

# 南极光学望远镜的氧化铟锡薄膜多相交流电除霜方法

郑 奕<sup>1,2</sup> 赵 顶<sup>1,3\*</sup> 袁祥岩<sup>1,2</sup> 王晋峰<sup>1,2</sup> 张凯元<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>中国科学院天文光学技术重点实验室,江苏 南京 210042

<sup>3</sup>中国科学院大学,北京 100049

**摘要** 在极地环境(如南极 Dome A)中的光学系统,氧化铟锡(ITO)薄膜加热除霜有突出的优势。简述了 ITO 薄膜除霜原理,指出了目前采用的直流电、点状电极的加热设计存在局部过冷、电极过热、整体加热不均的情况,影响成像质量与除霜效果。给出了加热除霜效果的评估指标,提出了多相交流电、线状电极的新设计,并采用“主路径”分析法进行论证。然后以南极巡天望远镜(AST)为背景,对 500 mm 口径镜面进行有限元模拟,在等功率条件下,对各加热设计进行评估。使用红外热像仪测量实际镜面:采用新设计后,镜面温度均方差降低了 81.65%,峰谷值降低了 76.31%。实验结果表明:新设计大幅提高了加热除霜的均匀性和效率,改善了视宁度,有望应用于南极光学望远镜工程中。

**关键词** 薄膜; 南极光学望远镜; ITO 薄膜; 多相交流电; 镜面除霜

中图分类号 P111.2; O484.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0631001

## Indium Tin Oxide Thin Films Defrosting Using Multiphase AC Design for Antarctic Optical Telescope

Zheng Yi<sup>1,2</sup> Zhao Ding<sup>1,3</sup> Yuan Xiangyan<sup>1,2</sup> Wang Jinfeng<sup>1,2</sup> Zhang Kaiyuan<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>National Astronomical Observatories, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** For optical system working in the polar environment, such as Antarctic Dome A, ITO film defrosting has outstanding advantage. The principle of ITO film defrosting is introduced. Present heating design for DC load with spot electrodes has several limitations: large area of local insufficient heating, electrode area overheating and uneven distribution on the whole surface. These affect imaging quality and defrosting effect. The evaluation index for defrosting effect is given, and then the new design of multiple-phase AC load with linear electrodes is put forward. It is analyzed using main path method. Targeting Antarctic Survey Telescope (AST), a 500 mm aperture mirror is studied using finite element method: each heating design is evaluated under equal power condition. The actual mirror is measured by infrared thermal imager. Using the new design, mean square deviation of mirror temperature reduces by 81.65% and peak to valley by 76.31%. The experimental results validate that the design of multiple phase AC load with linear electrodes greatly improves defrosting homogeneity, effectiveness and seeing. It will be applied to Antarctic optical telescope engineering.

**Key words** thin films; Antarctic optical telescope; ITO film; multiphase alternating current; mirror defrosting

**OCIS codes** 310.1515; 350.1260; 310.7005; 350.4600

收稿日期: 2015-01-29; 收到修改稿日期: 2015-02-03

基金项目: 国家 973 计划(2013CB834901)、国家自然科学基金(11190011)、江苏省自然科学基金(BK20141516)、所青年人才专项  
作者简介: 郑 奕(1977-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光学镜面磨制、检验, 精密运动控制方面的研究。

E-mail: yzheng@niaot.ac.cn

\*通信联系人。E-mail: zhaoding475613635@126.com

## 1 引 言

我国南极科考队经过长期测量,发现南极 Dome A 区域近地层高度低、寒冷干燥、大气透明度高,大气视宁度极佳,可连续 3~4 个月无间断观测,光学望远镜比安置在其他台址效率高 2~4 倍<sup>[1]</sup>,因此,Dome A 被天文学家一致公认为地面上最好的天文台址<sup>[2-3]</sup>。2008 年,南极天文中心研制的首台南极望远镜“中国之星”(CSTAR)安装在 Dome A,获得了巨大的天文数据及成果<sup>[4]</sup>。2012 年,“南极巡天望远镜”的首台(AST3-1)已运抵南极 Dome A,开始正式观测;AST3-2 也已启程,后续的 AST3-3 将观测扩展到红外波段<sup>[5-6]</sup>。南极天文台已列入十二五国家重大科技基础设施建设中长期规划,其主干设备之一南极昆仑暗宇宙巡天望远镜(KDUST)主镜达 2.5 m,工作波段为 0.4~2.5  $\mu\text{m}$ ,视场可达 1.5<sup>o</sup><sup>[7]</sup>,用于研究暗能量、暗物质,搜寻系外行星。

