

专题报告

**[编者按]** 气动光学是现代光学的一门新分支学科。殷兴良研究员是我国这一新学科研究的组织者和开拓者。他率先带领一支科研队伍从事该领域的科学研究,并取得了一系列突破,对这一学科宝库做出了重要贡献。为了使国内学术界对气动光学学科内容及研究状况有所了解,关注该学科的进展;为了向国外学术界展示我国在这一领域的研究水平,本刊特发表殷兴良研究员最近撰写的这篇论文,以飨读者。

## 现代光学新分支学科——气动光学

殷兴良

(中国航天科工集团公司,北京 100039)

**[摘要]** 从气动光学学科发展历程出发,介绍了气动光学提出的背景,提出了气动光学的定义及内涵、研究对象和研究方法,描述了气动光学研究的主要内容:气动光学效应机理研究、气动光学效应校正方法研究、气动光学效应校正验证试验研究和高速飞行器光学窗口技术研究;详细阐述了国内开展气动光学学科理论基础、工程建模、试验原理及试验方法等研究途径,给出了一些典型的研究结果,指出了学科的应用前景和发展趋势。

**[关键词]** 空气动力学;湍流;光学;气动光学

**[中图分类号]** O43; O35 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)12-0001-06

随着新军事技术变革的到来,各种无人驾驶精确制导的飞行器(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制导和追求高速飞行,已成为当代各种精确制导(或打击)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,采用光学成像探测制导系统的精确制导武器气动光学效应越严重,并严重影响到探测的精度。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”,该领域的研究进展将直接影响高速飞行器光学探测系统的精确性,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。王大珩先生在笔者

主编的《气动光学原理》一书的序中称该书“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。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”<sup>[1]</sup>。

### 1 学科提出的背景

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,飞行器头罩(其上开有光学窗口,以下简称为“光学头罩”)与来流之间发生剧烈相互作用形成激波、边界层及其相互作用等复杂的流场,对光学成像探测系统形成气动热、热辐射和图像传输干扰,引起目标图像偏移、抖动、模糊,这

**[收稿日期]** 2005-08-04; **修回日期** 2005-09-01

**[基金项目]** 国家安全重大基础研究资助项目(51323)

**[作者简介]** 殷兴良(1953-),男,江苏无锡市人,中国航天科工集团公司研究员,博士生导师

种效应称为气动光学效应 (aero-optical effect)。它包括复杂流场光学传输效应、激波与光学头罩窗口气动热辐射效应和光学头罩气动热效应。

以美国为主要代表的国外发达国家,为了满足高速飞行器技术发展的需求,自20世纪80年代初投入大量人力与物力,耗费巨资系统地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一系列成果,并已成功地将这项技术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目标的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)的拦截弹采用了光学侧窗红外成像探测体制,在完成高层拦截飞行试验之后,正在考虑进行气动光学效应更加严重的低层拦截飞行试验<sup>[2,3]</sup>。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。除此之外,美国机载激光武器(ABL)以波音747飞机为载体,完成了对战术弹道导弹(TBM)主动段拦截演示验证试验<sup>[4]</sup>。这些公开报道表明,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已基本得到解决。

国内在气动光学领域的研究始于20世纪90年代初,由笔者在国内首先提出了研究气动光学效应这一新课题;并把气动光学效应与校正技术作为第四代空天防御武器的主要关键技术之一,率领课题组成员开展了深入的理论研究和有针对性的原理试验,取得了丰硕的研究成果,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。这些工作在国内该领域受到了广泛的关注。

随着国内外在气动光学领域研究的不断深入,主要由空气动力学、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——气动光学,正逐步形成,并日益呈现出广阔的应用前景。

## 2 气动光学内涵及研究内容

### 2.1 气动光学内涵

目前,在国内外学术界还没有对气动光学给出统一的定义。笔者以为,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。根据绕流速度的不同,气动光学的

