



厦门大学 航空系 流体&PIV实验室

风洞 在航空发展中的地位与作用

A horizontal band image showing a blue-tinted visualization of a wind tunnel experiment. It features two bright, spherical light sources in the foreground, likely representing particle image velocimetry (PIV) seeding, with a blurred aerodynamic shape in the background.

厦门大学航空航天学院 鲍锋
2018年10月27日福州



讲座的内容提要

- 风洞的基本概念
- 风洞的分类以及其功能作用
- 风洞实验\试验的基本原理
- 世界上典型和著名的风洞
- 现代风洞的民用大用途



风洞实验的重要地位

- 风洞，是飞机、导弹和宇宙飞船的设计1个非常重要的设备！
- 水面舰艇、潜艇和鱼雷设计，风水洞也是必不可少的设备！
- 高速运输工具汽车、高铁和动车设计，也离不开风洞设备！
- 现代工业高层建筑、桥梁和电视塔等也需要利用风洞设备来优化设计方案！



风洞实验的原理

模型实验按空气与模型产生相对运动方式分3类：

- ① 空气运动，模型不动，如风洞实验。
- ② 空气静止，物体或模型运动，如飞行实验、模型自由飞实验、火箭橇实验、旋臂实验等。
- ③ 空气和模型都运动，如风洞自由飞实验（相对风洞气流投射模型而进行实验）、尾旋实验（在尾旋风洞上升气流中投入模型，并使其进入尾旋状态而进行实验）等。

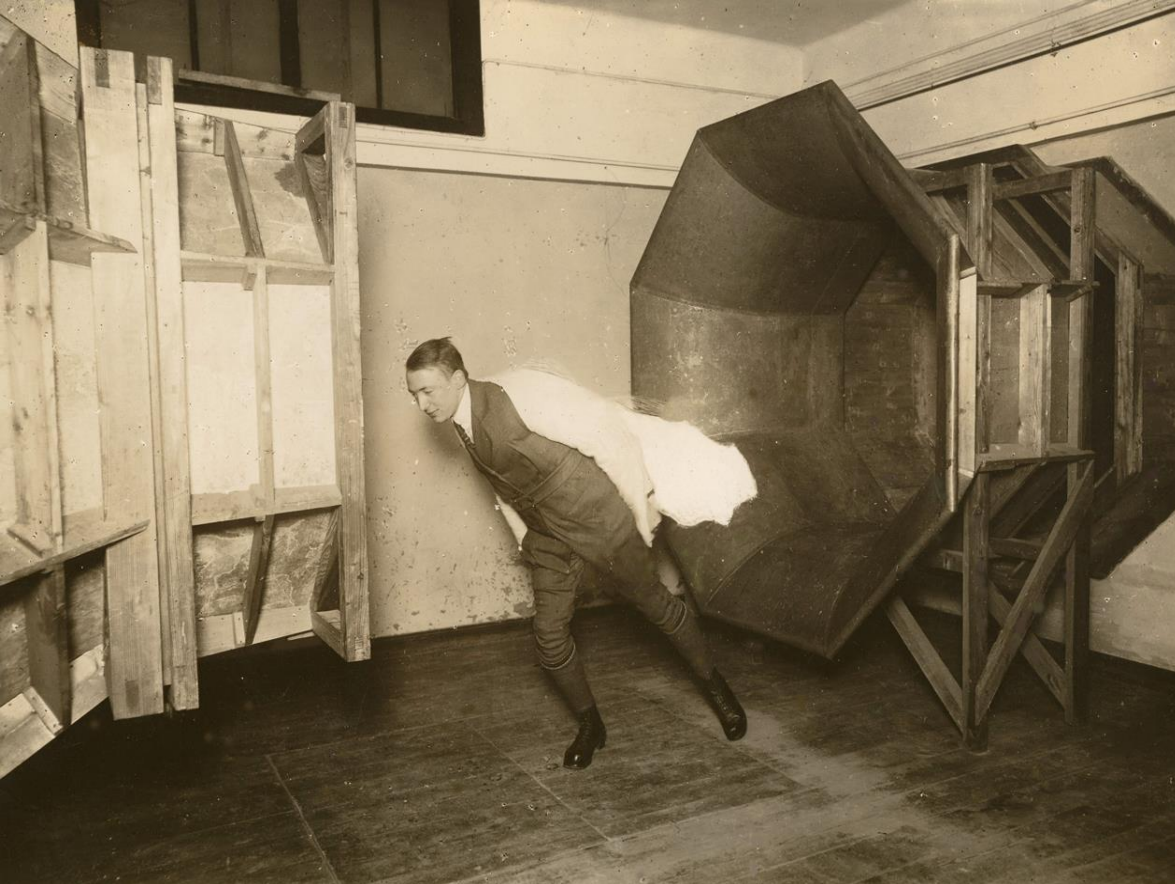


风洞实验的原理 ☺

是一种利用‘相对运动原理’来制作的一种实验装置。
可以借用风洞来测试模型在不同速度、高度或特定的情况下，对压力、风力、震力等承受能力的设备

- ❖ 飞行器的研制过程中在风洞中进行各种实验——环绕流态观测实验、测力实验、动态模型实验、传热实验等等：
 - 观测模型表面及周围的流动现象
 - 测量作用在模型上的各种气动力
 - 了解和掌握飞行器的空气动力学特性！
 - 验证数值模拟结果的正确性（靠谱）。。。。

风洞基本概念 ☺



- Tunnels get larger
- Airspeeds get faster
- Testing becomes more specialized

- ❖ 风洞是空气动力学研究和试验中最广泛使用的工具。它的产生和发展是同航空航天科学的发展紧密相关的。最早“风洞”专门用来研究飞机的气动性能。
- ❖ 风洞广泛用于研究空气动力学的基本规律,以验证和发展有关理论,并直接为各种飞行器的研制服务,通过风洞实验来确定飞行器的气动布局 and 评估其气动性能。

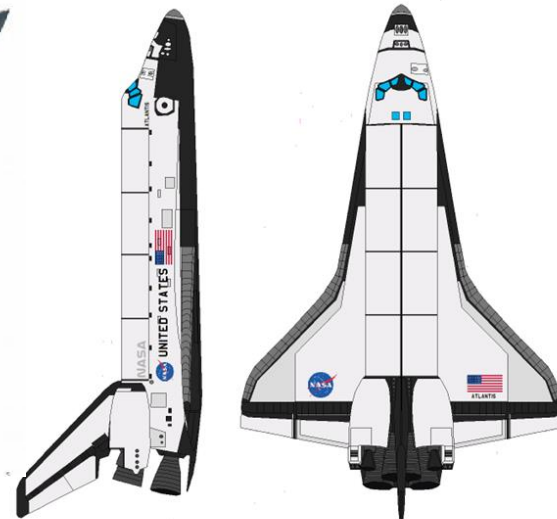


先进战机研制依托风洞试验

- 过去和现在，现代先进飞行器的设计对风洞的依赖性很大。
- 设计新的飞行器必须经过风洞实验，才能获得靠谱的气动设计！
- e.g. 50年代美国B52轰炸机的研制,曾进行了约1万小时风洞实验
- 60~70年代F15第三代空优战机的研制,进行了8万小时风洞实验
- 而80年代第一架航天飞机的研制则进行了约10万小时的风洞实验。



