

合成射流流动与传热特征的数值模拟

向立平, 夏智勋, 罗振兵, 邓雄, 王林

(国防科学技术大学 航天科学与工程学院, 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:采用 RNG $\kappa-\varepsilon$ 模型和 PISO 算法, 通过求解三维 N-S 方程, 对腔体右侧振动膜片运动的二维合成射流流动与传热特征进行了数值模拟。模拟结果显示由于激励器在右侧振动膜片的作用下, 合成射流产生的喷射气流在喷口中心右边速度稍大于左边速度, 形成不对称射流流场; 射流冲击壁面的速度峰值出现在中心区两侧, 使得射流冲击换热的 Nu 数形成相应的峰值; 随着合成射流冲击距离 Z/d_o 的增大, 其对流换热系数出现先增大后减小的变化规律, 当冲击距 $Z/d_o = 20 \sim 30$ mm 时冷却效果较佳。

关键词:合成射流; 冲击冷却; 传热; 数值模拟

中图分类号: TU452 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2015)01-0036-05

Numerical study on flow and heat transfer characteristics of Synthetic Jets

Xiang Liping, Xia Zhixun, Luo Zhenbin, Deng Xiong, Wang Lin

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Numerical simulation of a right-hand cavity moving law was performed through the solution 2D N-S equations and energy equation by using the PISO algorithm and RNG based $\kappa-\varepsilon$ turbulence model. The simulation results reveal the airflow is asymmetry because the right airflow velocity of jet nozzle are more than the left airflow velocity. The streamwise velocity off center peaks near the impinging surfaces, the Nusselt number off center peaks near the impinging surfaces. The Nusselt number take on up-down tendency as the nozzle-to-plate distance is increased. The cooling effect for $Z/d_o = 20 \sim 30$ mm is more than the others. The Nu distribution along the wall is influenced mainly by the interaction of produced vortex ring and wall boundary layer.

Keywords: synthetic jet; impinging cooling; heat transfer; numerical simulation

目前高功率 LED 的热流密度高达 100 W/cm^2 , 并且随着芯片技术的不断发展, 热流密度可高达 500 W/cm^2 , 传统的散热技术已不能满足如此高的散热需求^[1]。电子设备厂家迫切需要对半导体芯片冷却的新技术和新方法。针对 LED 的散热问题, 国内外学者开展了广泛的研究。Yan^[1]研究了空气冷却和被动冷却高功率 LED 散热技术, 结果表明这 2 种技术都不能很好的保证 LED 散热要求, 提出了主动式液冷技术。罗小兵研究了一种微喷射流的主动散热方法, 并通过数值模拟与实验进行了研究^[2]。Acikalin 等^[3]采用小型压电风扇主动冷却电子器件和 LED, 提供了一个具有竞争力的热管理手段。

近年来, 运用合成射流技术来为 LED 散热的主动冷却技术得到了重视。合成射流技术是利用压电膜振动激励器的腔体壁面压电振子产生周期性振动, 改变腔体容积产生吹/吸气效应, 向外喷射产生一系列不断向外扩展的非定常涡。涡环运动过程形成强烈的卷绕掺混、破碎和融合, 从而使得合成射流具有将强的换热能

收稿日期: 2014-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11002161); 湖南省自然科学基金项目(13JJ9033); 全国优秀博士学位论文作者专项基金(201058); 高等学校博士学科点专项科研基金(20104307110007)

通信作者: 向立平(1977-), 男, 湖南衡东人, 博士, 副教授, 主要从事传热传质及流体控制技术研究。E-mail: xguofkd@qq.com

力.针对零质量射流的形成机理、基本流场结构、影响因素、性能,以及应用等方面开展了大量的研究工作^[4-7].在合成射流用于强化传热方面国内外也开展了一系列的研究.谭晓茗,张靖周应用动网格技术研究了腔体底面具有一定运动规律的合成射流冲击冷却恒热流壁面的散热规律^[8],同时,采用数值计算和实验方法研究了活塞驱动合成喷的流动特征和冲击靶板的对流换热特征.国外 San 和 Shiao^[9]研究了受限空间圆孔连续喷射冷却平板表面换热特性. Chaudhari^[10]研究表明合成射流是一种新的流动喷射技术,在冷却领域具有非常大的潜力. Pavlova 等^[11]实验研究冷却常热流量表面的效率和原理,分析比较了合成射流和连续射流的特性.本文针对具有侧面运动规律的合成喷分析其流动特征,并对其散热规律进行研究.

