

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.006

基于油耗和空燃比的汽油机充气效率测定方法*

万里平 蒋炎坤 郭岩 张建平 刘欣

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘要:从充气效率的定义出发,提出了基于油耗和空燃比测量结果的汽油机充气效率测定方法。利用汽油机稳态工况下油耗量和空燃比计算得到相应的进气量,再根据定义直接计算充气效率。推导了基于油耗和空燃比的充气效率计算公式及误差分析公式。针对配备有ZH600发动机电控系统的ZS157FMI-3型发动机,先后设计了喷油器流量系数标定试验系统以及油耗和空燃比测试系统,通过测定平均油耗和瞬态油耗并结合空燃比测量对该型发动机的充气效率进行了测定。充气效率的测量结果表明,在同一试验条件下,采用两种油耗测试方法测得的充气效率差异很小;充气效率测试的误差分析结果表明,在本试验设备测量精度范围内,所得到的充气效率相对误差很小(基本在0.5%以下),具有很高的测量精度。此外,由于该充气效率测试方法克服了压力波法及流速-压力法的固有缺陷,在理论上的测量精度和对燃料种类的适应性方面,均具有明显的优越性。

关键词:汽油机 充气效率 油耗 空燃比 测量精度

中图分类号:TK412 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1298(2014)03-0032-05

引言

发动机充气效率直接影响其功率、扭矩特性,是衡量发动机动力的重要指标。测定发动机最大节气门开度下的充气效率特性,能够获取该发动机各个转速下的动力性能,从而为其性能优化提供参考。此外,采用发动机CAE软件进行发动机性能模拟时,充气效率标定是计算模型标定过程中最为基础和关键环节,直接影响模拟计算精度。

发动机充气效率受多种因素影响,其测量的难点一方面在于进气过程的脉动特性;另一方面在于流量测量装置难以在进气管内安装,并且将不可避免地影响进气过程^[1]。目前已有的各种充气效率测量方法,如流量法、压力波法以及流速-压力法等,在使用过程中对试验装置以及试验条件的要求较高,限制了其推广运用。在充气效率的众多影响因素中,邓文^[2]详细讨论了壁温、缸温以及管道摩擦等因素对充气效率的影响,供油对充气效率测量及计算的重要影响却常常被忽略。

本文针对已有充气效率测定方法存在装置复杂、测量精度不高和燃料适应性有限等问题,基于充气效率基本概念和误差分析方法,对采用常规测试设备测定汽油机充气效率的可行性进行研究,以达

到简便、快速和有效获取高精度汽油机充气效率数据的目的。

1 充气效率测量的理论基础

1.1 充气效率的定义

发动机充气效率(或称容积效率、充量系数等) η_v 为衡量四冲程发动机换气过程完善程度的指标,定义为进气冲程中,进气管的空气体积流率与活塞排开的空气体积流率之比^[3],即

$$\eta_v = \frac{2\dot{m}_a}{\rho_{a,i}V_d n} \times 100\% \quad (1)$$

或定义为进气过程的缸内总进气量在进气管状态下的体积与发动机排量之比^[3-4],即

$$\eta_v = \frac{m_a}{\rho_{a,i}V_d} = \frac{V_{a,i}}{V_d} \quad (2)$$

式中 m_a ——循环进气质量

\dot{m}_a ——进气过程中进气的质量率

$\rho_{a,i}$ ——进气管内空气密度

V_d ——发动机排量

$V_{a,i}$ ——循环进气量在进气管状态下的体积

n ——发动机转速

对于自然进气发动机,定义中的进气管状态可取为发动机工作的大气环境。

收稿日期:2013-03-28 修回日期:2013-05-08

*教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

作者简介:万里平,博士生,主要从事发动机电控系统及发动机性能优化研究,E-mail:wlphust@gmail.com

通讯作者:蒋炎坤,教授,博士生导师,主要从事发动机性能优化及燃烧过程数值模拟研究,E-mail:jkxust@mail.hust.edu.cn

实际发动机的充气效率受多种因素影响,主要分为燃油因素、发动机结构因素和发动机使用工况^[3]。充气效率主要受发动机转速、负荷、进气管壁温、缸体壁温、燃油(燃油物性^[5-6]及温度等)及燃油喷射(喷射压力及燃油雾化程度等)等的影响,因而实际发动机充气效率的测量需要综合考虑以上各种因素的影响。

