光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024031804

水下大功率 LED 灯散热数值模拟和试验研究

陈　康[1,2*]，李　锦[1,2]，李晓伟[1,2]，夏　彬[1,2]，葛锡云[1,2]

（1. 深海技术科学太湖实验室，江苏 无锡 214082；2. 中国船舶科学研究中心 深海载人装备国家重点实验室，江苏 无锡 214082）

摘　要： 为进行水下大功率 LED 灯散热结构的多方案优化设计，基于 CFD 方法对某一型自主设计、加工和制造的 LED 灯进行自然对流工况下的流-固共轭传热数值模拟；为验证仿真结果准确性，进行了水箱试验验证，得到的热平衡状态下测点温度值与试验结果平均相对误差为 2.9%；为预测实际水下环境中 LED 灯的内部工作温度，进行了水下大空间中 LED 灯的热平衡数值模拟，比较了不同海水流速下，横向和竖向翅片对应测点的温度变化趋势，为进一步优化特定作业环境下的 LED 灯散热结构提供参考。

关键词： 大功率 LED 灯；数值模拟；自然对流；共轭传热；水下大空间

中图分类号： TN312.8；P754.2　**文章编号：** 1001－5868(2024)05－0817－06

Numerical and Experimental Research of Heat Dissipation for Underwater High-Power LED Light

CHEN Kang[1,2], LI Jin[1,2], LI Xiaowei[1,2], XIA Bin[1,2], GE Xiyun[1,2]

(1. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science, Wuxi 214082, CHN;
2. State Key Laboratory of Deepsea Manned Vehicles, China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, CHN)

Abstract: This research focused on the numerical simulation of fluid-solid conjugate heat transfer in natural convection conditions, specifically addressing an independently designed and manufactured LED light. Employing Computational Fluid Dynamics (CFD) methods, the study aimed to optimize the multi-scheme design of the heat dissipation of the light in underwater environments. Validation efforts involved water tank testing, demonstrating 2.9% average relative error between simulated and measured temperatures under thermal equilibrium. Furthermore, the study delved into predicting the inner operating temperature of the LED light in large underwater spaces. Comparative analysis of temperature variations under varying seawater velocities and fin orientation provided valuable insights, guiding the refinement of the heat dissipation of the light for enhanced performance in specific underwater contexts.

Key words: high-power LED light; numerical analysis; natural convection; conjugate heat transfer; large underwater space

0　引言

水下照明装置在海洋开发设计中应用频繁，水下光源作为深海探测作业不可或缺的装备，在国内外得到广泛研究与改进[1]。由于需要根据实际使用水深设计专用的耐压封装结构以达到水下承压的效果，深海运载装备用照明灯和常用照明设备具有显著的差别[2]。在水下探测作业中，因发光二极管 LED 发光效率高、寿命长、能瞬时开启和关闭、功耗低及抗振性能好等优点，被广泛应用于水下照明，是最为常见的水下照明灯[3]。随着像蛟龙号载人潜水器等深海运载装备的成功应用，国内许多企业及科

收稿日期：2024－03－18.
基金项目：海南省重大科技计划项目(ZDKJ201902).
* **通信作者：**陈　康

研机构开始自主研发水下照明设备并陆续应用在深海运载装备上。“深海勇士”号载人潜水器是中国第二台深海载人潜水器，其照明设备主要由 12 盏 300 W 的 LED 灯阵组成[4]。

