

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.004

四冲程汽油机缸内斜轴涡流研究*

刘欣 熊淦 胡春明 董亮亮 张巍 乔治彬
(天津大学内燃机研究所, 天津 300072)

摘要: 利用双特征角气道稳流试验台,对一款二气门四冲程单缸试验机的3种不同进气道方案进行了不同测试平面的气流运动试验和分析。结果表明,提高原气道涡流强度来改善燃烧的同时会降低气道的流通能力,但适度提高滚流强度的同时还可以提高流通能力。利用测得的无因次涡流比和滚流比,提出了一个简便的斜轴涡流特征参数计算公式,并通过试验数据给予了有效性证明。另外对特征角 $\alpha=60^\circ$ 时的无因次涡流比和利用涡流与滚流合成的无因次斜轴涡流比进行了线性回归分析,3种方案数据的相关系数分别是0.96、0.97、0.97,因此,通过稳流气道试验台测取某一特征角度下的无因次涡流比可以评价进气道斜轴涡流的性能。
关键词: 四冲程汽油机 进气道 斜轴涡流 双特征角 线性回归分析
中图分类号: TK411.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)05-0019-06

In-cylinder Inclined Swirl of Four Stroke Gasoline Engine

Liu Xin Xiong Gan Hu Chunming Dong Liangliang Zhang Wei Qiao Zhibin
(Tianjin Internal Combustion Engine Research Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A double eigen angle steady-state flow rig was used to measure three modified options of intake port on a single cylinder four stroke gasoline engine. The results showed that improving combustion by enhancing swirl might reduce the flow capacity while improving tumble ratio appropriately could also increase the intake flow coefficient. Based on the dimensionless swirl ratio and tumble ratio, a group of simple formulas which were used to calculate the inclined swirl characteristic parameters were proposed, and related experiments were accomplished to prove their effectiveness. Additionally, linear regression analysis was conducted between the dimensionless swirl ratio at the condition characteristic angle α of 60° and the dimensionless inclined swirl ratio synthesized by swirl ratio and tumble ratio, and the correlation coefficient of three options were 0.96, 0.97 and 0.97 respectively. It was concluded that the performance of intake port could be evaluated by the dimensionless swirl ratio at a certain angle α instead of swirl ratio and tumble ratio.
Key words: Four stroke gasoline engine Intake port Inclined swirl Double eigen angle Linear regression analysis

引言

发动机进气道的流通能力及在缸内形成的空气流动对燃烧室内的火焰传播有极其重要的作用,进而影响发动机的各项性能。评价进气道的性能指标主要有表征流通能力的流量系数和表征缸内宏观气

流运动强度的涡流比、滚流比等^[1]。
在火花点火式发动机中,大尺度的滚流运动可以提高压缩终了时燃烧室内的湍流强度,增快火焰传播,提高燃烧速度,改善燃烧过程,提高发动机性能^[2],因此汽油机中常将缸内滚流强度作为评价进气道性能的主要指标。在实际发动机中,气缸在进

收稿日期: 2012-05-06 修回日期: 2012-06-12
* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2008AA11A114)和天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室开放基金资助项目
作者简介: 刘欣,研究员,主要从事内燃机检测技术研究,E-mail: liuxin@tju.edu.cn
通讯作者: 胡春明,研究员,主要从事内燃机电控技术的应用研究,E-mail: cmhu@tju.edu.cn

气过程中形成的气流运动不是单纯的涡流或滚流,而是两种气流运动的共同作用,Kent等最早提出斜轴涡流的概念^[3],20世纪90年代初,Furuno等利用外置式测量方案对一款四气门发动机进行了斜轴涡流的研究^[4];刘瑞林基于涡流与滚流不同刚体的假设,利用角动量合成理论推导出一个计算斜轴涡流特征参数的公式^[5],并利用可变斜轴涡流系统,分析了不同斜轴涡流强度对发动机性能的影响,得出斜轴涡流对发动机燃烧过程有直接影响的结论^[6]。斜轴涡流的强度在一定程度上决定了发动机的性能好坏^[7],有必要对斜轴涡流进行评价。