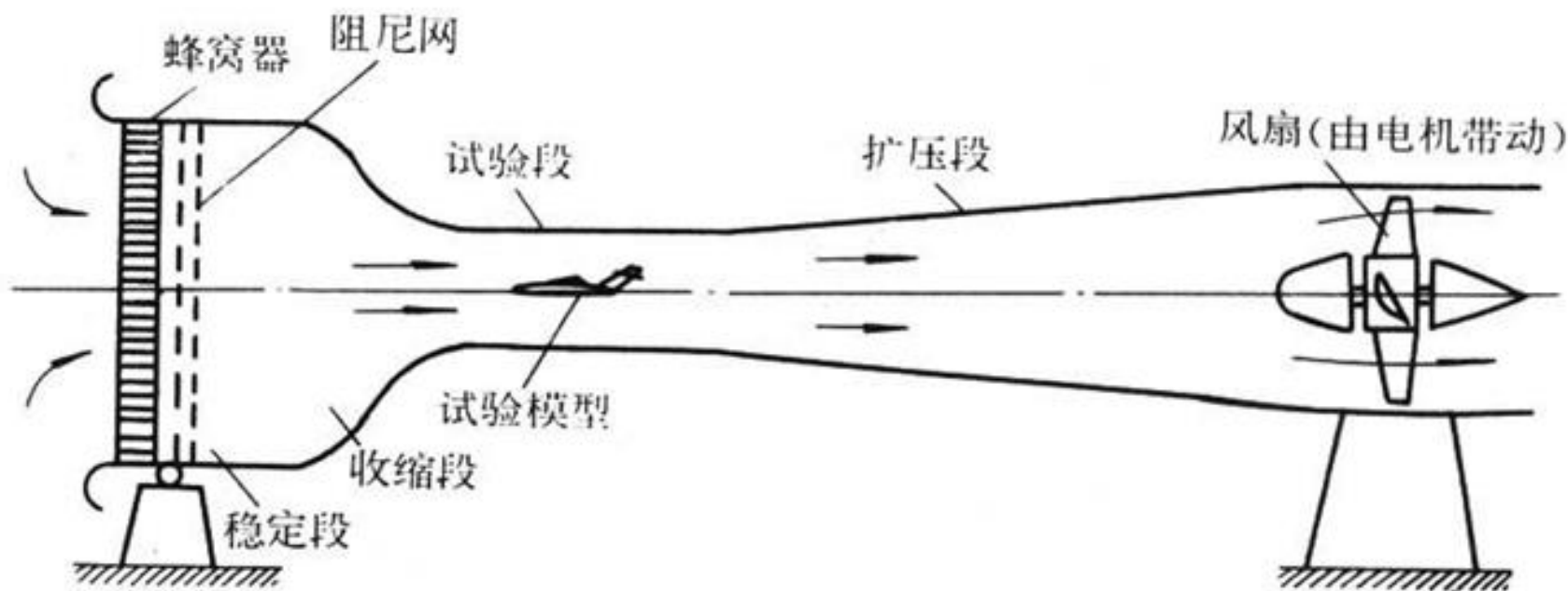
SPACE SHUTTLE





什么是风洞？ 概念~定义 ☺

- ❖ “风洞 **wind tunnel**”，一个专门设计的管道，用来产生人造气流。
- ❖ 在这种管道中驱动一股可控的、均匀的流动气流(人造风)区域，使其流过安置在实验段的模型(静止或移动)，模拟在空气中的运动。
- ❖ 通过观测模型表面及周围的流动现象，研究气流或气流与物体之间相互作用，并测量作用在模型上的空气动力。





为什么要做风洞模拟？

航空飞行器流体动力学研究之三个途径：

(1)现场之实际量测

(2)流体力学之理论解析及数值模拟

(3)实验室内之风洞模拟实验

因为风洞实验的控制性佳、可重复性高，可用来模拟复杂的流况，故风洞实验仍为模拟飞行条件，地面验证飞行器性能不可或缺之方法。

良好的气动特性：提高升力，减小阻力。

获得升力和阻力变化特性：科学计算和风洞试验。



❖ 风洞实验的主要优点是：

- ① 实验条件易于控制。（包括气流状态和模型状态两方面）
- ② 流动参数可各自独立变化。
- ③ 模型静止，测量方便而且容易准确。
- ④ 一般不受大气环境变化的影响。
- ⑤ 与其他空气动力学实验手段相比，价廉、可靠等。



风洞模拟~ 所需的相似性

风洞试验要满足以下条件：

- (1) 几何相似，即飞机和模型之间的；
- (2) 运动相似，即模型各部分气流速度大小与真实飞机对应部分分成同一比例，流速方向相同；气流扰动和实际情况相同；
- (3) 动力相似，作用与模型上的空气动力（升力和阻力）和作用于真实飞机上的空气动力大小成比例，且方向相同。

严格来讲，风洞试验要求：以上无因次量的数值需与实际流场相同，然而，毕竟要每个相似性相同是十分困难的。

有些系数在超过某些例如雷诺数后，就不再被影响，此时只要超过其值即可(不须要求一样的雷诺数)，

根据相似理论将实验结果整理成可用于实物的相似准数。



模型实验的动力相似和雷诺数

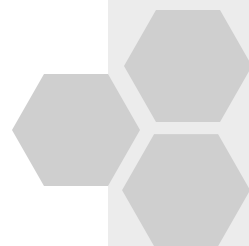
为保证“动力相似”，必须保证实验中模型和真实飞机飞行时的雷诺数相同。

雷诺数（Reynolds number）一种可用来表征流体流动情况的无量纲数

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

其中 v 、 ρ 、 μ 分别为流体的流速、密度与黏性系数， d 为一特征长度。

**雷诺数小，意味着粘性力影响比较显著，
雷诺数越大，意味着惯性力影响越显著。**





风洞实验主要项目

- ❖ 风洞实验的主要项目有测力实验、测压实验、传热实验、动态模型实验和流态观测实验等。测力和测压实验是测定作用于模型或模型部件（如飞行器模型中的一个机翼等）的气动力及表面压强分布，多用于为飞行器设计提供气动特性数据。传热实验主要用于研究超声速或高超声速飞行器上的气动加热现象。
- ❖ 动态模型实验包括颤振、抖振和动稳定性实验等，要求模型除满足几何相似外还能模拟实物的结构刚度、质量分布和变形。流态观测实验广泛用于研究流动的基本现象和机理。计算机在风洞实验中的应用极大地提高了实验的自动化、高效率和高精度的水平。



风洞实验 ‘优点多多’

主要优点 列举几下：

- ① 实验条件易于控制（包括气流状态和模型状态两方面）
- ② 流动参数可各自独立变化。
- ③ 模型静止，测量方便而且容易准确。
- ④ 一般不受大气环境变化的影响。
- ⑤ 与其他空气动力学实验手段相比，价廉、可靠等。



