文章编号：1005-5630(2025)05-0054-08 **DOI**: 10.3969/j.issn.1005-5630.202409200091

加热型电子后视镜在不同场景使用下的数值仿真研究

李 波，徐楚雯，张清清，杨 超，吴宗涛，王芳敏，钱 锋
（江西凤凰光学科技有限公司，江西 上饶 333100）

摘要：本文建立了电−热−流多物理场耦合模型对镀有氧化铟锡薄膜的电子后视镜在零下、有风等恶劣环境下的加热除雾除霜效果开展了数值仿真研究。首先，搭建了一个环境温度分别为−10 ℃与 0 ℃的镜头加热模型，通过比对实验测量不断修正物理模型，验证仿真结果与实验温度测量一致性，建立了可靠的数学模型；其次，对有风环境下的镜头加热物理过程进行求解，得到了不同温度、不同风速的镜头可视区中心的温度随时间变化一维曲线。仿真结果表明，在温度为−20 ℃、风速为 1 m/s 环境下，加热 60 s 后，镜头温度可达 41.69 ℃；在温度为 0 ℃、风速为 10 m/s 环境下，加热 60 s 后，镜头温度可达 36.44 ℃，具有良好的除雾除霜功能。

关键词：主动加热；镜头除雾除霜；导电膜；电子后视镜
中图分类号：TN 253 **文献标志码**：A

Study of numerical simulation of heated electronic rear-view mirror under diverse use scenarios

LI Bo，XU Chuwen，ZHANG Qingqing，YANG Chao，WU Zongtao，
WANG Fangmin，QIAN Feng
（Jiangxi Phoenix Optical Technology Co., Ltd., Shangrao 333100, China）

Abstract: In this paper, a coupled mathematical model of electric-thermal-fluid multi-physical field is established to carry out a numerical simulation study on the heating, defogging and defrosting effect of electronic rear-view mirrors in harsh environments such as subzero and windy environments. Firstly, a lens heating model with ambient temperatures of −10 ℃ and 0 ℃ was constructed, and a physical model was continuously revised through comparative experimental measurements to verify the consistency between simulation results and experimental temperature measurements. As a result, a reliable mathematical model was successfully developed. Secondly, the physical process of lens heating in windy environments was solved, and the one-dimensional curve of the temperature change with time in the center of the lens visible area was obtained for different temperatures and different wind speeds. The simulation results show that the lens

收稿日期：2024−09−20
第一作者：李 波 (1996—)，工程师，研究方向为薄膜光学。E-mail：libo@phenixoptics.com.cn
通信作者：钱 锋 (1964—)，教授，研究方向为光学薄膜与真空物理。E-mail：qianfeng1964@126.com

temperature can reach 41.69 ℃ after heating for 60 s at a temperature of −20 ℃ and a wind speed of 1 m/s, and the lens temperature can reach 36.44 ℃ after heating for 60 s at a temperature of 0 ℃ and a wind speed of 10 m/s, which provides a good demisting and defrosting function.

Keywords: active heating; lens defogging and defrosting; conductive film; camera monitor system lens

近年来，随着汽车市场的不断成熟，光学仪器、电子影像等技术的持续发展，电子后视镜（camera monitor system，CMS）应运而生。2022 年国内《GB15084—2022 机动车辆间接视野装置性能和安装要求》后视镜法规的颁布标志着电子后视镜将取代传统后视镜合规上路[1]。相较于传统侧方后视镜而言，电子后视镜更加安全、有效[2]，具有能够扩大驾驶员视野、降低风阻、节能降耗、克服环境条件恶劣时光学图像模糊等优势[3]，电子后视镜的开发与应用对汽车行业智能化发展至关重要。

智能除雾除霜是智能座舱的热门研究领域，可以极大地提高汽车驾驶的安全性[4]。汽车除雾主要包括被动的喷涂防雾涂料或防雾剂法[5] 与主动加热法，其中喷涂法是在玻璃上涂抹防雾剂或者洗洁精、香皂等，通过在镜面上形成透明保护膜来防止起雾，但是该方法维持时间过短，效果欠佳。主动加热法是汽车除雾的有效方法，传统加热方法主要是通过风道向后视镜鼓吹热风，减小镜头表面与周围环境的温差，进而达到去雾的效果。然而，该方法不仅加热效率低而且智能化程度过低，难以满足电子后视镜的智能化发展需求。