利用双特征角气道稳流试验台^[8~9]调整特征角 α 、 β 可以方便测取三维空间不同角度的斜轴涡流分量。其中特征角 α 为叶轮绕支撑轴的转角,不同的 α 代表缸内不同的气流运动形式(α 为 0° 和 90° 时,测得的分别是涡流和滚流);特征角 β 为模拟气缸绕气缸轴线旋转的角度,代表通过模拟气缸轴线与叶轮支撑轴的测试平面,叶轮轴与气缸盖进、排气门连线平行时 β 为 0° 。

1 进气道性能评价参数计算方法

缸内气流运动参数通常使用Ricardo方法评价:保证气道进出口压差 Δp 恒定,计算不同气门升程下的流量系数 C_F 和无因次涡流比 N_r ,再根据平均流量系数和进气终了的涡流/滚流比来评价进气道性能^[10]。

平均流量系数为

$$\bar{C}_F = \frac{\int_{\gamma_1}^{\gamma_2} C_F(\gamma) d\gamma}{\gamma_2 - \gamma_1} \quad (1)$$

进气终了涡流/滚流比为

$$R = \frac{L_D \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} C_F(\gamma) N_r(\gamma) d\gamma}{\left[\int_{\gamma_1}^{\gamma_2} C_F(\gamma) d\gamma \right]^2} \quad (2)$$

式中 γ_1 、 γ_2 ——气门开启与关闭时的凸轮转角

L_D ——发动机形状因子

在计算平均流量系数 $\bar{C}_F$ 和终了涡流/滚流比 R 时要对整个凸轮工作段积分,但试验过程中只能测取有限个凸轮转角时的参数值,因此 $\bar{C}_F$ 和 R 可以使用数值积分方法计算

$$\begin{cases} \bar{C}_F = \frac{\sum_{j=1}^N C_F(j) \Delta\gamma_j}{\gamma_2 - \gamma_1} \\ R = L_D \frac{\sum_{j=1}^N C_F(j) N_r(j) \Delta\gamma_j}{\left[\sum_{j=1}^N C_F(j) \Delta\gamma_j \right]^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $j=1,2,\dots,N$ 为所测气门升程点数, $\Delta\gamma_j$ 为所测点与前一点的凸轮转角差。

上述计算结果精度局限于试验点数 N ,要得到比较满意的结果需要相当大的试验工作量,另外气门升程与凸轮转角之间的关系比较复杂,要利用此数值积分还需采用专业的气门升程测量工具测量两者之间对应的数据,也增加了工作量。

由于稳流气道试验台测量的是不同气门升程下的数值,而气门升程 L 与凸轮转角 γ 是一一对应关系,因此平均流量系数 $\bar{C}_F$ 和进气终了涡流/滚流比计算公式为

$$\begin{cases} \bar{C}_F = \frac{\int_{L_1}^{L_2} C_F(L) dL}{L_2 - L_1} \\ R = \frac{L_D \int_{L_1}^{L_2} C_F(L) N_r(L) dL}{\left[\int_{L_1}^{L_2} C_F(L) dL \right]^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中 L_1 和 L_2 分别表示试验中测取的第一点气门升程和最大气门升程。本文在计算 $\bar{C}_F$ 和 R 时,利用数值分析软件Matlab对气门开启侧的变量进行数值拟合,然后进行曲线积分,最终得到 $\bar{C}_F$ 和 R 。

2 斜轴涡流特征参数计算方法

基于双特征角 α 、 β 的新型气道稳流测试平台的详细测试原理可参照文献^[8~9],此处不再介绍。在特定 β 角时,改变特征角 α 可以测得不同平面的气流流动强度,可计算得到进气过程不同气门升程下的无因次涡流比,此处提到的涡流不是严格意义上的纯涡流,只是一种跟 α 角有关的宏观气流运动,在 α 分别为 0° 和 90° 时,测得的是缸内气流运动的涡流分量和滚流分量,当 α 是除此之外的某角度时,测取的就是该角度下的斜轴涡流分量。其中涡流、滚流与斜轴涡流的计算公式均采用Ricardo方法。