研究对象、研究内容和研究方法也不同。当绕流为低速的大气湍流时,其对目标光学图像的影响可视为传统的“大气光学”的范畴,并采用自适应光学原理和方法进行校正,该方法在工程应用上已日趋成熟,但目前还难以适应高速飞行器弹载气动光学效应校正的需要,因此大气湍流对光学图像影响及其校正不作为本学科的研究重点。当绕流速度为超高速、并且高到飞行器前缘激波后边的高温将加热飞行器表面的湍流边界层,激发气体分子的振动,带来分子的共振效应,同时引起气体分子的化学反应甚至电离,成为等离子体。这种流体中光学传输发生质的变化并变得极其复杂,所涉及的学科将增加化学动力学、高温物理学、分子物理学等多学科领域,对它的研究需要创新思维,开辟新的研究途径,甚至形成另一支新学科(例如,可称为化学反应流气动光学)。因此,对它的研究也暂不作为本学科的研究重点。

本学科的研究基于绕流速度可以达到高超声速,但湍流边界层的气体是连续介质,在边界层内不存在气体电离和分子共振等现象。此时可以运用光学和流体力学理论研究气动光学效应产生机理,运用光电技术、信号处理技术和流体力学理论等研究气动光学校正方法。

可以预见,气动光学研究将带动多学科跨越式的发展,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。

### 2.2 气动光学研究内容

气动光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。研究分为气动光学原理、气动光学工程和气动光学应用3个层次。

气动光学原理是气动光学开展研究的基础,主要研究高速流场光学传输效应、高速流场热辐射效应和光学头罩气动热效应的形成机理;研究各种基本不同原理的气动光学校正方法及其试验验证方法,揭示气动光学的基本规律,为气动光学工程和应用研究提供基本理论依据,并牵引气动光学技术的发展。

气动光学工程主要研究气动光学效应工程描述与校正方法的数学建模与仿真、光学头罩设计方

法,开展气动光学校正原理系统研制和光学头罩样机研制,建立气动光学校正方法有效性和光学头罩的性能评估手段,开展评估试验,为气动光学校正技术和光学头罩技术在武器装备中的应用提供设计分析手段、技术解决途径和试验评估手段。

气动光学应用主要研究气动光学校正技术和光学头罩技术在具体型号中的实际应用,为高速飞行器采用光学成像探测实现高精度命中目标提供技术支撑。

围绕上述 4 个方面的研究内容和 3 个层次的工作,气动光学研究的主要内容有:

1) 气动光学效应机理研究。研究光学头罩高速绕流气体热辐射机理和光波在高速流场中传输的机理,建立飞行器光学头罩绕流场光传输描述方法、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(包括激波)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、光学滤波技术、背景辐射噪声处理技术等进行气动光学效应校正的原理和方法。其中包括:湍流流场气动光学效应控制方法、自适应图像复原方法、光学校正方法和气动热辐射校正方法等研究。

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及校正方法研究是跨多学科的前沿性研究课题,需要利用现有条件或创造条件(含风洞试验、光测量等)开展试验与测试方法研究,完成模型校验,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。

### 3 学科研究的主要工作

根据国内现有的工业技术基础和工程应用的迫切需求,课题组提出了国内开展气动光学的研究方法和研究途径,经过 10 多年的理论研究和工程实践,取得了较大的进展,奠定了气动光学学科建立的理论基础和应用基础。

#### 3.1 学科的理论研究

前期开展的学科理论研究主要是根据光学工程方法,建立描述气动光学效应的数学理论。气动光学效应中的气动热辐射效应和光学头罩气动热效应有比较成熟的工程计算经验模型,涉及的理论问题较少;光学传输效应在气动光学效应中占有极其重要的地位,国内在此领域的理论研究还是空白,是气动光学学科理论研究的重点。研究的难点在于:

1) 光学传输效应是由湍流流场引起的,而湍流流场运动是随机的、无规则的,其运动规律目前还没有完整的理论进行描述,一直是流体力学领域研究的热点和难题。

2) 由于湍流运动的随机性,目标红外辐射在随机场中的传输需要进行系列的假设,这些假设并没有理论的支撑,其准确性需要在工程实践中加以验证。

3) 气动光学研究主要关注密度场的问题,特别是密度脉动的描述,而流体力学关于这方面的研究极少,因而流体力学的研究方法不适应气动光学的研究。

为了抓住气动光学理论研究的主要矛盾,将湍流运动对光学传输效应的影响分解为两部分:平均运动产生的影响和脉动运动产生的影响。平均运动引起目标图像的偏移,可利用几何光学、物理光学原理进行分析,流场平均运动的规律利用层流模型来描述,在流体力学中有比较成熟的理论分析基础;脉动运动引起目标图像的抖动和模糊,情况非常复杂,需要利用波动光学、统计光学等学科理论进行分析。

课题组将湍流流场中光学传输效应的理论分析建立在如下假设的基础上。

假设 1: 湍流流场是一个随机场  $\zeta(r, t)$  ( $r$  为空间坐标  $x, y, z$ ;  $\zeta$  表示湍流的物理量), 且随机变量对于时间是独立平稳的。即不同时间的  $\zeta$  值看作  $\zeta(r)$  的不同实现, 对足够长时间的  $\zeta(r)$  将经历它的所有状态, 满足各态历经性。

假设 2: 高速飞行器湍流流场密度脉动具有空间相关性, 密度脉动的相关函数可用 von Kármán 模型、指数模型和 Gaussian 模型等来描述<sup>[5,6]</sup>。

假设 3: 高速飞行器湍流流场密度脉动对穿过其中的波前产生扰动, 这种扰动类似于一个随机相位屏对波前的影响, 且这个随机相位屏以某种速度  $v$  沿流体流动方向移动。

在上述假设基础上, 经过一系列的数学运算, 可以得出目标红外辐射传输到湍流介质后引起的相位脉动功率谱<sup>[1]</sup>:

$$F_{\Phi}(K_x, K_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C_{\Phi}(x, y) \cdot \exp[-j2\pi(K_x x + K_y y)] dx dy \quad (1)$$

$$\text{其中 } C_{\Phi}(x, y) = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \Phi(x, y), \quad \Phi(x, y) = \int_0^L \int_{-z}^{L-z} K_{GD}^2 \Delta \bar{\rho}^2(x, y, z) \text{cov}_n(x, y, z') dz' dz,$$

式中  $K_{GD}$  为 Gladstone-Dale 系数;  $\text{cov}_n(x, y, z)$  为折射率脉动相关函数;  $\rho(x, y, z)$  为流场密度;  $\lambda$  为光波波长;  $K_x, K_y$  为像面空间频率。

功率谱又可分为低频和高频两个部分, 即

$$F_{\Phi}(K_x, K_y) = F_{\Phi J}(K_x, K_y) + F_{\Phi B}(K_x, K_y) \quad (2)$$

其中  $F_{\Phi J}(K_x, K_y)$  为低频部分, 产生图像抖动;  $F_{\Phi B}(K_x, K_y)$  为高频部分, 产生图像模糊。

通过引入湍流流场相位脉动相关尺度、内时间尺度、瞬态空间截止频率和外时间尺度等参数, 可以进一步描述湍流随机相位屏的特性。湍流流场相位脉动相关尺度  $l_{\Phi}$  为

$$l_{\Phi} = \frac{1}{\sigma_0^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C_{\Phi}(x, y) dx dy \quad (3)$$

