

转塔气动光学效应时空特性

董航, 徐明*

北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094

摘要 通过对相同马赫数、相近雷诺数、不同转塔口径(400 mm 和 2000 mm)的绕流场模拟和气动光学效应进行分析,给出了不同发射方向时气动光学效应导致的光束倾斜角和光束质量因子的时间变化特性、统计特性以及时间相关特性。结果指出:多数场景下气动光学效应中平均流场效应占主要部分,平均流场效应的特征频率由绕流流场的特征频率决定。尺寸效应的研究表明:缩比实验可以有效模拟实际飞行状态下气动光学效应的统计特性,但无法准确模拟其时间相关特性。开展了前向发射时发射方向的优化选择,指出发射方向在中轴线上天顶角约为 40° 时,气动光学效应导致的波前畸变统计值和涨落值最小。分析了前向发射时发射口径的影响,指出发射光束半径增加会导致平均流场效应快速增加,但湍流效应基本不变。

关键词 大气光学; 气动光学效应; 时空特性; 数值模拟; 平均流场效应; 湍流效应

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1001002

Space-Time Characteristics of the Aero-Optical Effect Around Turrets

Dong Hang, Xu Ming*

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China

Abstract This study simulated the aero-optical effect of beams with different projection directions around turrets with different radii (400 mm and 2000 mm). The Mach number was fixed, and the Reynolds number remained similar in all cases. The space-time characteristic of the beam quality factor and beam tilt angle caused by the aero-optical effect was comprehensively studied. The aero-optical effect was mainly determined based on the mean flow effect, and the characteristic frequency of the mean flow effect was determined based on that of the flow around the turret. The spatial characteristic of the aero-optical effect was accurately reproduced in the reduced-scale experiments; however, the temporal characteristic was poorly simulated. The aero-optical effect appeared to be minimized at a projection direction of 40° zenith in the forward direction. An increase in the projection radius resulted in an increase in the mean flow effect while maintaining the turbulent effect almost constant.

Key words atmospheric optics; aero-optical effect; space-time character; simulation; mean flow effect; turbulent effect

OCIS codes 010.3310; 260.2710; 260.3060; 350.5500

1 引 言

由于绕流流场强烈依赖于几何结构,发射窗口的位置、结构等对气动光学效应有显著的影响。经过多年的发展,半球加圆柱的转塔结构在实际应用中最常用。美国的机载项目 ABL (Airborne Laser)、ATL (Advanced Tactical Laser) 以及 AAOL (Airborne Aero-Optics Laboratory) 等,均采用转塔模型作为激光输出窗口。针对转塔气动光学效应的研究,国内外开展了许多风洞实验和飞行实验^[1-9],这些实验研究的重点都是气动光学效应中的

湍流效应。

随着风洞技术的发展,已经可以使马赫数、雷诺数以及几何外形与实际情况相同,保证了风洞实验的几何相似和动力学相似。但是由于风洞实验是缩比实验,尺寸效应导致的实验结果与实际情况之间的差异,是风洞实验本身无法解决的。尺寸效应影响的主要是流场的非定常特性。转塔绕流流场的特征频率与转塔口径成反比,与飞行速度成正比,其比例系数为斯特劳哈尔数,通常记为 Sr 数。对于转塔结构,随着马赫数和雷诺数的变化, Sr 数基本保持不变,约为 0.2。因此绕流流场特征频率随模型尺

收稿日期: 2017-12-21; 修回日期: 2018-02-02; 录用日期: 2018-05-02

* E-mail: xu_ming@iapcm.ac.cn

寸变化会有明显的差异。考虑到光学效应对流场特性极为敏感,风洞实验的适用性受限。

转塔的绕流流场的方向性非常明显。在跨音速条件下,其迎风方向基本是定常流,而其顶部、侧部和背风方向是典型的非定常流,同时顶部附近有相对稳定的激波结构,相应的气动光学效应也有非常明显的方向性。迎风方向的气动光学效应在小口径条件下较弱,但在大口径下气动光学效应是不可忽略的。

本文通过数值模拟,研究了转塔绕流流场导致的气动光学效应的随时间变化特性、统计特性、时间相关特性,初步分析了平均流场效应和湍流效应的贡献比例。通过对不同转塔口径的气动光学效应时间特性的比较,研究了转塔口径的尺寸效应对气动光学效应的影响。针对迎风方向给出了发射方向的优化选择,分析了发射口径对气动光学效应的影响。

2 气动光学效应随时间变化特性

2.1 计算条件与转塔模型

利用大型流体计算软件 SAED (Simulation of aerodynamics)^[10-11],针对 400 mm 模型地表环境,以

表 1 计算模型参数

Table 1 Parameters of the computational models

Model	Diameter of turret /mm	Velocity / (m · s ⁻¹)	Reynolds /10 ⁶	Frequency /Hz
Model 1	400	227	6.8	122
Model 2	2000	207	9.1	22.3