1 数学模型

1.1 控制方程

激励器腔体内射流最大速度均很低($Ma \leq 0.1$),在流动速度不高的亲看下,可假定模拟的流场为不可压.考虑到激励器出口宽长比很小(1/10),因此流场只进行二维分析,同时考虑流动的粘性和非定常性,控制方程采用连续性方程、非定常不可压缩雷诺平均的 N-S 方程和能量方程,并结合边界条件进行分析,连续性非常如下:

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0. \quad (1)$$

动量方程:

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\nabla \bar{p} + (\mu_1 + \mu_t) \nabla^2 \bar{u}. \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) = -\nabla \cdot (U(\rho E + p)) + k \nabla^2 T - (\tau - \nabla U) - \nabla \cdot \left(\sum_k H_k J_k \right) + S_h, \quad (3)$$

式中:内能 $E = H - \frac{p}{\rho} + \frac{U^2}{2}$, 焓 $H = \sum_k x_k H_k$.

对于理想气体, E 和 H 的公式为

$$E = C_v(T - T_0), H_k = C_{pk}(T - T_0). \quad (4)$$

局部努塞尔数 $Nu(x, t)$ 包含换热系数 h , 以喷口宽 d_0 为特征长度, d_c 为腔体宽度, h_0 为喷口高, h_c 为腔体高, 其定义式是:

$$Nu(x, t) = \frac{hd_0}{k_f} = \frac{\partial T}{\partial y} \frac{d_0}{\Delta T} \quad (5)$$

努塞尔数 Nu 通过温度梯度 $\partial T / \partial y$ 和温差 $\nabla T = (T_w - T_b)$ 计算得到, T_w 和 T_b 分别为壁面温度和流体区域温度.

1.2 计算模型和边界条件

Utturkar^[12]等研究认为合成射流的旋涡结构受雷诺数(Re)和斯托罗哈数控制(St), $Re/St^2 > K$, 对于二维合成射流 $K \approx 1$, 三维轴对称合成射流 $K = 0.16$. 本文选取喷口宽 2 mm、高 4 mm, 腔体厚 7 mm、高 46 mm, 顶板长 180 mm, 顶板加热面长 40 mm, 喷口到加热面的距离为 Z (Z 取 10 ~ 80 mm).

固体边界:速度为无滑移条件,射流顶板和底板为绝热条件,冲击靶面为恒热流密度 $1\ 000\ \text{W/m}^2$. 将激励器腔体、出口喉道及其工作所处的外部流场作为一个单连通域考虑,在此区内求解 N-S 方程,得到全场流动参数.采用罗振兵等^[13]提出的 X-L 模型. $u_i = 2\pi f \cdot A \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$. 其中 f 为频率, A 为振幅. X-L 模型作为一种全场流动模型,实现了合成射流全流场的数值模拟.

本文采用 Fluent 商业 CFD 软件进行数值模拟,对合成射流喷射采用非稳态隐式求解器,湍流模型采用适用于应变大和流线弯曲度大流动问题的 RNG $k - \varepsilon$ 模型,各参数的离散均采用二阶精度的迎风格式,压力修正采用 PISO (Pressure - Implicit with Splitting of Operators) 算法来纠正和改进初始压力场^[14].

2 结果与讨论

2.1 受限空间合成射流场特征

如图 2 所示,罗振兵采用 RNG $k - \varepsilon$ 模型模拟了在测点(1,0)处合成射流流向速度随时间的变化,并

与实验数据进行了对比分析^[15]. 数值模拟结果与实验数据吻合较好,说明所选模型是可靠的.

文中选取激励器的频率为 $f=1\ 000\ \text{Hz}$,振幅 $A=0.5\ \text{mm}$ 时的条件,由于篇幅所限,文中取 $10\ \text{mm}, 30\ \text{mm}, 40\ \text{mm}$ 不同喷射距离的气流进行分析.

