

液压直角管路压力波动特性计算与试验对比研究

陆 浩, 徐 璁, 周毅博

(中国航发控制系统研究所, 江苏无锡 214063)

摘要:为了探索液压直角管路内部的瞬态流动特征,熟悉压力波动特性的形成机理,采用大涡模拟方法对某型活门出口处 1 段直角管路进行数值模拟,捕捉局部涡旋结构的动态特性,并与粒子图像测速和激光多普勒测速试验结果进行对比。结果表明:大涡模拟方法能精确模拟直角管路内部的瞬态速度场,与试验结果吻合较好;在直角拐弯处存在明显的涡旋脱落现象,同时伴随着涡旋诱导的局部低压区域尺度与位置变化,从而导致压力波动问题的产生。

关键词: 直角管路; 压力波动; 大涡模拟; 试验; 航空发动机

中图分类号: V233.2

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.06.009

Comparative Study on Calculation and Test of Pressure Fluctuation Characteristics of Hydraulic Right-angle Pipeline

LU Hao, XU Cong, ZHOU Yi-bo

(AECC Control System Institute, Wuxi Jiangsu 214063, China)

Abstract: In order to explore the transient flow characteristics inside the hydraulic right-angle pipeline and the formation mechanism of pressure fluctuation, a large-eddy simulation method was used to a right-angle pipeline at a valve outlet. Dynamic characteristics of local vortex structure was caught and compared with the results of the velocity measurement test of particle image and laser Doppler. The results show that the large-eddy simulation method can accurately simulate the transient velocity field in the right-angle pipeline, which is in good agreement with the test results. There is obvious vortex shedding at the right-angle corner, accompanied by the variation of local low pressure regional scale and position induced by vortex, which leads to the problem of pressure fluctuation.

Key words: right-angle pipeline; pressure fluctuation; large-eddy simulation; test; aeroengine

0 引言

燃油计量装置是航空发动机控制系统的重要组成部分,主要由计量、压差、回油、定压、增压等活门组成,各活门间通过内部管路实现压力传递及流量输送,精确供给发动机所需燃油。在实际工况下燃油泵、活门运动以及管路流态等效应,一般通过系统阻尼以燃油压力波动的形式存在,直接影响着液压系统的工作稳定性,困扰燃油计量装置的整个研制过程。航空发动机性能的提升,对控制系统提出更高要求,燃油计量装置趋向小型化、高压、大流量,使得压力波动的影响更为明显,是目前液压领域亟需解决的难题。

合理的液压管路设计能有效降低压力波动水平^[1],包括管路通径、截面形状以及管路之间过渡形式等的设计。受加工工艺和结构布局等的限制,直角管路仍是常见的管路过渡形式,其内部二次流及分离涡的存在给设计端的精确预测带来较大困难^[2-5]。随着设计水平的提高及仿真、验证技术的进展,直角管路内部的流动特性逐渐受到重视,被认为是影响液压流场稳定性的关键因素,并对此开展大量研究工作。在数值仿真方面,曹娇坤等^[6]采用有限体积法研究了矩形截面微通道直角收缩弯道局部流场及压力损失机理,得出弯道压力损失系数与雷诺数及进、出口截面面积比的关系;赖奇璋等^[7]建立了液压系统 1 维仿真模型,分析液

收稿日期:2018-09-05 基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:陆浩(1989),男,硕士,工程师,从事航空发动机液压机械装置总体结构设计及优化工作;E-mail:824768826@qq.com。

引用格式:陆浩,徐璁,周毅博. 液压直角管路压力波动特性计算与试验对比研究[J]. Aeroengine, 2019, 45(6): 51-55. LU Hao, XU Cong, ZHOU Yibo. Comparative study on calculation and test of pressure fluctuation characteristics of hydraulic right-angle pipeline [J]. Aeroengine, 2019, 45(6): 51-55.