近十年来，国内外许多学者致力于提升电子后视镜系统人机交互设计的有效性、系统分辨率，并优化以及智能接管界面设计等，已取得一定成果。2008 年。刘明强等[6] 求解了光学薄膜样品在脉冲或方波调制激励光作用下的热传导方程和热弹方程，从而获得了样品在瞬态和稳态情况下对应的温度场和形变场；2011 年，马维刚等[7] 基于双温度模型和傅里叶导热定律，提出普适的理论模型可用于完整描述激光加热金属薄膜或基底的整个热量传递过程；2020 年，Zeng 等[8] 建立耦合电热模型，分析了模型中电流密度对导电薄膜的电热和光学性能影响。2024 年，王松林等[9] 建立了表面透明导电膜的加热除冰理论模型，提升了低温环境下对厚冰层的加热除冰效率，为光学薄膜在极端气候条件下的应用开辟了新途径。

本文构建了热−流−电磁场多物理场耦合模型，模型中以氧化铟锡 (ITO) 膜为热源、银电极为电极进行加热，对阻值为 35 Ω、电压为 11 V 的电子后视镜镜头进行了数值仿真，并对电子后视镜镜头加热效果进行实验测量，比对验证了该仿真模型同实验的一致性和可靠性。另外，加入不同温度、不同风速环境中的热仿真，对该镜头在不同环境中的应用的普适性进行了预测分析，为提高镜头在恶劣气候条件下的清晰度和稳定性提供了支持。

1　理论分析

1.1　加热原理

电子后视镜镜片加热原理如图 1 所示，可将该镜片拆解成三部分，分别为导电银电极、导电膜和单镜片。首先向银电极两端加大小为11 V 的电压作为整个模型的激励源，此时，电流将在导电膜与银电极中传导并发生能量损耗产生焦耳热。进一步导电膜和镜片、镜头外壳内的分子或原子相互发生碰撞进行热传导，从而达到为镜片加热的效果。

1.2　数学模型

基于加热除雾理论的电子后视镜主动加热法主要分为两个部分：生成焦耳热，热量传导、传递。其中生成焦耳热是指在电势差的作用下电流在导电膜与银电极中传导，由于电阻的存在，电能被转换为热能的过程；而热量的传递与传导则是导电膜与镜片、镜头外壳相互接触发生热传导

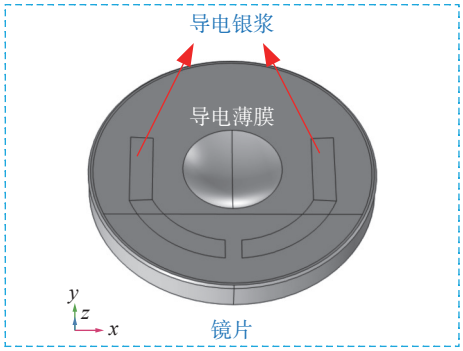

图 1　镜片加热原理图

Fig. 1　Schematic diagram of lens heating

以及发热的镜头与空气发生自然对流、热辐射的过程。

1.2.1　焦耳热

首先，向银电极两端加大小为 11 V 的电压，在电势差的作用下，导电膜内产生电场，在电场的作用下正负电荷定向移动产生电流。根据电势与电场之间的关系，导电膜上各点的电场可以表示为

$$\boldsymbol{E} = -\nabla u \tag{1}$$

式中：u 为导电膜电势分布；$\boldsymbol{E}$ 为导电膜电场分布。

根据全电流定律，此时导电膜内的总电流密度 $\boldsymbol{J}$ 可表示为

$$\boldsymbol{J} = \sigma\boldsymbol{E} + \boldsymbol{J}_{\mathrm{e}} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{J}_{\mathrm{e}}$ 为外部电流密度；σ 为材料电导率。在该模型中，电流仅在电势差的作用下生成，外部电流密度等于 0。

另外，总电流密度满足电流连续性定理，有

$$\nabla\cdot\boldsymbol{J} = 0 \tag{3}$$

进一步，计算产生以焦耳热作为热源的功率 Q_{e}

$$Q_{\mathrm{e}} = \boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{E} \tag{4}$$

