



## 谈谈跨音速面积率和超音速面积率

蒋 迅

### 1. 引言

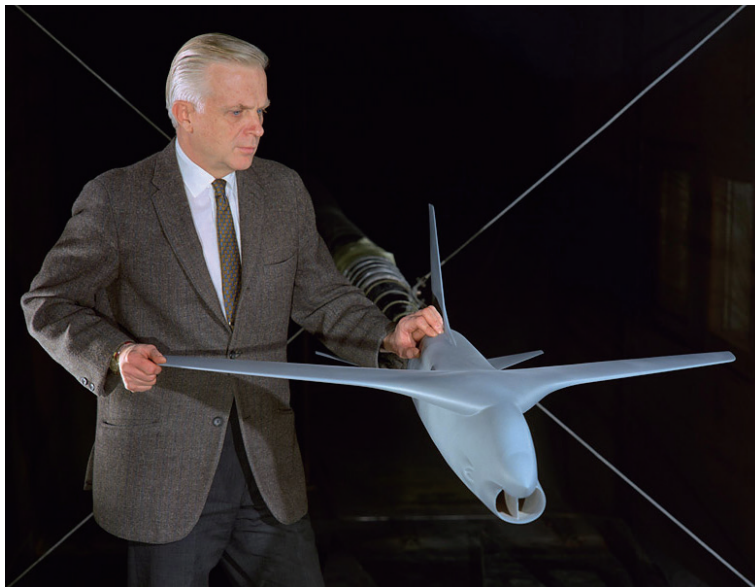
今天我们将要介绍的面积率，也称面积法则，不是我们在中学平面几何里的面积公式，也不是热力学中的麦克斯韦等面积法则，而是在超音速研究中发现的一个设计规则。这个规则是帮助人类突破音障的两大帮手之一。另一个是超临界翼型（supercritical airfoil）。从数学的角度，面积率的发现与发展是数学思维在科学研究中的完美体现。本文没有严格的数学公式推导和证明，但读过之后，能感受到科学家们是怎样运用他们的数学训练到实际问题中的。

### 2. 跨音速面积率和理查德·惠特科姆<sup>1,2</sup>

二次世界大战以后，许多飞机开始改成使用喷气发动机作为动力来源，但是它们的速度都在马赫数 1 以下，因为它们遇到同样的问题，就是音障。这里，马赫数  $Ma$  是飞机速度与音速的比值。在二战结束以前，飞机的速度都是亚音速的，即马赫数小于 1 ( $Ma < 1$ )。1947 年 10 月 14 日，NACA (NASA 的前身) 试飞员查克·叶格 (Charles E. "Chuck" Yeager, 1923-) 驾驶 X-1 飞机飞出了 1.06 马赫的速度，这是人类第一次实现了超音速飞行。但为了克服音障造成的巨大阻力，引擎在 5 分钟内就消耗掉了全部燃料。显然，这次成功虽然是一次里程碑，但还不能算是一次真正意义上的超音速飞行。人们必须寻找一个技术上的突破口。即使到了 1950 年代，美国空军的 YF-102 使用了三角翼，依然无法突破音障。

<sup>1</sup> Lane E. Wallace, From Engineering Science to Big Science, Chapter 5, The Whitcomb Area Rule: NACA Aerodynamics Research and Innovation, <https://history.nasa.gov/SP-4219/Chapter5.html>

<sup>2</sup> R.T. Whitcomb, A Study of the Zero-Lift Drag-Rise Characteristics of Wing-Body Combinations Near the Speed of Sound, NACA Research Memorandum L52H08, September 3, 1952.



理查德·惠特科姆

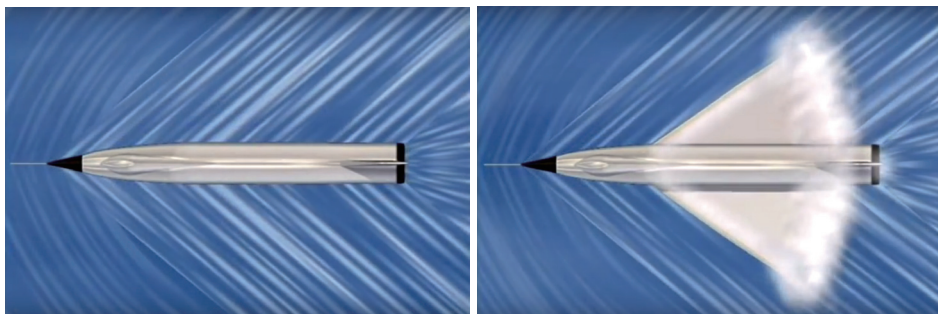
问题的症结到底在哪里呢？这个任务就落在了 NACA 兰利航空实验室研究人员的手里。兰利实验室的空气动力学家理查德·惠特科姆（Richard T. Whitcomb, 1921-2009）就是这个团队中的一员。惠特科姆出生在芝加哥市郊区的埃文斯顿市。他的父亲是第一次世界大战期间的热气球驾驶员，也是一名机械工程师。后来父亲找到了新的工作，就把一家搬到了马萨诸塞州的伍斯特市。所以他是在马萨诸塞州长大的。惠特科姆从小就着迷于飞机。他自己制作模型飞机，努力提高飞行效率并参加比赛。1943 年，他在伍斯特理工学院获得航空工程学的本科学士学位，然后开始了他在 NACA 兰利航空实验室的研究生涯。