压管路的压力波动特性,认为对管路长度和内径组合进行优化设计能使压力波动的降幅在 50% 以上;王建兴等^[8]对旋流雾化喷嘴中的细小直角弯管流动场进行 3 维数值模拟,获得流道内的压力分布和不同截面的迪恩涡结构;林义忠等^[9]针对典型直角弯管结构,采用 k-e 湍流模型对其内流场进行数值仿真,并分析了工艺孔容腔及偏心距对管道流场的影响;Aoyama T 等^[10]对空气静压导轨内的直角过渡区域进行数值分析,认为其内流场中涡旋运动的存在将导致结构振动。在试验验证方面,近年来粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, PIV) 和激光多普勒测速(Laser Doppler Velocimetry, LDV) 等非接触测量技术逐渐成熟,已被广泛应用于液压管道类小尺度内流场的研究。胡建军等^[11]利用 PIV 对液压集成块典型的直角转弯流道结构开展可视化测量研究,分析了进、出口相对位置等对流动液流特性的影响;李杰等^[12]利用 LDV 对 3 维弯管的流动进行测量,并与稳态数值模拟结果进行对比,流场数据吻合较好。

液压直角管路流动特性的研究热点主要集中在直角管路内流场的稳态特性方面,采用基于雷诺平均 N-S 方程(Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS)的时均流场开展相关分析,而涉及压力波动的液压直角管路设计是典型的非定常问题,关键在于对瞬态流动特征的精确预测。为此,本文采用大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)方法^[13-15]对某型活门出口处的直角管路内流场进行仿真计算,捕捉局部涡区的动态特性,并结合 PIV、LDV 等测量技术进行验证,为后续液压管路布局提供可靠的数据支撑。

1 数值模型

1.1 计算域及网格

本文的研究对象为 1 段方转圆截面的直角过渡管路,外形轮廓及进、出口方向的 3 维计算域如图 1(a)所示。根据截面形状变化共分为 4 个区域,区域 1、2 考虑了管接头和安装孔的特征,与试验模型保持一致,截面直径分别为 10、28 mm;区域 3 为 17 mm × 12 mm 的矩形直管,长 55 mm;区域 4 为圆形直管,直径为 14 mm,长 84 mm。

对直角管路内流场进行非结构网格划分及生成,如图 1(b)所示。为了提高数值计算的准确性,在壁面处进行网格加密,以保证计算的 $y^+ \approx 1$,从而有效捕捉

近壁面的流动结构,提高计算精度,总网格量约为 400 万。

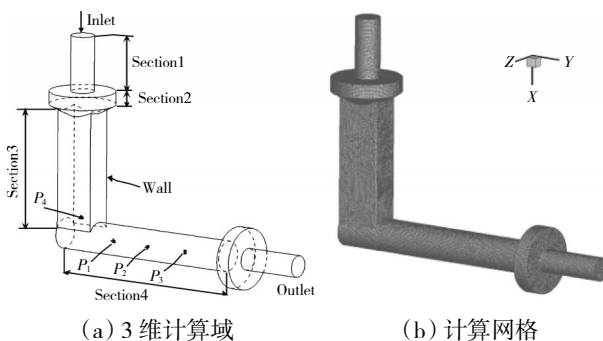


图 1 3 维计算域及网格

1.2 计算方法

因为直接数值模拟(Direct Numerical Simulation, DNS)对计算机的需求远远超过可实现的范畴,所以 N-S 方程表征的湍流运动在绝大多数情况下(大范围的时间及空间尺度)无法通过 DNS 求解。为此需要对 N-S 方程进行平均处理。应用范围最广的平均处理方法是 RANS,也是目前工程设计中常用的计算方法,但是其中所有的湍流结构均被消除,速度和压力场经平均处理后呈光滑过渡的分布态势。

LES 方法把湍流中的大尺度涡旋和小尺度涡旋分开处理,大尺度涡旋直接通过 N-S 方程求解,小尺度涡旋则通过亚网格尺度模型,建立与大尺度涡旋的关系对其进行模拟。LES 方法需要利用滤波函数对连续方程和动量方程进行一定滤波处理。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式中: u_i 为速度; x_i 为坐标。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中: t 为时间; u_j 为速度; p 为压力; ρ 为密度; μ 为动力黏度; τ_{ij} 为亚格子剪切应力。

