



方向舵保护协会

从零开始设计一个简单的乘波体

[方向舵保护协会](#)

10-07 16:42

阅读 85893

当你知道（简单的）乘波体外形是怎么设计的以后，你对于各种消息就拥有了最基本的判断能力

一段很长很长的前言

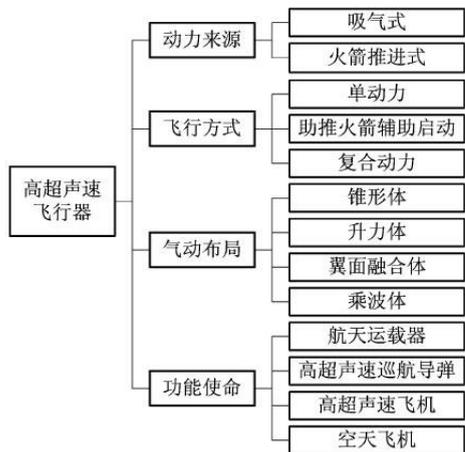
国庆阅兵亮相了很多飞起来很快的东西，这就导致最近关于超高速/高超声速飞行器的讨论突然变得热烈。很多军事论坛军事自媒体和军事博主都以此为主题开展了各种探讨。看到自己的研究方向成为话题热门，笔者自己还是有点小高兴的。

但很快事情就有点不对劲了。

现在网上出现了一种涉及到“高超音速”这个关键词就群魔乱舞的趋势，我觉得单纯地靠我自己的嘴去和一些人不现实又没有意义的。我认为把知识和原理都放出来让圈子里的广大爱好者都拥有基本的分析能力不被忽悠才是最有用的手段。当大家知道乘波体的气动外形是怎么一回事、怎样一个特征以后，对一些消息也就具有基本的判断力了。笔者不想堵住整个互联网的嘴，因为无论对错人人都有说话的权利，但笔者希望圈子里很多人能把基本的名词定义摸索清楚。在定义正确的基础上进行分析、科普、讨论，这才是一种对说出来的话负责的体现。

首先，高超声速（Hypersonic）是一个明确的速度范围，我们平时如果谈“高超声速环境”，那就意味着飞行器在该工况下飞行速度大于等于5马赫。除此之外的描述（如出现过很多次的“3-5马赫”等说法）都是错误的。（这里补充一点：马赫数是飞行器“真空速（True Air Speed）”除以当地音速得到的倍数，并不是真空速除以海平面音速得到的倍数。随着飞行高度的增加，当地音速会不断降低。海平面音速为340.3m/s，10km高度的音速为300m/s左右，仅为海平面音速的88%[1]）

其次，高超声速飞行器是一个涉及飞行器类型众多的名词。小A和小B两个飞行器可能都是高超声速飞行器，但它们的动力来源可能会不同（飞行器自身有动力/无动力；火箭推进/吸气式；单一动力/组合动力），它们的气动布局可能会不同（锥形体/升力体/翼身融合体/乘波体），它们的飞行方式可能会不同（动力巡航/机动再入/天地往返），等等等等。



高超声速飞行器分类方式[2]

目前存在着这样一种误区：



实际上，抛开“高超声速飞行器到底是不是一定要去打水漂”这个问题不谈，对于现实世界的空气动力学而言，任何物体，哪怕是一个中心对称的球体，都具备产生并非纯阻力的气动力（如升力、横/航向气动力等）的能力。

举个例子，只要满足“能够自我配平”的条件并得到了足够的空速，一个加藤惠手办也能在升力作用下像飞机一样离开跑道飞上天，一个绝对耐热的TENGA杯杯也有希望成为“高超声速机动弹头”。一艘“乌鸦”级战列舰也可以在大气层中翱翔。

前言说了这么多，笔者想表达的意思很简单：高超声速飞行器包括乘波体，但高超声速飞行器≠乘波体。乘波体只是高超声速飞行器大家族里小小的一份子。一个普通的圆锥弹头也可以成为“水漂弹”，也能打出多种多样的弹道，只不过它的升阻比没有乘波体高，它在获得同样多的升力时阻力比乘波体要大，速度损失比较快。

那么，为什么乘波体升阻比会比普通飞行器高？

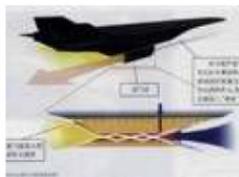
大家都知道这是因为它“骑在激波上”。可为什么乘波体能够骑在激波上，别人就不行？换句话说——到底要长成什么样，才能骑在激波上？才能被称为乘波体？

把上一段最后一句这个问题捋明白，就是本篇文章最主要的目的。

百度为您找到相关结果约200,000个

搜索工具

乘波体_百度百科



乘波体是一种适宜高超音速飞行的外形，其所有的前缘都具有附体激波。乘波体飞行时其前缘平面与激波的上表面重合，就像骑在激波的波面上，依靠激波的压力产生升力，所以叫乘波体...

引言 乘波体 种类 气动特性 应用研究

baike.baidu.com/

为您推荐: 乘波飞行器 中国35马赫导弹 热胀 乘波体高空飞行器 乘波体布局 歼20飞机多少马赫 升力体 乘波体高超音速飞行器是什么 超声速外形

东风-17乘波体【重兵器吧】_百度贴吧 block

3天前 - 东风-17乘波体..不能说取代吧,东风11和15这么大的存量,而且打周边小国,有谁能拦截的,包括台湾伪军的爱国者能拦截多少。东风17是对付美军的,其它国家,...

tieba.baidu.com/p/6281... - 百度快照

百度搜索乘波体，第二条结果就带有“东风17乘波体”字样

那么它到底是不是乘波体呢？看完全文你就应该对这种问题拥有了判断能力。

怎样“乘波”

一、避免高压气体流失

1.高压气体流失的机理

民航飞机为什么要有翼梢小翼？

——因为翼梢小翼可以减少诱导阻力。

诱导阻力从何而来？

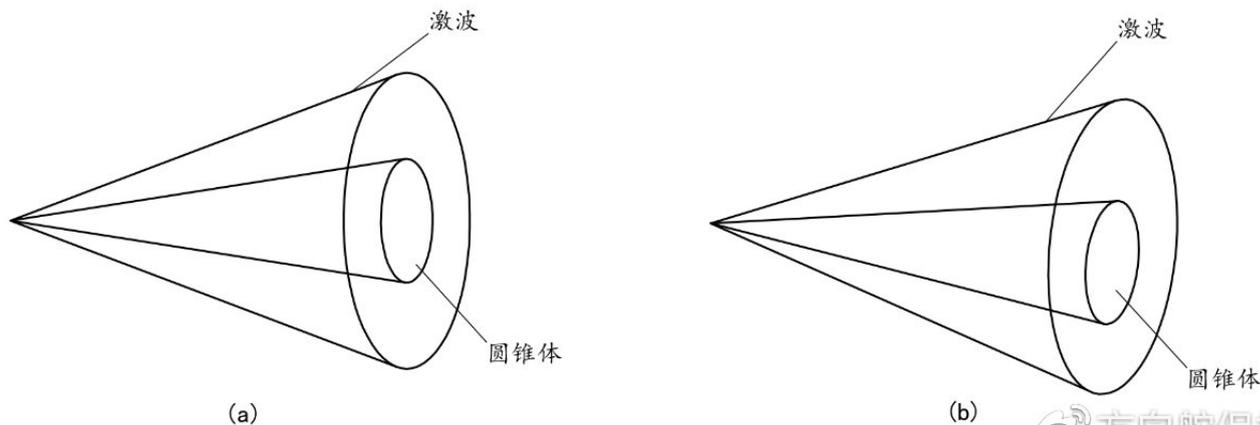
——机翼下表面的气体压强比机翼上表面的高，机翼下表面的高压气体有从机翼梢部横向绕行至机翼上表面的趋势，这种流动导致笔者为了避免篇幅过长在此处省略五百字

