

高速飞行器成像探测气动光学效应研究 (特约)

张丽琴^{1,2}, 费锦东^{1,2}

- (1. 北京电子工程总体研究所, 北京 100854;
2. 航天系统仿真重点实验室, 北京 100854)

摘要: 随着各种飞行器对信息获取的精确性和实效性依赖程度的大幅度提高, 采用光学成像探测技术和追求高速飞行已成为各种飞行器发展的趋势。光学成像制导飞行器在大气层内高速飞行时, 光学头罩与来流之间发生剧烈的相互作用, 光学头罩与来流之间形成复杂的流场, 在光学窗口中产生复杂的热响应, 给头罩内的光学成像探测系统带来气动热辐射噪声, 带来目标图像的偏移、抖动、模糊等气动光学效应。文中针对高速飞行器成像探测面临的气动光学效应, 从机理、工程和应用三个层次, 提出了气动光学研究思路和后续工作展望, 旨在为气动光学效应研究提供参考思路。

关键词: 高速飞行器; 成像探测系统; 气动光学效应

中图分类号: TJ760 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20201016

Study on aero-optical effect of the imaging detection system of high speed flight vehicle(*Invited*)

Zhang Liqin^{1,2}, Fei Jindong^{1,2}

- (1. Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China;
2. Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing 100854, China)

Abstract: With the increasing dependence on the accuracy and effectiveness of information acquired during flight, the photoelectric image detection and hyper-speed flight technology have become the development trend of the future flight vehicles. However, when the flight vehicles equipped with optical imaging detection and guidance system fly at high speed in the dense atmosphere, the optical dome and incoming flow generate a complex flow field because of intense interaction. The complex thermal response generated in optical windows brings aerodynamic thermal noise for the optical imaging detection system in the optical dome, and causes deviation, jitter, blur of the target, which is called aero-optical effect. From three levels—mechanism, project and application, research ideas and further works were put forward for aero-optical effect faced by the imaging detection system of high speed flight vehicle, aiming at providing reference ideas for study on aero-optical effect.

Key words: high speed flight vehicle; imaging detection system; aero-optical effect

收稿日期:2020-03-10; 修订日期:2020-04-16

作者简介:张丽琴(1974-),女,研究员,博士,主要从事光电探测、气动光学方面的研究。Email: lsp@bit.edu.cn

0 引言

光学成像制导飞行器在大气层内高速飞行时,其光学头罩与来流之间发生剧烈的相互作用,光学头罩与来流之间形成复杂的流场,在光学窗口中产生复杂的热响应,给头罩内的光学成像探测系统带来气动热辐射噪声,并引起目标图像的偏移、抖动、模糊,这种效应称为气动光学效应 (Aero-Optical Effect)^[1-3],如图 1 所示。气动光学效应主要包括光学传输效应和气动热辐射效应,分别由高速流场和窗口两部分的影响组成。

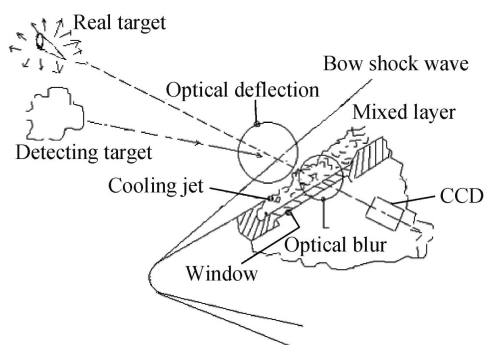


图 1 气动光学效应示意图

Fig.1 Diagram of aero-optical effect

气动光学效应将造成光学成像探测系统探测威力与探测精度的下降,主要体现在以下几个方面:一是产生的气动热环境影响光学头罩的工作性能,严重时甚至对光学头罩产生热破坏作用;二是气动光学效应使光学成像探测系统信噪比降低,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;三是引起目标场景模糊,降低探测场景中目标检测识别的能力,严重时甚至无法检测识别目标;四是对目标的视线角位置测量发生偏折,视线角速率发生抖动,引起探测精度下降。

借鉴国外气动光学研究思路,高速飞行器成像探测气动光学效应研究主要从机理、工程和应用三个层次开展。气动光学效应机理研究主要涉及空气动力学和光学两个学科领域,如何应用这两个学科领域的研究成果,为气动光学效应研究服务,避免偏离气动光学研究主题而陷入纯空气动力学和光学领域前沿性理论研究,是做好气动光学机理研究首先需要思考的问题;在取得气动光学效应机理研究成果的基础

上,如何将研究成果进行集成和凝练升华以提取气动光学效应特征规律,为高速飞行器采用成像探测技术奠定基础,是气动光学工程研究时需要仔细考虑的问题;再次,在气动光学效应特征规律研究的基础上,如何结合高速飞行环境开展气动光学效应抑制校正,实现气动光学研究的最终目的,是气动光学应用研究需要考虑的问题。