对于亚格子尺度模型,采用 Boussinesq 假设

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

式中: μ_t 为亚格子湍流黏性系数; $\bar{S}_{ij}$ 为求解尺度下的应变张量分量。

采用涡黏 Smagorinsky 模型

$$\mu_t = (c \Delta)^2 \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right]^{0.5} \quad (4)$$

本文采用 LES 方法对直角管路内流场开展数值

模拟研究。与试验条件一致,对水介质流场进行仿真分析,密度为 998.2 kg/m^3 ,动力黏性系数为 $0.001 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。计算中进口采用质量流量进口边界,出口采用压力出口边界,壁面为无滑移绝热壁面。

2 试验研究

为了研究实际工况下直角管路内部的详细流动特征,设计了全尺寸透明有机玻璃模型,试验件结构如图2所示。由于PIV及LDV要求流动介质透光性好,同时流动介质与示踪粒子的密度应尽可能一致,保证较好的跟随性,因此折中考虑,选择常用的空心玻璃珠作为示踪粒子,并以与燃油动力黏性系数相近的水为介质开展相关试验。其中空心玻璃珠直径约为 $20\sim 60 \mu\text{m}$,密度为 $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

试验中采用Lavision公司的高频PIV系统,如图3所示。通过合适的光路布置,可以有效地捕捉2维平面上的流动状态,其中Cmos相机的空间分辨率为 $(1280 \times 800) \text{ PPI}$ 。在PIV测量过程中,采集频率设置为 1000 Hz ,不同位置处的速度场是坐标 x, y 和时间的函数,即 $v(x, y, t)$,采用时均方法处理得到的时均流场表示为

$$\bar{v}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v(x, y, t_0 + i\Delta t) \quad (5)$$

为了获得管路内流场的湍流脉动信息,采用Dantec Dynamics公司的Flow Explorer LDV系统进行测量分析,使用红光和红外光测速。其中红光波长为 660 nm ,红外光波长为 785 nm ,激光焦距为 500 mm 。试验中采用非协同模式采集数据,数据率为 1 kHz 以上,以保证湍流测量的要求。在试验过程中,只对管路的矩形段进行LDV测量,沿其中心线每隔 3 mm 测1组速度数据。



图2 试验件结构

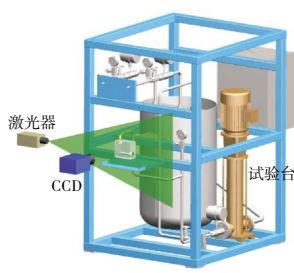


图3 PIV测量系统

3 结果分析

在进口流量为 3000 L/h 、出口压力为 101325 Pa

时,采用LES方法计算所得 xoy 截面速度与PIV试验的对比如图4所示。对比图4(a)、(b)可见,采用LES方法可以有效地捕捉圆形管内的高速流动结构,高速流动区域贴近圆管外侧,且范围与PIV试验结果吻合较好;在矩形段进口处,采用LES方法可以捕捉到由管接头引起的射流结构,射流流速大小略高于PIV结果,该射流结构与圆管内的高速流动结构不连续;此外,在直角拐弯处内侧及外侧均存在低速区。

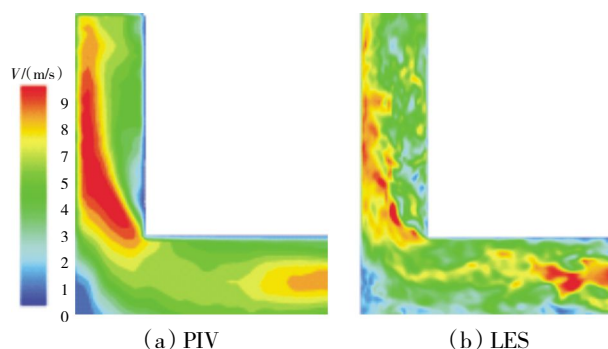


图4 xoy 截面速度对比

采用3种不同方法所得矩形段中心线上的平均速度结果对比如图5所示。从图中可见,LDV和PIV的试验测量结果吻合较好,从矩形段进口开始,平均速度呈下降趋势,直至圆管壁面滞止为0,表明试验结果具有一定的置信度;采用LES方法计算所得速度变化趋势和试验结果基本一致,但LES的速度大小略高于试验值。