气动光学效应是相对口径的函数,为了数据可以相互比较,对于不同的计算模型,取相同的相对口径。相对口径定义为发射口径与转塔口径之比,本研究中的相对口径未特别说明时都取为 0.33,与 AAOL 实验相同。

背部安装的转塔周围的绕流流场,在转塔的不同区域,如前部、侧面、顶部、后部等,其特征区别非常明显,相应的气动光学效应差别也非常大。图 1 给出了不同时刻转塔结构与计算得到的绕流流场的流线图,可以看到这是典型的转塔流场。

本研究考虑的是共形窗口,发射窗口与半球形的表面是一体的。发射光束从半球所在球的球心射出,光轴与垂直向上方向(Y 轴)的夹角为天顶角,在 XZ 面上光轴的投影与顺时针来流方向(X 轴)的夹角为方位角,方位角沿 X 轴正方向逆时针旋转为正,中轴线为过球心的直线。选取 9 个不同的发射方向,比较不同区域流场气动光学效应的变化。发射方向如图 2 所示,从 1 到 9 的天顶角和方位角坐

及飞行在 12 km 高空的 2000 mm 模型进行了分析。大气参数依据标准大气(美国 1976)^[12],地表环境的参数为:密度 1.225 kg · m⁻³,压力 1.0133 × 10⁵ Pa,温度 288.15 K,黏性系数 1.7894 × 10⁻⁵ kg · s² · m⁻¹; 12 km 高空的参数为:密度 0.3119 kg · m⁻³,压力 1.94 × 10⁴ Pa,温度 216.65 K,黏性系数 1.4216 × 10⁻⁵ kg · s² · m⁻¹。转塔模型为半球加圆柱的结构,圆柱高度与半球直径相同,计算时转塔表面取固壁条件,其他的外边界取远场条件。利用非定常计算给出的转塔绕流流场,网格总规模为 3000 多万,并在转塔的半球附近采取局部加密;计算步长取 5 μs,共计算约 2.8 万步。

马赫数都取 0.7,计算雷诺数,取转塔口径作为特征长度:

$$Re = \frac{\rho UD}{\mu}, \quad f = Sr \frac{U}{D}, \quad (1)$$

式中:Re 为雷诺数;ρ 为空气密度;f 为流场特征频率;U 为飞机速度;D 为转塔口径;μ 为黏性系数;Sr 为斯特劳哈尔数,在表 1 中取为 0.215。这两个算例马赫数相同,雷诺数相近,通过比较可以研究转塔口径对气动光学效应的影响。

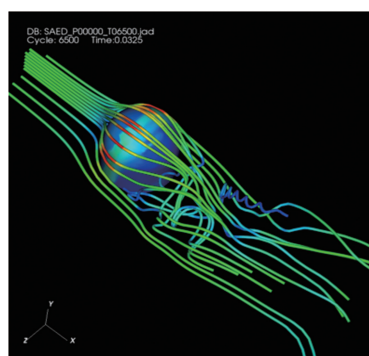


图 1 转塔结构的绕流流场示意图

Fig. 1 Illustration of the flow around a turret

标分别为 (35°, 180°), (14°, 180°), (0°, 0°), (14°, 0°), (35°, 0°), (14°, 90°), (14°, 270°), (14°, 135°), (14°, 225°)。其中方向 6 和 7 以及 8 和 9 互相对称,其气动光学效应是相似的,可以用来分析模拟结果的可靠性。

根据绕流流场的密度分布,求得发射口径内各点的光程 L_{OP}、光程差 D_{OP}:

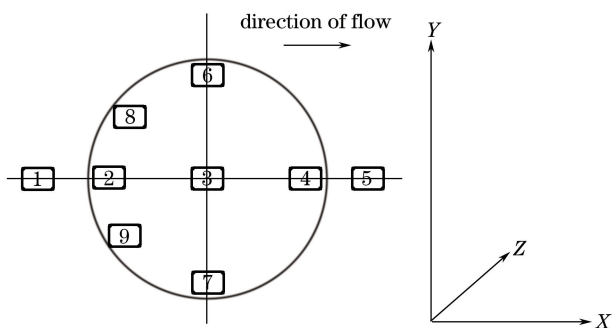


图 2 激光发射方向示意图

Fig. 2 Illustration of projection directions

$$L_{OP} = \int (1 + k_{GD}\rho) ds, D_{OP} = L_{OP} - \bar{L}_{OP}, \quad (2)$$

式中： k_{GD} 为 Gladstone-dale 常数，本研究中取 $k_{GD} = 2.19 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$ ； s 为激光传输的路程； \bar{L}_{OP} 为各点的平均光程。发射口径上的光程差构成波面，包含了气动光学效应导致的波前畸变。将气动光学效应导致的波面叠加到波长为 $0.532 \mu\text{m}$ 的理想平面波，通过远场衍射光斑的漂移和扩散计算光束倾斜角和光束质量因子，以光束倾斜角和光束质量因子描述光束方向偏移和质量下降。对于理想的平面波，远场衍射光斑质心没有漂移，第一艾里斑内的能量占总能量的 83.7%。叠加畸变的波面后，远场衍射光斑的质心偏离原来的光斑中心，光斑也产生弥散和变形。将远场光斑质心的漂移定义为光束的倾斜，将包含 83.7% 能量的远场衍射光斑半径与艾里斑半径之比定义为光束质量因子。