1.2 充气效率的基本测试方法

由充气效率的定义可知,针对确定的发动机结构(排量一定),充气效率测量最终归结于循环进气量的测量。

常见的进气量测量方法有:流量法、压力波法和流速-压力波法等。流量法是一种直接测量方法,即采用流量计(如节流式压差流量计)直接测量循环进气量^[7];压力波法通过测定进气过程中进气门前后的压力波,并假设气流为准稳态流动,由气门流通截面上的流速和密度来计算循环进气量^[1,8-9];流速-压力波法即测量进气过程中进气压力波和进气歧管截面上气体平均流速来计算得到循环进气量^[1,10]。

1.3 基于油耗和空燃比测量的充气效率测定方法

假定发动机运行在某一稳态工况下,空燃比通过闭环控制的方式保持在一极小的范围内变动。取大气环境、温度及压力为参照,即

$$V_{a,i} = \frac{m_a RT}{Mp} \quad (3)$$

式中 R ——理想气体常数

T ——大气温度 p ——大气压力

M ——空气平均摩尔质量

发动机排量 V_d 为

$$V_d = \frac{\pi d^2 l}{4} \quad (4)$$

式中 d ——气缸缸径 l ——气缸行程

定义 α 为此时空燃比, m_f 为循环供油量,根据式(2)可得

$$\eta_v = \frac{4\alpha m_f RT}{\pi d^2 l Mp} \quad (5)$$

式中,空燃比 α 、循环供油量 m_f 均为该工况下的平均值。

为考虑 α 和 m_f 测量误差对最终结果的影响,将式(5)写成

$$\eta_v(\alpha, m_f) = \frac{4\alpha m_f RT}{\pi d^2 l Mp}$$

若在某次测量中,循环油耗量 m_f 和空燃比 α 分别产生了 Δm_f 和 $\Delta \alpha$ 的误差,则根据误差传播规律,充气效率计算产生的误差 $\Delta \eta_v$ 为

$$\Delta \eta_v = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_v}{\partial m_f} \Delta m_f\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_v}{\partial \alpha} \Delta \alpha\right)^2} \quad (6)$$

相对误差 $\delta \eta_v$ 可写为

$$\delta \eta_v = \frac{\Delta \eta_v}{\eta_v} \quad (7)$$

2 试验测定方法

针对 ZS157FMI-3 型单缸汽油机^[11](基本参数见表1),采用基于油耗测量和空燃比测量的方法测定其在最大负荷工况部分转速点的充气效率特性。

表1 ZS157FMI-3 型发动机基本参数

Tab.1 Basic parameters of ZS157FMI-3 engine

参数	数值
排量/mL	125.0
气缸直径/mm	57.0
气缸行程/mm	49.5
压缩比	10.2
气缸数	1
气门数	2
排气门开启角度/(°)	30
排气门关闭角度/(°)	0
进气门开启角度/(°)	2.5
进气门关闭角度/(°)	20
最大功率(转速)/kW($r \cdot \min^{-1}$)	7.3(8 500)
最大扭矩(转速)/($N \cdot m$)($r \cdot \min^{-1}$)	9.0(7 000)

2.1 油耗测量

循环油耗量可以通过测量发动机某段时间内的总油耗量算得,也可以通过获取发动机运行过程中喷油脉宽与喷油器流量系数算得。

2.1.1 喷油器流量系数测定

对于电喷发动机而言,在获取喷油器流量系数后,获取循环喷油脉宽即可方便、精确地获取实际循环油耗量。对于本次试验所使用的 DH020M-1-83 型喷油器,结合自行设计的电喷控制系统,依据《汽油发动机电磁阀式喷油器总成技术条件》,按照表2 参数进行流量检测。其标定试验系统见图1。

