

气动光学原理

殷兴良 主编



中国宇航出版社

责任编辑 任长卿

封面设计 赵喜东

ISBN 7-80144-708-5



9 787801 447081 >

ISBN 7-80144-708-5/V·081

定价：59.00 元

气动光学原理

殷兴良 主编



中国宇航出版社

内容简介

本书系统地阐述了高速飞行器光学成像探测制导的基础技术, 主要包括气动光学的基本理论、研究方法、验证试验及其校正方法, 全书共分三篇, 14章。

第一篇介绍了气动光学效应研究所需的数学知识和物理知识; 第二篇阐述了高速流场数值计算方法、气动光学传输效应的基本理论和计算方法、气动热辐射效应的基本理论和计算方法、光学头罩气动热效应的分析计算方法以及气动光学效应试验原理和试验方法; 第三篇探讨了气动光学效应的校正方法, 包括图像复原方法、光电综合校正方法、光学头罩致冷技术以及湍流控制方法等。

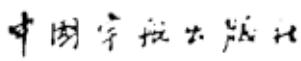
本书力求理论紧密结合工程实践, 突出理论性、系统性和实用性, 适合从事光学工程、空气动力学、信号检测与处理、飞行器设计、精确制导与控制等领域研究的工程技术人员阅读, 也可作为高等院校师生教学学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

气动光学原理/殷兴良主编. —北京: 中国宇航出版社, 2003.10
ISBN 7-80144-708-5

I. 气… II. 殷… III. 气动光学-原理 IV. V448.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 089887 号

出版 发行			
社址	北京市阜成路 8 号 (010)68768548	邮编	100830
网 址	www.caphbook.com/ www.caphbook.com.cn	版 次	2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月第 1 次印刷
经 销	新华书店	开 本	1/16
发行部	北京市和平里滨河路 1 号 (010)68373103	规 格	787×1092
		印 张	20
零售店	读者服务部 北京市阜成路 8 号 (010)68371105	字 数	518 千字
		书 号	ISBN 7-80144-708-5
		印 数	1~2000 册
承 印	北京航丰印刷厂	定 价	59.00 元

本书如有印装质量问题可与发行部调换

序

随着新军事技术变革的到来，各种飞行器或精确打击武器对信息获取的精确性和时效性的依赖程度大幅度地提高，采用光学成像探测跟踪瞄准体系和追求高速飞行，已成为当代各种飞行器或精确打击武器的必然发展趋势。随着这两项技术的广泛应用，气动光学问题也应运而生，飞行器速度越高，气动光学效应越严重并影响到探测的精度。可以说，气动光学问题已经成为这两种技术同时应用的“关键”。气动光学效应与校正技术研究力图认识和消除气动光学的影响。该领域的研究进展和取得的每项成果，都将直接影响到高速飞行器光学探测技术的精确性，也将影响新一代精确打击武器的发展。

气动光学是一门迅速发展的军民两用并具广泛应用前景的新型交叉学科，它涉及光学、流体力学、工程热物理、光电子学、计算机与信息信号处理以及材料科学等多学科领域。殷兴良同志主编的《气动光学原理》既是基础理论之作，也是在大量研究基础上形成的该领域专著。它建立了国内该领域研究的基础，开辟了光学、流体力学和信息信号处理等学科领域研究的新途径，标志着我国气动光学这门现代光学新分支学科的形成。

为此，作为专著，该书的出版对现代光学文库作出了新的贡献，并有益于气动光学及相关学科的持续发展。

王大中

2003年9月21日

前 言

带有光学成像探测制导系统的飞行器在大气层内高速飞行时，光学头罩与来流之间形成复杂的流场，对光学成像探测系统造成热、热辐射和图像传输干扰，引起目标图像偏移、抖动、模糊，这种效应称为气动光学效应(Aero-Optical Effect)。它包括高速流场光学传输效应、激波与窗口气动热辐射效应和光学头罩气动热效应。

气动光学效应由概念提出到研究应用已有几十年的历史，国外在该领域开展了深入的理论研究和大量的试验，取得了丰富的可供工程应用的研究成果，并已从对气动光学效应统计特性的认识逐步转到机理方面的研究。随着国内外在该领域的研究不断深入，气动光学这门主要由流体力学、光学、信息信号处理、工程热物理、计算机科学和材料科学等交叉形成的光学工程新的分支学科正日见端倪。