在这里，我们还需要介绍另一位重要人物阿道夫·布士曼（Adolf Busemann, 1901-1986）。此人是纳粹时期德国的一名空气动力学的先驱。他提出的后掠翼概念引发了飞机设计革命。他后来研究的三角翼设计就是我们在航天飞机上所看到的那种。1947 年，布士曼移民美国，也成为了兰利中心的一员。

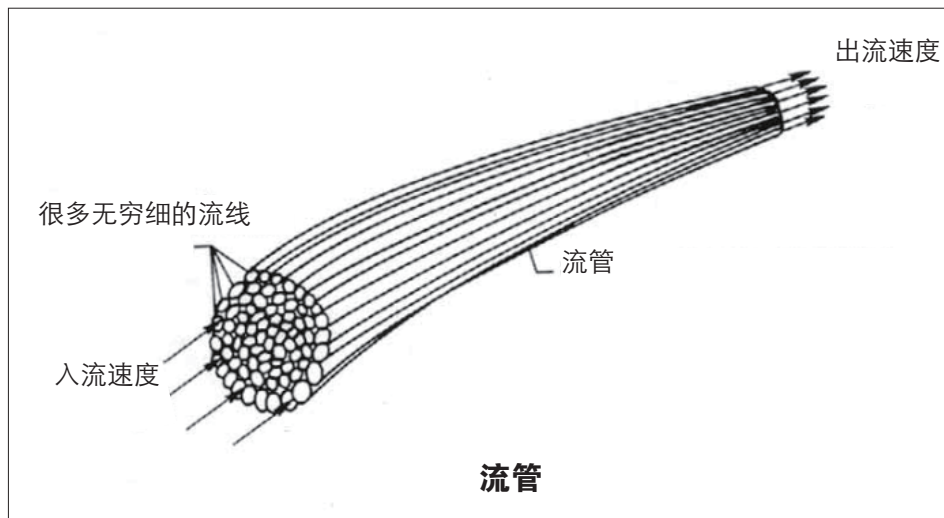
那个时候人们还没有理论支持这项研究，也没有用计算机模拟飞机的条件。飞机设计全是靠人员的直觉、经验和风洞试验。在亚音速飞行中，来自机身和机翼厚度的压阻可以忽略，只要其形状足够具有流线型，这样可以避免气流的分离。从已有的经验人们已经认识到，在接近音速后，阻力变得对机体的形状和排列特别敏感。尽管如此，人们还是找到了一些能在大范围里消除阻力的机体布局。这方面的例子有后掠翼和布士曼的双翼飞机。

惠特科姆使用了 8 英尺高速风洞观察了飞机模型在速度 0.95 马赫以下的飞行状况。我们可以通过纹影法（Schlieren photography）在实验室里看到冲击波。他惊讶地发现，在 0.7 马赫的速度时冲击波就可能开始形成，而后造成的阻力迅速增加。从理论上讲，在高亚音速时，气流的局部在机身和机翼附近

会加速到声速，即接近马赫数 1。对不同的飞机来说，开始出现这种情况的速度是不同的。我们把这时候的马赫数叫作临界马赫数（critical Mach number）。为了减少在达到临界马赫数之后的新的阻力，人们通常是让机身的截面变化尽可能地满足气动的流线型要求。那么如何进一步减少冲击波所造成的阻力呢？



惠特科姆先是用一个没有机翼的机身做测试，他发现气流是非常完美的；但当他加上机翼后，空气的碰撞就产生了令人难以置信的阻力。他又做了一个测试，这一次他把机翼去掉，同时让相应部位的机身增厚以使得其截面积等同于原来的机身加机翼的截面积。他发现，风洞里的效果与带机翼的结果是一样的。但是既不能不要机身，也不能不要机翼。这是不是说，就无法克服这个障碍了呢？这个问题让他苦苦地思索。



1951年，布士曼在兰利中心给了一次报告。他在报告中描述了在接近临界马赫数时气流的性质。让我们先从亚音速飞行来看布士曼说的管线型。在亚音速情形中，我们可以把气体看作是无粘性和不可压缩的。整个流场可以看作是一维的，也就是说，我们可以想象成空中的一把流管，每个流线可以被认为流管，因为流体沿着管子流动，就好像在管中一样。它们可以是弯曲的，但它们互相没有干扰。