

## 大口径长焦距光学检测系统强制对流方法

张俊<sup>1,2,3</sup>, 宫雪非<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏南京 210042;
2. 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏南京 210042;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 大口径、长焦距的水平光学检测系统极易受到气流扰动的影响, 气流扰动会引起光路中温度、速度、压强等多个物理量在时间和空间上随机动态变化。尤其是温度在空间上呈现梯度分布, 以及在时间上存在缓慢漂移, 均将会直接导致空气折射率的动态变化, 从而导致点扩散函数退化、引起波前倾斜、出现波前时变。为了抑制气流扰动对检测光路的影响以及提高检测精度, 基于计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 方法, 提出了风扇强制对流的室内温度场控制方法, 确定风扇放置方式与风扇数量。采用温度最大峰值 (Peak to Valley, PV) 并引入了最大光程差概念, 综合评价光路温度场的均匀性。经过多次实验验证, 采用强制对流方案, 将  $0^\circ$  像散标准差从  $0.146\lambda$  降低到  $0.0263\lambda$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ), 显著提高了光路温度场的均匀性与稳定性, 大幅降低了光学检测误差, 提高了检测精度。为今后保障狭长通道内长光路、大口径光学检测系统的测量精度提供了借鉴。

**关键词:** 强制对流; 光学检测; 气流扰动; 温度梯度

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220204

## Forced convection method for optical testing system with large aperture and long focal length

Zhang Jun<sup>1,2,3</sup>, Gong Xuefei<sup>1,2</sup>

- (1. National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;
2. CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The horizontal optical testing system with large aperture and long focal length is extremely susceptible to the airflow disturbance, which will cause random dynamic changes in time and space of multiple physical quantities in the optical path, such as temperature, velocity and pressure. In particular, the spatial heterogeneity and temporal stability of temperature will directly affect the dynamic change of air refractive index, resulting in the degradation of the point spread function, the tilt of the wavefront and the change of the wavefront over time. In order to suppress the influence of airflow disturbance on the testing optical path and improve the testing accuracy, based on the Computational Fluid Dynamics (CFD), a forced convection method was proposed

收稿日期: 2022-04-10; 修订日期: 2022-05-25

基金项目: 国家自然科学基金 (1162780070)

作者简介: 张俊, 男, 博士生, 主要从事大口径拼接子镜检测装备关键技术等方面的研究。

导师简介: 宫雪非, 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事天文仪器结构设计与分析等方面的研究。

to improve the uniformity of the indoor temperature field, which can be used to determine the array mode and number of fans. The Peak to Valley (PV) of the temperature was adopted and the concept of maximum optical path differences was introduced to comprehensively evaluate the uniformity of the indoor temperature field. Verified by several groups of experiments, the forced convection scheme reduces the standard deviation of the astigmatism coefficient from  $0.146\lambda$  to  $0.0263\lambda$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ), which significantly improves the uniformity and stability of the indoor temperature field, greatly reduces the optical testing error, and improves the testing accuracy. It provides a reference for ensuring the optical testing accuracy of the optical testing system with long optical path and large aperture in the future.

**Key words:** forced convection; optical testing; airflow disturbance; temperature gradient

## 0 引言

实验室存在的气流扰动,极易影响到大口径、长光路的光学检测系统的波前测量精度。空气具有热惯性小、易流动性等特点,气流扰动使得光路中空气的各物理参量在时间上不稳定以及在空间上不均匀,尤其是温度。温度是影响空气折射率的最主要因素,而空气折射率的动态变化,则将给大口径、长光路的光学检测系统,带来显著的波前测量误差。要想提高光学系统的测量精度,意味着要求该光学系统所在的空间区域,均需提高温度场的均匀性。

针对抑制气流扰动对光学测量的影响,很多专家学者进行了深入探究。徐抒岩<sup>[1]</sup>等基于计算流体力学方法,提出了风扇阵列主动送风的室内温度场控制方法。通过温度场控制前后的多组测量数据,说明主动送风手段可以有效改善室内温度场的非均匀性与动态变化性,从而抑制气流扰动对光学检测精度的影响。姜自波<sup>[2]</sup>等研究了光轴水平和垂直两种检测情形下,温度梯度对不同曲率半径球面反射镜像质的影响,得出了温度梯度对水平检验光路的像质变化影响更大的结论。陈华<sup>[3]</sup>等研究了环境温度在时间上的不稳定性及空间上的不均匀性,分析了在不产生湍流的情况下,通过采用优化送风速度的手段,从而降低温度分布的不均匀性。杨振<sup>[4]</sup>等开展对干扰规律的验证实验,得出了湍流强度、测量距离与湍流产生的影响作用正相关的结论,提出了 Kalman 滤波消扰法和成像约束消扰法,显著消除了高频部分的湍流干扰。杨影<sup>[5]</sup>等分析了气流扰动、温度、温度梯度等环境因素对光学波前测量精度的影响,提出了采用搭建隔离罩等环境控制措施,从而降低空气扰动对测量结果的影响。毛洁<sup>[6]</sup>等分析了均匀温度场、轴向温度梯