对处于极端低温环境的地面光学望远镜而言,镜面结霜的问题一直干扰着天文观测。虽然南极 Dome A 地区寒冷干燥、空气稀薄,但仍含有少量水蒸气,当空气流过低于其冻结温度的表面时,空气中的水蒸气会凝华并附着在固体表面上,结成一层霜<sup>[8-9]</sup>。若不及时处理,将导致望远镜镜面失效而阻碍观测;不恰当的除霜方法,将造成镜面上方冷热不均,形成空气湍流,严重影响观测视宁度,降低光学成像质量。

相对其他除霜方法,如机械擦拭法、暖气流吹除法、电阻丝加热法,氧化钢锡(ITO)薄膜除霜有着突出的优势:1) 不对光学镜面施加机械外力,不会降低镜面的装配精度,也不存在镜面磨损问题;2) ITO 材料的带隙宽(3.5~4.3 eV),载流子浓度( $10^{21}\text{cm}^{-3}$ )和电子迁移率( $15\sim 45\text{cm}^{-2}\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )较高,具有良好的导电性能(电阻率可低至  $10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$ )<sup>[10]</sup>;3) ITO 薄膜在可见光波段可获得 85% 以上的透射率<sup>[11]</sup>,适合透镜使用;与反射膜组合,可用于反射光学系统;4) 制备工艺成熟,在保持镜面精度的同时,易于集成到光学系统中,且通过调节膜层厚度可以控制面电阻,在一些极端环境中的光学系统中获得应用<sup>[12]</sup>。

## 2 ITO 薄膜除霜原理与分析

### 2.1 ITO 薄膜除霜原理

当镜面适当加热,使得镜面温度略高于环境温度时,就破坏了结霜条件,从而实现除霜效果。实践证明当温差控制在 2  $^{\circ}\text{C}$  附近时<sup>[13]</sup>,既可实现结霜效果,又能显著减小由温差造成的空气对流,保证成像质量。由此,可以调节 ITO 薄膜的发热功率,使得镜面平均温度高于环境温度约 2  $^{\circ}\text{C}$ 。实际工程中,为保证光线透过镜面后或经镜面反射后的光程差一致,镜面采用均匀镀膜,图 1 为镜面单元示意图,ITO 薄膜厚度  $d$  各处相等。

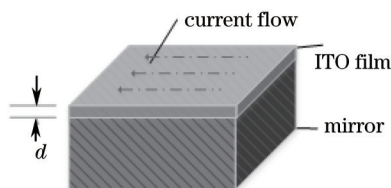


图 1 镜面上的 ITO 薄膜

Fig.1 Conductive film on the mirror

薄膜的面电阻  $R_s$  与材料电阻率  $\rho$  以及薄膜厚度  $d$  的关系如下

$$R_s = \rho/d. \quad (1)$$

对于 ITO 薄膜加热方法,其加热功率与面电阻和电流的平方成正比,公式为

$$P = I^2 \cdot R_s, \quad (2)$$

而材料电阻率  $\rho$  及薄膜厚度  $d$  不变,因此面电阻  $R_s$  为定值。加热功率大小直接由电流大小决定,加热的均匀性由电流的分布性决定。

### 2.2 ITO 薄膜除霜现有设计的局限

ITO 薄膜除霜目前采用直流电、点状电极的设计。如图 2 所示, $a$  为正极, $b$  为负极,与镜面相比,电极尺寸很小,正负极之间有一个固定的电压差,电流由正极流入,主要沿粗箭头方向流动,汇聚于负极流出。

这种设计存在的局限有:电流集聚在电极附近,造成发热过多;远离电极的区域电流很小,造成发热不足。而镜面冷热不均将导致:

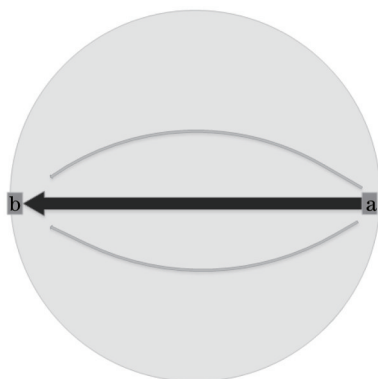


图2 直流电、点状电极的电流流向示意图

Fig.2 Current flow of DC load with spot electrodes

- 1) 镜面各处热膨胀不同,面形偏离设计,影响光学成像质量;
- 2) 镜面附近由于温度不均引起湍流,影响视宁度,降低成像分辨率;
- 3) 南极站点设备的运行能源均依赖于长途运输获得的燃油发电,低效除霜方法浪费宝贵的能源。因此原有设计难以满足 Dome A 望远镜除霜的要求。

### 2.3 镜面加热除霜性能的评估指标

对于镜面加热除霜设计的性能,通过以下5个指标进行评估:

- 1) 功率密度的最大值( $P_{max}$ ):代表镜面上的最热点的功率密度;
- 2) 功率密度的最小值( $P_{min}$ ):代表镜面上的最冷点的功率密度;
- 3) 功率密度的峰谷值( $P_{pv}$ ):峰谷值越小,镜面加热越均匀;
- 4) 功率密度的均方差值( $P_{ms}$ ):均方差值越小,镜面各点的功率密度越相近,即加热更均匀;
- 5) 功率密度直方图( $P_{hist}$ ):对于均匀加热的镜面而言,各点功率密度相等,在直方图上表现为 $\delta$ 函数。因此功率密度直方图形状越趋近于 $\delta$ 函数,加热除霜效果越好。

### 2.4 多相交流电、线状电极的设计概念

#### 2.4.1 主路径分析法

由于直流电极沿镜面水平对置,电流主要沿径向流动(图2中粗箭头),其余区域,如上下两极附近流经的电流就很少(图2中细箭头),出现过冷现象。因此需改变电极布置及电压加载的方式,在维持径向电流的同时,增加沿镜面周向流动的电流。为此引入了多相交流电的改进设计。

图3为电极分布示意图。对于半径为 $R$ 镜面,电极沿外圆等间隔分布,设电极数量为 $N$ ,则各电极的位置为:

$$\begin{cases} P_i^x = R \cos(\alpha i) \\ P_i^y = R \sin(\alpha i) \end{cases}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (3)$$

式中  $\alpha = 2\pi/N$ , 称为极间角。

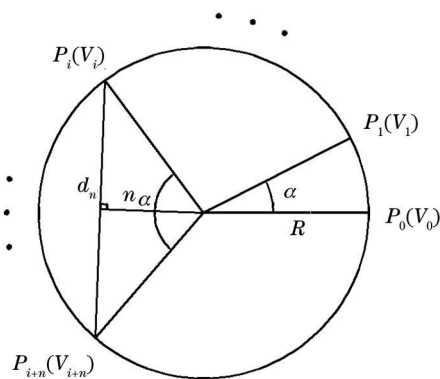


图3 电极分布示意图

Fig.3 Distribution of electrodes

每个电极上加载幅值为  $A$  的交流电压, 公式为

$$V_i = A \sin(\omega t + \alpha i), i = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (4)$$

则电极  $i$  与电极  $(i+n)$  之间在  $t$  时的电压差为

$$\begin{aligned} \Delta V_n &= V_{i+n} - V_i \\ &= A \sin[\omega t + \alpha(i+n)] - A \sin(\omega t + \alpha i) \\ &= 2 \sin\left(\frac{n\alpha}{2}\right) \cos\left[\omega t + \left(\frac{\alpha}{2}\right)(2i+n)\right], i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (5)$$

$\Delta V_n$  在一个周期内的有效值为

$$\overline{\Delta V_n} = \frac{1}{T} \int_0^T |\Delta V_n| dt = \frac{4A}{\pi} \sin(n\alpha/2), \quad (6)$$

电极  $i$  与电极  $(i+n)$  之间的直线距离为

$$d_n = 2R \sin(n\alpha/2), \quad (7)$$

因为电极之间直线路径最短, 电压差最大, 电流最容易在此直线路径上传输, 因此可定义电流在电极之间的直线传输路径为“主路径”, 则主路径上的电场强度幅值为

$$\bar{E} = \frac{\overline{\Delta V_n}}{d_n} = \frac{2A}{\pi R}, \quad (8)$$

而电流密度  $J$  与电场强度幅值  $\bar{E}$  的关系为

$$J = \bar{E}/\rho = 2A/\pi\rho R, \quad (9)$$

由(8)式与(9)式可获得交流电压幅值  $A$  与镜面半径  $R$  的关系:

$$A = (\bar{E}\pi/2) \cdot R = (J\pi\rho/2) \cdot R, \quad (10)$$

根据以上分析, 可得到以下结论:

1) 由(8)式可知, 两个电极之间的平均电场强度大小仅取决于加载交流电的幅值和镜面半径, 与电极数量、电极间隔无关;

2) 若采用两相交流电, 电极间隔  $180^\circ$ , 等同于直流加载, 此时(如图2所示)只有一条沿径向的主路径; 若增加到三相交流电[如图4(a)所示], 主路径增加到3条, 且呈等边三角形分布; 若配置成: 六相交流电[如图4(b)所示], 则不仅覆盖了两相和三相交流电具备的所有主路径、数量增加到15条, 且对镜面形成更全面而均匀的覆盖; 可以想象, 随着多相交流电相数的增加, 主路径对镜面的覆盖情况会进一步改善;

3) 随着交流电相数的增加, 镜面各处的电场强度趋于一致, 由(9)式可知, 各处的电流密度也趋于一致, 从而获得均匀的除霜效果;

