# 平板形、圆柱形、圆锥形石英灯阵列热流计算方法



张肖肖,张赐宝,赵旭升,丛琳华

中国飞机强度研究所,陕西西安 710065

**摘 要:**针对平板形、圆柱形、圆锥形石英灯加热阵列,本文提出一种基于解析法的热流快速计算方法,构建了三种加热阵列 的解析传热模型,将石英灯管和试验件表面分别离散化为点光源和接收点,利用辐射传热定律逐点计算各点接收到的热流 密度,建立了圆柱和圆锥加热阵列中单支石英灯管照射范围的判断依据,指出了内加热与外加热情况下算法的区别,得到了 典型灯管排布下热流分布规律,可以为热试验加热器设计提供指导。

关键词:热流分布;石英灯;平板阵列;曲面阵列;照射范围

#### 中图分类号:V216.4

#### 文献标识码:A

石英灯是地面热强度试验中常用的辐射加热元件,用 于模拟高速飞行器飞行过程中的瞬态气动热效应<sup>[1]</sup>,进而 开展相应热环境下的强度验证<sup>[2]</sup>。在加热器设计中需要根 据试验件表面形状进行设计,如对于翼面、舵面等大面积平 直表面的加热,一般设计为平板形加热器;对于等直舱段等 圆柱形表面的加热,一般设计为圆柱形加热器;对于天线罩 或变径非等直舱段等圆锥形或近似圆锥形表面的加热,一 般设计为圆锥形加热器,如图1所示。



图1 加热阵列 Fig.1 Heating array

试验件表面热流分布是评估加热器设计合理性的直接 依据。杨晓宁等<sup>(3)</sup>建立了使用红外灯阵作为外热流模拟装 置时到达被加热面热流密度的计算模型,对影响热流密度 均匀性的因素进行了分析。刘守文等<sup>(4)</sup>采用蒙特卡罗法对 红外灯能束辐射过程的物理模型进行了分析,建立了能束 辐射随机位置、随机方向的数学模型和灯丝温度计算模型,

#### DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.11.005

给出了辐射波长、灯管反射率、吸收率、透射率的确定方法, 进而提出了红外灯热流分布计算流程。同时,为了提高红 外灯阵热流分布均匀度,应用单灯热流分布计算模型生成 单灯热流分布数据库,解决了反光板反射热流问题,建立了 红外灯阵热流分布仿真计算方法[5]。杨国巍等[6]利用蒙特 卡罗法计算了红外单灯热流分布,并据此建立了数据库,综 合考虑红外灯直射热流、挡板反射率以及间隙漏光量等影 响因素,得到红外灯阵热流分布结果。王智勇等<sup>77</sup>基于蒙 特卡罗法对单一石英灯加热器内部热流分布进行了数值模 拟仿真,为更合理优化加热器内部热场分布提供了理论参 考。夏吝时等闷也采用蒙特卡罗法对平板形石英灯加热器 中水冷反光板面积、水冷反光板与灯阵间距离、热源疏密程 度、热源阵列与材料受热面间距等因素对辐射热场中典型 隔热材料受热面温度分布均匀性和热流密度进行了模拟计 算。朱言旦等阿为了掌握石英灯单灯及灯阵热流分布规 律,提高石英灯阵热流分布预测能力,对石英灯阵热流分布 进行了计算分析与试验研究,发展了基于蒙特卡罗法的石 英灯阵热流分布预测方法及计算程序。

以上研究对象多为平板形石英灯阵列,对圆柱、圆锥等 热强度试验常见曲面形状的加热阵列热流计算方法研究报 道较少。目前在加热器设计中受试验周期影响,往往依赖

收稿日期: 2022-06-14; 退修日期: 2022-07-25; 录用日期: 2022-09-16

引用格式: Zhang Xiaoxiao, Zhang Cibao, Zhao Xusheng, et al. Computation method for the heat flux of quartz lamp heating array in the plane, cylindrical and conical shape[J].Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(11):34-40. 张肖肖,张赐宝,赵旭升,等. 平板形、圆柱形、圆锥形石英灯阵列热流计算方法[J]. 航空科学技术, 2022, 33(11):34-40.