度及径向温度梯度影响下光学元件曲率半径的变化,采用风扇加强光腔内的空气流动,抑制气流扰动的影响。

综上所述,针对气流扰动目前主要的解决方法有:(1)抽真空,将实验光路置于大型真空罐中,这也是最彻底最完善的解决方法,但是受限于实验条件,尤其在长光路、大口径的情况下很难实现<sup>[1]</sup>;(2)搭建隔离罩将光路进行封闭,隔绝环境中的气流对光路干扰,缺点在于封闭区域存在干涉仪等热源,以及金属工作台等热沉,将在垂直方向上形成稳定的温度梯度,影响测量结果;(3)通过强制对流等外力手段加大扰动,提高光路内空气的流动性以及温度的均匀性,进行多次测量取平均,从而消除单一测量结果中气流扰动对检测精度的影响<sup>[5]</sup>。

文中研究的大口径、长光路的光学精密检测系统<sup>[7]</sup>,其中主要的反射镜口径达到  $\varnothing 940 \text{ mm}$ ,曲率半径达到  $62.558 \text{ m}$ ,极易受到气流扰动的影响。为提升光学精密检测系统的精度,该工作同样采用风扇强制对流方式,降低气流扰动影响,工作重点集中在基于 CFD 方法,给出风扇放置方式、送风角度、风扇数量的优化设计方案。在上述工作基础上,提出用光路区域的温度 PV,同时引入最大光程差的概念,综合评估该方法对于抑制气流扰动、提高光路温度场均匀性效果。将该方案应用于实际光学测量系统,对比强制对流前后的实验结果,验证了风扇强制对流方法确实能够有效提高光路内温度场的均匀性与稳定性,为抑制气流扰动对大口径、长焦距的光学检测系统测量精度的影响,提供了借鉴。

## 1 原理

### 1.1 温度对空气折射率的影响

温度是影响空气折射率的最主要因素,气流扰动

引起光路内温度起伏变化,从而导致折射率的动态变化。折射率的不均匀,会引起光线的偏折,导致光线的光程差变大,带来测量误差,降低测量精度。

采用高斯——劳伦斯公式计算空气折射率<sup>[8]</sup>:

$$N = 1 + \frac{77.6 \times 10^{-6}}{T} (1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) \left( P + 4.810 \frac{V}{T} \right) \quad (1)$$

式中:  $N$  为空气折射率;  $\lambda$  为光的波长, 单位:  $\mu\text{m}$ ;  $P$  为干燥的大气压强, 单位:  $\text{hPa}$ ;  $V$  为水汽的压强, 单位:  $\text{hPa}$ ;  $T$  为开尔文温度 (热力学温度), 单位:  $\text{K}$ 。

### 1.2 温度对光程的影响

通过公式 (2) 计算光波通过折射率不均匀空气的光程<sup>[8]</sup>:

$$S(L, y, z) = \int_0^L N(x, y, z) dx \quad (2)$$

式中:  $S(L, y, z)$  为光波通过的光程;  $L$  为光路长度;  $N(x, y, z)$  为光路中某确定位置的空气折射率。

### 1.3 某实验室温度梯度特征

由于太阳辐射等原因, 屋顶的温度明显高于环境温度; 由于地面的热沉效应, 地面的温度则是低于环境温度。屋顶温度高于屋底, 实验室竖直方向上存在显著的温度差。

根据传热学理论: 一水平封闭夹层, 受热面在上, 受冷面在下。在没有外界扰动情况下, 夹层上部的空气贴近受热面 (屋顶), 空气被加热, 温度升高, 密度降低, 始终保持在上方的位置; 下部的空气接近冷面 (地面, 热沉), 温度降低, 密度增加, 始终停留在下方的位置。上部的空气密度始终低于下部的空气, 空气中的各质点不发生相对位移, 不产生冷热流体相互掺混的热量传递过程。这种热量传递是仅依靠纯导热, 属于热传导范畴<sup>[9]</sup>。