气动光学是研究高速绕流对弹载成像探测或大气湍流对光学图像影响及其校正的一门学科。它运用光学和流体力学理论研究气动光学效应产生机理，运用光学原理、光电子技术、信息信号处理和流体力学理论等研究气动光学校正方法。研究内容主要包括气动光学效应机理、气动光学校正方法、气动光学效应与校正试验和飞行器光学头罩技术等方面。该项研究对高速飞行器实现光学成像精确探测、机载激光(ABL)实现精确跟瞄与照射、机载光电成像系统实现精密跟踪与瞄准具有重要的基础性作用，研究成果还可以推广应用于远距离地面光电探测跟踪系统、卫星对地探测光电系统的图像复原与校正等。气动光学研究将带动相关学科跨越式的发展，拓展我国空气动力学、光学和信息信号处理等学科的研究领域，增强空气动力学与光学交叉学科研究的试验能力，推动材料科学尤其是光学材料科学的发展。

本书是中国航天二院气动光学课题组从事气动光学多年研究成果的概括和总结，凝聚了众多科研人员多年的心血，是广大科技人员智慧的结晶。全书系统地

介绍了气动光学效应的基本理论、数值模拟、校正方法和验证试验，旨在加强从事相关研究领域技术成果的交流，促进气动光学的发展，使之更好地服务于我国国民经济建设尤其是国防现代化建设。

本书有幸得到我国著名光学专家、新中国光学工程的奠基人、开拓者和组织者，中国科学院资深院士王大珩先生的赐教并惠予作序，先生科学严谨的工作作风令人感动。今年适逢王老从事科学研究 65 周年，借本书出版之际，衷心地表示我们这些从事光学工程研究工作的后来者对王老的敬仰之情。著名流体力学家、中国科学院院士、中国航天科技集团公司及中国航天科工集团公司高级技术顾问庄逢甘先生对书稿提出了许多宝贵的意见，使作者受益匪浅，惠及终身，在此深表谢意。同时衷心感谢中国科学院院士、南开大学教授母国光先生，中国工程院院士、北京理工大学教授周立伟先生对本书出版给予的支持和关怀。

作 者

2003 年 10 月于北京

绪论	1
----------	---

第一篇 气动光学研究的数理基础

第 1 章 数学基础	11
1.1 线性代数	11
1.2 卷积与相关	17
1.3 傅里叶变换	20
1.4 随机变量与随机过程	25
1.5 偏微分方程	35
1.6 矢量分析与场论	39
第 2 章 计算流体力学概论	45
2.1 流体力学基本概念	46
2.2 流体运动学	50
2.3 流体动力学基本方程	55
2.4 湍流概述	62
2.5 力学相似原理	68
2.6 激波的形成与描述	72
2.7 计算流体力学基本概念	74
2.8 超声速流场数值计算格式	79
2.9 三维层流流场的数值计算	85
第 3 章 光的波动理论	90
3.1 电磁场基本原理	91
3.2 光的波动传播	93

3.3	光波与气体介质的相互作用	101
3.4	光学传输特性的描述方法	107
第4章	红外成像制导原理	114
4.1	红外成像制导技术的发展	114
4.2	红外目标辐射及其在大气中的传输	116
4.3	红外成像探测系统	124
4.4	红外成像制导系统评估方法	138

第二篇 气动光学效应的描述

第5章	高速流场 N-S 方程的数值计算	145
5.1	大气状态方程	146
5.2	雷诺平均方程和雷诺应力模型	149
5.3	雷诺平均方程的数值计算	154
5.4	大涡模拟方法	158
5.5	直接数值模拟法	163
第6章	光波在高速流场中的传输	169
6.1	层流流场中光波的传输	170
6.2	湍流流场中光波的传输	173
6.3	高速流场光学传输特性	180
6.4	光学传输效应对成像探测的影响	181
6.5	高速流场光学传输效应数值模拟	182
第7章	激波与光学头罩的气动热辐射效应	187
7.1	激波辐射机理	188
7.2	光学窗口的红外热辐射计算	194
7.3	气动热辐射效应对光学成像探测系统信噪比的影响	196
7.4	高温激波和窗口气动热辐射数值模拟	197

