

柴油机进气涡流自动试验系统设计与评价方法

于吉超¹, 刘德新¹, 冯洪庆²

(1. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072;

2. 中国石油大学热能与动力工程系, 山东 东营 257061)

[摘要] 涡流是影响柴油机经济性与排放特性的关键参数, 在柴油机设计与改进过程一般通过气道稳态试验台进行测量与评价。介绍了一种自动化程度较高的气道稳态试验台的设计方案, 可以自动控制气门升程和试验压力, 适用于生产线。论述和比较了当前常用的测量与分析方法, 并在试验台上进行了相应试验研究。结果表明, 即使在相同试验条件下, 不同测量方法或分析方法也会有不同的结果, 在对不同试验台测量结果进行比较时, 需要注意由于方法不同所引起的差异。

[关键词] 涡流; 柴油机; 叶片风速仪; 涡流动量计; 稳态试验台

[中图分类号] TK406; U464 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2007)05-0085-06

能源紧张与排放法规日趋严格, 对柴油机动力性、经济性和排放特性提出了更高的要求。发动机进气过程的流动特征, 尤其是涡流, 作为直接影响燃油与空气混合程度优劣的一个关键参数, 对发动机的经济性和排放影响很大, 从而越来越受到研究者的关注。

研究表明^[1,2], 在中小缸径直喷柴油机中, 高涡流系数能使燃油和空气很好地混合, 并增加初期放热率, 缩短燃烧持续期, 改善碳烟排放; 但是过高的涡流会增强燃烧噪音, 增加 HC 和 CO 排放。因此, 合适的涡流对于柴油机的设计与改进尤其重要。

涡流主要是由进气过程的切向气流形成的, 用气道稳态试验台来分析进气过程中的气流速度就成为考查涡流的一个主要手段。随着生产的发展, 许多厂家提出了在生产线上对气道的涡流参数进行检测的要求。传统的试验台需要手动操作气门开启、调节试验压力, 试验过程比较长, 不能满足在线测试的要求。为了加速测量, 以与生产线节奏匹配, 笔者在原有气道试验台的基础上^[3], 开发了基于闭环控制的自动化试验台。

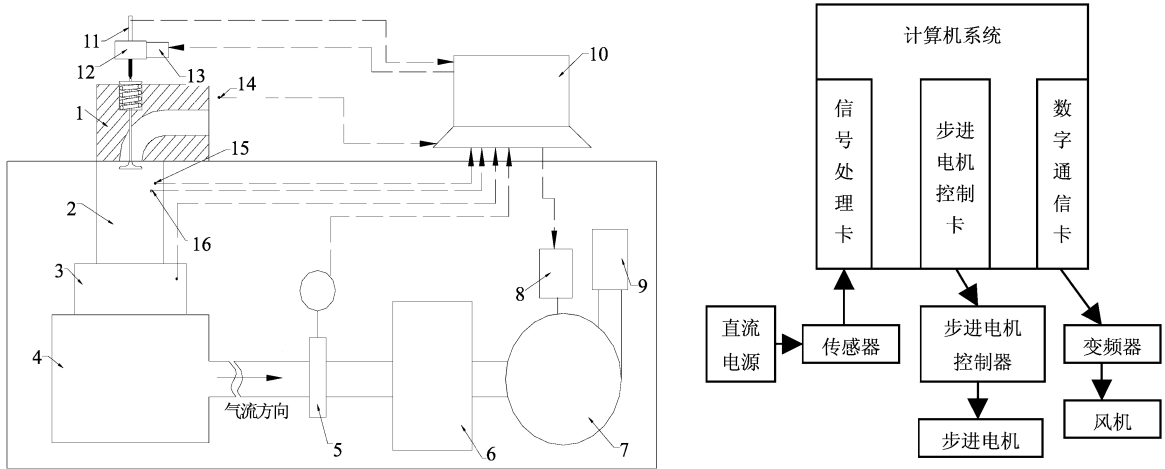
1 试验系统设计

气道试验台结构系统示意图 1。试验过程中, 气门在减速机 12、步进电机 13 的驱动下逐渐打开, 高压风机 7 提供负压, 变频器 8 用于调节风机转速, 以保持气门两侧压力稳定。各传感器信号传送到计算机系统 10, 进行信号处理和数据保存。涡流的测量既可以使用叶片风速仪^[3], 也可以应用涡流动量计^[4], 以适应汽缸直径不同的缸盖, 测量结果可以进行换算和比较。