4) 由(10)式可知, 加载电压幅值  $A$  与镜面半径  $R$  成正比关系, 因此当镜面口径发生变化时, 为了获得相同的电场强度或电流密度, 加载电压幅值应做等比例的调整。

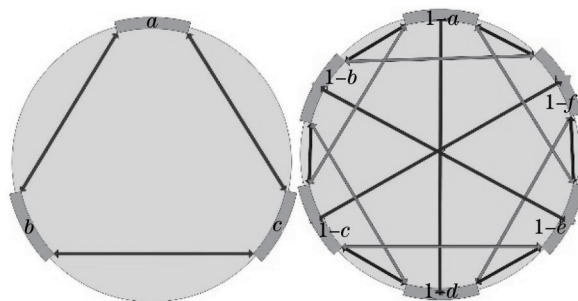


图4 多相交流电、线状电极的主路径示意图。(a) 三相交流电、线状电极  
Fig.4 Current flow for multi-phase AC load with linear electrodes. (a) 3 phase AC load with linear electrodes;  
(b) 6 phase AC load with linear electrodes

#### 2.4.2 电极形状和改进

电极是电流的汇聚区, 过小的电极, 如点状电极, 在电极附近因电流积聚而产生热集中问题。为此, 将

点状电极扩展为适当长度的线状电极,增大电极与ITO薄膜的接触面来分摊电极附近的电流,从而降低镜面加热的峰值。

### 3 南极巡天望远镜 500 mm 非球面改正板加热仿真

#### 3.1 南极巡天望远镜简介

南极巡天望远镜(AST),采用了类施密特光学系统的大视场望远镜,其光学设计<sup>[14]</sup>如图5所示。

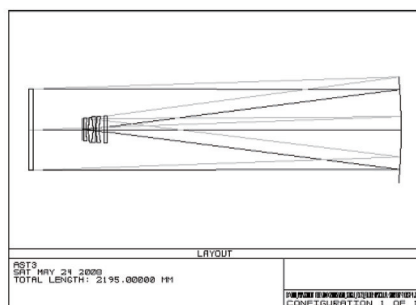


图5 AST3的光学设计图

Fig.5 Optical layout of AST3

左端为望远镜的入瞳,是一块500 mm的透镜。内侧(向主镜一侧)的光学面为非球面改正板,用于改正成像质量;外侧(向被观测对象)的光学面为平面,镀有一层ITO薄膜,用于电加热除霜。此透镜与望远镜镜筒组成密封结构,充有氮气以防止内部的光学系统结霜。以下以该透镜为对象,进行仿真模拟。

#### 3.2 镜面加热仿真模拟

使用ANSYS有限元分析软件的电场仿真功能对以上透镜进行数值模拟。仿真条件如下:建立静电场有限元模型,单元类型为壳单元,玻璃材料和空气绝缘。具体参数如下:镜面直径为500 mm,ITO薄膜厚度为100 nm,电阻率为 $0.04 \Omega \cdot m$ ,载荷边界约束条件为电压约束,求解后获得单元的电压、功率数据。有限元结果输入Matlab软件处理,得出功率密度的分布图、统计值及直方图。

##### 3.2.1 直流电、点状电极的仿真

对直流电、点状电极的设计进行了模拟,镜面总功率为0.196 W(平均功率密度 $P_d$ 为 $1.0 W/m^2$ ),功率密度分布如图6所示。

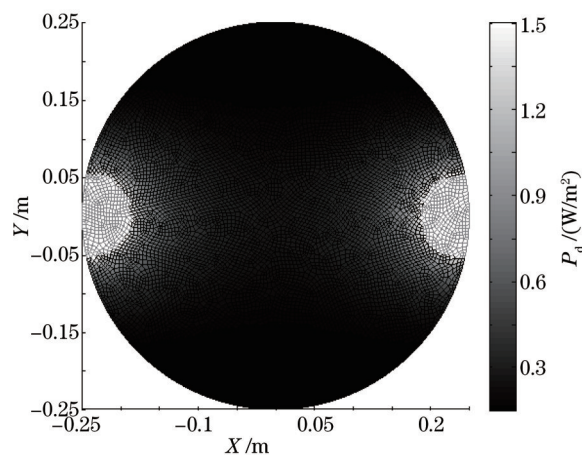


图6 直流电、点状电极加载的功率密度分布图

Fig.6 Power density distribution for DC load with spot electrodes

可以看到,电极附近由于电流集聚,功率密度大;其他区域由于电流发散,功率密度小,整体呈现不均匀的分布。

##### 3.2.2 三相交流电、线状电极的仿真

交流电加载情况比直流加载复杂,采用50 Hz的工频交流,一个周期为20 ms,将其20等分,每隔1 ms做



一次仿真求解,再累加取平均值,最后用 Matlab 软件进行分析处理。镜面总功率为 0.196 W(平均功率密度  $P_d$  为  $1.0\text{W}/\text{m}^2$ ),功率密度分布如图 7 所示。

