

测量多缸内燃机单缸充气量的 流速-压力波方法

程 鹏¹, 刘忠长², 郭英男², 刘金山², 谭满志², 宫宝利³, 刘巽俊²

(1. 吉林大学 测试科学实验中心, 长春 130022; 2. 吉林大学 汽车工程学院, 长春 130022; 3. 车辆排放与节能重庆市市级重点实验室, 重庆 400039)

摘要:论述了一种基于稳定紊流运动沿通过截面径向的速度分布规律,对多缸内燃机各缸进气歧管内进气充量和充气效率的计算方法。利用奥地利 AVL657 内燃机数据采集分析仪和美国 TSI 公司 IFA100 热线/热膜恒温流速仪等测试设备测量各缸进气歧管内气体速度波和压力波等参数,通过计算获得了各缸各工况下的进气充量和充气效率。将各缸充气效率的平均值与同时实测的整机充气效率的平均值进行了比较,充气效率值最大相差 4%,验证了该方法的可行性。得到的实验内燃机充气效率不均匀度最大值为 9.1%。用这种方法可以定量研究多缸内燃机各缸进气充量的不均匀性。

关键词:动力机械工程;内燃机;充气量;流速波;压力波;充气效率;测量

中图分类号:TK412 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2007)01-0069-05

Velocity-pressure wave measurement method of individual cylinder charging for multi-cylinder IC engine

Cheng Peng¹, Liu Zhong-chang², Guo Ying-nan², Liu Jin-shan²,
Tan Man-zhi², Gong Bao-li³, Liu Xun-jun²

(1. Center of Test Science, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. Chongqing City Key Laboratory of Vehicle Emission and Energy, Chongqing 400039, China)

Abstract: A new method for determination of the charging and the volumetric efficiency of the individual cylinder in a multi-cylinder internal combustion engine was proposed. The method is based on the measurement of the pressure wave in the intake system of the engine and the radial distribution of the velocity of the steady turbulence flow in a section of the intake port of each cylinder. The AVL657 digital analyzer was used to measure and record the charge pressure wave in the intake system and the TSI IFA100 hot-wire/hot-film constant temperature anemometer was used to measure and record the charge velocity in the intake port. The measurements were performed under motoring condition at different engine speeds and different throttle valve openings and the chargings and the

收稿日期:2005-06-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50376019).

作者简介:程鹏(1964-),男,硕士,高级工程师.研究方向:内燃机测试技术. E-mail:chengpeng@jlu.edu.cn

通讯联系人:郭英男(1946-),男,教授,博士生导师.研究方向:内燃机代用燃料开发及内燃机测试技术.

E-mail:jiandingzhan@jlu.edu.cn

volumetric efficiencies of each cylinder were calculated under different conditions. The average volumetric efficiencies of each cylinder were compared with that of the whole engine, and the maximal deviation was 0.04. The maximal unevenness of the volumetric efficiencies inside the engine was 9.1%. By means of the proposed method, it is possible to study quantitative the unevenness of charging of individual cylinder.

Key words: power machinery and engineering; internal combustion engine; charging; velocity wave; pressure wave; volumetric efficiency; measurement

多缸往复式内燃机各缸进气道构造尺寸不一致和各缸之间的相互干扰以及气体流动的脉动性等因素造成各缸的进气充量不均匀,对整机性能产生重要影响。因此,确定多缸内燃机的单缸进气充量和充气效率并分析多缸进气充量差别的原因,可为改善多缸内燃机工作均匀性提供有力依据^[1,2]。国内外关于各缸进气充量测量方面文献较少^[3-6]。作者提出一种确定多缸内燃机的单缸充气量流速的方法——压力波方法,可用于判断多缸进气充量的不均匀性。该测量方法利用进气歧管某截面上的平均流速及进气压力波来计算单缸充气量和充气效率。实验证明了该方法的可行性。

1 流速分布规律的确定

内燃机进气过程中进气歧管某一截面上沿径向流速分布是不均匀的,气体流动为紊流状态^[7]。对于雷诺数 $Re < 10^5$ 的管内紊流运动,其速度分布可用以下经验公式表示^[8]:

$$\frac{V_y}{V_*} = 8.7 \left[\frac{yV_*}{\gamma} \right]^{\frac{1}{7}} \quad (1)$$

