

# 高速通信光模块热控系统的设计

关博仁<sup>1</sup>, 李明宇<sup>1\*</sup>, 邓仁辉<sup>2</sup>, 胡海洋<sup>2</sup>, 廉哲<sup>2</sup>

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;  
2. 苏州联讯仪器股份有限公司设备部, 江苏 苏州 215000)

**摘要:** 为了测试高速通信光模块在极端环境下的工作性能, 并提升其出厂测试效率, 设计了高速通信光模块热控系统。使用该系统不仅可以实现单独测试 QSFP-DD 封装模式的光模块, 还可以实现双通道并行测试 QSFP-28 封装模式的光模块, 成功使光模块测试效率提升一倍。首先, 根据半导体制冷器的特性设计了待测试件热电制冷器组件, Flotherm 的仿真结果表明热电制冷器组件可用。接着, 根据半导体制冷器的原理及特性, 设计了热排散系统。最后, 将热控系统与水冷机的控温效率和效果做对比。实验结果表明: 热控系统可以在 110 s 内实现光模块壳温在 0~65 °C 之间的快速调控。热控系统基本满足对常用封装方式的高速通信光模块的控温需求, 且相对于水冷机而言, 具有小型化、低噪音、零震动的优势, 更利于光模块集成化测试。

**关键词:** 光纤通信; 热控系统; 热仿真; 光模块

**中图分类号:** TN929.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220705

## 0 引言

光模块功能是实现电信号的相互转化与传输, 主要应用于数据中心互联场景、电信市场、无源波分系统等。目前国内应用的光模块封装类型以 100 Gb<sub>s</sub> 的四通道小型可插拔光模块 (Quad Small Form-factor Pluggable Plus 28, QSFP-28) 及 200 Gb<sub>s</sub> 的四通道小型可插拔双密度光模块 (Quad Small Form Factor Pluggable-Double Density, QSFP-DD) 为主。随着光通信行业的发展, 400 Gb<sub>s</sub> 的 QSFP-DD 光模块逐渐开始应用于云计算和 5G 网络<sup>[1]</sup>。通信速率的提升不可避免地带来了大功耗。为了保证数据中心和基站稳定地运行, 必须要保证散热环境。前有 Microsoft 公司将数据中心建在海底, 后有 Facebook 公司将数据中心建在北极圈, 由此足以见得环境对光模块的散热是非常重要的。为了保证高速通信光模块在这种极端环境下依然可以稳定工作, 需要在模块出厂测试中加入极

端温度循环实验, 保证光模块在极端温度下可以正常工作。目前对模块控温的有热流仪、冷热冲击试验箱和半导体制冷器 (Thermoelectric Cooler, TEC) 等。

热流仪的控温效率高, 但其体积大、成本高、噪音大, 且由于测试夹具的限制, 热流仪只能进行单个模块的测试, 不能并行测试多个模块; 冷热冲击试验箱控温稳定, 但其体积大、效率低, 尤其是降温时间过长。且由于冷热冲击试验箱的结构, 导致其无法在控温的同时进行其他的光模块功能测试。为了利于光模块的功能集成化测试, 需要控温系统的机箱尺寸小于 200 mm×500 mm×500 mm, 且要满足噪声低于 65 dB。综上所述, 热流仪与冷热冲击试验箱均不适用; TEC 具有质量轻、结构紧凑、占用空间小、零噪声等优点<sup>[2-5]</sup>, 符合光模块集成测试的需求, 因此选用 TEC 作为热控系统的控温元件。同时, 根据已有的相关理论研究<sup>[6]</sup>: 液冷散热方式具有超静音、散热快等优点<sup>[7]</sup>, 热管散热方式虽然体积小、占地小, 但是具有

收稿日期: 2022-09-30; 修订日期: 2022-12-08

基金项目: 国家自然科学基金 (62027825); 国家重点研发计划 (2020YFC2004600); 高等学校学科创新引智计划 (111 计划 D21009); 吉林省自然科学基金 (20220101130JC)

作者简介: 关博仁, 男, 硕士生, 主要从事光纤通信方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 李明宇, 男, 教授, 博士, 主要从事光波导传感器、集成光学、光电子器件和薄膜光学方面的研究。

自然失效的可能性<sup>[8]</sup>;蒸发冷却散热方式通常应用于冶金、化工建材等行业,电子行业应用较少<sup>[9]</sup>;结合热端散热优化设计<sup>[10]</sup>的实验结论,最终选用液冷的方式来提升 TEC 的控温效率。

文中将液冷与 TEC 结合,设计了高速通信光模块热控系统。系统中的热电制冷器组件根据不同封装类型的待测试模块可以更换不同的测试夹具,可以实现单独测试一枚 QSFP-DD 光模块或并行测试两枚 QSFP28 光模块。而系统中的热排散系统相对于水冷机而言具有体积小、噪音低的优势,对后期光模块功能的集成化测试有着推进作用。

## 1 热控系统的构成及其工作原理

### 1.1 热控系统的硬件构成

图 1 为高速通信光模块热控系统原理图。它主要由待测件 (Device under test, DUT) 热电制冷器组件、DUT 夹具、TEC 控制器及 TEC 热排散系统组成。TEC 热排散系统由外循环水路和内循环水路构成。其中,外循环水路包括冷板、水泵、TEC 冷源;内循环水路包括冷板、风排、风扇及水泵。

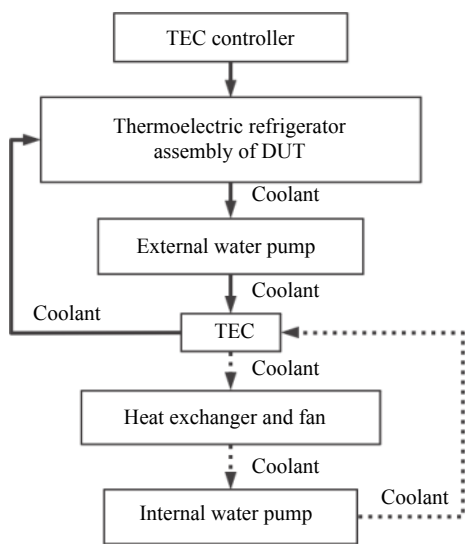


图 1 热控系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of TEC temperature control system