表2 喷油器流量检测参数

Tab.2 Calibration parameters of injector

参数	数值
燃油压力/kPa	300
驱动电压/V	12
喷射频率/Hz	100
喷射持续时间/ms	2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0
喷射次数	3 000

2.1.2 直接油耗测量

在台架试验过程中,通过油耗仪直接测定一段时间内的总燃油消耗量,再根据转速计算出其循环

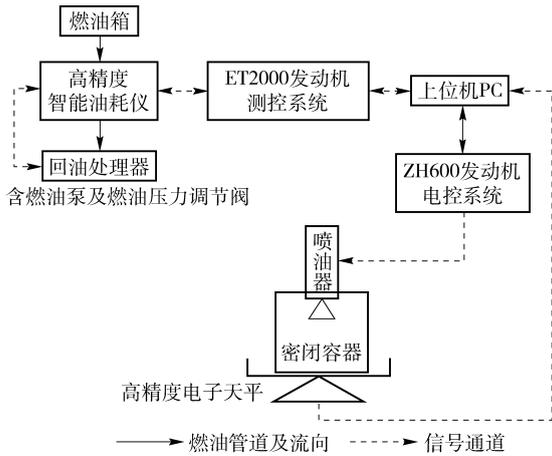


图1 喷油器标定试验系统原理图

Fig. 1 Injector calibration system

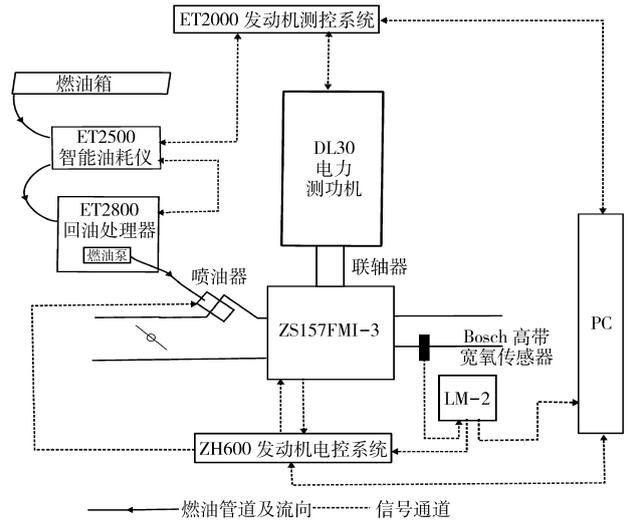


图2 测试系统原理图

Fig. 2 Basic structure of test system

油耗量。

2.2 空燃比测量

空燃比测量采用 LM-2 数字式空燃比测试仪, 其基本参数见表 3。

表3 测试设备性能

Tab.3 Parameters of equipments

种类	参数	数值
ET2500 智能油耗仪	测量范围/kg	0 ~ 2
	测量精度/% F. S	± 0.4
	测量时间/s	1 ~ 99
	响应时间/ms	< 80
LM-2 数字空燃比测试仪	空燃比测量精度	± 0.05
	过量空气系数测量精度	± 0.005
ZH600 发动机电控系统	喷油脉宽控制精度/ms	± 0.005

2.3 试验系统组成及试验流程

基于油耗和空燃比测量的单缸汽油机充气效率测试系统见图 2, 油耗和空燃比测试设备基本性能见表 3。

试验按照《GB/T 17692—1999 汽车用发动机净功率测试方法》中外特性试验要求进行, 试验转速范围为 4 000 ~ 8 500 r/min。试验过程中, 在记录相关数据前, 为保证空燃比测量数据的有效性, 应使发动机空燃比处于闭环控制状态, 保持空燃比的相对稳定。