第 8 章 高速飞行器光学头罩气动热效应	200
8.1 光学头罩绕流参数计算方法.....	200
8.2 光学头罩热流密度计算方法.....	205
8.3 光学头罩热流密度算例.....	206
第 9 章 气动光学效应测试试验	209
9.1 测试试验的目的和意义.....	209
9.2 高速流场密度测试试验.....	210
9.3 G-D 系数测试试验.....	218
9.4 光学传输效应测试试验.....	221
9.5 气动热效应测试试验.....	230
9.6 激波和窗口气动热辐射效应测试试验.....	235

第三篇 气动光学效应校正方法探讨

第 10 章 气动光学效应校正方法概述	241
10.1 气动光学效应校正基本方法.....	241
10.2 气动光学效应校正验证试验技术.....	243
第 11 章 图像复原校正	248
11.1 图像的退化模型.....	248
11.2 退化模型的数值模拟.....	252
11.3 经典复原滤波器.....	254
11.4 图像盲反卷积.....	261
11.5 序列图像分析.....	262
11.6 数字图像偏移的校正原理.....	263
第 12 章 光电校正	266
12.1 气动热辐射效应的校正.....	266
12.2 自适应光学校正.....	266

12.3	图像帧频与帧积分时间自适应变化校正·····	276
12.4	光学与图像处理综合校正·····	277
第 13 章	高速飞行器光学侧窗致冷头罩设计·····	282
13.1	光学头罩侧窗致冷原理·····	282
13.2	光学头罩侧窗设计·····	292
13.3	光学头罩侧窗致冷系统设计·····	294
13.4	光学头罩罩体设计·····	298
第 14 章	湍流流场控制·····	301
14.1	壁面冷却·····	301
14.2	吸气·····	302
14.3	壁面形状的优化·····	304

绪 论

一、气动光学效应的产生

自从人类发明飞行器以来，就一直在探索如何使拦截器飞行更远、更快和更精确，在新技术与新需求推动下，新一代拦截器朝着高速飞行、高精度探测与高精度控制、以精度代能量的方向发展。拦截器发动机推力的增加和轻小型化是实现其高速飞行的主要技术途径，实现轻小型化、高速飞行和以精度代能量的主要技术途径是采用光学成像探测制导。新一代拦截器具有如下4个新的特点：1) 高速高加速；2) 凝视红外成像体制；3) 侧窗探测与控制；4) 直接侧向力和气动力复合控制。

拦截器在大气层中高速飞行时其光学头罩周围流场将产生真实气体效应、激波诱导边界层分离、无粘流与边界层的相互干扰等，从而引起气流密度变化、温度变化、组成成分变化，甚至产生气体分子电离现象等。可见，带有光学成像探测制导系统的高速飞行器在大气层内飞行时，光学头罩与来流之间形成复杂的流场，对光学成像探测系统造成热、热辐射和图像传输干扰，引起目标图像偏移、抖动、模糊，这种效应称为气动光学效应(Aero-Optical Effect)，如图1所示。气动光学效应包括：高速流场光学传输效应、激波与窗口气动热辐射效应和光学头罩气动热效应。