### 1.2 热控系统的工作原理

该系统的基本工作原理为:热电制冷器组件中的 TEC 制冷面通过热沉与待测模块直接接触实现热量交换,从而实现对待测光模块进行控温的目的。其散

热面与水冷头表面接触,并通过已冷却的水冷液进行热量交换,实现降温的目的;水冷液因吸热而温度升高后,又经热排散系统的外循环水路流入外循环水泵,继而泵入 TEC 冷源进行降温,最后经水路重新流回热电制冷组件中的冷板内,继续实现热量交换。热排散系统中的 TEC 冷源则采取液冷的散热方式散热。其主要目的是为了降低冷源中 TEC 的双面温差,从而提高热排散系统的制冷能力和效率。

## 2 热控系统的设计与分析

### 2.1 热控系统的设计要求

高速通信光模块热控系统功能如图 2 所示,相关指标列于表 1。在以下设计要求的基础上,要求高速通信光模块的热控系统尺寸小于 200 mm × 500 mm × 500 mm,噪声低于 65 dB。

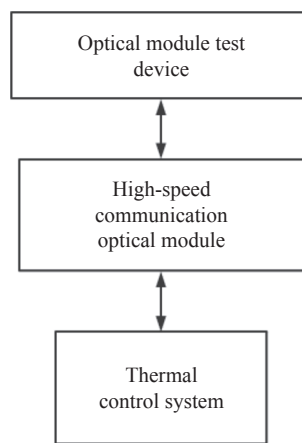


图 2 TEC 热排散系统功能

Fig.2 Function of TEC cooling system

表 1 TEC 热排散系统设计指标

Tab.1 Design indicators of TEC cooling system

Temperature settings for TEC/°C	Shell temperature of the module/°C	Time/s
-20-75	0-65	120
75--20	65-0	120

### 2.2 DUT 热电制冷组件的设计

目前常用的光模块封装类型有 QSFP-DD、QSFP-28 和 SFP28 三种。有三种 DUT 测试板,此处以 QSFP-DD 光模块的热电制冷组件为例,其 DUT 热电制冷组件如图 3 所示,其三维模型如图 4 所示。热沉保证了光模块与热电制冷器之间进行均匀热量交

换,可以有效减小总传热阻<sup>[11]</sup>。由于结构的限制导致热电制冷组件的连接点较多,从而会导致漏热;使用气缸支架及冷板散热器安装盒可以有效减少漏热现象<sup>[12]</sup>。为了降低热电制冷器双面温差以提高热电制冷器的制冷效率,采用液冷散热的方案。热电制冷器的热端直接与冷板散热器表面接触,并通过流动的低温水冷液把热量带入 TEC 热排散系统中,将升温的水冷液降温后重新回到冷板散热器中进行与光模块进行热量交换。需要注意的是 TEC 需要使用导热硅脂紧密黏贴在热沉与冷板换热器之间,这样可以使 TEC 与它们充分接触,利于热传导<sup>[13]</sup>。

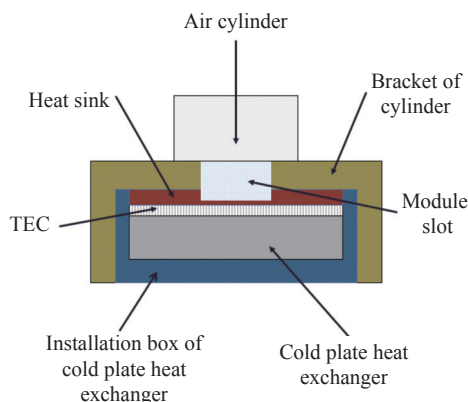


图 3 DUT 热电制冷组件

Fig.3 Thermoelectric refrigeration components at DUT

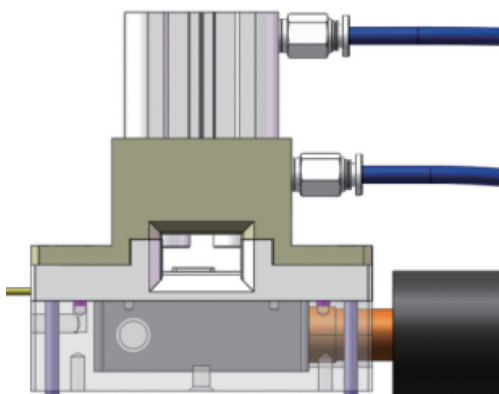


图 4 DUT 热电制冷组件封装三维模型

Fig.4 Package 3D model of DUT thermoelectric refrigeration components

### 2.3 冷板换热器的设计

#### 2.3.1 冷板换热器的结构

冷板换热器要保证在规定的工作环境中可以提供足够的冷量,使组件中热电制冷器热端产生的热量

可以及时散掉。针对上述条件,选用的冷板换热器的平面视图如图 5 所示。

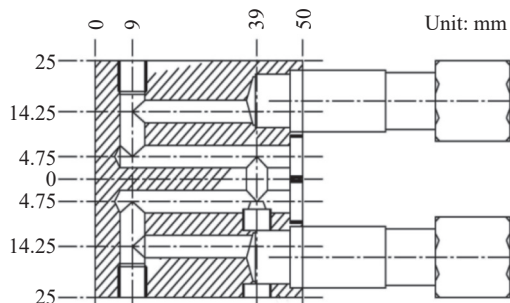


图 5 冷板换热器平面视图

Fig.5 Flat model of cold plate heat exchanger

#### 2.3.2 冷板换热器的制冷效果仿真

冷板的换热能力要保证在环境为常温 25 °C 时,可以满足 275 W 的散热需求。虽然理论上通道截面为方形的水路,其接触面积比通道截面为圆形的水路大,但考虑到成本问题,所以最终选择通道截面为圆形的冷板,其结构的截面图如图 5 所示,进水口与出水口之间加工成“S”型。冷板换热器的相关尺寸如表 2 所示。