实验室上下面边界温度属于第一类边界条件, 其余四周视作绝热边界条件, 属于常物性、稳态、无内热源的工况。模型可以简化为一维平壁稳态导热问题, 得出竖直方向上温度分布  $t$  与高度  $z$  的关系为<sup>[9]</sup>:

$$t = \frac{t_2 - t_1}{\delta} z + t_1 \quad (3)$$

式中:  $t_1$  为受冷面温度;  $t_2$  为受热面温度;  $\delta$  为冷热面之间的距离;  $z$  为高度;  $t$  为高度  $z$  对应的温度。

从上述公式可以看出: 在开风扇之前, 某实验室符合上述的水平封闭夹层上热下冷特征, 经过长时间

的静置稳定, 空气温度分布与所在高度成线性关系, 空气在竖直方向上形成稳定的温度梯度分布。光路内空气温度显著不均匀, 从而导致空气折射率不均匀, 影响测量精度。

## 2 仿真分析

### 2.1 工作环境

图 1 为该光学检测系统示意图, 表 1 给出了该系统的主要参数, 主要包含有口径  $\phi 940 \text{ mm}$  反射镜、 $\phi 320 \text{ mm}$  平面镜、干涉仪, 中心高度为  $1.18 \text{ m}$ <sup>[10]</sup>。所在实验室属于狭长通道, 计算流域长宽高分别为  $40$ 、 $5.6$ 、 $5.2 \text{ m}$ 。在 2021 年 4 月 30 日 14 时开展了实测实验, 在实验过程中进行了环境温度的实际测量。壁面条件为: 屋顶受太阳辐射等条件影响, 温度最高达  $302.15 \text{ K}$ ; 屋底属于热沉条件, 温度恒定在  $298.15 \text{ K}$ , 都属于第一类温度边界条件, 四周墙壁简化为绝热壁面条件。

表 1 大口径长焦距光学检测系统参数

Tab.1 Parameters of optical testing system with large aperture and long focal length

Devices	Parameters
Diameter of the reflector/mm	940
Radius of the reflector/m	62.558
Diameter of the mirror/mm	320
Computational domain/ $\text{m}^3$	$40 \times 5.6 \times 5.2$
Diameter of fans/mm	750

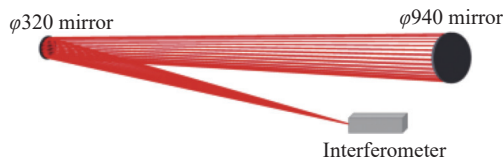


图 1 光学检测系统

Fig.1 Optical testing system

### 2.2 静置稳定条件下的温度分布

关闭实验室门窗, 禁止工作人员走动, 且暂停风机等外力作用影响。经过长时间的静置稳定, 实验室竖直方向上出现了明显的温度梯度。

如图 2 所示, 在光路中心做竖直横截面  $Y=0$ , 显示竖直方向上温度云图, 竖直方向上温度分层显著, 体现出明显的温度梯度分布。如图 3 所示, 在  $\phi 940 \text{ mm}$

反射镜前方设置一条竖直线,读取竖直线上各点的温度值,显示出空气温度与所在的竖直高度成线性关系。读取该竖直线上高度为  $Z=0.71\text{ m}$ 、 $Z=1.18\text{ m}$ 、 $Z=1.65\text{ m}$  的温度数值,并与公式 (3) 计算出来的理论温度进行比较,如表 2 所示。对比显示:仿真结果与理论计算结果一致。

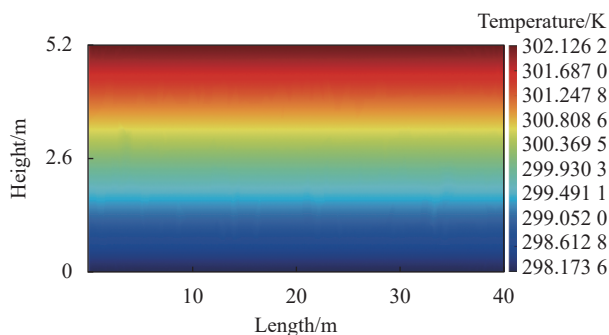


图 2 竖直方向横截面  $Y=0$  温度云图

Fig.2 Temperature contour of  $Y=0$  cross-section in the vertical direction

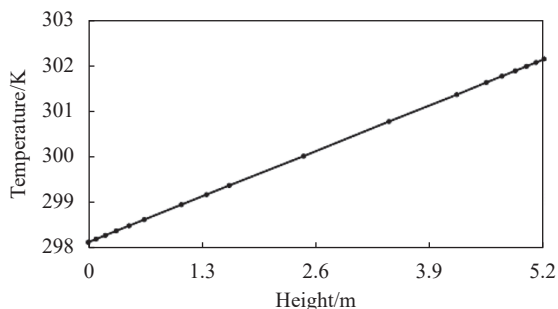


图 3  $\phi 940\text{ mm}$  反射镜前方竖直方向温度分布

Fig.3 Temperature distribution in the vertical direction in front of the  $\phi 940\text{ mm}$  mirror