此外, 基于 GT-Power 建立试验用发动机的一维仿真模型。模型中进排气系统的结构参数为实测获得, 气门升程规律和气门流量系数等由厂家提供。在按照 GT-Power 使用手册^[12]完成包括进气压力波、排气压力波标定后, 结合试验结果进行充气效率标定。

3 试验结果及分析

3.1 喷油器流量系数测定结果及分析

在同样条件下, 分别进行了 4 次测定试验, 最终

的流量系数根据 4 次试验的结果求平均得到, 测定结果见图 3。

由图可知, 4 次试验过程中, 该型喷油器在各个喷油持续期下的总喷油质量基本相同, 说明该喷油器的流量一致性比较好; 此外, 该喷油器在各个喷油持续期下的流量系数基本不变, 并且与厂家提供的参考值(1.23 ~ 1.30 mg/ms)相符。

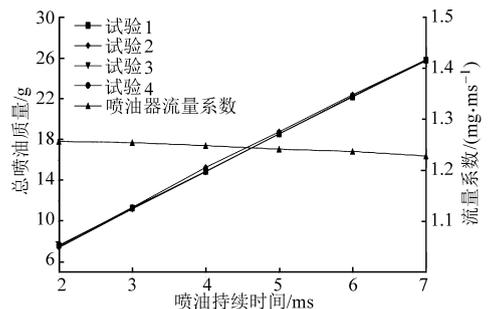


图3 喷油器流量系数测定结果

Fig. 3 Calibration results of injector

3.2 充气效率的测定结果及误差分析

试验测得的空燃比和循环油耗量见图 4。其中, 循环油耗量 m_{f1} 为采用喷油器喷油脉宽与流量系数算得, 循环油耗量 m_{f2} 为根据试验过程中相应工况下总油耗量算得。图 5 为由测得油耗和空燃比计算

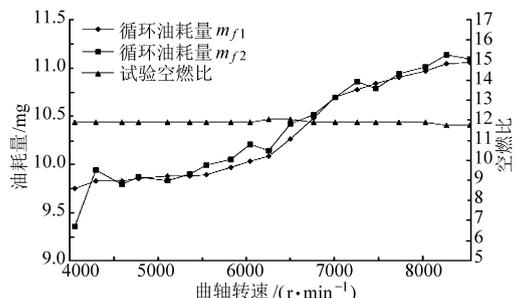


图4 循环油耗量及空燃比测试结果

Fig. 4 Test results of fuel consumption per cycle and AFR

得到的发动机充气效率曲线,充气效率 φ_1 和充气效率 φ_2 分别对应于循环油耗量 m_{j1} 和循环油耗量 m_{j2} 。

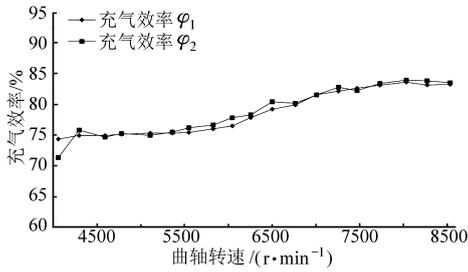


图 5 ZS157FMI-3 型发动机充气效率测试结果

Fig. 5 Charge-efficiency curve of ZS157FMI-3

由以上测试结果可知,两种油耗测试方法的测量结果基本相同。根据测量仪器及测量值对充气效率测量的误差分析结果见表 4,其中 φ_1 和 φ_2 分别对应于两种油耗测试方法测得的充气效率。表中误差值是依据仪器的极限测量偏差算得,因而表中充气效率的计算误差也应看作其极限误差。 φ_1 绝对误差在 0.32% ~ 0.36% 范围内,相对误差在 0.42% ~ 0.43% 范围内; φ_2 绝对误差在 0.24% ~ 0.5% 范围内,相对误差在 0.28% ~ 0.70% 范围。相比较而言, φ_1 的测量精度更高,且极限误差的一致性较好,这主要是由于采用直接油耗测量方法计算发动机循环油耗时,测量的时间相对较短,因而干扰以及随机误差对其影响较为明显,而通过喷油脉宽和喷油器流量系数计算得到的循环油耗的精度主要取决于喷油器流量系数标定精度,其极限误差一致性主要受