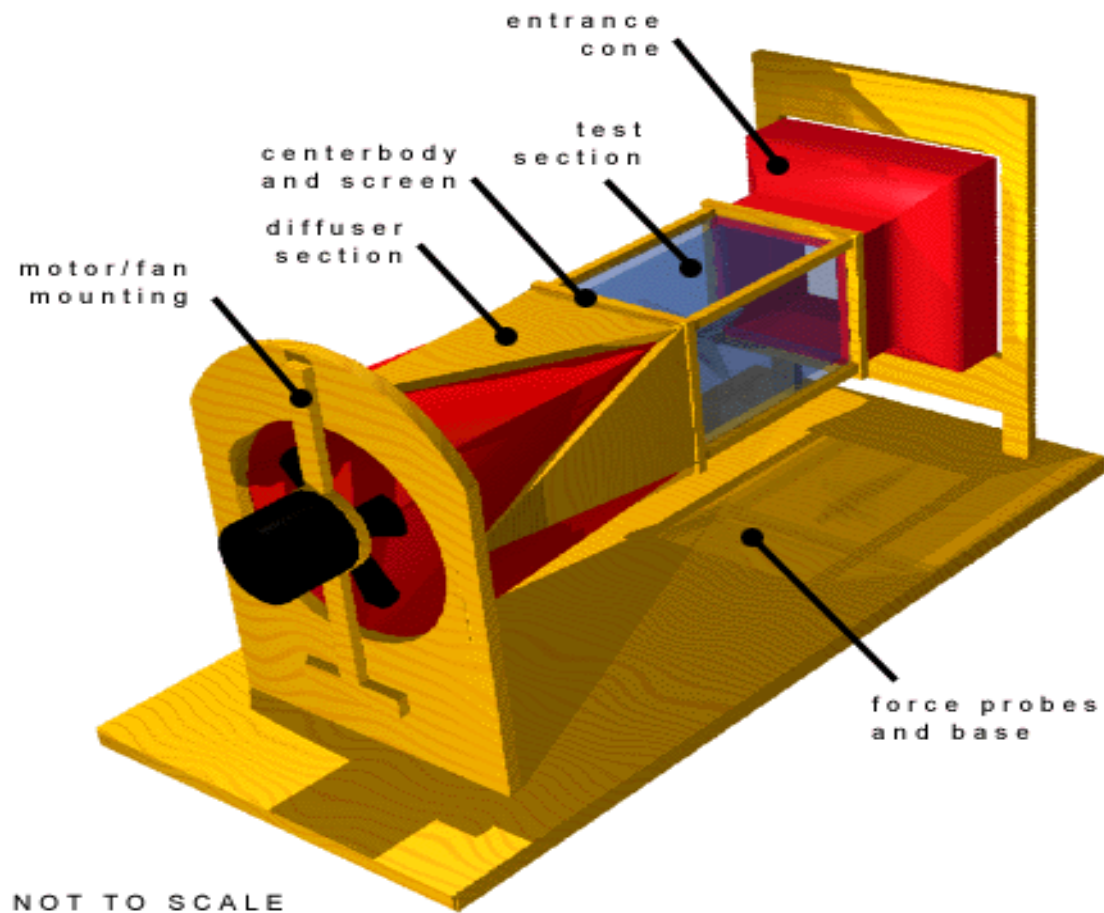
风洞的历史沿革

- ❖ 世界最早的风洞是英国人在1871年建造的，但是飞机的发明人却是美国的莱特兄弟。莱特兄弟在1901年建造了一个风速每秒12米的风洞，用它做实验发明了世界上第一架飞机。但是真正有系统地建造大量风洞的是德国人。被称为「现代流体力学之父」的普朗特（Ludwig Prandtl, 1875~1953）认为研究空气动力学必须做模型实验，于是在1906年建立德国的第一个风洞。
- ❖ 1907年，流体力学的奠基人普朗特主持创办了「哥廷根空气动力实验院」。在他的领导下德国耗费巨资建立了一批低速、高速、超高速和特种风洞。
- ❖ 风洞设备能够帮助人们深入了解物理本质，然后分析再把物理本质用数学方程式概括出来，这样结合了物理性质和数学理论就奠定了流体力学的理论基础。当时的德国在流体力学，特别是空气动力学上领先世界。根据这些扎实的理论基础和风洞实验，德国制造了V1和V2火箭还有世界第1个喷气发动机



Wenham 风洞 始祖

- ❖ 维纳姆(**F.H.Wenham, 1824~1908**)英国杰出的航空学家, 他的工作代表了英国航空学会**19**世纪航空研究的最高水平。
- ❖ 维纳姆已经进行过几年航空研究, 内容包括观察鸟的飞行、开展旋臂机试验、螺旋桨试验和全尺寸滑翔机试验等, 这些工作已经为他的著名论文《论空中交通》作了大量前期准备。
- ❖ **1866**年, 维纳姆在英国航空学会上发表了一篇题为《论空中交通和关于重于空气飞行器的支持原理》的演讲。明确阐述升力主要集中于前缘的思想。他的最初试验通过旋臂机进行。
- ❖ **1871**年, 维纳姆设计并建造了世界上第一座风洞。它是个四周封闭的矩形框, 一端有一架鼓风机, 提供试验用的气流。中间的一个支杆上安装试验件, 用弹簧秤测量气动升力。



