

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0081-05

基于计算流体力学方法的半导体激光器外部散热设计的数值模拟

刘 刚 朱 辰 林 佶 翔
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要 介绍了半导体激光器外部散热设计的数值模拟方法——计算流体力学(CFD)方法。对于流体-固体耦合传热问题,建立对流-导热耦合传热模型和质量守恒、能量守恒、动量守恒以及 $k-\epsilon$ 方程联合控制方程组,按照给定的边界条件,利用数值方法进行迭代计算,求解出高精度的数值结果。对一只最大热功耗 15 W 的半导体激光器的外部散热设计——铝合金片状翅片热沉加轴流风扇强制风冷方案,用 CFD 方法进行模拟仿真,数值计算结果表明设计方案可以较好地满足总体热设计要求。

关键词 激光器;半导体激光器;散热;计算流体力学;强制风冷;热沉;数值模拟

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0081

Numerical Simulation Based on Computational Fluid Dynamics Method for a Semiconductor Laser External Heat Dissipation Design

Liu Gang Zhu Chen Lin Jixiang

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract A computational fluid dynamics (CFD) method for semiconductor laser external heat dissipation numerical simulation is introduced. For fluid-solid coupled heat transfer problems, convection-conduction coupled heat transfer model and mass conservation, energy conservation, momentum conservation, $k-\epsilon$ equation governing equations are established; precise numerical solution can be acquired by iterative calculation according to specified boundary conditions. The forced air cooling design for a semiconductor laser (15 W maximum heat load) with external heat dissipation, which consists of an aluminum alloy heat sink and an axial fan, is simulated with CFD method; the result of numerical simulation indicates that the design is applicable for the thermal requirements of the system.

Key words lasers; semiconductor laser; heat dissipation; computational fluid dynamics; forced air cooling; heat sink; numerical simulation

1 引 言

半导体激光器的阈值电流、输出光功率、激光器光谱特性等都和芯片区温度有密切的关系^[1~3],而外部散热状况又会直接影响半导体激光器的外壳和芯片区的温度,所以,外部散热问题是关系半导体激光器能否正常工作的一个关键问题。

在室温下工作的较低功率的半导体激光器的应用中,一般较少需要考虑到主动散热问题,因为低功率半导体激光器功耗一般很小,外部在自然的自然散热条件下,芯片区的温升不会太高,往往都能满足

激光器的工作要求。

随着半导体激光器功率的不断提高,热功耗也逐渐变大,自然散热的外部条件已经不能使芯片区的温度升高控制在要求的范围之内时,就需要采用适当的主动散热措施来强化散热,使半导体激光器工作在正常温区之内。常用的外部强化散热措施有强制风冷、强制水冷和加装半导体制冷器(TEC)等。其设计计算以前大多采用经验公式估算^[4,5],但一般只能进行很粗略的估计,适用范围小,针对不同的情况要借助于很多不同的经验公式,且计算结果偏

收稿日期: 2009-12-22; 收到修改稿日期: 2010-01-22

作者简介: 刘 刚(1978—),男,工程师,主要从事光电子器件的冷却和热管理等方面的研究。

E-mail: beijingliugang@yahoo.cn

差都很大,却很少有专门研究来讨论外部散热的准确计算问题。本文以一定尺寸最大热功耗 15 W 的半导体激光器风冷散热方案为例,用计算流体力学(CFD)方法对半导体激光器所需要处理的外部散热初步热设计方案进行模拟仿真,得到准确详尽的全局温度分布和压力分布等模拟结果。

2 外部散热问题设计方案和模型

散热设计方案采用了半导体激光器和铝合金热沉良好热连接,轴流风扇侧向强制风冷该热沉的散热方式。半导体激光器的散热面尺寸为 $8.5 \text{ mm} \times 11.8 \text{ mm}$,最大热功耗为 15 W,即该面上热流密度

