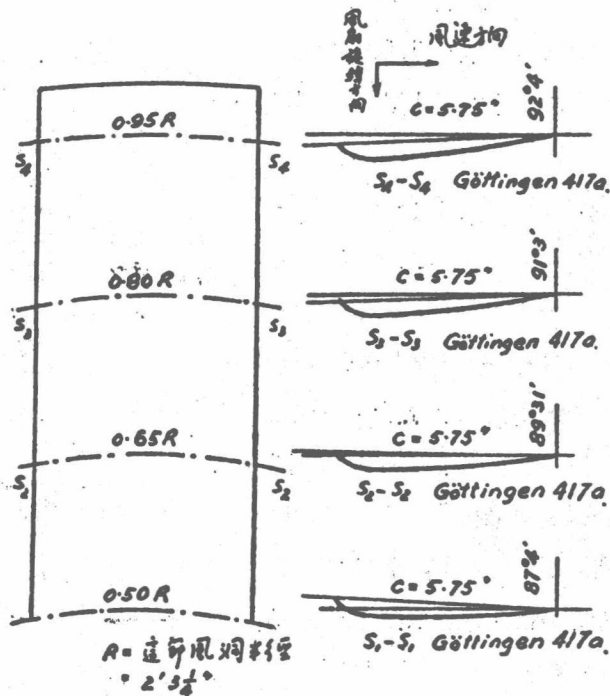


圖 4. 整流片的形狀圖 比例尺 1:5

(三)風扇系

風扇系包括風扇與整流片兩部份。前者為推動氣流的原動力，用以增加氣流壓力，抵償迴流時的消耗；後者用來消除風扇所產生的轉動滑流，並且藉以支持風扇的殼軸。浙大風洞風扇系的構造：風扇外徑為4呎 $6\frac{1}{2}$ 吋，扇葉計八片。（形狀見圖3。）當這一段的流速為122呎/秒的時候，旋轉數為1,400轉/分；增壓數為3吋水柱高；發出能量為42.3匹馬力。動力由一架尼生（Nissan）汽車發動機供給，發動機裝置在風洞的外面，用長 $11\frac{1}{2}$ 呎的圓軸，伸入洞內，來帶動風扇。整流片裝置在風扇後面，共九片，固定在風洞殼上。（形狀見圖4。）風扇殼軸，罩有流線體，以減少動能的損失。流線體的最大直徑是2呎 $3\frac{1}{4}$ 吋，等於風扇外徑的一半；長度與直徑的比率為2.1，這是取其阻力係數為最小時的比值。關於風扇與整流片的設計，大致參照 Ruden's Method^[4] 和 Patterson's Method^[5] 而得；殼軸流線體的形狀，則採用 V. Mises^[6] 書中所載 C-class Airship 的尺寸做成。

(四)收斂段

收斂段又稱收縮筒，位於試驗段的前面，它的目的在使低速的氣流，進入筒內以後，逐漸收縮，而達到試驗段所需要的高速氣流。根據錢學森^[7]的理論，設計的要點有二：第一‘收縮筒末端的氣流速度，也就是試驗段前端的氣流速度，必須均勻穩定。第二，沿筒壁的氣流速度，從頭至尾，應該保持所謂“單向遞增”；如果筒壁的曲度，在某處過大，致使該處的流速反而超過試驗段前端的均勻速度的時候，就會產生逆壓力坡度的區域，因而氣流可能發生附面層分離的現象。再者，根據經濟觀點來看，筒長應該儘量求短。浙大風洞收縮筒的設計，就是依照這個方法，但是為了計算上的簡便，關於筒軸上的流速分佈情形，是根據 Szczeniowski^[8]的假設。所得尺寸：收縮筒前端直徑為6呎1吋，末端為3呎，收縮比 $\left(=\frac{\text{收縮筒前端的面積}}{\text{收縮筒末端的面積}}\right)$ 為4.111，筒長為6呎。

(五)阻尼網

風洞的氣流，由於風扇，導流板，以及風洞壁等的關係，產生各種不同大小不同強度的渦流，而形成整個氣流的擾動。因此風洞中的氣流速度，在速率上，在方向上，總不能像自由空氣中的相對氣流速度那樣地均勻穩定。在新近的風洞中，普通都裝有一層或幾層的阻尼網，以求減少風洞中的擾動，達到它的最小程度。當然，減低擾動所付出的代價，就是增加能量損失。根據 H. L. Dryden^[9]的理論及實驗的結果：一層較密的阻尼網，與其作用相同的多層較稀的阻尼網相比較，後

者的能量損失較小。裝置的位置，應遠離試驗段，而且以裝置在流速較低的地方為宜。浙大風洞的阻尼網，就是普通的鐵絲網，前後共有三層，裝置在收縮筒入口的前面，相互間隔距離為16吋。式樣與大小，因為當時市上僅有這一種可以買到，所以形狀和尺寸，都不十分合於所需要的標準；式樣既非正方，鐵絲本身截面也不是圓形。（見圖5。）

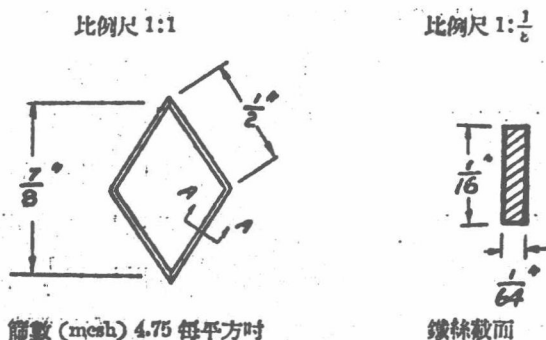


圖 5. 鐵絲網的形狀圖

至於擾動程度的減小情形，初步計算結果（並且參考實驗數據）是：

$$\frac{u_2' \text{ (經過阻尼網後的擾動平均強度)}}{u_1' \text{ (在阻尼網前的擾動平均強度)}} = 0.35.$$

四. 製造情形

浙大風洞的各項工程，完全是由航空系工場自行承辦的；一切設備，不是由舊有廢料改裝，就是買來原料自己製造，尤其在今日新中國的研究工作中來講，這一點是值得提倡的。茲將各部份的構造情形，概述如下：

(一) 風洞外殼

浙大風洞的外殼，是用 $\frac{1}{16}$ 吋鐵板作成，共分二十六節；每節作法，先將鐵板按各節的展開圖形裁好，然後錘成所需要的彎度，再用電焊連接在一起。為避免變形起見，每節兩端，各鉚 $1\frac{1}{2}$ 吋 $\times$ $1\frac{1}{2}$ 吋 $\times$ $\frac{3}{10}$ 吋的三角鐵環一個。角環的作法：按照樣板，將角鐵煅成所需要的彎度，接頭處也用電焊焊起；當各接頭處焊牢以後，再用精確的樣板校驗，以期與設計的形狀符合。角環是用 $\frac{3}{10}$ 吋的鉚釘鉚於每節的兩端，釘與釘之間的距離為 $1\frac{1}{2}$ 吋。至於收縮筒的一段，因為是雙曲度（double curvature）的曲面，所以製造較繁；方法是先用 $1\frac{1}{2}$ 吋 $\times$ $1\frac{1}{2}$ 吋 $\times$ $\frac{3}{10}$ 吋的角鐵，依照收縮筒的設計，煅成所需要的彎度，然後將鐵板按單度曲線展開圖形，裁成小塊，由於鐵板具有展性，所以可將每一小塊，再按照樣板，錘成所需要的弧面，拼攏電焊而成。