



气动物理靶试验 与测量技术

QIDONG WULIBA SHIYAN YU CELIANG JISHU



曾学军 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

总装部队军事训练“十一五”统编教材

气动物理靶试验 与测量技术

曾学军 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

气动物理靶试验与测量技术/曾学军主编. —北京:国防工业出版社, 2009. 6

总装部队军事训练“十一五”统编教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 06260 - 1

I. 气... II. 曾... III. ①靶场试验 - 教材②靶场 - 测试技术 - 教材 IV. TJ06

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 037905 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 8% 字数 240 千字

2009 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 22.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

总装备部军事训练统编教材 编审委员会

(2007)

主任委员 夏长法

副主任委员 陆晋荣 史续生 聂 皞

委 员 褚庆俊 于俊民 李方洲

周铁民 郝光宇 赵新国

单志伟 石春和 孙宝升

姜国华 肖力田 张 渊

秘 书 石根柱 郝 刚

本书编审委员会

主 编 曾学军

副主编 石安华 黄 洁

编 委 (按姓氏笔画排序)

马 平 平新红 石安华 陈 鯤

罗锦阳 部绍清 黄 洁 韩 冬

曾学军 谢爱民

主 审 杨祖清

前 言

气动物理靶,即用于气动物理特性研究的自由飞弹道靶,是研究超高速飞行器缩比模型与空气相互作用条件下,飞行器及高超声速流场光电特性的室内动态试验靶场,是研究高超声速飞行器在再入段和在大气中飞行的目标光电特性机理,建立高超声速飞行器绕流场及尾迹流场特性、光谱辐射特性、电磁散射特性模型,验证再入目标光电特性计算方法和计算结果的十分重要的地面试验设备。在一定的条件下,气动物理靶试验的某些结果可直接应用于飞行条件。

气动物理靶设备主体一般由超高速模型发射器、膨胀箱、分离段、试验段和真空系统组成,测量系统包括电子密度测量系统、光辐射特性测量系统、电磁散射特性测量系统、试验模型探测与测速系统和阴/纹影照相系统等组成。具备比较完备的光电特性测量技术是气动物理靶区别于其他自由飞弹道靶的本质特点。

本书根据气动物理靶的特点,对气动物理靶试验技术进行比较系统的介绍。全书共7章,第1章是概论,简要综述了气动物理试验研究内容及其气动物理试验研究的主要试验设备,在此基础上介绍了气动物理靶工作原理,气动物理靶试验的一般方法。发射超高速飞行试验模型是气动物理靶试验的基础,因此,本书第2章简要介绍了气动物理靶试验模型发射技术,重点介绍了二级轻气炮构造与工作原理、二级轻气炮的内弹道、影响超高速发射的因素。第3章~第5章是本书的重点,第3章介绍了高超声速尾迹流场电子密度诊断技术,包括微波干涉仪、微波谐振腔和静电探针测量技术;第4章介绍了气动物理靶电磁散射测量技术,包括测量原理、测量系统、数据分析与处理;第5章介绍了再入目标光辐射测量技术,包括光辐射强度测量技术和光谱特性测量技术等;第6章简要介绍

了弹道测量技术,包括内弹道测量技术、模型飞行速度测量技术、模型飞行姿态测量技术;第7章简要地对气动物理靶试验技术的发展趋势进行了展望。

必须指出的是,本书的重点是气动物理靶测量技术,没有对气动物理靶设备主体进行系统介绍,相关内容可参阅其他文献、书籍。气动物理靶光电特性测量技术涉及等离子体诊断、从紫外到长波红外的光谱辐射强度测量、光谱特征测量、电磁散射特性测量,涉及的学科较多、跨度极大,因此,本着着眼应用的原则,在本书的编写过程中比较注重测量原理、测量系统、数据处理方法,而对基本概念、基本理论没有过多叙述。由于时间仓促,学识有限,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

在本书的编写过程中,得到了中国空气动力研究与发展中心、超高速空气动力研究所等机关、领导和专家的关心和支持,在此表示衷心的感谢!

编者

内 容 简 介

本书总结了国外 40 多年和国内 30 多年来在气动物理靶试验与测量技术研究方面的成果及宝贵经验,总结继承了许多老专家的学识见解和丰富的试验经验。

本书根据气动物理靶的特点,对气动物理靶试验与测量技术进行了较为系统的介绍,全书共分 7 章。第 1 章简要介绍了气动物理试验研究的内容及用于气动物理试验研究的主要试验设备,在此基础上介绍了气动物理靶的工作原理,气动物理靶试验的一般方法。第 2 章简要介绍了气动物理靶试验模型发射技术、模型设计方法和模型与弹托的分离方法,重点介绍了二级轻气炮构造与工作原理、二级轻气炮的内弹道、影响超高速发射的因素。第 3 章~第 5 章是本书的重点,第 3 章介绍了气动物理靶高超声速飞行体尾迹流场电子密度的诊断技术,包括微波干涉仪、微波谐振腔和静电探针测量技术;第 4 章介绍了气动物理靶电磁散射测量技术,包括测量原理、测量系统、数据分析与处理方法;第 5 章介绍了气动物理靶光辐射测量技术,包括光辐射强度测量技术和光谱特性测量技术等;第 6 章简要介绍了弹道测量技术,包括内弹道测量技术、模型飞行速度测量技术、模型飞行姿态测量技术;第 7 章简要地对气动物理靶试验技术的发展趋势进行了展望。