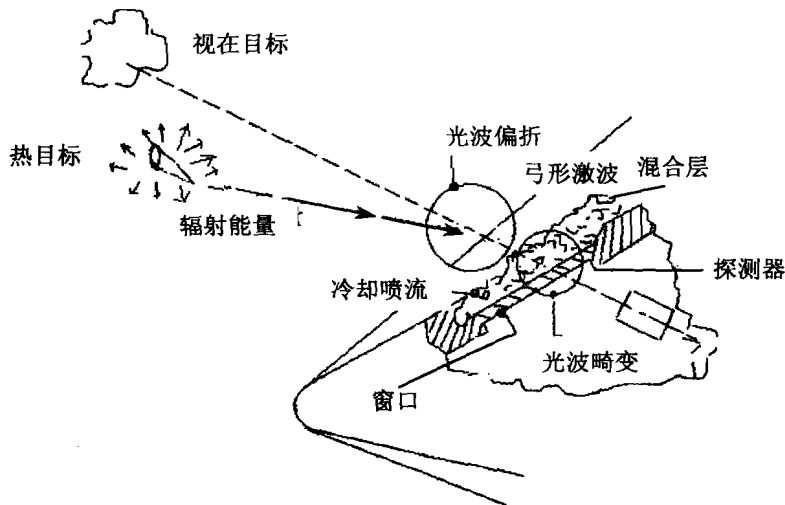


图1 飞行器光学头罩产生气动光学效应示意图

根据光学原理，光线在介质中传播时，其传输特性取决于光线入射方向、介质的介电常

数、吸收损耗和散射特性等。光学头罩周围流场不断变化将影响来自目标光线的传输,使光学成像器中目标图像产生模糊、抖动、偏移和能量衰减,这种效应称为飞行器高速流场光学传输效应,简称流场光学传输效应;飞行器在大气层中高速飞行时其光学头罩周围高温激波和被气动加热的窗口产生强的红外辐射,形成辐射干扰,甚至使光电探测器饱和而不能接收来自目标的辐射,这种效应称为飞行器光学探测系统气动热辐射效应,简称气动热辐射效应;飞行器在大气层中高速飞行时其光学头罩与来流之间发生剧烈的相互作用,头罩温度升高,使光学成像探测系统处于严重的气动热环境,这种效应称为飞行器光学头罩气动热效应,简称气动热效应。

气动光学效应使光学探测制导系统对目标探测信噪比降低,从而减小了对目标的探测距离,严重时甚至形成“热障”而淹没需探测的目标信号;对目标的检测识别概率降低,抗诱饵、识别假目标能力降低,严重时甚至无法检测识别目标;对目标的视线角位置测量发生偏折,视线角速率发生抖动,而引起探测制导精度急剧下降;产生的气动热环境影响光学头罩工作性能,严重时甚至对光学头罩产生热破坏作用。

二、影响气动光学效应的因素

气动光学效应是研究飞行器高速飞行产生的复杂流场对其成像探测制导系统带来的影响,而飞行器在大气层中飞行时,其光学头罩外流场特性将取决于飞行器的飞行弹道参数、光学头罩的结构及致冷方式和周围大气环境,且这种效应对成像探测系统的影响程度与其光电参数密切相关。飞行器飞行弹道参数主要包括:飞行速度、飞行姿态、飞行高度等,由飞行器总体技术指标确定;大气环境直接影响来流参数,它包括:大气温度、密度、压力、组分等随高度变化的特性,这些特性可以通过求解大气状态方程或直接查阅相关资料得到^[1]。成像探测系统的光电参数主要包括:接收口径、视角范围、光学分辨率、工作波段、成像帧频与积分时间和光学系统焦距等,它由成像探测系统总体指标确定。

高速飞行器光学致冷头罩一般由罩体、光学窗口和窗口致冷系统等3部分组成。光学窗口的结构及致冷方式,是影响窗口外流场特性的主要因素之一。窗口主要有两种形式,第一类为头部多孔径光学窗口^[2],如图2所示;它具有较好的视线跟踪范围,不需要外加飞行器滚动控制使其对准目标,但致命的弱点是光学衍射效应大,孔径效率低,结构工艺复杂。第二类为侧窗致冷光学窗口^[3],如图3所示,一般是将一块平面光学窗口安装在头罩侧表面,略低于表面,它保持了头罩外形,光束不受窗口孔径衍射限制,易安装,但最大的缺点是窗口大面积暴露在灼热的边界层内,在大气层内飞行时窗口需要冷却;另外为了保证目标在窗口视角范围之内,必须外加飞行器的滚动控制以保证窗口始终对准目标。

窗口冷却主要采用两种方式:外部喷射冷却和内部蒸发冷却,即外冷、内冷两种形式。外部喷射冷却有两种形式:一种是从窗口前(或四周)喷射出一种低温气流在窗口外形成一层薄膜,将光学窗口和外面灼热的气流隔开,从而达到窗口隔热致冷目的。它要求整个工作过程中在窗口外侧形成一个均匀稳定的气体冷膜,这种方法又称外部喷射薄膜冷却方法;另一种方法是喷射出起化学反应的气体或液体,利用化学反应吸热来冷却窗口。内部蒸发冷却方法也有两种形式:一种为框架内冷,选用导热率极高的光学材料(如:光学级金刚石)制作