表 4 充气效率测试的误差分析

Tab. 4 Error estimation of charge-efficiency test

转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	$\varphi_1 /$ %	$\Delta\varphi_1 /$ %	$\delta\varphi_1 /$ %	$\varphi_2 /$ %	$\Delta\varphi_2 /$ %	$\delta\varphi_2 /$ %
8 537	83.32	0.36	0.43	83.59	0.24	0.28
8 273	83.23	0.36	0.43	83.91	0.24	0.29
8 035	83.68	0.35	0.42	84.01	0.25	0.30
7 733	83.19	0.35	0.42	83.47	0.26	0.32
7 471	82.70	0.35	0.42	82.30	0.27	0.33
7 259	82.22	0.35	0.42	82.85	0.28	0.34
7 009	81.63	0.35	0.42	81.61	0.29	0.36
6 765	79.97	0.34	0.42	80.23	0.30	0.37
6 501	79.28	0.33	0.42	80.49	0.32	0.39
6 255	77.89	0.33	0.42	78.35	0.33	0.42
6 044	76.55	0.33	0.42	77.89	0.34	0.43
5 825	76.06	0.32	0.42	76.70	0.35	0.46
5 547	75.48	0.32	0.42	76.24	0.37	0.48
5 359	75.38	0.32	0.42	75.53	0.38	0.50
5 105	75.38	0.32	0.42	75.01	0.40	0.53
4 777	75.19	0.32	0.42	75.31	0.43	0.57
4 588	74.99	0.32	0.42	74.72	0.44	0.59
4 292	74.99	0.32	0.42	75.86	0.47	0.62
4 053	74.40	0.32	0.43	71.39	0.50	0.70

该型喷油器流量一致性的影响;而从前述喷油器标定试验结果来看,喷油器流量系数标定具有较高的精度,其流量一致性较好。

尽管两种油耗测试方法测得充气效率存在一定差异,但在目前的仪器精度下,两种油耗测试方法测得的充气效率值均具有较高的测量精度。因而,尽管未将该方法测得充气效率与其他方法比较,但是所得结果仍然可信。

图 6 为根据 GT-Power 模型计算得到的各个燃空比 (FAR) 下该型发动机的充气效率曲线。由图可知,燃空比由 0 (对应于倒拖工况) 到 0.070 (对应于理论空燃比工况) 变化时,充气效率曲线的差异较大,相对误差基本在 10% 以上,最大相对误差超过 25%;燃空比从 0.070 到 0.084 (对应于加浓运行工况) 变化时,充气效率曲线基本吻合。这说明供油量对充气效率的影响不可忽略,其影响随着燃空比的增加而减小,到理论燃空比附近时,其影响在 1% 以下,基本可以忽略。由此可知,尽管燃空比在正常范围内对充气效率影响很小,供油对充气效率的影响仍然不可忽略,更不能在倒拖的情况下测定发动机充气效率。

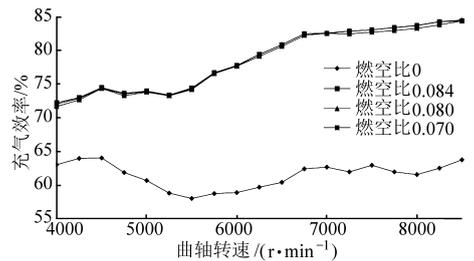


图 6 各燃空比下发动机充气效率曲线

Fig. 6 Charge-efficiency curves under different

FAR conditions

值得注意的是,在采用压力波法以及流速-压力法测定发动机充气效率时,由于不能忽略供油,实际测量时的对象应为混合气,而非进气(空气)量,由此将不可避免地带来误差。假定油气的分子量为 M_{fuel} ,空气分子量为 M_{air} ,测定时发动机实际燃空比为 l_0 ,则采用以上方法对最终结果带来的相对误差 δ 为

$$\delta = \frac{M_{air}}{M_{fuel}} l_0 \times 100\% \quad (8)$$

以燃空比 l_0 为 0.080、空气分子量 M_{air} 为 29、汽油平均分子量 M_{fuel} 为 114 计算,相对误差在 2% 以上;若是以气体燃料如甲烷 (CH_4) 为例,其相对误差将在 10% 以上。产生的误差是该类方法的固有属性,而本文提出的基于油耗和空燃比的测量方法则可以有效地避免类似问题。

