

钱学森讲座报告

为何建造长试验时间 激波风洞 JF-12 ?

俞 鸿 儒

中国科学院力学研究所
高温气体动力学国家重点实验室
2013.12.28 北京

从“钱学森讲座”说起

- 讲座讲什么？

“讲课”：传授公认的文化、科学知识；

“讲座”：交流尚未获得共识的新知识、新观点、新方法、新技术。

- 钱学森讲座要弘扬钱学森的观点、学风与方法。

钱学森论“科学精神”

“我们不能人云亦云，这不是科学精神。科学精神最重要的就是创新。”

“是不是真正的创新，就看是不是敢于研究别人没有研究过的科学前沿问题。而不是别人已经说过的东西我们知道，没有说过的东西，我们就不知道。”

摘自《钱学森的最后一次系统谈话》

问题的提出

- 超燃冲压发动机研究，已投入巨额资金和大量人力，历时也逾半个世纪，为何前景仍不明朗？
 1. 因为超燃冲压发动机研究已获得不少进展，许多人仍沿着已开辟的道路，再努一把力，夺取最后胜利；
 2. 我觉得是否先查明病因，再去攻其他难关效果更好？

如何探查病因？

人们从不全面的自然现象和生产经验中，得到一些原始的往往是不正确的概念。以后从积累的生产经验中发现有矛盾，又从人们有控制的有意安排的**实验**中，来分辨这些矛盾概念的正确与错误，从而得出改进了的概念。在进一步的**实验**中，又发现这种概念的不完备性和矛盾，再用人为的**实验**进一步验证和分析其真伪。

摘自《钱伟长：院士自述》

冲压发动机地面试验

- 仅靠污染气体试车台是不够的，需要创建洁净空气地面试验装置。
- 高超冲压发动机试车台实质上就是高超声速风洞。
- 冲压发动机试车台（复现）与常规加热高超声速风洞（模拟）要求的工作方式不同。
- 高超声速风洞性能最关键的参数是气源温度（焓值），因此关键是气源加热技术。