本书理论与实践相结合,理论性强,具有很好的针对性,既可作为从事气动物理弹道靶试验研究的新上岗人员的培训教材以及从事气动物理弹道靶试验研究的中、高级技术人员的学习指导用书,也可作为从事气动物理理论研究、技术管理工作人员和院校空气动力学相关专业师生的参考用书。

目 录

第1章 概论	1
1.1 气动物理试验综述	1
1.1.1 气动物理试验研究内容	2
1.1.2 气动物理试验研究的主要设备	2
1.2 气动物理靶简介	3
1.2.1 国外气动物理靶概况	3
1.2.2 气动物理靶基本工作原理	4
1.2.3 气动物理靶的基本组成	15
1.3 气动物理靶试验的一般方法	15
1.3.1 再入体尾迹流场电子密度测量方法	16
1.3.2 再入目标电磁散射特性测量方法	16
1.3.3 再入目标光辐射特性测量方法	16
1.3.4 气动物理靶弹道测量方法	17
参考文献	18
第2章 试验模型发射技术	20
2.1 概述	20
2.2 二级轻气炮	20
2.2.1 二级轻气炮的构造与工作原理	20
2.2.2 二级轻气炮勤务辅助系统	22
2.2.3 二级轻气炮工作流程	23
2.2.4 二级轻气炮的内弹道	26
2.2.5 二级轻气炮的性能调试试验	42
2.2.6 二级轻气炮主要部件和试验装填件设计	43

2.3	模型设计技术	53
2.3.1	模型设计基本原则	53
2.3.2	模型设计基本要求	54
2.3.3	模型物理特性的测定	57
2.4	模型分离技术	59
2.4.1	模型与弹托的分离设计	59
2.4.2	弹托分离装置	61
	参考文献	62
第3章	再入体尾迹流场电子密度诊断技术	63
3.1	概述	63
3.2	微波干涉仪	64
3.2.1	工作原理	64
3.2.2	系统组成	69
3.2.3	数据处理方法	74
3.2.4	典型试验结果	76
3.3	微波谐振腔	78
3.3.1	工作原理	78
3.3.2	系统组成	86
3.3.3	数据处理方法	91
3.3.4	典型试验结果	102
3.4	朗缪尔探针	106
3.4.1	工作原理	106
3.4.2	数据处理	107
3.4.3	典型试验结果	108
	参考文献	110
第4章	电磁散射测量技术	112
4.1	概述	112
4.2	测量原理	113
4.2.1	基本理论	114
4.2.2	测量原理和条件	118

4.3 测量系统	121
4.3.1 天馈线系统	124
4.3.2 发射机系统	130
4.3.3 接收机系统	132
4.3.4 信号处理与控制系统	135
4.3.5 标定系统	144
4.3.6 微波暗室	146
4.4 测量数据分析处理	149
4.4.1 紧缩场测量	149
4.4.2 近场—远场变换	151
4.4.3 目标—维散射中心分布成像处理	157
4.4.4 误差分析	163
4.5 典型试验结果	167
参考文献	169
第5章 再入目标光辐射测量技术	171
5.1 概述	171
5.2 分谱辐射强度测量	171
5.2.1 工作原理	171
5.2.2 系统组成	174
5.2.3 数据处理方法	178
5.2.4 典型试验结果	184
5.3 瞬态光谱测量	187
5.3.1 工作原理	187
5.3.2 系统组成	189
5.3.3 数据处理方法	198
5.3.4 典型试验结果	200
5.4 瞬态光辐射图像测量	203
5.4.1 工作原理	203
5.4.2 系统组成	204
5.4.3 数据处理方法	205

5.4.4 典型试验结果	206
参考文献	208
第6章 弹道测量技术	210
6.1 概述	210
6.2 内弹道测量	210
6.2.1 内弹道压力测量	211
6.2.2 内弹道温度测量	212
6.2.3 活塞速度测量	213
6.2.4 破膜压力测量	215
6.2.5 发射管模型速度测量	215
6.3 模型飞行速度测量	218
6.3.1 模型探测方式	219
6.3.2 模型速度测量	220
6.4 模型飞行姿态测量	225
6.4.1 靶室基准系统	226
6.4.2 正交阴影照相系统	230
6.4.3 数据处理方法	232
6.5 流场显示技术	236
6.5.1 阴影照相	237
6.5.2 纹影照相	240
6.5.3 全息干涉照相	249
参考文献	253
第7章 展望	254

