

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.002

# 基于特征矢量的汽油机缸内气流运动特性研究\*

侯圣智<sup>1</sup> 吕永<sup>1</sup> 詹樟松<sup>2</sup> 刘斌<sup>2</sup> 张巍<sup>1</sup> 于勇<sup>1</sup>

(1. 天津大学内燃机研究所, 天津 300072; 2. 重庆长安汽车股份有限公司, 重庆 400020)

**【摘要】** 运用基于双特征角的气道稳流测试系统,对四气门电喷汽油机缸内不同测试平面内的气流运动进行了试验、分析及评价。引入特征矢量的概念,利用缸内滚流运动矢量轨迹图及不同气门升程下发动机缸内气流运动特征矢量表,分析了缸内不同气流运动形式的气流强度、作用平面、矢量方向,宏观地反映了缸内气体流场的运动特性及分布规律。在发动机进气系统的优化过程中,为组织缸内气流最优化作用区域及适当强度的气流运动,改善汽油机性能提供了新的方法和全面的数据依据。

**关键词:** 汽油机 气道稳流测试系统 特征矢量 气流运动

**中图分类号:** TK411.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0005-05

## Eigenvector-based Research on In-cylinder Flow Field of Gasoline Engines

Hou Shengzhi<sup>1</sup> Lü Yong<sup>1</sup> Zhan Zhangsong<sup>2</sup> Liu Bin<sup>2</sup> Zhang Wei<sup>1</sup> Yu Yong<sup>1</sup>

(1. Internal Combustion Engine Research Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2. Chongqing Chang An Automobile Co., Ltd., Chongqing 400020, China)

### Abstract

A novel double eigen angle-based steady-state flow test rig to comprehensively investigate port generated air flow inside a 4-valve EFI gasoline engine cylinder head was developed. The concept of eigenvector was introduced and the eigenvector path of the in-cylinder tumble flow was protracted; besides, the eigenvector table under different valve lifts in the dummy cylinder was shown to get a macroscopical reflection of the intensity, the tested plane, the vector direction and the distribution of the inclined swirl. In the process of the optimizing the intake system of the engine, a new methodology and comprehensive data basis were provided to organize the optimization the regional and the strength of the appropriate in-cylinder air movement, and improve the performance of the engine.

**Key words** Gasoline engines, Steady-state flow rig, Eigenvector, Air motion

### 引言

发动机缸内的气流运动是三维、非定常、伴随传热和摩擦等现象的可压缩气流运动,影响点火以及火焰传播速度,进而影响发动机的动力性、经济性和排放性能,而发动机进气道的气体流动特性会在很大程度上决定缸内气流运动情况<sup>[1]</sup>。为获得良好的混合物质量和高燃烧率,进气道需要组织新鲜充量运动所需要的宏观结构,即缸内大尺度气流运动,如涡流和滚流等。目前,发动机缸内气流运动的

测量主要采用气道稳流试验台,该测量技术一般通过测量置于发动机气缸内的叶轮转速来间接地反映气缸内空气流动的强度及状态。相对于微观测量方法,如激光粒子图像速度场测量仪(PIV)、激光多普勒测速法(LDA)等<sup>[2]</sup>,采用气道稳流试验台仅能从宏观上反映进气道的性能,而不能揭示其微观气流运动状况,但其原理简单、经济性良好、实际应用中效率较高,故本文研究采用基于双特征角的气道稳流测试平台对发动机缸内气流运动加以研究。

收稿日期:2011-05-20 修回日期:2011-06-29

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2008AA11A114)

作者简介:侯圣智,工程师,博士,主要从事发动机工作过程控制与优化研究,E-mail: houshengzhi@tju.edu.cn

## 1 进气道流动特性的评价方法

发动机进气道流通能力及其产生缸内涡流、滚流、斜轴滚流是评价进气道设计的主要指标。发动机缸内气流运动评价一般采用 Ricardo 评价方法,即固定模拟气缸真空度,计算不同进气门升程对应的无量纲气流强度  $N_r$  和流量系数  $C_F$ ,积分得到平均涡流比  $R_s$ ,从而评价进气道性能<sup>[3]</sup>。