2.2 气动光学效应随时间变化及频谱分析

在图 3~8 中，比较了模型 1 和模型 2 在不同发射方向上，气动光学效应导致的光束倾斜角和光束质量因子随时间的变化。对于模型 1 的特定方向，还开展了快速傅里叶变换(FFT)分析。由于模型 2 对

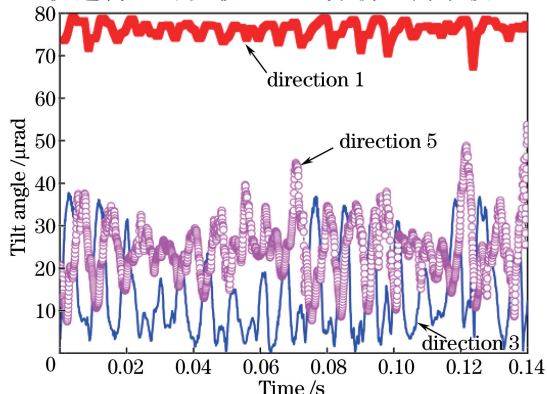


图 3 400 mm 转塔光束倾斜角随时间变化(方向 1,3,5)

Fig. 3 Tilt angle of the 400-mm-diameter turret as a function of time (in directions 1, 3, and 5)

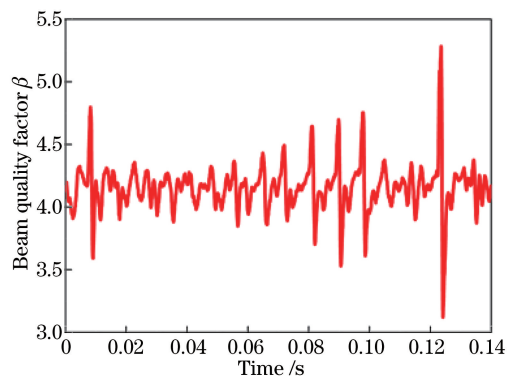


图 4 400 mm 转塔光束质量因子随时间变化(方向 1)

Fig. 4 Beam quality factor of the 400-mm-diameter turret as a function of time (in direction 1)

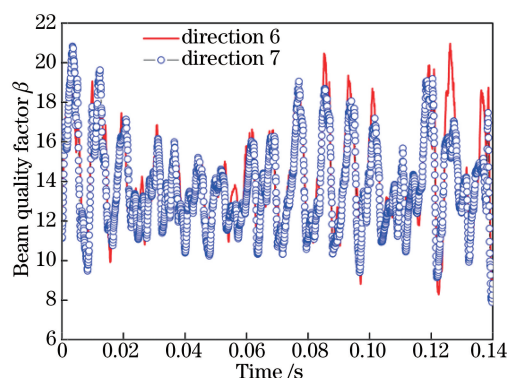


图 5 400 mm 转塔光束质量因子随时间变化(方向 6,7)

Fig. 5 Beam quality factor of the 400-mm-diameter turret as a function of time (in directions 6 and 7)

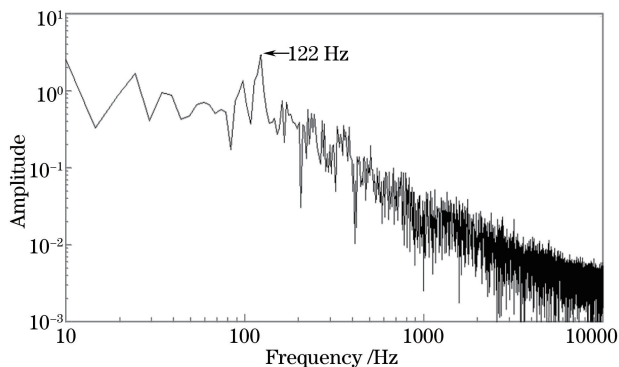


图 6 400 mm 转塔方向 5 的光束质量因子 FFT 分析

Fig. 6 FFT analysis of the beam quality factor of the 400-mm-diameter turret in direction 5

应的周期较长，计算时间只相当于 2~3 个周期，无法进行 FFT 分析，因此直接利用周期给出特征频率。

结果表明，相互对称的方向 6 和方向 7，以及方向 8 和方向 9，气动光学效应导致的光束倾斜角随时间变化的表现非常相似，一定程度上证实了计算结果的可靠性。通过图 6 可以看到，对于模型 1，存在 122 Hz 的特征频率，对应的斯特劳哈尔数为