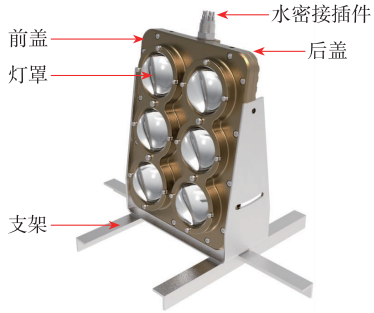
水下大功率 LED 灯技术研究的重点主要集中于抗压、散热、密封、光源分析、聚光设计[5]。LED 灯的散热设计直接影响 LED 灯的寿命和可靠性，常规 LED 灯散热方式主要通过主动和被动散热的方式。通过灯外壳与静止的低温海水进行对流换热带走能量的被动散热方式因其结构设计简单且额外消耗电能，更加适宜于水下独特的环境条件和探测作业任务要求。目前，研究比较多的大功率 LED 灯散热多是在空气环境中[6]。张万路等[7]提出了一种灯具热学分析等效模型，选取若干样品进行测试和系统分析，研究了影响灯具散热设计的主要因素。张雪粉[8]利用 Fluent 对不同散热结构下的 LED 芯片的温度场进行了模拟，研究了散热器结构、材料和环境等因素对芯片散热的影响。Dialameh 等[9]研究了翅片散热器在自然对流情况下，不同肋片高度和肋间距下肋片的平均换热系数。Ilker 等[10]对垂直底座上平行布置的矩形横截面板翅片散热器的稳态自然对流进行了数值研究，确定了传热速率对几何参数的敏感性。水下大功率 LED 灯的热平衡计算没有现成的经验公式可用，为确定 LED 灯在水下的热平衡温度，需要根据使用环境条件来进行数值模拟计算。为保证数值模拟的准确性，还需要对 LED 灯进行试验验证。

本文以某一型自主研发、加工和制造的水下大功率 LED 灯为研究对象，基于 CFD 方法进行了自然对流状态下的共轭传热数值模拟计算，并与水箱实验结果进行了对比，最后进行了大空间下 LED 灯的热平衡数值模拟计算和分析，为水下大功率 LED 灯的优化设计提供数据支撑。

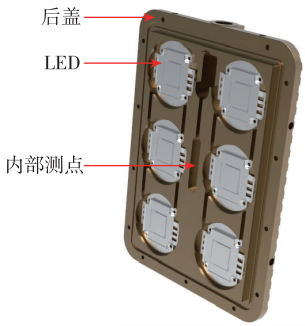
1 数值模拟方法

1.1 物理模型

水下大功率 LED 灯的整体模型和内部结构如图 1 所示，灯具主体材料用铝青铜合金打造，材料具有高强度的同时具备优良的机械加工性能。灯具共有 6 个发光元件，每个元件的额定功率为 100 W，主要尺寸参数见表 1。灯具通过顶部的水密接插件供电。LED 灯发出的光通过光学聚光组件（主要为聚光杯和凸透镜）汇聚成平行光后射出，前后盖之间通过密封胶条实现有效密封。LED 灯的散热块与壳体紧密贴合保证散热。为确保不超过灯的极限使用温度，通过设置一个内部测点来监测 LED 灯的内部温度。内部测点位于 6 个 LED 芯片的中心位置，其温度可基本反应 LED 灯内部的最高温度。



（a）实物整体图



（b）内部结构图

图 1 LED 灯结构示意图

表 1 LED 灯主要参数

参数名称	数值
长度/m	0.24
宽度/m	0.18
厚度/m	0.021
灯罩直径/m	0.056
LED 芯片个数	6

在 LED 灯实际使用工况下，外界海水基本处于静止状态，壳体外侧海水被加热后处于自然对流状态，传热系数比较低，因此，考虑使用翅片结构作为强化换热手段。为充分利用外界低温海水环境条件，在后盖的背面开有矩形截面沟槽增加换热面积，图 2 所示为灯具后盖翅片的基本结构和尺寸。

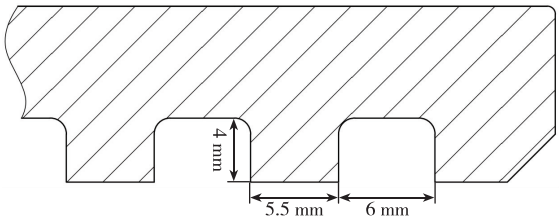


图 2 灯具后盖翅片结构

1.2 数值计算模型

灯具外壳与水直接接触，水被加热后会产生密

度的变换而浮升，引起水中温度场的变化。因此，在质量连续方程、动量方程的基础上还需要补充能量方程，共同构成流固共轭传热问题的控制方程组。方程组如下：

质量方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1}$$

动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}+\rho g_i \tag{2}$$

能量方程：

$$\rho c_\rho \frac{\partial T}{\partial t}+\rho c_\rho u_j \frac{\partial T}{\partial x_j}=u_j \frac{\partial p}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(k \frac{\partial T}{\partial x_j}\right) \tag{3}$$