为接近 15 W/cm^2 ,依靠自然对流散热显然不能满足使用要求。根据总体结构尺寸,初步选用了材质为硬铝 LY12,尺寸为 $70 \text{ mm} \times 69 \text{ mm} \times 67 \text{ mm}$ 的平行片状翅片散热热沉,其翅片为 18 片,厚度为 1 mm,高度 60 mm;侧向送风的风扇尺寸为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$;半导体激光器和热沉之间设置一块 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 的导热铜块,其作用为安置温度检测用的温度传感器;导热铜块和半导体激光器以及散热热沉的接触面都用导热硅脂填充,目的是减小和消除传热通路上的接触热阻,实验装置散热设计总布局如图 1 所示。

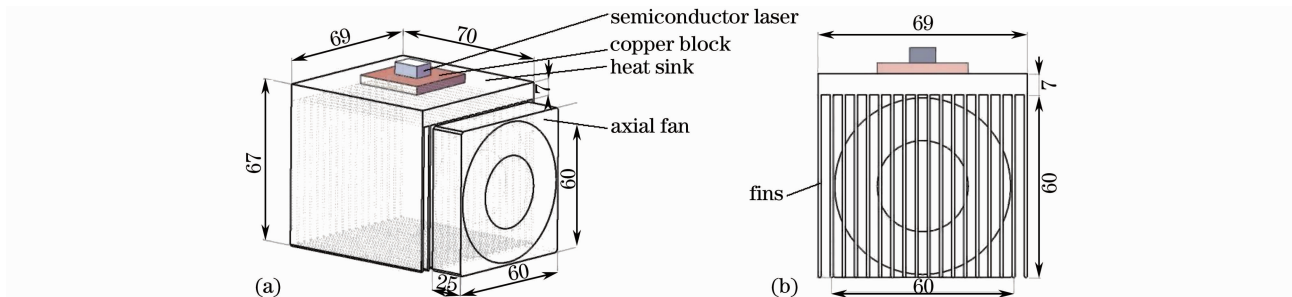


图 1 散热结构简图。(a) 轴测图,(b) 正视图

Fig. 1 Schematic of heat dissipation structure. (a) axonometric drawing, (b) frontal view

设计方案选用的风扇为 PAPT 公司 614NGN 型轴流风扇,其风量-风压数据和特性曲线如表 1 和图 2 所示,值得说明的是风压指的是风扇出口压力对于标准大气压的相对压力值。已经完成封装的半导体激光器热阻值是一定值,在一定的热流量下,温度升高也是一定值,因此,保证半导体激光器散热面的温度就可以保证芯片区的正常温度,根据使用要求(半导体激光器输出功率和波长满足系统要求),设计目标为保证半导体激光器散热面的温度为 $30 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

表 1 风扇的风量-风压数据

Table 1 Flow rate-pressure data of the fan

Flow rate / ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Pressure / Pa
0	69
0.00278	45
0.00444	30
0.00500	23
0.00556	20.8
0.00611	21
0.00694	21.5
0.00778	20
0.00833	19
0.00972	12.8
0.01139	0

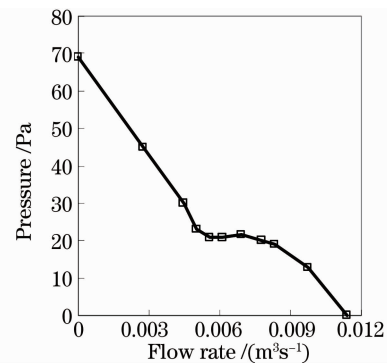


图 2 风扇的风量-风压关系

Fig. 2 Flow rate-pressure relation of the fan

3 散热方案的数值模拟

由传热学基本原理可知,在本问题中可以忽略辐射散热,因为强制风冷的散热量大大高于辐射散热量,数值上有着数量级的差别。热量从半导体激光器向热沉的传递是单纯的导热问题,用 Poisson 方程就可以很精确描述。而对热沉向流动空气传递热量这种复杂的热问题,可以建立对流-导热耦合模型,对质量、能量和动量控制方程组进行求解,可以很好地描述流体和固体区域内的温度分布以及流体区域的压力分布,但是这种复杂问题一般无法获得