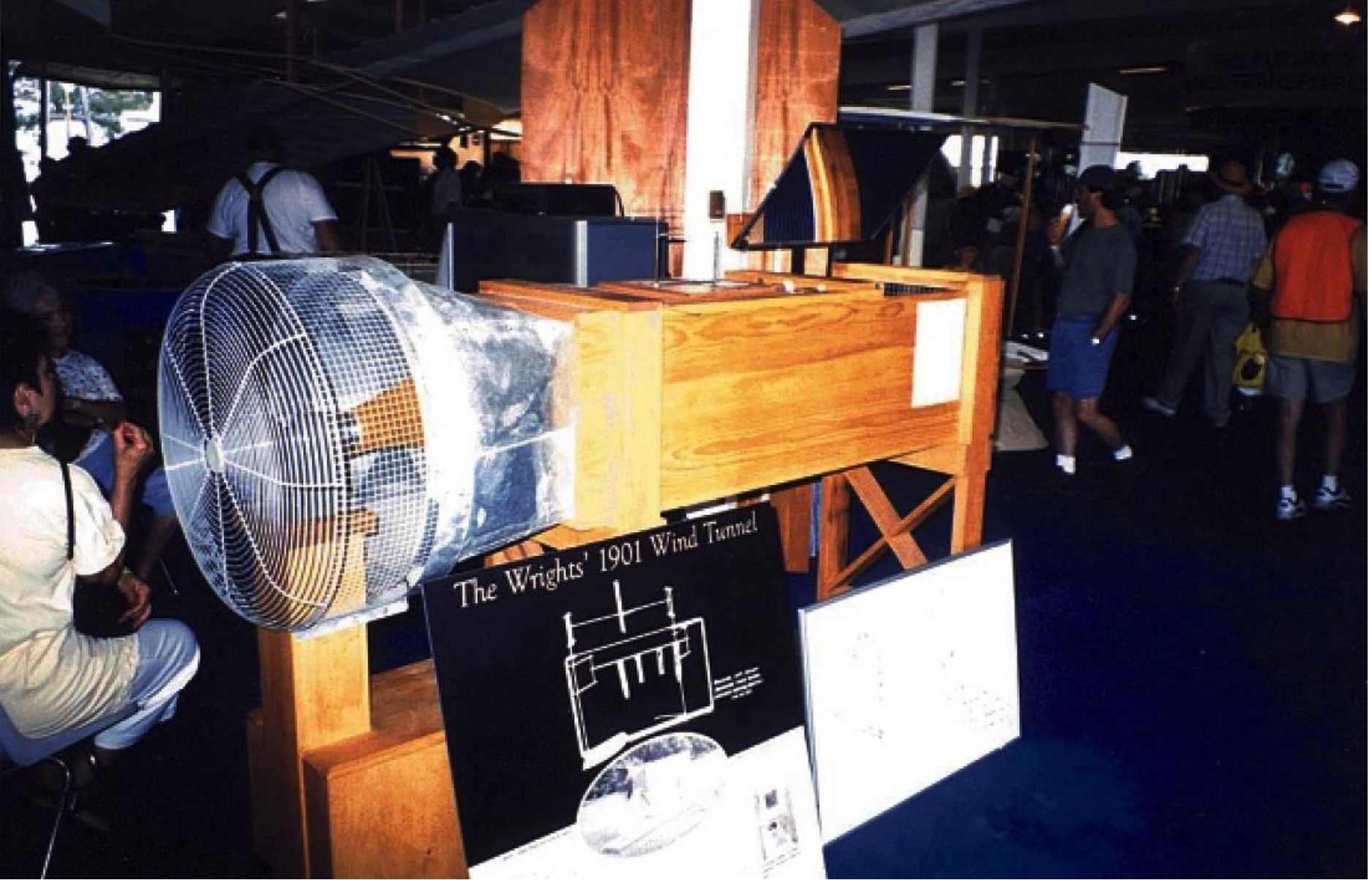
早期的风洞





Wenham 风洞 始祖

- ❖ 既然在空气中物体所受的力只与物体与空气的相对速度有关，于是就可以让空气运动而物体固定来测量物体所受的力。这就是原始的风洞的想法。
- ❖ 最早的风洞是为了研究在空中飞行时所受的升力与阻力需要来设计的，也就是为了早期设计飞机所需要来设计的。
- ❖ 温翰姆(**Francis Herbert Wenham, 1824-1880**)英国航空学会创始人之一。
- ❖ 第一个设计与建造实验风洞的是英国人他在**1871**年设计建造了世界上第一座风洞。
- ❖ 它是个四周封闭的矩形框，一端有一架鼓风机，提供试验用的气流。中间一个支杆上安装试验件，用弹簧秤测量气动升力。



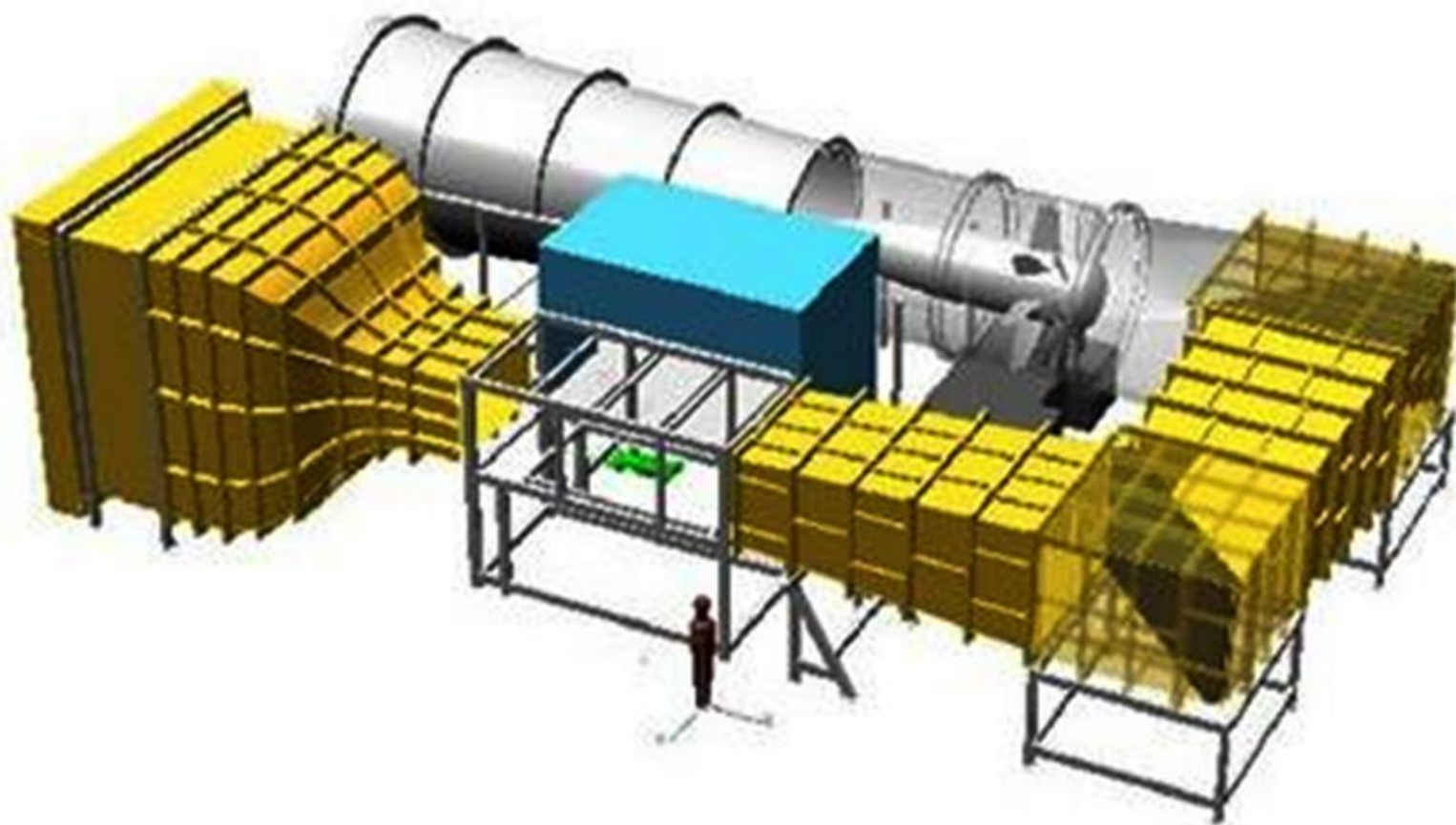
莱特兄弟的风洞（1901年）复制品

1903



风洞的基本分类及其典型构造

现代风洞的基本结构组成





风洞的分类

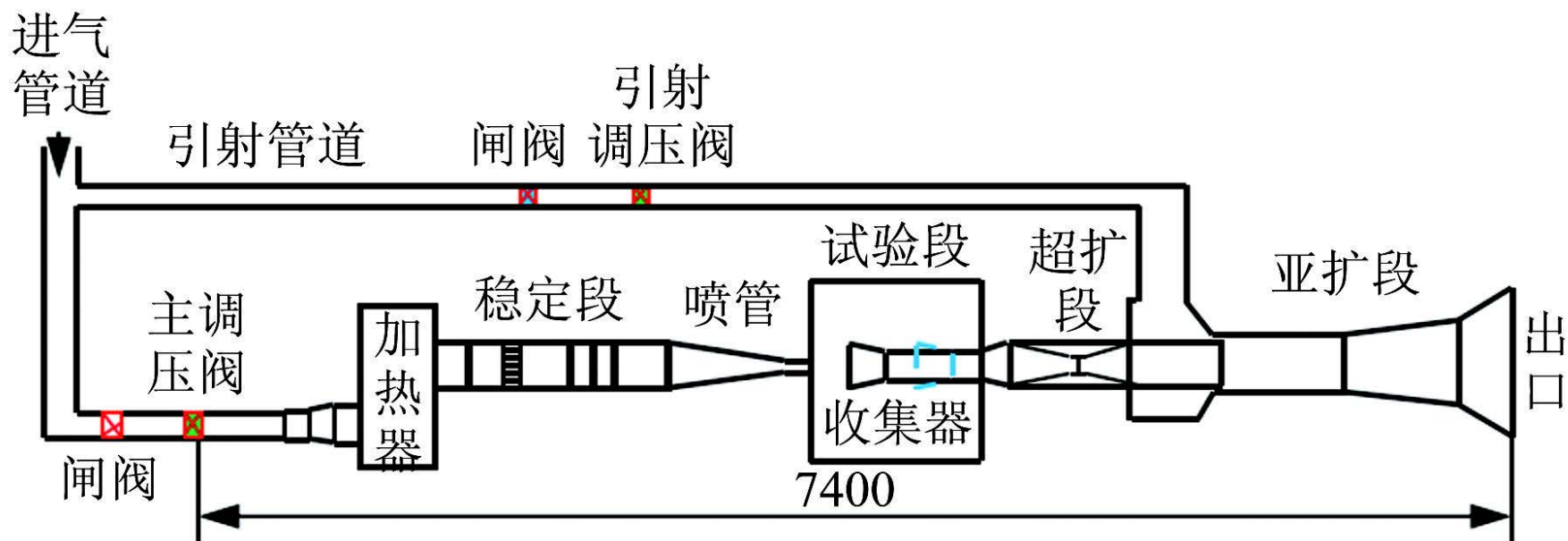
- ❖ 风洞中的气流需要有不同的流速和不同的密度，甚至不同的温度，才能模拟各种飞行器的真实飞行状态。
- ❖ 风洞中的气流速度一般用实验气流的马赫数(**M**数)来衡量。
- ❖ 风洞分类**1**: 根据流速范围（通常）
- ❖ 风洞分类**2**: 按用途（风雨、汽车、工业风洞）
- ❖ 风洞分类**3**: 按结构型式（直流、回流、开式、闭式、立式）
- ❖ 风洞分类**4**: 按实验时间（连续、暂冲式）
- ❖ 其他特征：二元风洞、低密度风洞、低湍流度风洞、高压风洞、全尺寸风洞



