

创新·严谨·团结·奋进

当前位置：首页 > 科学传播 > 力学家地 > 释疑解惑

释疑解惑

【释疑解惑】风洞究竟是什么？

发布时间：2024-05-07

《力学家地》编辑部：

从媒体报道中，知道了力学研究所在2023年又建成了一座激波风洞JF22，为我国航天事业增添了新的国之重器。我们是文科大学生，很希望你们给我们科普一下“风洞”是怎么回事儿。十分感谢！

几名非理工专业的大学生

2023年12月10日

风洞究竟是什么？

萤火

提起风洞，可能不少人比较陌生，不知道它究竟是什么东西？也不清楚它有什么用处。但是，风洞对于每一个流体力学从业者来说都是无法绕开的话题，几乎见证了现代流体力学的发展。

它可不是黑洞、虫洞一类的东西，而是一个开展空气动力科学研究的实验装置。今天，咱们就一起来探秘一下风洞吧！在具体介绍风

洞之前，我们要引入一个力学原理——运动相对性原理。所谓“运动的相对性”是指：对于同一个物体，由于选取的参照物不同，人们可以说它是运动的，也可以说它是静止的。由此可见，一个物体是运动还是静止，取决于所选的参照物。参照物不同，得出的结论也不相同。机械运动的这种性质叫做运动的相对性。图1中的汽车里坐着一群人，站在路边的姑娘认为车中的乘客离她远去（在运动中），但是汽车司机却认为这些乘客始终坐在后面没有动（在静止中）。因为姑娘是以地面作为参照物，而司机是以车厢作为参照物。

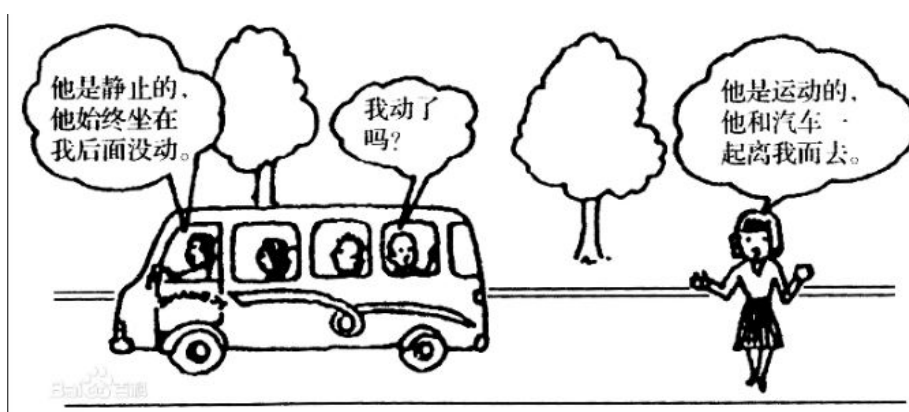


图1 运动相对性的示意图（图片来源：网络）

类似地，飞机在空中飞行时，地面上的行人认为飞机在高速飞行，飞机上的旅客往往感觉不到飞机在运动而是认为舷窗外的云朵在向后方飘走。这样，空气动力学家就可以另辟蹊径来研究飞行器运动特性了：把飞行器模型固定在一个支架上，让空气从模型周围流过。只要气流的速度和飞行器的速度相同，气流对模型的作用就和飞行器在空中飞行时的情况一样。这样当然，试验气流要限制在一定的空间里（一般是管状通道），否则驱动试验气流要耗费巨大的能量。这就是“风洞”的来由，图2是风洞的示意图。



图2 风洞示意图（图片来源：网络）

这里要特别说明的是，依照力学的相似性原理，人们可以采用缩比模型来开展模拟实验。这里“相似”的定义是：对于同一个力学过程，如果两个力学现象的各个力学量在各对应点上以及各对应瞬间大小成比例，且各矢量的对应方向一致，则称这两个力学现象相似。在流动现象中，如果两种流动相似，一般应满足几何相似，运动相似，动力相似。人们只要保证几何相似（模型与原型形状相同而尺寸可以不同，但一切对应的线性尺寸成比例）和运动相似（在流场中的所有对应点处对应的速度和加速度的方向一致，且比值相等），那么它们的动力就是相似的（流场中相应位置处的各种力的方向对应相同，且大小的比值相等）。因此，在地面上开展风洞试验一般会比空中进行飞行试验方便得多，而且也便宜得多，因为可以采用缩比的小模型来开展试验。

