

单缸发动机进气特性仿真与实验研究

叶 昌, 张振东, 刘 钰, 吴后平

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 分析了单缸发动机进气系统的工作原理,通过台架实验研究了进气管内气体的剧烈波动现象.在此基础上,讨论了单缸发动机进气管内气体剧烈波动现象的产生原因.运用理想气体方程、速度-密度方程和质量守恒方程建立了进气管内气体运动的动力学模型,通过 Matlab/Simulink 软件对该系统进行数值仿真.台架实验对比分析表明,基于速度-密度法的单缸发动机进气系统仿真模型对于进气量的测量具有较高的准确性,并可以在进气压力波动剧烈的情况下较好地反映出循环进气量.

关键词: 单缸发动机;进气特性;仿真分析;速度-密度法

中图分类号: TK 417.1 **文献标志码:** A

Simulation and Experimental Research on Performance of Single-Cylinder Engine Intake System

YE Chang, ZHANG Zhen-dong, LIU Yu, WU Hou-ping

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The working principle of a single-cylinder engine intake system was deeply analyzed, and the gas fluctuation phenomenon in intake system was confirmed by working bench test. On this basis, the generating mechanism of gas fluctuation phenomenon in the single-cylinder engine intake system was deeply discussed. By virtue of the ideal gas equation, the speed-density equation and the mass conservation equation an intake gas dynamics model for the single-cylinder engine was founded. The Matlab/Simulink software was used to simulate the system. The comparative results between the numerical simulation and experiments show that the model for the single-cylinder engine intake system based on the speed-density method has a good accuracy. It can well reflect the intake value of the single-cylinder engine under volatile intake pressure.

Key words: *single-cylinder engine; intake system characteristics; simulation analysis; speed-density method*

收稿日期: 2013-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275309);上海市研究生教育创新基金资助项目(JWCXSL1202)

第一作者: 叶 昌(1988-),男,硕士研究生.研究方向:发动机电子控制技术. E-mail: yechang163@163.com

通讯作者: 张振东(1968-),男,教授.研究方向:发动机燃烧与排放控制. E-mail: usstzdz@126.com

进气量作为发动机控制系统中一项重要的参数,与喷油量共同为发动机不同工况提供最佳的燃油混合气,对发动机的动力性、燃油经济性以及排放性能具有重要的影响^[1-2].与多缸发动机相比,单缸发动机的进气过程由于受到较小的进气稳压腔、脉冲式的进气过程等因素影响,导致每个工作循环中进气道内的压力波动更为剧烈,很难精确对其进行测量^[3].目前,国内单缸发动机的控制策略大多采用传统的速度-开度算法,这种方法利用节气门开度和发动机转速决定发动机的喷油量,避免了进气压力波动对发动机喷油量造成的影响^[4].但这种方法的准确度受到了发动机制造公差、节气门体老化磨损等因素的影响,测量误差存在不可逆的偏移.此外,速度-开度算法的另一个缺点是需要对发动机进行大量的参数标定,导致开发过程繁琐^[5-6].本文通过台架实验对单缸发动机的进气系统特性进行分析,利用速度-密度法建立进气系统的数学模型并进行仿真,对进气量的测量方法展开研究.

1 单缸发动机进气过程分析

单缸发动机进气系统结构组成及内部气体运动过程如图1所示.考虑到单缸发动机的输出转速高、循环时间短,且受到体积制约,设计过程中研发人员一般将节气门体到进气门之间的进气道设计得结构紧凑.这种设计结构的优点是减小了进气阻力,增加了进气量,同时也提高了响应速度.但同时这种方法缺点也较明显,短小的稳压腔造成了进气道内气体波动剧烈,使得每循环进气量的测量难度增加.

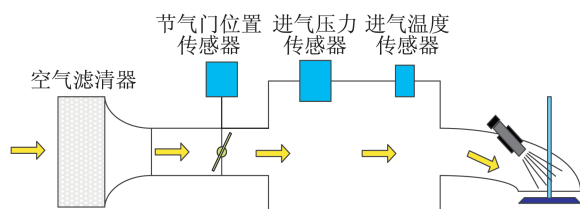


图1 进气道内气体运动过程

Fig.1 Gas movement in the single-cylinder engine intake system

台架实验选取某排量125 ml的单缸发动机作为研究对象,在转速为3 000 r/min和7 000 r/min的条件下,对进气道内气体压力的波动变化进行测量.实验结果如图2和图3所示,其中TP0、TP45和TP90分别表示节气门处于0°,45°和90°.