评价斜轴涡流的两个基本参数是斜轴涡流比和倾斜角,其中斜轴涡流倾斜角是指相应的斜轴涡流旋转轴线与气缸轴线之间的夹角。文献^[5]假设涡流运动为柱形刚体,滚流为球形刚体,基于角动量合成理论,推导出一个计算斜轴涡流特征参数的公式,该推导过程与计算公式非常复杂。本文通过试验选择一个对缸内流动影响最大的 β 角,然后对该测试平面内的涡流与滚流均采用柱形刚体假设,通过计算该平面内的斜轴涡流特征参数,来评价缸内整个空间流动。基于上述思路,提出一组简单的用于计算进气过程中各气门升程下无因次斜轴涡流比 N_i 和无因次斜轴涡流比对应的倾斜角 φ 的公式

$$\begin{cases} N_l = \sqrt{N_s^2 + N_t^2} \\ \varphi = \arctan \frac{N_t}{N_s} \end{cases} \quad (5)$$

式中 N_s ——无因次涡流比($\alpha=0^\circ$)

N_t ——无因次滚流比($\alpha=90^\circ$)

进气终了时的斜轴涡流比 R_l 和倾斜角 θ 同样可类似计算。

$$\begin{cases} R_l = \sqrt{R_s^2 + R_t^2} \\ \theta = \arctan \frac{R_t}{R_s} \end{cases} \quad (6)$$

式中 R_s, R_t ——进气终了时的涡流比和滚流比

3 试验

试验样机是一款二气门四冲程单缸试验机缸盖,燃烧室为球形燃烧室,3 种不同方案气道如图 1。相对于方案 1,方案 2 的气道进口上移,进口角度与曲率半径增大,出口角度减小;方案 3 气道出口倾角减小,各截面方向与大小变化平缓。

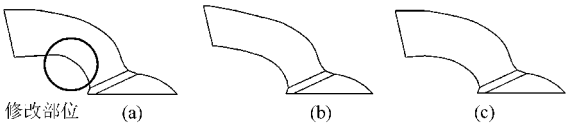
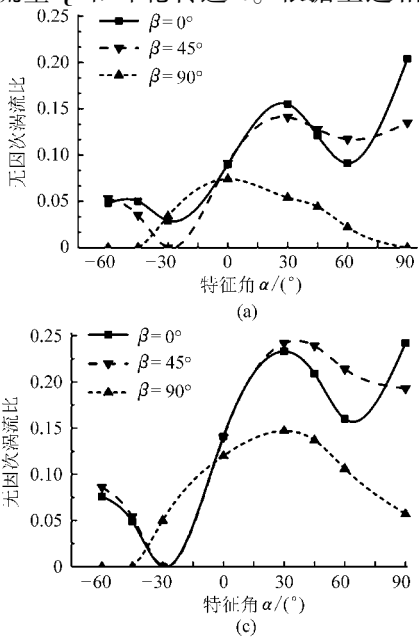


图 1 3 种不同气道方案

Fig. 1 Three different options of intake port

(a) 方案 1 (b) 方案 2 (c) 方案 3

在稳流气道试验台上,压差取 3.4 kPa,测取了 3 种方案在不同的特征角 α, β 下,气门升程从 1 mm 到 8 mm 的气道流量 Q 和叶轮转速 n 。根据上述相



关公式计算流量系数、无因次涡流/滚流比、无因次斜轴涡流倾斜角。

图 2 是方案 1 气道 3 种不同 β 角下各 α 角时的无因次涡流比变化曲线。对比分析可以看出,3 种 β 角下的涡流强度基本一致,但 $\beta=0^\circ$ 时的滚流强度最大,并且其它各 α 角时的流动也相对较强,因此,本文选择 $\beta=0^\circ$ 时的数据来分析缸内斜轴涡流。