美国宇航局（NASA）的官网上对风洞有一个很接地气的定义：风洞是内部有空气流动的大管子。换言之，风洞是通过人工来产生和控制气流，模拟飞行器或物体周围气体的流动，可以量度气流对飞行器或物体的作用并观察相关力学现象的一种管道状试验设备。它是进行空气动力试验最常用、最有效的工具，是现代飞机、导弹、火箭等研制、定型和生产的“绿色通道”。如果形象地打个比喻，那么可以说风洞是在地面

上人为地创造了一个“天空”。目前，风洞通常被用来测试飞机、宇宙飞船、汽车，以及几乎所有与周围空气流动有关的工程应用装置，甚至高尔夫球、滑雪板等。图3就是在风洞中展示的一个球体周围流场中的流线形态。

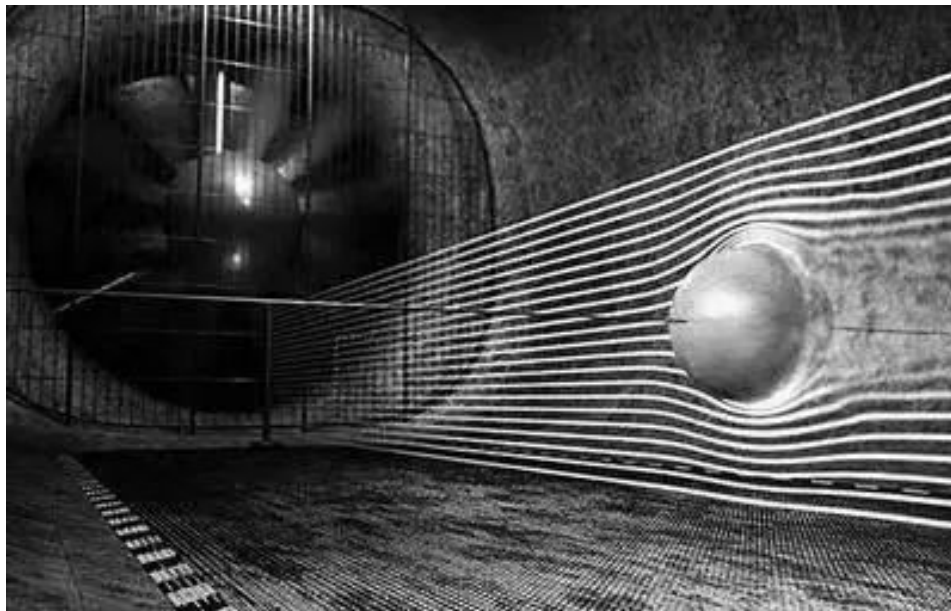


图3 风洞中圆球周围流场形态展示（图片来源：网络）

风洞主要由洞身结构、驱动系统和测控系统组成。每个部件的形式因风洞的类型而异。主体实验部分主要是用于测量和观察模型，称为“实验段”。在实验段的上游有稳定段和喷管，稳定段的作用是提高试验气流的平直度和减小试验气流的紊乱程度，而喷管的作用则是将气流加速到所需的速度。在实验段的下游一般有扩散段，用于降低流速，从而降低能量损失。此外，在扩压段下游还有一个排气段（将气流引向风洞外排出）或，用于将风洞外的气流或回流段（将气流导回风洞入口）（参见图4）。为了让读者感受一下大型风洞的规模，图5示出美国NASA的Ames风洞的照片。当然，不同种类的风洞在结构和布局上会有许多差异的。