4 结论

(1) 基于油耗和空燃比的充气效率测试方法,原理简单,理论基础坚实,其测量过程能够通过常见的内燃机测试设备完成。

(2) 两种油耗测试方法测得的充气效率基本吻合。采用该方法测取发动机充气效率时,油耗测量可根据实际情况选择一种即可。

(3) 本文提出的基于油耗和空燃比的充气效率

测量方法,在仪器测量精度范围内,具有很高的精度,测量结果可靠。

(4) 尽管在实际空燃比附近,空燃比对充气效率的影响有限,但是供油对充气效率的影响仍然不可忽略。

(5) 相较压力波法和流速-压力法,本方法具有更高的理论精度,且完全能够适应不同种类的燃料,因而应用前景更广。

参 考 文 献

- 李善祯,褚雪征,陆晓军,等. 多缸内燃机单缸充气效率的测定[J]. 内燃机工程,1992,13(3):18-26.
Li Shanzhen, Zhu Xuezheng, Lu Xiaojun, et al. The measurement of individual cylinder volumetric efficiency for multi-cylinder engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 1992,13(3): 18-26. (in Chinese)
- 邓康耀. 发动机循环模拟中有关参数对充气效率的影响度[J]. 上海交通大学学报,1998,32(7):123-126.
Deng Kangyao. Effect of related parameters in engine cycle simulation on volume efficiency[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1998,32(7):123-126. (in Chinese)
- Heywood J. Internal combustion engine fundamentals[M]. New York: McGraw-Hill, 1988.
- 周保龙,刘巽俊,高宗英. 内燃机学[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,1999.
- 郑亮,李格升,董健. 气体燃料对内燃机充气效率的影响[J]. 内燃机,2011(4):51-53,56.
Zheng Liang, Li Gesheng, Dong Jian. Impact of gas fuel on the volumetric efficiency in internal combustion engines[J]. Internal Combustion Engines, 2011(4): 51-53,56. (in Chinese)
- 董健,李格升,黄勇. 乙醇重整燃料对内燃机充气效率的影响[J]. 内燃机,2009(1):29-31,40.
Dong Jian, Li Gesheng, Huang Yong. Effect of reformed-ethanol fuel on the volumetric efficiency in IC engines[J]. Internal Combustion Engines, 2009(1): 29-31,40. (in Chinese)
- 侯存满. 差压式流量计在内燃机充气效率测量中的误差分析[J]. 承德石油高等专科学校学报,2009,11(2):26-28.
Hou Cunman. Error analysis of measuring the internal combustion engine air with TY1151 current capacity transmitting instrument[J]. Journal of Chengde Petroleum College, 2009,11(2): 26-28. (in Chinese)
- 齐放,杨卫光. 内燃机充气效率测量方法的研究与探讨[J]. 实验技术与管理,2000(1):31-34.
- 程鹏,孙万臣,刘金山,等. 测量多缸内燃机单缸充气效率的压力波方法[J]. 内燃机学报,2006,24(6):537-542.
Cheng Peng, Sun Wanchen, Liu Jinshan, et al. Pressure wave method for measuring volumetric efficiency of individual cylinder of multi-cylinder IC engine[J]. Transactions of CSICE, 2006,24(6): 537-542. (in Chinese)
- 程鹏,刘忠长,郭英男,等. 测量多缸内燃机单缸充气量的流速-压力波方法[J]. 吉林大学学报:工学版,2007,37(1):69-73.
Cheng Peng, Liu Zhongchang, Guo Yingnan, et al. Velocity-pressure wave measurement method of individual cylinder charging for multi-cylinder IC engine[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007,37(1): 69-73. (in Chinese)
- Wan L, Jiang Y, Hong G, et al. Development of electronic control system for a single cylinder motorcycle engine[C]. SAE Paper 2012-01-0508, 2012.
- Morel T. GT-Power user's manual—Version 6.2[M]. Gamma Technologies, 2006.
- 刘敬平,杨汉乾,赵智超,等. 基于压力波动原理的发动机气体动力学相似性[J]. 内燃机学报,2011,29(4):313-320.
Liu Jingping, Yang Hanqian, Zhao Zhichao, et al. Engine gas dynamic similarity based on fundamental pressure wave actions[J]. Transactions of CSICE, 2011,29(4): 313-320. (in Chinese)
- 孙晓辉. 柴油机进气过程的数值仿真研究[D]. 济南:山东大学,2011.
Sun Xiaohui. Study on numerical simulation of diesel engine intake process [D]. Ji'nan: Shandong University, 2011. (in Chinese)
- 石来华. 基于GT-POWER的车用汽油机动力性能优化[D]. 长沙:湖南大学,2009.
Shi Laihua. Optimized dynamical performance of vehicle gasoline engine by GT-POWER[D]. Changsha: Hunan University, 2009. (in Chinese)
- 许元默,帅石金,王建昕. 进气歧管对电喷汽油机充气效率的影响[J]. 内燃机工程,2004,25(1):27-30,34.
Xu Yuanmo, Shuai Shijin, Wang Jianxin. Effects of intake manifold on volume efficiency of EFI gasoline engines[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004,25(1): 27-30,34. (in Chinese)