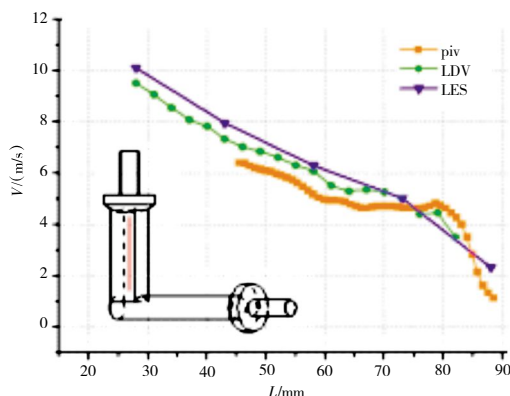


图5 矩形管段沿程速度分布对比

在时间 $t=0.100\sim 0.106 \text{ s}$ 时, xoy 截面速度矢量及静压力分布的变化趋势如图6所示。从图中可见,流动方向的改变使得矩形段流体沿 x 方向的速度降低,静压力逐渐增大;受惯性力的作用,高速流体将冲击到圆管段的右侧壁面,对整体流场形成强剪切作用,将在直角拐弯处形成大尺度涡结构,如图6(a)所示,在虚线框区域存在低速涡旋结构;在矩形段与圆管段

的直角拐弯内侧存在明显的涡旋产生和脱落过程,随着时间的推进,近壁处的涡逐渐向下游推移,并且其形状及尺度也逐渐发生变化,大尺度涡旋开始向小尺度涡转变,并最终由于流体黏性完全耗散;最小静压力出现在涡旋的中心,且涡旋脱落现象伴随着低压区域的尺度与位置变化,影响流场的压力稳定性。3维计算域内详细的静压力分布随时间的变化趋势如图7所示。