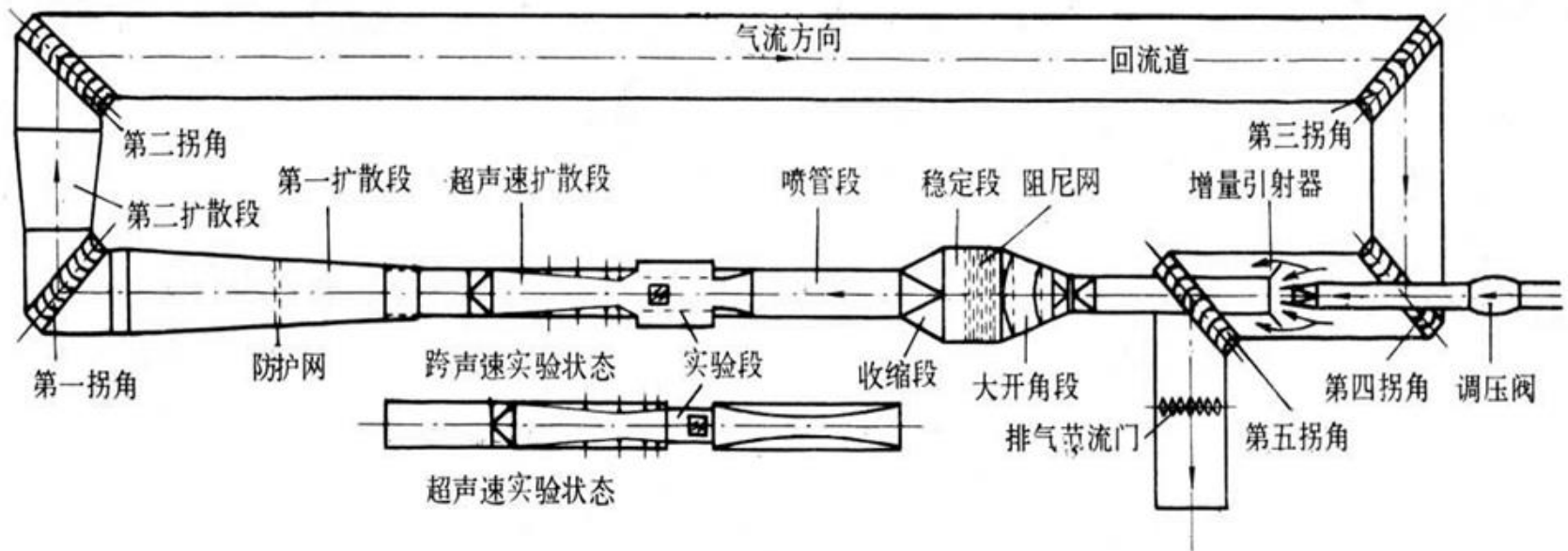
Wind Tunnels Types

- Open-loop
- Closed-loop
- Subsonic
- Transonic
- Supersonic
- Hypersonic
- Refrigerated
- Full-sized
- Scale-sized





- ❖ 风洞，不只是个简单的筒状物，，
- ❖ 高端好用的风洞设备设计精细巧妙，造价昂贵



中国气动力研究与发展中心的跨、超声速风洞结构示意图

- 风洞，不只是个简单的筒状物，，
- 高端好用的风洞设备设计精细巧妙，造价昂贵



低速風洞的基本構造

- 1洞体（收缩段, 整流段(蜂窝管\整流网), 试验段, 收集段）
- 2驱动系统（电机和驱动风扇）
- 3测量控制系统(视流技术、测力、测压、测温、数据处理。。)

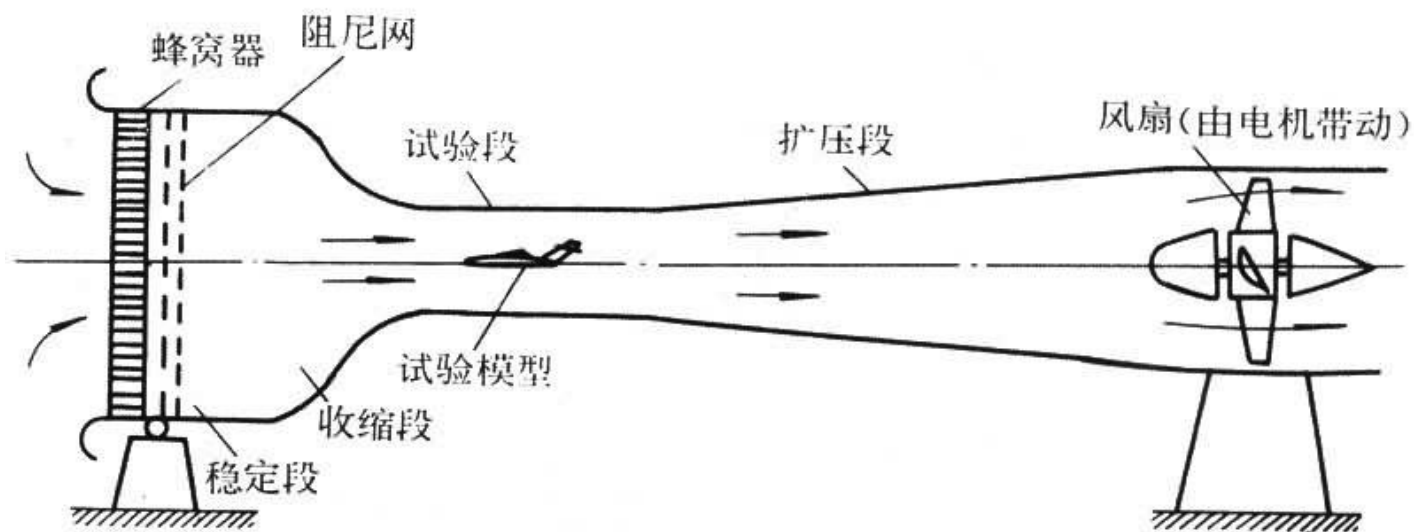


图1 低速风洞

实验段是风洞的中心部件，实验段流场应模拟真实流场，其气流品质如均匀度、稳定度（指参数随时间变化的情况）、湍流度等，应达到一定指标。



风洞的基本构成

- ❖ 洞体 能对模型进行必要测量和观察的实验段。实验段上游有提高气流匀直度、降低湍流度的稳定段和使气流加速到所需流速的收缩段或喷管。实验段下游有降低流速、减少能量损失的扩压段和将气流引向风洞外的排出段或导回到风洞入口的回流段。有时为了降低风洞内外的噪声，在稳定段和排气口等处装有消声器。
- ❖ 驱动系统 由可控电机组和由它带动的风扇或轴流式压缩机组成。风扇旋转或压缩机转子转动使气流压力增高来维持管道内稳定的流动。改变风扇的转速或叶片安装角，或改变对气流的阻尼，可调节气流的速度。直流电动机可由交直流电机组或可控硅整流设备供电。它的运转时间长，运转费用较低，多在低速风洞中使用。
- ❖ 测量控制系统 按预定的实验程序控制各种阀门、活动部件、模型状态和仪器仪表，并通过天平、压力和温度等传感器，测量气流参量、模型状态和有关的物理量。随着电子技术的发展，**40**年代后期开始，风洞测控系统由早期利用简陋仪器，通过手动和人工记录，发展到采用电子液压的控制系统、实时采集和处理的数据系统。



