

基于 FLUENT 的准分子激光器气体流场数值仿真

朱能伟^{1,2} 方晓东¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 利用 ICEM 软件对简化后的准分子激光器气体流道进行二维截面网格划分。基于 realizable $k-\epsilon$ 湍流模型和多参考系 (MRF) 模型, 利用 FLUENT 软件对激光器内部气体流动进行稳态流场仿真, 获得了气体流动速度大小和分布。仿真结果表明, 气体平均流速与风机转速大小呈线性关系, 风机扭矩与风机转速的平方也呈线性关系。采用皮托管实测流速分布并与仿真结果进行对比, 它们之间的一致证实了仿真结果的可靠性。

关键词 激光器; 气体流场; 数值仿真; 气体流道设计

中图分类号 TN248.2; O355

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0901007

FLUENT-Based Numerical Simulation of Gas Flow Field of Excimer Laser

Zhu Nengwei^{1,2} Fang Xiaodong¹

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract With ICEM software, the mesh generation of the two-dimensional cross-section of the simplified gas flow channel of excimer laser is introduced. Based on realizable $k-\epsilon$ model and multiple reference frame (MRF) model, the simulation to the steady-state flow field of gas flowing inside laser with FLUENT software, and the velocity value and its distribution of gas flow are obtained. The simulation results indicate that there exist linear relationships between the average gas flow velocity and the rotational speed of blowers, also between the torsional moment and the square of rotational speed of blowers. The gas flow velocity distribution measured by a pitot tube is compared with the simulation results, and the consistency between them confirms the validity of the latter.

Key words lasers; gas flow field; numerical simulation; design of gas flow circuit

OCIS codes 140.2180; 140.7240

1 引 言

准分子激光器作为气体激光器, 其内部工作气体的放电、循环、冷却、净化等环节是影响准分子激光器性能指标的重要因素。在准分子激光器内部, 与气体放电和气体循环相关的结构包括激光腔体、贯流式风机、风道结构、放电电极等。受化学反应、电极和腔体材料的放电产物等的影响, 激光器放电区域会产生大量热量以及气态和固态的污染物, 因此需要及时更换电极间放电区域的工作气体, 以避免对下一个脉冲产生不良影响^[1-2]。贯流式风机利用合理的风道将激光腔内的工作气体传送到激光放电区域, 通过循环保证激光正常工作^[3]。激光放电区域的工作气体流速大小及其均匀性直接影响工作气体的均匀放电和激光的输出功率^[4-6]。目前, 6 kHz 高重复频率准分子激光器放电区域的工作气体流速高达 45 m/s^[7]。为满足放电出光要求, 需要合理地设计工作气体的循环流道和风机^[8]。一般采用模仿或经验改进等方法对激光器进行设计,

收稿日期: 2016-04-25; **收到修改稿日期:** 2016-06-08

作者简介: 朱能伟(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事准分子激光器结构方面的研究。E-mail: znwei@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 方晓东(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事准分子激光技术及应用方面的研究。

E-mail: xdfang@aiofm.ac.cn(通信联系人)

不仅成本高而且研究周期长。随着计算机技术的发展,出现了用于流体仿真的专业软件,给激光器设计提供了极大的方便。然而,目前国内外对准分子激光器内部气体流场数值仿真的相关研究鲜有报道。

本文基于一台 10 W 准分子激光器,利用 ICEM 软件对其进行网格划分。通过皮托管实测电极间的气体流速,并与三种湍流模型仿真结果进行对比。选择 FLUENT 软件中的 *realizable k-ε* 湍流模型对激光器内部流场进行二维数值仿真计算,通过电极之间气体流量变化来判断计算是否收敛,最终得到了电极间平均流速和驱动风机所需的扭矩与转速及工作气体气压的关系。

2 准分子激光器工作气体流场仿真

2.1 流体仿真的模型参数

准分子激光器无进、出口边界条件,流道轮廓为固定的壁面边界条件,风机轮廓为旋转的壁面边界条件,转速为 2800 r/min。风机外径为 103 mm,内径为 80 mm,长度为 500 mm,叶片数为 27。两电极间最短距离为 22 mm。在进行流体仿真时使用以下三个假设:

- 1) 等温条件;
- 2) 当转速小于 50 m/s 时,工作气体介质是不可压缩的;
- 3) 氙气为工作气体的主要成分,当温度为 21.1 °C、气压为 300 kPa 时,其密度为 2.508 kg/m³,动力粘度设为 3.15×10⁻⁵ Pa·s。