式中: V_y 为与管壁距离为 y 处的气体速度; V_* 为应力速度, $V_* = \sqrt{\tau/\rho}$, τ 为紊流切应力, ρ 为气体密度; γ 为气体运动黏度。

若气体流过某截面 A 的平均流速为 \bar{V} , \bar{V} 可用以下积分表示:

$$\bar{V} = \frac{1}{A} \iint_A V_y dA_y$$

结合式(1)有:

$$\frac{\bar{V}}{V_*} = 0.816 \times 8.7 \left[\frac{r_0 V_*}{\gamma} \right]^{\frac{1}{7}} \quad (2)$$

式中: r_0 为圆管半径。

2 测点位置的选择

为了减少测试工作量,所取测点数应尽可能少。在半径方向若取两点: $y_1 = ar_0, y_2 = br_0$, 其

中 a, b 为待定系数,代入式(1)并整理有:

$$\frac{V_{y1} + V_{y2}}{V_*} = 8.7 \left[\frac{r_0 V_*}{\gamma} \right]^{\frac{1}{7}} (a^{\frac{1}{7}} + b^{\frac{1}{7}})$$

式中: V_{y1}, V_{y2} 为 y_1, y_2 处的气体流速。

由式(2)得:

$$\bar{V} = c(V_{y1} + V_{y2}) \quad (3)$$

式中: $c = 0.816 / (a^{\frac{1}{7}} + b^{\frac{1}{7}})$ 。

测点的确定常用中间矩形法和切比雪夫积分法。当测点数较少时宜采用切比雪夫积分法,用它计算的通过管道截面的流量的精度比用中间矩形法高。

对于环形面积,用切比雪夫积分法确定测点位置的公式如下:

$$y_i = \sqrt{\frac{r_2^2 - r_1^2}{2} t_i + \frac{r_2^2 - r_1^2}{2}}$$

式中: r_2 为圆环外半径; r_1 为圆环内半径。

对于圆柱面积 $r_1 = 0, r_2 = r_0$ 。取 2 个测点时,由切比雪夫系数 t_i 表查得: $t_{1,2} = \pm 0.577$ 。对于某实验机 $r_0 = 18.5 \text{ mm}$, 求取: $y_1 = 16 \text{ mm}, y_2 = 8.5 \text{ mm}$, 则 $a = 0.865, b = 0.432$ 。

3 计算各缸充气量和充气效率

因为 V_{y1}, V_{y2} 及 \bar{V} 都为曲轴转角 φ 的函数,式(3)可变为以下形式:

$$\bar{V}(\varphi) = c[V_{y1}(\varphi) + V_{y2}(\varphi)] \quad (4)$$

单位时间的进气量可表示为:

$$\frac{dG}{dt} = A\rho(\varphi)\bar{V}(\varphi)$$

若认为在进气过程中温度基本不变,则测量截面上混合气体的密度可表示为: $\rho(\varphi) = \frac{p(\varphi)}{kT_p}$ 。

其中 $p(\varphi), T_p$ 分别为测点处的压力和温度。

在进气开闭角为 240° CA 内,若计算步长 $\Delta\varphi = 1^\circ \text{ CA}$, 由式(4)并且 $d\varphi = 6ndt$, 得气缸实际进气量 G_L 的数值计算形式为:

$$G_L = \frac{cA}{6n} \sum_{j=1}^{240} \left\{ \frac{p(\varphi_j)}{RT_p} [V_{y1}(\varphi_j) + V_{y2}(\varphi_j)] \right\} \Delta\varphi$$

式中: n 为发动机转速。

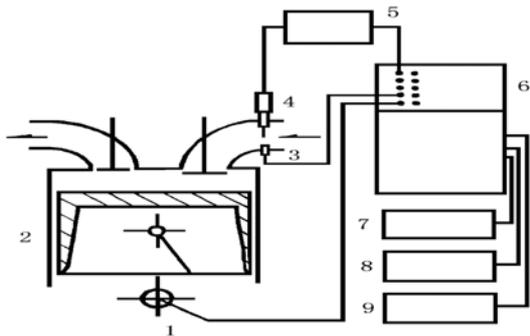
充气效率 $\eta_v = G_L/G_0$; 单缸理论充气量 $G_0 = \frac{p_0 V_H}{RT_0}$, 其中 p_0 、 T_0 、 V_H 分别为大气压力、大气温度、单缸工作容积, 则:

$$\eta_v = \frac{cAT_0}{6np_0V_H T_p} \sum_{j=1}^{240} p(\varphi_j) [V_{v1}(\varphi_j) + V_{v2}(\varphi_j)] \Delta\varphi$$