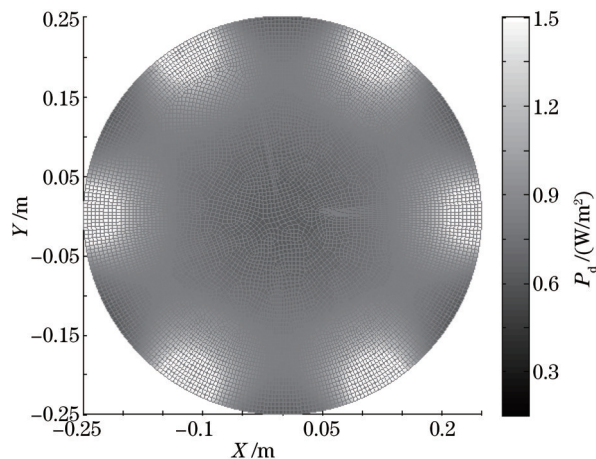


图 7 三相交流电、线状电极加载的功率密度分布图

Fig.7 Power density distribution for 3 phase AC load with linear electrodes

可以看到,相对直流点、点状电极设计,镜面上大多数点的功率密度显著上升;电极附近的电流汇聚获得改善(由于电极呈线条状,电极端点处与相邻电极距离最短,平均压差最大,因此端点处依然存在一些电流积聚的现象,但电极数量增多,会逐步减弱电流积聚效果,对于三相交流电加载,有 3 个成  $120^\circ$  分布的线条状电极,共 6 个电极端点,呈现出 6 个小区域)。虽整体功率分布不均的现象得到显著改善,但镜面中心、电极间的边缘区域仍存在功率不足的现象。

### 3.2.3 六相交流电、线状电极的仿真

采用与三相交流电类似的分析方法,在总功率相等的情况下,得到六相交流电、线状电极的功率密度分布,如图 8 所示。

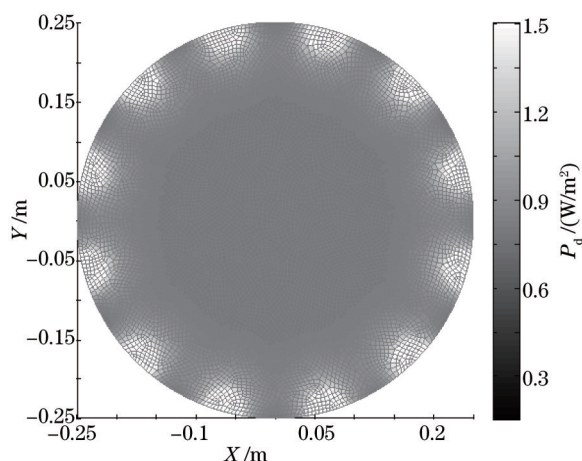


图 8 六相交流电、线状电极加载的功率密度分布图

Fig.8 Power density distribution for 6 phase AC load with linear electrodes

随着相数的增加,整个镜面功率密度分布更趋均匀:镜面中心、极间的边缘存在的低功率密度区域基本消失;电极附近的电流汇聚进一步降低(对于六相交流电加载,有 6 个成  $60^\circ$  分布的线条状电极,共 12 个电极端点,呈现出 12 个小区域)。

### 3.2.4 仿真结果分析

图 9 给出了 3 种设计下的功率密度直方图。

在采用多相交流电、线状电极的新设计后,直方图中的功率密度分布随着相数的增加,基底越来越窄、峰值越来越高,逐步趋近  $\delta$  函数;其峰值与功率密度平均值的偏差也越来越小。