1.2.2　热量传导与传递

该部分分为三步，分别是导电膜与镜片、镜头外壳、空气之间的热传导、镜头与空气之间发生的热对流以及热辐。

热传导

热源功率、温度传播速度、温度分布之间的关系可以表示为

$$\rho C_{\mathrm{p}} v\cdot\nabla T_1 - \nabla\cdot(k\nabla T_1) = Q_{\mathrm{e}} \tag{5}$$

式中：ρ 为材料密度；C_{p} 为恒压热容；v 为温度传播速度；T_1 为镜头、周围环境的温度分布；k 为材料导热系数。

同时，导电膜初始温度设置为 273.15 K，联立式(1)～(5)即可计算出温度分布 T_1。

自然热对流

将镜头四周及上表面均设置为开放边界，此时，镜头与空气之间的热传导为

$$\begin{cases} v\cdot n<0, n\cdot(k\nabla T_1) = \rho\Delta H v\cdot n \\ v\cdot n\geqslant 0, n\cdot k\nabla T_1 = 0 \\ \Delta H = \displaystyle\int_{T_{\mathrm{ustr}}}^{T_1} C_{\mathrm{p}}\,dT_1 \end{cases} \tag{6}$$

式中：k 表示导热系数；n 表示法向量；T_{ustr} 为外部环境温度。

进一步，由于空气温度分布不均匀，导致空气发生非等温流动，空气流动产生的浮力可通过式(7)求得[10]

$$\begin{cases} \boldsymbol{F}_{\mathrm{g}} = \rho_{\mathrm{ref}}(1-\alpha_{\mathrm{p,ref}})(T_1 - T_{\mathrm{ref}})\boldsymbol{g} \\ \alpha_{\mathrm{p}} = -\dfrac{1}{\rho}\left(\dfrac{\partial\rho}{\partial T_1}\right)_{\mathrm{p}} \end{cases} \tag{7}$$

式中：α_p 代表等压压缩系数；p 表示压力；ρ_{ref} 与 T_{ref} 分别为参考密度与参考温度；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{g}}$ 为浮力。

镜头四周及上部分表面均设置为开放边界，可表示为

$$\begin{cases} (-p\boldsymbol{I} + \boldsymbol{K})\boldsymbol{n} = 0 \\ \boldsymbol{K} = \mu(\nabla v_1 + (\nabla v_1)^T) \end{cases} \tag{8}$$

式中，μ 表示材料动力粘度。

最后，在重力与浮力的作用下，空气发生流动，此时，流动速度 $\boldsymbol{v}_1$ 通过联立式(7)、(8)求得

$$\begin{cases} \rho(\boldsymbol{v}_1\cdot\nabla)\boldsymbol{v}_1 = \nabla\cdot(-p\boldsymbol{I} + \boldsymbol{K}) + \boldsymbol{F}_g + (\rho - \rho_{\mathrm{ref}})\boldsymbol{g} \\ \rho\nabla\cdot\boldsymbol{v}_1 = 0 \end{cases} \tag{9}$$

随着镜头周围温度的升高，空气发生热膨胀，密度也随之减小。空气密度与温度的关系可以描述为

$$\rho = \frac{p_{\mathrm{A}}}{R_S T_1} \tag{10}$$

辐射传热

辐射传热包括两部分：镜头对环境的辐射与镜头内部若干镜片相互之间的辐射传热。

其中，镜头表面对环境辐射可以表示为

$$n\cdot(k\nabla T_1)=\varepsilon\sigma(T_{\mathrm{ustr}}^4-T_1^4) \tag{11}$$

式中，ε 为表面发射率。

另外镜片相互之间的辐射传热可通过联立式(12)计算求得

$$\begin{cases} \boldsymbol{n}\cdot(-D_{\mathrm{p1}}\nabla G)=q_{\mathrm{r,net}} \\ Q_{\mathrm{e}}=\kappa(G-4\pi I_{\mathrm{b}}(T_1)) \\ \nabla\cdot(-D_{\mathrm{p1}}\nabla G)=-\kappa(G-4\pi I_{\mathrm{b}}(T_1)) \\ q_{\mathrm{r,net}}=\dfrac{\varepsilon}{2(2-\varepsilon)}(4\pi I_{\mathrm{b}}(T_{\mathrm{wall}})-G) \end{cases} \tag{12}$$