为了加快试验节奏, 以与生产线相配合, 与原来的试验系统相比^[3], 新试验台的自动控制程度有很大提高: 气门开启装置采用步进电机—减速机系统, 用变频器—风机系统控制进气压力; 使用 VC 的定时机制控制气门自动开启、数据测量与气门的落座。

1.1 步进电机—减速机气门自动开启系统

步进电机作为控制执行元件, 是机电一体化的关键器件, 通过输入不同方向的脉冲电压, 可以对旋转角度和转动速度进行高精度控制, 并且电机转子与定子靠磁场定位, 回位误差非常小, 在各种自



1—缸盖；2—模拟缸套；3—涡流测量装置；4—稳压桶；5—涡街流量计；6—稳压箱；7—高压风机；8—变频器；9—消声器；10—计算机；11—位移传感器；12—减速机；13—步进电机；14—大气压力传感器；15—缸内压力传感器；16—温度传感器

图1 气道试验台结构与系统示意图

Fig.1 The sketch of test bench's structure and system

动化系统和精密机械系统上得到广泛的应用。在此试验系统中，选用 57BYG250E 型两相混合式步进电机，驱动扭矩在脉冲频率 1 kHz 时为 $0.8 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，步距角 1.8° ，运转速度为 5 r/s。配备双极恒相流式驱动器，与外部控制接口采用光耦隔离，能够方便地与计算机或者 PLC 系统适配。

为了将步进电机的旋转变换为直线运动，并且增大驱动扭矩，采用涡轮—蜗杆减速器，减速比为 10:1，丝杠螺距为 2 mm。虽然减速比很高，但由于步进电机转速较高，仍能满足测试要求，气门开启速度为 1 mm/s。

1.2 变频器—风机压力调节系统

为了满足测量结果与测量过程的无关性，应保证试验台为全紊流流动，即要求气门两侧的压力差在气门升程为 $0.1 L/D$ 和 $0.25 L/D$ (L/D 为气门升程与缸径之比) 时，阀座内径处的雷诺数 Re 分别大于 60×10^3 和 90×10^3 ^[5]。虽然采用变压差方法对无因次分析没有太大影响，但在整个升程测量范围内风机提供的压力值变化较大，若压力太低，流动不再是全紊流；压力太高，则气体压缩性的影响明显。因此常采用定压差的方法，定压差下的测量结果也具有横向可比性。

变频器是在交流电机调运性能中比较常用的调速控制系统，非常适用于风机压力控制。其原理是将三相交流电整流为直流电，经滤波电容及大功率开关元件逆变为频率可变的交流。由于变频器本身

是由一个 16 (或 32) 位微处理器所控制，设有 RS-485 (或 RS-422)、A/D 输入，D/A 输出接口，从而为自动控制创造了充分的条件。

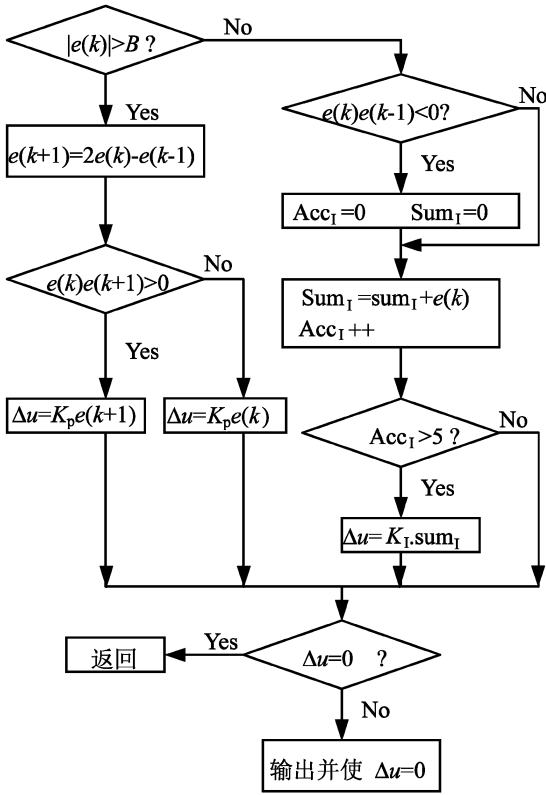
控制系统采用增量 PID 控制方式，以压力传感器的压力值作为反馈量，控制变频器的频率，调节风机转速，自动控制压力，使其稳定在设定值附近。控制框图见图 2。试验证明控制效果好，能够对压力进行快速调节，压力波动小于 10 Pa，满足恒压测量要求^[6]。

