

高超声速技术译丛

Advanced Hypersonic Test Facilities

先进高超声速试验设备

(美) 弗兰克·K. 陆 (Frank K. Lu) 著
丹·E. 马伦 (Dan E. Marren) 著
柳 森 黄训铭 等 译



航空工业出版社

高超声速技术译丛

先进高超声速试验设备

(美) 弗兰克·K. 陆 (Frank K. Lu) 著
丹·E. 马伦 (Dan E. Marren)

柳 森 黄训铭 等 译



航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书系统地总结了 20 世纪最后 10 年里世界先进高超声速地面试验设备的发展情况, 涉及到高超声速试验设备的所有类型, 包括采用不同加热方式 (蓄热、电加热/燃烧加热、电弧加热等) 的下吹式暂冲型高超声速风洞, 燃烧加热类高超声速风洞, 激波风洞和高焓膨胀管风洞, 电弧加热器和电弧风洞, 超高速弹道靶和火箭橇。书中还介绍了几种高超声速风洞的新概念。

读者可以系统地了解高超声速试验设备的基本原理、主要类型与功能、系统组成, 以及主要研究内容等, 并对国际上的高超声速试验设备总体情况有所把握。

本书既可作为航空航天高超声速技术领域工程人员的指导用书, 也可作为相关专业人员及高等院校师生的学习参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

先进高超声速试验设备 / (美) 陆 (Lu, F. K.),
(美) 马伦 (Marren, D. E.) 著; 柳森等译. -- 北京:
航空工业出版社, 2015. 12

(高超声速技术译丛)

书名原文: Advanced Hypersonic Test Facilities

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0955 - 5

I. ①先… II. ①陆… ②马… ③柳… III. ①高超音
速飞行器—试验设备—研究 IV. ①V47 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 301841 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01 - 2015 - 8078

Translated from the English language edition: *Advanced Hypersonic Test Facilities*, by Frank K. Lu and Dan Marren. Originally published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. ISBN 978 - 1 - 56347 - 541 - 2. Copyright © 2002 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. All rights reserved.

先进高超声速试验设备

Xianjin Gaochao Shengsu Shiyān Shebei

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936597 010 - 84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2015 年 12 月第 1 版

2015 年 12 月第 1 次印刷

开本: 710 × 1000 1/16 印张: 36.25 彩插: 24 字数: 740 千字

印数: 1—2000

定价: 200.00 元

《高超声速技术译丛》编委会

顾问：(按姓氏笔画排序)

王礼恒	史新兴	包为民	乐嘉陵
冯志高	刘永才	杜善义	杨卫
李椿萱	张立同	俞鸿儒	陶文铨
黄伯云	黄瑞松		

主任委员：郑耀

副主任委员：符松 孟华

委员：(按姓氏笔画排序)

王振国	方文军	刘洪	刘卫东
关成启	杨超	李仲平	李存标
李建林	李跃明	何国强	沈清
张天序	张香文	张蒙正	张新宇
陈振乾	林均品	周毅	宗群
桂业伟	高正红	高效伟	韩杰才
程克明	樊菁		