式中：I_{b} 为初始黑体；G 为入射辐射；κ 为材料吸收系数；D_{p1} 为扩散系数；$q_{\mathrm{r,net}}$ 为净辐射热通量。

2　镜头数值仿真可靠性研究

为了验证该数学模型的可行性，即镜头加热仿真结果与实验镜头加热结果一致，建立了流−热−电磁场多物理场耦合模型，仿真模型参数尺寸同实际电子后视镜镜头完全一致，银电极厚度约为 5 μm，ITO 薄膜厚度约为 150 nm，加热镜片直径为 17.5 mm，厚度 2 mm，镜头质量为 8.5 g。

2.1　数值仿真研究

图 2 为数值仿真三维模型，由主动加热镜头与空气域组成，其中，加热镜头的头部镜片为通电加热镜片，如图 1 左侧所示，仿真模型材料参数设置如表 1 所示。

向导电膜右侧银电极加 11 V 的电势，左侧银电极接地，得到的导电膜电势分布如图 3 所示、热源分布如图 4 所示、仿真镜头温度分布随时间变化如图 5 所示，以及加热镜片可视区中心点的温度随时间 0～60 s 的变化趋势如图 6 所示。

图 3 为导电膜的电势分布结果，图中表明，导电膜电导率分布均匀，但是受导电膜形状的影响，电势梯度变化规律具有对称性，导电膜中间位置电势大小约为 5.5 V，该结果与理论具有一致性。

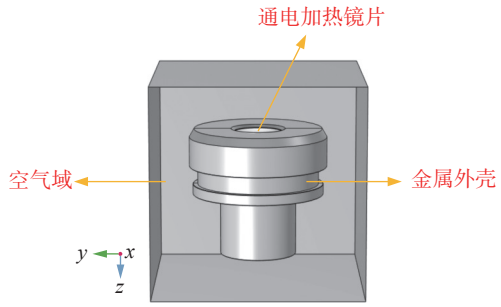

图 2　加热镜头加空气域物理模型

Fig. 2　Physical Model of Heating Lens and Air Domain

表 1　仿真模型材料参数

Tab. 1　Material Parameters of Simulation Model

参数	空气域	金属外壳	导电膜	银电极	镜片
恒压热容/ $\frac{\mathrm{J}}{(\mathrm{kg\cdot K})}$	1 005	900	703	234.29	703
电导率/ $\frac{\mathrm{S}}{\mathrm{m}}$	–	–	2.5×10^5	6.2×10^7	–
密度/ $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^3}}$	–	2 700	2 203	10 498	2 203
导热系数/ $\frac{\mathrm{W}}{(\mathrm{m\cdot K})}$	0.025 8	238	0.75	429	1.5
相对介电常数	–	–	–	6.9	–
动力粘度/(Pa·s)	1.82×10^{-5}	–	–	–	–
表面发射率	–	0.6	0.6	–	–
初始温度/℃	−10 ℃	0 ℃	0 ℃	0 ℃	0 ℃

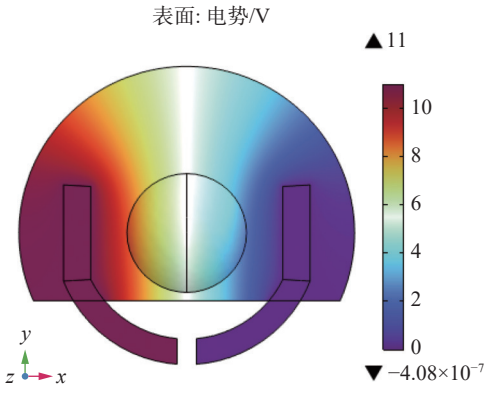

图 3　导电膜电势分布

Fig. 3　Distribution of conductive film potential

图 4 为导电膜通电后作为热源的功率分布情况。由于设定导电膜、银电极的电阻、介电常数等参数不随温度的升高而变化，因此，热源功率为一个恒定值，不随时间的变化而发生变化。同时，由于银电极的电导率大于导电膜的电导率数值，通常电子后视镜镜头的主动加热系统工作在恒压模式，因此，根据发热功率计算公式：$P=$