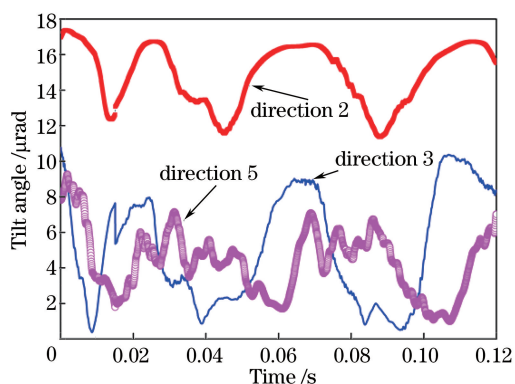


图 7 2000 mm 转塔光束倾斜角随时间变化(方向 2,3,5)
Fig. 7 Tilt angle of the 2000-mm-diameter turret as a function of time (in directions 2, 3, and 5)

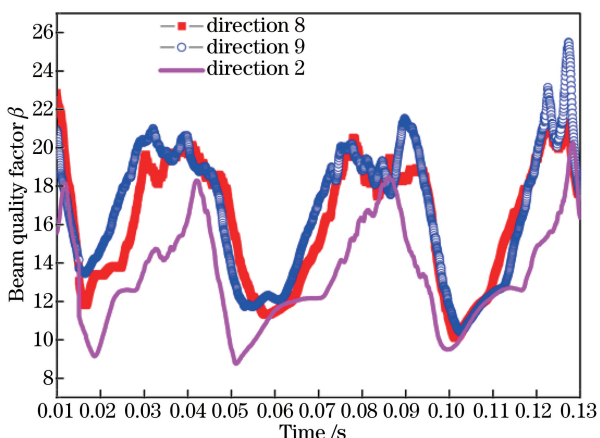


图 8 2000 mm 转塔光束质量因子随时间变化(方向 2,8,9)
Fig. 8 Beam quality factor of the 2000-mm-diameter turret as a function of time (in directions 2, 8, and 9)

0.215;分析图 7 和图 8 可以看到,在模型 2 的迎风方向,光束质量因子和光束倾斜角,存在约 0.044 ms 的变化周期,对应特征频率为 22.7 Hz,相应的斯特劳哈尔数为 0.22。

从光束质量因子和光束倾斜角两方面比较缩比模型和实际尺寸模型中气动光学效应随时间的变化,可以发现它们有同样的定标规律,即气动光学效应的特征频率与绕流流场特征频率相同。这是因为在气动光学效应中,平均流场效应所占比例较大,决定了气动光学效应随时间变化的特性,而平均流场效应的特征频率取决于流场的特征频率。进一步分析表明,光束质量因子的涨落频谱表现更复杂,随发射方向不同有更细致的结构,斯特劳哈尔数也有轻微变化。

3 气动光学效应统计特性

图 9~11 给出了不同模型沿不同发射方向的气动光学效应的统计分析结果,包括光束质量因子和

光束倾斜角的平均值、变异系数,其中变异系数定义为均方差值和平均值的比值。光束质量因子和光束倾斜角的平均值主要是由平均流场效应贡献的,而涨落值则主要由湍流效应贡献,因此变异系数可近似作为衡量湍流效应的参数。

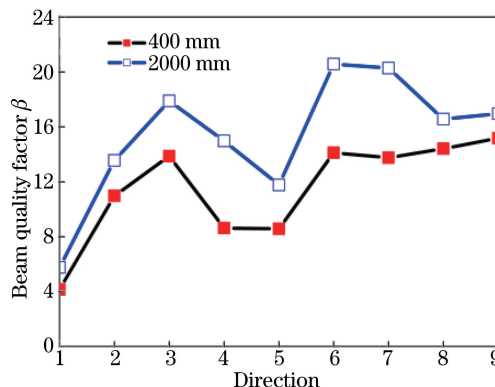


图 9 400 mm 和 2000 mm 转塔的光束质量因子均值随不同发射方向的变化

Fig. 9 Mean beam quality factors of 400- and 2000-mm-diameter turrets versus projection direction

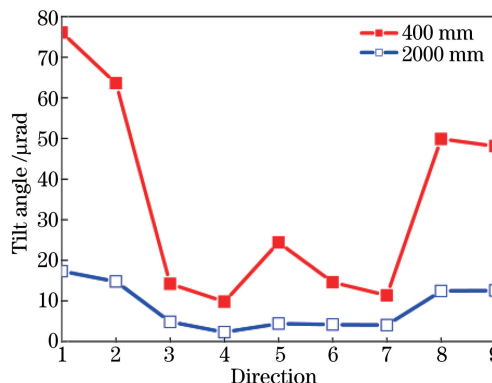


图 10 400 mm 和 2000 mm 转塔的光束倾斜角均值随不同发射方向的变化

Fig. 10 Mean tilt angles of 400- and 2000-mm-diameter turrets versus projection direction

分析图 9~11 可以发现,在发射方向 1,气动光学效应导致的波前畸变的平均值和涨落值都明显低于其他方向,可以围绕该方向寻找最佳发射角度。在迎风方向(1,2,8,9),流场基本是定常流场,光束质量因子和光束倾斜角的变异系数也相对较小。发射方向 3 由于存在稳定的激波,光束质量因子的变异系数相对较小;而光束倾斜角绝对值较小,涨落值较大,说明该方向的光束倾斜主要是由于湍流效应产生的。方向 4,5,6,7 对应的区域是典型的非定常流场,变异系数很大。