解析解,只能求取数值解。应用湍流 $k-\epsilon$ 两方程模型是目前工程流动和传热的主要方法,用这些方程作为控制方程组,将计算区域离散,对全局进行迭代数值计算可求得精确度很高的数值解^[6,7]。

3.1 流动与传热控制方程组

对于固体区域(导热铜块与热沉)内部应用 Poisson 方程

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q'''}{\lambda} = 0, \quad (1)$$

式中 x, y, z 为固体内任一点的坐标, T 为该点的温度, q''' 是该点的热源发热密度, λ 为固体材料的导热系数。该问题中各种材料导热系数均为各向同性,由于温度变化较小,忽略温度变化对导热系数的影响。20 °C 时,热沉材料 LY12 的导热系数为 121 W/(m·°C),导热铜块的导热系数为 395 W/(m·°C)。

对于流体区域(流动空气)应用 Navier-Stokes 方程组:

1) 连续性方程

$$\frac{\partial(\rho_t u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_t v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_t w)}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

式中 ρ_t 为任一点的流体密度, u, v, w 为该点 x, y, z 三个方向的速度分量。

2) 湍流动量方程、能量方程及 $k-\epsilon$ 方程通用方程

$$\frac{\partial(\rho_t u \varphi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_t v \varphi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_t w \varphi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + S, \quad (3)$$

式中参数 φ 分别代表 u, v, w, T, k, ϵ ; Γ 代表扩散系数; S 代表源项; T 为温度; k 为湍流脉动动能; ϵ 为湍流动能耗散率。

3.2 热 源

数值为 15 W 的面热源加载在半导体激光器散热面表面,均匀分布。

3.3 风 扇

设定 614NGN 型轴流风扇为内部风扇,将风扇的风量-风压数据输入计算模型,空气入口温度为室温 20 °C,出口(环境)压力 1.01325×10^5 Pa。

3.4 热界面热阻

导热铜块和半导体激光器以及散热热沉的接触面都用导热硅脂填充,仍存在一定热界面热阻,为保证模拟计算的准确性,此热阻一定不能忽略。为使这两个面设定接触热阻系数为 3×10^{-5} m²·°C/W,对应的导热硅脂层的每层厚度为大约 0.03 mm。

3.5 其他假设

由于风扇自身形状比较复杂,而自身导热可忽略不计,因此设定风扇为绝热体,半导体激光器散热面之外的其他表面由于只能通过空气自然散热,也假定为完全绝热。

3.6 CFD 数值模拟结果

对于流动模型的建模和计算,流体和传热仿真计算求解采用基于 CFD 原理的商业软件来进行,该软件基于有限体积方法(FVM)。当网格划分精度达到要求时,网格数量与数值计算结果相关性很小,经大量计算,数值计算结果很一致,该模拟计算中划分网格总数超过 1.3×10^5 。

在计算结果中,最值得关心的几项数据为风扇的风压、风扇的送风量、半导体激光器散热面最高温度等。图 3 表示设计的热沉中流动迹线和流体温度的变化示意图,其中箭头表示空间各处空气的流动方向,灰度代表该点的空气温度。