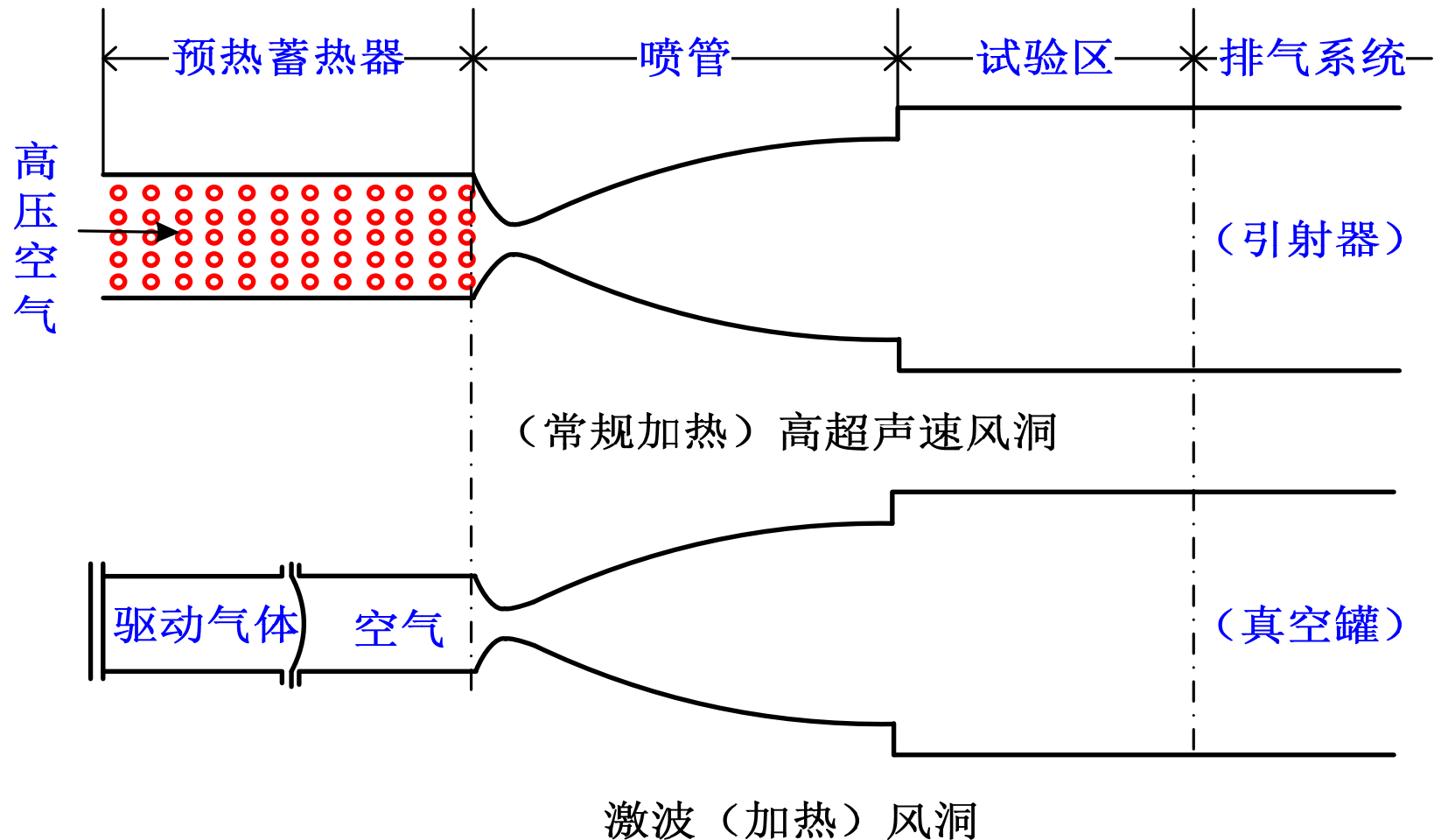
为何“气源加热”是要害？

- 高超声速风洞试验气流速度基本上决定于气源总温 T_0 ，马赫数 Ma 影响很小。

试验气流速度 V (m/s)

$T_0 \backslash Ma$	5	6	7	8	10
600K	1005	1037	1048	1060	1074
800K	1160	1190	1210	1224	1240
1000	1297	1338	1353	1368	1386

高超声速风洞分为常规加热和特种加热（激波、压缩、放电、电弧、感应加热）两类。



高超声速风洞 两种工作方式

1, 模拟: 模型外形几何相似和模拟参数 (Ma 、 Re 、 γ 、 Pr) 相同;