为什么要提诱导阻力？

——因为乘波体所解决的气动问题与低速飞机所面临的诱导阻力问题有着非常类似的地方。

如何解释二者的联系，笔者需要从一个典型的超音速流场说起。

将一个尖锐到一定程度的圆锥置于超音速流场中，从圆锥的尖锐顶点开始，一层同样是圆锥形状的激波会出现，将圆锥物体包裹在“自己的体内”。这是一个非常典型的流动现象。下图中左边的（a）是圆锥没有攻角的情况，图中右边的（b）是圆锥有攻角的情况。由于图片是手工绘制的，可能存在有些地方角度不对、不够精确的情况，请谅解。

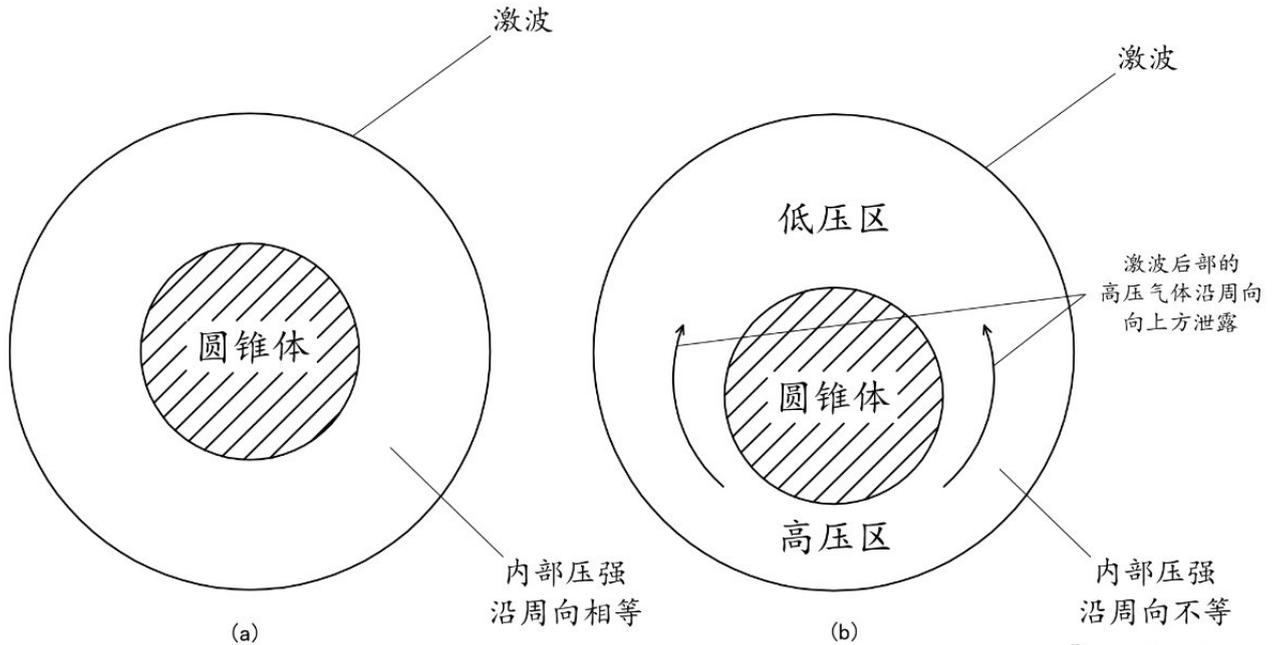


圆锥流场简易示意图

请先记住这一规律：超音速气流经过激波之后会减速增压。

由于（a）的圆锥没有攻角，它所产生的流场也是沿着圆锥体的轴线呈中心对称的。这种情况下圆锥只受到了阻力，没有升力。

由于（b）的圆锥有正攻角，它所产生的流场就不再是中心对称的了。此时圆锥下表面的气体压强较高，上表面的气体压强相对于下表面较低，上下存在压强差，故（b）圆锥存在升力。



圆锥流场后视方向剖面图

但是，同样也是因为圆锥上下表面气体存在压强差，圆锥下表面的高压气体会从圆锥的两侧向圆锥上方泄露，这就造成了高压气体的流失，导致飞行器升阻比降低。虽然部分细节原理不同，但是这种现象和低速飞机的翼尖涡是有一定的相似之处的。

2.避免高压气体流失的方法

如何避免高压气体流失？给圆锥弹头两侧加两片板子阻挡一下？这种设想早期也不是没有过[3]，但并不是目前的主流方案[来源请求]，篇幅所限这里不对此做详细介绍。

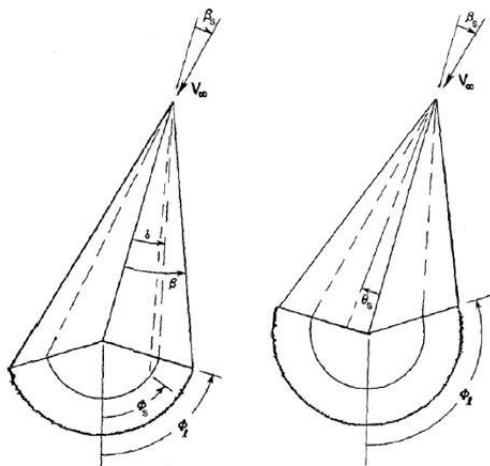


Fig. 8. Idealized cone-derived waverider [96].

为圆锥体增加两片鳍板阻挡高压气体流失以增加升力的乘波方案[3]

避免高压气体流失还有一种方法，那就是利用激波。激波有一个很重要的特征：**激波后的气流无法穿过同一道激波回到激波前**。也就是说，激波是天然的物理隔断，合理地利用激波就可以阻断高压气体的向上泄露路径。

附体激波和脱体激波是激波的两种形式，附体激波的起点与飞行器的表面接触，而脱体激波无论哪个点都不与飞行器表面接触。因此“附体激波+飞行器下表面”的组合能够形成一个绝佳的“羊圈”，把高压气体这群“羊”牢牢地围在飞行器下表面。所以在目前这个问题下，附体激波才是我们的朋友。

看一看之前的圆锥流场，除了最前面的尖点以外，激波没有任何一个部分和圆锥体有过接触，这两道“围墙”没有连接到一起，高压气体自然也就泄露了。但对于乘波体而言——

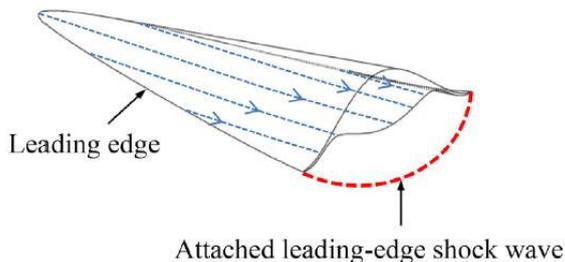


Fig. 1. Waverider configuration [2,3].