通过两个模型比较,发现缩比模型的光束倾斜角要明显大于实际模型,而光束质量因子略小于

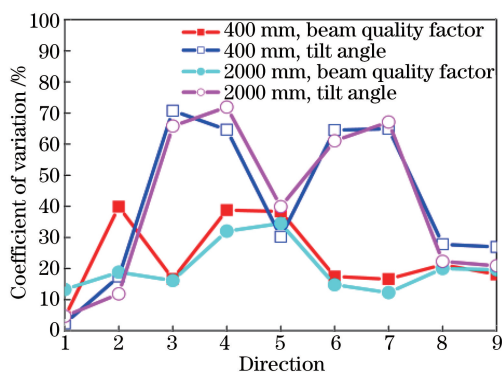


图 11 变异系数随不同发射方向的变化

Fig. 11 Coefficient of variation as a function of different projection directions

实际模型。这是因为光束倾斜角与发射口径成反比,同样的波前畸变,发射口径越小,光束倾斜角越大,因此缩比模型的光束倾斜角约为实际尺寸模型的 5 倍。光束质量因子与发射口径无直接关系,主要由波前畸变决定,在几何外形相同的情况下,波前畸变由马赫数和雷诺数决定。缩比模型的雷诺数稍小,因此光束质量因子也略小于实际尺寸模型。变异系数对于两个模型来说表现接近,说明对于两种模型湍流效应的贡献率基本接近。上述分析说明在马赫数和雷诺数相同的条件下,通过缩比实验,可以有效模拟实际尺寸模型气动光学效应的统计特征。

4 气动光学效应时间相关特性

以理想校正的方法分析转塔气动光学效应的时间相关特性。具体方法是,利用当前波前减去一定时间间隔前的波前,计算残留波前相差与当前波前相差导致的光束倾斜角之比和光束质量因子之比。在特定的时间间隔 Δt 下,对于所有时间序列进行同样操作,取平均值作为分析指标,而校正频率取时间间隔 Δt 的倒数。比值大于 1 时表示完全没有校正效果,用这个方法可以粗略给出气动光学效应的时间相关特性。在图 12~15 中给出了 2000 mm 转塔和 400 mm 转塔校正后各方向光束倾斜角及光束质量因子比值随校正频率的变化。

可以看到,对于不同的发射方向,校正效果差异很大。迎风方向流场比较稳定,尤其是发射方向 1,校正频率高于流场特征频率时,校正效果非常好;而天顶方向、背风方向以及侧面方向,由于主要是湍流效应,需要很高的频率才会有较好的校正效果;同时,转塔口径越大,达到同样的校正效果所需要的校正频率越低。

通过两个模型的比较,可以看到在方向 1 上

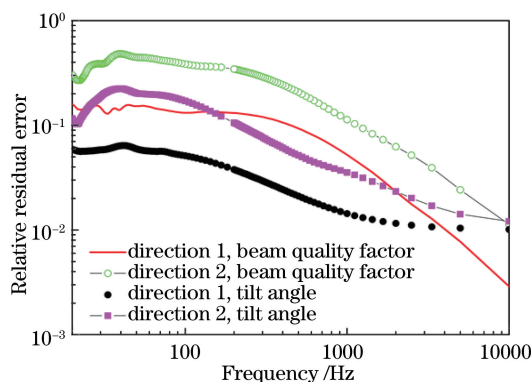


图 12 2000 mm 转塔相对残差随校正频率的变化

Fig. 12 Relative residual error of 2000-mm-diameter turret versus correction frequency

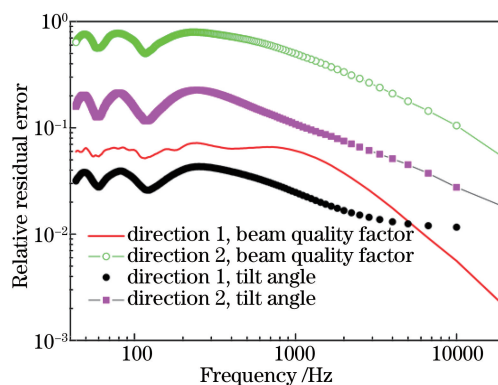


图 13 400 mm 转塔残差随校正频率的变化

Fig. 13 Relative residual error of 400-mm-diameter turret versus correction frequency

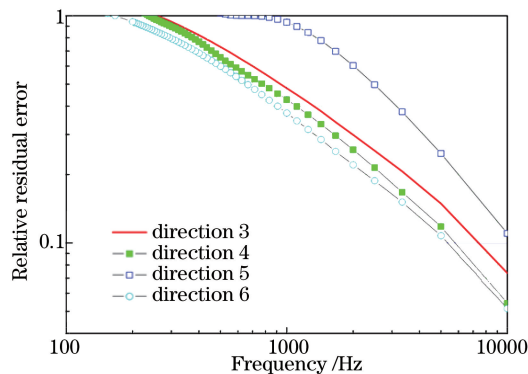


图 14 2000 mm 转塔光束质量因子残差随校正频率的变化

Fig. 14 Relative residual error of the beam quality factor of 2000-mm-diameter turret versus correction frequency