表 1 给出了在相同的平均功率密度的情况下,各加热方法功率密度的最小值、最大值、峰谷值和均方差

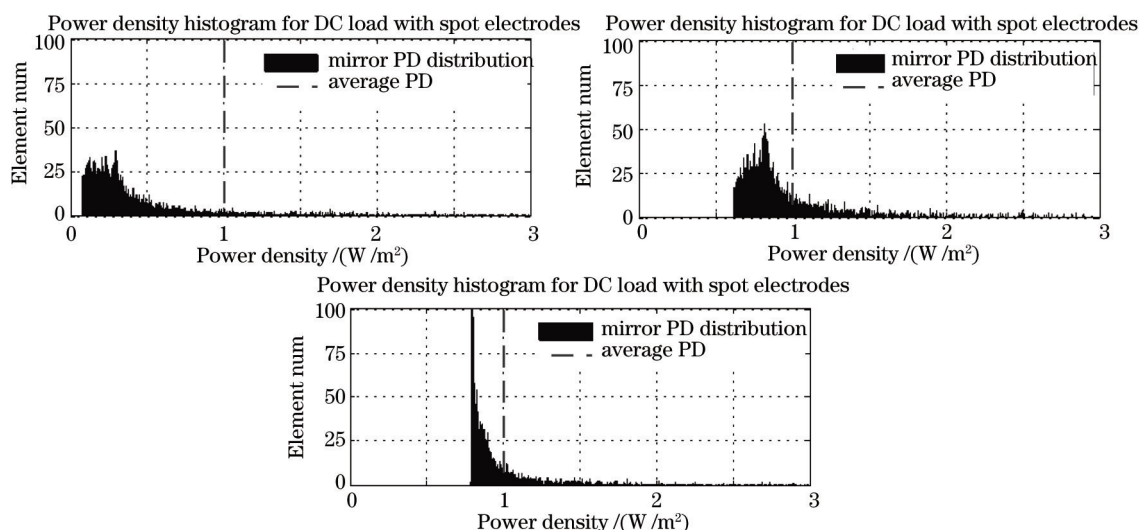


图9 直流电-点状电极、三相交流电-线状电极、六相交流电-线状电极功率密度分布直方图对比

Fig.9 Power density histogram for DC load with spot electrodes and 3 phase AC load with linear electrodes and 6 phase AC load with linear electrodes

值。从数据中可以看出,在等功率条件下,采用空间分布的多相交流电、线状电极的新设计后,功率密度的最大值降低,最小值提升,峰谷值与镜面功率密度的均方差(RMS)大幅减小。所以新设计相对于原先直流电、点状电极设计的节能效果更好,除霜效率更高。

表1 功率密度数据表

Table 1 Power density histogram data sheet

| Heating  | Min    | Max                  | Peak to valley       | Average | RMS     | Unit              |
|----------|--------|----------------------|----------------------|---------|---------|-------------------|
| Design A | 0.0741 | $1.0068 \times 10^3$ | $1.0068 \times 10^3$ | 1       | 15.8345 | W /m <sup>2</sup> |
| Design B | 0.6149 | 25.8514              | 25.2365              | 1       | 1.0220  | W /m <sup>2</sup> |
| Design C | 0.7817 | 19.9923              | 19.2106              | 1       | 0.7953  | W /m <sup>2</sup> |

Note: Design A: DC load with spot electrodes; Design B: 3 phase AC load with linear electrodes; Design C: 6 phase AC load with linear electrodes

## 4 ITO 薄膜电加热实验实测

### 4.1 采用红外热像仪的 ITO 薄膜镜面温度测量

实验准备工作如下:

1) 镜面 ITO 镀膜:通过离子束辅助蒸发镀膜工艺为 520 mm 的平面镜镀上一层 100 nm 厚的 ITO 薄膜,用四探针法测得的面电阻约为  $40 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ;

2) 电极设计及装配:电极材质为铝,长 58 mm、宽 10 mm,呈短线条状,加工有固定导线用的螺纹结构。一共有 24 个,使用导电胶均匀粘于镜面边缘,与 ITO 薄膜接触良好。通过电极间的串联,可形成不同长度的电极;

3) 红外热像仪:使用 Fluke 公司 Ti55 红外热像仪,工作波段为 8~14  $\mu\text{m}$ ,成像阵列分辨率为 320 pixel  $\times$  240 pixel,测量范围为零下 20~600  $^{\circ}\text{C}$ ,热灵敏度为 0.05  $^{\circ}\text{C}$ ;

4) 杂散光抑制:抛光镜面能反射周边热源所辐射的红外光,影响测量精度,因此抑制杂散光十分重要。采取的措施有:镜面后方铺垫黑纸、铝电极发黑来抑制背景辐射;镜面前方放置黑色遮光板,阻隔热源红外光照射镜面;

5) 电源配置:泰克可编程直流电源,0~60 V 连续可调;三相交流电源,0~380 V 连续可调。

实验过程见图 10 所示。

让热像仪镜头通过通光孔对准实验镜面,将电源接至电极通电,待热平衡后通过热像仪监测并拍摄图像,同时在镜面附近用温度传感器探针监测环境温度。工作中热像仪发热较大,被布置在测试镜面前方,用来采集镜面热辐射,而镜面反射率较高,获得的图像中难以避免出现热像仪的辐射(如图 11 中右上角所示),

