气动光学平均流场效应时间特性研究

董 航

(北京应用物理与计算数学研究所,北京 100088)

摘要 根据气动光学效应定义了绕流流场厚度,分析了气动光学平均流场效应的时间特性与绕流流场厚度的关系,给出特征时间的粗估公式。使用大型流体计算软件 SAED 模拟计算了机载光学平台绕流流场随时间的变化, 计算了绕流流场厚度,研究了气动光学平均场效应随时间的变化规律。计算结果验证了粗估公式的可靠性,表明 与湍流效应的特征时间相似,气动光学平均流场效应的特征时间,正比于绕流流场厚度与飞机速度的比值。在给 定的计算模型中,特征时间约为5 ms 量级,特征频率低于 300 Hz;平均流场气动光学效应引起的光程差均方根随 时间围绕平均值变化,方差与平均值之比约为8%。

关键词 大气光学;气动光学;波前像差;平均流场;特征时间;流场厚度 中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1201004

Simulation on Time-Dependent Aero-Optic Effects of Mean Flow Field

Dong Hang

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract The thickness of flow field around the platform is defined based on aero-optical effect, the relationship between the thickness of flow field around the platform and the characteristic time of the aero-optic effect for the mean flow is investigated, and the rough estimation formula of characteristic time is given. Using large computational fluid dynamics software (SAED), the change of airborne optical flow field around the platform with respect to time and the thickness of flow field is computed, and change rule of aero-optic effect for the mean flow is researched. The calculation results verify the reliability of the rough estimation formula. It is shown that characteristic time of the aero-optic effect for the mean flow field is proportional to the ratio between thickness of flow field and the plane speed, which is in agreement with that of turbulence effect. In the given model, characteristic time is about 5 ms, and the characteristic frequency is less than 300 Hz. The root mean square of optical-path difference induced by the aero-optic effect for the mean flow field varies around a mean value with time. The ratio of variance to mean value is about 8%.

Key words atmospheric optics; aero-optics; wavefront aberration; mean flow field; characteristic time; thickness of flow field

OCIS codes 010.1285; 010.3310; 260.2710; 260.3060; 350.5500

1 引

言

机载光学平台或导弹在飞行过程中会对大气产 生扰动,形成绕流流场。由于绕流流场密度分布的 不均匀,通过绕流流场的光束会发生波前畸变,使远 场光斑能量损耗和成像质量变差,产生气动光学效 应^[1~3]。为研究方便,通常将绕流流场分为平均流 场分量和湍流流场分量,相应地气动光学效应也分 为平均流场效应和湍流脉动效应。平均流场效应是 雷诺时间平均的空气密度的空间分布不均匀引起的 光学效应,包含了完整的绕流流场的影响;湍流脉动 效应是真实物理量与其时间平均差异,即随机涨落, 其主要产生在飞行器壁面湍流边界层区域。

近年大量关于气动光学效应的理论和实验工作,主要集中于激光制导应用中的湍流效应方面^[1~5],关于机载光学平台的气动光学效应研究相 对较少。本课题组关于机载光学平台平均流场效应 的研究表明^[6],平均流场效应对激光波前的影响,主 要是倾斜、离焦和像散等低阶效应,光程差均方根能

收稿日期: 2012-06-20; 收到修改稿日期: 2012-08-06

基金项目:中国工程物理研究院科学技术发展基金(2012B0401062)资助课题。

作者简介: 董 航(1969—), 男, 副研究员, 主要从事气动光学效应方面的研究。E-mail: dong_hang@iapcm. cn. cn

达到微米量级,并且随出射方向变化,光程差均方根 的大小会产生剧烈变化;不加处理的话,会对机载光 学平台的应用产生很大的影响,需要通过自适应光 学系统进行校正。而开展自适应光学校正,不仅要 了解波前的空间特性,还要了解其时间特性。