可以看出,发动机转速一定的情况下,进气道内

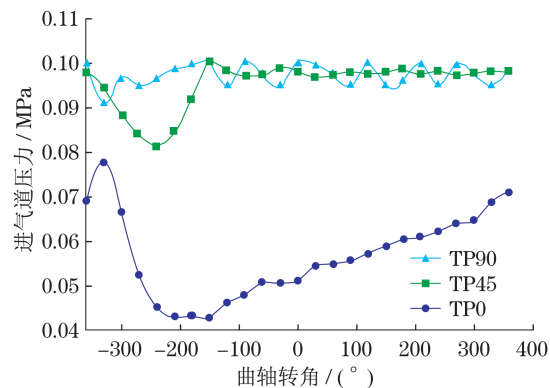


图2 3 000 r/min 进气压力变化

Fig.2 Intake pressure at 3 000 r/min

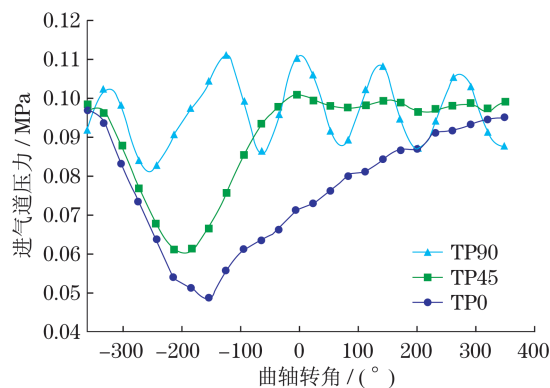


图3 7 000 r/min 进气压力变化

Fig.3 Intake pressure at 7 000 r/min

气体压力的波动随节气门开度的变大而越来越剧烈.而在节气门开度相同的情况下,由两图对比可以看出进气压力的波动随转速的增大而越来越剧烈.这是由于在发动机转速相同时,节气门开度小会增加进气阻力,同时减小了气体压力波反射叠加的效应;而在节气门开度大时,进气道达到最大流量,气体压力波反射作用也达到了最大,进而产生强烈的进气脉动现象.在节气门开度相同时,发动机转速越高,进气道内气体流速越快,产生的压力波反射作用也就越大,进气脉动现象越显著.

2 进气系统建模分析

2.1 数学模型分析

速度-密度法是一种利用发动机转速和进气压力来计算每循环进气量的方法,其测量原理如图4所示(见下页).当空气通过节气门体流入进气道内,位于节气门体后的压力传感器和温度传感器分别测量气体的压力值和温度值.结合发动机的输出转速并利用气体方程,即可算出进入发动机缸内的气体质量^[7-8].计算表达式为

$$\dot{m}_a = \frac{n}{120} V_d \rho \eta_v = \frac{n}{120} V_d \eta_v \frac{P_m}{RT_m} \quad (1)$$

式中, $\dot{m}_a$ 为发动机进气门处空气质量流量; n 为发动机转速; V_d 为发动机排量; ρ 为进气管空气密度; η_v 为充气效率; P_m 为进气管绝对压力; T_m 为进气管绝对温度; R 为气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$.

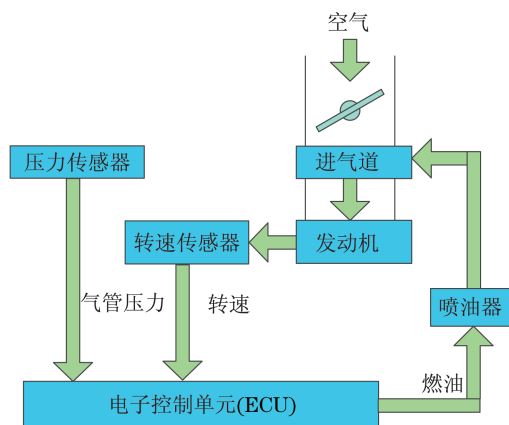


图 4 速度-密度法测量原理

Fig.4 Principle of the speed-density measurement

由质量守恒定律可知, 进气道内气体质量流量 $\dot{m}_m$ 为节气门处空气流量 $\dot{m}_t$ 与进气门处空气流量 $\dot{m}_a$ 之差, 其表达式为

$$\dot{m}_m = \dot{m}_t - \dot{m}_a \quad (2)$$

再由理想气体状态方程可知, 进气道内气体状态可以表示为

$$\dot{P}_m V_m = \dot{m}_m R T_m \quad (3)$$

式中, $\dot{P}_m$ 为进气管内的气体压力变化率; V_m 为进气道的体积.