表 2 冷板换热器相关尺寸

Tab.2 Relevant dimensions of cold plate heat exchanger

Name	Size/mm	Name	Size/mm
Total height	17	Total length	50
Diameter of inlet	6	Diameter of outlet	6
Total width	50	Diameter of pipe	6
Spacing of pipes	3.5	Width of the left and right boundaries	7.75
Width of the front and back boundaries	6	Width of the upper and lower boundaries	5.5

冷板材质为紫铜 T2,冷却水用接头材料为黄铜,其表面整体镀镍,起到提高强度及防氧化的作用,且表面精磨处理,用以提高表面平整度。水冷液通过水冷头时要吸收 TEC 热端热量,因此冷板要选择体积比热容高的材料,以保证其导热效率够快,可以及时将吸收热端热量传递给水冷液<sup>[13]</sup>。

选定的水冷液在 30 °C 条件下近似于水的物性参数。已知水在 30 °C 时物性参数如表 3 所示。

图 6 为采用 Flotherm 软件建立的热电制冷组件

表 3 30 °C 水的物性参数

Tab.3 Physical parameters of water at 30 °C

Parameter	Value
Thermal conductivity $\lambda_f/W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	0.62
Kinematic viscosity of fluid $\nu_f/m^2 \cdot s^{-1}$	$0.805 \times 10^{-6}$
Fluid density $\rho_f/kg \cdot m^{-3}$	995.4
Specific heat $C_p/J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	$4.17 \times 10^3$
Prandtl number $Pr$	5.42

热仿真模型, 并采用参考文献 [14-15] 中的计算方法对其进行封装。其进出口水冷却液温度仿真结果如图 6 所示。由图可知, 冷板换热器的进出口水冷却液温差小于 5 °C。图 7 为热电制冷组件的制冷效果仿真图, 由图可知模块壳温可以稳定在 -0.382 °C, 故冷板换热器满足需求。

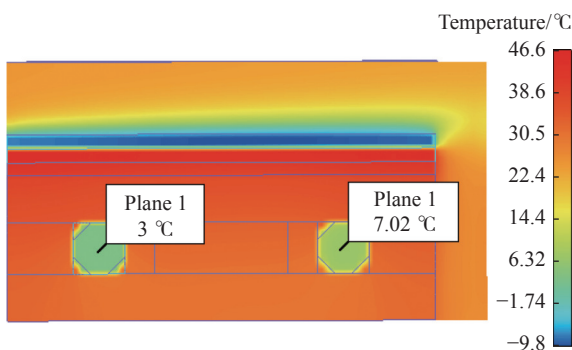


图 6 冷板换热器进出口水冷却液温度

Fig.6 Cold plate heat exchanger inlet and outlet water cooling temperature

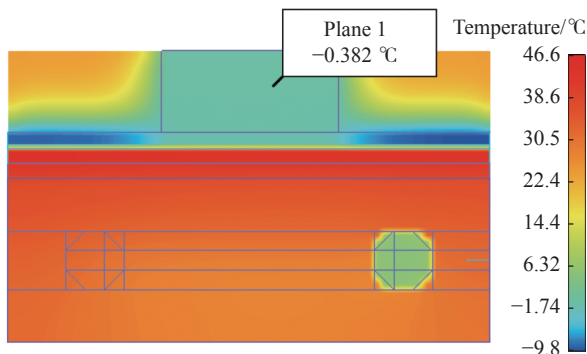


图 7 热电制冷组件的制冷效果

Fig.7 Cooling effect of thermoelectric refrigeration components

## 2.4 TEC 及 TEC 控制器的基本参数

### 2.4.1 TEC 热电制冷原理

用一个直流电源直接给 TEC 供电, 通过改变加

载电流方向来控制 TEC 制冷或制热, 其原理如图 8 所示。

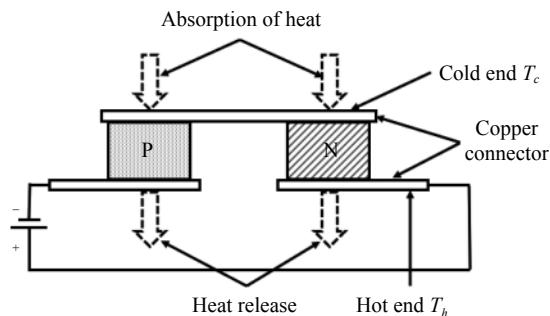


图 8 热电制冷原理图

Fig.8 Schematic diagram of TEC

TEC 的冷端制冷量为  $Q_c, W$ 。其大小为:

$$Q_c = 2N \{ \alpha I T_c - [(I^2 \rho) / (2G)] - k \Delta T \} \quad (1)$$

式中:  $N$  为热偶对数量;  $\alpha$  为塞贝克系数,  $V/^\circ C$ ;  $I$  为 TEC 电流,  $A$ ;  $T_c$  为 TEC 制冷端温度,  $^\circ C$ ;  $\rho$  为 TEC 电阻率,  $\Omega \cdot cm$ ;  $G$  为 TEC 几何系数, 含义是 TEC 的截面积与高度之比,  $cm$ ;  $k$  为热偶对的热导率,  $W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $\Delta T$  为 TEC 冷热端温差,  $^\circ C$  [16]。

### 2.4.2 TEC 的基本参数

根据相关设计经验, 综合考虑换热能力、所需制冷量、升降温效率需求。文中选用的 TEC 基本参数如表 4 所示。

表 4 TEC 的基本参数

Tab.4 Basic parameter of TEC

Name	Numerical value	Conditions for testing
$I_{max}/A$	15	$Q_c = 0, \delta T = \delta T_{max}, T_h = 50 \text{ }^\circ C$
$U_{max}/V$	37.4	$Q_c = 0, I = I_{max}, T_h = 50 \text{ }^\circ C$
$\delta T_{max}/^\circ C$	78	$Q_c = 0, I = I_{max}, T_h = 50 \text{ }^\circ C$
$Q_{cmax}/W$	294	$Q_c = 0, \delta T = 0, T_h = 50 \text{ }^\circ C$
$T_{hmax}/^\circ C$	200	Instant