Abstract: In order to establish break-up model of multi-hole injection on gasoline direct injection engine, an analysis and evaluation on FIPA model, Huh Gosman model and KH – RT model has been done. The second break-up model was built for gasoline direct injection in cylinder, and the primary break-up particle size distribution formula was also built based on injection pressure. So the break-up model of gasoline direct injection in cylinder was established. At last, by carrying out capacity spray experiments, gasoline free spray experiments were done to verify the reasonability of the established model. It was found that Huh Gosman model has the best simulation results compared with other models. The droplets break relatively too fast with FIPA model and too slowly with KH – RT under the same simulation condition. After modifying Huh Gosman model, the simulation results showed close to the practical ones. At last, free sprays under different injection pressures were simulated with the above established model. Calculation results match well with the experimental results.

Key words: Gasoline direct injection engine Multi-hole injector Break-up model Free spray

(上接第 36 页)

Gasoline Engine Charge-efficiency Measuring Based on Fuel Consumption and AFR Test

Wan Liping Jiang Yankun Guo Yan Zhang Jianping Liu Xin

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This essay describes a new method, based on fuel consumption and AFR (Air-fuel ratio) measuring, to acquire the charge efficiency of internal combustion engine. In the method, the fuel consumption and AFR under steady condition are used to calculate the air inlet, and the air charge efficiency is calculated by definition. The equations of air charge efficiency and error analysis were built on fuel consumption and AFR. An injector flux calibration & testing system and a measuring system of fuel consumption and AFR were designed for a ZS157FMI – 3 motor equipping with ZH600 engine electronic control system. The charge efficiency was tested through measuring mean and transient fuel consumptions and AFR. The efficiency test result indicates that the two methods of measuring fuel consumption have a good consistence for charge efficiency calculation, and the error estimation of the test results demonstrates that the efficiency results calculated from the fuel consumption and AFR have high accuracy, with the relative error below 0.5%. Since the charge efficiency acquiring way overcomes some inherent drawbacks of the common methods such as pressure wave method and velocity-pressure method, it offers more measure accurate in theory and better adaptability to different fuel types.

Key words: Gasoline engine Charge efficiency Fuel consumption AFR Accuracy