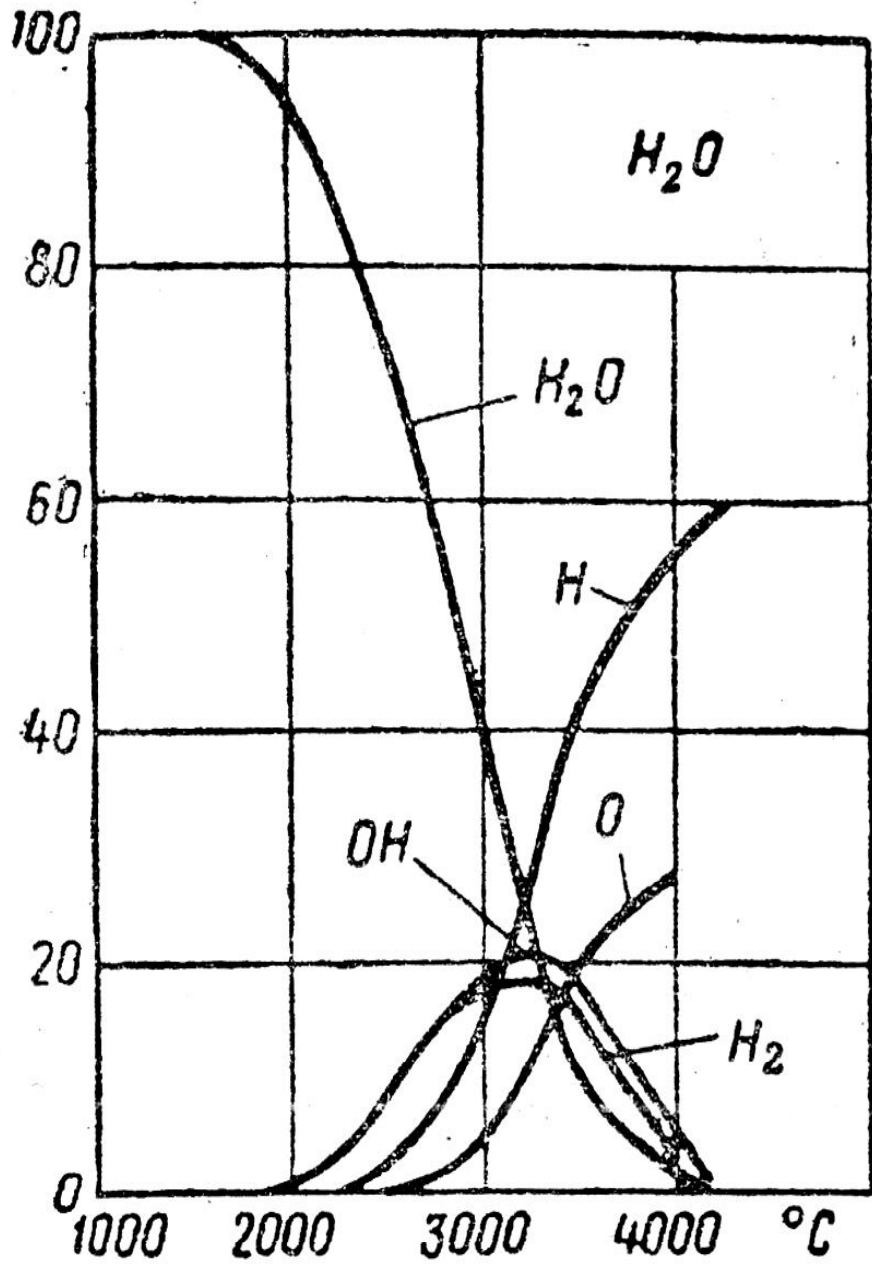
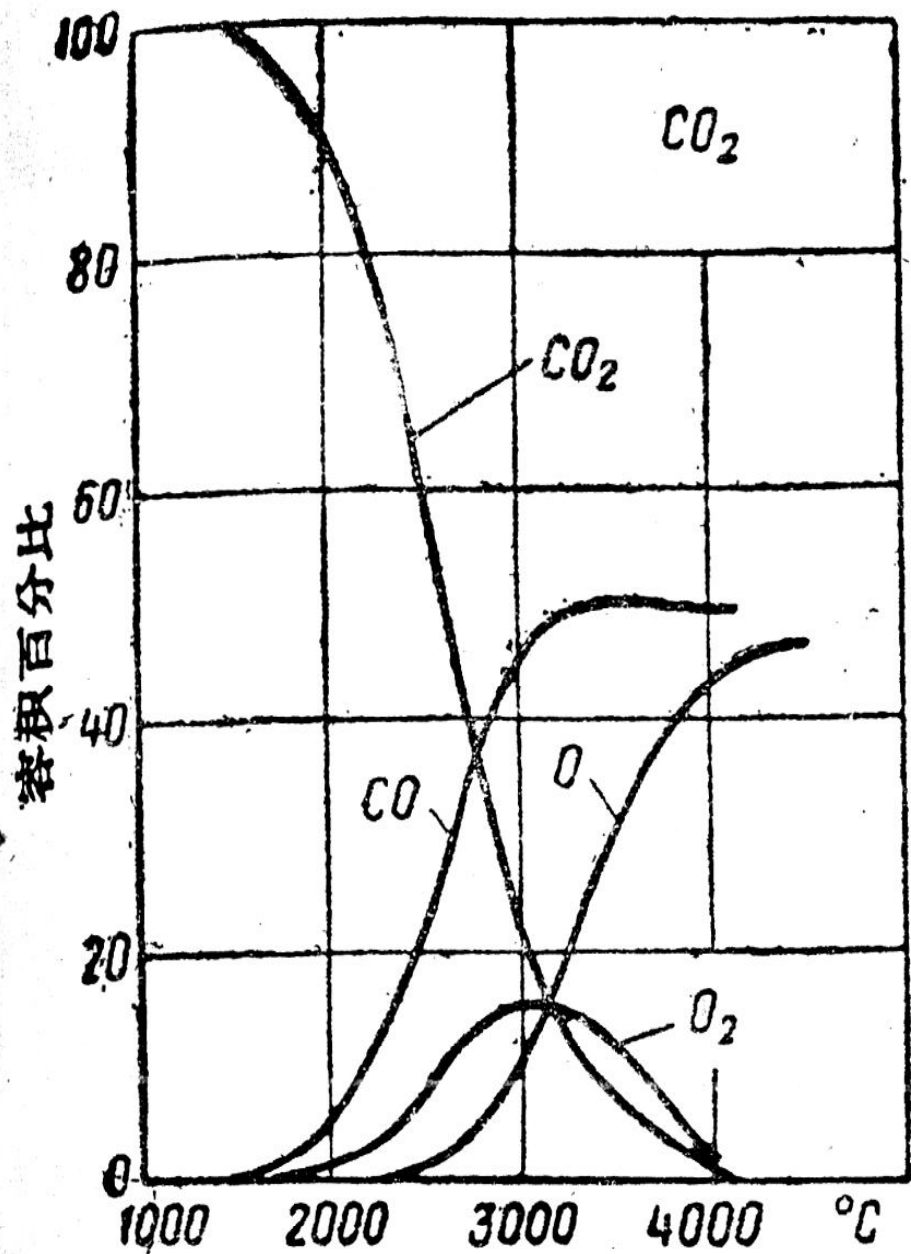
2, 复现: 模型几何外形相同和试验气流组分和状态参数 (V 、 p 、 ρ 、 T) 相同。