由于本文所采用的测试平台能够对发动机缸内任意测试平面内的气流运动进行测量<sup>[3]</sup>,为统一评价标准,基于 Ricardo 评价方法并统一算法,采用无量纲气流运动参数  $Q$  对发动机缸内各个不同测试平面内的气流强度进行评价:

速度头

$$V_0 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

无量纲流量系数

$$C_F = \frac{Q}{mAV_0} \quad (2)$$

无量纲气流强度

$$N_r = \frac{nB}{V_0} \quad (3)$$

式中  $\Delta p$ ——气道压差  $\rho$ ——空气密度  
 $Q$ ——进气流量  $n$ ——叶轮转速  
 $m$ ——气门数  $B$ ——气缸直径  
 $A$ ——气门座圈内径面积

基于式(1)~(3),无量纲气流运动参数为

$$Q = \frac{L_D \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_F(\alpha) N_r(\alpha) d\alpha}{\left[ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_F(\alpha) d\alpha \right]^2} \quad (4)$$

式中  $\alpha_1, \alpha_2$ ——气门开启、关闭时的曲轴转角  
 $L_D$ ——发动机形状因子

## 2 测试平台

采用的测试平台是自行设计的基于双特征角的新颖气道稳流测试系统,结构如图1所示。测试平台的测控系统基于 LabVIEW 软件平台研制而成,主要完成对执行电动机、变频器等的控制和对叶轮转速、气门升程等信号的采集;并完成对数据的显示、计算及存储等。相比于国内外传统气道稳流试验

台,该系统能够对缸内任意测试平面内的气流运动强度和矢量方向进行测量,能够较全面、准确地宏观反映缸内气流运动的真实情况<sup>[4]</sup>。其基本核心部件及工作原理如图2所示。

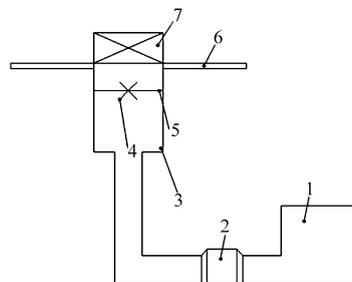


图1 气道稳流试验台结构示意图

Fig. 1 Schematic of the steady-state flow test rig

1. 风机 2. 热线风速仪 3. 模拟气缸 4. 叶轮 5. 叶轮支承轴  
6. 支承板 7. 待测缸头

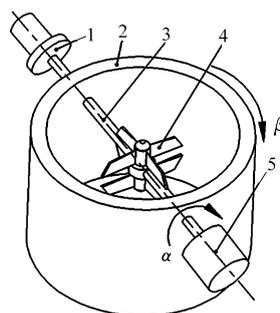


图2 试验平台核心部件结构

Fig. 2 Key components and the schematic of the test rig

1. 角度传感器 2. 模拟气缸 3. 叶轮支承轴 4. 叶轮 5. 驱动电动机

特征角  $\beta$  为模拟气缸绕气缸轴线所旋转的角度,代表通过模拟气缸轴线与叶轮支承轴的测试平面,叶轮轴与气缸盖进、排气门连线平行时  $\beta$  为  $0^\circ$ ;特征角  $\alpha$  为叶轮绕支承轴的转角,代表缸内每个测试平面内的矢量平面,即不同的  $\alpha$  代表缸内不同的气流运动形式(例如  $\alpha = 0^\circ$  时代表涡流,而  $\alpha = 90^\circ$  则代表滚流),在试验平台中叶轮转角由驱动电动机控制。气缸内任意测试平面及矢量平面内的气体流动状态可以通过两个特征角的设定来测量,并基于无量纲气流运动参数  $Q$  全面地反映缸内气流的运动状态。

本文基础样机为一款气道优化后的四气门四缸水冷四冲程气道喷射汽油发动机,发动机基本参数见表1。

表1 发动机技术参数

Tab. 1 Technical parameters of the engine

参数	发动机 排量/L	缸径 /mm	活塞 行程/mm	压缩比	最大进气 门升程/mm	进气门座 圈内径/mm	怠速转速 /r·min <sup>-1</sup>	标定转速 /r·min <sup>-1</sup>
数值	1.998	86	86	10	10	33.1	700~800	6000