表 2 反射镜温度的仿真结果与理论结果的比较

Tab.2 Comparison between simulation results and theoretical results of mirror temperature

Height/m	Simulation results/K	Theoretical results/K
0.71	298.706	298.696
1.18	299.061	299.058
1.65	299.417	299.419
PV	0.7102	0.723

引入最大光程差的概念,从而综合评价仿真设计方案中温度场的均匀性对光学检测精度的影响<sup>[8]</sup>。在光路内均匀分布 25 条平行于光轴的光束线,体现出整个镜面光路内的气流分布状况,图 4 是光束分布的

横截面。读取 25 条光束的温度分布,代入折射率公式 (1) 而按照光程公式 (2) 计算光程。取 25 条光束的光程最大值、最小值做差值,称之为最大光程差,即  $S_{PV} = S_{\max} - S_{\min}$ 。此时最大光程差为  $43\ 676\text{ nm}$ 。

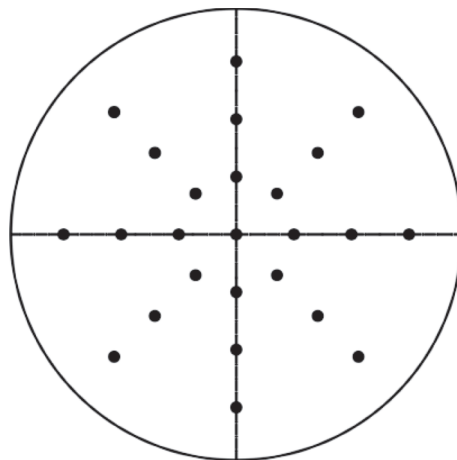


图 4 圆面上的 25 个采样点分布

Fig.4 Distributions of 25 sampling points on the circular section

综上所述结论:在不开风扇,实验室静置稳定的情况下,某实验室在竖直方向呈现出明显的温度分层。在光路所涉及的高度范围 ( $0.71\sim 1.65\text{ m}$ ) 之内,最大光程差为  $43\ 676\text{ nm}$ 。由于温度梯度的存在,引起了空气折射率不均匀,将会给测量带来了严重的测量误差。必须改善这一情况。

### 2.3 强制对流条件下的温度分布

利用风扇强制对流手段加大扰动,循环运动引起不同温度的空气相互掺混并进行热量传递,可以有效提高光路温度场的均匀性<sup>[11]</sup>。与此同时,采取多次测量平均的方式,进一步消除单一测量结果中气流扰动对检测精度的影响<sup>[5]</sup>。

#### 2.3.1 测量风扇参数

采用  $\phi 750\text{ mm}$  的工业风扇,经过多组实际测量取均值,得出风扇的出风速度为  $5.759\text{ m/s}$ ,距离  $1\text{ m}$  处的风速为  $5.285\text{ m/s}$ ,距离  $5\text{ m}$  处的为  $1.8175\text{ m/s}$ 。按照 1:1 比例进行建模。因为重点关注对象是光路区域温度场,进行整体系统分析,而风扇在计算流域内部,属于系统的一部分,因此对风扇进行模型简化,设置为 Fan 边界,最大速度为  $5.63\text{ m/s}$ ,距离  $1\text{ m}$  处的风速为  $5.249\text{ m/s}$ ,距离  $5\text{ m}$  处为  $1.975\text{ m/s}$ 。