《先进高超声速试验设备》翻译委员会

主 编：柳 森

副 主 编：黄训铭

译编领导小组：

组 长：柳 森

成 员：（按姓名汉语拼音排序）

陈德江 黄 洁 黄训铭 孔荣宗

李向东 石义雷 许 伟 朱 涛

专 家 审 校

总 审：柳 森

校：

第 1 章：柳森、王宗浩译，陈鸿、柯发伟审校，柳森终审

第 2 章：陈鸿译，柳森、王宗浩、柯发伟审校，柳森终审

第 3 章：常雨译，罗义成、龚红明审校，柳森终审

第 4 章：李理、廖振洋译，罗义成、常雨审校，柳森终审

第 5 章：常雨、廖振洋译，罗义成、李理审校，柳森终审

第 6 章：张扣立译，罗义成、陈苏宇审校，常雨终审

第 7 章：孔荣宗译，罗义成、郭晓伟审校，常雨终审

第 8 章：龚红明译，罗义成、田润雨审校，常雨终审

第 9 章：段金鑫译，罗义成、庄宇审校，柳森终审

第 10 章：王辉译，陈德江审校，柳森终审

第 11 章：吉洪亮译，陈德江审校，柳森终审

第 12 章：白菡尘、卢传喜译，毛雄兵、李向东审校，柳森终审

第 13 章：杨娟译，钟萍审校，柳森终审

第 14 章：曾慧译，庄开莲审校，柳森终审

第 15 章：陈久芬、朱涛译，战培国审校，柳森终审

第 16 章：胡振震译，杨彦广、陈爱国审校，柳森终审

第 17 章：陈久芬、朱涛译，战培国审校，柳森终审

第 18 章：曾慧译，钟萍审校，柳森终审

第 19 章：柯发伟译，柳森、陈鸿、王宗浩审校，柳森终审

第 20 章：王宗浩译，柳森、陈鸿、柯发伟、李毅审校，柳森终审

第 21 章：罗月培译，苏冯念审校，柳森终审

第 22 章：黄训铭译，苏冯念审校，柳森终审

《高超声速技术译丛》序言

飞得更快、更高、更远，是人类永恒的追求。通常人们把大气层中飞行速度达到5倍声速以上的飞行称为高超声速飞行。相关的高超声速流动的理论研究始于20世纪40年代后期，我国的著名科学家钱学森先生和郭永怀先生都是高超声速概念的最早倡导者。

早在20世纪60年代，在突破3倍声速之前，人类就已经开始研究高超声速技术。美国开展的X-43A、X-51A、X-37B和HTV-2（Hypersonic Technology Vehicle 2）“猎鹰”等飞行器的飞行试验在高超声速领域占据了领先地位，并积累了宝贵的技术和经验。受其鼓舞，更是由于其潜在的重要战略意义和极高的应用价值，使得高超声速技术成为21世纪航空航天领域的研究热点之一，得到了世界范围的广泛关注。

我国在高超声速技术领域的研究方兴未艾，相关的科研院所和高等学校取得了令人瞩目的突破和积累，但与美国等航空航天发达国家相比仍有一定差距，亟待汲取其先进的研究经验，并借此能够系统培养相关的科研人员。《高超声速技术译丛》的出版适逢其时，译丛旨在借鉴和总结美国等航空航天领先国家的经验，使其理论化、科学化和系统化，进而结合工程实践，以形成具有我国特色的高超声速技术理论与实践相结合的知识体系。

《高超声速技术译丛》主要涵盖飞行器总体技术、推进技术、气动力与气动热、材料与结构热防护、制导与控制、数值模拟与试验测量技术等专业方向，知识领域覆盖了高超声速飞行器研发设计、制造和试验等关键技术。译丛择优选取了美国航空航天学会等国外机构出版的高超声速及相关技术的经典著作，以飨读者。

本套译丛的出版得到了国内众多方面的大力支持。丛书凝结了高超声速研究领域专家的智慧 and 成果，承担着记载与弘扬科学成就、积累与传播科技知识的使命，具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性，既可以作为实际工作的指导用书，也可以作为相关专业人员的学习参考书。期望这套丛书能够有益于高超声速技术领域人才的培养，有益于高超声速技术的发展，有益于高超声速飞行器的研制工作。同时，希望能够吸引更多的读者来关心、支持和热爱高超声速技术，并投身其中做出贡献。

《高超声速技术译丛》编辑委员会

2012年5月

译者序

随着飞行速度进入到高超声速范畴，飞行器所面临的空气动力学问题变得极其丰富和复杂。气动力仍然是飞行器气动布局和飞行弹道设计的一个最重要的因素，同时，气动热和防热系统成为飞行器成败的制约因素。高温气体效应除了严重影响高超声速飞行器的气动力、气动热和防热系统设计，也使得流场光辐射特性、电磁场特性成为必须研究的重要问题。稀薄气体效应、黏性干扰效应、吸气式推进技术等使得高超声速空气动力学问题进一步复杂化。