400 mm 口径模型的校正效果比 2000 mm 口径模型的校正效果好,这是因为此时的流场接近平板绕流流场,对于平板绕流,湍流效应随距离的增加而增加,因此 2000 mm 模型湍流效应的绝对值更大。在其他方向,400 mm 口径模型的时间相关性比 2000 mm 口径模型差很多,这是因为此时气动光学效应的时间相关性严重依赖由转塔口径决定的流场特征频率。由

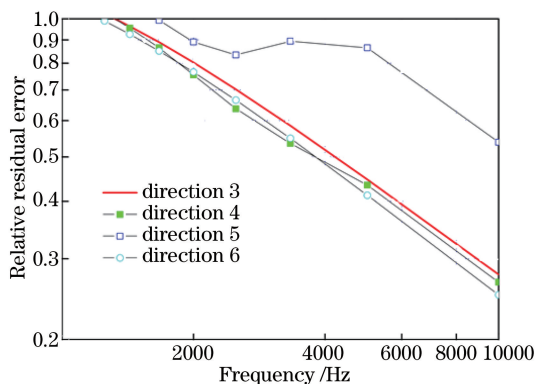


图 15 400 mm 转塔光束质量因子残差随校正频率的变化
Fig. 15 Relative residual error of the beam quality factor of 400-mm-diameter turret versus correction frequency

于缩比模型的特征频率高于实际模型,因此通过缩比实验,通常无法准确模拟实际飞行状态下气动光学效应的时间相关特性。

5 气动光学效应随发射方向的变化

前面的结果表明,除了迎风方向,其他方向的气动光学效应会导致发射光束产生严重的畸变,因此通常会采取整流技术^[13]改善流场特性,而前向发射的气动光学效应较弱,可用作发射场景。针对 2000 mm 模型,比较了前向发射场景下不同发射方向时气动光学效应的变化。图 16~18 中,给出了气动光学效应随发射方向的变化,其中发射光束的半径为 0.33 m,发射方向在中轴线上,天顶角范围为 20°~70°。对于气动光学效应导致的光束质量因子和光束倾斜角变化,都给出了其平均值和均方根值。粗略来说,平均值代表了平均流场效应,涨落的均方根值代表了湍流效应。

图 16 和图 17 给出的是光束质量因子和倾斜角的平均值和均方根值,可以看到对于不同的发射方向,其涨落值都相对较小,这是因为转塔迎风方向的流场是定常的,比较稳定。当天顶角约为 40° 时,光束质量的平均值以及涨落值都比较小;光束倾斜角的变化相对严重,但光束倾斜相对来说是容易克服的,因此选取这个方向作为最佳发射方向的候选。图 18 给出了变异系数随发射角度的变化,因为变异系数为均方差和平均值的比值,可作为衡量湍流效应相对大小的参数。结果表明在天顶角 40° 附近,湍流效应占 10%~15%。