本文分析了气动光学平均流场效应时间特性的 来源,根据气动光学效应定义了绕流流场厚度,给出 平均流场效应特征时间的粗估公式。通过数值模拟 计算了平均流场效应随时间的变化特性,初步验证 了粗估公式的可靠性。

2 特征时间粗估

对于亚音速情况,绕流流场随时间的变化,主要 来源于边界层湍流的时间脉动。边界层附近的扰动 随着与壁面距离的增加会逐渐衰减,因此平均流场 效应的特征时间与湍流效应有所不同。对于具体的 几何结构,如整流罩上的绕流流场,不存在清晰的边 界层结构,无法明确地定义边界层厚度。与平板绕 流流场相比,凸起的整流罩对更大的区域形成扰动, 流场更加复杂,大区域的不确定性会使平均流场效 应的时间效应更加明显。同时气动光学效应考虑的 是较大口径上的流场对激光的影响,因此分析其时 间特性时应该包含口径的因素。

气动光学效应是由于机载光学平台的绕流流场 的密度扰动引起的,为分析气动光学湍流效应的特 征时间,通常假定最重要的密度扰动的尺度约为边 界层厚度,其传播速度则约为飞机速度,而特征时间 则约等于边界层厚度与飞机速度的比值^[7]。这个假 定得到了理论和实验结果的支持,使大家普遍接受。

类似这样的考虑,因为气动光学平均流场效应 是由于机载光学平台的绕流流场引起,为了估计平 均流场效应的时间特性,可以认为最重要密度扰动 的尺度为绕流流场厚度量级,其传播速度同样为飞 机速度,则特征时间 t 约为绕流流场厚度 δ 与飞机 速度 U 之比:

$$t = \delta/U. \tag{1}$$

相同条件下,随马赫数变化,影响绕流流场厚度 的物理因素,主要有两个:1)当马赫数增加时,飞机 表面温度升高更加明显,密度涨落更强,会引起绕流 流场厚度增加;2)马赫数增加时,动压增加,会使绕 流流场厚度变薄。这两方面的因素会部分地相互 抵消。

关于绕流流场厚度并没有清晰的定义,根据气 动光学效应给出一个近似的估计。气动光学效应主 要是因为密度的不均匀分布引起的,因此可以通过 气动光学效应定义绕流流场厚度。在文献[6]中研 究了气动光学平均流场效应随口径的变化,本文取 0.4 m口径作为研究对象,比较特定距离光程上 (0.02 m)气动光学效应所产生的光程差均方根。 可以预期,随着离开飞机表面距离的增加,流场受飞 机飞行的影响降低,光程差均方根会逐渐减小;当远 离飞机表面时,流场不受飞机干扰,光程差均方根变 为零,因此可以根据光程差均方根随离开飞机表面 距离的变化判断绕流流场厚度。

3 计算工具与模型

绕流密度场由 Navier-Stokes 方程组求解器 SAED 在巨型机上并行计算得到。为了准确模拟窗 口对飞机气动环境的影响,计算模型取机身上加整 流罩的方式^[6],如图 1 所示。计算条件如下:飞行高 度为 12 km,飞行速度为 235 m/s,飞行马赫数为 0.8,大气参数依据美国标准大气 1976。计算的总 网格数量约 1200 万,在垂直于飞机表面方向上,网 格数为 600。





Fig. 1 Calculation model of airplane

计算绕流流场厚度时,采用定常计算。根据计算得到的绕流流场密度分布,按照(2)式求得光斑口径内各点的光程L、光程差D及出射口径内的光程差均方根D_{rms}:

$$\begin{cases} L = \int (1 + k_{\rm GD} \rho) \,\mathrm{d}s \\ D = L - \overline{L} \\ D_{\rm rms} = \sqrt{\sum_{N} D^2 / N} \end{cases}$$
(2)