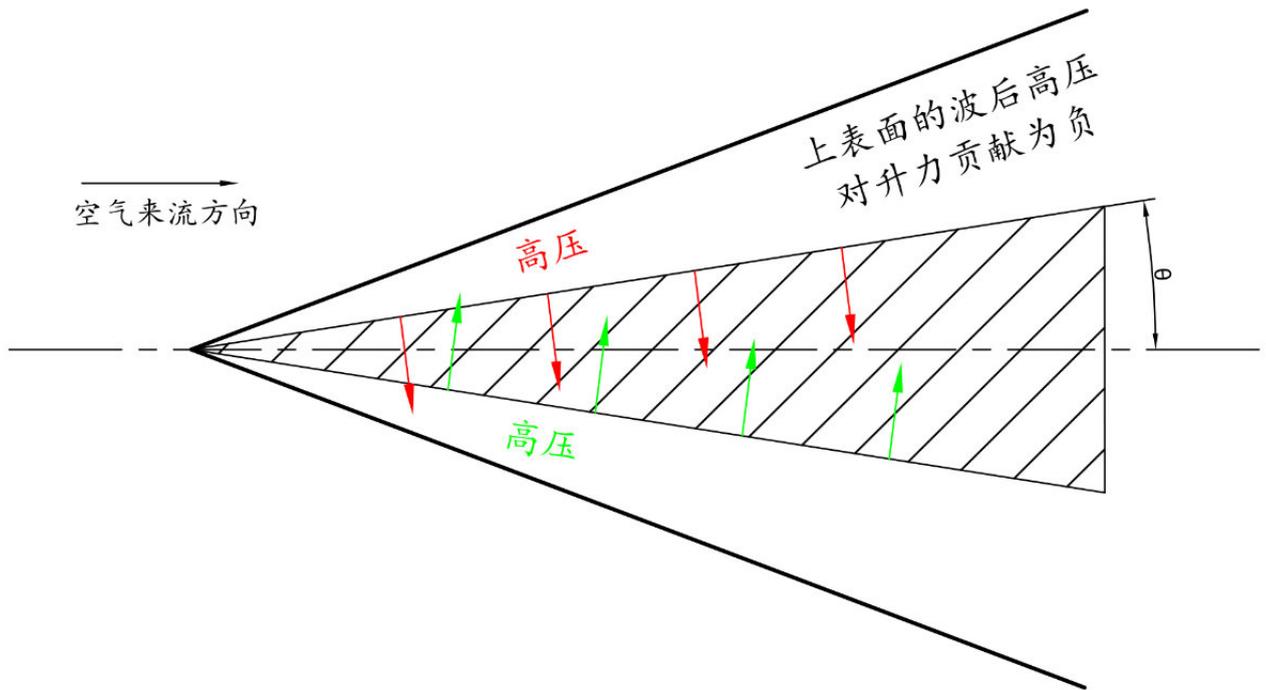
飞行器下表面与附体激波一同围堵高压气体[3]

如图所示，飞行器的前缘（Leading edge）始终是带有附体激波的，它的前缘非常尖锐并连成了一道线，以保证形成持续的附体激波（而不是圆锥激波那样只有一个点附体）。这就是乘波体两大重要设计原理之一：飞行器的前缘要始终有附体激波（也就是前缘和激波始终保持接触），保证激波面和飞行器下表面“相交”，形成一个封闭的空间，以此避免高压气体泄露。

二、“消除”上表面激波

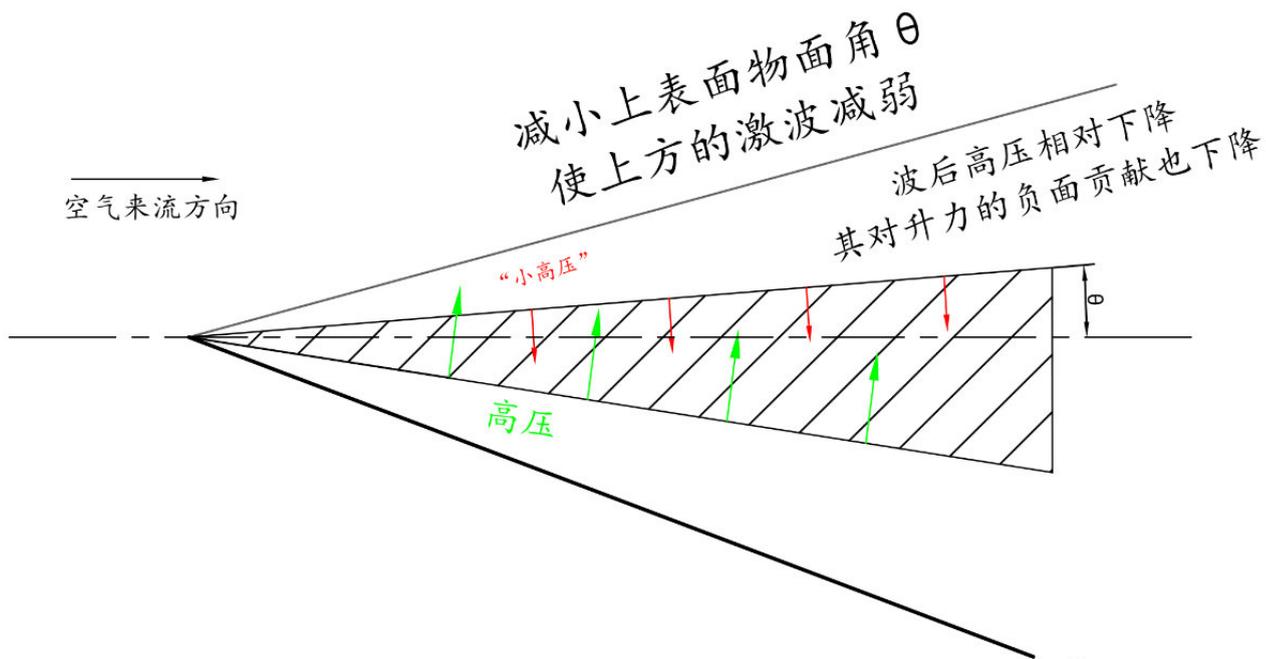
单单驾驭住下表面的激波。对于乘波体而言是不够的。由于超音速气流经过激波之后会减速增压，如果飞行器上表面也产生了具有一定强度的激波，那么上表面的压强就会偏大，设计人员通常希望上表面的压强偏小，这样上下表面才能产生足够大的压强差，才能产生足够的升力。

