

基于压力升高率的氢燃料发动机异常燃烧分析与控制

杨振中, 师素娟, 宋茂江

(华北水利水电学院机械学院, 郑州 450011)

摘要: 为了消除氢燃料发动机的异常燃烧, 并且为解决异常燃烧与提高氢发动机功率的矛盾提供参考, 本文阐述了氢燃料发动机异常燃烧的发生机理。分析了氢发动机压力升高率与早燃的关系, 研究了早燃的诊断方法, 试验指出: 运用小波分析方法可以诊断氢发动机在不同压力升高率下发生早燃的时间和严重程度。通过试验得出了影响氢发动机压力升高率的最主要运转因素是点火提前角和过量空气系数。在进一步分析这 2 个运转参数与压力升高率之间关系的基础上, 得出了氢发动机关于压力升高率的控制规律。为消除氢发动机异常燃烧提供了一种定量的控制方法。

关键词: 氢燃料, 发动机, 小波分析, 压力升高率, 点火提前角, 过量空气系数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.022

中图分类号: TK91

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0124-06

杨振中, 师素娟, 宋茂江. 基于压力升高率的氢燃料发动机异常燃烧分析与控制[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 124—129.

Yang Zhenzhong, Shi Sujuan, Song Maojiang. Analysis and control of abnormal combustion of hydrogen fueled engines based on pressure rise rate[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 124—129. (in Chinese with English abstract)

0 引言

随着汽车工业的快速发展, 在对能源带来了巨大压力的同时也产生了严重的环境污染问题。为了减少石油短缺给国家安全和经济发展带来的压力, 世界各国对探索石油的替代能源非常重视。氢能以其清洁、高效、可再生的持续性等特点受到广泛关注, 正在登上 21 世纪能源舞台^[1-6], 并有望成为主角。氢作为内燃机的燃料具有燃烧速度快、点火能量低、扩散速度快、淬火距离小、着火界限宽等优点^[7-9], 但同时也使得氢发动机易发生早燃、回火、工作粗暴等异常燃烧现象, 这限制了氢发动机的动力性和经济性的提高, 甚至使发动机无法正常工作^[10-11]。因此, 消除异常燃烧是推进氢内燃机技术进步的关键之一。本文将从点火后平均压力升高率(下文不另加说明统称为压力升高率)着手分析氢发动机的异常燃烧及控制方式, 主要研究如下 3 个问题: 1) 氢发动机压力升高率与异常燃烧的关系; 2) 氢发动机主要结构参数和运转参数与压力升高率的关系, 从而得出影响氢发动机压力升高率的关键参数; 3) 氢发动机压力升高率与这些关键参数的定量描述。通过控制这些关键参数, 实现对压力升高率的控制, 进而从根本上抑制氢发动机的各种异常燃烧。

1 压力升高率与异常燃烧的关系

1.1 压力升高率与异常燃烧关系

收稿日期: 2010-02-23 修订日期: 2010-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(50322262, 5107604640); 郑州市科技创新人才专项(096SYJH25086); 郑州市技术研究与开发项目(0910SGYG23261-3); 河南省重点科技攻关项目(102102210034)

作者简介: 杨振中(1957—), 男, 博士, 教授, 主要从事氢燃料发动机燃烧与优化控制方面的研究。郑州 华北水利水电学院机械学院, 450011。
Email: yzzho@163.com

试验是在一台改装的单缸氢发动机^[12-13]上进行的, 发动机缸径×行程为: 85 mm×85 mm, 气缸总工作容积为 482 cm³, 半球形燃烧室, 通过改变气缸盖的高度, 可以使压缩比分别达到 4.80、6.00、7.93 和 8.50。试验使用的氢燃料浓度达 99.9%, 初始压力为 15 MPa, 通过调节减压阀将氢料减压至 0.2~0.5 MPa 后, 经进气管供入氢发动机气缸内。保持冷却水温在 80℃。

图 1a 所示为氢发动机以压缩比为 4.80、点火提前角为至上止点前 34°、转速为 $n=2\ 100\text{ r/min}$ 运行时, 从早燃到回火的过程(图中进气管内压力仅具有示意的意义, 而非标示出值)。图 1b 反映了在 6 个循环中早燃发生时刻与最高压力的变化关系(第 7 个循环已经回火, 缸内压力与前 6 个循环没有对比价值, 故在图中未示出), 图 1c 为早燃发生时刻与压力升高率之间的关系。

试验时, 调整氢空气混合气浓度, 当混合气加浓到一定程度时, 早燃发生(本试验当过量空气系数 $\alpha=1.7$ 以下时, 早燃发生)。随着混合气加浓, 早燃现象越来越严重, 最高燃烧压力值不断降低, 压力升高率逐步增加, 早燃不断提前。当过量空气系数 $\alpha=1.4$ 时, 回火产生, 氢发动机的最高压力进一步下降。回火近似轻微爆炸, 并发出强烈的爆炸性噪音; 回火很快导致氢发动机失火。从图中可以看出这个变化过程。由于从早燃发生到回火仅仅几个循环, 实际情况好像发生早燃后发动机很快就熄火了。进一步的试验表明, 当出现早燃时, 即使保持过量空气系数 $\alpha=1.7$ 不变, 燃烧变得很不稳定, 最高燃烧压力波动幅度较大, 但趋势仍然是不断降低, 压力升高率逐步增加。早燃不断提前, 回火产生, 发动机熄火。改变发动机转速, 对压力升高率几乎没有影响。压力升高率随着过量空气系数减少, 迅速增加。经研究, 虽然氢燃料发动机的早燃、回火发生时间、发生地点可能不同, 但在满足一定条件下, 它们基本趋势是: 混合气加