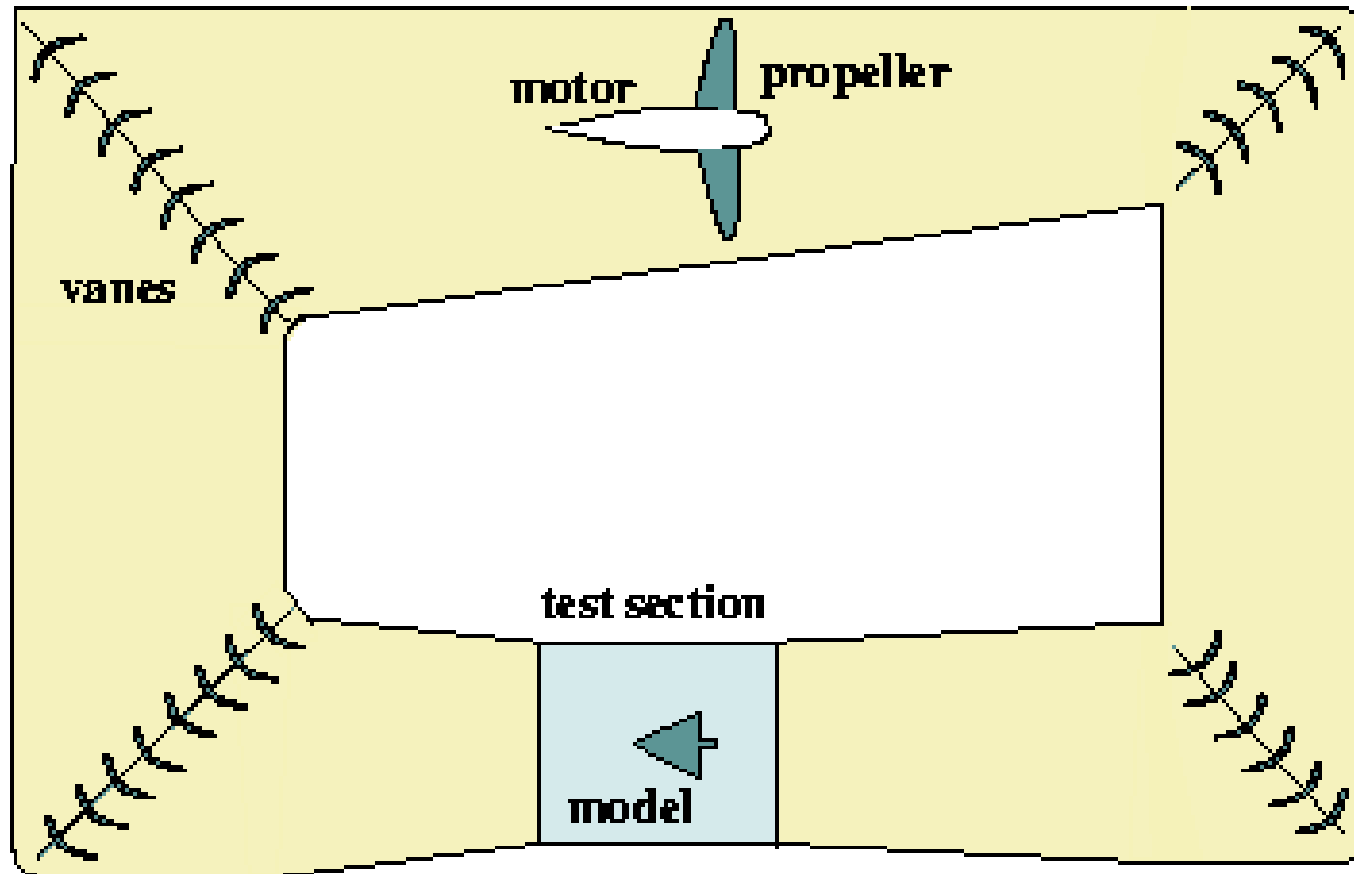
❖ 直流式低速风洞

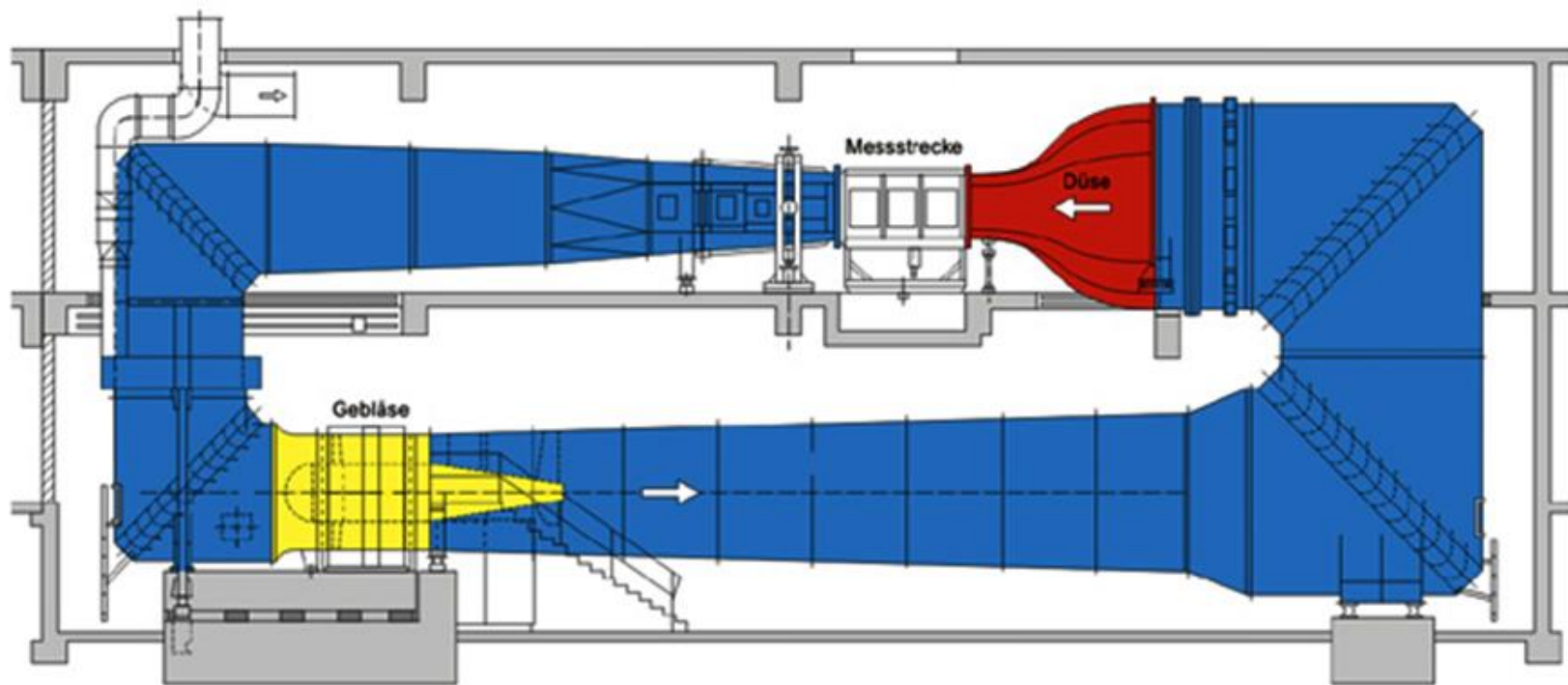
Ames Research Center, NASA
National Full Scale Aerodynamic Facility (40x80x120)