表 4 中:  $I$  为电流,  $A$ ;  $U$  为电压,  $V$ ;  $\delta T$  为 TEC 的双面温差,  $^\circ C$ ;  $Q_c$  为热电冷却器能转移的热量,  $W$ ;  $T_h$  为热电冷却器热端温度,  $^\circ C$ ; 下标 max 表示最大。对于 TEC 而言, 当双面温差不同时, 由于电气性能变化 [17], 上文提及到关键参数也将有所不同。

图 9 为根据 TEC 厂家给出的 TEC 热端温度在 50 °C 时的电流与电压关系数据拟合出的关系曲线。

经初步测量验证,在实际使用过程中,热电制冷组件中的 TEC 的双面温差为 50℃,其输入端电压为 19.2 V。因此,可使用图 8 来推断流入此 TEC 的输入电流区间为 [8 A, 9 A]。再根据 TEC 的制冷量与电流的关系曲线(图 10)可得,到当输入电流在 8~9 A、双面温差在 50℃的情况下,TEC 的制冷量约为 70~80 W。常用的高速通信光模块功率较大的封装模式是 QSFP-DD 封装模式,此种模式的功耗约为 12 W。因此,所用 TEC 的制冷量完全满足应用条件。

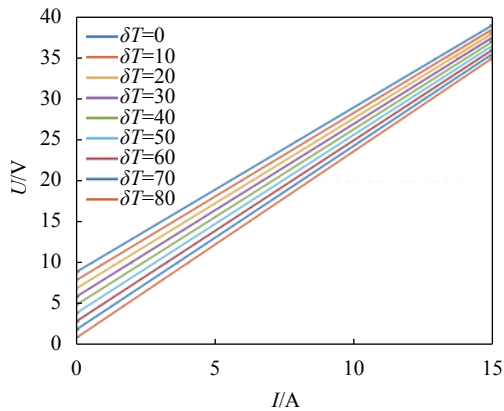


图 9 TEC 的电压-电流关系曲线

Fig.9 Voltage-current relationship curve of TEC

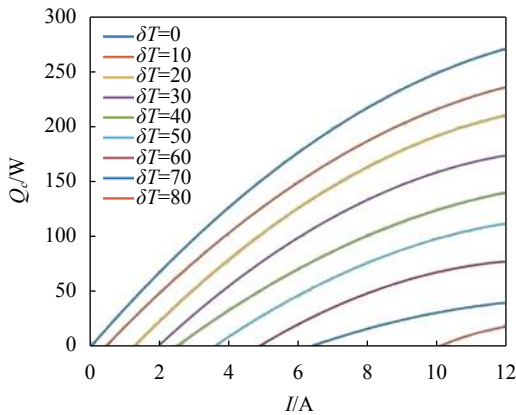


图 10 TEC 制冷量与输入电流关系

Fig.10 Relationship between TEC cooling capacity and input current

2.4.3 TEC 控制器的基本参数

设计选用的 TEC 控制器基本参数如表 5 所示,其中:  $V_{IN}$  为温控模块的电源电压, V;  $CH$  为温控模块的控温通道个数;  $V_{OUT}$  为温控模块输出电压, V;  $I_{OUT}$  为温控模块输出电流, A; Dimensions 为温控模块的外形尺寸,  $mm^3$ ; 下标 max 表示最大。

表 5 TEC 控制器的基本参数

Tab.5 Basic parameters of the temperature control module of TEC

Parameter	Numerical value
$V_{IN}/V$	24
$CH$	1
$V_{OUT_{max}}/V$	19.2
$I_{OUT_{max}}/A$	15
Dimensions/ $mm^3$	55×95×28

2.5 TEC 热排散系统的设计

2.5.1 热排散系统的寄生传热抑制

寄生传热是指温度较高的器件通过辐射及热传导的方式向温度较低的器件传热。为了保证 TEC 热排散系统的制冷性能,必须减少寄生传热。因此,在热排散系统中外循环水路的结构件采用隔热设计的同时,仅采用六颗碳钢螺丝钉固定。

2.5.2 热排散系统冷板换热器的设计

考虑到成本问题,设计的冷板换热器三维截面图如图 11 所示。该冷板换热器除长度为 100 mm 外,其他参数与 DUT 热电制冷组件中设计的水冷头完全一致。采用 Flow Simulation 对其内部流体流速进行仿真,该软件是利用经检验的计算流体力学 (CFD) 技术计算而实现仿真的,最终结果如图 12 所示<sup>[18]</sup>。

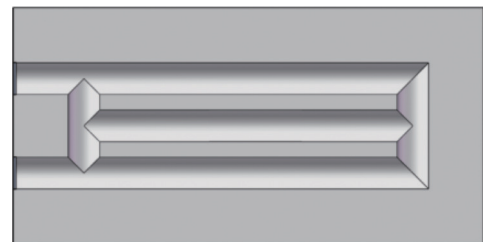


图 11 冷板换热器三维截面图

Fig.11 3D section diagram of cold plate heat exchanger

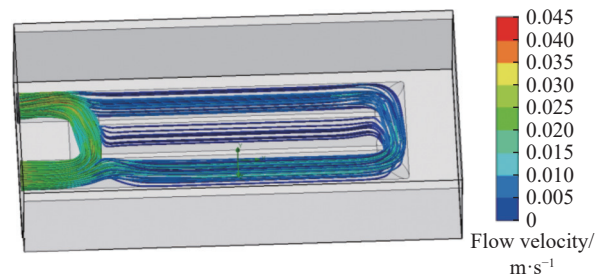


图 12 冷板内流体流速仿真

Fig.12 Simulation of fluid velocity in cold plate

根据图 12 中的流体仿真结果可知, 流体在该结构中的流速基本小于 0.02 m/s, 即水路结构不利于液体的流通, 会影响冷板的散热效果。故优化水路的三维截面图如图 13 所示, 其内部流体流速仿真结果如图 14 所示。