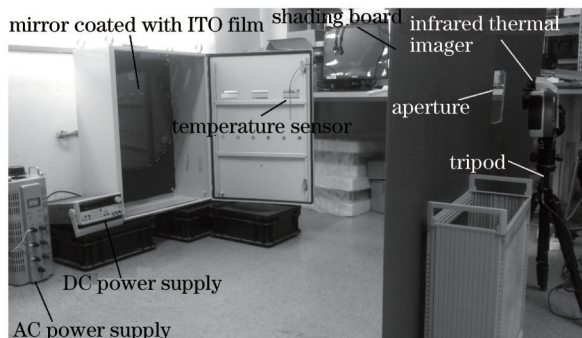


图 10 实验平台

Fig.10 Experimental platform

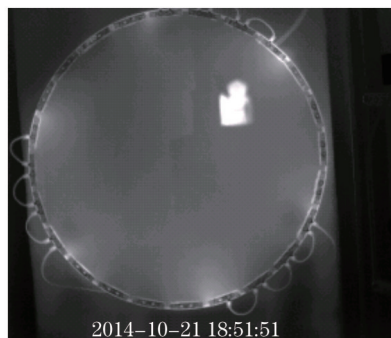


图 11 实验镜面的红外图像

Fig.11 Infrared image of mirror

因此需要在后续处理中删去这部分非镜面的数据。此区域面积很小,并不影响镜面温度的整体布局。

#### 4.2 实验结果处理与分析

开展了直流电、点状电极加热和三相交流电、线状电极加热两个实验,加热功率都设置为 24 W。将拍摄

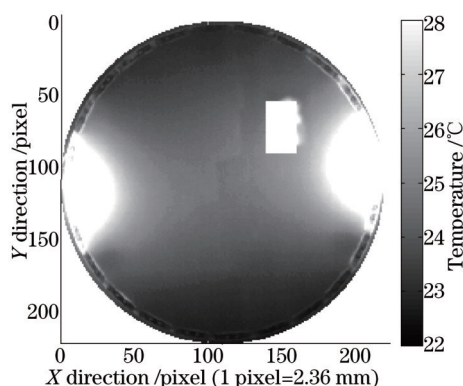


图 12 直流电、点状电极加热的温度分布图

Fig.12 Temperature distribution for DC load with spot electrodes

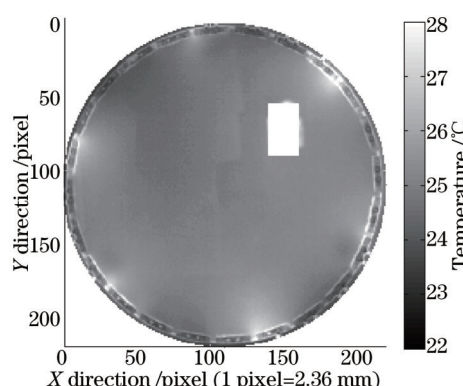


图 13 三相交流电、线状电极加热的温度分布图

Fig.13 Temperature distribution for 3 phase AC load with linear electrodes

后的红外图像导出,再用 Matlab 软件做数值处理,结果如图 12 和图 13 所示。

图 14 为温度的直方图对比,新设计的直方图形状更趋近于 $\delta$ 函数,加热更均匀。

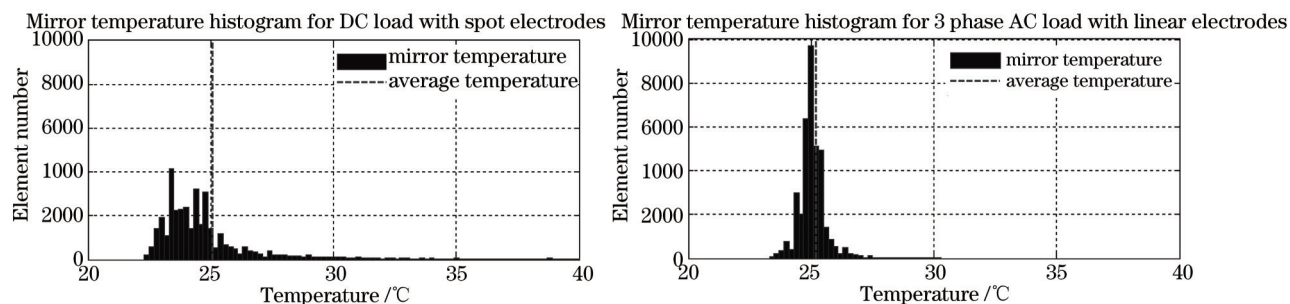


图 14 直流电-点状电极、三相交流电-线状电极镜面温度分布直方图对比

Fig.14 Mirror temperature histogram for DC load with spot electrodes and 3 phase AC load with linear electrodes

表 2 给出了测量结果的统计值,在功率相等的情况下,新设计将温差均方差值降低了 81.65%,峰谷值降低了 76.31%,同时镜面平均温度比环境温度提高了约 2 °C,能满足 AST 望远镜镜面除霜的要求。