于经验选取加热阵列设计参数,缺少对表面热流分布状态 的计算分析,而上述文献中广为采用的蒙特卡罗法在热流 分布计算方面耗时较长,不能满足试验设计主管对于热流 分布快速计算的需求。因此,需要建立一种能够满足平板 形、圆柱形和圆锥形等常见形状阵列的辐射热流快速预测 要求的计算方法,能对热强度试验中的加热器设计、试验件 表面的热环境模拟快速给出直观的评估依据。

本文主要针对平板形、圆柱形和圆锥形的石英灯加热阵 列,基于辐射传热学中的斯忒藩-玻耳兹曼定律和兰贝特定 律,简化石英灯灯丝模型,忽略周围环境的折射、反射效应,将 辐射加热元件离散成点光源,在试验件表面布置离散的网格 节点,结合点光源与节点距离、加热元件和节点法线方向以及 照射范围进行判断,分别计算各节点接收到各加热元件的辐 射热流,之后将每个节点处的辐射热流进行累加,进而实现热 试验常用石英灯阵列的热流分布快速计算。与蒙特卡罗法相 比,在计算精度方面有所降低,在计算速度方面大幅提高。

## 1 理论基础

#### 1.1 斯忒藩-玻耳兹曼定律

黑体的辐射力与热力学温度的关系由斯忒藩--玻耳兹 曼定律所规定<sup>[10]</sup>

 $E_{\rm b} = \sigma T^4$  (1) 式中,  $\sigma$  为黑体辐射常数, 其值为 5.67×10<sup>-8</sup>W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)。

# 1.2 兰贝特定律

如图2所示,用三维空间的立体角来表示某一方向的 空间所占的大小<sup>[10]</sup>,定义为

$$\Omega = \frac{A_{\rm e}}{R^2} \tag{2}$$

设面积为d4的黑体微元面积向围绕空间纬度角θ方向 的微元立体角dΩ内辐射出去的能量为dΦ(θ),则试验测定



表明

$$\frac{\mathrm{d}\Phi(\theta)}{\mathrm{d}A\mathrm{d}\Omega\cos(\theta)} = I \tag{3}$$

式中,I是从黑体单位可见面积发射出去的落到空间任意方向的单位立体角中的能量,称为定向辐射强度。其与黑体的辐射力之间的关系为

$$E_{\rm b} = I_{\rm b} \pi \tag{4}$$

# 2 计算方法

考虑灯丝面向试验件表面的半圆柱段,将灯丝沿长度 方向N等分,将每一半圆柱段视为平面微元处理,其向半球 空间内辐射的总热流为

$$Q_{e} = \pi r L/N \cdot \sigma T^{4}$$
(5)
式中,L为灯管长度:r为灯丝半径:T为灯丝温度。

需要说明的是,第1节中所述公式虽针对黑体,在将其 应用于灯丝时发射率的差异仅体现为灯丝温度的差异,因 此为简化分析,本文中将灯丝发射率视为1。

#### 2.1 平板形加热阵列

平板形加热阵列如图3所示,二维平面的法矢量*a*可写为[0,0,1],对于平面上*A*点处面积为d*A*<sub>1</sub>的微元接收到某一 微元 d*A*(中心点为*B*)的辐射热流为

$$q_{e} dA_{1} = I dA \cos\theta \cdot \frac{dA_{1} \cos\theta}{AB^{2}} = Q_{e} / \pi \cdot \frac{dA_{1} \cos^{2}\theta}{AB^{2}}$$
(6)  
所以A点处受B点照射获得的热流密度为

$$q_e = Q_e / \pi \cdot \frac{\cos^2 \theta}{AB^2} \tag{7}$$

将所有灯丝的微元对A点的热流密度累加,便得到了 在此平板灯阵作用下A点的热流密度,按照此过程计算平 面上所有布点获得的热流密度,便可以给出整个预测区域 内的热流分布云图。



### 2.2 圆柱形外加热阵列

圆柱形外加热阵列如图4所示,对于圆柱面上接收点A点处的法矢量a可写为[ $Rcosa_1, Rsina_1, 0$ ],对于圆柱形阵列 点光源B处的法矢量b可写为[ $-(R+d)cosa_2, -(R+d)sina_2,$ 0],其中d为灯阵到圆柱面的距离,R为圆柱面半径。对于 圆柱面上A点处面积为 $dA_1$ 的微元接收到面积为dA的微元 B的辐射热流为

$$q_{e} dA_{1} = I dA \cos \theta_{1} \cdot \frac{dA_{1} \cos \theta_{2}}{AB^{2}} = Q_{e} / \pi \cdot \frac{dA_{1} \cos \theta_{1} \cos \theta_{2}}{AB^{2}}$$
(8)