### 3 特征向量的引入

为了更好地理解发动机缸内的气流运动形式,引入特征矢量  $N$  的概念,其大小为无量纲气流运动参数  $Q$ ,方向垂直于不同测试平面内的矢量平面。采用矢量合成的方法,将代表不同气流运动形式的各测试平面内相同  $\alpha$  角矢量平面的特征矢量  $N$  进行合成,从而得到不同气门升程  $L$  条件下特定气流运动形式的特征矢量的大小及其所处测试平面  $\beta$ ,表示为  $N_{\alpha}(L, Q, \beta)$ 。该特征向量反映了不同气门升程下,特定气流运动形式的强度大小及其所处测试平面。

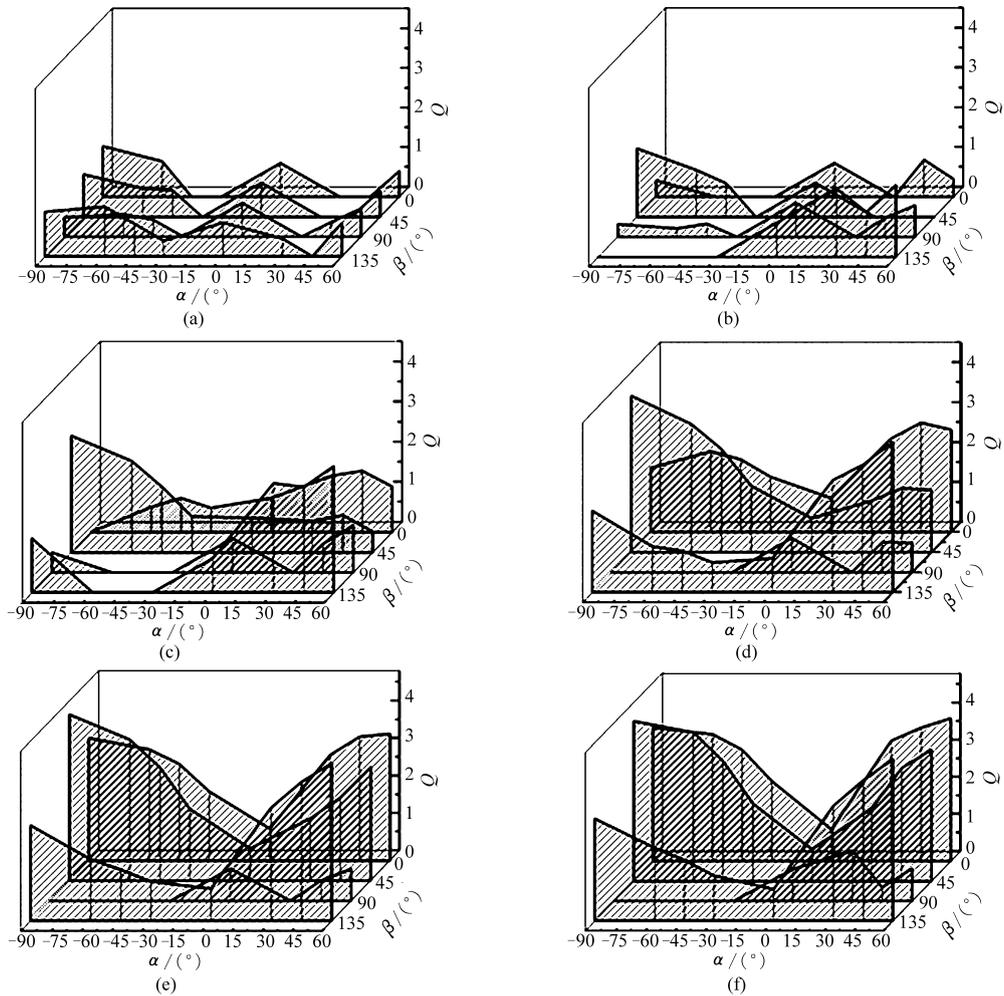


图3 不同气门升程下,发动机缸内不同测试平面内的气流运动参数变化特性

Fig.3 Change characteristic of the parameters in different test planes under different valve lifts

(a)  $L=5$  mm (b)  $L=6$  mm (c)  $L=7$  mm (d)  $L=8$  mm (e)  $L=9$  mm (f)  $L=10$  mm