其中  $\sigma_0^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \Phi(0, 0)$ 。

内时间尺度  $\tau_{in}$  描述湍流随机相位屏脉动的内时间边界, 其表达式为

$$\tau_{in} = \frac{q_1 \sqrt{l_{\Phi}}}{v_{\max \text{ Turb}}} \quad (4)$$

式中  $v_{\max \text{ Turb}}$  为湍流流场最大速度;  $q_1$  为内比例系数。

瞬态空间截止频率  $f_{FZ}$  用于划分湍流随机相位屏功率谱高频与低频分量。其表达式为

$$f_{FZ} = \frac{1}{q_1 \sqrt{l_{\Phi}}} \quad (5)$$

外时间尺度  $\tau_{out}$  描述湍流随机相位屏脉动的外时间边界, 其表达式为

$$\tau_{out} = \frac{q_2 D}{\bar{v}_{\text{Turb}}} \quad (6)$$

式中  $D$  为成像探测光学系统口径;  $\bar{v}_{\text{Turb}}$  为湍流流场平均速度;  $q_2$  为外比例系数。

有了上述定义的概念, 即可建立湍流光学传输

特性的理论分析基础: 当探测系统成像的帧积分时间  $\tau$  大于外时间尺度, 此时的导引头成像相对于湍流流场为长曝光成像; 当探测系统成像的帧积分时间  $\tau$  大于内时间尺度且小于外时间尺度时, 导引头成像相对于湍流流场为短曝光成像。由此, 可以最终得出湍流流场的光学传输特性理论计算公式。

课题组在上述一系列研究工作的基础上, 建立了比较完整的气动光学理论, 填补了国内气动光学的理论研究空白, 构筑了气动光学理论基础。

### 3.2 学科的数学建模研究

在理论工作的基础上, 课题组开展了在特定条件下气动光学效应统计规律及其对红外图像传输影响的统计型描述的工程模型研究, 提出了湍流光学传输效应、气动热辐射效应和光学头罩气动热效应工程计算模型, 并在此基础上进行了气动光学效应统计分析数学仿真工作。图1至图4给出了在计算输入条件: 光学系统口径 60 mm、光学系统焦距 120 mm、工作波段 9  $\mu\text{m}$ 、光线入射方向 90° 和探测器单元尺寸为 50  $\mu\text{m}$ ; 飞行参数:  $H = 20 \text{ km}$ ,  $Ma = 3$ ,  $v = 2360 \text{ m/s}$  下一些典型的数学仿真结果, 结果基本揭示了气动光学效应现象和统计规律。仿真结果与试验结果相比, 基本反映了气动光学效应的变化规律, 数学模型的准确性进一步得到了确认。



图1 层流流场  
PSF 二维图

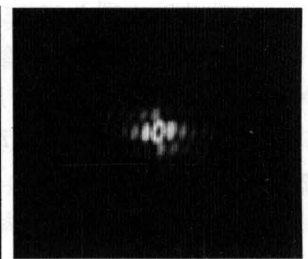


图2 长曝光时间下  
PSF 二维图

Fig.1 2D PSF images of laminar flow Fig.2 2D PSF images for long exposure period

关于气动光学效应校正技术及模型建立的工作, 课题组联合华中科技大学图像所、上海交通大学图像所、北京航空航天大学图像中心等单位在图像复原与校正领域提出了经典图像复原与校正的一些理论和方法, 例如基于估计总体点扩展函数的湍流退化图像校正方法, 但这些算法一般只适用于固定模糊和低频随机介质传输带来的模糊或抖动的图