式中 ρ 为空气密度, k_{GD} 为 Gladstone-Dale 常数, 是 波长的函数, 取波长为 1.315 μ m, 此时 k_{GD} = 2.19× 10⁻⁴ m³/kg。 图 2 为飞机沿飞行方向中轴线上的空气密度分 布,可以看到在整流罩前的近平面区域内,飞机表面 流场有清晰的附面层结构;而在整流罩附近,由于整 流罩的影响,破坏了规则的附面层结构,空气密度变 化区域增加,密度变化幅度增大,会导致平均流场性 质随时间有明显变化。



图 2 飞机表面密度分布

Fig. 2 Density distribution on surface of airplane

图 3 为对于从整流罩中心向正上方出射的口径 为 0.4 的光束,0.02 m 光程气动光学效应引起的 *D*_{rms},随离开飞机表面距离的变化。距离飞机表面 越远,*D*_{rms}越小,与预期一致,并且变化趋势相对平 缓,因此 0.02 m 光程的 *D*_{rms}变化可以作为绕流流场 厚度的判断指标。





在距离整流罩表面 0.5~2 m 区域, Dms 变化开始 不明显,可以初步判断绕流流场厚度在 0.5~2 m 的范 围。取绕流流场厚度为 1.5 m 时, 根据(1)式估计, 特征

时间约为 6.4 ms,对应的特征频率为 157 Hz。

4 时间效应模拟结果

采用双时间迭代的方式,以定常计算结果作为 初始条件,利用 URANS^[8]方法计算了气动光学效 应随时间的变化。非定常计算非常复杂,当时间步 长取得很短时,得到同样的结果耗费的时间很多,并 且随时间增加积累的舍入误差也会增加;而时间步 长取得大,截断误差会增加。在计算过程中,对时间 步长分别取为 0.01,0.05,0.1,0.2,0.5 ms,做了对 比计算,结果表明在时间步长取为 0.1 ms 的时候, 其结果与更短的时间步长基本一致;而当时间步长 取 0.2 ms 或更大时,刚开始的时候计算结果仍符合 较好,但随计算时间增加误差逐渐增加。不同时间 步长计算结果的对比,也在一定程度上说明了计算 结果的可靠性。图 4 比较了时间步长为 0.1 ms 和 0.2 ms 时得到的 Dms随时间的变化,可以看到计算 结果开始仍然符合得比较好。本文取时间步长为 0.1 ms 的计算结果作为最终的计算结果。



图 4 不同计算时间步长下 D_{rms}随时间的变化 Fig. 4 D_{rms} versus time under different computation time steps

考虑到需要足够的计算数据来分析气动光学平 均流场效应的时间特性和计算量的因素,以及增加 计算步长会导致积累的舍入误差增加,取计算 700 步(时间为 70 ms)的结果进行分析。图 5 为 D_{rms}在 70 ms内的变化,对其进行分析表明,在 25 ms的时 间内,D_{rms}的平均值为 0.25 µm,方差为 0.018 µm, 方差与平均值的比值约 7.8%;在 70 ms的时间内, D_{rms}的平均值为 0.27 µm,方差为 0.021 µm,方差与 平均值的比值约 8%。考虑到计算误差的因素,以 及气动光学效应随时间变化的不定常性,可以认为 不同时间平均的结果是一致的,计算结果体现了气 动光学平均流场效应的时间特性。

从图 5 可以看到,在 4~25 ms 的范围内, D_{ms} 随时间的变化有比较明显的周期结构。图 6 为时间范围为 4~25 ms 时 D_{ms} 随时间变化的功率谱,而图 7为时间范围是 0~70 ms 时 D_{ms} 随时间变化的功率谱。可以看到,主要是低于 300 Hz 的贡献,相



Jo Drms 随时间的文化



图 6 D_{rms}的功率谱(21 ms)

Fig. 6 Power spectrum of $D_{\rm rms}$ versus time (21 ms)



图 7 D_{rms}的功率谱(70 ms)