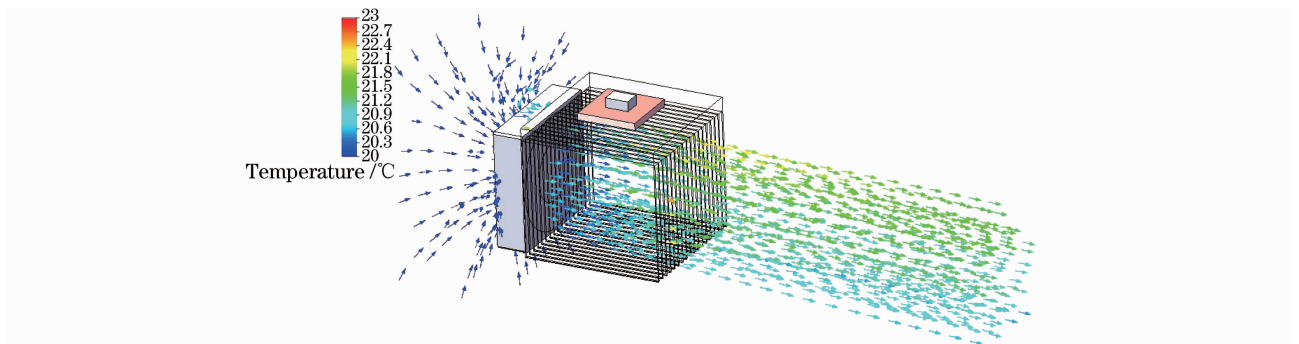


图 3 流动迹线和流体温度变化示意图

Fig. 3 Flow trajectories and temperature change of fluid

图 4 是迭代计算过程中各目标参数的收敛曲线图,迭代过程共进行了 126 次,从图中可以看出,总散热量、最高温度、风扇风量和风压都收敛得很好,从

第 40 次迭代之后这些参数就已经基本达到稳定。

数值模拟结果显示半导体激光器散热面最高温度 32.1 °C,可保证半导体激光器的正常工作温度。风

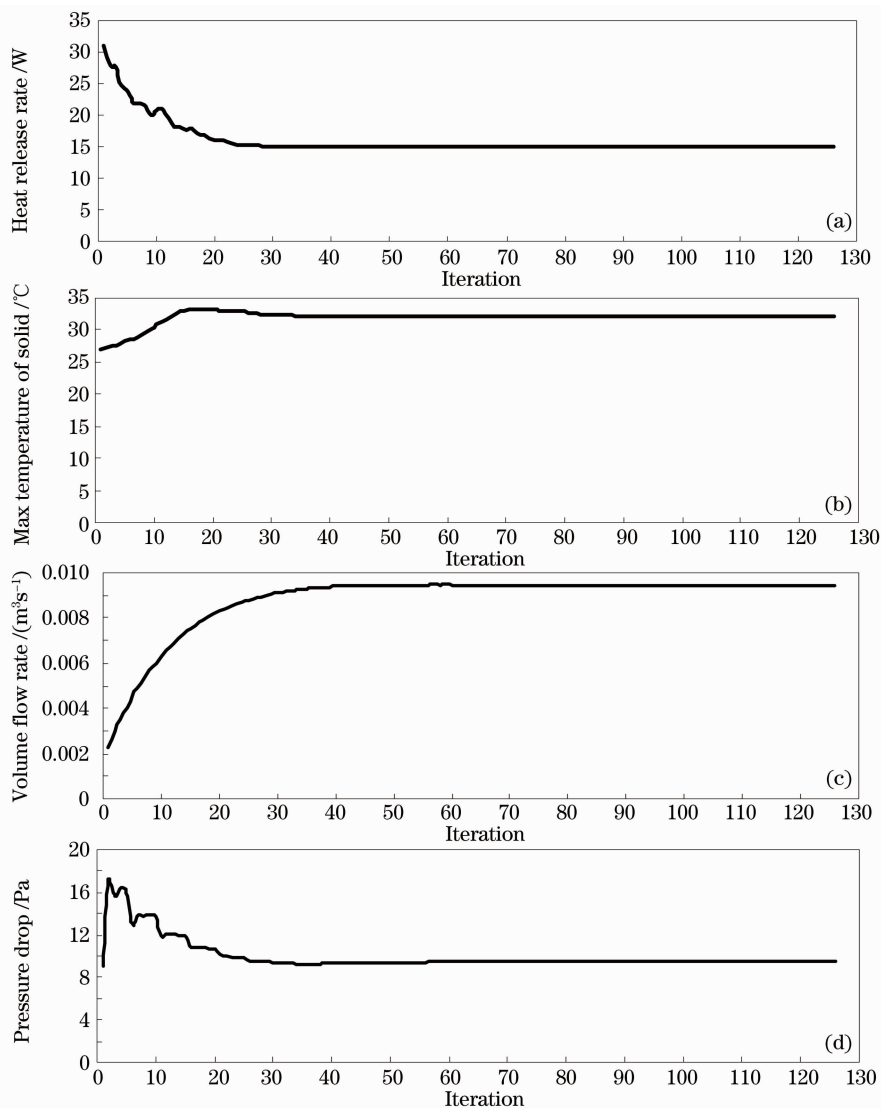


图4 计算目标收敛曲线图。(a)散热量,(b)最高温度,(c)风量,(d)风压

fig. 4 Convergence curve of the calculation goals. (a) heat release, (b) max temperature, (c) volume flow rate, (d) pressure drop. The fan's air flow rate is $0.0094 \text{ m}^3/\text{s}$, and the fan's pressure loss (pressure drop) is 9.5 Pa . According to the air flow rate-pressure loss relationship curve, it is shown that the fan works in a stable working area of low pressure and large air flow rate, which is in line with the actual situation, indicating that the design scheme can better meet the experimental requirements.

