

车灯温度场数值模拟分析

A Numerical Thermal Analysis of an Automotive Head Lamp

刘杨 付杰

奇瑞汽车股份有限公司公用技术院

摘 要：本文利用 CFD 软件 STAR-CCM+ 模拟并详细分析了某款汽车前大灯内部温度场及流场情况。分析结果与实车问题吻合，表明该模拟方法可以很好的应用于车灯热设计中。

关键词：CFD STAR-CCM+ 车灯 温度场 流场

Abstract: In this paper, the thermal and airflow behavior inside an automotive head lamp is simulated by using a CFD software STAR-CCM+. A good agreement between the analysis and experiment is achieved, which means the CFD simulation can be a very useful tool in the design of automotive head lamp.

Key words: CFD STAR-CCM+ Automotive head lamp Thermal analysis Airflow analysis

1 前言

车灯对汽车来说有着非常重要的作用。在光线较暗的隧洞、黑夜，其能为车辆提供照明，使驾驶员能够看清前后方路况；前后车灯不同的开启状态也是一种信号的显示，周围行人或是车辆能够通过识别车灯信号，了解驾驶员的行驶意图与车辆状态；同时，作为车辆的“眼睛”，车灯造型也在很大程度上影响了车辆外观。因此车灯在车辆的行驶、安全、外形等各个方面都扮演了很重要的角色。目前大部分车辆前大灯都集成了转向灯、近远光灯、位置灯等，后尾灯一般会集成位置灯、刹车灯、转向灯、倒车灯和雾灯等。大量灯泡集成在一个灯罩内，组成总成件。除了灯具静态的性能，如光学性能、材料性能等，在设计前期我们还要关注灯具在使用时的热性能。

在车灯实际使用中，经常出现的与灯内温度场密切相关的现象主要有：大灯烤坏（图 1）、透镜结雾不易消除（图 2）。前大灯功率较大，发热量也较高，如果灯罩透镜选取的材料耐温不够，就会被烤坏。出现这种情况不仅会影响美观，还会影响灯具的光学性能。被烤坏的部位一般都是与灯泡直线距离较短的壁面，此部位辐射最强。大灯结雾一般发生在较为潮湿的气候条件下。灯具中的水分由通气孔进入，也有可能由灯具上的裂缝破损进入。当车灯开启后，灯内空气被加热，



图 1 大灯透镜烤坏现象



图 2 大灯结雾现象

湿热的空气遇到透镜壁面温度较低处遇冷凝结成雾滴。结雾会影响美观，引起客户抱怨，严重时会影响车灯效果。如果湿气不能及时排除，会腐蚀灯具内部镀层、线束、金属等，长期下去会引起车灯失效。

随着现在大灯灯源不断进化，与 AFS（自适应照明系统）等复杂系统的介入，大灯温度场已成为了一个重点考察的对象。甚至在某些高端车型中，直接为大灯加入了冷却风扇，及时排湿降温（图 3），以解决可能出现的上述问题。



图 3 奥迪新 A8L 前大灯后部壳体（带排风扇）

2 原理简介

灯具内部有直接来自于灯泡的热辐射、内部气流的自然对流换热，还有由灯具壳体、透镜介入的热传导。外部有阳光辐射、发动机热量以及外部气流冷却。其中灯泡是主要热源，其辐射的热量一部分被壳体等固体吸收，一部分透过透镜射向外界环境，部分回到灯泡；灯具内部气流由于受到直接的加热作用，温度升高，密度降低，于是在浮力作用下上升，并与在上升过程中遇到的固体进行热交换；灯具前后壳体以及灯泡与壳体之间由于温差原因也会进行热传导。在此次分析设定中，只考虑了灯泡发出的热量（图 4）。