Fig.7 Power spectrum of D_{rms} versus time (70 ms) 当于特征时间为 3.3 ms,根据(1)式,对应于绕流流 场厚度为 0.8 m。图 6 存在 156 Hz 的峰值,相当于特 征时间为 6.4 ms,对应于绕流流场厚度为 1.5 m,与 前面计算所得的结果不矛盾。由于这两个得到绕流 流场厚度的计算是独立的,结果一致说明计算结果的 可靠性,也说明粗估公式是成立的。可以看到,70 ms 相当于 10~20 倍左右的特征时间,对于分析气动光 学平均流场效应的时间效应是合适的。

5 结 论

根据气动光学效应定义计算了绕流流场厚度, 给出了机载光学平台气动光学平均流场效应的特征 时间的粗估公式,指出其特征时间约等于绕流流场 厚度与飞机速度的比值。同时通过数值模拟计算了 机载光学平台绕流流场随时间的变化规律,定量分 析了平均流场气动光学效应的特征时间和特征频 率,与粗估公式相吻合,初步说明的了粗估公式的可 靠性。结果表明,对于给定的光学平台模型,飞行马 赫数为0.8,飞行高度为12 km,平均流场气动光学效 应的特征时间在5 ms量级,特征频率低于 300 Hz;平 均流场效应引起 Dms的围绕均值变化,变化幅度约为 8%。由于非定常计算的复杂性,需要更多的实验和 模拟工作来验证计算结果。

致谢 感谢徐明和李守先研究员对本文提供的宝贵意见。感谢计算中心的肖丽、艾志玮同事提供的海量数据、高性能可视化平台——Teravap,感谢曹立强、夏芳提供的 JADLIB 接口,显著提升了数据分析效率。

参考文献

- Shi Ketian, Cheng Xiaoli, Ma Handong. Numerical simulation of aero-optical effects for the flow field around the optical window [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(1): 6~11 史可天,程晓丽,马汉东. 光学头罩绕流流场气动光学效应数值
- 更可天,程晓丽,与汉东, 元字头卓统流流场气动元字效应数值 模拟[J]. 红外与激光工程,2010,**39**(1):6~11
- 2 Chen Yong, Guo Longde, Zhang Long *et al.*. Investigation on aero-optical effects of high-speed turbulence over a slope with a cavity[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2010, **28**(6): 666~671 陈 勇, 郭隆德,张 龙等.带凹窗斜劈高速湍流气动光学效应 研究[J]. 空气动力学学报, 2010, **28**(6): 666~671
- 3 Zhang Li, Liu Guodong, Wang Guibing. Inflence of optical window shape on aero-optic effcts[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(12): 2835~2838
- 张 黎,刘国栋,王贵兵.光学窗口外形对气动光学效应的影响 [J]. 强激光与粒子束,2010,**22**(12):2835~2838
- 4 Xu Dong, Liu Haowei, Wu Lin. High-order singular value decomposition applied in aero-optical effects analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3367~3372
 许 东,刘浩伟,吴 琳. 高阶奇异值分解在气动光学效应分析
- 中的应用[J]. 光学学报, 2010, **30**(12): 3367~3372
- 5 Feng Dinghua, Li Hua, Xiao Fei *et al.*. Study on optical transmission effect of optical window's cavity flow [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0401004
- 冯定华, 李 桦, 肖 飞等. 光学窗口凹腔流场的光学传输效应 研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(4): 0401004
- 6 Dong Hang, Zhang Jianzhu, Xu Ming. Simulation on mean flow field aero-optical effect of airborne optical platform [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0201003
- 董 航,张建柱,徐 明. 机载光学平台平均流场气动光学效应 研究[J]. 光学学报,2012,**32**(1):0201003
- 7 C. M. Wyckham. Aero-Optic Characteristic of Turbulent Compressible Boundary Layers [D]. New Jersey: Princeton University, 2006. 1~5
- 8 C. A. Atwood, W. R. Van Dalsem. A numerical study of complex cavity flows via the Navier-Stokes equation [C]. 11th Australasian Fluid Mechanics Conference, 1992. 1233~1236 栏目编辑: 王晓璞