在高超声速范围内，从发现新现象、研究流动机理，到提供飞行器设计所需的气动力、热数据，高超声速地面试验设备至关重要。

本书比较系统地总结了20世纪最后10年里世界高超声速地面试验设备的发展情况。所介绍的试验设备几乎都是当时世界上同类之中最先进的，涉及到高超声速试验设备的所有类型，包括采用不同加热方式（蓄热、电加热/燃烧加热、电弧加热等）的下吹式暂冲型高超声速风洞，燃烧加热类高超声速风洞，激波风洞和高焓膨胀管风洞，电弧加热风洞，超高速弹道靶和火箭橇。文中还介绍了几种高超声速风洞的新概念。通过本书，可以比较系统地了解高超声速试验设备的基本原理、主要类型与功能、系统组成，以及主要研究内容等，并对国际上的高超声速试验设备总体情况有所把握。译者希望本书能够为我国相关领域的同行们提供一定的参考。

本书的翻译工作是由中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所和科技信息中心的同仁们共同完成的（参加翻译的人员名单见本书编委会名录），在此表示衷心的感谢！

感谢航空工业出版社对本书出版所给予的大力支持。由于译者水平有限，译文必有不当之处，敬请读者谅解并不吝指正（联系方式：liusen@cardc.cn）。

柳 森

2015年4月7日

中国空气动力研究与发展中心，四川绵阳

原版前言

人们说，风洞试验是“部分模拟艺术”的典范。尤其对于高超声速测试，这句话非常恰当。通常认为马赫数大于5即为高超声速。如此高的速度下的极端条件给设计满足苛刻要求的飞行器带来巨大的技术挑战。设计师可用的工具包括各种地面试验设备，也就是本书的主题。由于没有哪一个设备能够覆盖高超声速飞行器的全部飞行包线，必须将多种地面试验设备结合起来才能获得所需数据。

人们发展了革命性的方法来研究气动热力学现象对高超声速飞行器设计带来的影响。吕卡西维奇 (P. J. Lukasiewicz) 所著的《高超声速试验方法》(马赛尔·德克尔出版社, 纽约 (Marcel Dekker, New York), 1973年) 也许是高超声速设备的第一个综述性文献。从那以后, 尽管不断有设备被关闭, 但是技术的发展没有停顿。人们建造了新的设备, 恢复了老的设备, 并且还在规划其他的设备。许多时候, 这些新设备的发展依赖于深入的计算流体力学分析、新的测试能力, 以及材料科学的进展。近来, 另一个有趣的现象是, 无论在军用还是民用领域, 围绕着发展高超声速试验技术这一共同目标, 不同层次的国际合作在不断加强。

本书是对过去10年中高超声速试验设备发展的回顾。书中内容并不十分全面, 重点介绍了我们认为重要的一些进展。另外, 有些设备是在不同的地方同时发展的, 对此我们仅选择了其中具有代表性的文章。限于本书篇幅, 我们只能收录有限数量的文章。如有疏漏, 责任全在我们编者, 在此先向各位同仁致歉。同时, 我们也相信在未来的很多年中, 本书将在高超声速设备使用者和运行者的阅读清单中占有重要地位。

一般而言, 高超声速设备近年来的应用主要集中在高速推进技术(特别是超燃冲压发动机)和飞行器气动热力学领域。因此, 本书没有收录被广泛用来获取气动数据的完全气体常规高超声速风洞。这并非贬低这类风洞的贡献, 而仅仅是因为编辑认为相关的知识在已有的文献中更容易获得。本书中所说的高超声速也被延伸到超高速。这样的话, 真实气体效应成了一个反复出现的主题。本书大致包括介绍性的两章, 随后的几章涉及脉冲设备、长时间设备和弹道类设备, 最后一章是关于下一代设备的先进技术展望。