1.3 控制软件

试验软件用 VC 进行编程，VC 具有能够控制到毫秒级的 Timer 触发器，并且能够使用多线程，将外部触发条件置于程序后台运行，当发生触发动作时，即行自动控制程序，测量过程无须手动干预。

试验流程见图 3。将缸盖放置在试验台上并调零，按下“测量”键，控制气门按设置的测量点间隔自动开启，直到最大升程处；在每个升程点，根据模拟气缸内反馈压力自动调节风机转速，当压力稳定后，自动记录各传感器数据；继续该过程，直到最大升程。测量完毕，自动计算并给出结果。

如果在生产线上使用，并且缸盖型号固定，则气门升程零点对于位移传感器为定值，传感器的调零操作可以省略；当缸盖定好位置后，利用接近开关传感器作为触发信号，使测量过程自动进行。



$e(k)$ —当前偏差; $e(k-1)$ —前次偏差; $e(k+1)$ —预测偏差;
 B —窗口门限; K_p —比例系数; K_I —积分系数;
 Sum_1 —积分项; Acc_1 —积分计数; Δu —控制增量

图 2 PID 控制程序运算过程流程图
 Fig.2 Flow chart of the PID controller

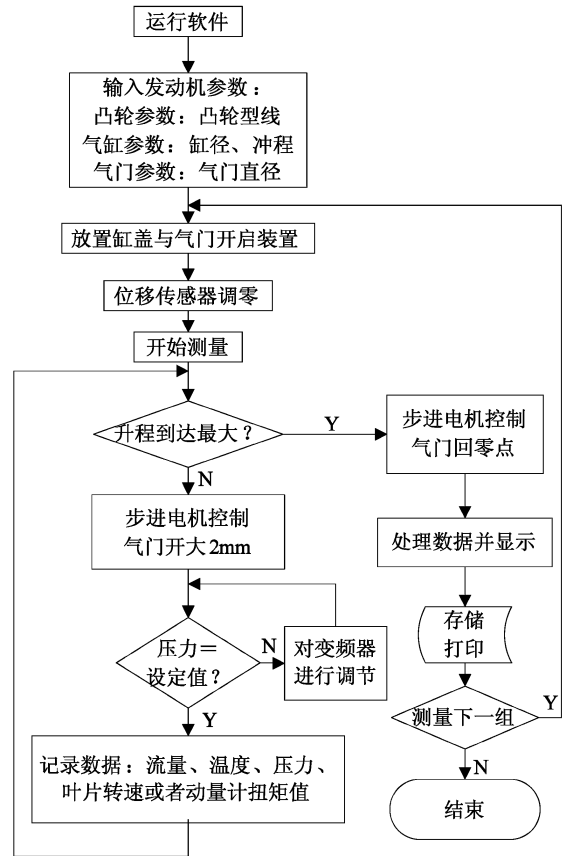


图 3 控制程序流程图
 Fig.3 Flow chart of the control software

2 涡流的测量方法

在现有的气道稳态试验系统中，用于检测涡流的手段很多，比如 LDA (laser doppler anemometry)、HWA (hot wire anemometry)、叶片风速仪、涡流动量计等，但是从复杂程度和成本方面考虑，常用的是后两种^[7]。如图 4 所示，分别为叶片风速仪和涡流动量计，两种方法用不同的物理量来表示气流的切向流动。

叶片风速仪将 1 个或者 2 个金属片放置到模拟缸套内，当旋转气流流过时，叶片会随着旋转。分析时最基本的假设是流入气缸的旋转气流为强制涡流，叶片能够无摩擦地转动，并且轴向速度分布尽可能均匀。如果假设成立，叶片的角速度与气流角速度相等^[7]，可以用叶片的角速度表示气流的切向流动。叶片的旋转速度通过数字式转速计或者数字计数器测出。