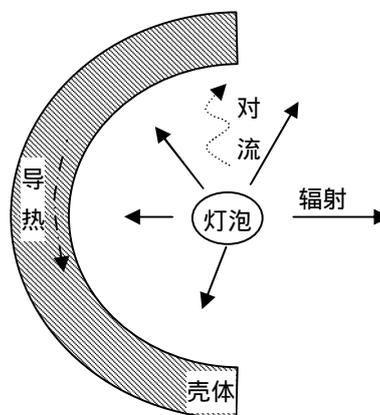


图 4 灯具热量传递简化示意图

热辐射 (thermal radiation) 指物体因热的原因而发出辐射能的现象。辐射不需要介质，可以在真空中进行；同时伴随着能量形式的转换，即发射时从热能转换成辐射能，而被吸收时又从辐射能转换成热能。由斯忒藩——玻尔兹曼定律揭示，实际物体辐射热流量总值为：

$$\Phi = \varepsilon A \sigma T^4$$

其中： ε 称为该物体的发射率 (emissivity, 也称黑度)； A 为辐射表面积； σ 为斯忒藩——玻尔兹曼常量。对于两个物体间的辐射换热，还要考虑角系数，他表征了两个物体表面的几何因素和两表面所处环境的几何条件，与温度无关。在 STAR-CCM#中，S2S模型会自动计算角系数，物体表面基于已有面网格被划分为有限个片区 (Patches)，以简化表面，更方便的计算角系数。Patches 越多，计算越准确，计算量也越大。

对流换热 (convection heat transfer) 指流体通过固体表面时流体与固体间的热量交换。对

流换热的换热量用牛顿冷却公式可以表示为：

$$\Phi = Ah\Delta t_m$$

Δt_m 为换热面 A 上流体与固体表面的平均温差；对流换热系数 h 是求解换热量的关键。边界层理论简化了 N-S 方程，使得求解壁面对流换热系数 h 成为可能。对于有限空间的自然对流，格拉晓夫数表征了其流动状态：

$$Gr_\delta = \frac{g\alpha\Delta t\delta^3}{\nu^2}$$

其中 α 为体积膨胀系数， δ 为特征长度， ν 为平均温度下的粘性。对于横圆柱，当 Gr 数在 5.76×10^4 以下时为层流， 4.65×10^5 以上时为湍流，中间为过渡层。

热传导 (heat conduction) 指物体各部分之间不发生相对位移时，依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递。傅里叶导热定律数学表达式为：

$$\Phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x}$$

$\frac{\partial t}{\partial x}$ 指物体温度沿 x 方向的变化率。通常固体的导热系数 λ 已知，导热量能够求出。

3 分析模型及设定

由于加入了气流流动方程，直接求解气流流动状态和属性是极其困难的；同时车灯内部几何形状复杂，直接求解辐射也是很困难的。采用目前实验手段，虽然可以测出车灯表面的温度分布，但却无法测出内部气流的微弱流动。在这种情况下，CFD (Computational Fluid Dynamic) 数值模拟分析手段被引入，工程师可以通过对 CFD 软件的操作，较为真实的模拟灯具内部温度场流场。并且这种模拟可以在实物模型出来之前进行，成本低，改动快。本文采用的软件 STAR-CCM+ 是一款功能强大操作方便的流体分析软件，完全可以模拟我们关注的热辐射、热对流和热传导，且后处理方便直观，能够很好的协助我们观察结果。现采用 STAR-CCM+，选取某车型前大灯进行模拟分析。

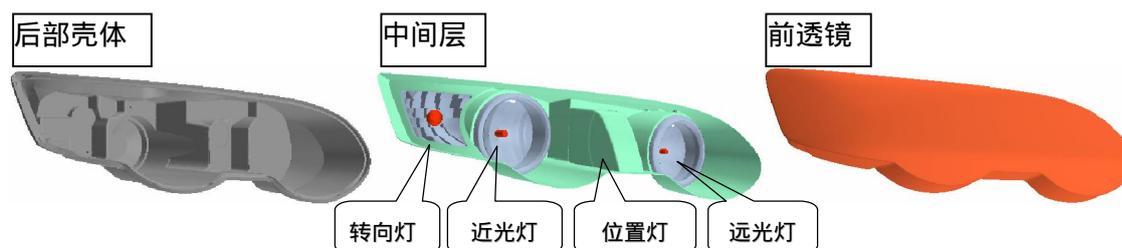


图 5 大灯组成

如图 5 所示：大灯由后部壳体、通气孔、中间层、反射镜、灯泡、前透镜这几个主要部件组成。后部壳体材料为 PP-T20，中间层与前透镜为 PC，反射镜为 BMC，灯体整

