

# The Application and Confidence Level Test of Automotive Aerodynamics Based on LBM on PC

Yao Li, Yuming Peng

Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan  
Email: 136703765@qq.com

Received: Dec. 5<sup>th</sup>, 2017; accepted: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2017; published: Dec. 29<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

With the promotion of LBM, many users thought this method took up too many computer resources, and its reliability and feasibility on PC need to be verified. Based on LBM and FVM, this paper has calculated the typical vehicle aerodynamics, and compared the calculation process, the results, computer resources and computing time. The results showed that we can successfully make LBM computation on PC. Lattice distribution had a great influence on the calculation results. Flow field results show that the lattice Boltzmann method has the same calculation accuracy as finite volume method, and it has more advantages than finite volume method in some aspects.

## Keywords

Aerodynamics, Lattice Boltzmann Method, FVM, Aerodynamic Drag

---

# PC上基于LBM的汽车空气动力学应用和置信度检验

李 尧, 彭宇明

西南交通大学, 四川 成都  
Email: 136703765@qq.com

收稿日期: 2017年12月5日; 录用日期: 2017年12月22日; 发布日期: 2017年12月29日

---

## 摘 要

随着LBM的不断推广, 众多的使用者认为该方法占用过多计算机资源, 其置信度和在PC上的可行性也有

待验证。本文分别采用LBM和有限体积法计算了典型的汽车空气动力学问题, 对比了两种方法的计算流程、结果、计算机资源占用和耗时。结果表明, 在PC端上, LBM实现了汽车空气动力学问题的计算, 发现格子的分布情况对计算结果有较大影响。流场结果表明, LBM与有限体积法的计算精度相当, 在有些方面比有限体积法更有优势。

## 关键词

空气动力学, 格子玻尔兹曼方法, 有限体积法, 气动阻力

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在汽车空气动力学的 CFD 应用中, 目前最普遍的方法依然是采用离散的纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程的算法。作为流体力学的基石, 纳维 - 斯托克斯方程已存在了一个多世纪, 在通常尺度下, 人们对此方程的物理可靠性及准确性并不持有异议[1]。但是在有些物理现象, 比如紊流[2], 由于计算机能力的限制, 直接求解纳维 - 斯托克斯方程, 即采用直接模拟(DNS)往往不能实现。这类物理现象一般必须加入各种物理近似假设。

上世纪 80 年代末, 格子玻尔兹曼方法(Lattice Boltzmann Method)问世[3], 计算流体力学有了新的发展方向。随着 LBM 其理论本质的完善, 又因其物理背景清晰, 易于并行计算、程序易于实现[4] [5]等优点, LBM 逐渐成为一种求解流体动力学问题的功能强大的替代方法。在非平衡统计力学中, Boltzmann 方程描述的是介观层面上的气体状态, 因此和传统的流体力学方程而言, Boltzmann 方程更加贴近物理真实, 因此, LBM 在模拟复杂现象, 例如非牛顿流体、多相流、多孔介质流和燃烧问题等方面[6]比传统的流体力学方程有优势。

相比之前只能在大型计算机上使用的基于 LBM 的软件, 随着 PC 多线程功能日益强大, 现在又有了许多 LBM 工具可以用在多核 PC 机上解决汽车空气动力学的基本分析问题。随着使用者增多, 众多研究者反应 LBM 计算结果差异较大。

在我国, LBM 相关领域的研究起步相对较晚, 相关中文文献比较少, 而且应用方式范围和置信度不如传统 CFD 广泛。原因, 1) 起步晚, 2) 成熟商业软件少 3) 硬件资源消耗大。4) 置信验证少。本文直接采用 LBM 对汽车的空气动力学进行模拟研究, 研究其的可行性及基本的计算过程和方法。通过跟 Fluent 的计算流程、结果、资源占有和计算时间相比较, 判断其的使用范围、优缺点和置信度。本文或许在相关方面能提供参考意见和指导。

## 2. LBM 控制方程

Boltzmann 方程是以动力学和统计学为基础发展而来的。Boltzmann 方程可用以下微分方程[7]描述:

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + c_i \cdot \nabla f_i + \frac{F}{m} \cdot \frac{\partial f_i}{\partial c_i} = \Omega_i(f) \quad (1)$$