在偏离中轴线的方向上,预期流场的不对称会使波面产生大的畸变,进而使光束质量因子变大。图 19 给出了天顶角为 40° 时,光束质量因子随方位

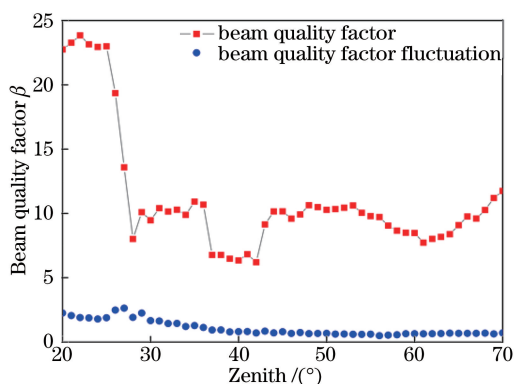


图 16 光束质量因子随发射方向的变化
Fig. 16 Beam quality factor versus projection direction

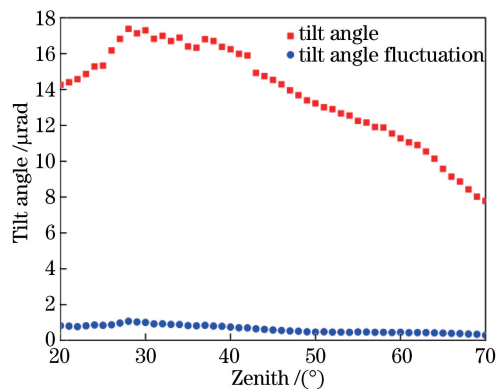


图 17 光束倾斜角随发射方向的变化
Fig. 17 Tilt angle versus projection direction

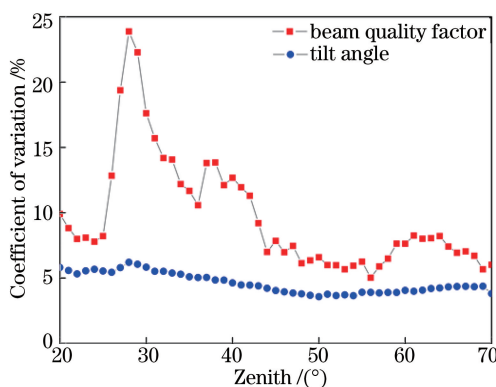


图 18 变异系数随发射方向的变化
Fig. 18 Coefficients of variation versus projection direction
角的变化,其中方位角的零度定义为中轴线迎风方向。可以看到随着发射方向偏离中轴线,光束质量增加到原来的 3~4 倍,明显恶化。综合以上结果,从气动光学效应的角度来考虑,可以沿中轴线选择天顶角 40° 左右作为最优发射方向。

6 气动光学效应随发射光束半径的变化

发射光束半径增加时,衍射效应使远场光斑减

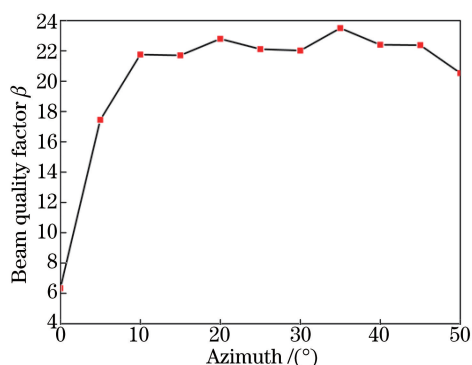


图 19 光束质量因子随方位角的变化

Fig. 19 Beam quality factor versus azimuth

表 2 不同发射半径下气动光学效应比较

Table 2 Comprison of aero-optical effects under different projection radii

Parameter	Value			
Radius /cm	33	40	45	50
Mean value of beam quality factor	6.62	8.47	9.73	12.40
Standard deviation of beam quality factor	0.78	0.55	0.49	0.37
Coefficient of variation of beam quality factor /%	11.8	6.5	5.0	3.0
Mean value of tilt angle / μ rad	16.76	6.23	3.96	1.94
Standard deviation of tilt angle / μ rad	0.75	0.79	0.77	0.45
Coefficient of variation of tilt angle /%	4.5	12.7	19.4	23.2

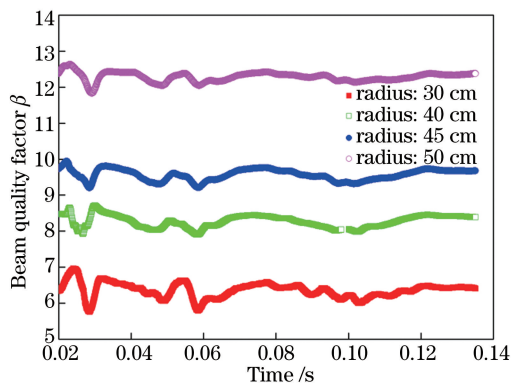


图 20 不同发射半径下光束质量因子随时间的变化

Fig. 20 Time dependence of the beam quality factor under different projection radii

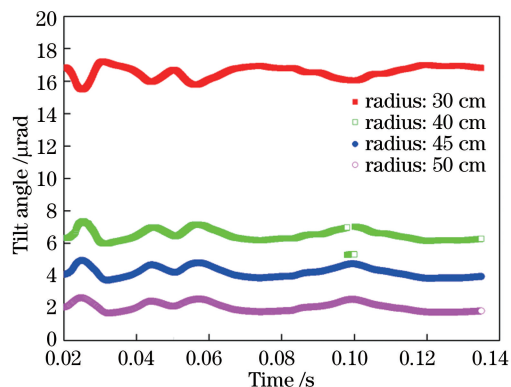


图 21 不同发射半径下光束倾斜角随时间的变化

Fig. 21 Time dependence of the tilt angle under different projection radii

以理想校正的方法进一步分析转塔气动光学效应的时间相关特性。从图 22 可以看到,发射口径增加时,相对校正效果更好,因为在光束半径增加时,湍流效应基本不变,但平均流场效应增加,而平均流场的特征频率比较低,校正效果很好。从理想校正的绝对值来看,尤其在高频校正时,对不同发射半径校正后的光束质量差别不大,说明在低频校正的时候,平均流场效应基本被完全校正了,而湍流效应仍然存在。湍流效应导致的光束质量因子变化不随发射半径变化而变化,是基本固定的。这个结果说明,在低频平均流场效应能够校正的条件下,增大发射

小;但通常也会因为光束通过的流场范围增加,导致气动光学效应产生的波前畸变增加,而使远场光斑变大。针对 2000 mm 转塔模型的前向发射,当中轴线上天顶角为 40° 时,分析不同发射半径下气动光学效应的变化,结果见表 2。可以看到,当发射光束的半径增加时,光束质量因子平均值变大,但变异系数变小。同时倾斜角减小,倾斜角的变异系数增大。