可知, 只要测得各缸进气歧管某截面处的流速和压力随曲轴转角的变化规律及管内温度等参数, 即可计算出单缸充气量和充气效率。

4 测量及数据结果分析

测试系统框图如图 1 所示。在拖动状态下进行测量, AVL PUMA3 内燃机自动化实验台和 AVL-ELEN APA 090/19-2/5 变频交流测功器与某六缸内燃机连接。用美国 TSI 公司生产的 IFA100 热线/热膜风速仪和 TSI 1211-20 传感器测出流速信号; 用奥地利 AVL657 内燃机数据采集分析系统和 AVL12QP250ca 石英压电低压传感器及 AVL414LP 低压测量标定系统测出进气歧管低压波信号。用德国 AERZEN 公司的 Za11.4 转子气体流量计同时测出整机空气消耗量。测量计算和数据曲线输出均在 PC 计算机上进行。



1-曲轴转角信号发生器; 2-内燃机; 3-进气歧管压力石英传感器; 4-测速探针; 5-IFA100 热线/热膜风速仪; 6-AVL657 内燃机数据采集分析系统; 7-PC 计算机; 8-打印机; 9-绘图仪

图 1 流速-压力波法测量装置简图

Fig. 1 Sketch map of measurement apparatus based on velocity-pressure wave method

图 2 表示内燃机在不同节气门开度下被测量截面的平均流速和进气压力波。图中的横坐标标值线: TDC 为上止点, BDC 为下止点, IO 为进气门开启角, IC 为进气门关闭角, EC 为排气门关闭角。各转速工况下各缸充气效率的试验测定结果如图 3 所示。

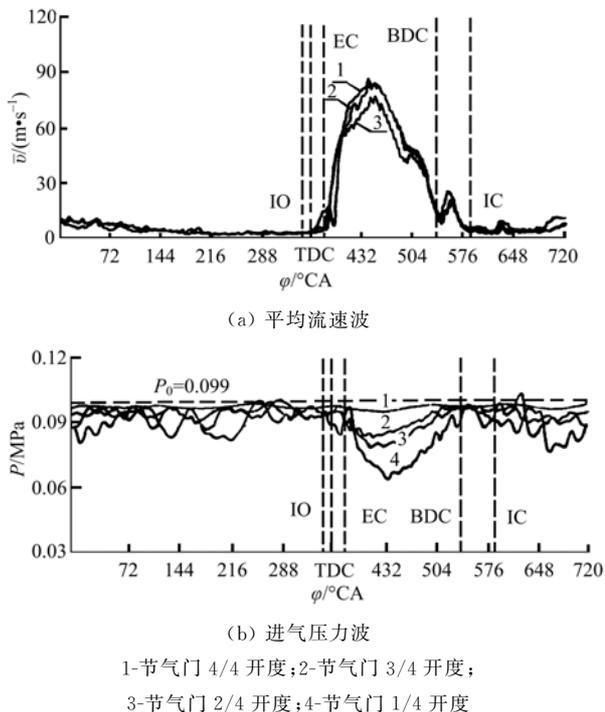
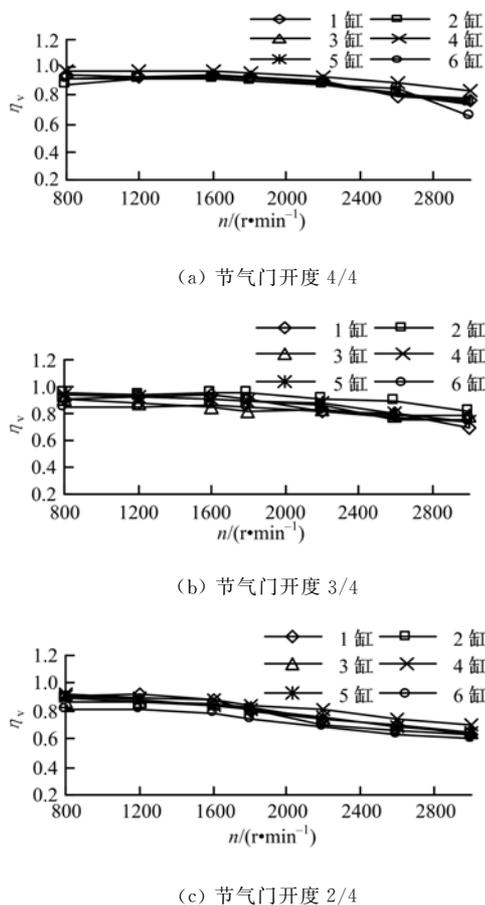