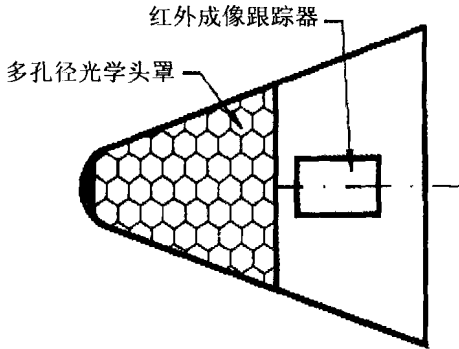


图2 多孔径光学窗口

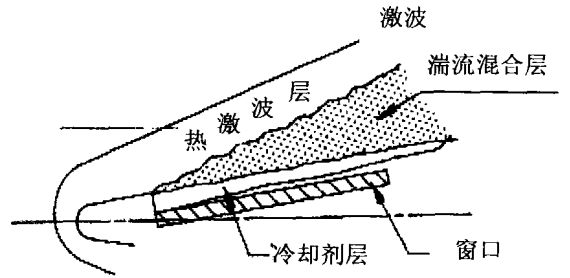


图3 侧窗致冷光学窗口

光学侧窗口，用金属框架结构连接，在连接框架上开通道使冷却液在通道内流动，实现对窗口的冷却；另一种是将冷却剂通过窗口内部的沟槽输入到窗口内部，沟槽分布在窗口上下表面中间，确保足够的散热^[4]，如图4所示。外冷和内冷均是光学侧窗头罩有效的冷却方法，两种方法各有优缺点。外冷方法简单，易实现，但它将冷却气体喷流射到边界层，冷却气体与边界层气体混合，形成剪切/混合层，这个混合层具有复杂的湍流特征，将附加产生严重的气动光学效应，且需要的致冷剂量较大；内冷的优点是不干扰窗口外的流场特性，不会因致冷产生新的气动光学效应，但是由于沟槽冷却剂的流动对穿过其中的光线将产生严重的扰动，因而为了避免这部分光线给图像带来的模糊，一般将这些冷却沟槽设计成光线不可透性，用来解决光线扰动问题，但降低了接收孔径效率。因而人们又探讨形成了一个“二元”光学窗口的概念，如图5所示，它采用会聚光束的空余间隙，进行致冷通道的设计，从而既解决了致冷剂对光线的扰动问题，又最大限度地提高了信号接收孔径。至于冷却剂种类繁多，主要有氮气、氨气、氩气和氦气等。在内冷方式中，甚至可以用循环水致冷。

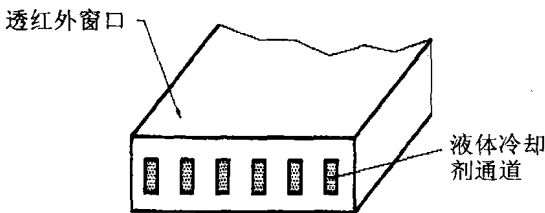


图4 内冷窗口

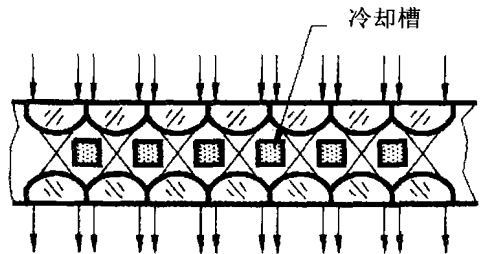


图5 “二元”致冷光学窗口

三、气动光学研究内容

气动光学是应用光学和流体力学理论研究气动光学效应产生机理，应用光电原理、信息信号处理技术和流体力学理论等研究气动光学效应校正方法，进行效应机理和校正方法试验研究的科学。研究内容包括：气动光学效应机理研究、气动光学校正方法研究、气动光学效

应与校正验证试验研究和高速飞行器光学头罩技术研究等 4 个方面。

1. 气动光学效应机理研究

研究光学头罩高速绕流, 尤其是湍流流场形成机理、高速流场气体辐射机制和光波在高速流场中传输的机理, 建立有扰流和无扰流时飞行器光学头罩绕流流场的描述方法、计算模型和产生图像模糊、偏移和抖动的理论计算模型, 建立光学头罩和高温流场热辐射分析计算模型和数据库。

2. 气动光学效应校正方法研究

研究应用湍流流场控制理论、自适应图像复原理论、光电校正理论以及气动热辐射理论、光谱滤波技术、背景辐射噪声处理等进行气动光学效应校正的原理和方法。

1) 湍流流场气动光学效应控制方法。在掌握光学头罩高速绕流气动光学效应机理的基础上, 应用雷诺平均法 (RANS)、大涡模拟 (LES) 和直接数字解 (DNS) 等流场计算理论, 建立流场参数与光学头罩结构、致冷之间的关系, 优化光学头罩设计, 使头罩绕流形成的湍流对图像的影响最小, 从而达到减小飞行器气动光学效应的目的。