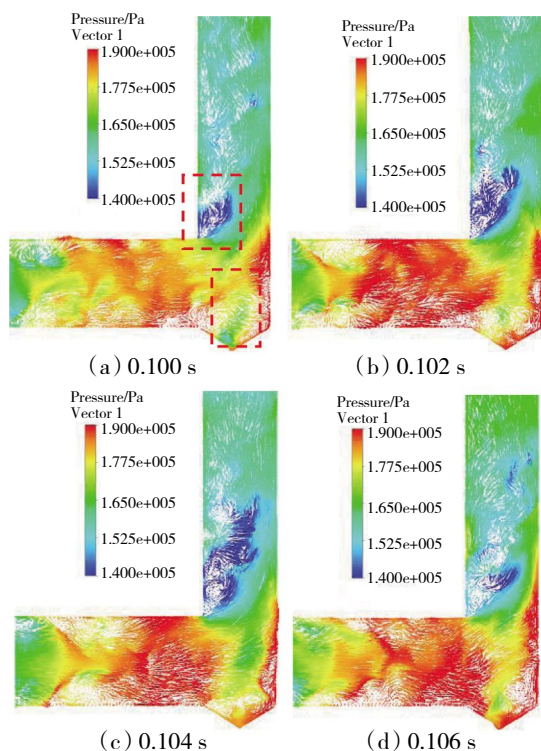


图6 xoy 截面瞬时速度矢量及静压力分布

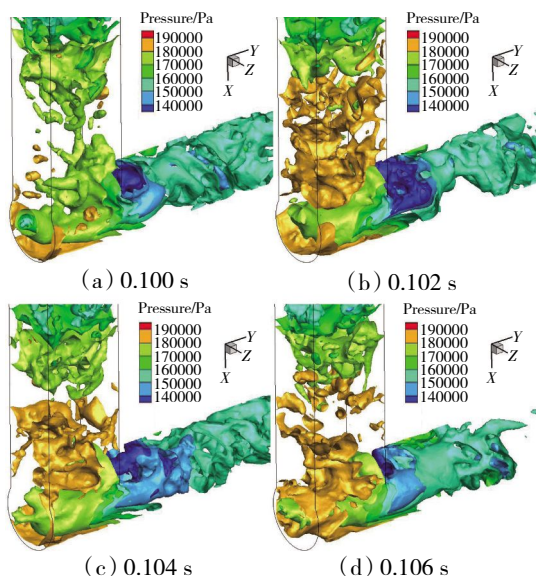


图7 瞬时静压力等值面

不同进口流量下采用 LDV 和 LES 2 种不同方法所得 P_4 点 x 方向速度随时间变化的对比如图8所示。 P_4 点距离矩形段进口约 48 mm, 其中 y 轴表征瞬时速度 v 与时均速度 v_a 之差。从图中可见, LES 方法计算结果基本能反映 x 方向瞬时速度的真实变化范围, 与 LDV 测量结果吻合较好, 随着进口流量的减小, x 方向瞬时速度的变化区间逐渐减小, 表明湍流脉动水平逐渐降低。在进口流量为 3000 L/h 时 LES 计算所得圆管中心线上 P_1 、 P_2 、 P_3 3 个不同位置点的静压力随时间的变化趋势如图9所示。相对位置如图1(a)所示, P_1 点靠近直角拐弯处的涡旋中心, P_1 、 P_2 、 P_3 点相互间隔 20 mm。受涡旋结构发展的影响, P_1 点静压力重复出现低谷, 最大压力波动幅值达到 40 kPa; 越往下游涡旋影响越小, 平均静压力逐渐升高, 压力波动幅值逐渐减小。

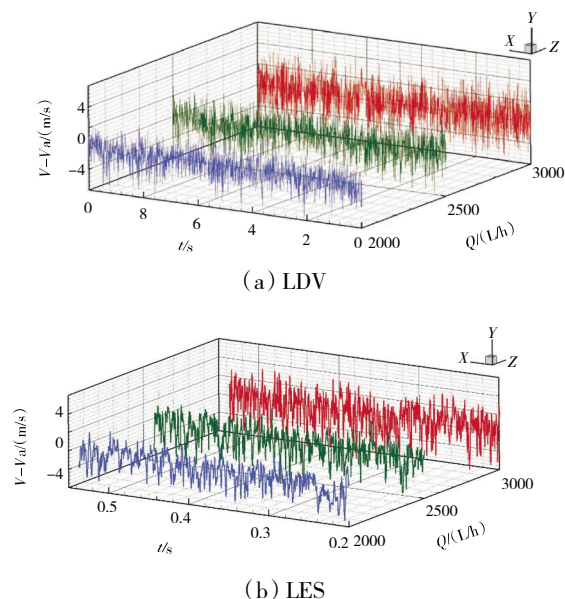


图8 不同流量下 P_4 点 x 方向速度随时间变化对比

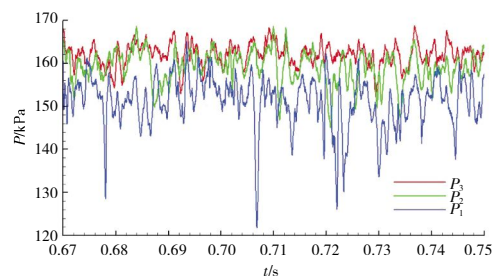


图9 各测点静压力随时间变化对比

综上分析可知, 直角管路内部存在明显的涡旋脱落现象, 伴随着局部低压区域的周期性发展过程, 导致压力波动问题的产生, 对液压流场类近似不可压的流动介质, 局部的扰动将在全场范围内传递, 影响管

路前、后活门的正常工作,具体的影响机理还需开展深入研究。

4 结论

本文采用 LES 方法对 1 段方转圆直角管路内流场的压力波动特性开展了数值模拟研究,分析了局部涡旋结构的瞬态变化特征,并结合 PIV、LDV 等非接触测量技术进行验证,得到如下结论:

(1) LES 方法对直角管路内部的瞬态速度场有较好的捕捉能力,与试验结果吻合较好,可以为前端设计提供数据支撑;