除此之外，上表面的激波不但对升力没有积极贡献，反而还徒增了飞行器的激波阻力，这进一步拉低了升阻比，降低了飞行器的飞行性能。



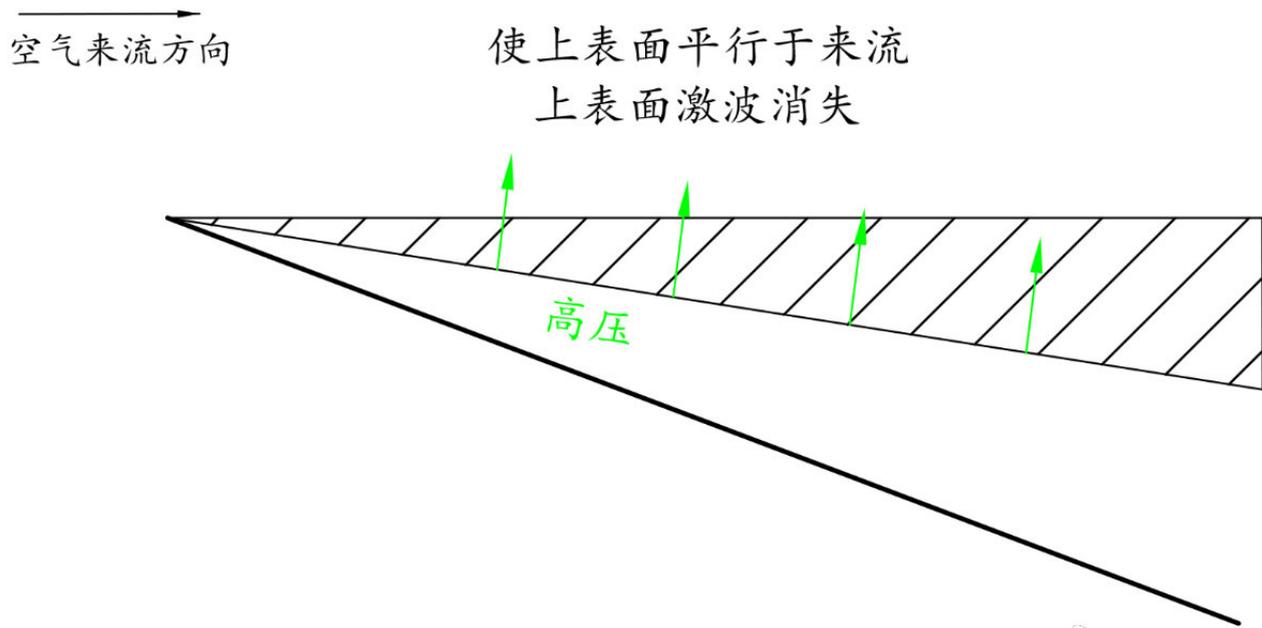
方向舵保护物

i. 一个普通的尖劈在超音速流场中



方向舵保护物

ii. 削去上半部分的一部分，物面角 θ 减小，激波减弱，上表面的波后压强降低



iii. 沿着自由流线削去整个上半部分，上表面激波消失（忽略粘性）

如最后一张图所示，使尖劈上表面平行于来流方向，那么经过上表面的气流就不会受到扰动（为了简单易懂本文忽略粘性作用），也就不会产生激波。这样一来飞行器上表面对升力的负面影响也就降到了最低。

我们现在拥有了两条法则：

第一条是让下表面的前缘始终有附着在物体表面的激波（附体激波）

第二条是消除上表面激波，使上表面气流不受扰动地流过上表面

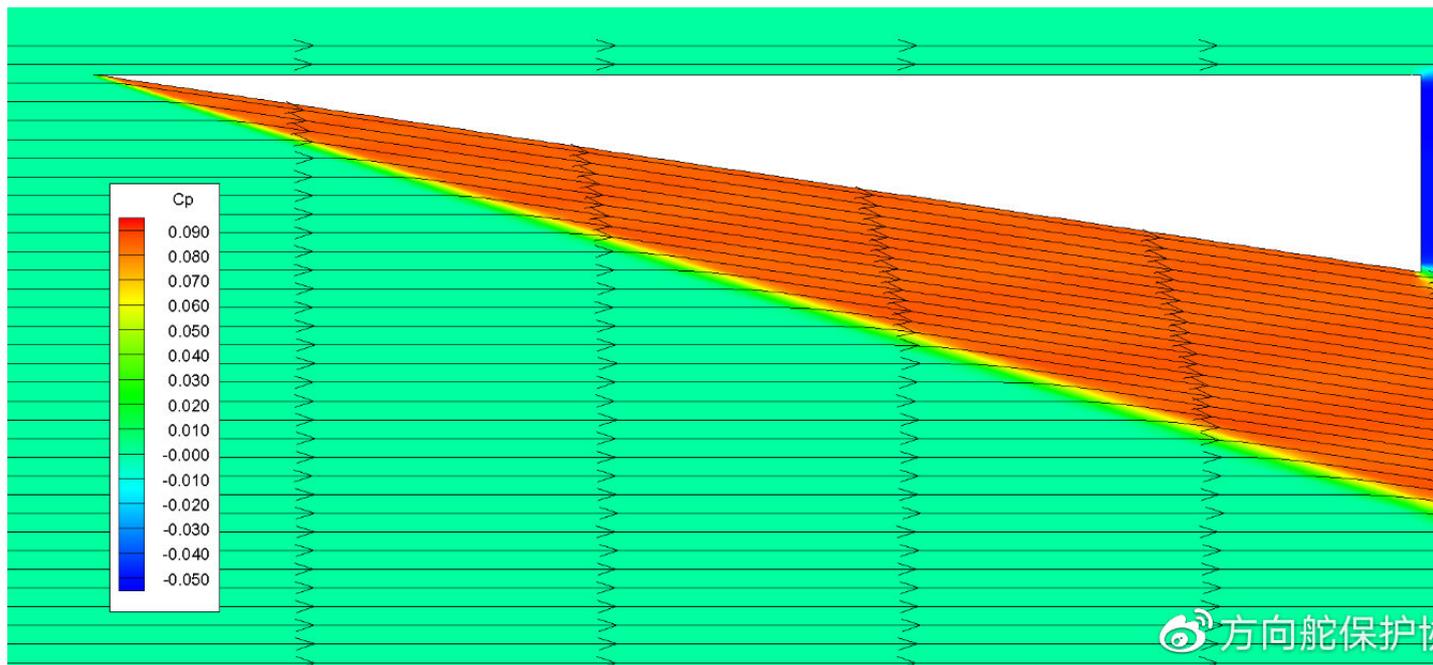
在这种最基本的约束下，我们可以画一个自己的乘波体了！

画一个简单了的乘波体

一、乘波体设计方法的独特之处

有别于传统的“先得到一个外形，再分析该外形在流动中生成的流场”的设计方法，乘波体的两条法则使得它成为了一种“先生成一个流场，再从流场中得到一个外形”的飞行器。设计师需要使用一个“基本体”（如斜楔、圆锥、内锥等多种物体）在高超音速气流中“打出”一个基本流场，这个基本体创造的流场如同施工用的脚手架。然后，在基本体打出来的流场中“抠出”一个乘波体外形。抠出乘波体外形以后我们拿掉基本体，拆掉这个“脚手架”，保持前方来流不变，让所抠出的乘波体仅凭自己在气流中迎风飞行，这时我们就能看到，这个“抠出来的外形”确实是一个“能乘波”的乘波体。

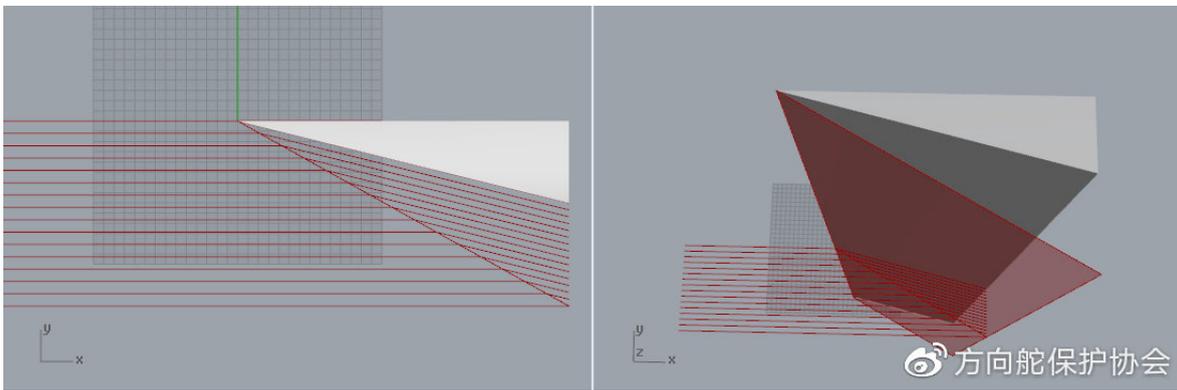
我们先举一个最基本的超音速流场为例，如下图所示。



尖劈/斜楔在超音速（Ma=5.0）气流中所形成的流场

因为是科普用，网格画的比较随意，激波抓得不够窄，但该图作为演示用是足够了。这是之前我们介绍过的一个尖劈/斜楔形成的流场，气流顺畅地流过上表面，而在下表面形成了一道激波。激波后的气流改变了流动方向，转而和尖劈下表面平行。在这个例子中，红色激波面以后的所有气流都是相互平行的。