1 气动光学效应机理研究

气动光学效应机理研究包括:研究气动光学效应(像模糊、像抖动、像偏移、失真波前、失真图像等)与来流参数、飞行器飞行参数、光学成像探测系统等参数之间的内在联系和基本规律;从空气动力学、信息信号处理、光电子等研究领域寻找气动光学效应校正的新原理、新方法;通过试验研究检验和完善气动光学效应理论模型,评估和完善气动光学效应校正方法。在研究过程中,主要涉及到高速流场机理理论与试验研究、气动光学传输效应机理理论与试验研究、气动热辐射效应机理理论与试验研究和气动光学校正方法与试验评估研究等方面的内容。

1.1 气动光学效应机理理论研究

1.1.1 高速流场机理理论研究

高速流场机理研究针对气动光学效应所关心的光学头罩窗口外密度场、速度场、温度场及其流动特性,重点分析压缩性、非线性、壁温耦合、冷却扰流等对高速飞行器光学头罩流场特性的影响,根据高速飞行器光学头罩绕流流场的特点,应用雷诺平均(RANS)+湍流模型的方法求解 N-S 方程并进行数值模拟,得到流场参数的平均分量 and 脉动统计分量;采取大涡模拟 (LES) 法和雷诺平均/大涡模拟 (RANS/LES) 混合法,研究使用蒙特卡罗直接模拟 (DSMC) 法,探索使用直接数值模拟 (DNS) 法,开展高速流场精确瞬态模拟。采取理论分析、数值模拟与风洞试验验证相结合的方法,建立光学头罩高速流场参数描述体系和数学模型,研究高速流场数值模拟方法,研制流场数值模拟计算软件,为气动光学传输效应机理研究提供技术基础。

1.1.2 气动光学传输效应机理理论研究

气动光学传输效应包括高速流场光学传输效应和窗口光学传输效应两部分。

光波在高速流场介质中的传输效应的描述,取决于对高速流场参数的揭示程度。按照得到的流场参数的精细程度,分别采用不同的方法来研究。对于流场稳态分量,根据流场参数的分布规律,建立介质折射率场的栅格模型和折射率场分层分布模型,使用光学路径求解法对经过流场稳态分量的光线进行追迹,得到层流流场的光学传递特性;对于基于统计描述的流场脉动分量,应用随机相位屏理论等统计方法来描述光波在湍流脉动流场中的传输过程;对于基于精确瞬态的流场脉动分量,应用瞬态相位屏理论和非均匀数值模拟等两种方法来描述光波在湍流流场中的传输过程。

窗口光学传输效应理论研究以光学窗口的温度场数学模型和热应力应变数学模型为理论基础,建立不同飞行参数下窗口热环境计算模型,应用流体力学和热交换原理建立致冷特性分析、窗口材料与流场热交换关系的模型,研究窗口热应力应变的计算方法以及气动热对光学头罩材料的作用机理;应用有限元方法和光波的传输理论,结合窗口热应力分布和形变计算结果,进行光波在窗口中的传输计算。

1.1.3 气动热辐射效应机理理论研究

气动热辐射效应包括光学窗口热辐射效应和高速流场辐射效应两部分。

光学窗口热辐射效应描述的准确性主要依赖于光学窗口材料的发射率和光学窗口的温度分布。窗口材料发射率受窗口的粗糙度、温度和材料的影响,通过建立不同温度下光学材料发射率计算的数学模型并辅以适量试验验证,揭示窗口发射率的变化规律,应用普朗克辐射定律描述窗口辐射特性。

在开展高速流场热辐射效应机理理论研究时,首先应用分子物理、电动力学、热力学理论,完善现有气体辐射机制,建立大气各组份不同温度下的辐射特性数据库,再结合光学头罩外的流场参数进行高速流场气体辐射特性计算。

1.2 气动光学效应机理试验研究

高速飞行器光学成像探测气动光学效应机理研究在围绕机理理论研究的同时需要开展相应的试验研究,提出针对机理理论的气动光学效应测试试验方法及验证手段,通过试验来检验理论模型的正确性和有效性。气动光学效应机理风洞模拟试验研究主要

包括高速流场测试试验、气动光学传输效应测试试验、气动热辐射效应测试试验和校正效果性能评估试验四个方面的试验内容。

1.2.1 高速流场测试试验方法研究

高速流场机理测试试验主要针对气动光学效应研究所关心的光学头罩窗口外高速流场密度场、速度场、温度场的时空特性及其流动特性,研究不同模拟参数、来流品质及其控制、洞壁干扰、头罩模型等对气动光学效应模拟的影响,提出合理的相似准则,应用超声速风洞、高超声速风洞、双喷管模拟器实现高速绕流流场参数模拟,应用电弧风洞实现光学窗口热环境参数模拟。