图 3 是 3 种方案的进气道在各气门升程下的流量系数曲线,利用式(4)计算得 3 种方案的平均流量系数 $\bar{C}_F$ 分别为 0.451、0.442 和 0.457。从图中可以看出,3 种方案的气道在中小气门升程时(小于 5 mm)的流量系数基本相同,主要是因为在小气门升程时,气体流速小,流量系数主要受气道最小截面处的形状决定;而在大升程时,与方案 1 相比,方案 2 可能由于气道进口角度发生改变,导致对大气门升程时的高气体流速不适应,流阻增大,流量系数减小,而方案 3 气道截面无突变,对气体流动适应性较好,大升程时的流量系数有所提升。

图 4、5 分别是各气门升程下无因次滚流比与涡流比的曲线。相对于方案 1,方案 2 和方案 3 对气道喉口部位均有改善(如图 1),使气道出口角度减小,在大升程时,气道内气流流速很高,气道倾角的导向作用也较为明显^[11],因此大气门升程时,这两种方案的滚流强度均有较大幅度的提高,其中方案 2 滚流强度比方案 3 稍弱,主要是因为气道进口位置上移,气道进口形状偏直,导向作用减弱。从图中得出,除方案 2 在大气门升程时涡流强度稍强外,3

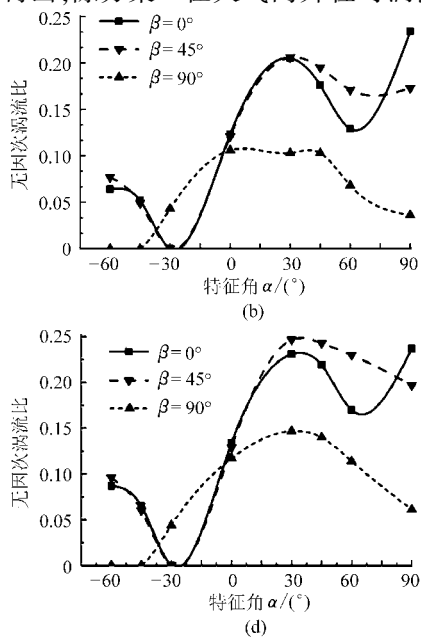


图 2 不同 α, β 角时的无因次涡流比变化曲线

Fig. 2 Changing curves of dimensionless swirl ratio at different α, β angle

(a) $L=4\text{ mm}$ (b) $L=5\text{ mm}$ (c) $L=6\text{ mm}$ (d) $L=7\text{ mm}$

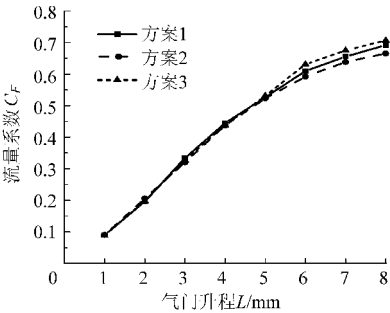


图3 3种方案的流量系数对比曲线

Fig. 3 Curves of flow coefficient contrast of three options

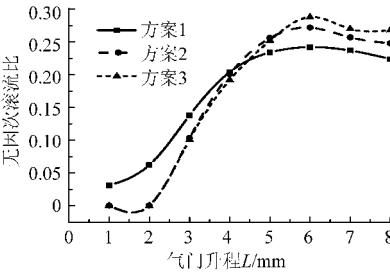


图4 3种方案的无因次滚流比曲线

Fig. 4 Curves of dimensionless tumble ratio of three options

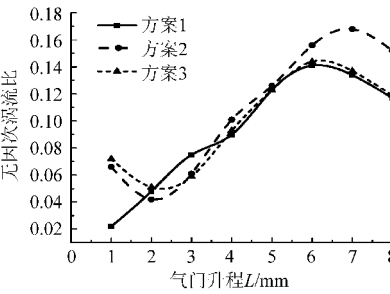


图5 3种方案的无因次涡流比曲线

Fig. 5 Curves of dimensionless swirl ratio of three options

种气道涡流强度基本相同,但与滚流相比,涡流影响很小。