(2) 矩形管段与圆管段的直角拐弯处存在明显的涡旋产生和脱落过程,伴随着局部低压区域的尺度与位置变化,导致压力波动问题的产生。

参考文献:

- [1] 杜润. 液压系统脉动衰减器的特性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
DU Run. The characteristic analysis of pulsation dampers in hydraulic systems[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [2] William Y, Benny K. Experimental investigation of dilute turbulent particulate flow inside a curved 90° bend [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(11): 3593–3601.
- [3] Sudo K, Sumida M. Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend[J]. Experiments in Fluids, 1998, 25(1): 42–49.
- [4] 李杜, 杨策. 带 90° 弯管的离心压气机进口畸变数值研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(11): 2556–2563.
LI Du, YANG Ce. Numerical simulation on inlet distortion of centrifugal compressor with 90° bent pipe [J]. Journal Aerospace Power, 2010, 25(11): 2556–2563. (in Chinese)
- [5] 谢龙, 靳思宇. 阀体后 90° 圆形弯管内部流场 PIV 测量及 POD 分析[J]. 试验流体力学, 2012, 26(3): 21–25.
XIE Long, JIN Siyu. PIV measurement and POD analysis of inner flow field in 90° bending duct of circular-section with fore-end valve[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(3): 21–25. (in Chinese)
- [6] 曹娇坤, 丁水汀. 微通道直角突缩弯道气流阻特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(7): 885–889.

- CAO Jiaokun, DING Shuiting. Pressure losses in gas flow through sudden contractive sharp bends in micro channels[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(7): 885–889. (in Chinese)
- [7] 赖奇璋, 巫世晶. 基于 AMESim 的特高压断路器管道系统压力波动[J]. 中国机械工程, 2015, 26(7): 859–863.
LAI Qiwei, WU Shijing. Analysis of pressure fluctuation in UHV breaker hydraulic pipeline based on AMESim [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(7): 859–863. (in Chinese)
- [8] 汪建兴, 王海民. 细小直角弯管流道的压力损失及迪恩涡特性[J]. 流体机械, 2017, 45(3): 33–37.
WANG Jianxing, WANG Haiming. Pressure loss and characteristics of dean vortices in small right-angle bend flow channel [J]. Fluid Machinery, 2017, 45(3): 33–37. (in Chinese)
- [9] 林义忠. 液压集成块典型转弯孔道流场仿真分析 [J]. 机床与液压, 2012, 40(5): 134–137.
LIN Yizhong. Simulation and analysis of flow field of typical turning channel inside hydraulic manifold block [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(5): 134–137. (in Chinese)
- [10] Aoyama T, Kakinuma Y. Numerical and experimental analysis for the small vibration of aerostatic guideways [J]. Annals of the CIRP, 2006, 55(1): 419–422.
- [11] 胡建军, 孔祥东. 刀尖角容腔对直角转弯流道液流特性影响的 PIV 试验研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(7): 943–948.
HU Jianjun, KONG Xiangdong. Experimental investigation of flow characteristics of right-angle turn with different tool included cavity using PIV technique [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(7): 943–948. (in Chinese)
- [12] 李杰, 郝鹏飞. 弯管流动的非均匀性及其整流[J]. 机械工程学报, 2002, 38(12): 146–148.
LI Jie, HAO Pengfei. Inhomogeneous effect of the flow in a curved pipe and the homogenization of the flow[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(12): 146–148. (in Chinese)
- [13] Fureby C, Alin N. Large-eddy simulation of high-reynolds-number wall-bounded flows[J]. AIAA Journal, 2004, 42(3): 457–468.
- [14] Druault P, Lardeau S. Generation of three-dimensional turbulent inlet condition for large-eddy simulation [J]. AIAA Journal, 2004, 42(3): 447–456.
- [15] Sagaut P, Garnier E. Turbulent inflow conditions for large-eddy simulation of compressible wall-bounded flows [J]. AIAA Journal, 2004, 42(3): 469–477.

(编辑: 刘 静)