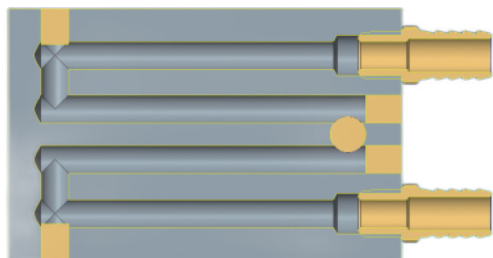


图 13 优化后的冷板换热器的三维截面图

Fig.13 3D section diagram of optimized cold plate heat exchanger

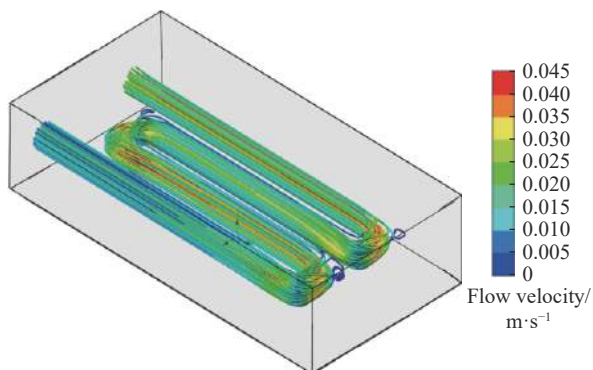


图 14 优化后的冷板换热器流量仿真模型

Fig.14 The optimized fluid flow velocity simulation model of cold plate heat exchanger

根据图 14 可知, 优化后的冷板换热器的水路可以保证流体在其中的流速大于 0.02 m/s, 该水路结构可用。

图 15 为 TEC 的热端热量与电流的关系曲线。取输入电流 8.5 A, 根据图 10 可以得出控温 TEC 的制冷量为 90 W; 此时 TEC 热端热量可以根据图 15 得到, 为 275 W。

为验证 TEC 的数量是否与制冷效率成正相关, 故在 TEC 热控系统中分别选取六片及八片 TEC 来制冷并相应地增加风扇数量。但考虑到噪音及体积因素, 风扇数量最多为六个。每组环境分别测量 10 组并将实验结果取平均值。结果如表 6 所示。

根据相关设计经验, 结合所用 TEC 的综合制冷系数 (Coefficient of Performance, COP) 最大为 0.5。最

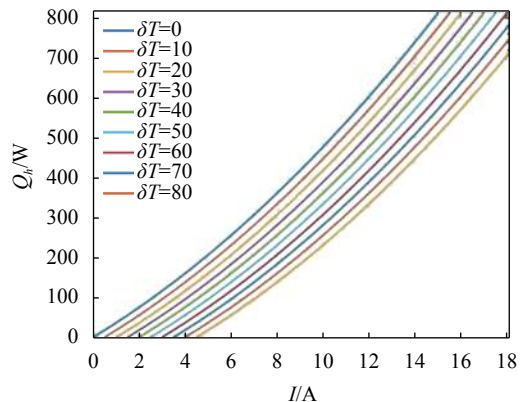


图 15 TEC 热端热量与输入电流关系

Fig.15 Relationship between the heat of the hot end of TEC and the input current

表 6 不同数量的 TEC 的升降温时间

Tab.6 Temperature rise and fall time of different number of TECs

The number of TEC/pcs	The number of fans/pcs	The duration of temperature rise/s	The duration of temperature decrease/s
6	3	87	95
8	6	130	150

终在 TEC 热排散系统中使用四片 TEC 来给外循环水冷夜降温, TEC 的热端用液冷的方式散热, TEC 组直接由 24 V、10 A 供电。供电电路如图 16 所示。

由于综合考虑噪音、体积、供电总功率等问题, 选取的水泵参数如表 7 所示。TEC 热排散系统达到

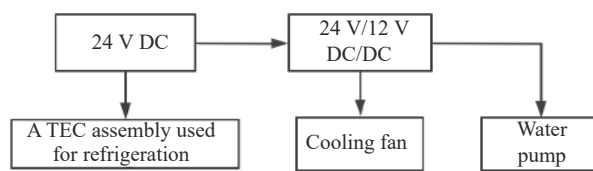


图 16 TEC 热排散系统供电电路

Fig.16 Power supply circuit for TEC cooling system

表 7 水泵参数

Tab.7 Parameters of water pump

Parameter	Numerical value
Volum/mL	8 890
Nominal voltage/V	12
Incoming current/A	1.5±10%
Motor speed/rpm	4500±5%
Lift/m	6±1
Quantity of flow/L·h <sup>-1</sup>	1 200
Power/W	18

稳态后, TEC 的热端温度可达到 47 °C, 冷端温度为 -2.5 °C。内循环水路水温为 45 °C, 外循环水路水温为 -0.5 °C, 即 TEC 双面温差约为 50 °C。结合图 10 可知, 每一片 TEC 的制冷量为 100 W; 结合图 15 可知, 每一片 TEC 的热端产热量约为 310 W。

内循环水路的初始水温为 27 °C, 最终系统达到稳态时, 内循环水路水温稳定在 45 °C, 所以风排和风扇散去的总能量为:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (2)$$

式中:  $Q$  为散掉的总能量;  $C$  为水冷液的比热容;  $m$  为水冷液的体积流量;  $\Delta T$  为水冷液温升。

结合公式 (2) 中的  $Q$  并综合考虑噪声、体积、效率及额定功率, 最终选用的风排和风扇的参数分别如表 8 和表 9 所示。图 17 为最终设计出的热排散系统的简化结构图; 图 18 为热排散系统内部风路仿真图; 图 19 为热排散系统实物图; 图 20 为热排散系统与误

表 8 风排参数

Tab.8 Parameters of the air exhaust

Parameter	Numerical value
Size/mm <sup>3</sup>	391 × 121 × 45
Number of pipes/bar	12 × 2
Diameter of fans/cm	12

表 9 风扇参数

Tab.9 Parameters of the fan

Parameter	Numerical value
Size/mm <sup>3</sup>	120 × 120 × 38
Working voltage/V	12
Noise/dBA	55.5
Rated power/W	12.6