我们使用这个斜楔作为我们的基本体，在超音速气流中“打出”一个基本流场。



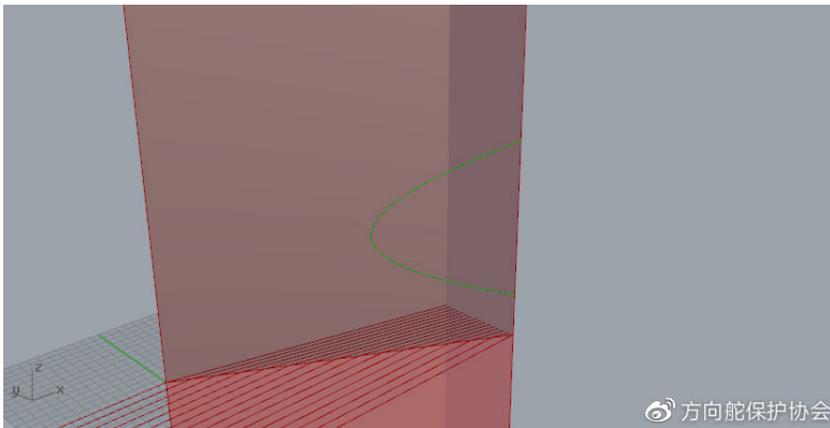
使用Rhino的Grasshopper进行图形演示，红色平面为激波面

图中的红线是流线，银白色的物体为基本体，红色的平面为基本体生成的激波面。

前文总结了两条规矩，其中的第一条规定乘波体的前缘一定要始终都有附体激波，也就是说前缘一定要和激波接触才行。而我们现在又拥有了一个激波面……

使用这个流场生成的乘波体，它的前缘曲线位于这个激波面上！

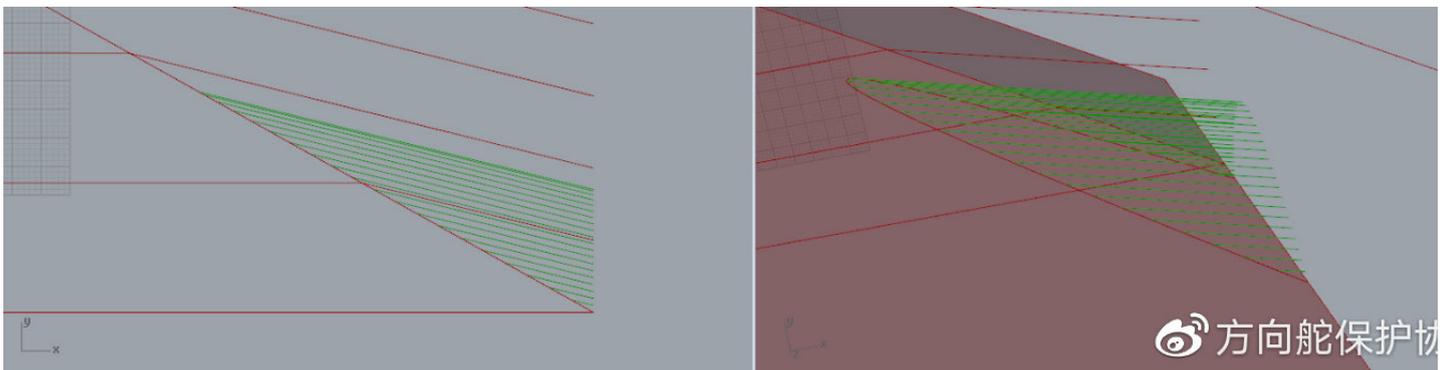
那么，根据我们对前缘曲线的需求（如飞行器后掠角，飞行器展长等等），我们可以在这个激波面上画一条前缘曲线，这个曲线是我随手画的一个二次抛物曲线。



绿色线条为前缘曲线

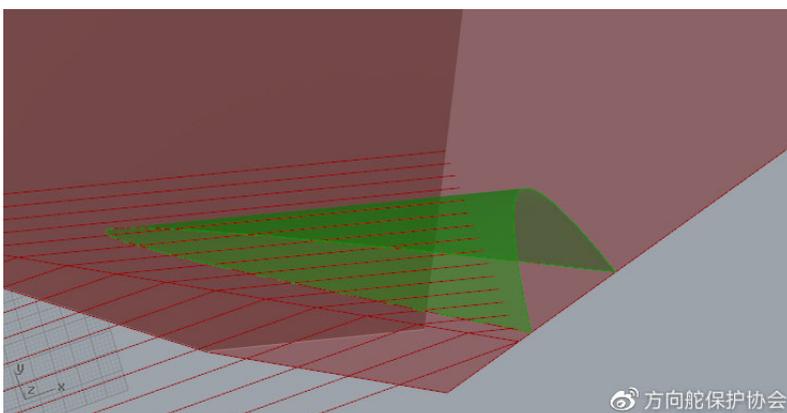
以绿色的前缘曲线为起点，追踪在这个激波流场中所有经过前缘曲线的波后流线，我们会得到一个曲面。

这个曲面有什么作用呢？这个曲面就可以成为乘波体的下表面。因为流场中的流线有一个很特别的性质，它好比马路中央的黄色实线，流体无论如何不得越过它。对于我们讨论的无粘流场来说，顺着一条流线的“纹路”掀掉流场的上半部分，并把该条流线改成踏踏实实的壁面，并不会影响到下半部分的流场。（用水泥填上黄实线左侧，并不会影响右侧车辆的行驶状态）。



绿色线条为以前缘曲线为出发点追踪得到的流线

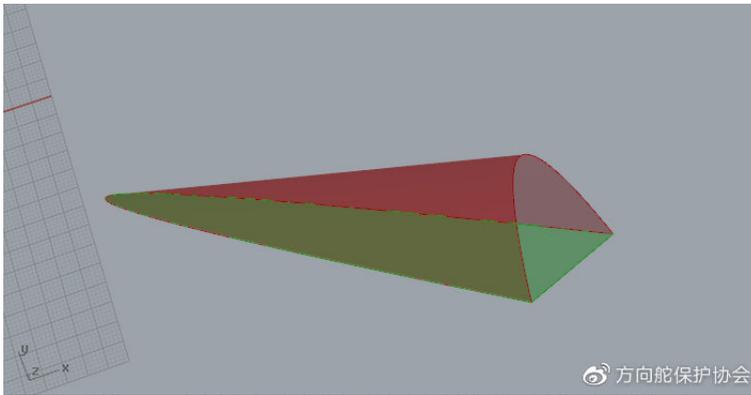
将所有追踪得到的流线连接成一个曲面，如下图所示



由无数条经过前缘曲线的流线形成的曲面

到了这里，有趣的地方出现了。

现在拿掉“脚手架”，去掉斜楔这个基本体，让这个曲面直接暴露在同等速度的超音速气流中。由于流线的“黄实线”性质，这个曲面在自己下方产生的激波，是和有基本体的时候完全等价的。（再说一遍：马路右侧的你怎么开车，和实线左侧有车还是没车无关我只是举例打比方请各位不要拿@交通事故video 惹我）