6 mm)条件下,各测试平面内的气流运动强度普遍较弱,且随着升程的变化各测试平面内气流运动强度波动随矢量平面的变化相对高升程而言很小,气流运动较为稳定。在高气门升程( $L$ 为7、8、9、10 mm)条件下,不同测试平面内的气流运动强度相对于低升程而言增加趋势明显,且随着升程的增加,缸内气流运动逐渐呈现出一定的规律:不同测试平

### 4 试验结果分析

对于发动机缸内气流运动特性,小气门升程情况下的气门座区域对缸内气流运动的影响要超过进气道形状对其的影响<sup>[1]</sup>。因此,在试验结果分析中气门升程初始值选择为5 mm。基于本试验平台,在不同气门升程下通过设定特征角  $\alpha$ 、 $\beta$ ,获得了气缸内任意测试平面及矢量平面组内的气流运动参数,宏观地描述了缸内气流运动特性。图3所示为不同气门升程下,发动机缸内不同测试平面内的气流运动参数变化特性。

分析图3相关曲线可知,在低气门升程( $L$ 为5、

面内的气流运动强度随着气门升程的变化均呈现出相近的变化趋势,并且随着气门升程增加缸内滚流运动强度逐渐增大,而涡流运动强度变化不大。由以上分析可知,该发动机气道优化后的性能较好,即随着气门升程的变化,缸内气流运动形式由较弱气流运动均衡分布向以强滚流、弱涡流的趋势变化。该发动机低升程下较弱的缸内气流运动有利于提高

进气流量系数,提供足够的新鲜充量;而高升程下以强滚流为主提高了发动机的火焰传播速率,降低了燃烧循环变动,提高了燃烧效率。

如图4a所示的矢量合成方法,通过分布于不同测试平面的滚流运动特征矢量的合成而得到该气门升程下的滚流运动作用测试平面 $\beta(L=8\text{ mm})$ 及特征矢量 $N_{-90^\circ}(8, 5.13, 55^\circ)$ ,以此类推,绘制出如图4b所示的发动机缸内滚流运动随气门升程变化的矢量轨迹图。由滚流运动特征矢量轨迹图可以看出,该发动机缸盖产生的滚流运动主要集中在 $\beta$ 为 $45^\circ\sim 90^\circ(225^\circ\sim 270^\circ)$ 的测试平面之间,随着气门升程的增加逐渐向 $\beta=47^\circ(227^\circ)$ 的测试平面变化并逐渐稳定。经分析,该汽油机缸内滚流运动区域较为集中,有利于减小发动机工作过程中的循环变动,增强发动机的燃烧及运行的稳定性。