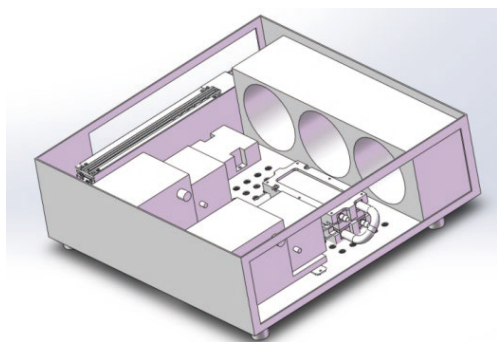


图 17 热排散系统结构图

Fig.17 Structure drawing of the heat dissipation system

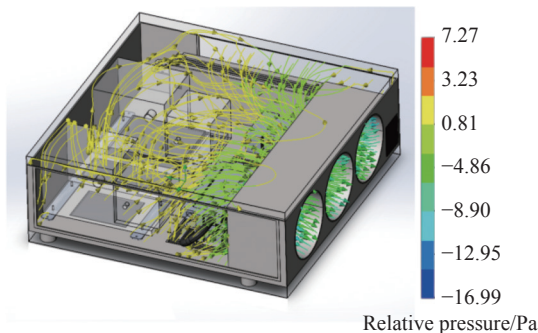


图 18 热排散系统内部风路仿真

Fig.18 Simulation of air path inside heat dissipation system



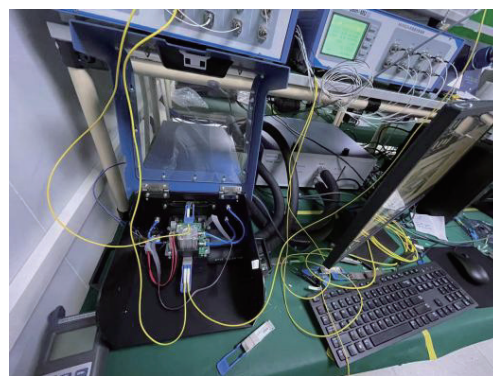
图 19 热排散系统实物

Fig.19 Physical view of the heat dissipation system



(a) 物料和仪器准备

(a) Preparation of materials and instruments



(b) 测试环境实拍

(b) Test environment real shot

图 20 热排散系统与误码仪共同搭建的测试平台

Fig.20 Test platform built by heat dissipation system and BERT instrument

码仪搭建的光模块测试环境实物图。

### 3 实验验证

#### 3.1 热控系统极限低温测试

根据前述元件选取及仿真模型搭建实验平台、实验装置。因为模块自身会有热量产生,所以通常情况下不考虑热控系统对升温效率的影响。故首先验证 TEC 热控系统可以使控温 TEC 在无负载情况下能达到的极限温度是否低于目标值,即低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,实验验证结果如图 21 所示。在无负载的情况下,经充分预冷,控温 TEC 的制冷面的极限低温为 $-31.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,同时满足制冷需求,TEC 热控系统可用。

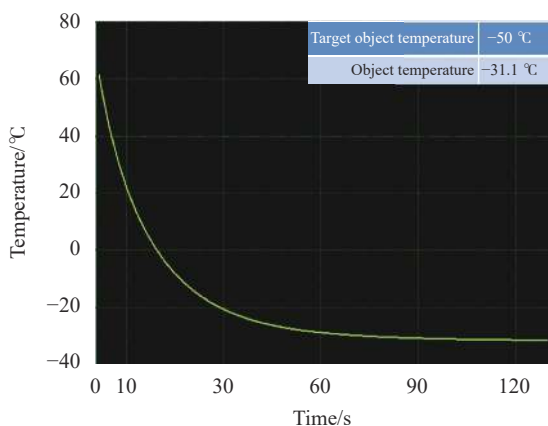


图 21 控温 TEC 制冷端极限温度

Fig.21 Limit temperature of TEC cooling surface for temperature control

#### 3.2 热控系统与水冷机温循效率对比

根据 MSA 多源协议 QSFP-28 和 QSFP-DD 封装模式的高速通信光模块的功率分别为 7 W 和 14 W,但通常厂商为了降低功率,会将 5 W 和 12 W 作为模块的出厂标准。而 MAS 多源协议中将 1.5 W 定为 SFP28 的功率,厂家在出厂时会把功率降低到 0.9 W。在功率上来估算,热控系统只要满足对单个 QSFP-DD 封装类型的光模块的升降温需求,那么在保证 DUT 测试板规格不变的条件下就可以同时并行测试两枚 QSFP-28 封装类型的光模块,四枚 SFP28 的光模块,大大提高了光模块的测试效率。在热控系统与水冷机的温循效率对比实验中所用的模块主要参数如表 10 所示。表中:“xxxG BASE”表示该产品支持和基于 xxxG 的应用环境;LR4 表示传输

距离为 10 km,通道数为四个;IR4 表示传输距离为 2 km,通道数为四个。

表 10 实验所用模块主要参数

Tab.10 Main parameters of the optical module used in the experiment

Type	Type of module	Central wavelength/nm
QSFP-DD	400 G BASE LR4	1310
QSFP-28	100 G BASE IR4	1310

##### 3.2.1 热控系统与水冷机对一枚 QSFP-DD 的升降温效率对比

首先打开热排散系统及水冷机分别预冷 30 min,然后打开热控系统 DUT 热电制冷器组件及 TEC 控制器,通过 TEC 控制器将两套系统中的热电制冷组件分别降温到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,用上位机软件读取模块壳温是否到达 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。待模块壳温到达 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,设置热电制冷组件升温到 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,过程中通过上位机软件监控并记录模块壳温到达 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间;之后重新控制热电制冷组件降到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,监测并记录模块壳温达到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间,重复步骤并记录 10 组数据。

热控系统与水冷机对 QSFP-DD 的升降温效率对比结果如表 11 及图 22 所示。结合对比数据可知,热控系统的升温控温效率比水冷机慢约 10 s,在可工程允许范围内。