根据图 5 所示的风速随着距离变化折线图,对比

实验测量得出的风扇风速与仿真计算得出的风速,基本吻合。

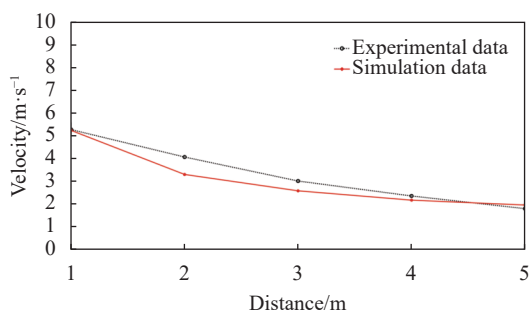


图 5 风速随着距离的变化

Fig.5 Variation of wind speed with distance

### 2.3.2 确定风扇放置方式

针对大口径、长光路的光学检测系统自身结构特

点,结合狭长通道实验室的工作建筑环境条件,主动送风方式拟采取水平送风,送风方向与光路方向、温度梯度方向相互垂直。该送风方式仍然存在风扇单侧布局或两侧布局的优化问题。本节暂时采用四台风扇,分别按照两侧布置和单侧布置方式排列,对比这两种放置方式对提高光路温度场的均匀性的效果。

从与温度梯度方向平行和垂直两方向,综合考虑光路范围内温度场的均匀性。图 6 分别显示了,风扇处于单侧布置和两侧布置时,不同高度横截面  $Z=1.65\text{ m}$ 、 $Z=1.18\text{ m}$ 、 $Z=0.71\text{ m}$  处的温度云图,其中虚线框范围是光路所在区域,核心目标就是提高这一区域温度场的均匀性。风扇单侧布置时,光路温度 PV 值为 0.453 K; 风扇两侧布置时,光路温度 PV 值下降到 0.379 K。

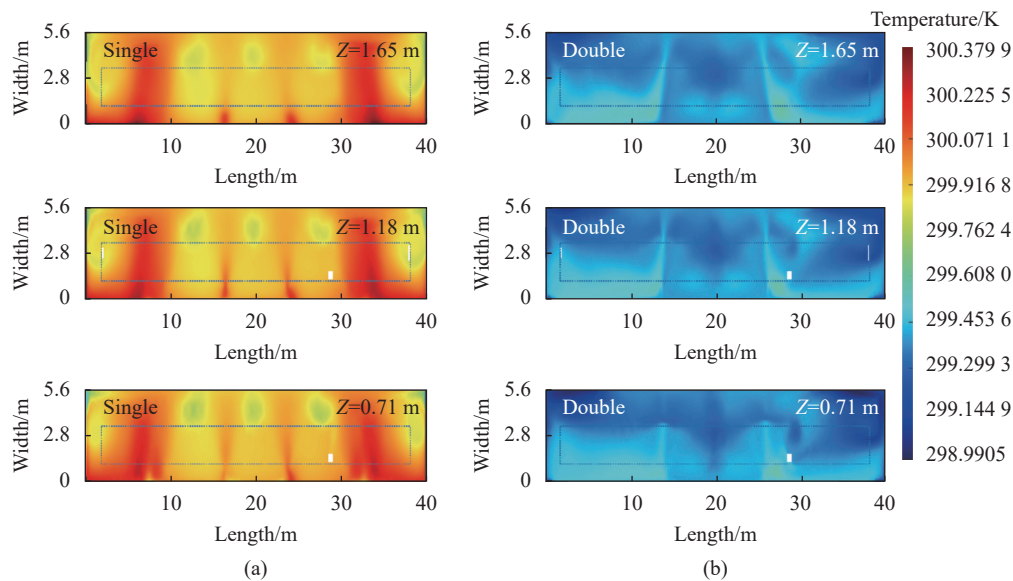


图 6 风扇单侧布置和两侧布置的温度云图

Fig.6 Temperature contours with 4 fans on one and both sides

根据风扇单侧放置和两侧放置的结果比较,印证了上述的测试经验:风扇两侧放置比单侧放置更能有效的提高光路范围的温度场均匀性。所以接下来都采用风扇两侧放置方式。

### 2.3.3 优化风扇送风角度

在确定了风扇两侧放置方式后,需要进一步对风扇送风角度进行优化,确定最佳的送风角度,从而更好的提高检测光路温度场的均匀性。将风扇送风方

向与光路方向的夹角定义为风扇送风角度。

图 7 给出了风扇倾斜不同送风角度对光路温度场的 PV 和最大光程差的影响。在  $0^\circ\sim 15^\circ$  时,最大光程差在下降,达到了最低;从  $15^\circ$  变化到  $90^\circ$ ,最大光程差在持续增加。温度 PV 则是一直在波动变化中,在角度为  $15^\circ$  时达到了最小值 0.366 K。综合考虑选用倾斜角度为  $15^\circ$ ,可以实现光路温度场均匀性达到最佳的效果。