高超冲压发动机 地面试验的困难

- 吸气发动机试验要求复现飞行条件：
 - 1, 试验介质为空气；
 - 2, 复现飞行速度，总温高（ $Ma=7$, $T_0 \approx 2200K$, $Ma \approx 8$, $T_0 \approx 3000K$ ）；
 - 3, 过程复杂，需足够的时间；
 - 4, 模型全尺寸。
- 60年代初，力学所钱学森所长请吴仲华副所长开展超燃冲压发动机研究。吴认为缺乏地面实验方法，暂缓实行。

燃气补氧试验

- 美国人采用简单易行的办法，将燃气补氧后开展地面试验，气流总温达2200K（满足马赫7试验要求），这种方法被广泛仿效。
- 但试验介质中相当部分氮被水蒸气和二氧化碳替代。（大量水蒸气对试验气流造成污染，影响实验结果。当时对“干净的空气”模拟高马赫数提出了各种方法，但都有缺陷。）（X-15的飞行说明，地面试验设施的不足也是其中影响因素。） 摘自《通向马赫数10之路：X-43A飞行研究计划的经验教训》



水蒸汽 H₂O 和二氧化碳 CO₂ 的离解与温度的关系

如何提高地面试验可靠性？

美国有人静悄悄地从两方面去努力：

1. 提高常规加热风洞气源温度：NASA Glenn中心采用新加热方法，用石墨加热器将氮加热至2800K，然后混入常温氧气，产生2200K高温空气。
($Ma=5、6、7$ ；喷管出口直径1.07m)；
2. 延长激波风洞试验时间：LENS II 激波风洞
($Ma=7, t=30ms$)。

我们该怎么办？

钱学森谈“选题”

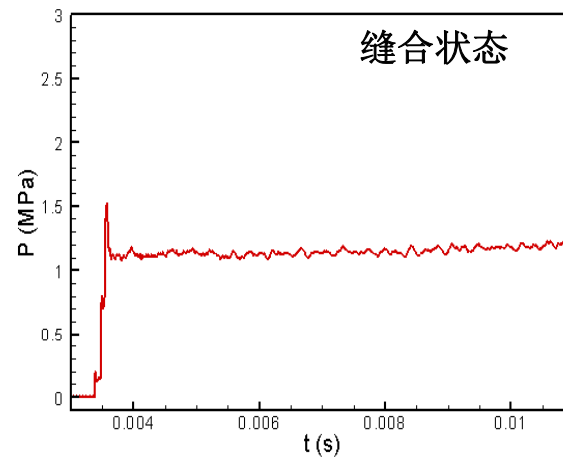
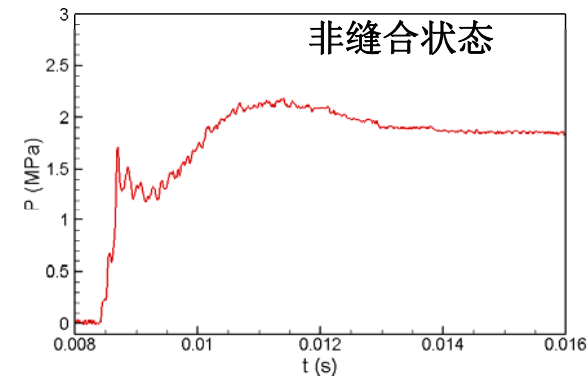
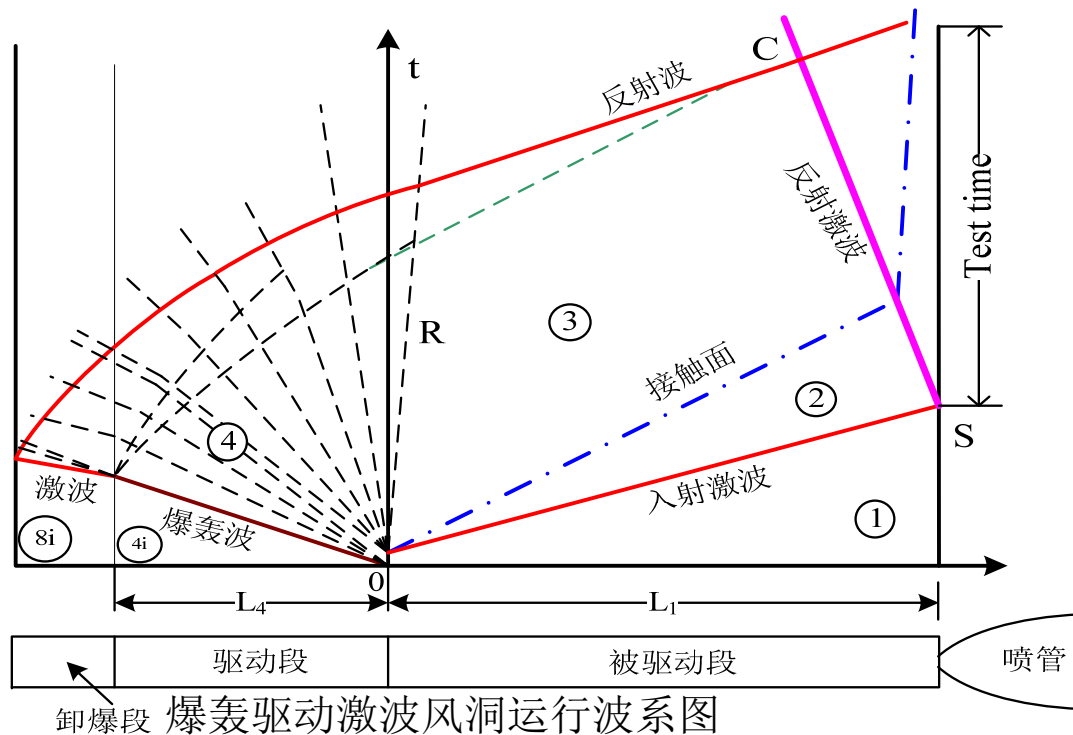
- 不要读论文找问题，而要从实际需要出发。
- 要依据自己的优势条件，选做经过刻苦努力，估计能够完成的工作。
- 要么不干，干就干到底，切不可半途而废。