图6是无因次斜轴涡流倾斜角 φ 随气门升程的变化情况。从图中可以看出,方案1的无因次斜轴涡流倾斜角一直稳定在 60° 左右,但在小升程时斜轴涡流波动相对较大;方案2和方案3在升程小于3 mm时无因次斜轴涡流倾斜角均为 0° ,气门升程大于3 mm时慢慢趋于稳定,也在 60° 附近。这说明在气门刚开启时缸内气流运动不稳定,并且主要以涡流为主,滚流分量逐渐增大,最后涡流分量和滚流分量比值达到稳定。

从理论上讲,与斜轴涡流矢量垂直的方向上应该没有气流运动。通过上述结论得出,在气门升程 L 大于3 mm时斜轴涡流倾斜角趋于 60° ,因此在升程为3~8 mm时,特征角 $\alpha = -30^\circ$ 时的无因次涡流比基本上等于零。图7是 $\alpha = -30^\circ$ 时3种气道的无因次涡流比,从图中可以看出 L 在3~7 mm之间的无因次涡流比为零,在 $L = 8$ mm时虽然有一定的

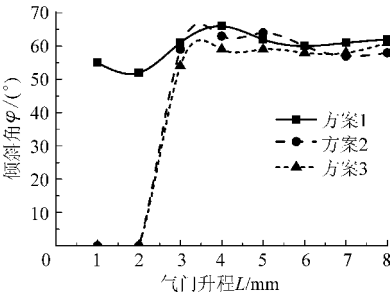


图6 3种方案的无因次斜轴涡流倾斜角 φ 变化曲线

Fig. 6 Dimensionless inclination angle of inclined swirl φ of three options

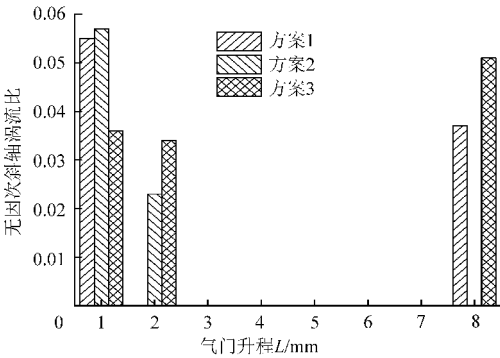


图7 $\alpha = -30^\circ$ 时3种方案的无因次涡流比

Fig. 7 Dimensionless swirl ratio of three options when α is -30°

流动强度,但数值非常小,在0.05左右,可能由于气流扰动造成,试验结果与理论分析相符。

由此得出结论:小气门升程时,进气道在缸内形成的气流运动不稳定,并且以涡流为主,随气门开启过程中气流运动方向逐渐稳定,斜轴涡流倾斜角在 60° 左右,稳定的气流运动有利于混合气的燃烧;另外通过 $\alpha = -30^\circ$ 下的试验数据验证了利用式(5)计算缸内无因次斜轴涡流特征参数的合理性。

表1是由式(4)计算得到的进气终了涡流比 R_s 、滚流比 R_t ,以及由式(6)计算得到的进气终了时的斜轴涡流比 R_l 和倾斜角 θ 。由表中数据看出,相对于方案1,方案2和方案3的斜轴涡流比分别增大了0.026和0.014,而斜轴涡流倾斜角基本没有变化,只有 $\pm 1^\circ$ 的偏差。因此得出结论:减小气道出口倾角可加强斜轴涡流强度,但对斜轴涡流的方向几乎没有影响。

表1 终了涡流比、滚流比和斜轴涡流比参数

Tab. 1 Final swirl ratio, tumble ratio and parameters of inclined swirl

方案	涡流比 R_s	滚流比 R_t	斜轴涡流比 R_l	斜轴涡流 倾斜角 $\theta/(^\circ)$
1	0.152	0.28	0.319	61
2	0.175	0.297	0.345	60
3	0.152	0.296	0.333	62