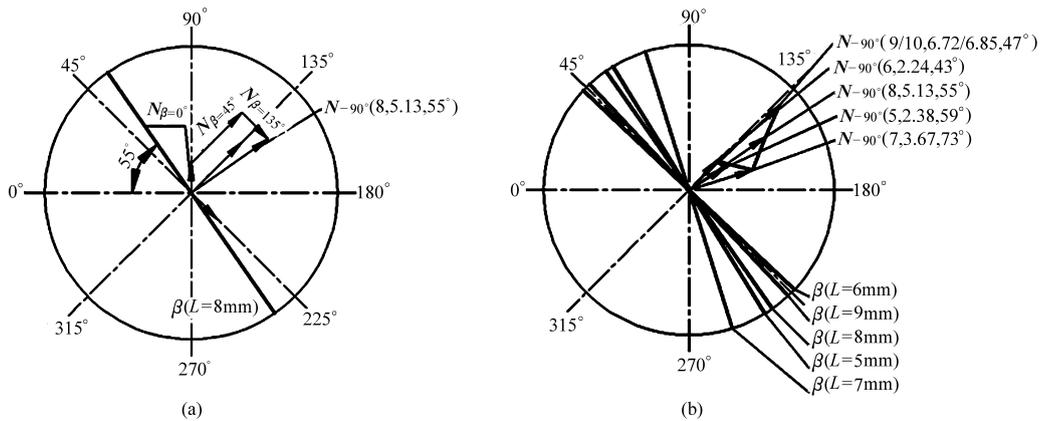


图4 发动机缸内滚流运动特征矢量

Fig. 4 Eigenvectors of the in-cylinder tumble flow

(a)  $L=8\text{ mm}$  时特征矢量合成图 (b) 不同升程下滚流特征矢量轨迹

表2 不同气门升程下发动机缸内气流运动特征向量 $N_\alpha(L, Q, \beta)$ 分布

Tab. 2 Eigenvectors under different valve lifts of the engine

$N_{-90^\circ}(5, 2.38, 59^\circ)$	$N_{-90^\circ}(6, 2.24, 43^\circ)$	$N_{-90^\circ}(7, 3.67, 73^\circ)$	$N_{-90^\circ}(8, 5.13, 55^\circ)$	$N_{-90^\circ}(9, 6.72, 47^\circ)$	$N_{-90^\circ}(10, 6.85, 47^\circ)$
$N_{-45^\circ}(5, 1.48, 99^\circ)$	$N_{-45^\circ}(6, 1.1, 57^\circ)$	$N_{-45^\circ}(7, 2.32, 30^\circ)$	$N_{-45^\circ}(8, 3.88, 41^\circ)$	$N_{-45^\circ}(9, 4.88, 40^\circ)$	$N_{-45^\circ}(10, 5.37, 40^\circ)$
$N_{-30^\circ}(5, 0.4, 135^\circ)$	$N_{-30^\circ}(6, 1.21, 46^\circ)$	$N_{-30^\circ}(7, 1.37, 27^\circ)$	$N_{-30^\circ}(8, 2.65, 40^\circ)$	$N_{-30^\circ}(9, 3.22, 40^\circ)$	$N_{-30^\circ}(10, 3.5, 40^\circ)$
$N_{30^\circ}(5, 0.45, 135^\circ)$	$N_{30^\circ}(6, 1.72, 135^\circ)$	$N_{30^\circ}(7, 1.96, 90^\circ)$	$N_{30^\circ}(8, 3.06, 68^\circ)$	$N_{30^\circ}(9, 3.72, 61^\circ)$	$N_{30^\circ}(10, 5.4, 63^\circ)$
$N_{45^\circ}(5, 0.36, 90^\circ)$	$N_{45^\circ}(6, 1.27, 84^\circ)$	$N_{45^\circ}(7, 3.26, 85^\circ)$	$N_{45^\circ}(8, 4.43, 69^\circ)$	$N_{45^\circ}(9, 5.18, 64^\circ)$	$N_{45^\circ}(10, 5.94, 60^\circ)$

## 5 结论

(1) 此款电喷汽油机优化后的气道对缸内气流运动特性影响较大。不同测试平面内的气流运动强度随着气门升程的变化均呈现出相近的变化趋势,且缸内的气流运动形式由较弱气流运动均衡分布向以强滚流、弱涡流的趋势变化。

(2) 引入特征矢量的概念并绘制出不同气门升程下的缸内滚流运动特征矢量轨迹图。分析结果表明,该款发动机缸内滚流运动主要集中在 $\beta$ 为 $45^\circ\sim$

为了更好地研究不同气流运动形式在发动机缸内的运动特性,对不同 $\alpha$ 的斜轴涡流的作用平面、强度、矢量方向进行了综合分析,表2所示为不同气门升程下发动机缸内气流运动特征向量分布。由表中数据可以看出,发动机进气门升程较低时,气流运动强度较弱且作用平面随气门升程变化很快,并且主要集中在平行于进气门连线的测试平面附近;对于较高的气门升程缸内气流运动逐渐加强,且不同角度的斜轴涡流作用平面逐渐趋于稳定,从表中可以看出取负的 $\alpha$ 斜轴涡流及滚流主要稳定在 $40^\circ(220^\circ)$ 的测试平面附近,取正的 $\alpha$ 斜轴涡流主要稳定在 $60^\circ(240^\circ)$ 测试平面附近。通过此种不同气流运动形式分布规律的研究,在发动机进气系统的结构优化过程中,可为组织最优化作用区域及适当强度的气流运动提供全面的数据基础。

$90^\circ(225^\circ\sim 270^\circ)$ 的测试平面之间,并且随着气门升程的增加逐渐向 $\beta=47^\circ(227^\circ)$ 的测试平面变化并逐渐稳定。