表 11 QSFP-DD 的升降温效率对比

Tab.11 Comparison of heating and cooling efficiency of QSFP-DD

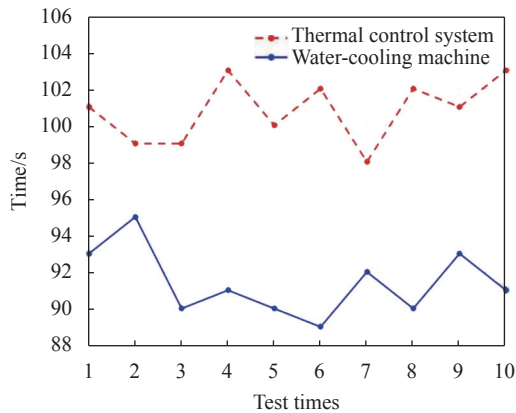
Number of tests	The duration of temperature rise/s		The duration of temperature decrease/s	
	Thermal control system	Water-cooling machine	Thermal control system	Water-cooling machine
1	101	93	95	93
2	99	95	96	93
3	99	90	95	93
4	103	91	95	93
5	100	90	95	92
6	102	89	95	92
7	98	92	95	93



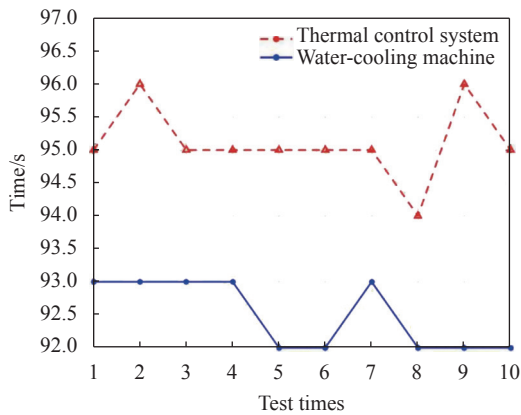
续表 11

Continued Tab.11

Number of tests	The duration of temperature rise/s		The duration of temperature decrease/s	
	Thermal control system	Water-cooling machine	Thermal control system	Water-cooling machine
8	102	90	94	92
9	101	93	96	92
10	103	91	95	92
Mean value	100.8	91.4	95.1	92.5



(a) 升温效率对比  
(a) Comparison of heating efficiency



(b) 降温效率对比  
(b) Comparison of cooling efficiency

图 22 QSFP-DD 的升降温效率对比

Fig.22 Comparison of heating and cooling efficiency of QSFP-DD

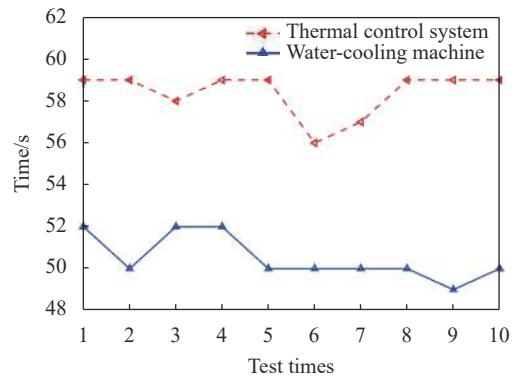
3.2.2 热控系统与水冷机对两枚 QSFP-28 的升降温效率对比

测试方式与上小节一致,故在此不过多赘述。热控系统与水冷机对两枚 QSFP-28 的升降温效率对比结果如表 12 及图 23 所示。结合对比数据可知,热控

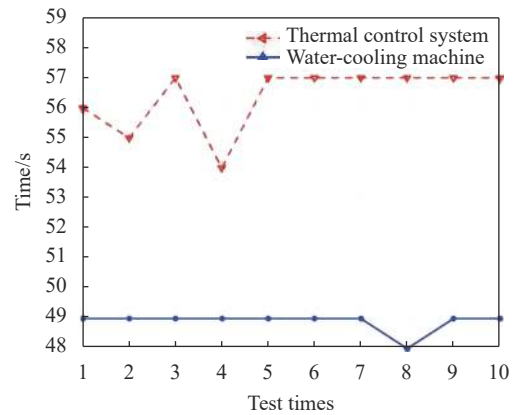
表 12 QSFP-28 的升降温效率对比

Tab.12 Comparison of heating and cooling efficiency of QSFP-28

Number of tests	The duration of temperature rise/s		The duration of temperature decrease/s	
	Thermal control system	Water-cooling machine	Thermal control system	Water-cooling machine
1	59	52	56	49
2	59	50	55	49
3	58	52	57	49
4	59	52	54	49
5	59	50	57	49
6	56	50	57	49
7	57	50	57	49
8	59	50	57	48
9	59	49	57	49
10	59	50	57	49
Mean value	58.4	50.5	56.4	48.9



(a) 升温效率对比  
(a) Comparison of heating efficiency



(b) 降温效率对比  
(b) Comparison of cooling efficiency

图 23 QSFP-28 的升降温效率对比

Fig.23 Comparison of heating and cooling efficiency of QSFP-28

系统的升温控温效率比水冷机慢约 10 s, 在工程允许范围内。

## 4 结 论

文中根据现代高速通信光模块的生产测试需求设计了高速通信光模块热控系统, 并介绍了热控系统的结构和工作原理; 然后设计了 DUT 热电制冷组件并使用 Flotherm 验证了其制冷效果; 设计了热排散系统, 进行了内部风路仿真; 最后, 将热控系统与水冷机进行升降温效率对比。实验结果证明: 热控系统基本满足对常用封装方式的高速通信光模块的控温需求, 且相对于水冷机而言, 具有小型化、低噪音、零震动的优势。热控系统对 QSFP-DD 封装模式的光模块升降温时间可以控制在 110 s 内; 对 QSFP-28 封装模式的光模块升降温时间可以控制在 60 s 内。相较于水冷机对光模块的控温效率而言, 热控系统整体比水冷机慢 10 s, 但是热控系统的体积是水冷机的三分之一, 且零震动、低噪音, 满足模块极端温度测试的控温效率需求, 并且适用于光模块功能的集成化测试。