技术上的难度

- 普通激波风洞试验时间短于10ms；自由活塞驱动高焓激波风洞只有1-2ms；用于冲压发动机试验，至少需要60-80ms。
- 激波管能力很强，（Columbia 电磁激波管能将试验气体加热到 2×10^7 K），但试验时间极短。
- 激波管试验时间短是其本性。《江山易改，本性难移》，要数量级延长激波管试验时间，绝非易事。

如何延长试验时间？

1. 激波风洞试验时间随试验气体温升倍数增加而急剧缩短，幸好超燃冲压发动机试验气体总温不太高。
2. 试验时间与激波管长度成正比。
3. 分界面不缝合，试验时间将极度缩短。



非缝合与缝合状态下
驻室压力曲线比较

激波风洞试验时间的关键因素

- ◆ 分界面需缝合运行，即匹配驱动与实验气体声阻抗，使反射激波通过两者间界面时不产生反射。

Calspan工作的启发

- 按马赫数 分为:

LENS I $Ma=7\sim 14$

LENS II $Ma=3\sim 7$ ($Ma=7, t=30ms$)

- 为何LENS II 试验时间不再延长?

1. 为防激波过度衰减, 激波管 L/d 保持不变。因而驱动气体耗用量随管长 (试验时间) 三次方增加。
2. 复现马赫7, 入射激波马赫数 $Ms\approx 4.4$, 驱动气体采用常温高压氢 (渗少量氮), 能使分界面缝合。用氢太多, 危险!

解决问题的新途径

- 发挥我们的优势，采用爆轰驱动，可大大节省驱动气体耗用量。
- 爆轰为强驱动，缝合激波马赫数高。
- 能否减弱爆轰驱动的程度是成功与否的关键。探求到有效措施：
 - 1，小直径驱动段配大直径被驱动段；
 - 2，更换爆轰介质。

思想上的障碍

这个问题如此复杂困难，发达国家都未解决，你敢干吗！

此外别人会支持你干吗？

王寿云等六同志

元旦刚过，我就给诸位写这封信，这是因为我读了“中国科学报”去年12月26日4版上几篇纪念毛泽东主席诞辰101周年的“毛泽东与科学”研讨会文章，心情久久不能平静。

回想在60年代，我国科学技术人员是按毛主席教导办的。

- 1，我国理论物理学家提出“层子”理论，它先于国际上的“夸克”理论。
- 2，我国率先人工合成胰岛素。
- 3，我国成功实现氢弹引爆的独特技术。
- 4，我国成功解决了大推力液体火箭燃料氧化剂燃烧稳定问题。
- 5，其它。