图 20 和图 21 给出了不同发射半径时,光束质量因子和光束倾斜角随时间的变化,可以看到,随着发射半径的变化,气动光学效应的时间特征是基本相同的。

光束半径可以有效地增加靶上功率密度。

7 结 论

针对实际应用尺寸转塔的模型,给出了时间步长足够短、空间分辨率足够高、持续时间足够长的流场数据,并详细分析了不同发射方向气动光学效应的变化,指出由于平均流场效应占重要部分,气动光学效应存在由绕流流场频率决定的特征频率。通过对相同马赫数、相近雷诺数、不同转塔口径的模型开展非定常计算,以光束质量因子和光束倾斜角作为衡量指标,分析了转塔流场气动光学效应的时空特

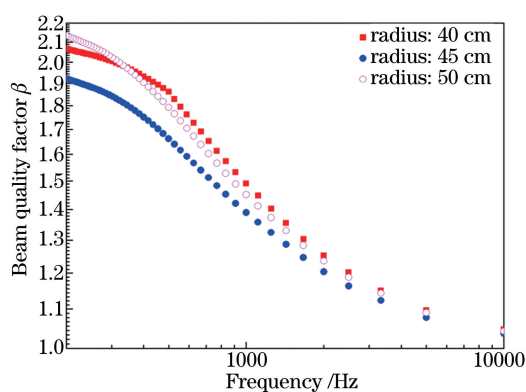


图 22 不同发射半径下校正后光束质量因子随频率的变化

Fig. 22 Beam quality factor versus correction frequency under different projection radii

性,指出缩比实验可以有效模拟气动光学效应的统计特征,但无法准确模拟气动光学效应的时间相关特性。

在迎风方向,气动光学效应引起的波前畸变的绝对值和涨落值都比较小,波前畸变主要是低频的平均流场效应。通过模拟研究给出了发射方向的优化选择,进一步研究了发射口径的影响,指出随发射光束半径增加,高频的湍流效应基本不变,而低频平均流场效应会相应地增加,平均流场效应的增加使光束质量显著变差。在平均流场效应可校正的前提下,增加发射光束半径能有效改善靶上功率密度。

参 考 文 献

- [1] Gordeyev S, Jumper E. Fluid dynamics and aero-optics of turrets[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2010, 46(8): 388-400.
- [2] Jelic R, Sherer S, Greendyke R. Simulation of various turret configurations at subsonic and transonic flight conditions using OVERFLOW[C]//50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, January 9-12, 2012, Nashville, Tennessee. Palo Alto: AAIA, 2012: 0464.
- [3] de Lucca N, Gordeyev S, Jumper E. Comparison of aero-optical measurements from the flight test of full and hemispherical turrets on the airborne aero-optics laboratory[C]//43rd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, June 25-28, 2012, New Orleans, Louisiana. Palo Alto: AAIA, 2012: 2985.
- [4] Nahrstedt D, Hsia Y C, Jumper E, *et al.* Wind tunnel validation of computational fluid dynamics-based aero-optics model[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2009, 223(4): 393-406.
- [5] Gordeyev S, Jumper E, Vukasinovic B, *et al.* fluidic control of a turret wake, part II: aero-optical effects[C]//47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, January 5-8, 2009, Orlando, Florida. Palo Alto: AAIA, 2009: 817.
- [6] Cress J, Gordeyev S, Jumper E, *et al.* Similarities and differences in aero-optical structure over cylindrical and hemispherical turrets with a flat window[C]//45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 8-11, 2007, Reno, Nevada. Palo Alto: AAIA, 2007: 326.
- [7] Vukasinovic B, Glezer A, Gordeyev S, *et al.* Active control and optical diagnostics of the flow over a hemispherical turret[C]//46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 7-10, 2008, Reno, Nevada. Palo Alto: AAIA, 2008: 598.
- [8] de Lucca N, Gordeyev S, Jumper E, *et al.* Aero-optical environment around turrets at forward-viewing angles[C]//51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, January 7-10, Grapevine, Texas. Palo Alto: AAIA, 2013: 0721.
- [9] Xie W K, Ma H T, Gao Q, *et al.* Research advances in aero-optics adaptive correction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 090001. 谢文科, 马浩统, 高穹, 等. 气动光学自适应校正研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 090001.
- [10] Dong H, Zhang J Z, Xu M. Simulation on mean flow-field aero-optic 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(2): 0201003.
- [11] Dong H. Simulation on time-dependent aero-optic effects of mean flow field[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1201004. 董航. 气动光学平均流场效应时间特性研究[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1201004.
- [12] National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration, Department of the Air Force. Standard atmosphere (USA 1976)[M]. Beijing: Science Press, 1982. 美国国家海洋和大气管理局, 国家航空航天局, 美国空军部. 标准大气(美国 1976)[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [13] Vukasinovic B, Glezer A, Gordeyev S, *et al.* Fluidic control of a turret wake: aerodynamic and aero-optical effects[J]. AIAA Journal, 2010, 48(8): 1686-1699.