(3) 分析不同气门升程下发动机缸内气流运动特征向量分布表可知,缸内不同气流运动形式的强度随气门升程的增大而逐渐加强, $\alpha$ 为负时的斜轴涡流及滚流趋于稳定在 $40^\circ(220^\circ)$ 测试平面附近,而 $\alpha$ 为正时的斜轴涡流趋于稳定在 $60^\circ(240^\circ)$ 测试平面附近。

## 参 考 文 献

- 1 周龙保. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- 2 Myoungjin Kim, Sihun Lee, Wootae Kim. Tumble flow measurements using three different methods and its effects on fuel economy and emissions[C]. SAE Paper 2006-01-3345, 2006.
- 3 Ricardo. Steady state flow bench port performance measurement and analysis techniques[R]. Report DP93/0704, 1993.
- 4 胡春明,郑振鑫. 汽油机缸内滚流运动的评价研究[J]. 车用发动机,2009(3):15~19.  
Hu Chunming, Zheng Zhenxin. Evaluation of gasoline engine in 2-cylinder tumble motion[J]. Vehicle Engine, 2009(3): 15~19. (in Chinese)
- 5 Stone C R, Ladommatos N. The measurement and analysis of swirl in steady flow[C]. SAE Paper 921642, 1992.
- 6 Bensler H, Kapitzka L, Raposo J, et al. A new experimental method for determining port generated swirl flow[C]. SAE Paper 2002-01-2846, 2002.
- 7 王健,刘德新,刘书亮,等. 四气门汽油机进气道流动特性的稳流试验研究[J]. 内燃机学报,2004,22(2):182~186.  
Wang Jian, Liu Dexin, Liu Shuliang, et al. Study of steady measurements on intake port flow characteristics in a four-valve gasoline engine[J]. Transactions of CSICE,2004,22(2):182~186. (in Chinese)
- 8 刘书亮,冯洪庆,王天友,等. 四气门火花点火发动机气缸内的滚流运动[J]. 燃烧科学与技术,2004,10(2):181~186.  
Liu Shuliang, Feng Hongqing, Wang Tianyou, et al. Tumble motion in the cylinder of the 4-valve spark ignition engine[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2004,10(2):181~186. (in Chinese)
- 9 刘德新,李丹,冯洪庆,等. 四气门汽油机进气道气流运动的三维数值模拟研究[J]. 内燃机工程,2006,27(2):36~38.  
Liu Dexin, Li Dan, Feng Hongqing, et al. Study of three-dimensional numerical simulation for air flows in intake port of four-valve gasoline engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2006,27(2): 36~38. (in Chinese)
- 10 任立红,舒歌群,张宝欢,等. 可变进气道发动机性能试验及分析研究[J]. 内燃机工程,2010,31(1):8~12.  
Ren Lihong, Shu Gequn, Zhang Baohuan, et al. Research on performance of variable intake system of motorcycle engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010,31(1): 8~12. (in Chinese)
- 11 Xu H. Some critical technical issue on the steady flow testing of cylinder heads[C]. SAE Paper 2001-01-1308, 2001.

~~~~~

(上接第4页)

## 参 考 文 献

- 1 周龙宝,刘巽俊,高宗英. 内燃机学[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2003.
- 2 White C M, Steeper R R, Lutz A E. The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006,31(10): 1 292~1 305.
- 3 张红光,郑轶,郑国勇,等. 采用汽油作燃料的内置横隔板定容燃烧室的开发与试验[J]. 兵工学报,2009,30(5): 622~627.  
Zhang Hongguang, Zheng Yi, Zheng Guoyong, et al. Development and test of the gasoline fueled constant volume combustion chamber with built-in adaptor [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(5): 622~627. (in Chinese)
- 4 威廉斯 F A. 燃烧理论[M]. 2版. 北京:科学出版社,1990.
- 5 Drell I L, Bells F E. Survey of hydrogen combustion properties[R]. NACA Report 1383, 1958.
- 6 李良军. 机械设计[M]. 北京:高等教育出版社,2010.
- 7 Golub V V, Baklanov D I, Bazhenova T V, et al. Experimental and numerical investigation of hydrogen gas auto-ignition[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(14): 5 946~5 953.