体网格尺寸在 1-5mm 之间；模型采用多面体网格计算，面网格局部见图 6，图 7 是体网格切面；拉伸两层边界层，总计约 234 万面网格，8 万个辐射 Patch。根据前述格拉晓夫准则，计算得出灯具内对流为层流。但由于考虑了外部气流对透镜的强制对流换热，故在此选用 k- ϵ 湍流模型。辐射选用灰体辐射，S2S 辐射模型，空气不参与辐射。本车灯灯泡全部为白炽灯，考虑到其约有 70% 能量转化为热能，故在赋予各灯泡热流密度时进行了相应折算；外部环境温度 27° C

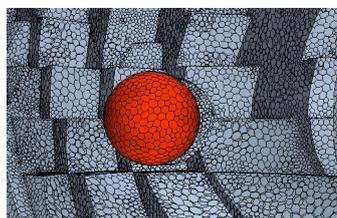


图 6 转向灯附近面网格

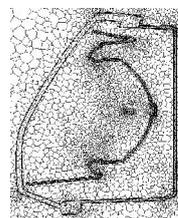


图 7 体网格切面

4 分析结果

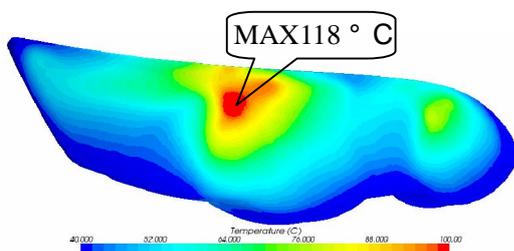


图 8 灯具前透镜温度云图

用于计算本模型的工作站为 DELL690, 4CPU 共 8 核, 16G 内存, OS Linux RH5.0 整个计算完成约耗时 8 小时。

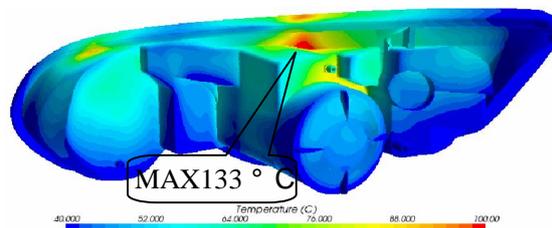


图 9 灯具后壳体温度云图

图 8 图 9 是灯具前部透镜以及后部壳体的温度云图，前部透镜最高温度可达 118° C, 后部壳体最高温度为 133° C。两最高温度区域均距离灯泡较近，直接被灯泡辐射，是辐射高温区；同时热气上升，在此处汇集，也起到了加热的作用，也加热高温区，两区域相叠加，故造成了此处温度时还可以看到：由于转向灯功率较小，温度较低亮，除了上部被热气流加热的区域外，下部温度且转向灯位置较高，可以想象湿热气流上升至低定会产生凝结现象。从实车图片（图 10）也确实到前透镜上的结雾现象，其结雾区域与分析结果度分布趋势非常吻合。