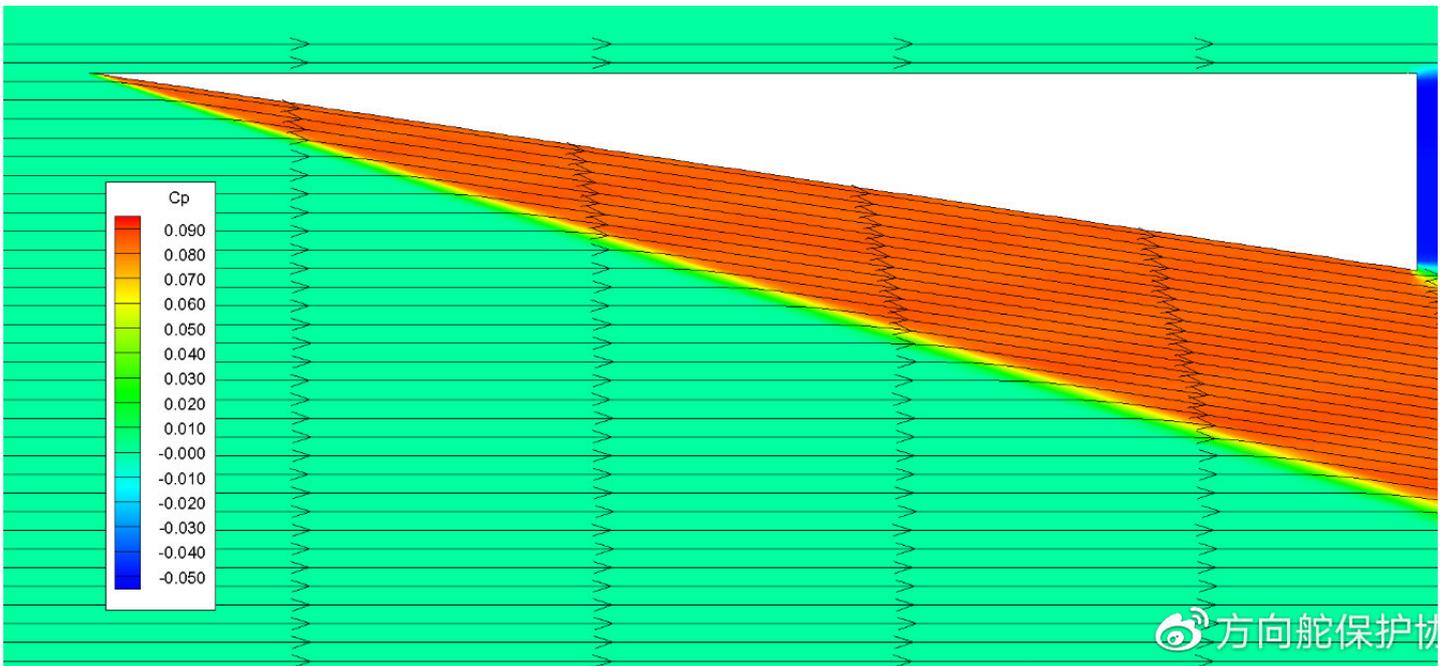


下表面在同样的 $Ma=5.0$ 来流中生成了绿色激波，这与之前斜楔流场对应的那部分激波一致

再次总结一下，在这里因为流线的真实线性质，追踪一条流线的轨迹并把它变成实心的壁面可以在它下面制造出和原来一样的流场。我们通过这个原理创造出了乘波体下表面。

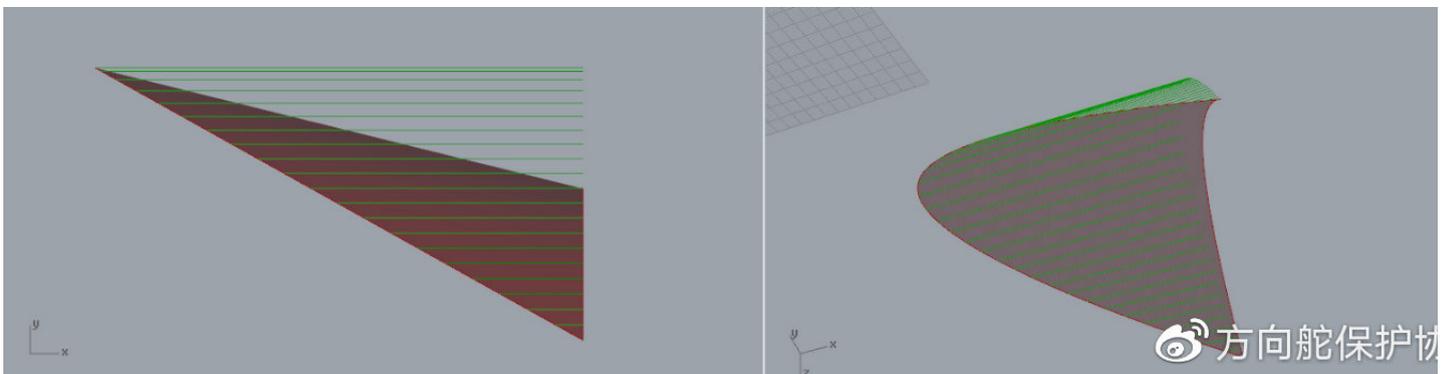
现在我们需要一个乘波体的上表面曲面。这时候需要用到第二条法则：消除上表面激波，使气流不受扰动地流过上表面。

这个其实很简单，使用同样的流线追踪手段，只不过和刚才不同（刚才追踪斜楔基本体产生的激波的后面的流场），这一次我们追踪的是没有斜楔基本体（也就是没有扰动）的自由流场。看一下之前提到的彩色云图，这个没有扰动的自由流场，它的流线一定是笔直的，因此我们通过追踪自由流线得到的上表面从前向后一定也是笔直的。