但是今天呢？我国科学技术人员有重要创新吗？诸位比我知道得多。我认为**我们太迷信洋人，胆子太小了！**

我们这个小集体，如果不创新，**我们将成为无能之辈！我们要敢干！**

钱学森 1995.1.2

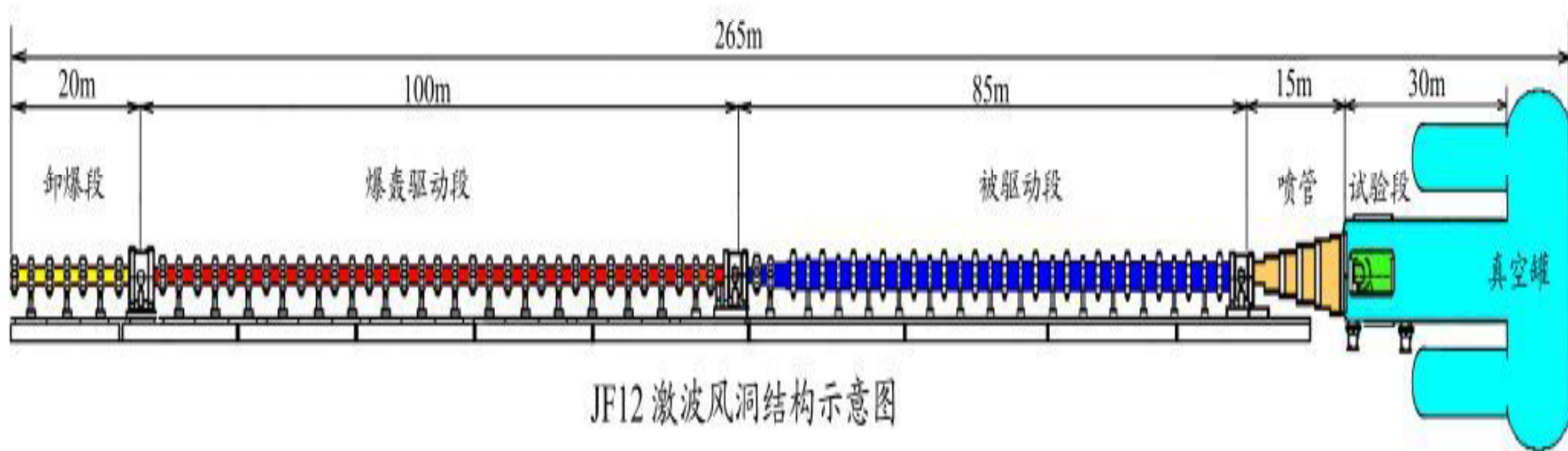
摘自糜振玉编：钱学森现代军事科学思想176-177页 科学出版社

物质条件方面的困难

- 近年国家重视科研，经费投入大量增加。但发达国家未实现的大装置，申请立项困难重重。幸遇财政部支持重大科研装备的自主创新，并以中科院为试点。JF-12被遴选为首批试点项目，解决了经费问题。
- JF=12长度近300m，路甬详院长亲自请北京市解决了实验室场地。



JF12激波风洞全景照片



■ JF12性能指标

- 复现马赫数5~9飞行条件
(总温1500-3500K)
- **试验时间: >100ms**
- 试验气体为纯净空气
- 喷管出口直径:2.5m



JF-12 的特长是什么？

1. 相对于现有激波风洞，试验时间数量级延长
2. 相对于常规加热高超声速风洞，能复现飞行速度
3. 试验区尺寸比较大

适于JF-12开展的工作

1. 污染气体试验影响；探求高超冲压发动机进展艰难的根本原因。
2. 提高激波风洞气动力数据质量；振动激发对飞行器气动特性有无影响？
3. 结构复杂的大模型试验,如飞行器/冲压发动机一体化性能试验。

国际同行反应

1. 国际激波研究院理事长，Shock Waves杂志主编高山和喜来信：“这个设备是国际唯一的。更重要的是应用了最独特的爆轰驱动技术。”
2. 名古屋大学航空系主任Sasoh教授在日本航空宇航会刊发表文章：“JF12的最大特点是试验时间飞跃性增长。”
3. 国际激波会议ISSW29（7月14-19，2013）特邀作大会报告“长试验时间爆轰驱动激波风洞的成功研制”

其它国外反应

1. 许多外国人来实验室参观（美国、俄罗斯、欧盟、日本、印度等）。
2. 联合国教科文组织网站介绍了“复现飞行条件激波风洞” JF-12的研究进展”
3. AIAA SciTech 2014（1月13~17，2014）特邀报告“长时间爆轰驱动激波风洞的实验与发展历程”
4. 美国国防部2013年度国会报告：“JF12及中科院支持的类似装置将支撑中国民用与军用部门在空天领域的研究与发展”

还要继续努力!