节气门处的气体流动状态, 可由空气动力学推导. 假设此处气体流动符合一维可压缩流体, 其方程通过渐缩喷管的等熵流动, 可表示为

$$\dot{m}_a = C_t \frac{\pi}{4} D^4 \frac{P_a \sqrt{k}}{\sqrt{R T_a}} \beta_{1(\alpha)} \beta_{2(P_m)} + \dot{m}_{a0} \quad (4)$$

式中, C_t 为节气门气体通过率; D 为节气门直径; P_a 为周围大气压力; $k = 2k/(k-1)$, k 为空气比热; T_a 为周围大气温度; $\dot{m}_{a0}$ 为旁路的空气流量, 可取某一常数.

$$\beta_{1(\alpha)} = 1 - \cos(\alpha - \cos \alpha_0)$$

$$\beta_{2(P_m)} = \begin{cases} \sqrt{P_r^{\frac{2}{k}} - P_r^{\frac{k+1}{k}}}, & P_r \geq \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k}{k-1}} \\ \sqrt{\left[\frac{1}{k} \right] \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k+1}{k-1}}}, & \text{其它情况} \end{cases}$$

式中, α_0 为气门初始角; $P_r = P_m/P_a$.

最后, 整理以上 4 个方程式, 得到单缸发动机进气系统的数学模型

$$\dot{P}_m = -\frac{n}{120} \frac{V}{V_d} \varphi_c P_m + \frac{R T_m}{V} \dot{m}_a(\theta, P_m) \quad (5)$$

利用本文的实验样机, 通过实验方法测得不同工况下发动机充气效率, 将该单缸发动机中各参数的值输入到仿真模型, 进行数值仿真.

2.2 仿真模型建立

本文应用 Matlab/Simulink 软件搭建单缸发动机进气系统的仿真模型, 该模型可以分为 3 个子模块, 分别为: 节气门处气体流量子模型, 进气门处气体流量子模型和进气道内部气体运动状态子模型^[9-10]. 这 3 个子模型分别与上文推导的数学模型相对应, 其结构示意图如图 5 所示. 仿真时可以输入不同的发动机转速和节气门开度对进气系统的特性进行仿真, 并将仿真结果与实验进行对比分析.

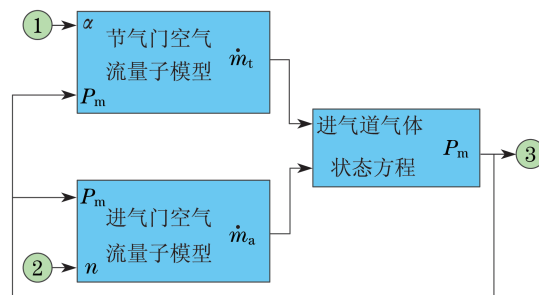


图 5 进气系统模型框架

Fig.5 Model framework of the intake system

3 仿真与实验结果对比

选取某排量 125 ml 的单缸发动机作为测试对象进行实验对比, 测试装置选用南峰 20 kW 电涡流测功机和 DEWETRON 公司的高精度数据采集系统. 为了保证仿真结果和实验结果具有可比性, 实验时选择节气门板后的位置作为测量点. 采集固定转速、不同负荷状态下发动机进气压力的变化数值, 与仿真结果进行对比分析.

实验中将发动机稳定至某一工况点, 调节发动机转速为 3 000 r/min, 调节节气门位置的开度变化. 测量发动机在不同负荷工况下进气道内气体压力的变化情况, 绘制出发动机进气压力变化实测值, 实验结果与仿真结果之间的对比如图 6~8 所示.