2.2 网格划分方法

进行计算流体力学分析的第一步是划分网格。其主要思想为:将空间连线的计算区域分割成足够小的计算区域,然后在每一计算区域里应用流体控制方程,求解所有区域的流体计算方程,最终获得整个计算区域的物理量分布^[9]。

准分子激光器结构如图 1(a)所示。在划分网格之前,删除与流体运动无关的线,抽取与流道相关的线条,简化激光器模型。确保每条线都是无重复和无重叠的,所有的线都有对应的封闭面,并将风机中心调整为坐标系的原点。考虑风机是旋转的,在风机叶片内外插入两个圆,将激光器分成三个计算域。

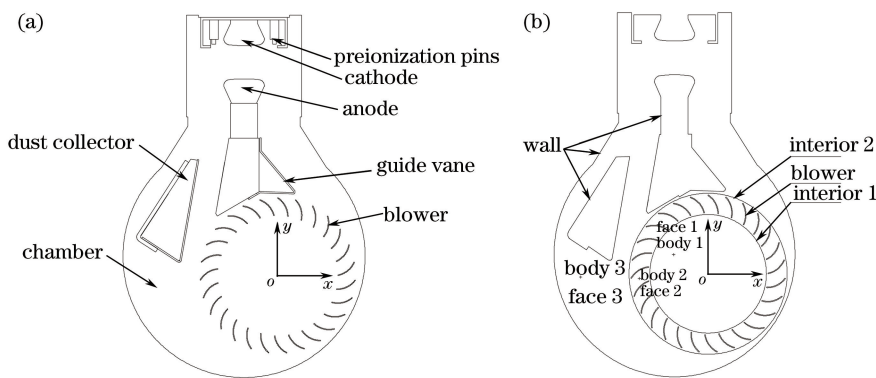


图 1 (a) 简化前的准分子激光器结构; (b) 简化后的准分子激光器 PART 定义

Fig. 1 (a) Structure of excimer laser before simplifying; (b) PART definitions of excimer laser after simplifying

在 ANSYS ICEM 软件中导入模型,选择 Simple Surface 创建面功能,通过 From 2-4 Curves 方法,选择所有线创建面,只要满足封闭条件的线都可创建一个独立面。以创建 PART 形式选择三个面,分别为风机内流区 face 1、叶片旋转区 face 2、叶片外流区 face 3,这三个面为气体流动的区域。删除以上三个面之外的其他面和线,通过拓扑构建功能重新构建三个面的轮廓线。以创建 PART 形式选择 face 1 和 face 2 的交界线为两面数据传递边界 interior 1,选择 face 2 和 face 3 的交界线为两面数据传递边界 interior 2,选择风机轮廓所有线为边界 blower,除以上线外的所有线为边界 wall。分别在三个 face 面内创建 body,用来表示非结构网格划分的三个不同计算域。简化后准分子激光器内部定义结果如图 1(b)所示。

设置第一层为四边形网格,网格边长为 0.1 mm。其他层全部为三角形网格,最大边长为 0.5 mm,边长增长率为 1.5。生成的网格局部效果图如图 2 所示。

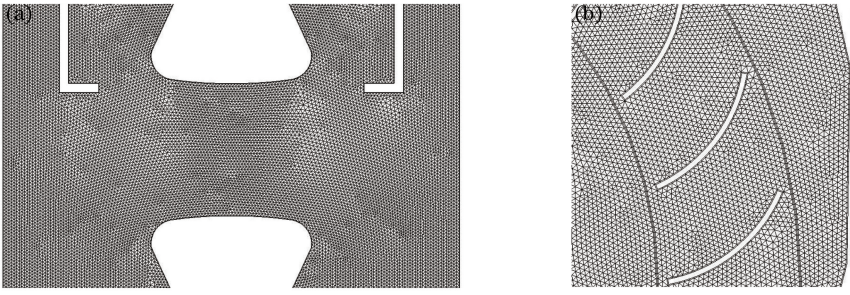


图 2 局部计算网格。(a) 电极之间；(b) 风机叶片

Fig. 2 Local computation mesh. (a) Between electrodes; (b) blower blade

2.3 激光器内部流场仿真

流体三维可压非定常的控制方程和状态方程为^[10]

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

x 动量方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad } u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u, \quad (2)$$

y 动量方程

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad } v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v, \quad (3)$$

z 动量方程

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad } w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w, \quad (4)$$