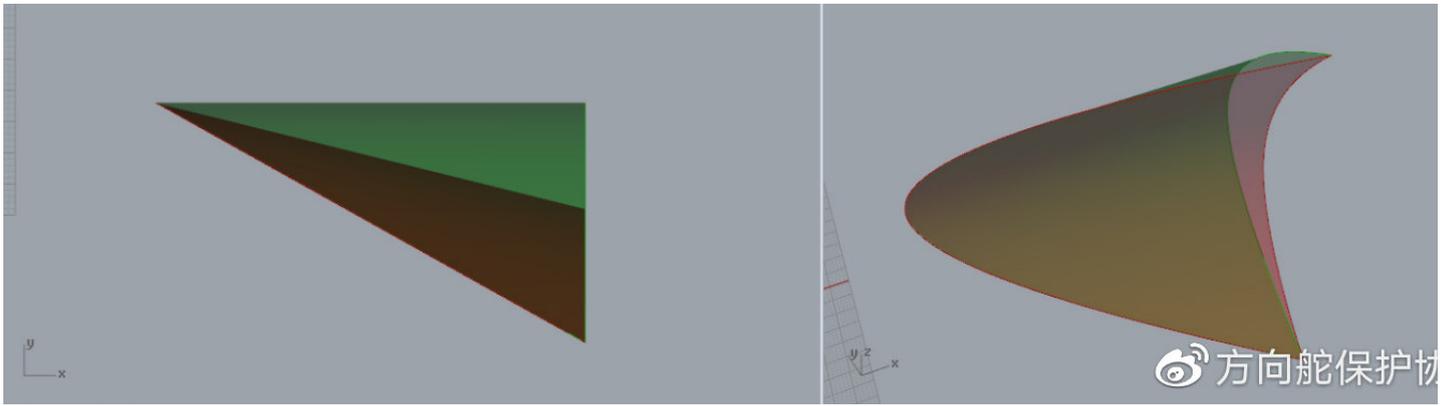


斜楔上边水平笔直的流线就是典型的自由流场中的流线

到了这就很简单了。

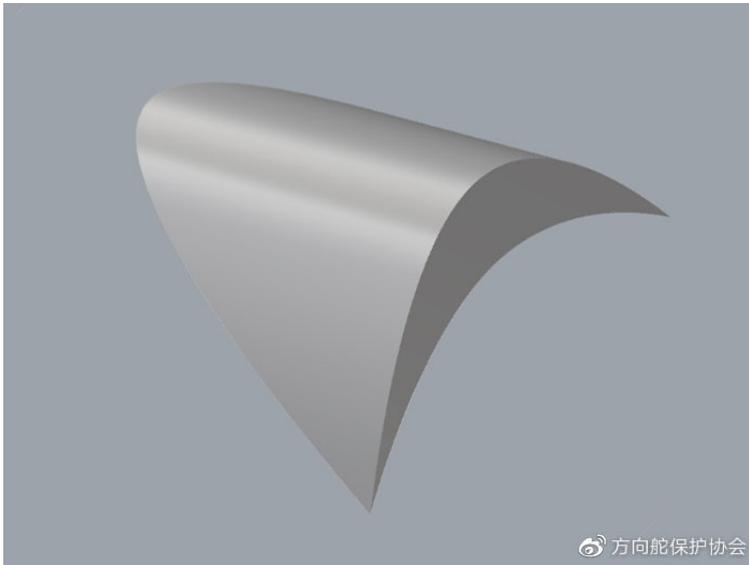


追踪自由流线得到绿色线条



绿色曲面为乘波体上表面

再把它月牙形底部封上口，于是.....



一个乘波体诞生了!

我们来看一看学术论文中的一些乘波体外形

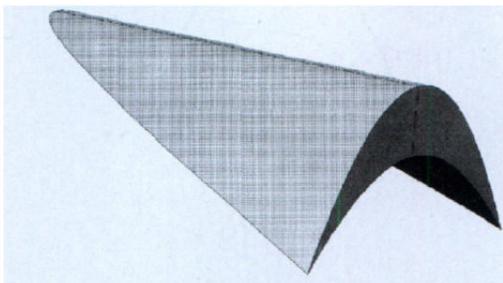
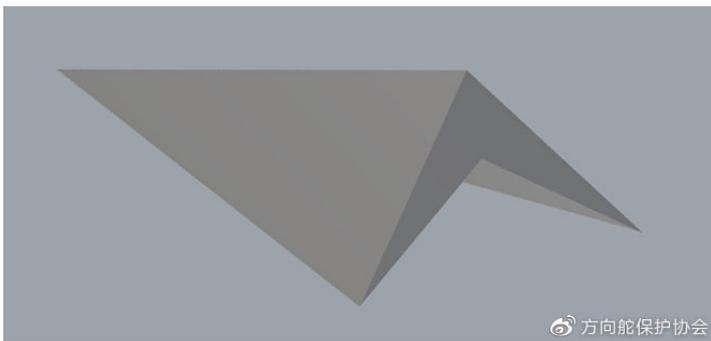


Fig. 13. 3D view of osculating inward turning cone (OIC) waverider [25].

论文使用的基本体不是我们使用的斜楔，但是这两个乘波体看起来是很像的[3]

如果看到这里依旧没有困惑的地方，那恭喜你，对于乘波体最基本的设计方法你已经掌握得差不多了。

还记得吗？我们的乘波体的前缘曲线是我随手画的二次抛物曲线。如果我们把前缘曲线改成直线会怎么样？



前缘为直线的情况下用同样的方法得到的外形

这就是这篇文章的封面[5]。

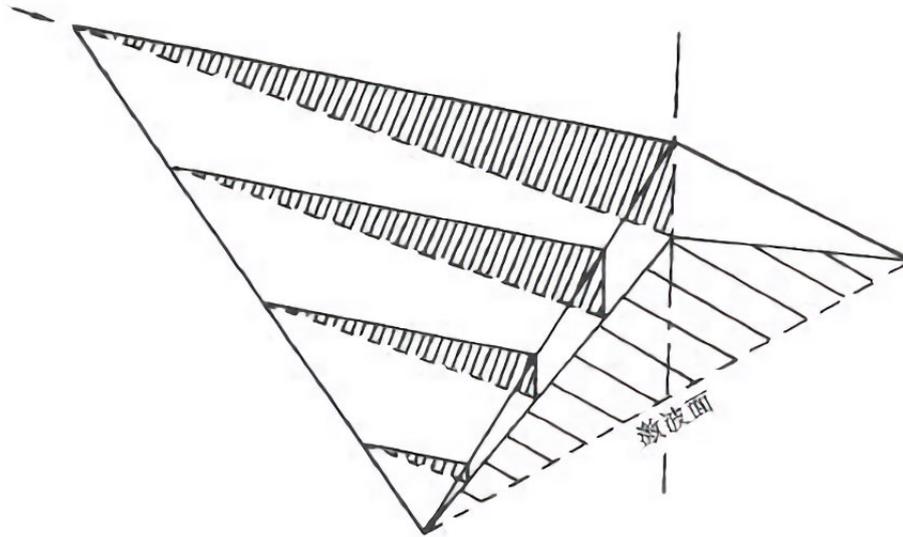


图 1 超音速流中的A翼及其横截面

这是一个非常古老的乘波体构型，它是1959年由诺威勒（Nonweiler）提出的，被业界称之“A”形乘波体。

写到这里，笔者也真的想长出一口气了。终于把最主要的也是基本的内容讲完了。

现在是轻松闲聊的阶段。

我们得到的这两个传统乘波体外形有什么缺点？

答案是：

1.飞行器下反角太大

下反角太大导致横向（滚转）稳定性不好。出于追求机动性的角度讲设计师当然希望飞行器能够稍微有一点不稳定，但它这个下反角带来的的横向不稳定性.....也太强了！



不稳定性过了啊，兄弟！

2.飞行器太扁了！

一个飞行器要想实用化，必须能够具备足够的容积以安装设备，可乘波体“上表面是自由流面，下表面追踪波后流线”的准则极大地限制了它的内部空间，这就导致提高容积率是乘波体设计的一个重要研究方向（即便在目前也依旧是）

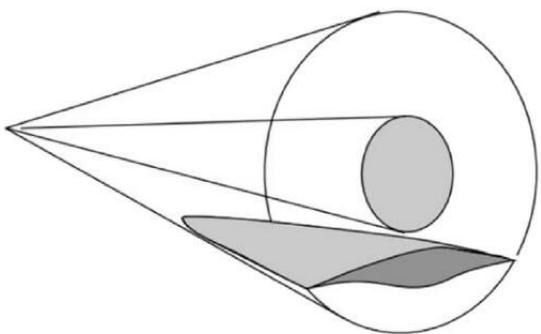
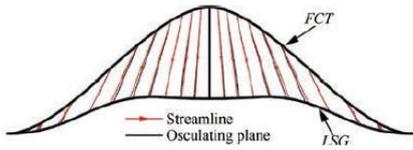


Fig. 9. General cone-derived waverider [95]. 方向能保护协会

使用圆锥激波流场生成的乘波体（灰色部分），该乘波体下反角较小[3]



(d) Front view of streamlines and osculating planes along the compression surface of the designed OCS wave-rider

Fig. 11 Flow-field information of Config A derived from theoretical and numerical method

一种增大容积率的乘波体方案截面图（但下反角似乎又大起来了？）[6]

合理地选择基本体+合理地布置前缘曲线+其它先进的新设计手段，才能让设计师们得到他们想要的能够实用化的乘波体。

笔者的梦想就是希望未来有一天能让各位在新闻里看到笔者（和笔者未来的同僚们）搞出来的新东西。

总而言之，乘波体外形的典型特点就是：**飞行器前缘尖锐且连续**；**飞行器上表面在气流流动方向上呈现出平直的特征**。

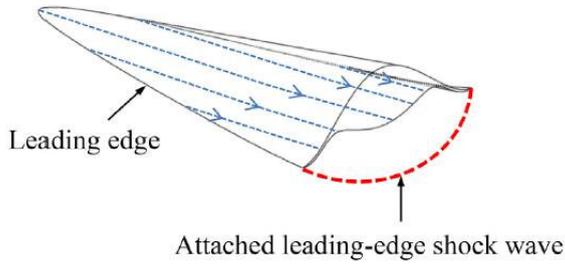


Fig. 1. Waverider configuration [2,3].