从图中的对比可以看出, 进气系统仿真模型可以较好的反应出单缸发动机处于不同负荷条件下进

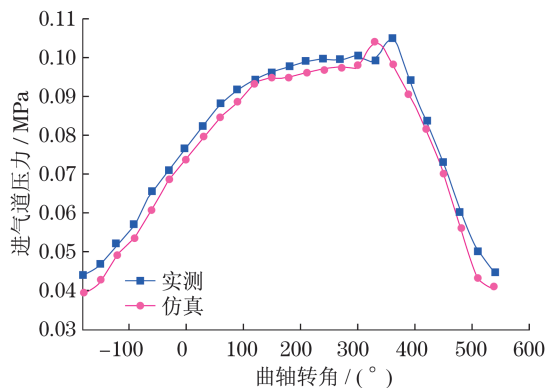


图6 小负荷时进气压力对比

Fig.6 Comparative results of the intake pressure at low load

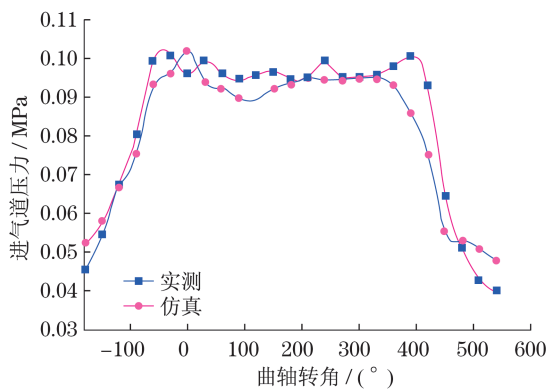


图7 中等负荷时进气压力对比

Fig.7 Comparative results of the intake pressure at the middle load

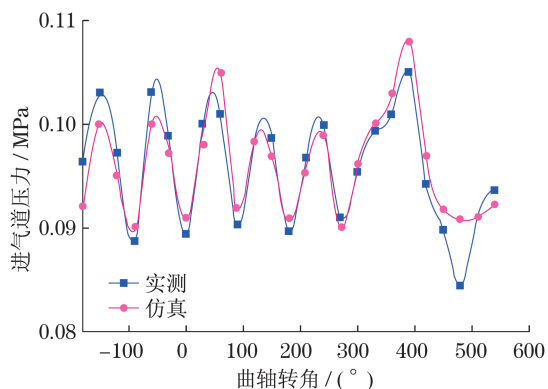


图8 大负荷时进气压力对比

Fig.8 Comparative results of the intake pressure at high load

气压力的变化情况,仅在个别工况下实测值与仿真值发生了较大偏差.在负荷较小的工况下,节气门开度较小,进气阻力很大,容易引起进气回流现象的发生,导致发动机进气量的实测值产生较大偏差,使实际进气压力大于仿真结果.而在大负荷的工况下,节气门开度较大,容易引起压力波叠加效应产生严重

的泵气脉动,导致实验与仿真结果的差异较为明显.

4 结 论

分析了单缸发动机进气系统在不同负荷和转速下进气量的变化过程,运用速度-密度法建立了进气系统的仿真模型,再通过发动机台架实验,测量了相同转速和负荷状态下的进气压力,并与仿真值进行对比,结果表明:在中小负荷状态下,基于速度-密度法的仿真模型能够准确地反映单缸发动机进气系统压力变化的过程;在大负荷状态下,由于气流速度快,气体压力波叠加等问题的影响,基于速度-密度法的仿真结果与实际测量值存在较大偏差,但依然具有较好的仿真精度,在一定程度上反应了进气系统的变化.

参考文献:

- [1] 王祝炜,王伯年.汽油机电控燃油系统空气流量的检测[J].上海理工大学学报,1999,4(21):398-402.
- [2] Lahti J L. Engine control using real time combustion and compressible gas flow models [D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2004.
- [3] 张妍. FAI 电喷摩托车发动机近期特性的研究[D]. 天津:天津大学, 2007.
- [4] 李程,白富强,丁济凡,等.电喷摩托车发动机进气调节系统的数值模拟研究[J].小型内燃机与摩托车, 2010,39(2):19-21.
- [5] 万冬,白富强,顾维东,等.摩托车电喷系统进气量计量方法的研究[J].小型内燃机与摩托车, 2007, 36(1):12-15.
- [6] 张振东,王玉顺,刘志远,等.基于进气调节的汽油机空燃比控制系统研究[J].上海理工大学学报, 2007, 29(6):521-524.
- [7] Chevalier A, Vigild C W, Hendricks E. Predicting the port air mass flow of SI engines in air/fuel ratio control applications[C]//SAE 2000 World Congress. Detroit: SAE Inc, 2000:2000-01-0260.
- [8] Hendricks E, Chevalier A, Jensen M, et al. Modelling of the intake manifold filling dynamics [C]//International Congress and Exposition. Detroit: SAE Inc, 1996:960037.
- [9] 姚栋伟,吴锋,俞小莉,等.基于状态观测器的电喷汽油机进气流量精确估计[J].内燃机工程, 2009, 30(3):34-38.
- [10] 姚栋伟,吴锋,凌鑫晨.汽油机进气动态特性建模与仿真研究[J].内燃机工程, 2012, 33(3):59-65.

(编辑:董 伟)