能量方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho T \mathbf{u}) = \text{div}\left(\frac{k}{c} \text{grad } T\right) + S_T, \quad (5)$$

状态方程

$$p = p(\rho, T), \quad (6)$$

式中 ρ 为流场流体的密度； $\mathbf{u} = u\mathbf{x} + v\mathbf{y} + w\mathbf{z}$ ， u, v, w 分别为 x, y, z 方向上的速度分量； p 为流场的压力； S_u, S_v, S_w 为动量守恒方程的广义源项； T 为流场的温度； k 和 c 分别为流体的导热系数和比热容； μ 为动力粘度； S_T 为流体的内热源及由于粘性作用流体机械能转换为热能的部分。

在准分子激光器二维风道流场仿真中，需要对上述方程进行合理简化。在等温条件下，无需求解能量方程和状态方程；工作气体介质是不可压缩的，则密度不变且广义源项为零；风道结构在风机轴向上具有一致性，风道简化为二维流场计算，无需求解 z 动量方程。故上述方程可以简化为

连续方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (7)$$

x 动量方程

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} \right] = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (8)$$

y 动量方程

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} \right] = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y}. \quad (9)$$

利用 FLUENT 对(7)~(9)式进行求解，从而获得准分子激光器内部的流场。在求解过程中，采用多参

考系模型(MRF)对激光器内部流场进行稳态仿真,分别采用 standard $k-\epsilon$ 湍流模型、RNG $k-\epsilon$ 湍流模型和 realizable $k-\epsilon$ 湍流模型进行仿真计算。

图 3(a)所示为连续方程残差、 x 动量方程残差、 y 动量方程残差、 $k-\epsilon$ 湍流模型的动能能量(k)残差及其动能耗散率(ϵ)残差分别随迭代次数的变化曲线。由图可知,残差收敛精度难以同时达到 10^{-5} ,无法用来判断迭代计算是否收敛。考虑到激光器工作气体在腔体内部循环必然有一个相对稳定的状态,在该状态下流过电极之间的气体流量保持不变,因此可以通过监视流过电极之间的气体流量来判断计算是否达到收敛。进行 800 次迭代计算,若流过电极之间的气体流量在这个过程中的变化小于 0.3%,则认为计算达到收敛。在 Surface Monitors 中创建放电区域中心线,并设置中心线的气体流量作为监视参数。设置迭代次数为 2500 次,收敛结果如图 3(b)所示。

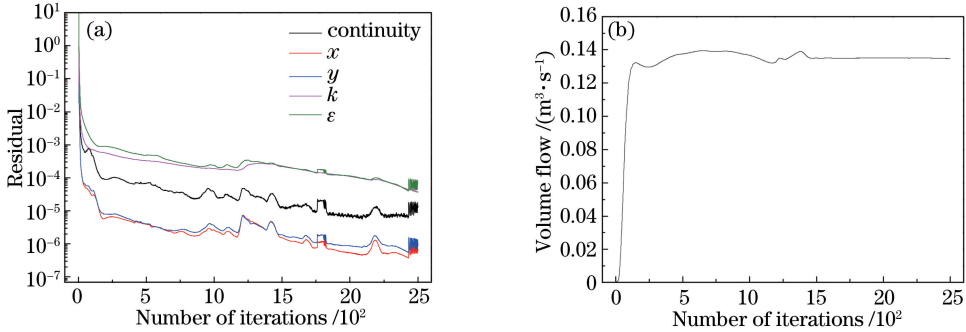


图 3 收敛评估。(a) 残差; (b) 电极间的气体流量

Fig. 3 Convergence estimation. (a) Residual; (b) volumetric flow between electrodes

3 仿真结果与讨论

3.1 固定风机转速下流速分布的仿真结果及实验验证

以空气为气体介质,当风机转速为 2800 r/min 时,准分子激光器腔体内部的速度云图仿真结果如图 4(a)所示。在图中可以找到代表贯流式风机特点的漩涡,空气介质经过风机加速后流向电极放电区,然后分两路流回风机,最终完成一个循环。仿真结果显示,在 2800 r/min 风机转速下,电极放电中心最高流速为 19.2 m/s;空气介质通过电极放电中心的平均流速为 12.3 m/s;阳极电极表面流速存在微弱逆流,如图 4(b)所示。