其中：

$$\tau_{ij}=\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i}\delta_{ij} \tag{4}$$

式中，ρ 为密度，u_i 对应 x，y，z 方向的速度分量，p 为流体静压，g_i 为重力加速度分量，T 为温度，单位为℃，c_ρ 为比热容，单位为 J/(kg·℃)，k 为导热系数，单位为 W/(m·℃)，μ 为黏性系数，单位为 Pa·s。

薛若军等[11]在研究换热器管外自然对流过程时，采用 k-ε 湍流模型取得了很好效果，因此，本文实际采用 k-ε 湍流模型进行数值模拟；传热模型采用分离流体温度和分离固体能量模型，考虑到自然对流对水物理性质的影响，在热交换过程中，水下的温升引起的水的密度变换不是很大，因此使用收敛性更好的 Boussinesq 假定进行简化计算。此时认为密度变化不显著改变流体的性质，流体的粘滞性等特性保持不变，表现为控制方程中只在重力项中考虑密度的变换，仅在动量方程中考虑密度变换对质量力项的影响，其对惯性力项、压差项和粘性力项的影响忽略不计。动量方程中浮力项表示为：

$$(\rho-\rho_0)g=-\rho_0\beta(T-T_{\mathrm{ref}})g \tag{5}$$

式中，T_{ref} 为参考温度，ρ_0 为对应参考温度下的参考密度，β 为水的体积热膨胀系数。

1.3　计算域和边界条件

流体域的四周和底部与塑料箱体接触，边界设置为壁面，材料为塑料，温度设为环境温度 32 ℃，塑料导热系数取 0.4 W/(m·℃)，厚度为 2 mm，由此可得壁面的面积热阻为 0.005 m²·℃/W；顶部与室内空气接触，边界设置为壁面，环境温度为 32 ℃，空气的对流换热系数取为 5 W/(m²·℃)。LED 灯部件之间相互接触，利用外壁将热量通过热传导的方式传递给水。水被加热后，冷热流体之间产生热对流。由此可以将系统的传热路径划分为两条：(1) LED→灯壳→水→壁面；(2)LED→灯壳→灯罩→水→壁面。数值模拟的计算域和边界条件设置如图 3 所示。

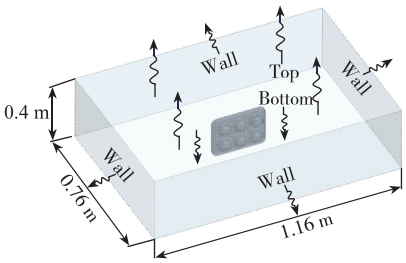


图 3　数值模拟计算域和边界条件

LED 灯的发光模块主要由芯片、陶瓷衬底、覆铜铝基板等部件组成，为简化计算，将 LED 灯的热源整体简化为铝基板。主要部件材料的物理性质如表 2 所示。

表 2　LED 灯部件物理性质参数

部件	材料	密度/(kg·m⁻³)	比热容/(J·kg⁻¹·℃⁻¹)	导热系数/(W·m⁻¹·℃⁻¹)
外壳	铝青铜	9 540	368	70
灯罩	有机玻璃	1 180	1 500	0.19
LED 灯	铝基板	2 702	903	237