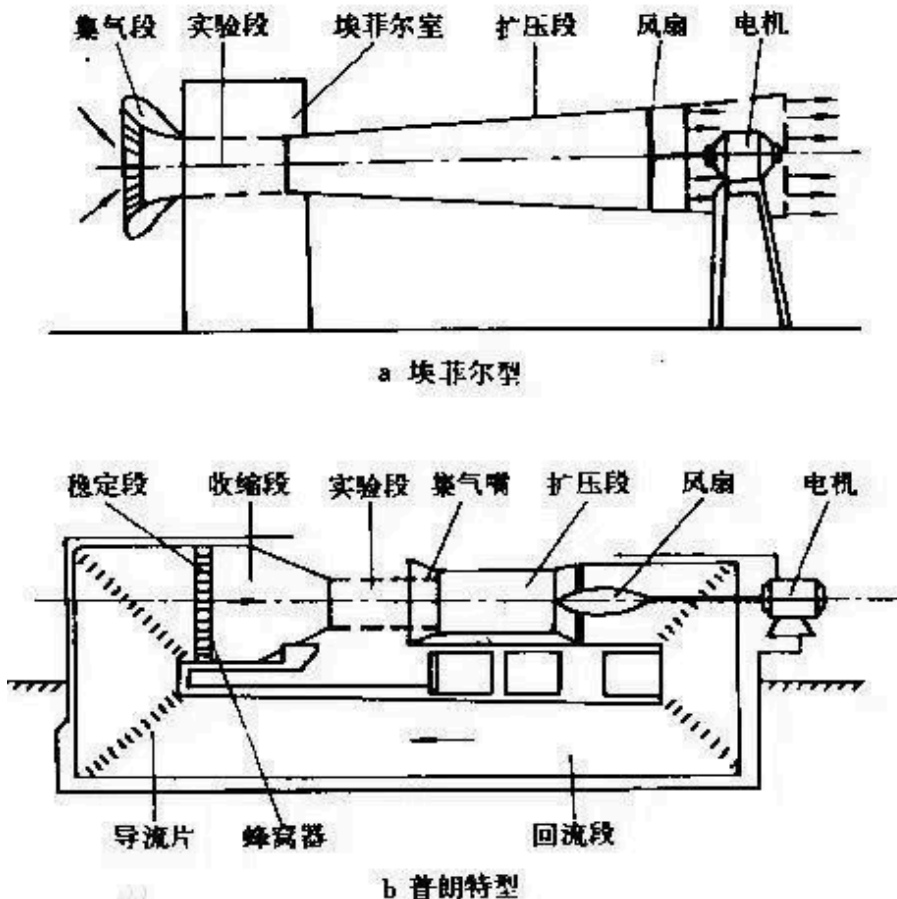


图4 风洞基本构成示意图（图片来源：网络）



图5 美国宇航局NASA下属Ames风洞（图片来源：网络）

应该说，风洞是近代科学的产物，是在人类向往飞行的梦想中逐渐发展起来的，并伴随着科技发展不断完善。风洞的分类方法也有很多种，例如根据气流速度可以分为低速风洞、高速风洞、亚声速风洞、超

声速风洞、高超声速风洞、以及超高声速风洞等；也可根据温度和焓值来分，有低温风洞、高温风洞、以及高焓风洞等；如果按照运行模式来分的话，有脉冲式风洞或连续式风洞等。此外，还有一些名称，如等激波风洞、离子体风洞、声学风洞、结冰风洞，则是依据风洞的特色而命名的。



图6 一个高超声速风洞的试验段展示（图片来源：网络）

如前所述，一般情况下，在风洞试验中，模型是固定不动的，而是让试验气体流过模型，这相当于将研究问题的坐标系固定在飞行器上。这种配置模式更易于实现，也便于测量。风洞就是根据前面提到的相对运动原理和相似理论来测量飞行器缩比模型的空气动力特性，并研究相应的流动现象与流动机理，从而确定实际的飞行器或其他物体的空气动力学特性。当然，也有一类风洞是气体不动，而模型运动，这种配置模式更接近于实际问题，例如弹道靶。这类风洞实验技术的困难在于模型的高速发射与回收以及测量。图7展示的就是力学研究所研制的一个弹道靶装置，它可以提供超高速飞行空间环境，开展不同环境下的超高速自由飞和碰撞模拟试验，并可以提供速度、原位阴/纹影图像、高速碰撞图像及碰撞光谱等信息。该装置的基本技术参数为：模拟飞行高度 0-130 千米，模拟飞行速度 1-7 千米/秒。



图7 一个典型的弹道靶装置（图片来源：力学所官网）

我们在日常生活中很少见到风洞，但其实它的研究领域非常宽广。前面提到了它在航空和航天工程的研究和发展中起着重要作用，像飞机、火箭等高速飞行器在实际运行前都需要经过风洞来检测，确保安全性和稳定性。目前，风洞在交通运输、房屋建筑、风能利用和环境保护等方面也得到越来越广泛的应用，人们也称之为“工业空气动力学”。从汽车到高铁，从大桥到高楼，从体育到军事，从能源到健康……，处处都可以见到风洞的身影。