方程(1)又称为玻尔兹曼输运方程。其中  $F$  是系统受到的外力。 $f$  是粒子的分布函数, 是位置  $r$ 、速度  $c$  和时间  $t$  的函数。 $\Omega$  称为碰撞算子, 因为碰撞项  $\Omega$  非常复杂, 一般我们引入 BGK [8] 近似碰撞算子模型,

这个碰撞算子表示为

$$\Omega_i(f) = \omega(f_i^{\text{eq}} - f_i) = \frac{1}{\tau}(f_i^{\text{eq}} - f_i) \quad (2)$$

其中,  $\omega = 1/\tau$ 。系数  $\omega$  称为碰撞频率,  $\tau$  称为松弛因子。局部平衡分布函数由  $f^{\text{eq}}$  表示。可以证明, 给定适当的粒子平衡态分布函数  $f^{\text{eq}}$  后, 可以通过玻尔兹曼方程推导出 NS 方程。因此, 式(1)可以代替计算流体动力学中的 NS 方程。上述方程与宏观量密度( $\rho$ )、速度( $u$ )和内能( $e$ )的关系可以表示为

$$\rho(r,t) = \int m f(r,c,t) dc \quad (3)$$

$$\rho(r,t)u(r,t) = \int m c f(r,c,t) dc \quad (4)$$

$$\rho(r,t)e(r,t) = \frac{1}{2} \int m(c-u)^2 f(r,c,t) dc \quad (5)$$

### 3. 数值计算方案

#### 3.1. 几何模型

分别用 FVM 和 LBM 两种方法模拟汽车外流场。计算用的是某车型的整车模型, 模型去除了后视镜、进气孔道和雨刮器。车灯、门把手凹陷处及轮胎都保留下来, 模型为全封闭几何体。LBM 对模型要求低, 需要是一个封闭的壳体。而 FVM 对模型要求高, 为了照顾网格质量和计算资源, 将车身上的一些凹陷处和曲率小的地方处理掉。

#### 3.2. LBM 数值仿真

应用基于格子 boltzmaan 方法(LBM)的商业软件 Xflow 的虚拟风洞模式对流场进行数值计算, PC 处理器为双核四线程的 i5-4590。图 1 为计算区域。仿真工况为 60 km/h, 90 km/h, 120 km/h。

表 1 为每个工况仿真次数及其格子尺度。汽车前端面是速度入口  $v = 25 \text{ m/s}$ , 后端为压力出口, 地面为移动壁面。湍流模型选用 Wall-Adapting Local Eddy [9] (WALE)粘性模型, 这里采用自适应格子划分技术, 当汽车周身和尾流的湍流发展时, Xflow 能在初始格子分布的基础上自动划分格子。

#### 3.3. FVM 数值仿真

利用 Fluent 软件, 针对以上介绍的 LBM, 结合壁面函数法, 采用结构体和非结构体结合的混合网格, 对同一模型进行仿真, 计算区域如图 1。各个边界条件参数如表 2。利用 Fluent 软件, 针对以上介绍的

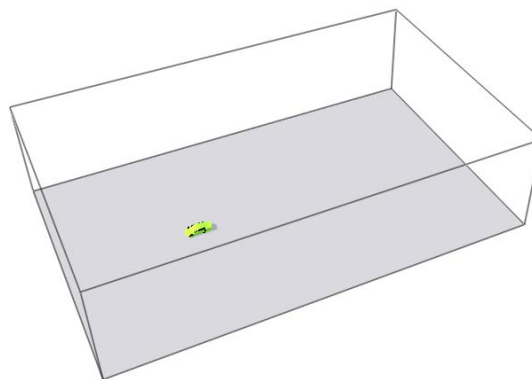


Figure 1. Computational domain of CFD  
图 1. CFD 计算区域

**Table 1.** The number of simulation times and lattice scale of each operating condition**表 1.** 每个工况仿真次数及其格子尺度

	全局解析尺度(m)	车身近壁面细化解析尺度(m)	尾流细化解析尺度(m)	初始格子数量
1	0.8	0.05	0.05	301,782
2	0.8	0.025	0.05	700,138
3	0.5	0.03125	0.03125	992,429
4	0.6	0.01875	0.0375	1,311,641
5	0.8	0.0125	0.0125	2,184,183