1.2.2 气动光学传输效应测试试验方法研究

气动光学传输效应测试试验主要包括高速流场光学传输效应测试试验和窗口光学传输效应测试试验,发展或改进现有的测试设备和方法,实现对像模糊、像偏移、像抖动、失真波前等参数的积分量和瞬态量的测量,采用基于机器学习/数据挖掘的图像信息处理技术,通过对高速流场气动光学传输效应试验数据的处理,得出气动光学传输效应引起的失真图像偏移、抖动、模糊量以及失真波前倾斜、方差、谱特性等传输效应描述参数。

1.2.3 气动热辐射效应测试试验方法研究

气动热辐射效应测试试验包括高温气体各组元辐射机制测试试验、高速流场辐射效应测试试验和高温窗口辐射效应测试试验。在组分、密度、温度、(非)平衡状态相似条件下,应用等离子体微波加热器实现对高温气体各组元辐射机理的试验模拟;在马赫数、平均密度、温度和(非)平衡状态相似条件下,应用激波风洞实现高速流场辐射效应的模拟;在窗口温度和材料相似条件下,应用电弧风洞或加热炉实现高温窗口辐射效应的模拟。应用光谱辐射计和红外热像仪等实现对高温气体各组元不同温度下的光谱辐射机制的测量;采用光谱积分辐射计和成像系统实现对高速流场和窗口辐射效应的测量。

1.3 气动光学效应机理理论与试验验证

气动光学效应机理理论与试验的相互验证,分三个层面来展开。第一,考核机理理论自身结果的正确性,首先是对不同理论模型和数值计算方法及其结果进行评估和考核,其次是根据给出的典型考核算例进

行不同模型数值计算结果的考核及对比分析。第二,考核测试试验自身结果的正确性,对风洞测试试验结果,首先是对风洞试验的测试技术、测试精度及测试结果进行评估和考核,其次是根据给出的典型试验状态在不同风洞上开展测试试验,进行不同测试方法与测试结果的对比分析和考核。第三,在以上分析考核的基础上,重点进行理论计算与测试试验的互相验证,以理论指导试验,评估预测试验结果;以试验验证理论计算结果以改进完善理论计算模型和计算方法,达到理论与试验相辅相成的目的。

1.4 气动光学校正及其评估方法研究

主要从信息信号处理和光电工程等两个方面开展气动光学校正方法研究,进行数学建模仿真和试验验证。气动光学校正主要有数字图像复原校正和光电校正方法,数字图像复原校正包括基于湍流退化模式的图像复原与校正、基于时间序列退化的图像校正和基于空变的图像复原与校正,光电校正方法包括图像积分时间随变校正和快速波前补偿光电校正。

气动光学效应校正评估试验以气动光学效应与校正理论的校验为目的,研究气动光学校正有效性评估方法,主要通过数学仿真、半实物仿真和风洞试验进行气动光学校正效果的评估,通过校正评估试验来验证气动光学效应校正原理的有效性和理论模型的准确性,从而不断完善气动光学校正方法和试验评估方法。

2 气动光学工程研究

开展气动光学工程研究时,首先利用气动光学效应机理研究成果,根据高速飞行器飞行参数和光学头罩复杂结构等参数,开展典型工作状态高速流场传输效应、耦合换热条件下光学窗口传输效应、高速流场辐射效应、高温窗口热辐射效应及其对探测性能影响预测技术研究;然后根据气动光学理论预测结果对光学头罩、成像探测系统、飞行参数等设计提出约束条件,与气动光学效应预测过程反复迭代,达到气动光学效应影响的最小化,实现飞行参数、光学头罩及成像探测系统的最优化设计;对于气动热环境恶劣的飞行条件,必要时采用窗口致冷方式,减小高热环境对探测性能的影响;采取上述措施后,对于剩余的气动光学效应,采用数字图像复原方式完成气动光学像偏

移、像抖动和像模糊的校正。

2.1 气动光学效应预测技术

利用由气动光学效应机理研究建立的数学模型和仿真软件,根据飞行器的飞行参数结合头罩结构参数及成像探测系统相关参数,在不同飞行状态高速流场参数和光学窗口热环境及热响应计算的基础上,完成高速流场光学传输效应、窗口光学传输效应、高速流场辐射效应和高温窗口辐射效应的分析计算;然后建立光学传输效应引起的图像抖动、偏移和模糊与成像探测参数空间分辨率、积分时间、视角方向、通光口径等之间的关联关系,分析气动光学效应对成像探测系统探测威力和探测精度的影响规律,提出飞行条件、光学头罩和成像探测系统约束条件。