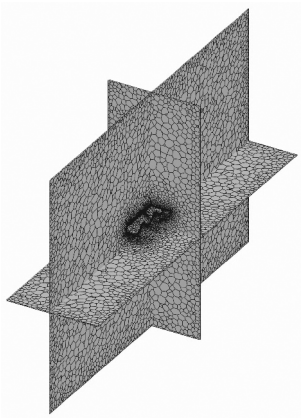
LED 灯的电光转换效率仅为 15%～20%，剩余 80%以上转化为热能，热分析包括热传导、热对流和热辐射，由于热辐射散发出的热能所占的比例有限，仅考虑热传导和热对流对散热的影响。六个 LED 灯的总功率实测为 675 W，取芯片电光转换效率为 20%，发热功率在数值模拟时设置为 540 W。

1.4　网格划分

完整的散热过程不仅包括 LED 灯内部固体部件之间的热导热，还包括外部流体的自然对流。水箱试验时，LED 灯整个浸没在水箱中，为了模拟整个系统的散热特性，计算域同时包括流体域和固体域。LED 灯的网格划分如图 4 所示。



(a) LED 灯网格



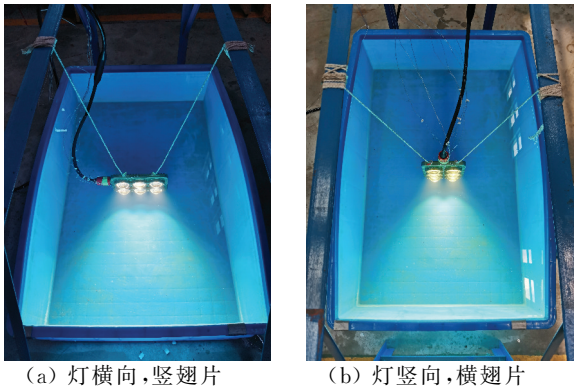
(b) 外部流场网格

图 4 模型网格划分

通过网格独立性检验，最终网格总数为 104 万，其中固体域网格数为 56 万，流体域网格数为 48 万。为模拟 LED 灯外流场，需要对壁面附近的网格进行加密处理，使 LED 灯的外壁面 $y^+ \approx 5$。这里，用 y^+ 表征网格密度。

2 试验验证

搭建水箱试验装置如图 5 所示，水箱底部通过横梁架起而不接触地面，水箱内加入水的总高度为 0.4 m。此时灯具全部浸没在水中。灯具用绳索拉起，调节绳索长度使得灯具位于水箱中间位置，灯具底面距离箱底 0.02 m。试验时通过将 LED 灯横向和竖向摆放，实现横翅片和竖翅片两种工况。



(a) 灯横向，竖翅片 (b) 灯竖向，横翅片

图 5 水箱试验工况

试验时使用 T 型热电偶测量 LED 灯外壳的表面温度，热电偶的测温精度为 ±0.5 ℃。使用热电偶焊机将 8 个热电偶热端焊接到金属壳体表面，布置点位如图 6 所示：1 号热电偶布置在顶部正中位置，2 号热电偶布置在前盖中轴线和第一、二排灯中线的交点，3 号热电偶布置在前盖中轴线和第二、三排灯中线的交点，4 号热电偶布置在底部中心位置，5、6 号热电偶对称 2、3 号布置在后盖，7、8 号热电偶布置在左右侧面中心位置。

实际试验时，随着 LED 灯开启后不断向外散热，水箱内水的温度不断上升。LED 灯发出的热量最终通过水箱的 5 个外壁面和顶部水面将热量散发到空气中。当所有测点的温度在 30 min 内的变化范围小于 0.5 ℃时，认为 LED 灯光源的发热量和通过水散出的热量基本达到平衡，选取此时的稳定状态为热平衡状态，记录各个测量点的温度值。

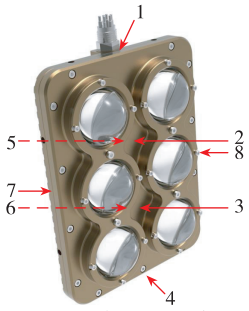
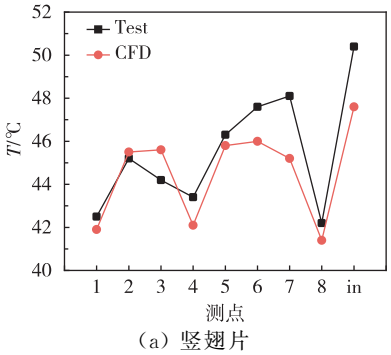