回顾一下这张图感受一下[3]

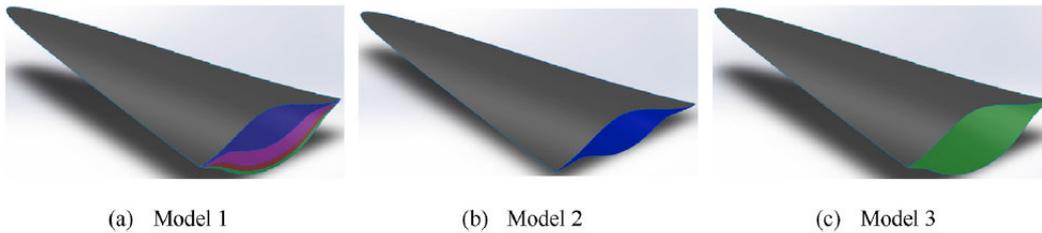


Fig. 4. Calculation models.

看一下这张图再感受一下[4]

也正如前文讨论缺点时提到的，乘波体容积率低的特点限制了它的实用化，所以目前的很多高超音速飞行器都在使用升力体设计。但它们也稍微借鉴了乘波体的基本原理（所以有些弹头会被称为“类乘波体”）。除了“尽可能兜住下表面激波”以外，许多升力体飞行器的外形都体现出了一种“我肚子太大了不能像乘波体一样苗条得能够消除上表面的激波，但是我要尽量减小我上表面产生的激波”的思想。比较典型的思路就是将弹头设计成三角形截面，还有一些方案会在此之上让弹头头部产生一定的下垂。这种弹头在带着正攻角飞行时，它的上表面特征会比传统弹头好一些（上表面激波相对变弱），下表面的物面角也会比传统弹小一些（减小下表面激波强度，以此减小高压在阻力方向的投影）。所以拜托大家不要像“看见鸭翼就嚷嚷抄袭XXX”那些人一样给东风17找爹啦！设计及使用需求才是决定外形最主要的因素。

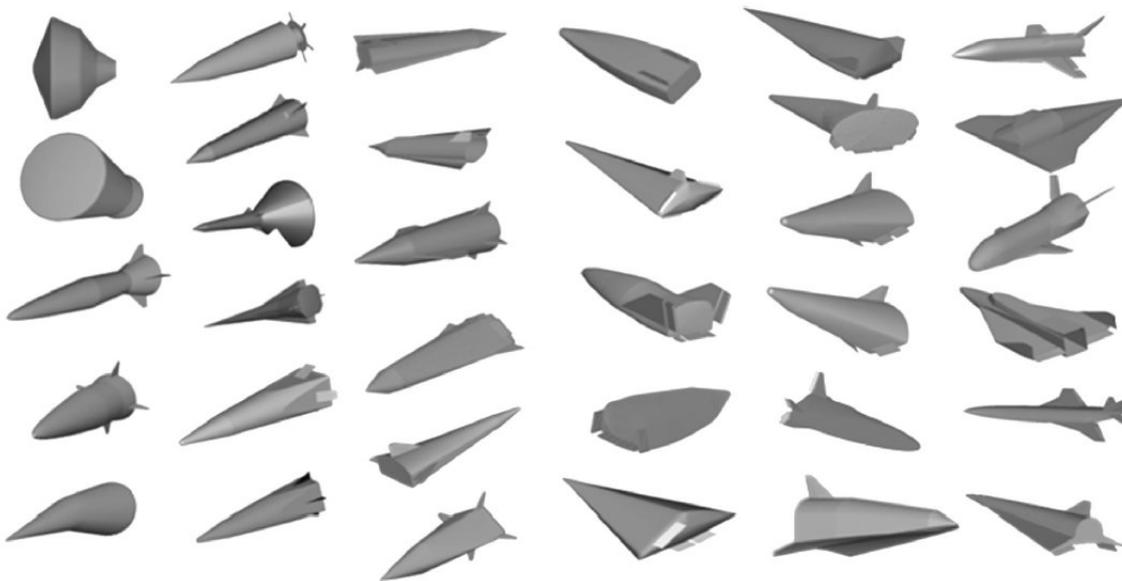


图 1 部分典型飞行器气动设计优化
Fig. 1 Some typical vehicle configurations

“三角形截面”与“下垂”是升力体常见的主要特征。图源：[7]

这篇文章一共写了整整四天，一开始笔者想出一期视频，奈何科研民工的技术、时间和精力真的有限（而且没人给我念稿子，我也不知道哪里去找视频素材），只能采取画几张图作讲解的方式出一篇文章。还有很多话想说，但现在自己真的太累了。向奋斗在一线的各专业领域原创科普工作者致敬，你们真的太不容易。这几天笔者自己的收获也很多，从头到尾做了一遍科普自己的理论知识得到了很大的强化，笔者在科普过程中也发现了很多自己以前习以为常没有注意到的问题。单凭这份收获，无论这篇文章有没有人看我都已经很满足了。

最后的最后，如果这篇文章解决了一些你的疑惑并能在未来的军迷道路中为你提供一些帮助和参考，那真的是笔者最愿意看到的事了。

参考文献：

[1]Atmosphere U S S. US standard atmosphere[M]. National Oceanic and Atmospheric Administration, 1976.

[2]王鹏飞,王光明,蒋坤,李庆辉.临近空间高超声速飞行器发展及关键技术研究[J].飞航导弹,2019(08):22-28+34.

[3]Ding F, Liu J, Shen C, et al. An overview of research on waverider design methodology[J]. Acta Astronautica, 2017, 140: 190-205.

[4]Liu Z, Liu J, Ding F, et al. Novel methodology for wide-ranged multistage morphing waverider based on conical theory[J]. Acta Astronautica, 2017, 140: 362-369.

[5]牛东兵. "乘波体" 气动外形设计综述[J]. 飞航导弹, 1998 (008): 5-8.

[6]卫锋,贺旭照,秦思,周正.密切弯曲激波乘波体技术的应用及有效性分析[J].推进技术,2018,39(02):277-285.

[7]唐伟,冯毅,杨肖峰,刘深深,肖光明,魏东,桂业伟.非惯性弹道飞行器气动布局设计实践[J].气体物理,2017,2(01):1-12.

打赏作者

PgoChan、RAT_芥人、hot_fb、...打赏了5次

- 
- 
- 
- 



方向舵保护协会

关注 285 粉丝 1624



简介: 飞行器设计与工程/KSP玩家/航空模型/看点日本动画片儿/学习画画中
[关注](#)