在编辑本书的过程中, 与各位作者的紧密合作令人愉快。感谢各位同仁, 特别是AIAA地面试验技术委员会, 他们提出了有益的建议。在此对阿纳托

里·哈利托诺夫、唐纳德·梅西特，以及拉里·鲁布什 (Anatoly Kharitonov, Donald Messit, and Larry Reubush) 表示特别感谢，并对 AIAA 的梅雷迪斯·考利和罗杰·威廉姆斯 (Meredith Cawley and Rodger Williams) 在我们编辑此书过程中的耐心指导表示感谢。

弗兰克·陆 (Frank Lu)

丹·马伦 (Dan Marren)

2002 年 7 月

目 录

第 1 章 高超声速地面试验需求	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 高超声速试验需求的历史、现状与展望	(2)
1.3 未来潜在的民用高超声速试验需求	(4)
1.3.1 行星探索	(4)
1.3.2 进入空间	(4)
1.4 高超声速试验的军事需求	(10)
1.4.1 进入太空	(10)
1.4.2 导弹	(11)
1.5 结论	(12)
第 2 章 高超声速试验设备原理	(16)
2.1 引言	(16)
2.2 高超声速关键技术	(17)
2.3 高超声速缩比试验	(18)
2.4 高焓和高速	(19)
2.5 高超声速设备种类	(21)
2.6 结论	(23)
第 3 章 NASA 的 HYPULSE 设备——GASL 的双运行模式、 双驱动反射激波/膨胀风洞	(26)
3.1 引言	(26)
3.1.1 背景	(26)
3.1.2 本章主要内容	(29)
3.2 激波风洞和膨胀管	(29)
3.2.1 激波加热设备	(29)
3.2.2 反射激波风洞	(29)
3.2.3 激波-膨胀管	(31)
3.3 驱动技术	(32)
3.3.1 轻气体驱动	(33)

3.3.2	电加热轻气体驱动	(33)
3.3.3	燃烧加热轻气体驱动	(34)
3.3.4	压缩加热轻气体驱动(自由活塞驱动)	(35)
3.3.5	驱动技术对比小结	(35)
3.3.6	HYPULSE 激波诱导爆轰驱动	(36)
3.4	HYPULSE 运行及性能	(37)
3.4.1	设备结构及设备尺寸	(37)
3.4.2	HYPULSE 运行	(38)
3.4.3	试验条件的验证	(41)
3.4.4	试验时间的确定	(41)
3.5	爆轰驱动 RST 运行模式时的驱动气体污染	(43)
3.5.1	喷管流动	(45)
3.5.2	驱动气体渗漏的瞬态发展	(48)
3.6	膨胀风洞运行模式喷管设计	(49)
3.6.1	skimmer 喷管	(50)
3.6.2	full capture 型面渐进过渡为锥形型面	(52)
3.6.3	试验验证	(53)
3.7	结论	(55)
第4章	LENS 超高速风洞及其在复现飞行器飞行条件试验中的应用	(61)
4.1	引言	(61)
4.2	高超声速飞行性能的地面模拟试验	(61)
4.3	LENS I 与 LENS II 的设计、运行和性能	(66)
4.3.1	简介	(66)
4.3.2	LENS I 与 LENS II 的设计与运行	(67)
4.3.3	配套的气动热、气动光学和辐射测量仪器	(69)
4.4	风洞验证试验	(72)
4.5	LENS 风洞设备在高超飞行器试验中的应用	(75)
4.5.1	高速拦截器气动热与气动光学性能评估	(75)
4.5.2	为进行导引头性能评估而进行的气动热测量示例	(77)
4.5.3	拦截器导引头构型的气动光学测量示例	(81)
4.6	轨控发动机喷流干扰效应的试验研究	(83)
4.6.1	简介	(83)
4.6.2	流场与气动热参数	(83)