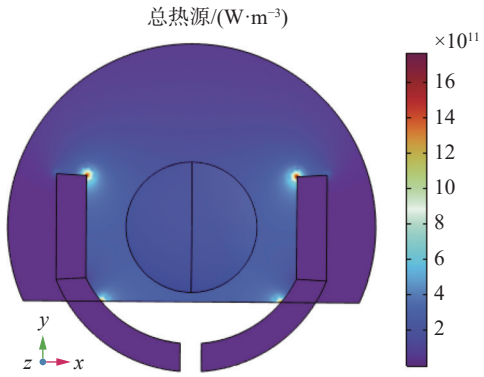

图 4　热源分布

Fig. 4　Distribution of Heat Sources

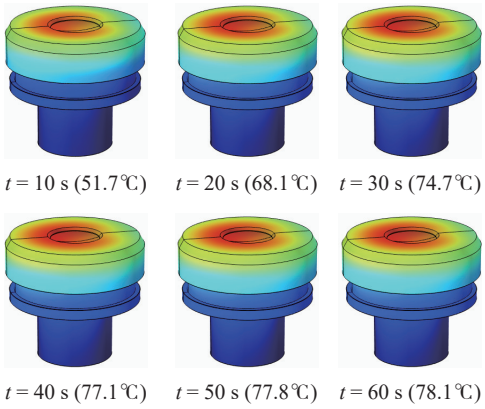

图 5　仿真镜头温度分布随时间变化三维图

Fig. 5　Three dimensional graph of temperature distribution of simulated lens over time

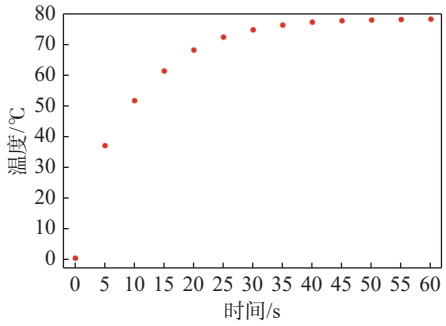

图 6　仿真镜头中心温度随时间变化曲线

Fig. 6　Time varying curve of the center temperature of the simulated lens

V^2/R 可知，在电压 V 恒定的情况下，阻值 R 越小即电导率越高，发热功率将越高。另外，被银电极包围的区域的导电膜之间的电势差大于未被银电极包围区域的电势差，因此，被银电极包围的区域的导电膜的发热功率更大。

图 5 为加热时间分别为 10，20，30，40，50 和 60 s 时镜头温度分布，该图表明，加热时间为 10 s 时，镜头温度可达 51.7 ℃；加热 20 s，镜头温度可达 68.1 ℃；加热 30 s，镜头温度可达 74.6 ℃；加热 40 s，镜头温度可达 77.1 ℃；加热 50 s，镜头温度可达 77.8 ℃；加热 60 s，镜头温度可达 78.1 ℃。

图 6 为加热镜片可视区中心点的温度随时间 0～60 s 的变化趋势。该图表明：

（1）在 0～10 s，镜头升温速度较快，10 s 之后，随着镜头温度的升高，根据式（5）、（6）、（11）可知，镜头与空气之间发生热传导、热对流以及热辐射所损失的热量增多，因此，温度升高速度降低，并逐渐达到热平衡；

（2）该镜头在 10 s 内温度能升高至 51.7 ℃，该数据表明，该加热方案能够在周围环境温度为 0 ℃ 时，短时间内将覆在镜片上的雾消除，同实验结果吻合。

为了研究镜片自主加热过程中镜头中心到四周的温度变化情况，在镜片上设置距离中心不同位置的点探针，距离镜片中心的半径（R）由 0 mm 增加至 3 mm，间隔为 1 mm，环境温度为 0 ℃ 时仿真得到结果如图 7 所示，环境温度为 −20 ℃ 时仿真得到的结果图如图 8 所示。从图中可以得出，加热 60 s 后，镜片中心的温度最高，温度随着 R 增大而减小。距离镜片中心半径 3 mm 处，环境温度为−20 ℃ 时，加热 60 s 后，温度升高至 50.7 ℃。