2) 自适应图像复原。应用图像复原理论, 研究变化频率高达 10^6Hz 的随机介质引起的图像抖动、模糊的自适应复原的原理和方法。

3) 光电校正方法。应用自适应光学原理, 光电子技术, 光学与信号处理相结合的方法进行气动光学效应校正。

4) 气动热辐射校正方法。研究高温激波产生的热辐射机理和建立激波光谱辐射数据库的基础上, 采用光学滤波、光学系统优化设计、光学头罩窗口致冷、电子信号处理等方法减小气体热辐射对成像探测系统信噪比的影响。

3. 气动光学效应与校正验证试验研究

由于气动光学效应机理与校正方法研究是跨多学科的前沿性研究课题, 研究过程中需对许多新理论、新方法和新概念进行相应的验证试验, 而这种验证试验又是一个全新的课题, 需要同时开展气动光学效应与校正的验证试验原理和方法研究, 为进行气动光学效应机理与校正方法研究提供技术基础。

4. 高速飞行器光学头罩技术研究

应用气动加热和热交换理论, 建立高速飞行器光学头罩热环境分析方法, 研究致冷与非致冷光学头罩技术方案, 结合光学头罩总体技术指标要求在综合考虑致冷与非致冷技术、头罩材料、湍流控制等因素的基础上, 寻找非致冷头罩和致冷头罩的设计方法。

四、国外气动光学研究动态

为了满足高速飞行器技术发展的需求, 发达国家自 20 世纪 80 年代初就投入大量人力与物力, 耗费巨资系统性开展气动光学效应与校正技术研究, 在理论上和工程实践上都取得了

重大突破, 并已成功地应用于新一代武器装备中。目前美国和以色列合作研制的“箭”式(Arrow)导弹, 突破了高速导弹光学成像探测气动光学效应与校正等一系列问题, 并成功地进行了拦截飞行试验而转入定型装备阶段。美国“战区高空区域防御系统”(THAAD)的拦截弹也采用光学侧窗探测体制, 于近几年完成了高层拦截飞行试验之后, 随着气动光学问题的解决也正在考虑进行低高度拦截飞行试验^[5-7]。美国正在研制试验的“大气层内拦截弹”(AIT)采用双波段红外成像制导体制, 正在突破相关的气动光学效应校正技术。美国机载激光武器(ABL)以波音747飞机为载体, 完成了对TBM主动段拦截演示验证试验^[8], 从而说明美国以机载精密跟瞄系统和激光发射系统为应用背景的气动光学效应问题基本得到解决。

1. 气动光学效应机理研究动态

美国系统地进行了气动光学效应机理研究, 建立了一系列的完整的气动光学效应理论及置信度较高的数据库和数学模型, 开发了完整的气动光学分析软件(如: Aero-optical Quality Code(AOQ)), 较系统地揭示了来流参数、导弹飞行参数、光学成像探测工作波段和末制导系统参数及其之间的内在联系和引起的气动光学瞬态效应的变化规律。

1) 美国 Teledyne Brown Engineering 公司系统地进行了气动光学效应机理研究^[9], 建立了完善的气动光学效应数学模型, 完成了气动光学效应分析软件(AOQ Code)的开发, 并建立了相应的验证试验系统(DNAOS)。研究结果表明: 对于确定的流场, 图像模糊、抖动程度与探测器的积分时间有关, 在一定的范围内积分时间越长, 抖动引起的图像模糊越严重, 抖动分量越小; 反之积分时间越短, 抖动分量越明显, 图像越清晰。

2) 美国高超声速导弹性能评估中心 HIPEC(Hypersonic Interceptor Performance Evaluation Center)建立了气动光学效应机理分析软件^[10], 可以对有外冷扰流和无外冷扰流情形下的高速导弹光学头罩产生的气动光学效应进行分析和预测。

3) 美国 Analysis and Applications Associates, Inc & Anser Corporation 共同开发研制了一种气动光学效应机理分析软件^[11], 它包括: CFD, GASP, OPD 等模块, 该软件可以对气动光学效应引起的像偏移、像模糊进行分析预测。美 SY Technology IN 开发的气动光学分析软件 AOQ(Aero-Optical Quality), 预测了飞行速度 $Ma=7.2$ 的导弹气动光学效应产生的模糊^[12]。

4) 美国 Science Application International Corporation 开发研制了激波辐射数学仿真软件, 它包括: EXTC 流场计算模块、SIRRM-II 辐射传输模块和 NORSE 热辐射数据库^[13], 并以一些典型的拦截飞行过程为例, 分析预测了激波辐射及其对信噪比的影响。