4.6.3	关于流场模糊失焦现象的光谱和辐射测量	(85)
4.7	超燃冲压发动机性能研究	(86)
4.7.1	简介	(86)
4.7.2	发动机内部的激波干扰现象	(89)
4.8	结论	(90)
第5章	U-12 大型激波管	(93)
5.1	引言	(93)
5.2	U-12 激波管简介	(93)
5.3	运行方式	(96)
5.4	空气动力学问题研究	(99)
5.5	飞行器力与力矩测量	(102)
5.6	地球及行星大气激波后非平衡过程研究	(103)
5.7	U-12 设备上开展的电磁波物理研究	(106)
5.8	U-12 激波管弹道运行模式	(108)
5.8.1	圆盘旋转稳定电磁设备	(110)
5.8.2	夹膜装置	(110)
5.8.3	制动装置	(110)
5.9	结论	(111)
第6章	爆轰驱动激波管和激波风洞	(114)
6.1	引言	(114)
6.2	爆轰过程的气动原理	(116)
6.3	爆轰驱动运行原理	(118)
6.3.1	反向爆轰模式	(119)
6.3.2	正向爆轰模式	(120)
6.4	TH2-D 爆轰驱动激波风洞	(121)
6.4.1	设备组成	(121)
6.4.2	爆轰波的起爆	(124)
6.4.3	爆轰段和卸爆段内波的传播过程	(126)
6.4.4	被驱动段内波的传播过程	(129)
6.4.5	试验段气流的校测	(132)
6.5	JF-10 爆轰驱动高焓激波风洞	(136)
6.5.1	充气 and 混合系统	(137)

6.5.2	起爆	(139)
6.5.3	入射激波的衰减	(140)
6.5.4	校准结果	(141)
6.5.5	带空腔环的正向爆轰驱动	(143)
6.5.6	双爆轰驱动	(147)
6.5.7	带收缩喉道的爆轰驱动	(150)
6.6	UTA 高性能激波管	(155)
6.7	爆轰驱动设备性能	(166)
6.8	结论	(170)
第7章	DLR 高焓激波风洞 (HEG) 上开展的气动热力学研究	(174)
7.1	引言	(174)
7.2	HEG 设备	(175)
7.2.1	运行	(175)
7.2.2	HEG 锥形喷管的几何形状	(177)
7.3	测试技术	(177)
7.3.1	传统测试技术	(177)
7.3.2	光谱测量	(178)
7.3.3	时辨纹影	(178)
7.3.4	测力	(178)
7.4	数值求解器 CEVCATS - N	(179)
7.5	喷管流动和自由流	(180)
7.5.1	化学/热力学平衡/非平衡	(181)
7.5.2	流动的瞬态发展	(182)
7.5.3	驱动气体污染	(184)
7.6	圆柱绕流	(186)
7.7	驱动气体污染的迟滞	(192)
7.8	现阶段工作	(193)
7.8.1	X-38/CRV 救生舱	(193)
7.8.2	大气再入验证机	(195)
7.9	结论	(198)
第8章	HIEST 特性及其在高超声速气动热力学和超燃冲压发动机研究中的应用	(203)
8.1	引言	(203)