图3(a-d)是压电合成射流激励器喷吹加热板面一个周期内典型时刻速度标量与流线图. 射流在前半个周期处于“吹”出阶段,后半周期处于“吸”入阶段. 射流“吹”出阶段,激励器腔体内的气体向外加速喷出,气体呈放射状离出口^[16]. 出口边缘剪切涡量形成一系列的涡环,这些涡环破碎并卷吸周围流体并形成一股稳定连续的射流. 喷射气流

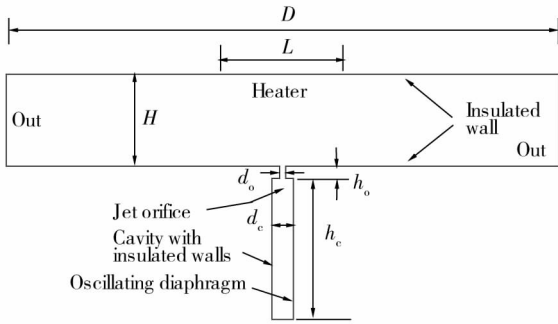


图1 合成射流物理模型

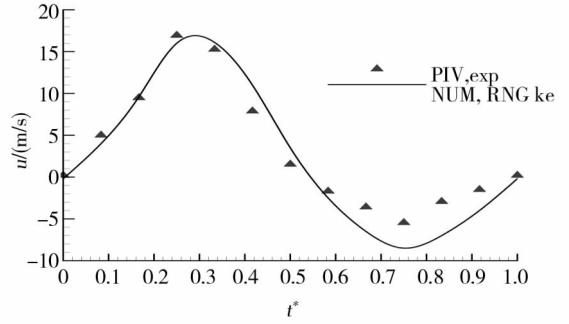
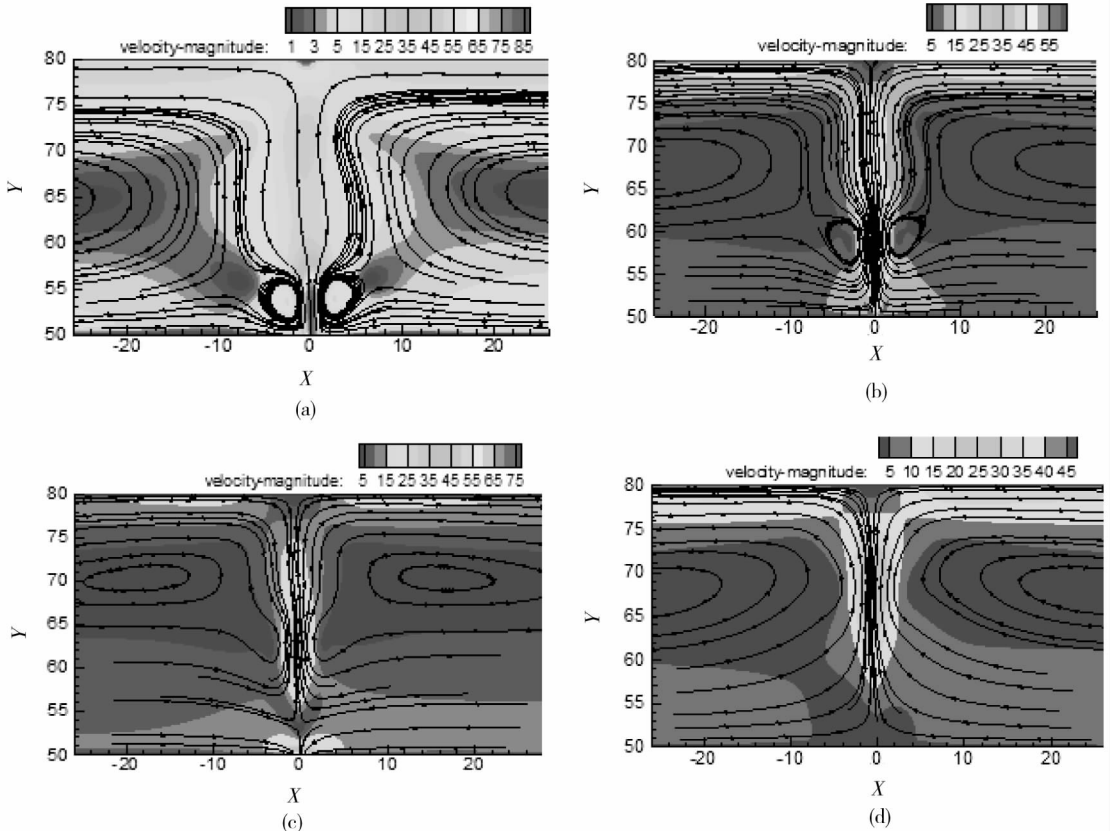