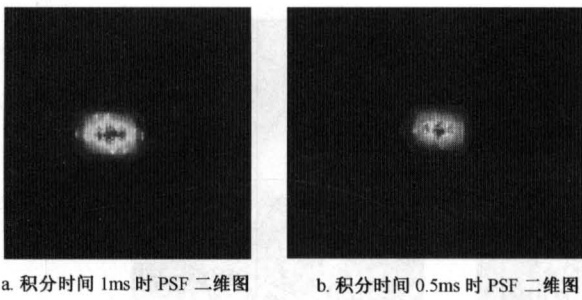


图 3 不同积分时间下端流流场引起的 PSF 分布二维图

Fig.3 2D PSF images with turbulence-induced for various integration periods

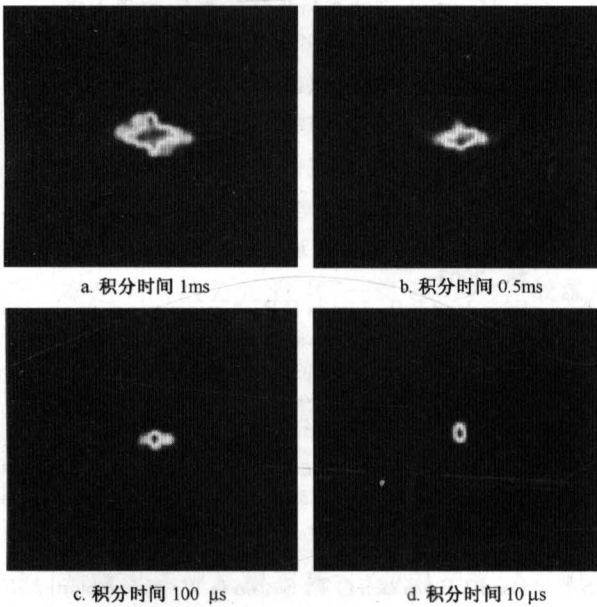


图 4 不同积分时间下对点目标成像二维图

Fig.4 2D simulated images of the point target for various integration periods

像复原。用于气动光学效应校正的高频随机介质传输带来的图像失真复原与校正技术，还需要从概念和原理上进一步地探索和发展。气动光学效应校正典型示意图见本期封面，其中左图是由于存在气动光学效应，在光学系统上接收到的某卫星模糊抖动图像；右下图是经过气动光学校正后的卫星清晰图像，基本复原成原图像。

### 3.3 学科的试验原理和试验方法研究

在光学传输效应、气动热辐射效应和光学头罩气动热效应试验原理的研究方面，课题组提出了可行、实用的试验方法，并根据国内现有的风洞试验

能力，应用现有的测试设备，首次进行了气动光学效应的测试试验，测试结果定性验证了气动光学效应的存在及其对高速光学成像制导飞行器末制导的影响。图 5 给出了典型的流场光学传输效应试验原理图。

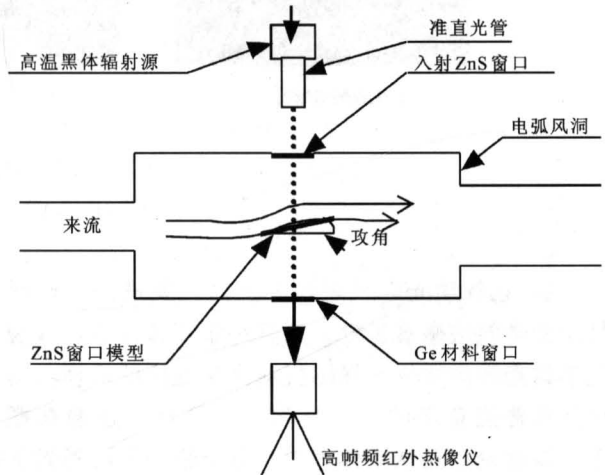


图 5 流场光学传输效应风洞试验原理图

Fig.5 Principle schematic of the tunnel testing in optics transmitting effects of the flow

图 6 是某次风洞试验的测试结果。其中图 6a 是吹风前没有流场时靶标的清晰图片；图 6b 是吹风开始后 0.5 s，窗口材料还没有被热气流加热时的模糊图，此时像模糊主要由流场引起；图 6c 是吹风开始 5 s 后的模糊图，此时窗口材料已被加热，像模糊主要因材料被加热引起。

## 4 工程应用及学科发展展望

气动光学研究对高速飞行器实现光学成像精确探测、机载激光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技术发展具有十分重要和关键的作用，研究成果通过改进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。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用价值，同时它又是一项基础性的研究，对推动新型交叉学科的发展具有重要意义。