这里给出风洞在体育竞技中应用的例子。图8是一个立式跳伞风洞，它是一种能产生垂直向上气流的科研试验设施。当向上的垂直气流达到一定的速度，人以一定姿态进入飞行舱内后，在飞行舱内风力的强大支撑下不需任何工具就能自由的悬浮于空中，可以使人在空中通过不同姿势和重心的变化做出各种飞行的动作如旋转、空翻、倒立、盘旋等，达到与真实飞翔同样的效果。在立式风洞内，运动员们可以在“带风”条件下进行空中翻转动作训练和动态平衡以及稳定性、旋转控制能力、核心力量等训练，因其独特的安全设计可以为自由式滑雪空中技巧运动员提供安全的训练环境。



图8 立式跳伞风洞在运行中（图片来源：网络）

为助力2022年北京冬奥，航空工业相关部门跨界利用空气动力学原理，为中国跳台滑雪项目量身打造了两类共三座体育专用风洞。通过风洞训练，可在模拟相对风速下，通过测力平台中的仪器精准测量运动员的双脚发力及不同动作姿态受到的摩擦阻力，来综合评估运动员脚步发力的情况以及起跳角度的正确性，从而改进助滑和起跳姿势，提高出台速度。这真可谓是，为中国跳台滑雪运动员们插上了科技的“翅膀”！



图9 滑雪运动员在风洞中测试训练（图片来源：网络）

最后，我们还是回到风洞的传统研究领域里吧！它被誉为航空航天器的摇篮。随着高超声速飞行的迅速发展，人们对于风洞的性能要求也越来越高。2023年，中国科学院力学研究所研发的JF22超高速风洞（全称为爆轰驱动超高速高焓激波风洞）成功通过验收，它将与JF12复现风洞（全称为复现高超声速飞行条件激波风洞）一同构建我国全面覆盖高超声速飞行走廊的“地面飞行”实验平台。



图10 力学所新建成的JF22超高速风洞图示（图片来源：自制）

从原理上讲，JF21和JF22都是激波风洞，这是一类脉冲式风洞，运行时间分别为100毫秒和50毫秒量级。激波风洞不像常规风洞那样依靠风扇等动力机械来驱动试验气体，而是“激波”。所谓“激波”是气体、液体或者固体

介质中压力、密度或温度在波阵面上发生突跃变化的压缩波。图11给出激波风洞示意，主要由激波管、喷管和试验段构成。在激波管的驱动段（充有高压气体）和被驱动段之间的主膜片，在两侧气体压差达到设定值时便会破裂，在被驱动段里形成一道向下游传播的激波。由于激波压缩，在波后产生了高压高温气体，它会冲破第二膜片进入喷管，并进一步膨胀加速。最终，高速试验气流在实验段中通过模型，测试系统采集所有的数据。当然，以上只是简单介绍一点基本知识，实际的激波风洞运行过程要复杂得多。

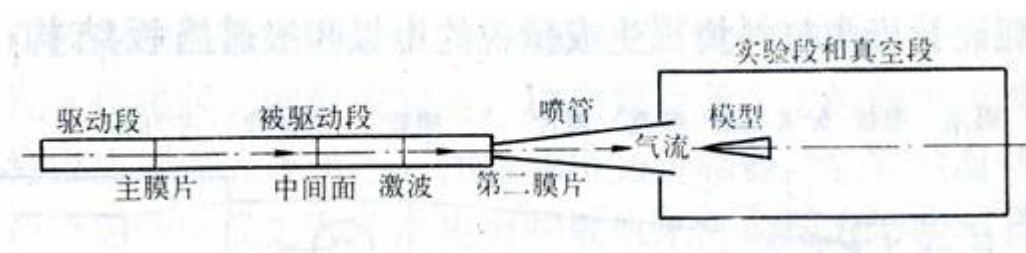


图11 激波风洞示意图（图片来源：自制）

这里要特别指出的是，力学所的俞鸿儒院士发明了一种“氢氧爆轰驱动技术”，使得JF12和JF22的试验气流的总温可以达到数千度以上（其中JF22的总温最高将近2万开氏度），从而实现了“复现”高超声速飞行条件。因为一般高超声速风洞的试验气流总温为室温量级，这样试验气流的速度虽然很高但温度十分低下，从而不能完全模拟高超声速飞行器飞行时的真实环境。图12画出在一个拉瓦尔喷管中，气体流动过程中速度 V 、温度 T 和压力 P 等参数的变化情况。在喷管的收缩段，流动马赫数 M 小于1，称为亚声速流动（subsonic flow），随着流速的增加温度和压力都减小；气体在喷管喉部达到声速，在声速流（sonic flow）下，马赫数 $M=1$ ；在喷管的扩张段，流动马赫数 M 大于1，称为超声速流动（supersonic flow），随着流速的增加温度和压力继续减小。所以，在高超声速风洞中，试验气流的温度会下降得很低。