第 1 章 概 论

本章简要介绍气动物理的基本含义、气动物理试验研究内容、可用于气动物理试验的地面试验设备、气动物理靶的组成和工作原理、国内外概况以及气动物理靶试验的一般方法,后续各章节将对这些研究内容进行详细介绍。

1.1 气动物理试验综述

气动物理(Aero-physics)是指高超声速空气动力学中的物理问题,或高超声速飞行器与大气强烈相互作用后产生的物理问题。包括高温气体或高超声速流场的电离特性、电磁散射特性、光谱特性、光辐射特性、电磁波传输特性、光传输特性等。

高超声速飞行器再入大气层时,空气被急剧压缩,飞行器前端会形成一道强激波,由于飞行器壁面与空气分子产生强烈摩擦,飞行器周围空气的温度、压力急剧升高,使空气中分子和原子的电子被激发到高能级,甚至产生电离,出现离子和自由电子,形成等离子体;同时,空气中受激分子和原子的电子又将返回到低能级,辐射出大量的光和热;此外,由于大气与表面的摩擦对飞行器的加热作用,飞行器耐热材料会产生烧蚀,形成烧蚀产物进入流场,烧蚀产物还会与高温气体发生相互作用,影响流场气体的组分、温度、电子密度等。图 1-1 是锥形再入体典型流场结构示意图。

高超声速飞行器在大气层中飞行与空气相互作用的气动物理特性主要表现为 3 个方面。一是高温气体对再入目标光电特性影响,通常称为再入目标特性或再入目标特征;二是高温气体对电磁波通信的影响,严重

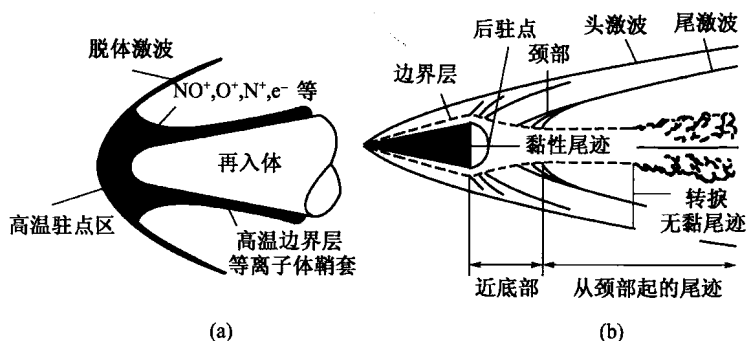


图 1-1 锥形再入体典型流场结构示意图

(a) 头部流场; (b) 尾迹流场。

时会出现通信中断,甚至产生“黑障”;三是高温气体对光信号传输的影响,严重时会引起瞄视误差、光晕、光信号抖动等,通常称为气动光学效应。

从 20 世纪 50 年代以来,气动物理研究实际上包括整个飞行器飞行过程中的目标探测、识别、指定 (D^3 - Detection, Discrimination, Designation) 研究。研究不仅从未间断,而且规模在不断扩大。

1.1.1 气动物理试验研究内容

气动物理试验研究内容极其广泛、十分复杂,总体上可以分为两大类。一是高温气体或高温流场电磁散射特性试验研究;二是高温气体或高温流场光谱辐射特性研究。

高温气体或高温流场电磁散射特性试验研究主要内容包括电子密度诊断、碰撞频率试验研究、雷达散射特性试验研究等。

高温气体或高温流场光谱辐射特性试验研究主要内容包括高温气体光谱特征试验研究、高温气体光谱辐射强度试验研究等。

1.1.2 气动物理试验研究的主要设备

可用于气动物理特性研究的试验设备较多,归纳起来主要包括气动物理靶、高温激波管、粉末激波管、高焓激波风洞、高频等离子体风洞等。

高温激波管主要用于研究高温气体的电离特性、光谱辐射特性、光信号传输特性、电磁信号传输特性等,其特点是气体纯净,高温气体温度、密度、压力等参数可控。粉末激波管主要用于研究高超声速飞行器耐热材料在高温条件下烧蚀的光电特性,研究耐热材料烧蚀产物对高温流场光电特性的影响。高焓激波风洞可用于研究高超声速飞行器头身部绕流场及近尾迹流场光电特性。高频等离子体风洞可用于研究高超声速飞行器耐热材料高温烧蚀流场的光电特性,研究耐热材料烧蚀产物对高温流场光电特性的影响。气动物理靶(即用于气动物理特性研究的自由飞弹道靶)是开展气动物理特性试验研究的重要设备。它具有无支架干扰,模拟环境真实、可控,能比较真实地模拟超高速飞行器从头身部绕流到尾迹的全流场的气动物理特性的优点,这是其他设备难以做到的。