2. 气动光学校正方法研究动态

美国系统地开展了气动光学校正理论研究, 提出了多种气动光学效应校正新原理、新方法。如基于大涡模拟(LES)理论的湍流流场图像抖动、模糊的控制技术, 利用迭代盲反卷积、空变图像复原技术实现流场产生的图像模糊、抖动和偏移的校正, 以及多种新的气动光学效应光电校正原理。

1) 基于大涡模拟(LES)理论的湍流流场图像抖动、模糊的控制技术。美国 Robert E .Childs 采用大涡模拟(LES)方法来研究和预测湍流引起的气动光学效应^[14]。提出了横向会聚和流线弯曲等两个二次应力概念实现对湍流控制。LES 仿真结果表明, 流线弯曲控制湍流可以达

到明显降低图像失真的目的, 从而通过建立光学头罩结构及其致冷与流场参数的关系, 优化光学头罩结构和致冷设计, 使湍流对图像的影响最小, 达到减小气动光学效应的目的。

2) 利用图像处理方法进行气动光学效应的校正。美国空军 Phillips 实验室利用迭代盲卷积 (Iterative Blind Deconvolution)、空变图像复原 (Space-Varying Restoration) 等图像复原技术进行了气动光学效应校正技术研究^[15], 取得了大量的研究成果。

3) 利用光电原理进行气动光学效应校正。SY Technology Inc 以弹载应用为背景研制成功的微型高频光电子自适应校正系统^[16], 应用光学干涉原理进行高速流场引起波前畸变检测, 采用微光学 (Micro-optical) 技术和照相平板印刷 (Photolithographic) 技术制成校正光电子器件, 其校正工作频率可达几百千赫兹, 基本满足高速导弹气动光学效应校正的需要。

3. 气动光学效应与校正验证试验研究动态

1) 美国国防部拨巨资建立了气动光学评价中心 (AEDC), 专门进行气动光学效应及校正技术的研究与试验^[17]; 耗巨资建造了世界上最大、能力最强的卡尔斯班国家高能激波风洞 (LENS)^[18], 它能够全尺寸模拟在大气层内高速 ($Ma=15$) 飞行的导弹头罩的环境流场参数。该风洞能有效地把试验模型、测试仪器与风洞振动隔离, 以确保获得的气动光学测试数据准确。在试验时有长达 20ms 的稳定运行时间以模拟流场特性, 进行完整的流场气动光学效应测试试验; 美国 NSWC (Naval Surface Warfare Center) 从 1978 年至 1995 年利用 9# 高速风洞进行了多次侧窗光学成像探测与气动光学试验, 取得了大量的数据^[19, 20]。此外, 美国阿诺德工程发展中心的高超声速风洞也进行了多次气动光学试验。

2) McDonnell Douglas Aerospace 对高速流场瞄视误差进行了飞行测试试验, 1992 年 8 月在白沙靶场用 HEDI KITE-2A 进行了飞行测试试验^[21]。在完成测试试验之后, 进行了理论预测值与试验测试值的对比分析。

3) 美国 Teledyne Brown Engineering 公司研制开发了双喷嘴高超声速气动光学效应模拟器 (Dual Nozzle Aero-Optic Simulator)^[22], 它应用精密的光学测量设备进行流场特性, 尤其是湍流流场参数的测试及其对光学图像传输特性影响的测量, 并同时进行气动光学效应机理和校正方法的试验研究。

五、气动光学的工程应用

气动光学研究成果将对解决高速飞行器光学成像探测系统面临的气动光学效应问题具有重要意义, 也可用于机载激光 (ABL) 武器、机载光学精密跟瞄系统和激光照射系统气动光学效应的分析与校正, 所取得的技术成果通过改进还可以推广用于远距离地面光电探测跟踪系统、卫星对地探测光电系统的图像复原与校正等。

气动光学研究涉及光学、流体力学、工程热物理、分子物理、计算机科学、信息信号处理和材料科学等多门学科, 因此, 研究成就将带动相关学科跨越式的发展, 拓展我国空气动力学、光学和信息信号处理等学科的研究领域, 增强空气动力学与光学交叉学科研究的试验能力, 推动材料科学尤其是光学材料科学的发展。

可见, 气动光学研究在国民经济建设领域尤其是国防现代化建设领域具有广阔的工程应