图 10 实车转向灯附近结雾现象

是对流最高。同且不常较低。而温区域可以看中的温

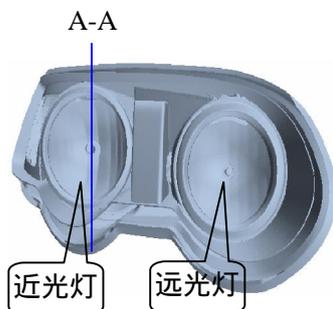


图 11 近光灯处切面示意图

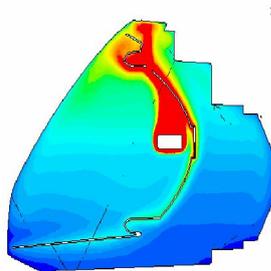


图 12 A-A 切面温度云图

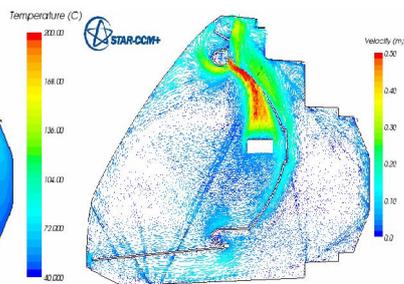


图 13 A-A 切面速度矢量图

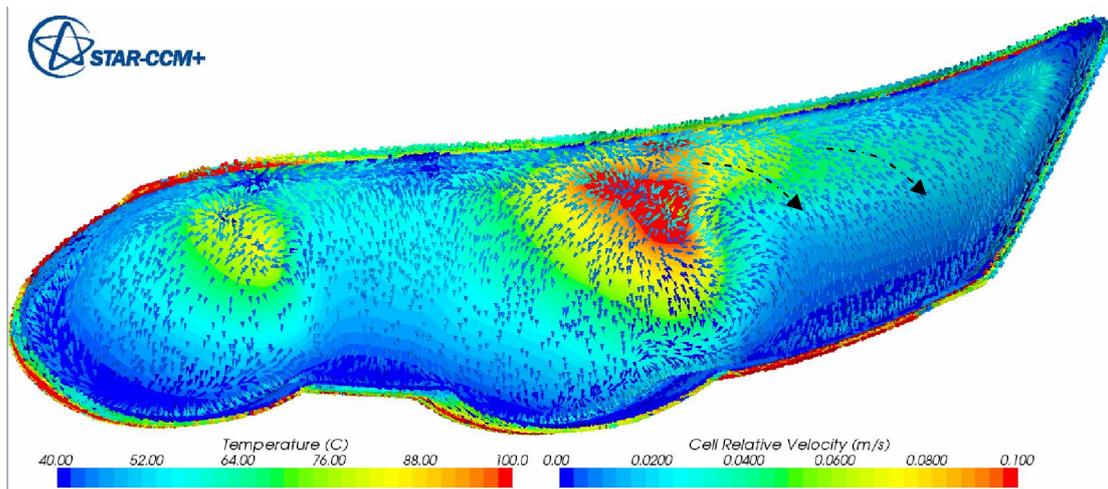


图 14 前透镜内壁面速度矢量图（叠加温度云图）

图 11是近光灯处纵向切面位置示意图，图 12为切面温度云图，图 13为速度矢量图。由温度云图可见，被加热后的气流上升，积蓄在灯具上部，因此造成上部空间温度高，下部空间温度低，仔细观察可见清晰的温度分层。固体中间层（包括反光镜）上部被热气流加热，然后再通过热传导，热量传到底部，于是整个固体温度都较高，可以看到固体层附近区域气流被加热的现象。从图 11 可以看到，整个空间流速较高的区域是灯泡上部，此处气流温度高，对流很强烈，其余部分流速都较低。

从图 14可以看出，透镜内壁面气流是从高温区向低温区扩散，故基本全部动，流速较低。其中能明显看到转向灯气流几乎全是来自于近光灯上部。从图 14 可以看到，经远光灯加热后的气流进部空腔，然后再返回前部，流经位置灯区域，最后流向转向灯区域。经近光灯气流主要停滞在灯具上部，一部分气流流向转向灯。同时可以看到，加热气流有沿灯具下沿回流的情况（图 15红线示）。

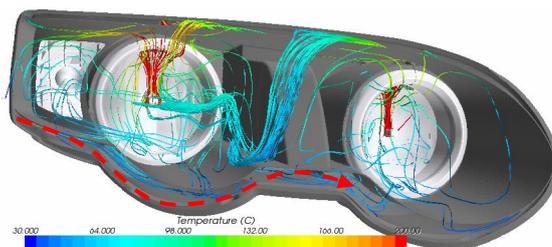


图 15 经近远光灯加热后的气流流线

流动趋势是向下流，附近壁面 15 的流线入灯具后，前部低温加热的气流

图 16标明了灯具后部壳体上的三个通气孔。在热气流上浮的作用下，下部 1、2号通气孔进入冷却气流，然后加热后经上部通气孔排出。但上部 3号通气孔未在合适的地方，转向灯附近法顺利排出。如果在 4号位置开一个通气孔，转向灯附近通会变好。但由于设计原因，此