1.2 气动物理靶简介

1.2.1 国外气动物理靶概况

为了研究超高速流场气动物理特性,国外从 20 世纪 50 年代就开始了弹道靶建设与研究,并利用弹道靶开展了大量研究工作。除美国和苏联之外,英国、法国、加拿大和印度等国都有这方面的研究文章的报道。

在这一领域开展研究最早、投入资金最多、涉及内容最为广泛的是美国。他们重点侧重于试验研究。

在美国,开展气动物理特性研究的单位主要有阿罗德工程发展中心(AEDC)、通用汽车公司防御研究实验室(GM/DRL)等弹道靶实验室和阿拉巴马大学(UAH)、乔治亚理工学院等,这些弹道靶设备上都配有雷达测试设备和光辐射测量设备,雷达频率为 3GHz、9GHz、17GHz、35GHz、60GHz、70GHz、95GHz 等,光辐射测量设备包括了从紫外到远红外波段。利用这些设备开展了大量的研究工作,以 GM/DRL 为例,在 20 世纪 60 年代至 80 年代之间就进行了 8000 多次试验。目前,美国已基本完成了典型超高速飞行器再入目标特性研究和数据的收集工作,并以文件的形

式存储在导弹防御司令部的数据库内,作为工程设计的依据。

为了更好地为导弹防御系统目标识别技术和拦截技术服务,美国于20世纪80年代末90年代初对弹道靶设备进行了技术改造,以进一步提高设备的研究能力^[1]。

俄罗斯在气动物理特性研究方面也开展了大量工作。开展弹道靶试验最早的是约菲物理技术研究所。此外,俄罗斯中央机械制造科学研究院也开展了相关研究工作。

1.2.2 气动物理靶基本工作原理

1.2.2.1 气动物理靶工作原理

一般来讲,气动物理靶试验模型为缩比模型,试验模型大小主要由发射管的内径确定。试验条件的选取原则是必须实现马赫数 Ma 或雷诺数 Re 模拟。

图1-2所示为气动物理靶的设备布置图,测量设备的布置位置、测量设备的数量等视设备规模而定,没有统一的标准。基本工作流程是:发射器(二级轻气炮)将模型与弹托的合体发射到需要速度后进入膨胀箱内分离,弹托偏离炮口轴线后在分离段内被拦截板拦截,模型通过拦截板中心孔进入靶室中,由于模型在靶室内的超高速飞行,在模型周围会形成高温发光、电离绕流流场,在模型后形成长的发光、电离尾迹流场。各种测量设备布置在靶室不同位置,当模型飞行到测量设备的测量区域时,各测量设备对所关心的物理量进行测量和记录。模型速度由模型速度测量系统测量,模型的位置、尾迹流场结构及其姿态由照相系统测量;电离尾迹的电子密度由微波干涉仪、微波谐振腔进行测量;模型及其流场的光辐射特性由光辐射测量系统进行测量;模型及其流场的电磁散射特性由相应雷达测量系统进行测量。

1.2.2.2 气动物理特性相似规律

高超声速飞行器气动物理特性十分复杂,它是流体力学、化学动力学、等离子体物理、光谱辐射与传输等一系列过程的耦合体。因此,高超声速流场气动物理特性的模拟十分复杂。

大量研究表明,高超声速流场气动物理特性的相似准则随高度的不

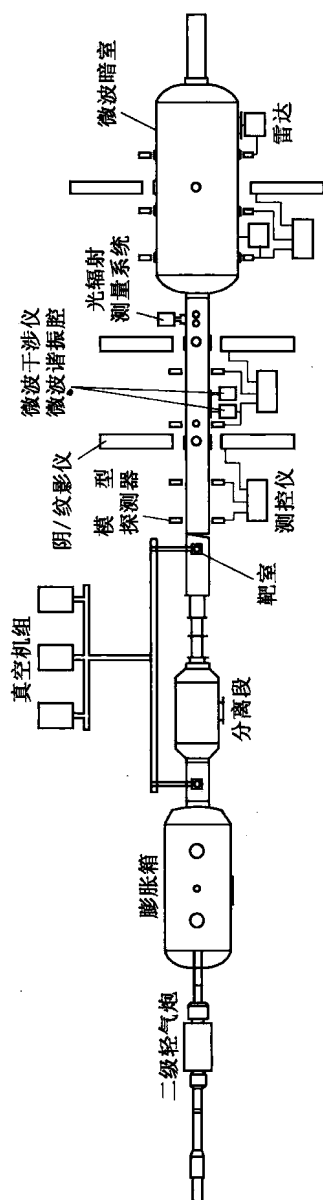


图 1-2 气动物理靶设备布置图