式中, $\theta_1$ 为点光源法线与*AB*连线的夹角; $\theta_2$ 为柱面上点的 法线与*AB*连线的夹角。 $\theta_1$ 与 $\theta_2$ 二者的余弦值可通过矢量 点积与矢量的模计算得到,如将A、*B*之间的矢量记为*c*,则

$$\cos\theta_1 = \left| \boldsymbol{c} \cdot \boldsymbol{b} / (\left| \boldsymbol{c} \right| \cdot \left| \boldsymbol{b} \right|) \right| \tag{9}$$

$$\cos\theta_2 = \left| \boldsymbol{c} \cdot \boldsymbol{a} / (\left| \boldsymbol{c} \right| \cdot \left| \boldsymbol{a} \right|) \right| \tag{10}$$

所以A点处受B点照射获得的热流密度为

$$q_{\rm e} = Q_{\rm e}/\pi \cdot \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{AB^2} \tag{11}$$



图 4 圆柱阵列点光源与节点位置关系示意图 Fig.4 Sketch map of relation between light source point of cylindrical array and receiving point

需要注意的是,在圆柱灯阵中,每一根灯管的可照射范围 是有限的,如在图4中,通过B点的切线BC、BD与圆的切点C、 D之间的圆弧CD上的接收点可受到点光源B的照射。因此, 在计算圆柱表面热流分布时,需要对表面节点A是否受到某个 点光源B的照射进行判断,判断依据为灯管所在直线和接收点 所在母线与圆柱圆心夹角小于相切时夹角(∠BOD),即

$$\left|\alpha_{1} - \alpha_{2}\right| < a \cos\left[R/(R+d)\right] \tag{12}$$

#### 2.3 圆锥形外加热阵列

圆锥外加热阵列如图 5 所示,对于圆锥面上接收点A点处的法矢量a可写为[ $R\cos\alpha_1, R\sin\alpha_1, R\tan\beta$ ],对于圆锥形阵列点光源 B 处的法矢量b可写为[ $-(R+d/\cos\beta)\cos\alpha_2, -(R+d/\cos\beta)$ sin $\alpha_2, -(R+d/\cos\beta)\tan\beta$ ],其中d为灯阵到圆锥面的距离, R 为圆锥底面半径,  $\beta$ 为半锥角,  $\alpha_1, \alpha_2$ 分别为A点所在母线、B 点所在阵列母线在xOy平面的投影与x轴的夹角。对于圆锥面上A点





conical array and receiving point

处面积为 $dA_1$ 的微元接收到面积为dA的微元B的辐射热流为

$$q_{\rm e} dA_1 = I dA \cos\theta_1 \cdot \frac{dA_1 \cos\theta_2}{AB^2} = Q_{\rm e}/\pi \cdot \frac{dA_1 \cos\theta_1 \cos\theta_2}{AB^2}$$
(13)

式中, $\theta_1$ 为点光源法线与AB连线的夹角; $\theta_2$ 为锥面上点的 法线与AB连线的夹角。 $\theta_1$ 与 $\theta_2$ 二者的余弦值可通过矢量 点积与矢量的模计算得到,如将A、B之间的矢量记为c,则

$$\cos\theta_1 = \left| \boldsymbol{c} \cdot \boldsymbol{b} / (\left| \boldsymbol{c} \right| \cdot \left| \boldsymbol{b} \right|) \right| \tag{14}$$

$$\cos\theta_2 = \left| \boldsymbol{c} \cdot \boldsymbol{a} / (\left| \boldsymbol{c} \right| \cdot \left| \boldsymbol{a} \right|) \right| \tag{15}$$

所以B点处受A点照射获得的热流密度为

$$q_e = Q_e / \pi \cdot \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{AB^2} \tag{16}$$