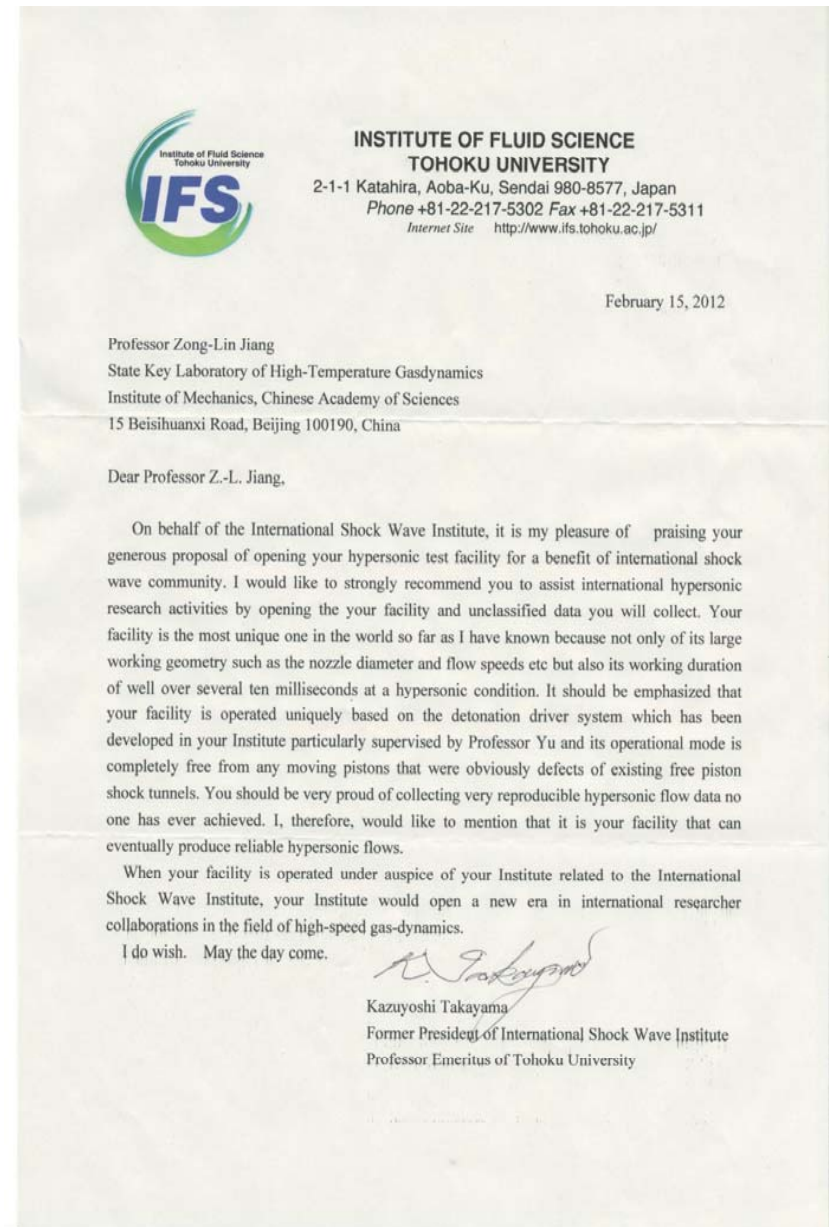
- JF=12建成获得一个热闹的好开头。
- 随着时间消逝, JF=12能否留下历史痕迹,将由今后获得的结果决定。