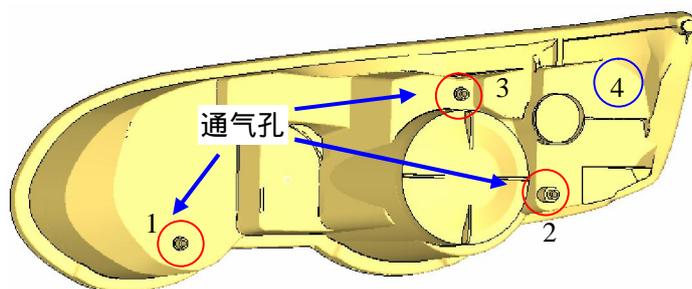


图 16 大灯后部通气孔

3号一个孔未设，气流无附近在气性能处已无

法再开孔。

有以上分析我们可以看到：在设计大灯时，必须充分考虑到车灯与前后灯罩的直线距离，距离过短将会直接导致灯罩烤坏；同时需要充分考虑大灯内部流场情况，保证良好的通气性能，以防止不易消除的雾气出现。当车灯结雾现象较为严重时，可以考虑将低温区域的空腔单独隔开，使高温气流无法流入到转向灯附近，也就避免了结雾现象。还可以考虑优化通气孔位置，以及出口形状的设计。有文献提到将通气孔做成喇叭形，以制造 Venturi 效应。另外，在通气孔处设置防水透气的薄膜，以阻挡水分的进入，或是在透镜内表面镀上特殊的防止结雾的镀层也是两种很好的防止结雾的手段，但采用薄膜或镀层均需要考虑到单件成本以及使用寿命等因素。

5 结论及展望

通过对大灯灯内 CFD 分析，了解了大灯内部温度场与流场情况。和实车结果的对比还表明 CFD 模拟方法能够较好的预测产品性能。由于具有介入早、改动快、成本低等特点，CFD 模拟可以很好的应用到车灯的设计与改进优化中，以提升产品质量。本次分析不足之处是：为简化分析，未考虑镜面反射和水汽；材料属性，特别是各种壁面的辐射特性不够准确，灯泡热流量随意性太大，没有具体的实验测量数据。为了更加真实的模拟车灯的状态，除了解决上述缺陷，下一步我们还可以考虑加入以下方向拓展深化分析：

加入镜面反射：由于目前使用的 CCM 版本较老，没有镜面发射设置。5.02 以上版本加入了镜面反射功能，可以更加精确的解析反光镜对辐射的影响。同时，多波段、多重透射等功能也会另模拟更加准确。

引入液膜模型 (ThinFilm)：CCM 特有的 ThinFilm 模型，可以考虑在透镜内壁面设置简单边界条件，模拟雾气或是冰层的消散情况。由此模型可以更加直观的观察：灯具在内部结雾的情况下，打开车灯，哪些区域雾气消散较快，哪些区域存在死区。

加入组分模型 (Species Models)：可以假设水蒸气不参与蒸发凝结反应，而只是以一种均匀的状态混合于空气中。这样就能够看到大灯内部物质的扩散和流动趋势，考察是否有死区，以及排气是否顺畅。

另外，还可以考虑灯泡闪烁造成的影响、加入热固耦合计算、加入整车模型。

参考文献

- [1] 陶文铨 《传热学》 西北工业大学出版社 2006年 12月第一版；
- [2] STAR-CCM+ 《Tutorial》 Release 4.02;

- [3] 黄保陵等 《汽车车灯内部结雾的热分析及应对措施》 汽车技术 2001年第 3期；
- [4] Alberto Deponi¹ etc. “ Modeling of condensate formation and disposal inside an automotive headlamp” 4th European Automotive Simulation Conference, 2009;
- [5] Dr. Viktor Bader etc. “ Usability of CFD for the Development of Tail and Head Lamps” 3rd European Automotive CFD Conference, 2007;