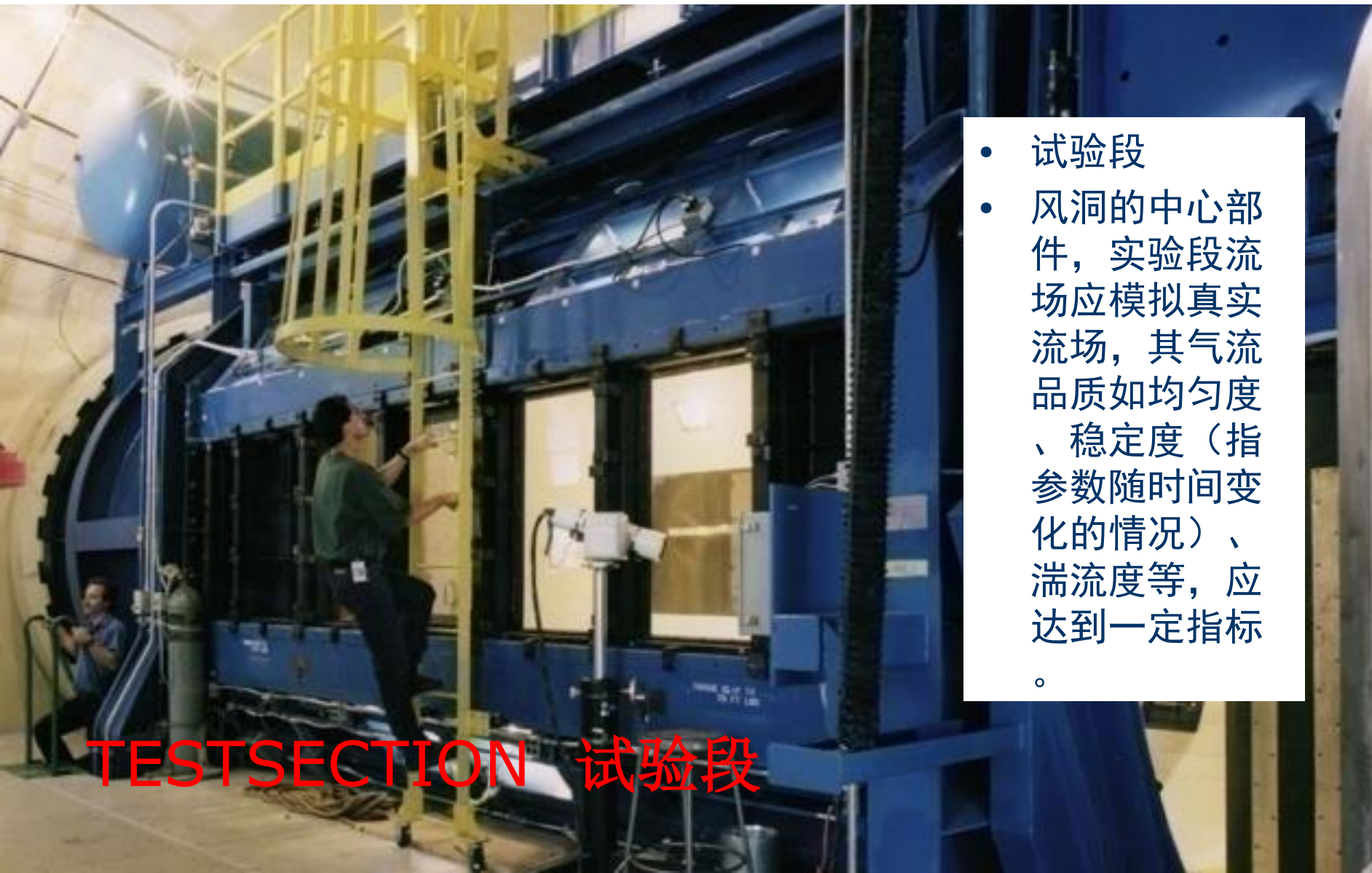
迴流式风洞





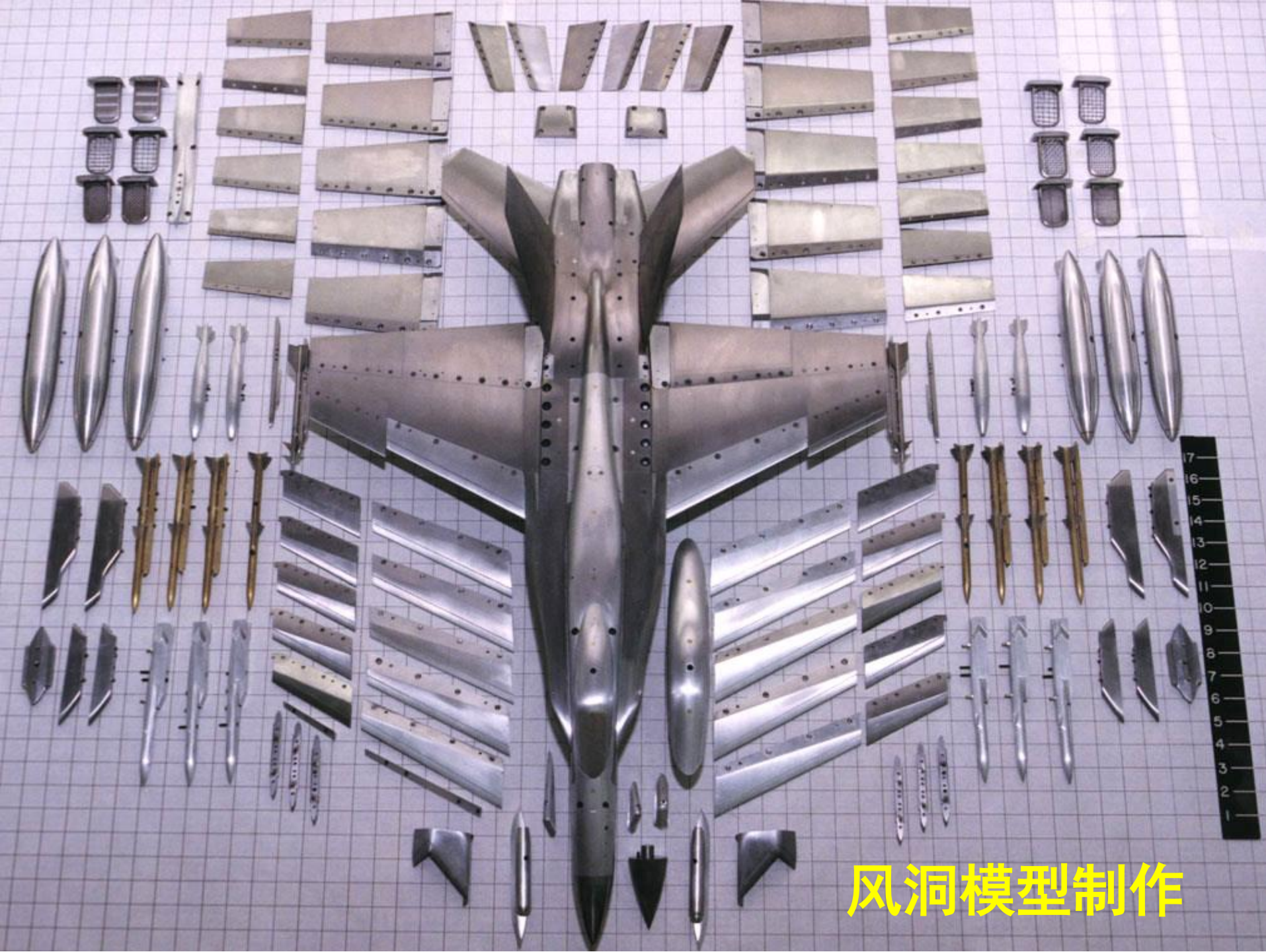
- ❖ 回流式风洞实际上是将直流式风洞首尾相接，形成封闭回路。气流在风洞中循环回流，既节省能量又不受外界的干扰。风洞也可以采用别的特殊气体或流体来代替空气，用压缩空气代替常压空气的是变密度风洞，用水代替空气的称为水洞。