以上结果表明，该镜头自主加热 60 s 能够实现整个镜片的除雾除霜，对于提高镜头在各种恶劣气候条件下的清晰度和稳定性提供支持。

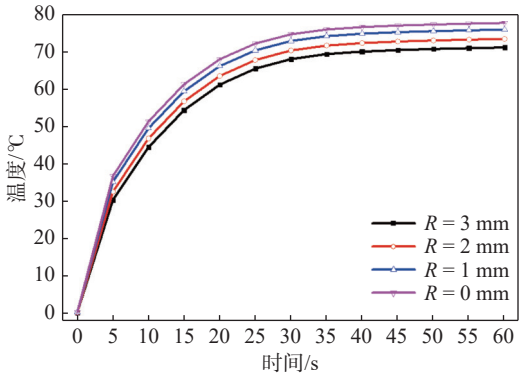

图 7　0 ℃ 镜头中心向四周温度变化曲线

Fig. 7　Temperature variation curve from the center of the lens to the surroundings at 0 ℃

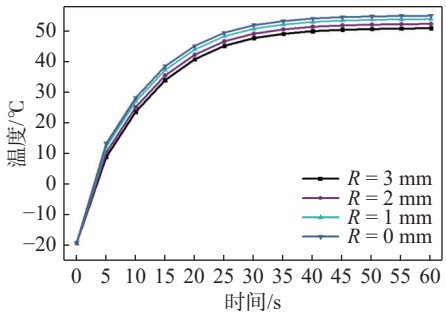

图 8　−20 ℃ 镜头中心向四周温度变化曲线

Fig. 8　Temperature variation curve from the center of the lens to the surroundings at −20 ℃

2.2　实验验证

电子后视镜镜头，如图 9 所示，据此，应用移动直流电源、手持热像仪搭建实验平台，实验系统图如图 10 所示。其中移动电源输出电压为 11 V，通过热成像仪实时记录镜头可视区中心点温度变化。

镜头温度变化图像如图 11 所示，该图表明加热 10 s 后镜头中心温度可达 53 ℃；20 s 可达 62.6 ℃；30 s 可达 68.0 ℃；40 s 可达 72.5 ℃；50 s 可达 74.0 ℃；60 s 可达 77.2 ℃。将实验结果与图 5 中的仿真结果进行对比分析，可知实验

图 9　后视镜镜头实物

Fig. 9　Physical rearview mirror lens

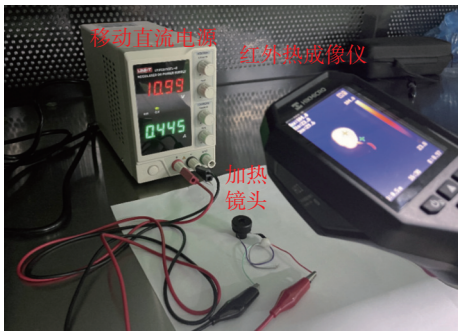

图 10　主动加热镜头实验装置

Fig. 10　Experimental setup for active heating lens

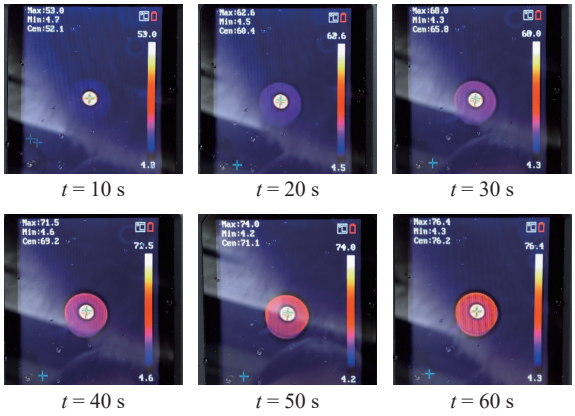

图 11　实验镜头温度分布

Fig. 11　Temperature distribution of experimental lens

与仿真具有一致性。

加入仿真结果与镜头实验结果进行对比分析，环境温度分别为−10 ℃ 与 0 ℃，得到的温度一维曲线随时间变化如图 12 所示。结果表明

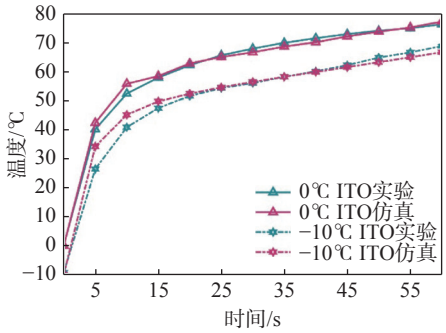

图 12　实验与仿真镜头中心温度随时间变化对比曲线

Fig. 12　Comparison curve of center temperature variation over time between experimental and simulated lenses