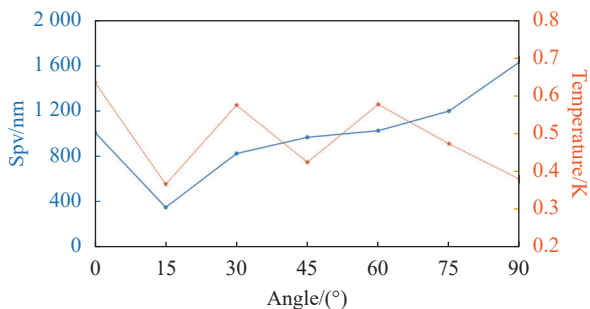


图 7 角度对温度和最大光程差的影响

Fig.7 Effects of the different angle on temperature and optical path difference

### 2.3.4 优化风扇数量

确定了风扇两侧布置方式和风扇送风角度 15°, 在此基础上进行风扇数量的优化。将风扇的数量从 2 台变化到 16 台, 图 8 所示为 4 台风扇两侧布置, 送风角度 15° 的示意图, 查看风扇数量对光路温度 PV 和最大光程差的影响。

图 9 所示的是风扇数量对温度和最大光程差的影响。图 10 所示不同数量风扇在 3 个 Z 平面的温度云图。风扇数量从 2 台增加到 4 台, 光路温度 PV 和最大光程差都在降低, 分别为 0.366 K 和 349 nm。风扇数量从 6 台增加到 16 台的过程中, 最大光程差在持续降低而温度 PV 在小范围内波动, 风扇数量为

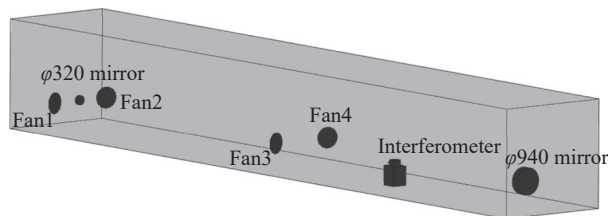


图 8 4 台风扇两侧布置, 送风角度 15° 示意图

Fig.8 Illustration of 4 fans on both sides with the tilt angle 15°

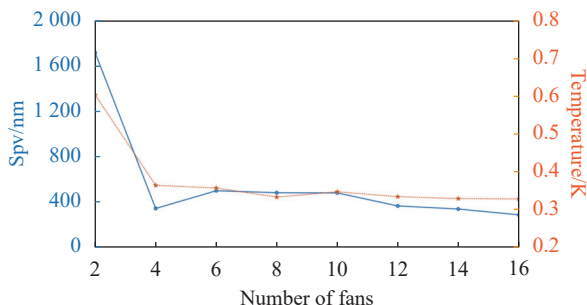


图 9 风扇数量对温度和最大光程差的影响

Fig.9 Effects of the different numbers on temperature and optical path difference

16 台的时候光路温度 PV 和最大光程差达到了最低, 分别为 0.330 K 和 293 nm。结合考虑实验室实际工作环境条件, 最终确定风扇数量为 4 台, 两侧布置, 吹风角度为 15°。