图 6 测点布置示意图

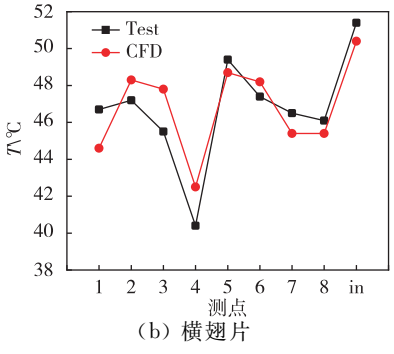
3 结果与讨论

3.1 仿真与试验对比

使用 8 个外部测点和 1 个内部测点的温度来表征灯的温度场。图 7 为测点的温度图，从试验和数值仿真结果可以看出，数值计算的测点温度分布趋



(a) 竖翅片

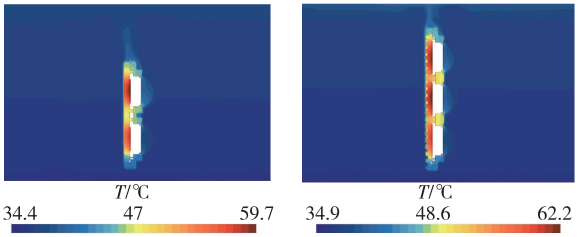


(b) 横翅片

图 7 测点温度值

势与试验结果基本一致，数值模拟温度值相对试验的平均相对误差为 2.9%，满足工程分析应用需求。对横翅片和竖翅片两种工况下的平均温度进行比较，可以得出在静水状态下，横向翅片测点的平均温度要高于竖向翅片状态。

从图 8 可以看出，LED 芯片不断产生热量，由于灯壳为导热性能良好的金属材料，热量使得灯壳温度不断提高。灯壳周围的水受热，密度变小，与远离灯壳的水形成密度差，产生热浮升力。水箱内的水随水深产生温度分层现象。竖翅片时，水流热浮升后可沿着竖槽流动到上层，有利于热量的传递；横翅片时，水流会在横槽内形成流动死区，造成热量集中于沟槽内部，不利于热量散出。



（a）竖翅片　　（b）横翅片

图 8　剖面温度云图

3.2　水下大空间模拟

在水深不超过 2 000 m 的海域，其底水温度随着水深增加而快速降低，1 000 m 左右的海底底水温度在 5 ℃左右，而且水的表面传热系数大于空气，同时水下并不会完全静止，会存在不大于 2 节的海流，可见水下环境下非常有利于灯具的散热。实际水下环境中，海水热容量大，冷源充足，相比水箱试验可更快达到热平衡状态。

虽然竖翅片有利于静止工况自然对流向上带走热量，但是当有海水流动时，横翅片更加有利于海水横向冲刷壳体带走热量。自然对流和强制对流带走的热量哪一部分占主导因素取决于海水的流速。水下大空间模拟的计算域如图 9 所示，实际水下空间取灯体前后 9 倍厚度，左右 9 倍宽度，向上 10 倍长度，向下 5 倍长度。四周设置为压力出口和恒温边界，温度取海水环境温度为 5 ℃。同样进行网格独立性检验后，最终网格总数为 231 万，其中固体域网格数为 56 万，流体域网格数为 175 万。对壁面附近的网格进行加密处理，使 LED 灯的外壁面 $y^+ \approx 5$。

水流静止时，翅片外流体处于自然对流状态，可使用与水箱数值模拟同样的数值模拟进行计算。当水流速度逐渐变大时，Boussinesq 假设不再适用，参照周俊杰等[12]对大功率 LED 散热器的空气强制对流冷却研究，可认为在强制对流下，流体物性参数为常数，此时重力和热浮升力对流体密度的影响忽略不计。