（1）根据实验结果可知，环境温度为−10 ℃ 时，加热镜头能够在 15 s 将镜头温度升高至 47.4 ℃；环境温度为 0 ℃ 时，15 s 能加热至 58.4 ℃，结果表明该方案具有实际可行性与可靠性。

（2）将实验结果与仿真一维曲线进行对比分析，实验结果与仿真结果具有一致性，当环境温度为−10 ℃ 时，仿真结果最大标称误差约为 6.5%，验证了仿真结果的正确性。

3　加热预测分析

为了研究该自主加热镜头的加热性能，特别是在低温情况和汽车行驶过程中，并为后续产品

开发提供数据参考，本文分别搭建了温度为 0 ℃、−10 ℃ 与−20 ℃ 时，风速分别为 0.3 m/s、1 m/s 的风洞模型，镜头顶部为风洞入口，尾部为风洞出口，如图 13 所示。

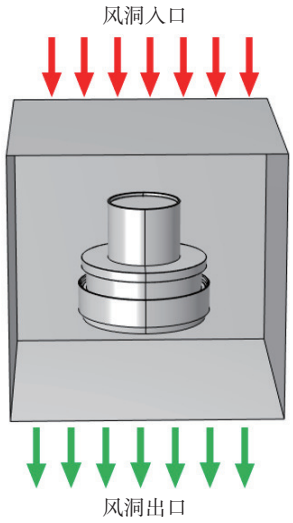

图 13　风洞模型

Fig. 13　Wind tunnel model

同时，设置镜头初始温度与环境温度一致并开展仿真分析，计算结果如图 14 所示。图中显示，环境温度为 0 ℃，风速 0.3 m/s、0.6 m/s、1 m/s，所得镜头加热 60 s 的温度分别为 69.02 ℃、65.17 ℃、61.59 ℃；环境温度为−10 ℃，风速为 0.3 m/s、0.6 m/s、1 m/s，所得镜头加热 60 s 的温度分别为 59.19 ℃、55.47 ℃、51.56 ℃；环境温度为−20 ℃，风速为 0.3 m/s、0.6 m/s、1 m/s，所得镜头加热 60 s 的温度分别为 49.36 ℃、45.46 ℃、41.69 ℃。以上温度均能达到防雾、除雾的效果。

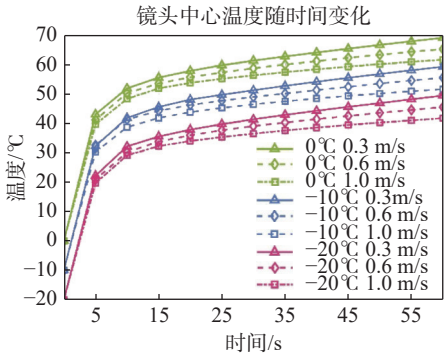

图 14　不同环境镜头在风洞中温度随时间变化曲线

Fig. 14　Temperature variation curves of different environmental lenses over time in a wind tunnel

另外，由于风速越大、周围环境温度越低，镜头散热将越快，当加热时间一定时，镜头加热升高温度将与环境温度成正比，与风速大小成反比。

镜头的外壳罩，能够有效地减缓镜头直接面对的气流速度，为了模拟汽车实际行驶过程中镜头自主加热效果，增加电势到 15 V，添加了风速为 3 m/s、5 m/s 以及 10 m/s 的镜头加热结果图。如图 15 所示，当环境温度为0 ℃，风速为 3 m/s、5 m/s、10 m/s，所得镜头加热得镜头加热 60 s 的温度分别为 73.29 ℃、55.36 ℃、36.44 ℃。在汽车行驶过程中，可通过调整镜头电势的大小达到除雾除霜的目的。该技术具有普适性，能够应用在超低温、有风的恶劣天气中。