图2 流场预测与实验数据比较



Z=30 mm: (a) $t=T/3$, (b) $t=T/2$, (c) $t=2T/3$, (d) $t=T$

图3 合成射流速度标量和流线图

在加热板的阻挡作用下,沿着加热板形成贴附射流,并在加热板中部区域左右两侧形成回流区. 由于喷射阶段速度涡量破碎卷吸周围流体较强,使得回流区范围较小. 在射流“吸”入阶段,涡对卷吸能力减弱,在向下游移动过程中基本耗散在环境流体中,此时的回流区作用范围增大. 同时,从图3可以看出射流冲击壁面的速度峰值出现在中心区两侧;其原因是射流冲击壁面时,气流在壁面的作用下向四周扩散形成涡对扩散,以及涡对的拉伸作用.

图4是 $t=T/2$ 时刻,合成射流距喷口平面 $0\ \text{mm}, 0.5\ \text{mm}, 29\ \text{mm}, 29.5\ \text{mm}$ 以及喷口平面X方向速度

分布. 从图可知喷嘴轴向中心右边速度大于左边速度,原因是激励器的振动膜片位于右侧,振动膜片振动导致腔气流流场不对称,从而导致靠振动膜片侧的出口气流速度要大于另一侧的气流速度,形成不对称射流流场;喷射气流在涡对的作用下不断卷吸周围流体向下游移动,同时,在加热面板的阻挡作用下,使得加热板右侧气流速度大于左侧气流速度,其最低速度出现在加热板左侧. 这也合理解释了下文 Nu 数低峰值出现在加热板左侧.

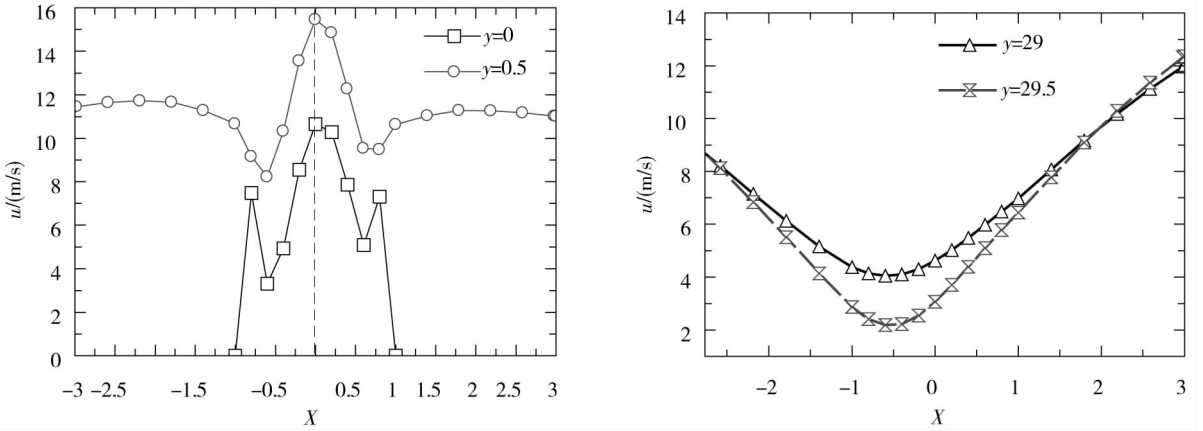


图4 $Z = 30 \text{ mm}$ 条件下 $t = T/2$ 时不同位置速度变化趋势

图5、图6分别是激励器的喷嘴与加热板面距离 10 mm , 40 mm 时 $t = 0.5T$ 的速度标量与流线图,由图可以得出,合成射流在流向方向上 x 在 $0 \sim 10 \text{ mm}$ 区域流动非常复杂,涡动特性非常明显. 由图5可知,由于喷射距离为 10 mm ,其气流涡动特性强烈,气流在加热板的限制下沿加热板底面流动,并在加热板中心两侧附近形成较大的回流区,在回流气流的诱导下导致加热板面中心处的喷射气流速度低于两侧,速度峰值出现在加热板中心两侧附近. 图6的喷射加热板距离为 40 mm ,合成射流在 x 方向大于 10 mm 距离处的流体流动基本稳定. 在加热板的受限作用下,气流在加热板较远处的下方形成较弱的回流区,其回流气流诱导周围流体作用减弱,同时在壁面粘性力的作用下,以及压力驱动和流线弯曲共同作用下产生的.