**Table 2.** Boundary conditions of computational domain**表 2.** 计算区域边界条件

区域	入口	出口	侧边和顶部	地面
边界条件	速度入口, $v = 60 \text{ km/h}$ , $90 \text{ km/h}$ , $120 \text{ km/h}$	压力出口, gauge pressure 为 $0 \text{ pa}$	对称边界条件	移动壁面, 无边界层

LBM, 结合壁面函数法, 采用结构体和非结构体结合的混合网格, 对同一模型进行仿真, 计算区域如图 1。各个边界条件参数如表 2。

## 4. 计算结果分析

### 4.1. 汽车外流场分析

从图 2 中我们可以看到在车的前端, 远方的来流由于受到车的阻挡, 气流逐渐降低, 气流的动压转化为静压, 因此在汽车前端形成正压区。这股气流在车头前部分为两部分, 一部分流向汽车的顶部, 一部分流向汽车的底部。气流在汽车表面出现加速和减速的现象, 因此, 在车体表面一些特殊地方产生正压或者负压区, 这些区域就是气动阻力、升力和侧向力的主要来源。从两种方法的计算云图中可以发现, LBM 计算的车后尾流中的涡流清晰可见, 更加真实的反应湍流的发展过程。

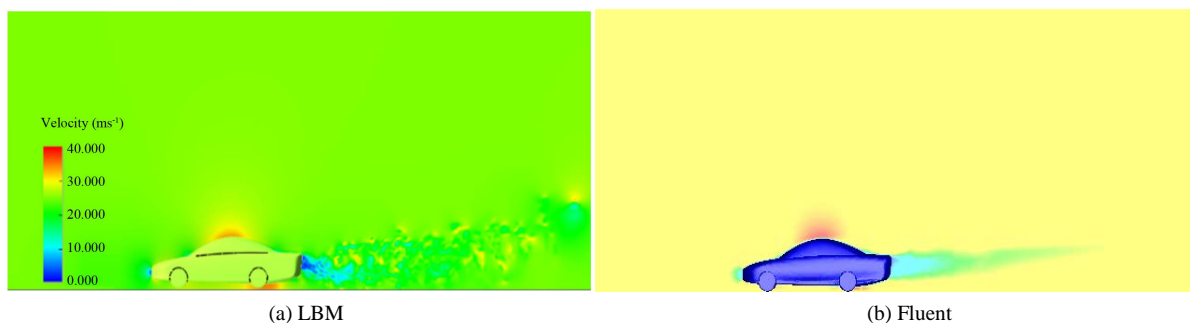
流向上方的气流按照图 3 所示的曲线在车身表面变化, 其中曲线的两个转折点分别是汽车前后玻璃与车厢的连接处, 在这个地方, 由于曲率半径较小, 气流来不及转折, 出现局部气流分离, 形成涡流区, 从压力图上看, 这两个点还是正压区, 这是由于气流前进路径上车身的阻挡。在车顶处出现气流速度极大值和负压极值(分别见图 3(a)的凸点和图 3(b)的凹点)。流向车身底部的气流, 由于气流通道狭窄, 气流速度依然较快, 所以理论上车身地面仍然是负压区, 图 3(b)的曲线证明车身底部绝大部分是负压区, 而且气流在经过后轮地方时, 由于截面积突然的减小, 气流的流速变大, 出现负压极值(见图 3(b)凹处)。

从图 4 中可以看出车尾尾流中有很长一段拖曳涡, 而且是向上卷曲, 这是由于流过顶面气流的速度大于底部气流(图 4(a)所示), 因而上面压强小, 下面压强大, 形成上卷漩涡。在这个区域, 大量的能量耗散, 形成低压区, 引起压差阻力。