在计算圆锥表面热流分布时,需要对表面节点是否受 到某个点光源的照射进行判断。选定圆锥面上任一母线 C'D'(C'为圆锥顶点,D'为圆锥下底面上一点),通过该母线做 出圆锥面的切面,石英灯所在直线CD与C'D'平行,则该切面 与除CD以外其他石英灯所在直线均产生一交点(如图6中 的E、F),可以看到各石英灯中位于该交点以上的部分可对 母线 C'D'上的点产生照射,而位于该交点以下的部分无法对 母线 C'D'上的点产生照射, 而沿直线 CD 的石英灯各部分均 可对母线 C'D'上的点产生照射。如图7所示,圆锥面上母线 C'D'处的法矢量 d可写为( $R\cos\theta$ ,  $R\sin\theta$ ,  $R\tan\beta$ ),  $\theta$ 为C'D'在 xOy平面投影OD'与x轴的夹角。由于E点位于过母线C'D' 的切面上,因此矢量d与由C指向E的矢量e垂直,圆锥顶点 C'坐标为(0,0,h),其中h为圆锥面高度。石英灯上点E坐标 可写为( $rcos\theta_3$ ,  $rsin\theta_3$ ,  $z_1$ ),其中 $z_1$ 为交点E的z向坐标, r为辐 射加热元件所在圆锥体高度为z1处的切面圆半径, θ, 为CG 在xOy平面投影OE与x轴的夹角。矢量e可写为( $rcos\theta_3$ ,  $r\sin\theta_{1}, z_{1}-h$ ),根据 $d \cdot e = 0$ 可得





 $R\cos\theta \cdot r\cos\theta_{3} + R\sin\theta \cdot r\sin\theta_{3} + R\tan\beta \cdot z_{1} =$   $R\tan\beta \cdot h$ 对圆锥面有 tan  $\beta \cdot h = R$ ,代人式(17)整理可得
(17)

 $r\cos\theta\cos\theta_3 + r\sin\theta\sin\theta_3 + \tan\beta \cdot z_1 = R \tag{18}$ 

根据相似三角形特性,石英灯阵列所在圆锥面高度为 z<sub>1</sub>处的截面圆半径r与z<sub>1</sub>的关系可表示为

$$r = r_1 \cdot (1 - z_1/h_1) \tag{19}$$

式中,*r*<sub>1</sub>为石英灯阵列所在圆锥面的底面圆半径(如图7中的 *OG*),*h*<sub>1</sub>为石英灯阵列所在圆锥面的高度(如图7中的 *OC*)。根据解析几何知识,*r*<sub>1</sub>和*h*<sub>1</sub>分别可表示为

$$r_1 = R + d/\cos\beta \tag{20}$$

$$h_1 = h + d/\sin\beta \tag{21}$$

将式(19)~式(21)代入式(18),整理可得

$$z_{1} = \frac{R - (R + d/\cos\beta)(\cos\theta\cos\theta_{3} + \sin\theta\sin\theta_{3})}{\tan\beta - \frac{R + d/\cos\beta}{h + d/\sin\beta}(\cos\theta\cos\theta_{3} + \sin\theta\sin\theta_{3})}$$
(22)

即对于投影与x轴夹角分别为θ的母线C'D',各石英灯

中位于z向坐标为z<sub>1</sub>的 E 点以上的部分可对母线 C'D'上的 点产生照射,而位于 E 点以下的部分无法对母线 C'D'上的 点产生照射,而与 C'D'平行的直线 CD 的石英灯各部分均可 对母线 C'D'上的点产生照射。

#### 2.4 内加热与外加热情况下的算法区别

圆柱形和圆锥形加热阵列如图 8、图 9 所示,与外加热 相比,相当于是将灯管与试验件交换了方向,在照射范围判 断上没有本质不同,都是判断光源与接收点能否在不受遮 挡的情况下连出一条直线,所以只需在判断依据中将光源 相关位置信息与接收点相关位置信息进行交换,就可以作 为内加热情况的照射范围判断依据。需要注意的是,由于 照射与接收的相对位置发生了变化,灯管点光源和试验件 表面接收点的法矢量表达式也相应改变,见表1。



图 8 圆柱内加热阵列 Fig.8 Cylindrical inner array



#### 2.5 具有解析表达式的曲面热流计算

对于形状复杂但具有解析表达式的空间三维曲面F(x,

表1 内加热与外加热情况下法矢量表达式 Table 1 Expression of normal vector of inner heating

	and outer heating	
法向量	外加热	内加热
接收点	$[R\cos\alpha_1, R\sin\alpha_1, 0]$	$[-R\cos\alpha_1, -R\sin\alpha_1, 0]$
(圆柱)		
点光源	$[-(R+d)\cos\alpha_2, -(R+d)\sin\alpha_2, 0]$	$[(R-d)\cos\alpha_2, (R-d)\sin\alpha_2, 0]$
(圆柱)		
接收点	$[R\cos\alpha_1, R\sin\alpha_1, R\tan\beta]$	$[-R\cos\alpha_1, -R\sin\alpha_1, -R\tan\beta]$
(圆锥)		
点光源 (圆锥)	$[-(R+d/\cos\beta)\cos\alpha_2,$	$[(R-d/\cos\beta)\cos\alpha_2,$
	$-(R+d/\cos\beta)\sin\alpha_2,$	$(R-d/\cos\beta)\sin\alpha_2,$
	$-(R+d/\cos\beta)\tan\beta$ ]	$(R-d/\cos\beta)\tan\beta$ ]