图 2 不同节气门开度测量截面平均流速和进气压力波

Fig. 2 Average flow velocity and intake pressure waves in measuring section at different throttle valve openings



(c) 节气门开度 2/4

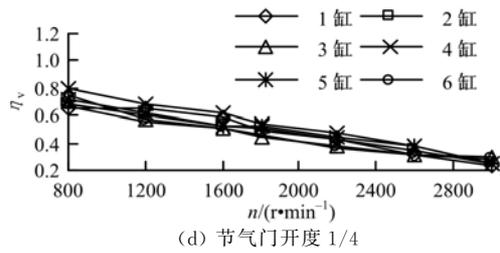
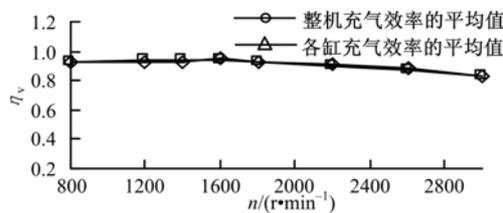
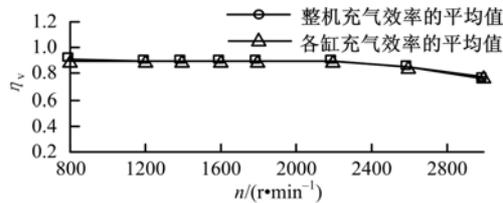


图 3 不同节气门开度和不同转速下各缸的充气效率
Fig. 3 Volumetric efficiencies of each cylinder at different throttle valve openings and engine speeds

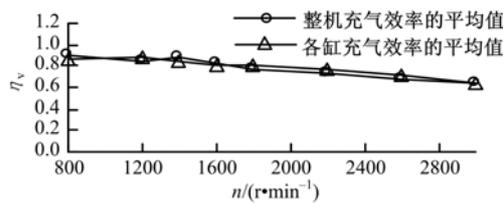
在测量多缸充气效率的同时测取了各工况下的整机充气效率。各缸充气效率的平均值 $\bar{\eta}_v$ 与相应工况下整机充气效率 η_{vm} 的对比曲线见图 4。



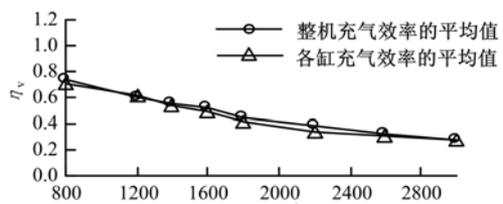
(a) 节气门开度 4/4



(b) 节气门开度 3/4



(c) 节气门开度 2/4



(d) 节气门开度 1/4

图 4 不同节气门开度整机充气效率的平均值和
各缸充气效率的平均值
Fig. 4 Average volumetric efficiencies of whole engine and each cylinder at different throttle valve openings

从图 4 可知,在各开度各转速下整机充气效率的平均值与各缸充气效率的平均值之间具有很好的 consistency,最大相差 4%。该方法能够反映实际的、具有不定常流动特点的内燃机各缸进气情况。

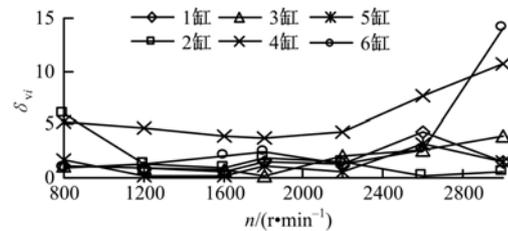
图 5 为可用于分析评价该内燃机各缸进气不均匀的气缸充气效率不均匀度和整机充气效率不均匀度。气缸充气效率不均匀度定义为:

$$\delta_{vi} = \left| \frac{\eta_{vi} - \eta_{vm}}{\eta_{vm}} \right| \times 100\%$$