基于式(5)计算得到各气门升程下的无因次斜轴涡流比 N_i ,然后利用式(4)计算出进气终了时的斜轴涡流比 R'_i 。图8为 R_i 与 R'_i 大小对比图,从图中看出两种途径得到的斜轴涡流比基本相等,误差在4%以内。

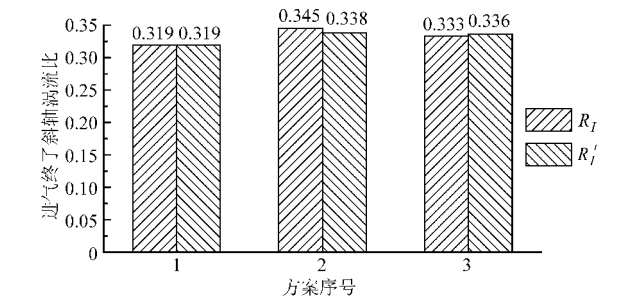


图8 进气终了斜轴涡流比 R_i 与 R'_i 的比较

Fig. 8 Contrast of final inclined swirl ratio between R_i and R'_i

已有研究表明斜轴涡流与燃烧有直接的联系,因此可以用缸内斜轴涡流强度来评价进气道的性能。基于式(5)、(6),可利用测取的涡流、滚流数据计算斜轴涡流特征参数,但过程比较复杂。在特征角 $\alpha=60^\circ$ 时,试验直接测取各气门升程下的无因次涡流比,将之与利用式(5)计算得到的无因次斜轴涡流比 N_i 作线性回归分析处理,如图9所示。

由前述内容可知,无因次斜轴涡流倾斜角并非完全稳定在 60° ,导致各气门升程下的无因次斜轴涡流比与 $\alpha=60^\circ$ 时的无因次涡流比在数值大小上有一定的差异,但两者之间的相关系数分别为0.96、0.97、0.97,说明两者有较强的线性相关性。因此可以得出结论:基于双特征角稳流气道试验台,通过试验直接测取斜轴涡流倾斜角下的无因次涡流比,可以评价缸内斜轴涡流运动的强弱,进而评价气道的性能。

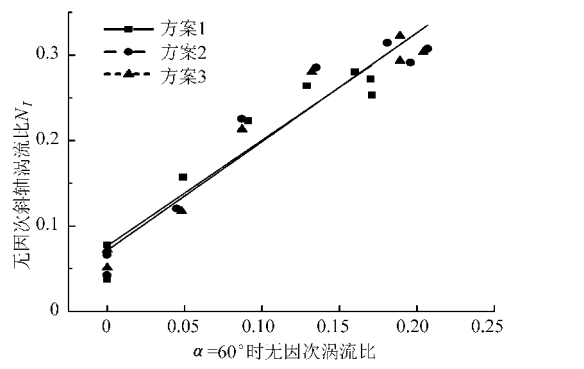


图9 $\alpha=60^\circ$ 时的无因次涡流比与 N_i 的关系

Fig. 9 Correlation between dimensionless swirl ratio and N_i when α is 60°

4 结论

- (1) 基于双特征角气道试验平台,测出在特征角 $\beta=0^\circ$ 的平面有较强的气体流动。在此角度下,对涡流和滚流采用相同的柱形刚体假设,提出一组比较简单、用于计算无因次斜轴涡流与进气终了斜轴涡流特征参数的公式,并利用试验验证了该公式的合理性。
- (2) 通过3种气道方案的试验,发现修改气道喉口部位,减小出口倾角可以较大幅度增加滚流和斜轴涡流强度,且斜轴涡流强度主要受滚流强度影响,但三者的斜轴涡流倾角均在 $(60\pm1)^\circ$ 范围内,说明缸内气流运动方向对气道出口倾角的变化并不敏感。
- (3) 对利用式(5)计算得到的无因次斜轴涡流比和 $\alpha=60^\circ$ 时测得的无因次涡流比进行了线性回归分析,发现两者之间有良好的线性相关性,其相关系数分别为0.96、0.97、0.97。因此,可以利用该 α 角下的气道试验数据来评价气道的斜轴涡流性能。