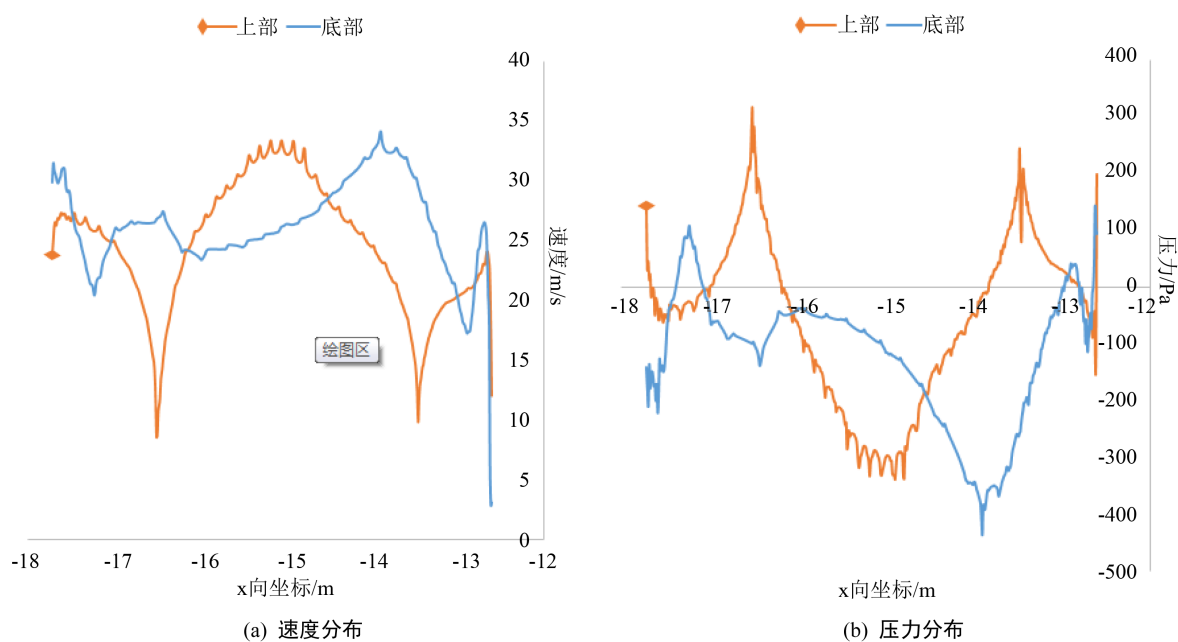
### 4.2. 两种计算方案的计算结果对比分析

图 5 为在  $90 \text{ km/h}$  工况下两种方法计算出来的气动阻力值的对比。可以明显的看出, 不同的格子单元数量计算出的阻力值有明显的差异, 其中格子数量最多的计算值和 Fluent 计算出来的非常接近, 而且随着初始格子数量的增加, 越接近 Fluent 计算值。

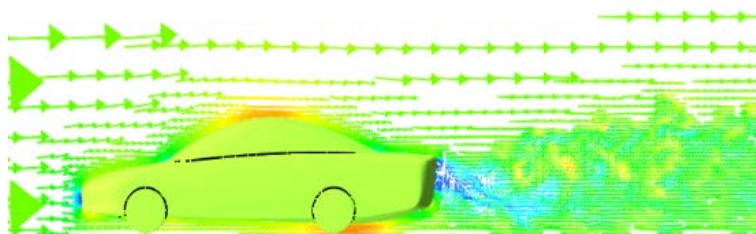
图 5 中 Fluent 计算的趋势线相比 Xflow 的平滑很多, 这是因为, FVM 的计算采用了所谓的时均方程加紊流模型, 将瞬时变量在时间域上进行平均, 再加上不可压缩的空气模型, 使得曲线变得光滑。而 LBM



**Figure 2.** Velocity distribution clouds of symmetrical surface  
**图 2.** 对称面速度分布云图



**Figure 3.** Velocity and pressure distribution of upper and lower surface computed by LBM  
**图 3.** LBM 对称面汽车上下表面速度压力分布



**Figure 4.** Velocity vector of symmetrical surface  
**图 4.** 对称面速度矢量图

采用的是 LES 方法, 从方程(4)可以看出, LBM 中空气的密度是跟粒子的分布函数有关, 所以, 空气的密度不是常数, 因此曲线具有波动性。LBM 能实时的模拟湍流。

对于汽车或飞机的设计而言, 除了空气作用形成的各个力和相应的力矩外, 我们也关心空气所造成的其他多问题, 例如, 物体的气动噪音。噪音的大小往往也当做车型或机型的性能指标, 而决定这些的