图5是给定条件下散热结构的总的温度分布图,从图中可更清楚地看出温度的分布。由于轴流风扇中心为无风区,因此温度略高,也是和实际情况非常吻合的。安置温度传感器的导热铜块的温度并不是完全均匀的,根据数值计算结果可得到任何一点的温度数值。因此,在导热铜块内任何一处安置温度传感器,都可根据数值计算结果提供合理的温度传感器报警温度点和控制温度点。数值模拟结果说明该条件下的温度分布和冷却效果都达到了设计要求。

3.7 关于模拟结果的其他讨论

另外,还可以改变数值计算的一些条件进行进一步计算,这样可以对各种因素的影响大小有更清楚的认识。例如,在该问题中可以设定热沉为紫铜材质,其他条件保持不变,重新进行计算。由于几何模型尺寸不变,风扇工作状态无变化,热源向外传热热阻减小,半导体激光器散热面的最高温度有所降低,达到 $30.4 \text{ }^\circ\text{C}$,比铝合金材质低 $1.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。这说明热沉的材质在该设定条件下对传热有一定影响,但不是决定性因素。换言之,铝合金热沉的热阻在总热阻中所占比重并不显著,除非特别必要,热沉的材质不必更改。如果再设热界面热阻为零,即忽略导热硅脂层的热阻,则得到散热面的最高温度为 $25.9 \text{ }^\circ\text{C}$,比存在热界面热阻低 $4.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。这说明热界面热阻的影响比较明显,所以在实验操作中应当充

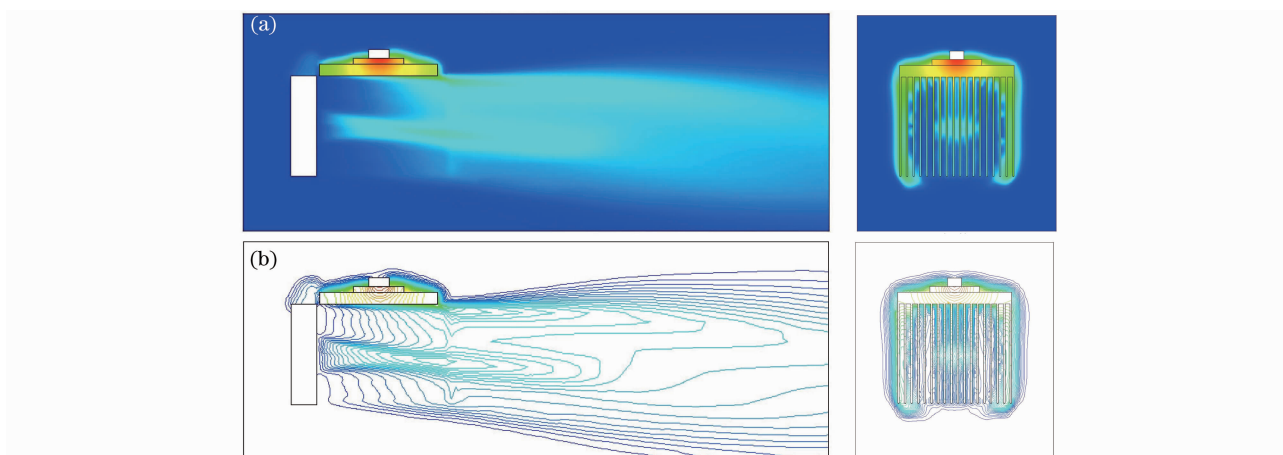


图5 中心切面的温度分布图。(a)温度云图,(b)温度等值线图

Fig. 5 Temperature distribution of central cross section. (a) temperature contour, (b) temperature isolines