## 参考文献:

- [1] Zhang Taolue, Li Qibo, Shankaran G, et al. Fan cooling investigation for high-speed electronic interconnect [EB/OL]. (2022-07-07) [2022-09-02]. <https://doi.org/10.1080/01457632.2022.2093530>.
- [2] 徐德胜. 半导体制冷与应用技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.
- [3] Goldsmid H J. Electronic Refrigeration[M]. Berlin: Springer, 1986.
- [4] Rowe D M, Pollock D D, Stockholm J G, et al. CRC Handbook of Thermoelectrics[M]. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [5] Kaushik S C, Bhardwaj S C. Theoretical analysis of ammonia-water absorption cycles for refrigeration and space conditioning systems [J]. *International Journal of Energy Research*, 1982, 6(3): 205-225.
- [6] Pang Y F. The theoretical analysis and experimental research on the optimal condition of semiconductor refrigeration [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, 40(1): 340-348.
- [7] Zhang Bo, Wang Yaxiong. An experimental investigation on a novel liquid thermoelectric cooling device [J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(9): 3441-3446. (in Chinese)
- [8] Liu Xiaoping, Cao Xu, Li Juxiang. Experimental research of heat pipe dissipater at the hot side of semiconductor [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2016, 32(7): 113-116. (in Chinese)
- [9] Sun Zhe, Huang Xiang, Liu Jiali. Experimental study on split evaporative air conditioner of evaporative cooling and semiconductor refrigeration [J]. *Fluid Machinery*, 2013, 41(9): 61-65. (in Chinese)
- [10] Li Jianglan, Shi Yunbo, Zhao Pengfei, et al. High precision thermostat system with TEC for laser diode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1745-1749. (in Chinese)
- [11] Liu Gang, Tang Xiaojun, Zhao Hong, et al. New designs and CFD numerical simulations for solid-state laser heat sink [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1111-1116. (in Chinese)
- [12] Xu Nana, Yu Feng, Zhou Zhenhua. Thermal design and validation of a geosynchronous orbit infrared camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20210056. (in Chinese)
- [13] Liu Ning. Research on fluid flow and heat transfer characteristics of liquid-cooling system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)
- [14] Zhang H Y. A general approach in evaluating and optimizing thermoelectric coolers [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2010, 33(6): 1187-1196.
- [15] Luo Z. A simple method to estimate the physical characteristics of a thermoelectric cooler from vendor datasheets [J]. *Electronics Cooling*, 2008, 14(3): 22-27.
- [16] Yang Wengang, Fan Xuewu, Wang Chenjie, et al. Design and test of thermo electric cooling system for space based telescope detector assembly [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8): 0822001. (in Chinese)
- [17] Astrain D, Vi N J G, Dominguez M. Increase of COP in the thermoelectric refrigeration by the optimization of heat dissipation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(17): 2183-2200.
- [18] DS SolidWorks®公司. SolidWorks® Flow Simulation教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

## Design of thermal control system for high-speed communication optical module

Guan Boren<sup>1</sup>, Li Mingyu<sup>1\*</sup>, Deng Renhui<sup>2</sup>, Hu Haiyang<sup>2</sup>, Lian Zhe<sup>2</sup>

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. The Equipment Department of Semight Instrument Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

### Abstract:

**Objective** As the communication rate increases, the power consumption of optical modules increases. Therefore, the heat dissipation environment of optical modules must be ensured. In order to ensure that the optical module can still maintain good performance under extreme environment, it is necessary to add extreme temperature cycle experiment in the delivery test of the optical module. With the increasing demand for optical modules, improving the efficiency of optical module delivery test has become the first engineering problem to be solved. Therefore, the design of the thermal control system for the high-speed communication optical module is important.

**Methods** First, according to the characteristics of the semiconductor cooler, the thermoelectric cooler assembly of the device under test was designed (Fig.3-4) and the results of Flotherm simulation indicate the availability of thermoelectric refrigeration components (Fig.6-7). Then, according to the principle and characteristics of the semiconductor refrigerator, the heat dissipation system is designed (Fig.17-19). Finally, the temperature control efficiency and the effect of the thermal control system and the water cooler are compared.

**Results and Discussions** The thermal control system of high-speed communication optical module uses a semiconductor cooler as the refrigeration unit, and the rise and fall time of the optical module in QSFP-DD packaging mode can be controlled within 110 s (Tab.11 and Fig.24). The rise and fall time of the optical module in QSFP-28 encapsulation mode can be controlled within 60 s (Tab.11 and Fig.25). The effect of temperature control is good, and the high-speed communication optical module manufacturers can analyze the performance of the optical module within the operating temperature range of commercial grade. The system is mainly composed of the device under test, thermoelectric cooler, the fixture, the controller of the semiconductor cooler and the heat dissipation system. Among them, the thermoelectric cooler assembly of the device under test is made up of the cylinder bracket and the cold plate radiator mounting box, which effectively reduces the heat leakage (Fig.3-4); Flotherm software is used to establish a thermal simulation model of cold plate heat exchanger in thermoelectric refrigeration components. The simulation results show that the module shell temperature can be stabilized at  $-0.382\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the cold plate heat exchanger can meet the requirements (Fig.6-7). And in the meantime, Flow Simulation is adopted to optimize the water flow of the cold plate heat exchanger in the heat dissipation system. The flow velocity of the optimized water flow in the cold plate heat exchanger is greater than  $0.02\text{ m/s}$  (Fig.14), and the optimized water structure is available. This system has the advantages of little vibration and low noise, and only one-third volume of the water cooler (Fig.20). Meanwhile, this thermal control system basically meets the temperature control requirements for the high-speed communication optical modules with the common packaging methods.

**Conclusions** The time of temperature control of the optical module with the thermal control system is 10 s longer than that with the water cooler. But it has the advantages of miniaturization, low noise and zero vibration, which is more conducive to the integrated testing of optical modules. Using this system can not only test the optical modules in the QSFP-DD package mode independently, but also realizes the dual-channel parallel test of the optical modules in the QSFP-28 package mode to double the test efficiency of optical module.

**Key words:** optical fiber communication; thermal control system; thermal simulation; optical module

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (62027825); National Key R&D Program of China (2020YFC2004600); 111 Project of China (D21009); Natural Science Foundation of Jilin Province, China (20220101130JC)