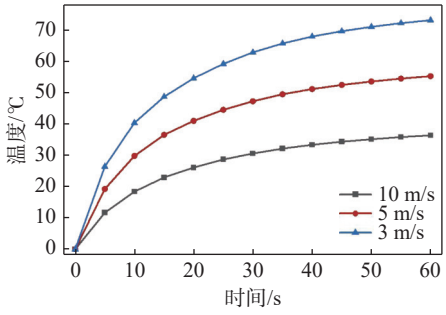

图 15　不同风速下镜头中心温度随时间变化曲线

Fig. 15　Temperature variation curves of lens center under different wind speeds

4　结　论

随着汽车行业智能化进程的不断推进，人们对座舱安全性提出了更高的要求。为此，本文开展了对主动加热电子后视镜头的研究，构建了该加热系统的数学模型，进行了数值分析，实验平台测量的实验结果同仿真数据比对分析验证了该数值模型的正确性。本文基于导电膜主动加热镜头理论建立了热−流−电磁场多物理场耦合模型，对环境温度、初始温度分别为 0 ℃ 与−10 ℃ 的电子后视镜镜头进行了数值模拟。结果表明，当环境温度为 0 ℃ 时，镜头可视区中心点在 10 s 内可升温至 51.7 ℃，60 s 内能加热至 78.1 ℃，与实际加热结果具有一致性。

为了研究该镜头在恶劣环境中的加热效果，设置环境温度分别为−20 ℃、−10 ℃ 和 0 ℃，建立风洞模型，并改变风速大小分别为 0.3 m/s、0.6 m/s 与 1 m/s。结果表明，该加热镜头在环境温度为−20 ℃、风速大小为 1 m/s 的环境中，加热 60 s 后，镜头可视区中心的温度将升高至 41.69 ℃。增加电压至 15 V，设置环境温度为 0 ℃，风速大小分别为 3 m/s、5 m/s 以及 10 m/s，加热 60 s 后，镜头可视区中心的温度将分别升高至 73.29 ℃、55.36 ℃、36.44 ℃。该温度可满足除雾除霜需求。随着环境温度的降低与风速的增大，镜头散热速度加快。因此，加热时间相同时，镜头温度与风速大小成反比，与环境温度成正比。当环境温度过低、风速过大时，可通过调整电压大小提高发热功率，从而提升镜头的加热效率。

该数学模型对后视镜镜头的开发具有指导作用，可以深入研究电子后视镜主动加热方案在多种恶劣环境下加热效果，如何高效、快速的加热，从而更好实现除雾、除霜功能。然而，该模型与实际汽车行驶过程中镜头所处环境存在差异，接下来将建立正常行驶状态下的镜头加热仿真模型，为电子后视镜镜头的开发提供参考依据。

参考文献：

[1] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB 15084—2022. 机动车辆 间接视野装置 性能和安装要求 [S]. 北京: 中国标准出版社,2022.

[2] DOI T, MURATA A, MORIWAKA M, et al. Camera monitor systems as replacement of side mirror in rearward monitoring[C]//Proceedings of the AHFE 2018 International Conference on Human Factors in Transportation. Orlando: Springer, 2018: 544 − 553.

[3] 王子龙, 郭炳映, 张海林. 汽车电子后视镜的发展现状及国内政策进展 [J]. 汽车实用技术, 2023, 48(19): 185 − 188.

[4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 24552—2009 电动汽车风窗玻璃除霜除雾系统的性能要求及试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

[5] 曹碧辉, 管超, 王瑞瑾. 防雾涂料防雾性能测试方法及关键设备的开发 [J]. 涂层与防护, 2023, 44(12): 13 − 16, 22.

[6] 刘明强, 李斌成. 光学薄膜样品的温度场和形变场分析 [J]. 物理学报, 2008, 57(6): 3402 − 3409.

[7] 马维刚, 王海东, 张兴, 等. 飞秒脉冲激光加热金属薄膜的理论和实验研究 [J]. 物理学报, 2011, 60(6): 421 − 427.

[8] ZENG Z J, WANG C H, GAO J W. Numerical simulation and optimization of metallic network for highly efficient transparent conductive films[J]. Journal of Applied Physics, 2020, 127(6): 065104.

[9] 王松林, 张建付, 刘青龙, 等. 基于透明导电膜的光学窗口加热除冰效率研究 [J]. 真空, 2024, 61(5): 30 − 35.

[10] 何建民, 艾青, 王迎州, 等. 基于 COMSOL 的小型杀青机电磁加热模型研究 [J]. 机电工程技术, 2023, 52(8): 43 − 48.

（编辑：张　磊）