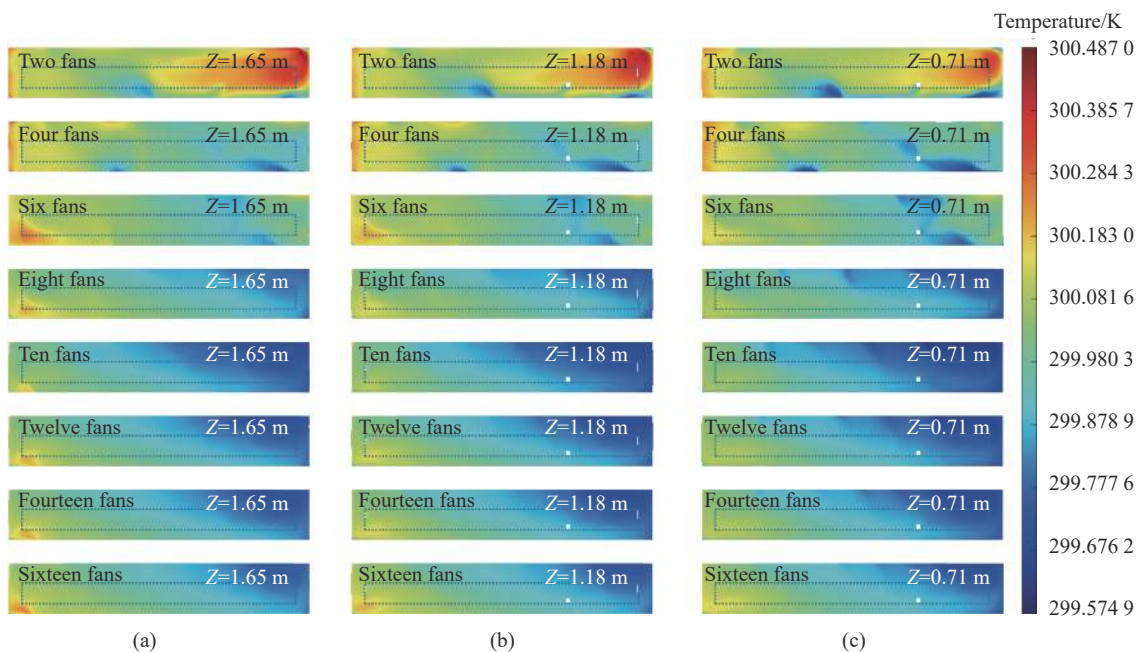


图 10 不同数量风扇在 3 个 Z 平面的温度云图

Fig.10 Temperature contours of three cross-sections with different numbers of fans

### 3 实 验

按照上述的仿真结果,搭建布置检测光路,当前选择通光口径  $\varphi 752\text{ mm}$  进行检测。进行多次实验测量,对面型进行 Zernike 多项式拟合<sup>[12]</sup>。竖直方向上的温度分层容易引起  $0^\circ$  像散,所以选择  $0^\circ$  像散值作为评价指标<sup>[1]</sup>。图 11 所示了强制对流前后的测量出的  $0^\circ$  像散值<sup>[13]</sup>,图 12 所示的是风扇强制对流前后的面型云图,根据实验结果,在没有开启风扇时,实验室静置很长一段时间进行稳定,测得像散平均值达到  $0.279\lambda$ ,标准差为  $0.146\lambda$ ;开启风扇之后,像散平均值