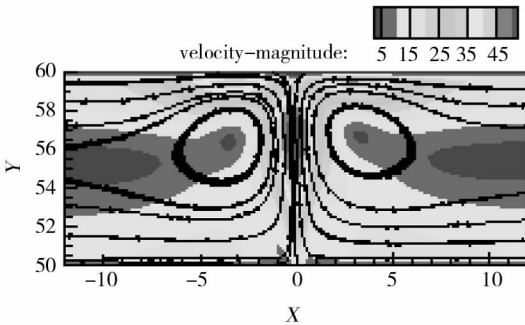


图5 $Z = 10 \text{ mm}$ 条件下 $t = T/2$ 时速度标量和流线图

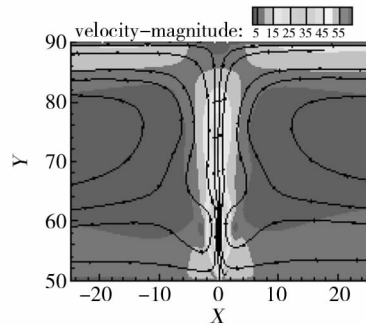


图6 $Z = 40 \text{ mm}$ 条件下 $t = T/2$ 时速度标量和流线图

2.2 合成射流换热特征

图7是在一个周期内不同时刻加热表面局部 Nu 数分布情况,可以明显看出,自耦合射流对靶板的冲击冷却存在着2个“驻点”,换热系数呈现马鞍状的分布(驼峰状),靶板中心位置的换热系数反而比较低,这是由于中间一股自耦合射流与两侧自耦合射流相互卷吸从而发展成为两股自耦合射流冲击到靶板上的缘故.

图8是冲击靶面在合成喷作用下的对流换热局部 Nu 数的分布曲线. 合成射流的对流换热系数呈现2个峰值. D. Wcolucci^[17] 研究圆形气体受限冲击射流进行传热实验发现,驻点的 Nu 不再是峰值,而是在驻点外出现了2个局部的 Nu 峰值的结论相符. 随着冲击间距增大,对流换热系数先增大后逐渐减小. 这种现象是由轴向速度衰减和限制板2个原因共同作用形成的. 喷射间距越小,限流作用越明显,板间的回流较弱,使得换热较弱;喷射间距越大,轴向速度衰减较快,到达换热表面的速度越小;同时,限制板离换热面越远,则限制作用越小,热量越容易散出. 只有当喷射距离取合适的值时 ($Z/d_o = 20 \sim 30 \text{ mm}$ 左右),对流

换热能力最强.

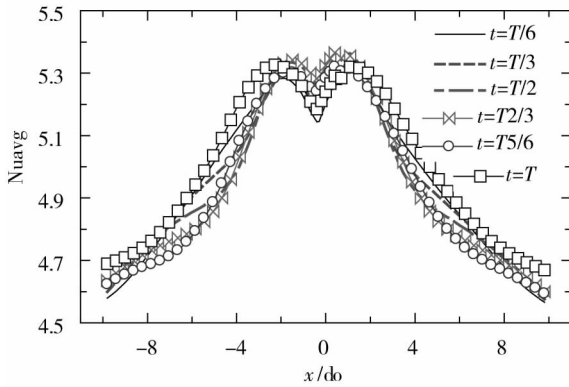


图7 $Z=30$ mm 时一个周期内壁面 Nu 分布图

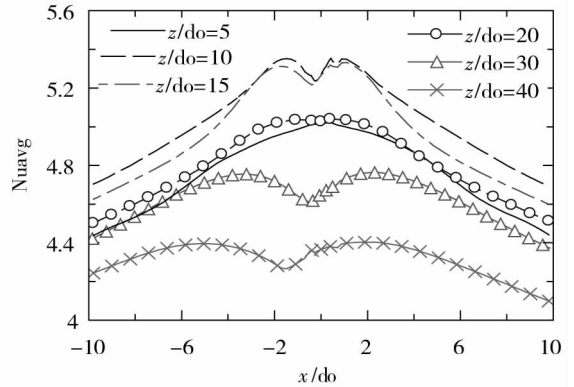


图8 在不同冲击距离时 Nu 分布规律图

3 结论

通过对二维合成射流冲击冷却恒热流加热面进行数值模拟,可以得到如下结论:

1) 激励器在右侧振动膜片的作用下,合成射流产生的喷射气流在喷口中心右边速度稍大于左边速度,形成不对称射流流场;由于涡环破碎卷吸作用,以及涡量的扩散作用,使得射流冲击壁面的速度峰值出现在中心区两侧;

2) 加热板与喷射距离对喷射流流动作用较大,喷射距离小时,加热板阻扰作用下使得气流回流作用很大;而喷射距离大时,加热板阻扰作用下使得气流回流作用较小.合成射流在 x 方向大于 10 mm 距离以后的流体流动特征具有相似性;

3) 合成射流受加热板面的限制以及喷口气流速度峰值发生“偏移”,使得射流冲击换热的 Nu 数形成相应的峰值;随着合成射流冲击距离 Z/d_o 的增大,其对流换热系数出现先增大后减小的变化规律,当冲击距 $Z/d_o = 20 \sim 30$ mm 时冷却效果较佳.

参考文献:

- [1] Yan L, Cordero N, Frank B. Liquid cooling of bright LEDs for automotive applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(6):1239-1244.
- [2] Luo X B, Liu S. A microjet array cooling system for thermal management of high-brightness LEDs[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2007, 30(3):475-484.
- [3] Acikalint T, Garimella S V, Petroski J, et al. Optimal design of miniature piezoelectric fans for cooling light emitting diodes [C]//Proc. 9th Intersociety Conf. Thermal Thermo mechanical Phenomena Electronic Syst, New York, 2004, 1:663-671.
- [4] Smith B L, Glezer A. The Formation and Evolution of Synthetic Jets[J]. Physics of Fluids, 1998, 10(9): 2281-2297.
- [5] Xia Z X, Luo Z B. Physical factors of primary jet vectoring control using synthetic jet actuators[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2007, 28(7): 907-920.
- [6] Cicca G M D, Iuso G. On the near field of an axisymmetric synthetic jet[J]. Fluid Dynamics Research, 2007, 39(9): 673-693.
- [7] Zhang P F, Wang J J, Feng L H. Review on the Zero-Net-Mass-Flux jet and the application in separation flow control [J]. Science in China Series E-Technological Sciences, 2008, 51(9):1315-1344.
- [8] 谭晓著, 张靖周. 自耦合射流冲击冷却的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(4): 646-648.
- [9] San J Y, Shiao W Z. Effects of jet plate size and plate spacing on the stagnation Nusselt number for a confined circular air jet impinging on a flat surface[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2006, 49(19):3477-3486.
- [10] Chaudhari M B, Puranik B, Agrawal A. Heat transfer characteristics of synthetic jet impingement cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(5):1057-1069.
- [11] Pavlova A, Amitay M. Electronic cooling with synthetic jet impingement[J]. International Journal Heat Transfer, 2006, 128(9): 897-907.
- [12] Utturkar Y, Holman R, Mittal R, et al. Formation criterion for synthetic jets[C]. AIAA, 2005, 43(10): 2110-2116.
- [13] 罗振兵, 夏智勋, 胡建新. 相邻激励器合成射流流场数值模拟及机理研究[J]. 空气动力学报, 2004, 22(1): 53-59.
- [14] Yang L Y, Du X Z, Yang Y P. Space characteristics of the thermal performance for air-cooled condensers at ambient winds [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54: 3109-3119.
- [15] 罗振兵. 合成射流/合成双射流机理及其在射流矢量控制和微泵中的应用研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2006.
- [16] 顾蕴松, 明晓. 应用 PIV 技术研究“零质量”射流的非定常流场特性[J]. 实验流体力学, 2005, 19(1):83-86.
- [17] Colucci D W, Skanta R. Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1996, 13(1): 71-80.