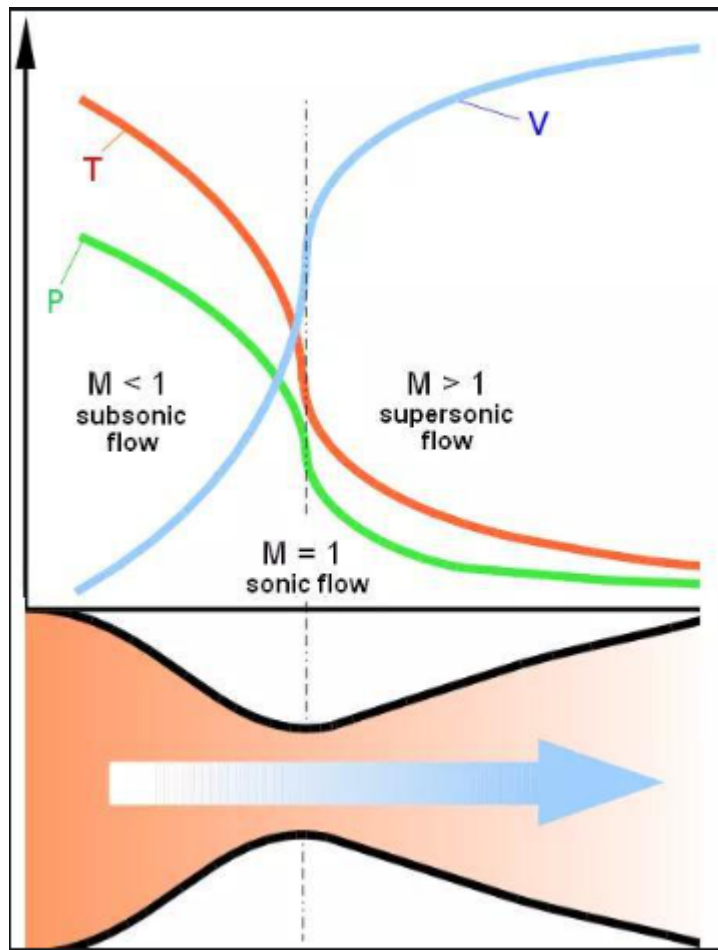


图12 气体在拉瓦尔喷管流动过程中参数的演化（图片来源：网络）

因此，能够复现高超声速飞行条件的JF12一经问世，便在国际气动学界引起了震动。那么，这个创新的驱动技术是怎么回事儿呢？它采用按一定比例混合的氢气和氧气作为爆轰气体，放置在驱动段中（此时亦可称之为“爆轰驱动段”，或简称为“爆轰段”），启动时在主膜片附近点火，这样就导致氢氧混合物起爆，形成爆轰波。爆轰波的能量远高于一般凭借压差产生的激波，因此波后气体的压力和温度会有极大的提高。图13给出JF12的全貌，它是一个庞然大物，风洞总长265米，总重量约1000吨。



图13 力学所的JF12复现风洞的全貌（图片来源：自制）

我们相信，力学所构建的“地面飞行”实验平台，将会推动高超声速与高温气体动力学学科发展，支撑我国临近空间高超声速飞行器的研发。

参考文献

- [1] <https://mp.weixin.qq.com/s/8if-U95K2BtaC4lGlq5M6A>
- [2] <https://mp.weixin.qq.com/s/19xAmcFmTY46DHzyDZuZ1Q>
- [3] <https://mp.weixin.qq.com/s/lxJ3r0NTKjPLP6wF4AS3gQ>

上一篇：【释疑解惑】风力发电机是怎样工作的？

下一篇：【释疑解惑】冰壶运动的奥秘

版权所有 © 2024 中国科学院力学研究所 京ICP备05002803号-1 京公网安备110402500049

地址：北京市北四环西路15号 邮政编码：100190