表 2 实测温度数据表

Table 2 Actual temperature data sheet

| Heating  | Lowest | Highest | Peak to valley | Average | Mean square deviation | Ambient | Unit |
|----------|--------|---------|----------------|---------|-----------------------|---------|------|
| Design A | 22.9   | 51.6    | 28.7           | 25.21   | 3.0612                | 22.41   | °C   |
| Ddsign B | 23.4   | 30.2    | 6.8            | 25.08   | 0.5618                | 23.10   | °C   |

Note: Design A: DC load with spot electrodes; Design B: 3 phase AC load with linear electrodes



## 5 结 论

对于南极环境下的望远镜镜面除霜方法,ITO薄膜加热除霜比较适合,然而原有的直流电、点状电极加热的设计存在局部过冷、电极过热、整体加热不均的情况,既影响除霜效果,又影响成像质量,因此提出了多相交流电、线状电极的新设计,并采用“主路径分析”的方法进行论证。以南极巡天望远镜为背景,对500 mm口径镜面进行有限元模拟,在等功率条件下,对各加热设计进行评估。通过用红外热像仪对实际镜面进行测量,结果显示采用新设计后,镜面温度均方差降低了81.65%,峰谷值降低了76.31%,镜面平均温度比环境温度提高了约2℃。实验结果表明:多相交流电、线状电极的设计能大幅提高了加热除霜的均匀性和效率,改善了视宁度。对于更大口径的镜面,如2.5 m口径的KDUST望远镜,六相交流电设计更适用,提供更好的加热除霜均匀性和效率。

## 参 考 文 献

- 1 Lu haiping, Yuan Xiangyan, Zhang Kaiyuan. Infrared background radiation removing design and simulation of Antarctic survey telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1122002.  
卢海平,袁祥岩,张凯元. 南极红外巡天望远镜背景辐射抑制方法[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1122002.
- 2 Elena M, Franck L, Susanna H. Optical turbulence: Site selection above the internal antarctic plateau with a mesoscale model[C]. SPIE, 2010, 7733: 77334F.
- 3 Pei C, Chen H L, Yuan X Y, *et al.*. Development of automated small telescopes as Dome A site testing DIMM[C]. SPIE, 2010, 77333: 77334W.
- 4 Yuan X Y, Cui X Q, Liu G R, *et al.*. Chinese small telescope ARray (CSTAR) for Antarctic Dome A[C]. SPIE, 2008, 7012: 70124G.
- 5 Cui X Q, Yuan X Y, Gong X F. Antarctic Schmidt telescopes (AST3) for Dome A[C]. SPIE, 2008, 7012: 70122D.
- 6 Yuan X Y, Cui X Q, Gu B Z, *et al.*. The AST3 project: Antarctic survey telescopes for Dome A[C]. SPIE, 2014, 9145: 91450F.
- 7 Zhu Y T, Wang LF, Yuan X Y, *et al.*. Kunlun dark universe survey telescope[C]. SPIE, 2014, 9145: 91450E.
- 8 Wang Jieteng. Theoretical and Experimental Study on Frosting Phenomenon on the Cold Surface[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008.  
王皆腾. 冷表面上结霜现象的理论与实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2008.
- 9 Liu Zhongliang, Huang Lingyan, Gou Yujun, *et al.*. Progress in the study of frost phenomenon and frost restraining technology[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(4): 1-13.  
刘中良,黄玲艳,勾昱君,等. 结霜现象及抑霜技术的研究进展[J]. 制冷学报, 2010, 31(4): 1-13.
- 10 Cheng Lishun, Sun Benshuang, Zhong Jingming, *et al.*. Development of ITO transparent and conductive thin films[J]. Rare Metals Letters, 2008, 27(3): 10-16.  
成立顺,孙本双,钟景明,等. ITO透明薄膜的研究进展[J]. 稀有金属快报, 2008, 27(3): 10-16.
- 11 Liu Xiaofei, Wang Xiaoping, Wang Lijun, *et al.*. Research progress in transparent conducting films[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 100003.  
刘晓菲,王小平,王丽军,等. 透明ITO薄膜的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 100003.
- 12 Zhao J L, Wang D X, Yuan X Y, *et al.*. The design of mirror's temperature control system of three Antarctic schmidt telescopes[C]. SPIE, 2010, 7658: 765815.
- 13 Zhang K Y, Li Z Y, Yuan X Y, *et al.*. Mirror seeing of the Antarctic survey telescope[J]. Advances in Polar Science, 2014, 25(3): 133-137.
- 14 Yuan X Y, Cui X Q, Gong X F, *et al.*. Progress of Antarctic Schmidt Telescopes (AST3) for Dome A[C]. SPIE, 2010, 7733: 77331V.

栏目编辑: 张浩佳