涡流动量计最初是由 Toppelmann 提出并应用

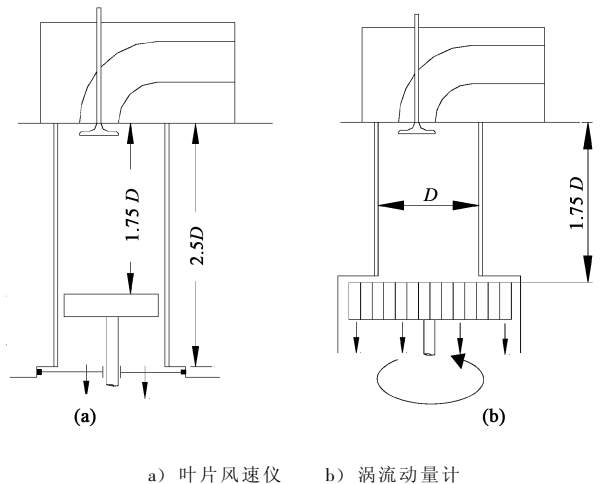


图 4 涡流测量方法示意图

Fig.4 The sketch of swirl measure methods

的^[7]，用扭矩或者角动量通量 M (或称角动量变化率) 表示气流的旋转运动，其关键部分是网状蜂窝体结构。当旋转气流流经网状结构时被破碎成细小的气流，然后通过细长的管路，气流绕气缸轴线

的速度分量被蜂窝体吸收,并传递到扭矩传感器。如果角通量能够被全部吸收,则传递到传感器部分的扭矩值 T 与气流的角动量通量 M 相等。从物理意义上讲,角动量通量 M 等于外部施加的扭矩 T ,可用

$$\frac{d(I\omega)}{dt} = M = T \quad (1)$$

表示(除特别说明,各物理参数的意义见附录)。

如果气体为强制涡流,则 ω 为常数, $I = \frac{mB^2}{8}$,代入式(1),得到扭矩与气体涡流的关系为

$$T = \frac{1}{8} mB^2 \omega \quad (2)$$

式中气流的旋转角速度 ω 可以假想为叶片的角速度。

两种系统具有不同的特点,叶片使用比较方便,不受缸径的限制,但是测量结果不及涡流动量计精确;相比之下,固定直径的涡流动量计虽然精度比较高,理论上也可以测量配备各种缸径的气缸盖,但是只在一定缸径范围内比较精确。笔者所设计的试验台对于两种装置都适用,软件中也分别设计了不同的计算方法。

3 涡流的分析方法

气道中速度在稳流试验时与发动机实际运行时是不一样的,但由于测量是在全紊流流动条件下进行,可通过将测量结果化为无量纲参数的方法来克服其差异。常用的方法是测得各个升程点的叶片转速或动量计的扭矩值,再将其转换为无量纲涡流系数 C_s ,然后分别用不同数值积分的计算方法得到最终的涡流比 R_s 。目前,对数据有很多分析方法,下面分析比较常见的几种方法。

3.1 无量纲涡流比的定义方法

对于通过叶片和动量计所测得的数据,比较典型的有以下几种定义无量纲涡流比的方法^[1,7,9]:

英国 Ricardo 咨询公司定义的无量纲涡流比为 $C_{s1} = \omega_p B / v_0$,可以理解为气流最大切向速度的2倍与气门口处气流速度之比。将式(2)代入,得到用涡流动量计测量时的涡流比 $C'_{s1} = 8T / (m v_0 B)$ 。

奥地利 AVL 公司把涡流比定义为叶片转速与发动机转速之比 n_0/n ,发动机转速可以通过计算得出:假设活塞平均速度 c_m 与缸内气流速度 c_a 相

同,则 $c_m = Sn/30 = c_a = \dot{m}/(\rho F_k)$,从中得到发动机转速 $n = 30 \dot{m}/(\rho S F_k)$,因此 $C_{s2} = n_0/n = n_0 \rho V_0 / (30 \dot{m})$ 。同样,如果用涡流动量计测得扭矩值,则 $C'_{s2} = 2TS / (\dot{m}V)$ 。

德国 FEV 研究所定义的涡流比为空气在汽缸内旋转的平均切向速度 c_u 与平均轴向速度 c_a 之比 c_u/c_a ,其中 $c_u = \omega_p R_{FL}$, $R_{FL} \approx 0.73 R_{cyl}$, $c_a = \dot{m}/(\rho F_k)$,则 $C_{s3} = 0.73\pi \omega B^3 / (8V)$ 。对于涡流动量计测量结果, $C'_{s3} = 0.73\pi TB / (\dot{m}V)$ 。

3.2 平均涡流比的计算

对于平均涡流比的计算,同样也具有如下多种不同的假设与评价方法^[7,8]:

Ricardo 假设气道中的流动为不可压缩和绝热过程,气道的压力降在进气期间为定值,气缸的充气效率为 100%,并假定进气过程发生在进气门打开和关闭期间。通过假设,得到平均涡流比为

$$R_{s1} = \frac{\omega_c}{\omega_e} = \frac{L_D \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_F C_{s1} d\alpha}{\left[\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_F d\alpha \right]^2} \quad (3)$$

式中 C_F 为流量系数, $C_F = V/(A v_0)$; L_D 为发动机因子, $L_D BS / (qD^2)$ (其中 q 为每缸进气门数)。

AVL 与 Ricardo 的假设类似,但是假定发动机的进气过程只发生在上止点与下止点之间,在计算进气终了的涡流比时,积分限取为 $0 \sim \pi$,进气流动过程取决于活塞排量的变化率(与 Ricardo 的流量系数为 100%类似),平均涡流比为

$$R_{s2} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{n_0}{n} \left[\frac{c_a}{c_m} \right]^2 d\alpha \quad (4)$$

FEV 用有代表性的气门升程的试验结果评价进气道性能是否符合要求,气门升程为最大升程的 0.9,涡流比的计算方法为

$$R_{s3} = C_{s3-h=0.9 \max H} \quad (5)$$

4 试验及计算结果

目前各科研机构以及生产厂家所采用的气道稳态试验系统,对进气切向速度的测量,既有使用叶片风速仪,也有用涡流动量计的;对试验结果的计算方法也多种多样,不同试验系统的结果差异很大,给涡流的统一评价带来很大困难,笔者所设计的试验系统也存在同样问题。为了考查各种测量方

法与评价方法之间的关系，为比较不同的试验方法提供参考依据，笔者对多种缸盖进行了多组试验，得到如下结果。

4.1 叶片风速仪和涡流动量计测量结果的不同

图5为叶片风速仪和动量计分别对同一缸盖测量的典型结果。为了便于比较，通过式(2)将叶片转速换算成扭矩值。可以看出，动量计测量结果明显高于叶片所测数值，这与Powling的结论是吻合的^[7]，叶片测量结果较小的原因是缸内并不是强制涡流，叶片转动所用的轴承也不可能没有摩擦，流动的轴向速度分布也不是均匀的。图中两组扭矩曲线的趋势表明，随着气门开度的增大，气流的角动量通量也逐渐增加，并在最大气门开度附近接近一个极限值。

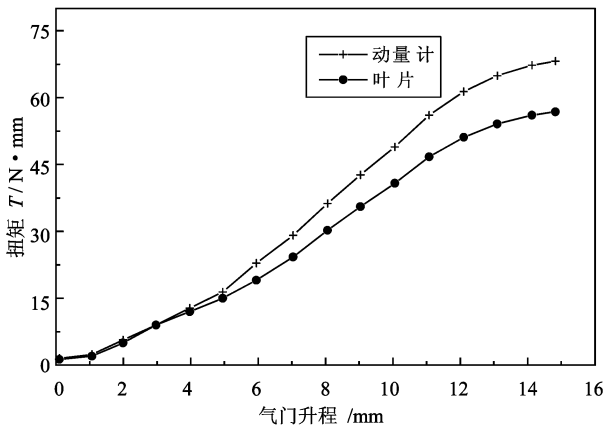


图5 叶片和涡流动量计测量结果比较

Fig.5 Test results comparison of paddle wheel anemometer and torque meter

4.2 不同方法的计算结果

表1为多组不同缸盖试验，分别用Ricardo, FEV, AVL计算方法得到的平均涡流比，各种方法计算的结果都有差异，虽然规律性不强，但是总体来看，AVL的计算结果普遍高于Ricardo的结果，而FEV的结果介于二者之间。因此，用不同的方法进行分析时，需要考虑不同方法在数值上的差异。

5 结语

所设计的气道涡流试验系统自动化程度较高，控制简单，反应速度快，能够满足试验台在生产线上使用。试验时，根据设定参数自动打开气门，并在各个测量点精确控制进气压力，自动记录测量结

表1 各种计算方法计算结果比较

Table 1 Comparison of calculation results of different methods

序号	Ricardo	FEV	AVL
1	1.104	1.543	1.435
2	1.596	1.707	2.074
3	2.018	2.383	2.623
4	2.185	2.639	2.840
5	2.207	2.474	2.869
6	2.320	2.779	3.016
7	2.972	3.070	3.863
8	3.093	3.214	4.020