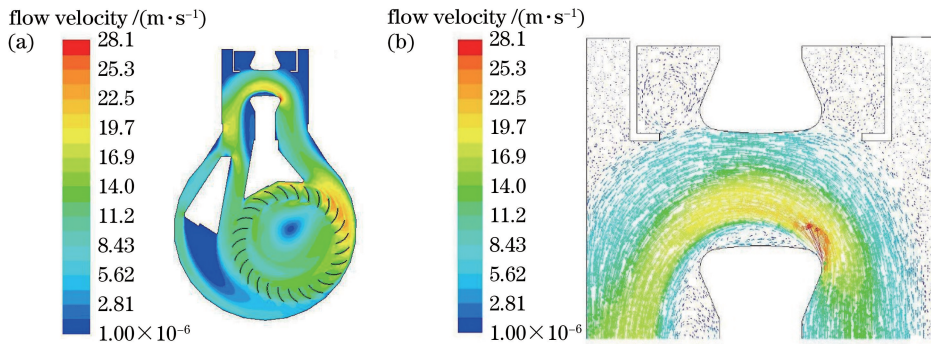


图 4 (a) 腔内的气体速度云图; (b) 电极间的气体流速矢量图

Fig. 4 (a) Cloud map of velocity of gas inside chamber; (b) vector graph of gas flow velocity between electrodes

将皮托管探头伸入电极放电区域,测得电极放电中心最高流速为 17.2 m/s。图 5 所示为三种不同模型下放电电极中心线之间的流速与实测流速的分布,从图中可以看出 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型和 realizable $k-\epsilon$ 湍流模型均出现负速度,与实测速度的趋势一致。由于皮托管的直径为 4 mm,电极间距为 22 mm,皮托管占 18.2%的流动空间,其测量结果必然存在一定误差。考虑 realizable $k-\epsilon$ 模型与实测速度分布的趋势最接近,认为该模型最符合实测结果。

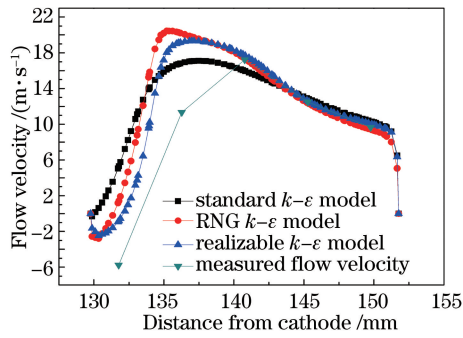


图 5 电极间的气体速度分布

Fig. 5 Velocity distribution of gas between electrodes

3.2 风机转速变化对放电电极之间的工作气体流速的影响

风机设计中,模型和原型只要满足几何相似、运动相似和动力相似,就存在相似定律^[11]。由风机的相似定律可知,随着风机转速的线性增加,放电中心的流速也线性增加。当气压为 300 kPa 时,以氦气为流体介质,电极之间的气体平均流速和风机所受扭矩与转速的关系如图 6 所示。仿真结果显示,准分子激光器电极间的工作气体平均流速随风机转速的增加而线性增加,风机扭矩与风机转速的二次方呈线性关系。

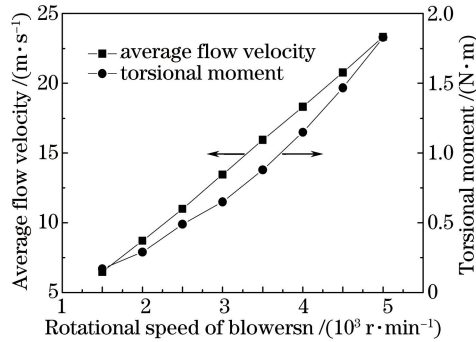


图 6 电极间气体平均流速和风机扭矩随转速的变化

Fig. 6 Variations of average flow velocity of gas between electrodes and torsional moment of blowers with rotational speed

3.3 工作气体气压对风机所受的力矩和电极之间的工作气体平均流速的影响

由于准分子激光器腔体内部是封闭的,工作气体的密度与气压成正比例关系。在固定转速 2800 r/min、以氦气为流体介质的情况下,通过改变工作气体密度来对腔内流体进行仿真计算,结果如图 7 所示。从图中可以看出,风机所受的力矩与气压呈线性关系。随着气压的增大,放电电极之间的工作气体平均流速趋于 13.3 m/s。