y,z)=0,其上一点(x,y,z)处的曲面法矢量为(F<sub>x</sub>,F<sub>y</sub>,F<sub>z</sub>),其中F<sub>x</sub>、 F<sub>y</sub>、F<sub>z</sub>分别为F(x,y,z)对x、y、z的偏导数。而石英灯阵列,受 加热元件外形限制,所在平面或曲面的法矢量表达式不难 确定,因此上述热流计算方法对于任意具有解析表达式的 曲面也适用,均能得到类似式(11)的表达式,但需要根据具 体曲面形状和阵列形状建立正确的照射范围判据。

# 3 热流计算结果

#### 3.1 平板形加热阵列计算结果

取灯管长度为310mm,灯丝直径为3mm,灯丝温度为 2500K,计算区域为350mm×300mm,灯管高度为50mm,灯 管间距为30mm,阵列上下左右居中放置。图10给出了1 支和10支灯管组成的阵列在试验件表面的热流分布情况, 图中虚线为灯管在计算区域平面上的投影。可以看到,单 支灯管照射下试验件表面热流沿灯管中段向四周呈现由高 到低的梯度分布;随着灯管排布密度的增加,加热阵列覆盖 的试验件中部区域的热流密度接近同一水平,四周仍呈现 出较为明显的热流梯度。

#### 3.2 圆柱形外加热阵列计算结果

取灯管长度为310mm,灯丝直径为3mm,灯丝温度为 2500K,圆柱试验件直径为400mm、高度为350mm,灯管距 试验件表面高度为50mm,阵列上下居中放置。图11给出 了1支和20支灯管组成的阵列在试验件表面的热流分布情 况。可以看到,单支灯管的照射范围较为有限,试验件表面 热流呈现上下左右对称分布,并且具有显著的热流梯度;随 着灯管排布密度的增加,加热阵列覆盖的试验件中部区域 的热流密度趋于均匀,灯管正下方区域的热流偏高。

#### 3.3 圆锥形外加热阵列计算结果

取灯管长度为310mm,灯丝直径为3mm,灯丝温度为2500K,试验件底面直径为150mm、高为500mm,灯管距圆



Fig.10 Heat flux distribution of plane heating array



Fig.11 Heat flux distribution of cylindrical outer heating array

锥试验件表面高度为30mm,阵列距试验件底面高度为 50mm。图12给出了1支和9支灯管组成的阵列在试验件 表面的热流分布情况。可以看到,单支灯管照射下试验件 表面热流呈现沿母线两侧左右对称分布,但受随高度渐变 的截面圆曲率影响,沿母线上下并不对称,越接近圆锥底 部,照射范围越大,但平均热流越小,这种趋势随着灯管排 布密度的增加,可以观察得更为明显。



Fig.12 Heat flux distribution of conical outer heating array

# 4 结论

针对热强度试验中常见的平板形、圆柱形、圆锥形石英 灯加热阵列,本文建立了三种内加热阵列的解析传热模型, 提出了基于解析法的热流快速计算方法,分析了内加热与 外加热情况下算法的区别,给出了典型灯管排布下热流分 布结果,得出了以下结论:

(1)通过将平板形、圆柱形、圆锥形结构表面离散化以及石英灯管离散化,按照兰贝特定律逐点计算各接收点接收到灯管上各点光源的辐射热流,再计算各接收点接收到所有点光源的辐射热流之和,可以快速得到合理的结构表