分关注,严格控制导热硅脂层的热阻。

如果环境温度(风扇送风温度)甚至环境压力发生改变,最典型的情况是在高低温环境下进行实验,则可以很容易地改变模拟计算的条件设定,得到新的工作条件下的温度分布等计算结果。

如果半导体激光器热功耗发生改变,也很容易通过改变条件求解得到新的温度分布。由于温升等于热阻与热功耗之积,热阻在小温度变化范围内可看作是一定值,它只受传热方式和传热路径影响,所以温升与热功耗近似成正比。当热功耗明显提高时,要保证温度在控制范围之内,必须要考虑采用新的散热结构和方法,以降低传热热阻。改用更大风量的风扇和更大换热面积的热沉可以在一定程度上达到降低热阻的目的,但是其降低是有限度的,而且必然使风扇和热沉的体积增大。所以当热功耗提高幅度较大时,只有采用水冷或者加装半导体制冷器等方式来降低总传热热阻,达到控制温度的要求。

4 结 论

根据计算所得到的热沉表面最高温度值以及其他模拟结果,说明该问题采用强制风冷方案可以充分满足散热要求,方案简单可靠,设计合理。在实验室环境下进行实验可以不必采用更为复杂的水冷和TEC辅助制冷等方案,计算结果很方便地为初步实验方案的确定提供了一定参考。

用CFD方法对强制风冷热沉的设计方案进行模拟仿真,得到准确详尽的温度分布和压力分布。还可以根据不同的计算条件,计算得到各种因素对传热的影响程度。与经验公式法相比较,基于CFD方法的数值计算方便,计算结果精度高,方法通用性

好。不仅仅适用于强制风冷散热问题,对于空气自然对流散热和强制水冷散热同样完全适用。它可用于各种流动传热耦合问题的数值计算,为各种散热问题的设计计算提供了重要手段。

参 考 文 献

- 1 Cheng Dongming, Du Yanli, Ma Fengying *et al.*. The study and prospects of heat sink technology about semiconductor lasers[J]. *Electronics and Packaging*, 2007, **7**(3): 28~33
程东明, 杜艳丽, 马凤英等. 半导体激光器散热技术研究及进展[J]. *电子与封装*, 2007, **7**(3): 28~33
- 2 Qiu Liping, Guo Weiling, Luo Dan *et al.*. Thermal property of high power 980 nm InGaAs/InGaAsP/InGaP laser diodes[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1356~1359
裘利平, 郭伟玲, 罗丹等. 大功率980 nm InGaAs/InGaAsP/InGaP激光器热特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1356~1359
- 3 Zhang Yongming, Zhong Jingchang, Lu Guoguang *et al.*. Study of thermal characteristics of 808 nm InGaAsP-InP SQW lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 9~12
张永明, 钟景昌, 路国光等. 808 nm InGaAsP-InP单量子阱激光器热特性研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 9~12
- 4 D. S. Steinberg. *Cooling Techniques for Electronic Equipment* [M]. Fu Jun Transl.. Beijing: Aviation Industry Press, 1989. 261~264
D. S. 斯坦伯格. 电子设备冷却技术[M]. 傅军译. 北京: 航空工业出版社, 1989. 261~264
- 5 Zhang Yunpeng, Tao Getao, Yao Shun *et al.*. Full solid-state cooling system for high power semiconductor laser [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(z1): 114~116
张云鹏, 套格套, 尧舜等. 大功率半导体激光器全固态风冷散热系统[J]. *光电工程*, 2004, **31**(z1): 114~116
- 6 Yan Chao. *Computational Fluid Dynamics Method and Application* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2006. 27~28
阎超. 计算流体力学方法及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006. 27~28
- 7 Tao Wenquan. *Numerical Heat Transfer* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2006. 347~352
陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006. 347~352