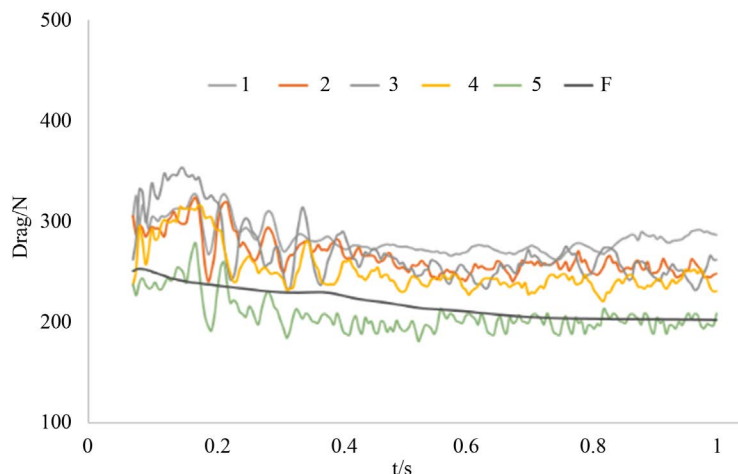


Figure 5. Contrast of drags  
图 5. 气动阻力值对比

重要指标的因素许多来自某些关键部位的几何形状, 而流体对这些细小的几何变化敏感性和耦合性决定了用简化几何形状的途径来近似是不可靠的。LBM 一方面不需要简化模型, 又能实时的模拟湍流, 因而在计算脉动压力和气动声学上有天然的优势。

取最后 0.3s 内的计算值计算平均气动阻力系数  $C_d$ , 绘制表 3, 并与 Fluent 计算值比较误差(Fluent 为网格数量)。

从表 3 可以看出, 当格子单元数量相差较大时, 有较大的误差, 最大误差甚至可以达到 56.1%, 随着单元数量的增加, 格子 boltzmann 方法的计算精度增加, 与 FVM 计算的最小误差为 2.56%, 说明格子 boltzmann 方法有着与主流的有限体积方法相当的计算精度。由于汽车模型没有后视镜, 车身上的一些凹凸处处理掉, 车轮光滑没有旋转, 而且模型与地面有一定的间隙, 使得数值计算出来的气动阻力系数比较小。从图 6 可以看出, LBM 无论是在低速还是高速区, 都有比较好的准确性和稳定性。

### 4.3. LBM 格子无关性分析

和 FVM 的网格无关性分析一样, LBM 的格子无关性分析也是判断计算结果的正确性指标。数值计算在 90 km/h 工况下进行, 计算采用的格子数和阻力系数如表 4。

这里计算采用的是格子数不变的方法。对于初始格子数 200 万的仿真, 计算中最终格子数可以达到 3000 万之多, 因此对比分析中的结果是有一定的可信度的。

### 4.4. 两种计算方案的耗费资源的对比

表 5 给出了格子 Boltzmann 方法与 FVM 对内存的占有和计算时间, 相比 Fluent 而言, Xflow 在计算上的用时跨度很大, 主要因为 LBM 计算采用的是 LES 方法。

在两种方案中用到的两个软件 Xflow 和 Fluent, 相比较而言, 基于格子 Boltzmann 方法的 Xflow 在计算耗时上在达到同样计算精度的前提下, 耗时长了很多, 对硬件要求高, 结果文件要占用很大的空间, 对于大型的仿真计算不是一般人能用的。由于结果文件详细, 中间计算包含所有的流场信息, 所以在一些偶然的断电情况下, Xflow 能实现断电续算, 这点是 Fluent 不能具备的。