面热流分布结果。

(2)单支石英灯在圆柱面上照射范围有限,在热流分布计算过程中需要采用照射范围判断依据来判断圆柱面上 母线与灯管所在直线的相对位置关系。

(3)不同石英灯对圆锥面上同一条母线的照射程度不同,在热流分布计算过程中需要采用照射范围判断依据来判断石英灯上光源点与圆锥面上母线之间的照射关系。

<sup>4</sup>AST

#### 参考文献

- [1] 喻成璋,刘卫华. 高超声速飞行器气动热预测技术研究进展
  [J]. 航空科学技术,2021,32(2):14-21.
  Yu Chengzhang, Liu Weihua. Research status of aeroheating prediction technology for hypersonic aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(2): 14-21. (in Chinese)
- [2] 邹学锋,潘凯,燕群,等.多场耦合环境下高超声速飞行器结构动强度问题综述[J].航空科学技术,2020,31(12): 3-15.
   Zou Xuefeng, Pan Kai, Yan Qun, et al. Overview of dynamic strength of hypersonic vehicle structure in multi-field coupling environment[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31 (12): 3-15. (in Chinese)
- [3] 杨晓宁,孙玉玮,余谦虚.提高红外灯阵热流模拟均匀性的优化设计方法[J].航天器环境工程,2012,29(1):27-31.

Yang Xiaoning, Sun Yuwei, Yu Qianxu. The optimized design for improving flux uniformity of infrared lamp array[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(1): 27-31. (in Chinese)

- [4] 刘守文,尹晓芳,裴一飞,等.基于蒙特卡罗方法的红外灯热 流分布研究[J]. 宇航学报,2010,31(2): 608-614.
  Liu Shouwen, Yin Xiaofang, Pei Yifei, et al. The study of heat flux distribution for infrared lamp based on Monte Carlo method[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(2): 608-614. (in Chinese)
- [5] 刘守文,裴一飞,孙来燕,等. 红外灯阵热流仿真及优化设计
  [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011,43(9): 144-148.
  Liu Shouwen, Pei Yifei, Sun Laiyan, et al. Simulation and optimization for heat flux distribution of infrared lamp array
  [J]. Jounal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(9): 144-148. (in Chinese)
- [6] 杨国巍,苏新明,裴一飞,等.红外灯阵热流分布仿真优化研

究[J]. 航天器工程, 2011, 20(1): 134-141.

Yang Guowei, Su Xinming, Pei Yifei, et al. Study of simulation and optimization for heat flux distribution of infrared lamp array[J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(1): 134-141. (in Chinese)

- [7] 王智勇,黄世勇,巨亚堂.石英灯辐射加热试验热流分布优化 研究[J].强度与环境,2011,38(2):18-23.
  Wang Zhiyong, Huang Shiyong, Ju Yatang. The quartz radiation heating system heat flux distribution optimization study[J]. Structuce & Environment Engineering, 2011, 38(2): 18-23. (in Chinese)
- [8] 夏吝时,齐斌,张昕,等.防隔热试验用平板型石英灯加热器
   热环境分析[J]. 红外技术,2016,38(7): 617-621.
   Xia Linshi, Qi Bin, Zhang Xin, et al. The thermal-environment

analysis of flat quartz lamp heater system for thermal protection and insulation test[J]. Infrared Technology, 2016, 38 (7): 617-621. (in Chinese)

- [9] 朱言旦,曾磊,董威,等. 石英灯阵热流分布规律计算与试验 研究[J]. 宇航学报,2017,38(10): 1131-1138.
  Zhu Yandan, Zeng Lei, Dong Wei, et al. Computational and experimental study on quartz lamp array heat flux distribution
  [J]. Journal of Astronautics, 2017, 38(10): 1131-1138. (in Chinese)
- [10] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].4版.北京:高等教育出版社, 2006.

Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)

# Computation Method for the Heat Flux of Quartz Lamp Heating Array in the Plane, Cylindrical and Conical Shape

Zhang Xiaoxiao, Zhang Cibao, Zhao Xusheng, Cong Linhua Aircraft Strength Research Institute of China, Xi' an 710065, China

**Abstract:** A rapid computation method based on analytic method for heat flux of quartz lamp heating array in the plane, cylindrical and conical shape is presented. The analytic models of heat transfer of these three kinds of heating array is established. The surface of the quartz lamp and test sample is dispersed respectively into light source point and receiving point. The heat flux density on every receiving point is computed singly by laws of radiation heat transfer. The criterions of the irradiation range of single lamp in the cylindrical and conical inner heating array were also proposed. The difference of the computation method between inner heating and outer heating is also discussed. The distribution characteristic of typical lamp array is obtained, which can guide the design of heater in the thermal tests.

Key Words: heat flux distribution; quartz lamp; plane array; curved surface array; irradiation range