8.2	HIRST 简介、常规性能和限制	(203)
8.2.1	简介	(203)
8.2.2	常规性能	(204)
8.2.3	喷管流动的限制	(208)
8.3	HOPE 气动力试验	(209)
8.4	热流的壁面催化效应	(211)
8.5	超燃冲压发动机	(213)
8.6	结论	(214)
第9章	多级压缩的活塞驱动气动设备 (PGU)	(216)
9.1	引言	(216)
9.2	多级压缩的 PGU 设备	(221)
9.3	多级压缩方法	(223)
9.4	模拟高超声速外流主流的方法	(226)
9.5	模拟发动机喷流对飞行器后体的影响	(229)
9.6	PGU 中的超燃试验	(230)
9.7	结论	(233)
第10章	电弧加热设备	(237)
10.1	引言	(237)
10.2	电弧加热器及高超声速试验	(238)
10.2.1	电弧加热用途及发展史	(238)
10.2.2	电弧加热设备类型	(239)
10.2.3	电弧加热器试验模式	(242)
10.2.4	电弧加热器试验应用	(243)
10.3	DoD 和 NASA 电弧加热设备概述	(247)
10.3.1	DoD 的电弧加热设备	(247)
10.3.2	NASA 的电弧加热器	(249)
10.4	电弧加热器相关技术最新综述	(254)
10.4.1	设备技术	(254)
10.4.2	试验技术	(256)
10.4.3	试验测试仪器	(258)
10.4.4	电弧建模/仿真	(259)
10.5	结论	(264)

第 11 章 SCIROCCO 70MW 等离子体风洞：新的高超声速能力	(270)
11.1 引言	(270)
11.2 设备	(272)
11.2.1 设备运行过程描述	(272)
11.2.2 设备性能	(272)
11.2.3 主要部件的技术参数	(273)
11.2.4 设备的交付验收情况及鉴定	(278)
11.3 高超声速的挑战：未来及潜在的应用	(280)
11.3.1 一般性问题	(280)
11.3.2 试验段气流环境	(285)
11.3.3 气动力模拟能力	(289)
11.3.4 吸气式推进系统的模拟能力	(291)
11.4 SCIROCCO 的发展	(296)
11.4.1 潜在的气动力试验能力提升	(296)
11.4.2 潜在的吸气式推进试验能力提升	(297)
11.5 结论	(298)
第 12 章 气动与推进试验设备 (APTU)	(303)
12.1 引言	(303)
12.2 未来高超声速吸气式推进系统试验的基本要求	(304)
12.3 APTU 介绍	(306)
12.3.1 近期 APTU 试验能力提升计划	(308)
12.3.2 延长试验时间	(310)
12.3.3 增大模拟高度范围	(310)
12.3.4 提高推力测量能力	(310)
12.4 中远期 APTU 试验能力升级计划	(311)
12.4.1 马赫数 8.0 自由射流试验能力	(311)
12.4.2 增大尺寸	(311)
12.5 APTU 试验技术的提升	(312)
12.5.1 试验方法	(313)
12.5.2 分析技术	(315)
12.6 总结	(320)

第 13 章 作为再入飞行器气动热力学问题研究工具的电弧加热设备	(323)
13.1 引言	(323)
13.2 试验设备与测量技术	(325)
13.3 流动特性	(328)
13.4 局部气动热力学试验	(331)
13.5 TPS 部件的表征与评价	(337)
13.6 再入条件下的飞行传感器考核	(340)
13.7 结论	(347)
第 14 章 NASA 兰利研究中心的 8ft 高温风洞	(351)
14.1 引言	(351)
14.2 设备描述	(353)
14.2.1 主要设备部件	(353)
14.2.2 主要保障系统	(357)
14.2.3 数据采集和测量仪器	(361)
14.3 试验能力	(362)
14.3.1 结构和材料	(362)
14.3.2 吸气式推进试验	(365)
14.3.3 系统概念性能评估试验	(366)
14.4 运行	(366)
14.5 结论	(368)
第 15 章 NASA 格林研究中心的高超声速风洞设备	(370)
15.1 引言	(370)
15.2 设备的历史	(371)
15.3 设备描述	(372)
15.3.1 石墨蓄热式加热器	(373)
15.3.2 设备的热部件	(374)
15.3.3 喷管	(375)
15.3.4 试验段和推力试验台组件	(375)
15.3.5 扩压器/蒸汽引射器系统	(375)
15.3.6 氮气系统	(376)
15.3.7 氧气系统	(376)