## 5. 结论

1) 计算结果可以看出, 格子 boltzmann 方法与有限体积法的计算精度相当。在气动阻力系数的分析

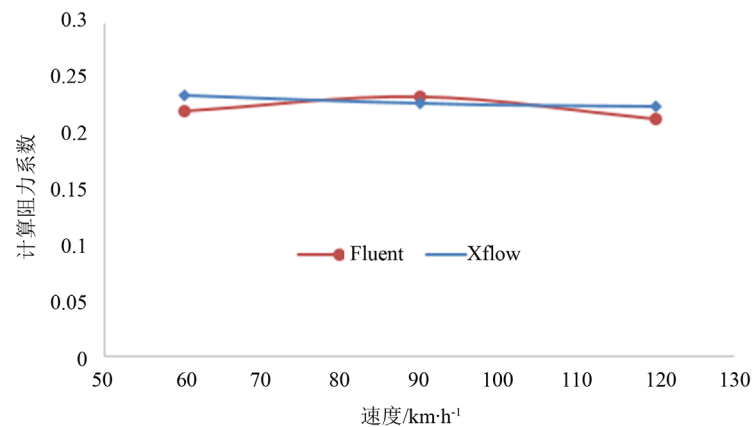


Figure 6. Computation resistance coefficient

图 6. 计算阻力系数

Table 3. Error of each operating condition

表 3. 各工况下计算误差

		1	2	3	4	5	F	
初始格子数量		301,782	700,138	992,429	1,311,641	2,184,183	2,901,331	
工况及误差	60	$C_d$	0.326	0.298	0.316	0.263	0.236	0.221
		误差	47.5%	34.8%	42.9%	19.0%	6.79%	-----
	90	$C_d$	0.323	0.295	0.297	0.277	0.228	0.234
		误差	38.0%	26.0%	26.9%	18.4%	2.56%	-----
	120	$C_d$	0.334	0.305	0.285	0.263	0.226	0.214
		误差	56.1%	42.5%	33.2%	22.9%	5.6%	-----

Table 4. Lattice independence computation of LBM

表 4. LBM 格子无关性计算

格子数	13,931,464	17,824,374	21,014,263	34,015,643	48,435,279
$C_d$	0.287	0.271	0.234	0.227	0.227

Table 5. The Contrast of resources consume between LBM and FVM

表 5. LBM 和 FVM 耗费资源的对比

	线程数(CPUs)	内存占有量(GB)	计算时间(h)
1	4	1.2	1.0
2	4	2.7	10.7
3	4	2.1	4.1
4	4	5.9	25.5
5	4	3.8	35
F	4	9.5	6.4

中, 与 Fluent 的计算值相比, LBM 最大误差为 6.79%, 最小误差为 2.56%, 说明用格子 Boltzmann 方法计算空气动力学无论在低速还是高速区, 都有比较好的准确性。只要格子数足够多, 计算出的后紊流区

特征更清晰, 对车后流场分析有好处。

2) LBM 对于瞬态, 低马赫数, 湍流特征强烈等条件下的流体问题, 计算结果的稳定性较好。LBM 一方面不需要简化模型, 又能实时的模拟湍流, 因而在计算脉动压力和气动声学上有天然的优势。

3) 相比于 FVM, LBM 对计算机资源耗用率高, 内存硬盘占用空间大, 计算时间较长, 但是断电续算功能对于大型计算来说是不可忽视的优点。

4) 于实现精确 LBM 计算, 有如下几点经验: a) 车身周围和尾流区格子解析度对计算结果的影响非常大, 解析度越小越好。b) 流场尽可能大。

## 基金项目

国家自然科学基金(51475387)。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈耀松, 单肖文, 陈沪东. 计算流体力学的新方向及其在工业上的应用[J]. 中国科学: 技术科学, 2007, 37(9): 1107-1116.
- [2] 李人宪. 有限体积法基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [3] 王一伟, 王洋, 安亦然, 等. 基于 LBM 方法的高速列车空气动力学计算[J]. 中国科学: 技术科学, 2008, 38(11): 1795-1804.
- [4] 葛钦钦. 基于格子 Boltzmann 理论的流场分析[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [5] 李红群, 史冬岩, 王志凯, 等. 不同壁面绕流特性的格子 Boltzmann 模拟研究[J]. 计算力学学报, 2017, 34(2): 219-225.
- [6] Girimaji, S. (2011) Lattice Boltzmann Method: Fundamentals and Engineering Applications with Computer Codes. *AIAA Journal*, 51.
- [7] Lekkerkerker, H.N.W., Poon, C.K., Pusey, P.N., *et al.* (1996) Lattice BGK Models for Navier-Stokes Equation. *Europhysics Letters*, 6, 479-484.
- [8] 杨红兵. 三圆柱绕流问题的格子 Boltzmann 方法研究[D]: [硕士学位论文]. 金华: 浙江师范大学, 2011.
- [9] Liu, M., Chen, X.P. and Kannan, N.P. (2012) Comparative Study of the Large Eddy Simulations with the Lattice Boltzmann Method Using the Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity and Vreman Subgrid Scale Models. *Chinese Physics Letters*, 29, 104706-104710.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2167-6631, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [met@hanspub.org](mailto:met@hanspub.org)