谢 谢

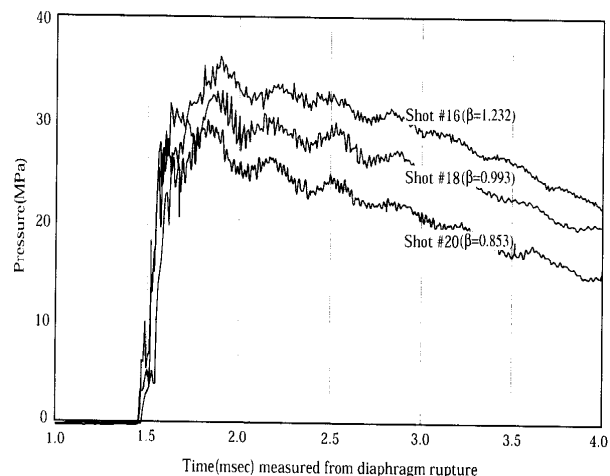
K.Takayama来信

Takayama教授：国际激波研究院
理事长，国际学术期刊《Shock
Waves》主编。

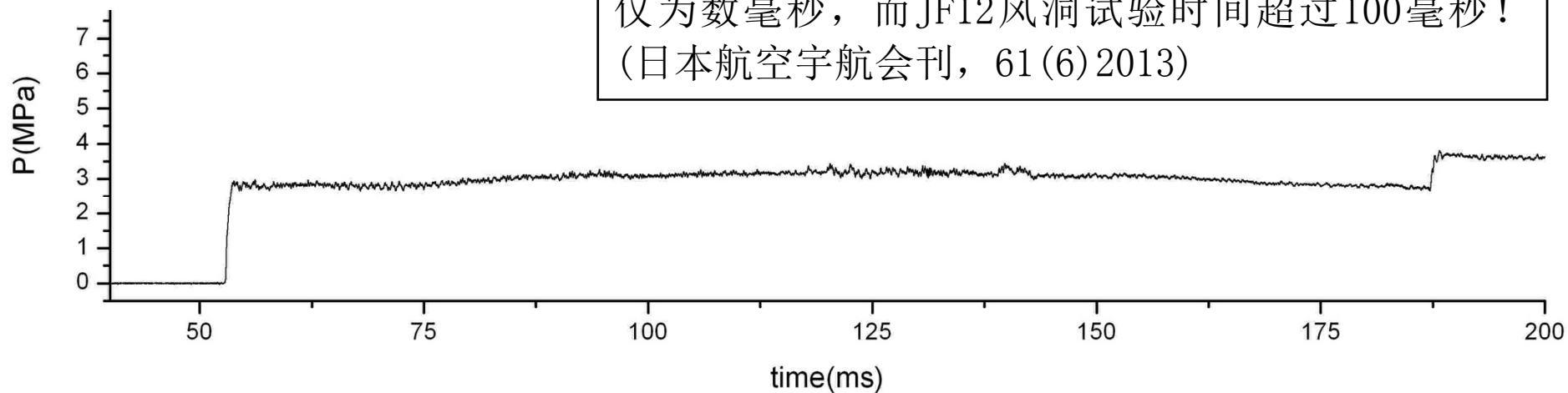
据我所知，这个设备是国际唯一的：不仅
在于它产生的流场区域大，气流速度高，
试验时间长，更重要的是应用了最独特的
爆轰驱动技术，这种技术克服了自由活塞
驱动技术的弱点…，你们将为获得的可靠
的高超声速试验数据感到骄傲。…



■ HEIST是世界上尺度最大，最先进的自由活塞驱动激波风洞



HEIST驻室压力曲线: 2ms



JF12驻室压力曲线: 130ms

本装置の最大の特徴は、試験時間が飛躍的に長いことである。通常、自由ピストン駆動の衝撃波風洞では、全長100 m 近い装置であっても、試験時間は数 ms 程度である。しかし、第4図(a)に示すように、キャリブレーション実験において100 ms を超える試験時間が達成された(最高200 ms まで達成済とのこと)。第4図(b)に示すよ

Sasoh教授（風洞专家）：**JF12的最大特点是试验时间飞跃性增长**。自由活塞风洞(100米长)的试验时间仅为数毫秒，而JF12风洞试验时间超过100毫秒！（日本航空宇航会刊，61(6)2013）

美国国防部2013国会年度报告



JF12及中科院支持的类似装置将支撑中国民用与军用部门在空天领域的研究与发展

The China Academy of Sciences (CAS) also plays a key role in facilitating research that supports advancements in military modernization. The CAS Institute of Mechanics is one example, with a mission focus on scientific innovation and high tech integration in aerospace technology, environmental engineering, and energy resources. Specific areas of emphasis include nano-scale and micro-scale mechanics, high temperature gas and supersonic flight technologies, and advanced manufacturing. In May 2012, the Institute announced successful acceptance testing of its new super-large JF12 hypersonic wind tunnel (reportedly the largest in the world), capable of replicating flying conditions at mach 5 to 9. This project was one of eight detailed in China's National Mid-and-Long-Term Scientific and Technological Development Outline Plan (2006-2020). This facility and others like it sponsored by CAS will support research and development efforts in China's civilian and military aerospace sector.