参 考 文 献

- 1 周龙保. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- 2 刘书亮,刘珺,许振忠,等. 汽油机气缸中滚动气流运动对发动机性能的影响[J]. 内燃机学报,1994,12(4):296~303.
Liu Shuliang, Liu Jun, Xu Zhenzhong, et al. Effect of in-cylinder tumbling air flow on engine performance in S. I. engines[J]. Transactions of CSICE, 1994, 12(4):296~303. (in Chinese)
- 3 Taehoon Kim, Seokhong Noh, Chulho Yu, et al. Optimization of swirl and tumble in KMC 2.4 L lean burn engine[C]. SAE Paper 940307,1994.
- 4 Furuno S, Iguchi S. The effects of inclination angle of swirl axis on turbulence characteristics in a 4-valve lean burn engine with SCV[C]. SAE Paper 902139,1990.
- 5 刘伍权,刘瑞林,李树珉,等. 内燃机缸内稳态斜轴涡流特性研究[J]. 内燃机学报,2000,18(3):279~282.
Liu Wuquan, Liu Ruilin, Li Shumin, et al. A study on in-cylinder inclined swirl of IC engine[J]. Transactions of CSICE, 2000, 18(3):279~282. (in Chinese)
- 6 刘瑞林,马康,温永继,等. 斜轴涡流对汽油机低速低负荷燃烧过程影响的试验研究[J]. 内燃机学报,2007,25(1):37~42.
Liu Ruilin, Ma Kang, Wen Yongji, et al. Experimental study on effect of inclined swirl on combustion process of a gasoline engine a low speed and load [J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(1):37~42. (in Chinese)

- 7 Whitelaw J H, Xu H M. Cyclic variations in a lean burn spark ignition engine without and with swirl[C]. SAE Paper 950683, 1995.
 - 8 候圣智, 吕永, 詹樟松, 等. 基于特征矢量的汽油机缸内气流运动特性的研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 5~9.
Hou Shengzhi, Lü Yong, Zhan Zhangsong, et al. Eigenvector-based research on in-cylinder flow field of gasoline engines[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 5~9. (in Chinese)
 - 9 郑振鑫. 内燃机缸内气流运动的评价与分析[D]. 天津: 天津大学, 2009.
Zheng Zhenxin. Evaluation and analysis for in-cylinder air motion of internal combustion engine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)
 - 10 Ricardo plc. Steady state flow bench port performance measurement and analysis techniques[R]. Report DP93/0704, 1993.
 - 11 刘书亮, 宋飞舟. 汽油机滚动涡流模拟试验台和滚流进气道的试验研究[J]. 内燃机工程, 1995, 16(4): 1~9.
Liu Shuliang, Song Feizhou. An investigation of the steady flow test rig and inlet port for in-cylinder tumbling air movement in gasoline engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 1995, 16(4): 1~9. (in Chinese)
-

(上接第 6 页)

- 8 王占林. 近代电气液压伺服控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- 9 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- 10 巩明德, 赵丁选, 段秀兵. 力觉反馈的电液位置伺服控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 104~107.
Gong Mingde, Zhao Dingxuan, Duan Xiubing. Research of electro-hydraulic position servo with force-feedback[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(1): 104~107. (in Chinese)
- 11 文广, 赵丁选, 唐新星, 等. 遥操作工程机器人力觉双向伺服控制系统[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(6): 919~923.
Wen Guang, Zhao Dingxuan, Tang Xinxing, et al. Bilateral hydraulic servo control system based on force sense for tele-operated engineering robot[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006, 36(6): 919~923. (in Chinese)
- 12 郭连. 汽车发动机电子节气门控制系统设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
Guo Lian. Design and research for electronic throttle control system of automobile engine[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- 13 于洪洋. 基于位置反馈控制的节气门控制系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
Yu Hongyang. Design of the electronic throttle control system based on position feedback[D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)