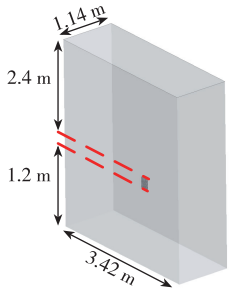


图 9　大空间计算域

用 LED 内部测点温度来表征灯实际工作温度。由图 10 可以看出，在大空间静水状态下（流速为 0），竖翅片测点温度低于横翅片，认为竖翅片比横翅片更有利于自然对流，结果与水箱试验的试验和仿真结果一致。加入海水流动条件后，海水冲刷壳体表面形成强制对流。随着海水流速的增加，测点温度逐渐下降，流速增加到大于 0.1 m/s 时，横翅片测点温度低于竖翅片，对于此 LED 灯而言，横翅片和竖翅片散热能力高低的海水临界速度在 0.1 m/s 附近。海水流动初期，竖翅片比横翅片测点温度变化梯度大，二者在海水流速增加到一定程度后，温度下降梯度均减小，认为此时再增加海水流速对增强换热能力影响不大。

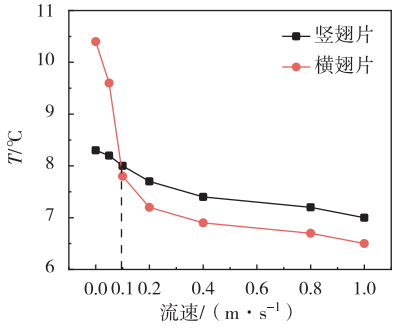
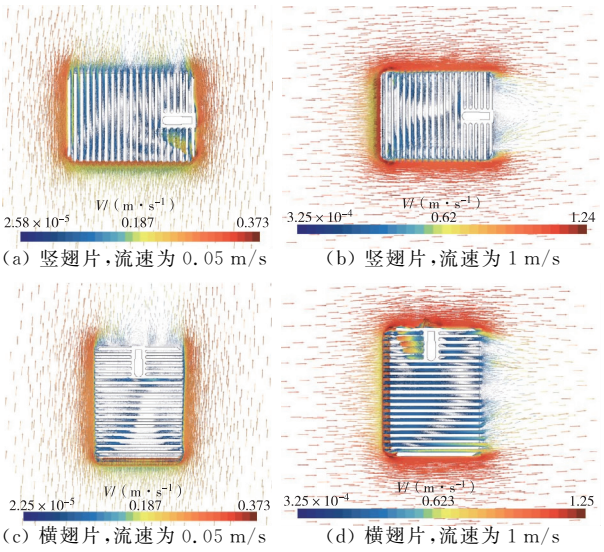


图 10　不同流速下测点的温度值

由图 11 的流动速度云图看出，在微速流动时，散热仍然以自然对流为主，壳体周边的水被加热后向上流动，此时竖翅片更有利于热流体的上浮，因此散热性能更好，测点温度值比横翅片状态低；流速增加到 1 m/s 时，此时横翅片更有利于水流从背板带走热量，强制对流能力更强，因此横翅片散热性能更好，测点温度值比竖翅片低。



(a) 竖翅片，流速为 0.05 m/s (b) 竖翅片，流速为 1 m/s

(c) 横翅片，流速为 0.05 m/s (d) 横翅片，流速为 1 m/s

图 11 不同流速和翅片方向下流动矢量图

4 总结

本文通过 CFD 方法对水下大功率 LED 灯的冷却散热进行了仿真和试验分析，进一步对其在大空间中的热传导和热对流过程进行了数值模拟，得出如下结论：

(1)水箱试验的数值计算结果与试验结果相对误差为 2.9%，数值模拟可用于指导 LED 灯换热器的优化设计，预测实际工况下的 LED 灯热平衡温度；(2)在微速流动情况下，LED 灯的散热情况得到改善，流速增大到一定范围后，温度下降梯度变小；(3)横翅片有利于海水流动下的强制对流，竖翅片有利于静水下的自然对流，设计时需要根据实际作业环境下海水的流动状态来进行进一步设计。后续将开展背板翅片结构参数对水下特定工况下 LED 灯散热性能影响的研究。

参考文献：

[1] Hardy K R, Olsson M S, Lakin B P, et al. Advances in high brightness light emitting diodes in underwater applications [C]// Oceans IEEE Conference, 2008: 1399-1403.