降低到  $0.0073\lambda$ ,标准差为  $0.0263\lambda$ 。

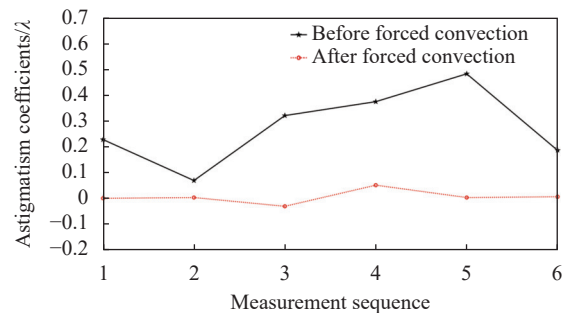


图 11 强制对流前后的  $0^\circ$  像散

Fig.11  $0^\circ$  astigmatism coefficients before and after forced convection

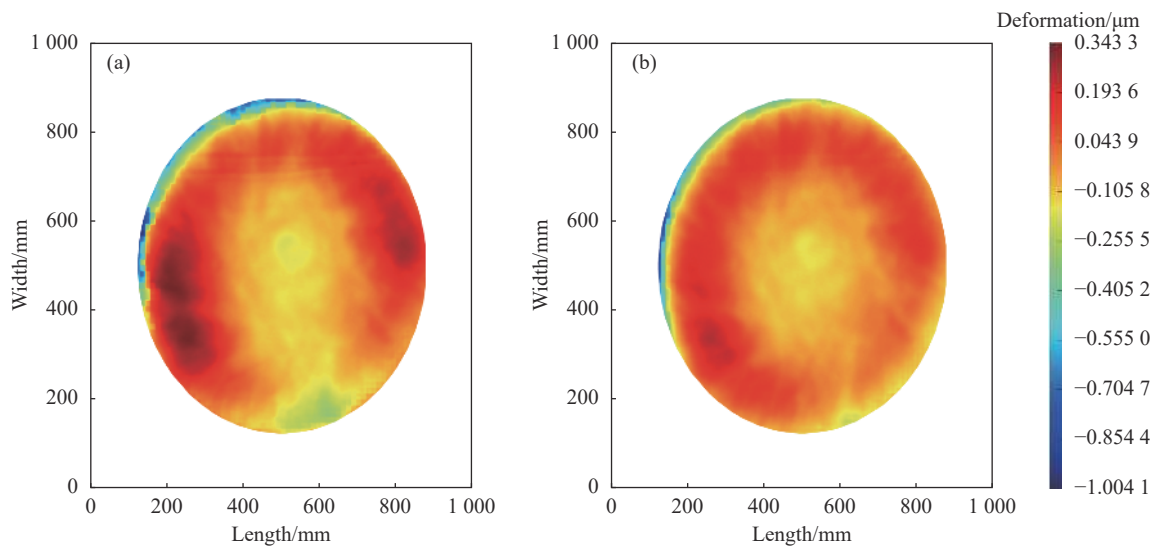


图 12 强制对流前后的面型云图

Fig.12 Deformation contours before and after forced convection

对比测量结果的标准差,开风扇之前的测量结果偏差很大,开风扇之后,有效提高了测量结果的稳定性。这表明:强制对流搅乱了之前的空气静置稳定分层,有效解决了竖直高度方向上温度梯度问题。并且通过加大扰动的方法,加快了检测光路中空气流动速度,提高检测光路内空气的流动性以及温度的均匀性。再进行多次测量取平均,进一步消除单一测量结果中气流扰动带来的测量误差。

### 4 结 论

从传热学角度,分析了强制对流之前某实验室上下分别存在稳定热源与热沉的情况下,静置稳定的工况主要引起竖直方向上温度分层,存在显著的温度梯

度,从而导致空气折射率变化带来测量误差,从理论与仿真两方面印证了这一分析的准确性。

针对降低气流扰动对大口径、长光路的光学检测系统测量精度的影响,基于 CFD 理论,提出了强制对流的室内温度场控制方法,确定风扇放置方式,优化风扇送风角度与数量。用三个横截面光路区域的温度 PV 值和最大光程差共同评价温度场的均匀性。打乱空气分层并且加大扰动,加快检测光路范围内的空气流动速度、提高空气温度的均匀性。通过多次测量取平均方法,从而消除单一测量结果中气流扰动对检测精度的影响。多次实验数据验证,采用风扇强制对流方法将像散平均值从  $0.279\lambda$  降低到  $0.0073\lambda$ ,将像散标准差从  $0.146\lambda$  降低到  $0.0263\lambda$ ,说明了风扇强制

对流方法能够有效提高光路温度场的均匀性与稳定性,从而提高测量精度。为今后的抑制气流扰动对长光路、大口径光学检测系统测量精度的影响提供了借鉴。

#### 参考文献:

- [1] Xu Shuyan, Zhang Xusheng, Fan Kuo, et al. Suppression of airflow turbulence in wavefront measurement for large-aperture optical systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(1): 80-89. (in Chinese)
- [2] Jiang Zibo, Li Xinnan, Ji Bo. Influence analysis of testing accuracy for long focal length mirror by vertical temperature gradient of air [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 142-147. (in Chinese)
- [3] Chen Hua. Analysis of environmental disturbance effects on high precision figure measurements[D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences), 2011: 50-70. (in Chinese)
- [4] Yang zhen. Analysis and modification on Imaging aberration caused by light oscillation in turbulence[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013: 23-31. (in Chinese)
- [5] Yang Ying. Research on dynamic fizeau interferometer based on lateral displacements of the point sources[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2018: 36-54. (in Chinese)
- [6] Mao Jie. Study on techniques of high-accuracy radius interferometric measurement[D]. Chengdu: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics), 2015: 29-51. (in Chinese)
- [7] Wang Fengpu, Li Xinnan, Xu Chen, et al. Optical testing path design for LOT aspheric segmented mirrors with reflective-diffractive compensation [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1184-1193. (in Chinese)
- [8] Xu Jianghai, Gong Xuefei. Study of wind load on four astronomical enclosures based on numerical wind tunnel experiments [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 45-55. (in Chinese)
- [9] Tao Wenquan. Heat Transfer[M]. Xi'an: Xian Jiaotong University Press, 2001: 34-42. (in Chinese)
- [10] Chen Baohua, Wu Quanying, Tang Yunhai, et al. Processing method of large off-axis aspheric mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(5): 1095-1102. (in Chinese)
- [11] He Jianguo, Li Ming, Mo Zeqiang, et al. Longitudinal forced convection heat transfer for high power slab laser media [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20200556. (in Chinese)
- [12] Wang Jing, Wei Liang, Xiang Wenhao, et al. High-precision camera calibration method considering projected circular edge blur and eccentricity error [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(12): 20210130. (in Chinese)
- [13] Shao Hongyu, Li Yingchao, Wang Chao, et al. Aberration effect and optimization design of super-resolution telescope optical system [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 106-120. (in Chinese)