2.2 头罩外形优化技术

通过合理优化光学头罩外形,使飞行器在头罩外流场品质较好,保持层流状态或充分发展的湍流状态;通过合理设计和优化光学窗口的安装形式、导热和边框结构,使得光学窗口在飞行条件下产生的热响应均匀,从而减小高速流场和窗口传输效应的影响。

2.3 光学窗口致冷技术

为适应高热环境下目标探测的需求,对光学窗口进行致冷以降低飞行过程中的窗口温度对红外成像探测的影响,避免“热障”并降低对窗口热环境适应性的要求。窗口致冷可采用外部冷却或内部冷却方式^[4-5]。

外部冷却包括窗口表面冷却喷流和前伸激波针/逆向喷流等方式。窗口表面冷却喷流方法是从窗口前缘或侧面喷射出气流,在边界层中形成气膜,避免外流场直接作用于光学窗口表面,或者是从窗口前缘或侧面喷射起化学反应的气体或液体,利用化学分解反应吸热来冷却窗口;前伸激波针/逆向喷流是在头罩球头处通过流动控制的方法,改变头罩窗口表面的流场状态,达到降低热流的目的。

内部冷却包括边框致冷和开内冷通道致冷两种方式。边框致冷是选用导热率极高的光学材料制作光学窗口,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,实现散热。

2.4 气动光学效应数字图像校正技术

在气动光学效应机理研究得到的主要气动光学

效应图像校正方法的基础上,利用气动光学效应的大量数学仿真和试验测试数据,开展校正算法有效性评估,并对算法进行优化和简化,使之适应特定的高速飞行器成像探测系统,并优选出可能用于高速飞行环境的算法,作为气动光学效应高速飞行环境校正算法基础。

3 气动光学应用研究

在气动光学工程研究的基础上,结合高速飞行器在处理实时性、快速性和信息容量等方面的局限性,如何开展气动光学效应应用研究实现气动光学效应抑制和校正,是气动光学应用研究需要重点考虑的问题。在气动光学效应抑制校正方面,基于目前信号处理水平,采用基于窗口致冷、基于理论预测的气动光学效应校正技术途径有一定的可行性。

3.1 高速飞行器窗口致冷技术研究

通过建模仿真得到窗口致冷效果与飞行参数等因素的相互关系,充分考虑高速飞行环境窗口致冷结构设计、致冷气瓶体积重量、致冷流量控制、致冷干扰力矩等关键问题,通过高超声速炮风洞验证致冷状态适用性、电弧风洞验证致冷效果、高焓风洞验证高热环境探测性能的分级试验验证方式,实现对窗口致冷效果的评估,完成窗口致冷理论分析模型校验,优化窗口致冷设计。

3.2 气动光学效应校正技术研究

窗口传输效应引起的像偏移可通过理论预测建立校正库实时校正,对引起的像模糊可采取理论预测和帧间实时估计得到失真图像的降晰模式,利用非线性滤波方法来校正。高速飞行环境条件下的气动光

学效应校正技术研究,重点解决像模糊校正高速飞行环境下的实时性技术。为解决高速飞行环境气动光学像模糊校正实时性问题,校正系统采用高速大容量混合并行架构高效并行地处理图像数据,校正算法采用高度并行结构;充分利用现有的风洞试验条件,基于试验数据构建较为可靠的图像退化模型和参数,通过改善校正算法的迭代起点,采取校正精度接力方式,提高算法的收敛速度。

4 结论

从机理、工程、应用三个层次提出了高速飞行器成像探测气动光学效应研究思路。后续需要进一步加强研究,逐步提升气动光学效应研究水平,为提高高速飞行器成像探测系统目标信息精确获取能力提供坚实的技术基础。

参考文献:

- [1] 殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.
- [2] Sutton George W, Pond John E, Snow R, et al. Hypersonic interceptor performance evaluation center aero-optics performance[C]//Annual Interceptor Technology Conference, 1993. DOI: 10.2514/6.1993-2675.
- [3] Sutton G W. Aero-optical Foundations and Applications[J]. *Aiaa Journal*, 1985, 23(10):1525-1537.
- [4] Raghuraman P, Anderson B J, Sieger S, et al. The HEDI transpiration cooling concept-lightweight, durable, flight ProVen[C]//Joint Thermophysics Heat Transfer Conference, 1994. DOI: 10.2514/6.1994-2005.
- [5] Wojciechowski C J, Ravi K V, Jones G. Internally cooled window for endoatmospheric homing-update[C]//Annual Interceptor Technology Conference, 1993. DOI: 10.2514/6.1993-2684.