果并进行处理，能够给出用各种评价方法计算的涡流比。

用叶片风速仪和涡流动量计所测得的结果，以及用不同方法处理的结果都有区别，对不同方法得到的结果进行比较时，要考虑测量方法和分析方法所引起的结果的差异。

需要指出，虽然稳流试验台可以用来评价发动机进气过程产生涡流的能力，并被广泛采用，但影响燃油与空气混合效果的应该是压缩终了的涡流参数，进气过程形成的涡流在压缩过程中也会发生很大改变，如果需要考查压缩终了的缸内涡流参数时，稳流试验台无法满足要求^[7]。在涡流参数的匹配上，涡流的大小需要与燃烧室形状、喷油压力等参数相配合，涡流比的增大是以降低充量系数为代价的^[1]，过大的涡流比反而使燃油经济性和排放特性变坏^[10]。

附录：文中符号定义

B —发动机气缸直径，m

S —发动机冲程，m

D —气门阀座内径，m

A —气门阀座内面积，m²

I —旋转气流的转动惯量，kgm²

T —用动量计测得的扭矩值，Nm

M —气流的角动量通量，Nm

v_0 —通过气门的气流速度，m/s

\dot{m} —气体质量流量，kg/s

V —气体体积流量，m³/s

ω —气流的角速度，rad/s

ω_c —进气终了充量的涡流角速度，rad/s

ω_E —假想的发动机曲轴旋转角速度，rad/s

ω_p —叶片旋转角速度, rad/s
 n —发动机转速, r/min
 n_D —叶片风速仪转速, r/min
 R_{Fl} —速度为平均切向速度处的半径, m
 R_{cyl} —气缸半径, m
 F_k —活塞面积, m^2
 ρ —气缸内空气密度, kg/m^3
 V_h —气缸工作容积, m^3
 c_m —活塞平均速度, m/s
 c_a —气流在活塞中的速度, m/s
 α_i —气门打开时对应的曲轴角度, rad
 α_e —气门关闭时对应的曲轴角度, rad
 α —曲轴角度, rad

参考文献

- [1] Heywood J B. Internal Combustion Engine Fundamentals [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1988
- [2] Mattarelli E, Borghi M, Fontanesi S, et al. The influence of swirl control strategies on the intake flow in four valve Hsdi diesel engines [A]. SAE Paper[C]. 2004-01-0112, 2004
- [3] 许振忠, 刘书亮, 李玉峰. 发动机进气道稳流试验台的开发[J]. 农业机械学报, 2000, 31(2): 82~85
- [4] 刘德新. 涡流动量计[P], 中国: CN03250732.1, 2004-07-07
- [5] 熊冰. 吕卡图稳流试验台试验结果分析及其精度[J]. 国外内燃机, 1978, (5): 1~21
- [6] 李兴, 于吉超, 刘德新, 等. 变频器在气道稳流试验台上的应用[J]. 低压电器, 2004, (2): 52~54
- [7] Stone C R. The Measurement and analysis of swirl in steady flow [A]. SAE Paper[C]. 921642, 1992
- [8] 赵振武. 内燃机气道的稳流试验技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2003
- [9] 段家修, 尧命发, 许振忠. 柴油机进气道性能试验与评价方法[J]. 汽车工程, 2001, (7): 23~25
- [10] Miles P C. The influence of swirl on Hsdi diesel combustion at moderate speed and load [A]. SAE Paper[C]. 2000-01-1829, 2000

Design of an Automatic Test System for Diesel Inlet Swirl and Evaluation Methods

Yu Jichao¹, Liu Dexin¹, Feng Hongqing²

(1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Department of Thermal and Power Engineering of China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China)

[Abstract] Swirl is a key parameter that directly influences the efficiency and exhaust property of diesel engine. And it is usually measured and valued by a steady flow test system in designing and development process. This paper firstly presented the scheme of a highly automatic steady test bench, on which the valve lift and test pressure are all computer-controlled. Then it reviewed the varied measuring and analysis methods, and performed some corresponding experiments on the bench. The experiment results show that even under the same test condition, the results are different if using different measuring or calculating techniques, which should be noticed in the comparison.

[Key words] swirl; diesel engine; paddle wheel anemometer; swirl torque meter; steady test bench