当前国内气动光学研究虽然建立了比较完整的理论，全面开展了工程应用，为学科的发展奠定了一定的基础，但仍有许多内容有待进一步深化研究。

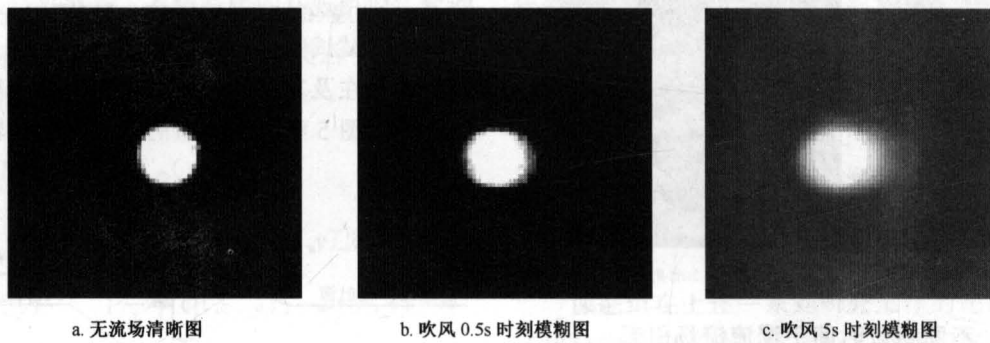


图6 风洞试验结果

Fig.6 Illustration of the tunnel testing

1) 在气动光学机理研究方面,要进一步开展气动光学效应微观机理,尤其是湍流条件下的气动光学瞬态效应研究,揭示气动光学效应的机理,提出具有普遍意义的气动光学效应机理描述的新概念、新理论。要从流体力学、分子物理和红外光学等领域提出描述气动光学效应的新概念、新理论和新方法,完整、系统地深化气动光学效应机理的研究。

2) 在气动光学效应校正研究方面,要以工程应用需求为背景,重点从数字图像校正和优化光学头罩设计、减小气动光学效应两个方面,开展气动光学效应实时校正技术研究,进一步探索和发展弹载快响应气动光学光电校正技术。

3) 在气动光学效应与校正试验技术研究方面,要充分利用国内风洞技术基础和光电测试技术基础,建立气动光学效应风洞测试试验平台,为进行气动光学效应机理研究试验验证提供试验手段,建立基于现有实验室和风洞试验条件的气动光学校正效果评估系

统,为评估气动光学效应校正技术提供试验手段。

当前,国内气动光学学科的研究仍处于不断发展和完善之中,与该领域世界先进水平相比,还存在不小的差距,需要国内相关学科领域高度关注和关心对它的研究,推动这一新兴学科的不断发

#### 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] Strickland B R, Lianos D P. A midcourse multiplier kill vehicle defense against submunitions [R]. AIAA 97-3907, 1997
- [3] Foxwell D, Lok J J. Naval TBM defense matures [A]. Jane's International Defense [M]. 1998. 27~30
- [4] Wirsig G W, Fischer D. The airborne laser—a revolution in military affairs [J]. Air Force Phillips Laboratory: Airborne Laser Program Newsletter, 1997, 3(3): 8~12
- [5] Pond J E, Welch C T, Sutton G W. Side mounted IR window aero-optical and aerothermal analysis [J]. SPIE, 1999, 3705: 266~275
- [6] Clark R, Banish M. Fundamentals of aero-optics phenomena (Invited) [R]. AIAA 94-2545, 1994

## A New Subdiscipline of Contemporary Optics—Aero-optics

Yin Xingliang

(China Aerospace Science & Industry Corporation, Beijing 100039, China)

[Abstract] Based on developing process of aero-optics, the background of the subject is introduced. The definition, intension, research object, research methods of the subject are proposed. The research contents are described, which include mechanism, calibration methods, calibration tests for aero-optic effects and optic window of the hypersonic aircraft. The theoretical research, engineering modeling, testing principle and testing methods in China are described in detail. Some representative results are given. At last, the application prospects and research tendency of the subject are suggested.

[Key words] aerodynamics; turbulent flows; optics; aero-optics