風洞的核心构造~试验段



- 试验段
- 风洞的中心部件，实验段流场应模拟真实流场，其气流品质如均匀度、稳定度（指参数随时间变化的情况）、湍流度等，应达到一定指标。

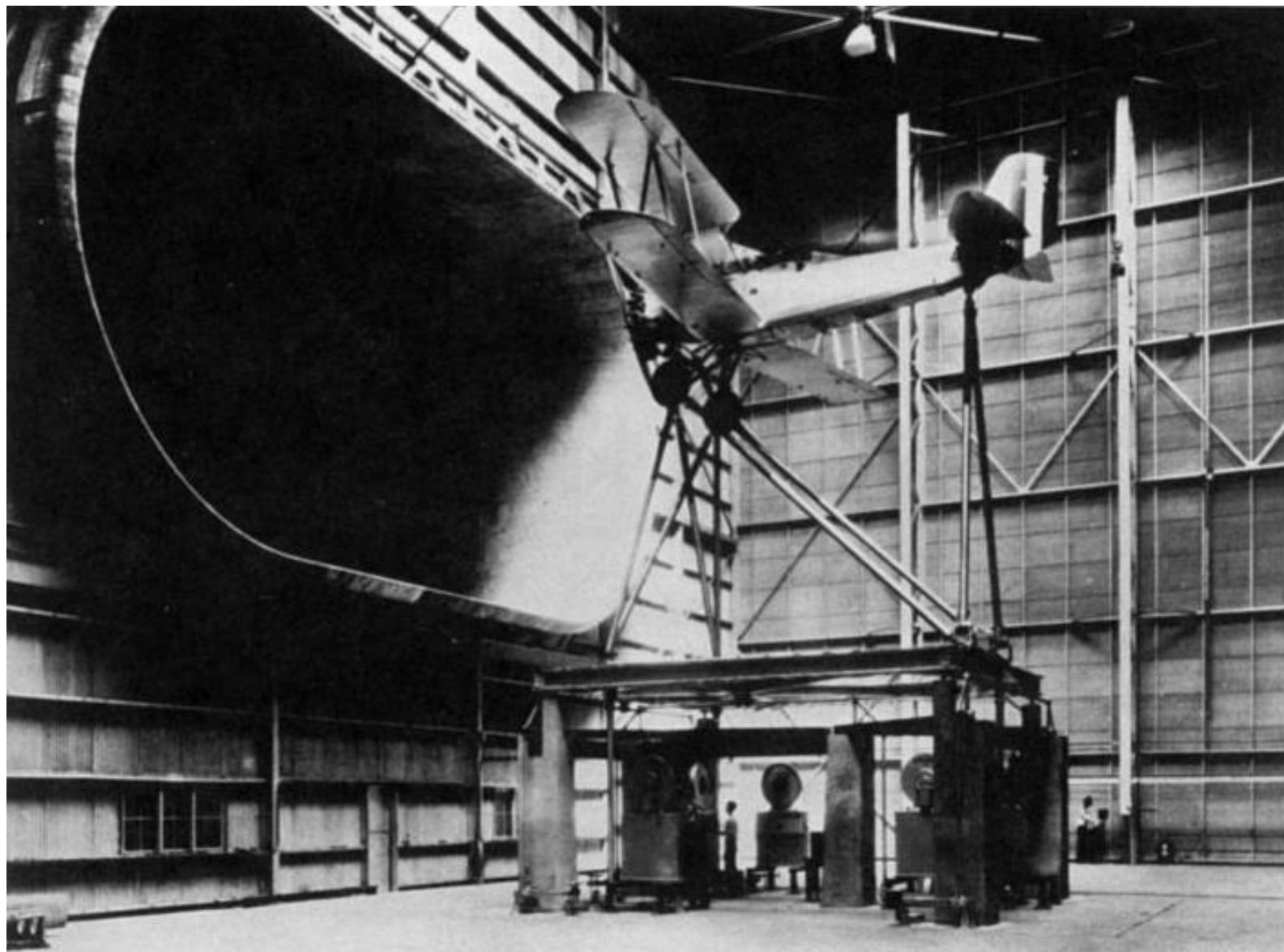
TESTSECTION 试验段



风洞模型制作



飞机模型在试验段做吹风试验





Bundesarchiv, Bild 183-L21649
Foto: Lysiak | o.Dat.

Bundesarchiv_Bild_183-L21649,_Ernst_Heinkel_mit_Modell_He_111_im_Windkanal



“运8”全机模型进行吹风试验



飞机模型在试验段做吹风试验



飞机模型在试验段做吹风试验





跨声速风洞

- ❖ 风洞的马赫数为**0.5~1.3**。
- ❖ 当风洞中气流在实验段内最小截面处达到声速之后，即使再增大驱动功率或压力，实验段气流的速度也不再增加，这种现象称为壅塞。
- ❖ 实验段采用开孔或顺气流方向开缝的透气壁，使实验段内的部分气流通过孔或缝流出，可以消除风洞的壅塞，产生低超声速流动。



特种风洞

- ❖ 风洞的种类很多，除一般风洞外，
 - ❖ 有专门研究飞机防冰和除冰的冰风洞，
 - ❖ 研究飞机螺旋形成和改出方法的立式风洞，
 - ❖ 研究接近飞行条件下真实飞机气动力性能的全尺寸风洞，
 - ❖ 研究垂直短距起落飞机(**V/STOL**)和直升机气动特性的**V/STOL**风洞，高雷诺数增压风洞，
 - ❖ 还有研究高空稀薄气动环境的低密度风洞等。
-
- ❖ 为了研究发动机外部噪声，进行动态模型实验，一些风洞作了改建以适应声学实验和动态实验要求。
 - ❖ 为了开展工业空气动力学研究，除了对航空风洞进行改造和增加辅助设备外，还有一批专用风洞：
 - ❖ 如模拟大气流动的速度剖面、湍流结构和温度层结的长实验段和最小风速约为**0.2米/秒**的大气边界层风洞，研究汽车声学性能的声学风洞，研究全尺寸汽车性能、模拟气候条件的汽车风洞，研究沙粒运动影响的沙风洞等。



声学风洞

❖ 特殊到位的消音设计，适合与精细的静音测量