[2] 李 意，张建华，楼志斌，等. 深海 LED 照明灯技术综述[J]. 上海应用技术学院学报：自然科学版，2017，17(3)：237-241.
Li Yi, Zhang Jianhua, Lou Zhibin, et al. A generalization of deep sea LEDs lighting technology[J]. J. of Shanghai Institute of Technology: Natural Science, 2017, 17(3): 237-241.

[3] 葛锡云，李晓伟，周宏坤，等. 深海载人平台观察系统研究与设计[J]. 船舶工程，2018，40(1)：1-5.
Ge Xiyun, Li Xiaowei, Zhou Hongkun, et al. Research and design of viewing system of deep sea manned platform[J]. Ship Engineering, 2018, 40(1): 1-5.

[4] 齐海滨，赵晟娅，沈 鹏，等. 深海运载装备照明技术与应用情况[J]. 照明工程学报，2018，29(4)：121-125.
Qi Haibin, Zhao Shenya, Shen Peng, et al. Introduction of lighting technology and application for deep sea submersible[J]. China Illuminating Engineering J., 2018, 29(4): 121-125.

[5] 卓世雲. LED 光源在深海照明中的应用及发展[J]. 光源与照明，2023，(1)：72-74.
Zhuo Shiyun. Application and development of LED light source in deep sea lighting[J]. Lamps & Lighting, 2023, (1): 72-74.

[6] 何 川，高圆圆，陈启勇. 翅片散热板大空间自然对流散热数值方法探讨[J]. 半导体光电，2011，32(5)：653-656，706.
He Chuan, Gao Yuanyuan, Chen Qiyong. Numerical methods on natural convection heat transfer from horizontal rectangular fin arrays in large space[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32(5): 653-656, 706.

[7] 张万路，江 磊，江 程，等. LED 道路照明灯具散热系统分析[J]. 中国照明电器，2009，(2)：6-10.
Zhang Wanlu, Jiang Lei, Jiang Cheng, et al. Thermal management analysis of LED luminaire for road lighting[J]. China Light & Lighting, 2009, (2): 6-10.

[8] 张雪粉. 大功率 LED 散热研究及散热器设计[D]. 天津：天津大学，2007.
Zhang Xuefen. A study of radiating of high-power LED and design of heat sinks[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.

[9] Dialameh L, Yaghoubi M, Abouali O. Natural convection from an array of horizontal rectangular thick fins with short length[J]. Appl. Thermal Engineering, 2008, 28(17/18): 2371-2379.

[10] Tari I, Mehrtash M. Natural convection heat transfer from inclined plate-fin heat sinks[J]. Int. J. Heat Mass Tran., 2013, 56(1/2): 574-593.

[11] 薛若军，邓程程，李朝军，等. 自然循环换热器壳侧传热及流动的数值模拟[J]. 原子能科学技术，2012，46(2)：192-198.
Xue Ruojun, Deng Chengcheng, Li Chaojun, et al. Numerical simulation of shell-side heat transfer and flow of natural circulation heat exchanger[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(2): 192-198.

[12] 周俊杰，绳冉冉，李雪丽. 大功率 LED 散热器的空气强制对流冷却研究[J]. 现代电子技术，2017，40(8)：1-3，7.
Zhou Junjie, Sheng Ranran, Li Xueli. Study on air forced convection cooling for high-power LED heat sink[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(8): 1-3, 7.

作者简介：

陈 康(1992—)，男，硕士研究生，工程师，研究方向为水下照明设备热仿真分析。