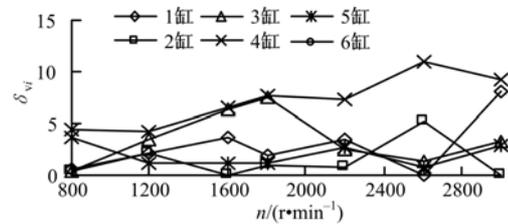
式中: η_{vi} 为某工况第 i 缸充气效率。

整机充气效率不均匀度定义为:

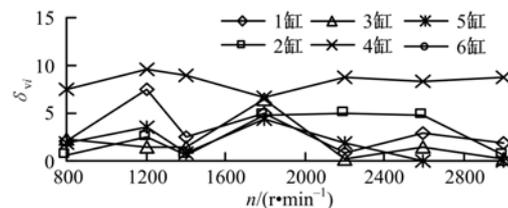
$$\delta_v = \frac{1}{\eta_{vm}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_{vi} - \eta_{vm})^2} \times 100\%$$



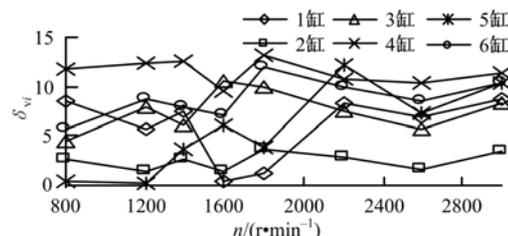
(a) 节气门开度 4/4



(b) 节气门开度 3/4



(c) 节气门开度 2/4



(d) 节气门开度 1/4

图 5 不同节气门开度各缸充气效率不均匀度
Fig. 5 Unevenness of volumetric efficiencies of each cylinder at different throttle valve openings

式中: N 为气缸数。

从图 5 中明显看出第 5 缸充气最好, 而第 4 缸充气最差。从图 6 中看出, 该发动机大负荷、高转速时, 由于气流的动力效应影响, 使进气均匀性差, δ_v 最大值为 7.5%。而在大负荷、低转速时, 进气均匀性得到改善, δ_v 最大值为 3.9%。在部分负荷(尤其是在小负荷)时进气脉动性大, 因此进气均匀性差, δ_v 最大值为 9.1%。

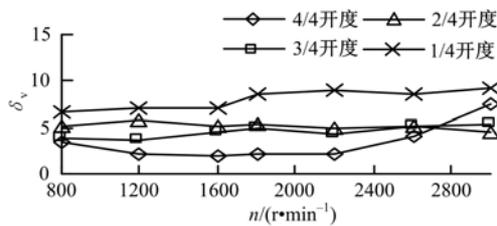


图 6 不同节气门开度整机充气效率不均匀度

Fig. 6 Unevenness of volumetric efficiencies of whole engine at different throttle valve openings

5 结束语

作者给出了进气歧管截面速度分布规律的假设, 并在此基础上提出了一种用来测量多缸内燃机单缸充气量和充气效率的流速-压力波方法, 实验证明该测量方法是可行的。管内稳定流动沿界面径向的速度分布规律适用于内燃机进气歧管的脉动流动, 实验结果令人满意, 并可以用于考察各缸进气的不均匀程度。

参考文献:

- [1] Algieri Angelo, Bova Sergio. Influence of valve-wall distance on the intake flow in high performance I. C. E[C]//SAE Paper 2004-01-1922.
- [2] Korman Matjaz, Hirz Mario, Eichlseder Helmut. Flow and engine test bench development of crank-case supercharged four stroke engine with oil separating system[C]//SAE Paper 2004-32-0002.
- [3] Gangurde P R, Aschokarajan G, Pati A V L. Simulation of intake system for two cylinder naturally aspirated in-direct injection engine [C] // SAE Paper 2004-32-0030.
- [4] De Vita A, Andreassi L, Di Angelo L. Experimental and computational study for the optimization of race car intake air flow[C]//SAE Paper 2001-01-1852.
- [5] Richter M, Franke A, Aldén M. Optical diagnostics applied to a naturally aspirated homogeneous charge compression ignition engine[C]//SAE Paper 1999-01-364.
- [6] Hinze P C, Miles P C. Quantitative measurements of residual and fresh charge mixing in a modern SI engine using spontaneous Raman scattering[C]//SAE Paper 1999-01-1106.
- [7] Dorriah L P, Christ A R. Advances in air charging technology[C]//SAE Paper 972675.
- [8] 盛森芝, 沈熊, 舒玮. 流速测量技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 1987.