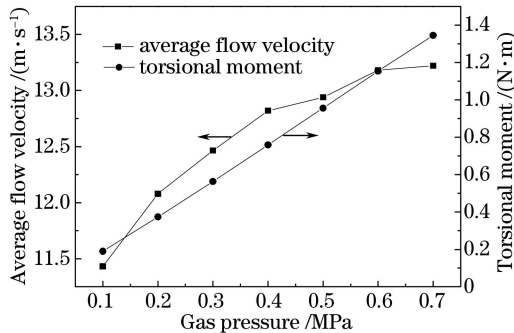


图 7 电极间的气体平均流速和风机扭矩与气压的变化

Fig. 7 Variations of average flow velocity of gas between electrodes and torsional moment of blowers with gas pressure

3.4 气体循环流道优化设计

仿真和实验采用的 10 W 准分子激光器的工作频率为 30 Hz,属于低频激光器,因此对放电电极间的气体流速的要求不高。从仿真结果可以看到,阳极电极表面流速存在微弱的逆流,电极间流速分布不均匀。在不影响电极放电电场下,对气体循环流道部分的弧度进行优化设计,并仿真计算腔内流速分布,其速度云图如图 8 所示。从图中可以看出,优化后的流道更加顺畅,流阻更小,电极间的小漩涡消失,电极间的流速分布更加均匀。在同样的转速下,获得的电极间平均流速是优化前的 1.6 倍。优化后的流道为实现更高重复频率放电和更高出光功率输出提供了可能。

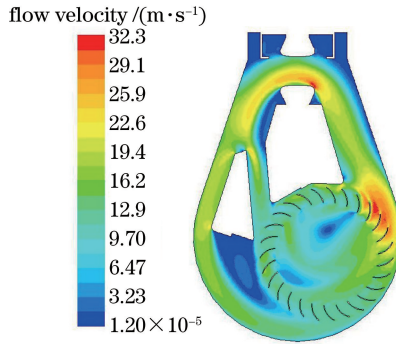


图 8 循环流道优化后的速度云图

Fig. 8 Cloud map of velocity after optimizing gas flow channels

4 结 论

介绍了准分子激光器流场的仿真方法。流场仿真结果直观显示了准分子激光器内部速度分布,该结果可以用来判断电极之间的流速大小及分布是否达到放电要求。数值仿真方法为准分子激光器内部的驱动风机和流道设计提供了一种经济快捷的手段。该仿真模型没有考虑激光器实际运行时温度变化和气体的可压缩性对流场的影响,因此其结果与实际结果存在一定差异。

参 考 文 献

- Amada Y, Steiger T D, Ujazdowski R C. Cross-flow fan impeller for a transversely excited, pulsed, gas discharge laser: US8814522B2[P]. 2014-08-26.
- Tusshima H, Katsuumi H, Ikeda H, *et al.* Extremely-long life and low-cost 193 nm excimer laser chamber technology for 450 mm wafer multi-patterning lithography[C]. SPIE, 2014, 9052: 90521E.
- Matsunaga T, Enami T, Kakizaki K, *et al.* Extreme high NA, high throughput scanner compatible 4 kHz KrF excimer laser for DUV lithography[C]. SPIE, 2001, 4346: 1617-1626.
- Oh C, Fleurov V B, Hofmann T, *et al.* Production-ready 4 kHz ArF laser for 193 nm lithography[C]. SPIE, 2002, 4691: 1752-1760.
- Tanaka S, Tsushima H, Nakaike T, *et al.* GT40A: Durable 45 W ArF injection-lock laser light source for dry/immersion lithography[C]. SPIE, 2006, 6154: 61542O.
- Kakizaki K, Sasaki Y, Inoue T, *et al.* High-repetition-rate (6 kHz) and long-pulse-duration (50 ns) ArF excimer laser for sub-65 nm lithography[J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(3): 035109.
- Hori T, Ishihara T, Kakizaki K. Excimer laser device operable at high repetition rate and having high band-narrowing efficiency: US7782922B2[P]. 2010-08-24.
- Yu Yinshan, You Libing, Liang Xu, *et al.* Progress of excimer lasers technology[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2253-2270.
余吟山, 游利兵, 梁 勛, 等. 准分子激光技术发展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2253-2270.
- Hu Kun, Li Zhenbei. Engineering examples of ANSYS ICEM CFD[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2014: 38-39.
胡 坤, 李振北. ANSYS ICEM CFD 工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 38-39.
- Wang Fujun. Analysis of computational fluid dynamics: Theory and application of CFD[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 7-11.
王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 7-11.
- He Chuan, Guo Lijun. Pumps and Fans[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 82-85.
何 川, 郭立军. 泵与风机[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 82-85.