浓到一定程度以后,发生早燃、早燃逐步加剧、发生回火。

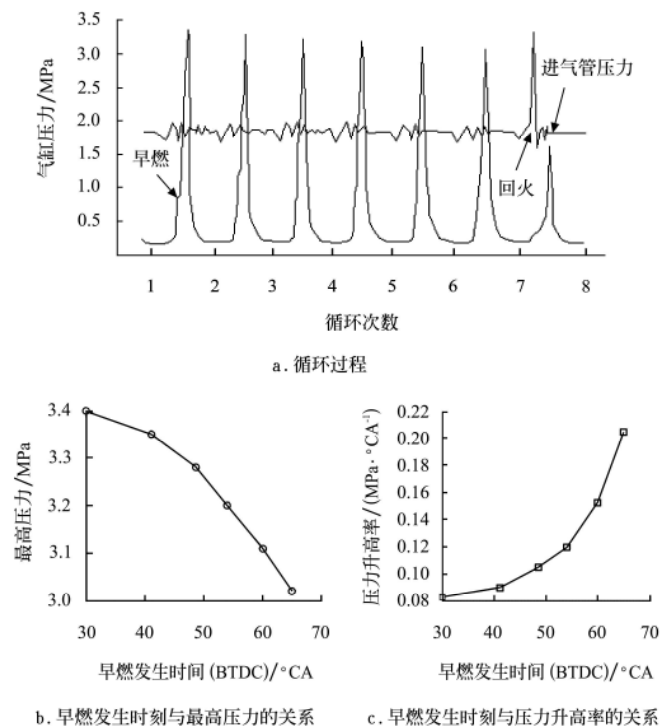


图 1 早燃到回火的过程
Fig.1 Process from pre-ignition to backfire

其原因可能是,混合气逐步加浓后,早燃发生。如果再继续加浓或保持混合气浓度不变,随着氢发动机工作循环的进行,早燃愈来愈提前,早燃现象越来越严重,燃烧始点提前也愈来愈多,这就使得,一方面,混合气加浓,放热量增加,对提高最高压力值的贡献增加,但另一方面,着火点前移后燃烧初期大量放热时对应气缸容积较大,会降低最高压力值。2 种因素后者起主要作用导致最高压力值逐渐降低。如果在发生早燃后混合气浓度保持不变时,由于此时没有前者的因素,后者的因素导致最高压力值逐渐降低应该更容易理解。至于压力升高率增加主要是由于随着混合气加浓,当愈来愈接近化学计量混合比时,燃烧速度的增加很快所致。如果在发生早燃后,混合气浓度保持不变的情况下,随着早燃前移,压力升高率也可能有所增加,这可以理解为着火点前移使得缸内开始燃烧时压力降低,即使最高压力值逐渐降低,也会使压力升高率增加。而且,随着早燃不断提前,缸内的高温点也逐步前移至压缩初期,加之氢气的点火能量很低,此时高温废气或缸内炽热点非常容易点燃在进气门未关闭时的进气管内的新鲜充量,回火产生,氢发动机的最高压力进一步下降;由于进气管内混合气浓度较高,燃烧速度快,回火加剧;严重的回火致使进气管内温度和压力过高,导致新鲜充量无法进入气缸,氢发动机失火。综上所述,压力升高率过大与发生早燃,乃至回火密切相关。

1.2 基于小波变换的压力升高率分析

对于氢发动机的正常燃烧,曲轴转角位于上止点附近时燃烧速度最快,即此时缸内压力变化速度最快。异

常燃烧则不然。由于小波变换在高频具有很好的频率分辨能力,在低频具有很好的时间分辨率,同时能保持信号的时域信息和信号的频域信息,这恰好符合氢发动机在上止点附近快速燃烧具有较高的频率、压力升高率在快速燃烧时几乎呈阶梯性变化的特点。在获得氢燃料发动机的示功图后,可以对燃烧压力信号进行小波分解,通过分析时域信号的变化情况和幅值大小来评价平均压力升高率和燃烧状态。压力升高率越大,时域信号在此刻的变化越显著,其变化的谱值也越大,这既显示了其变化值的大小,还能得到压力显著变化的时间,即得到谱值信号和时间信号反映。因此,小波变换能够识别出快速燃烧发生的时间及其在此时压力幅值变化的大小,以断定氢发动机工作时是否发生异常燃烧现象,并决定其异常燃烧的严重程度。由于小波变换要求间断倒数的阶尽可能接近小波函数的消失矩,故在此选用 db2 小波函数对压力信号进行变换,根据研究需要,提取小波变换后的最高层频域内的特征信号和信号的能量谱进行分析。图 2 为压力升高率为 0.0974 的小波分解信息。

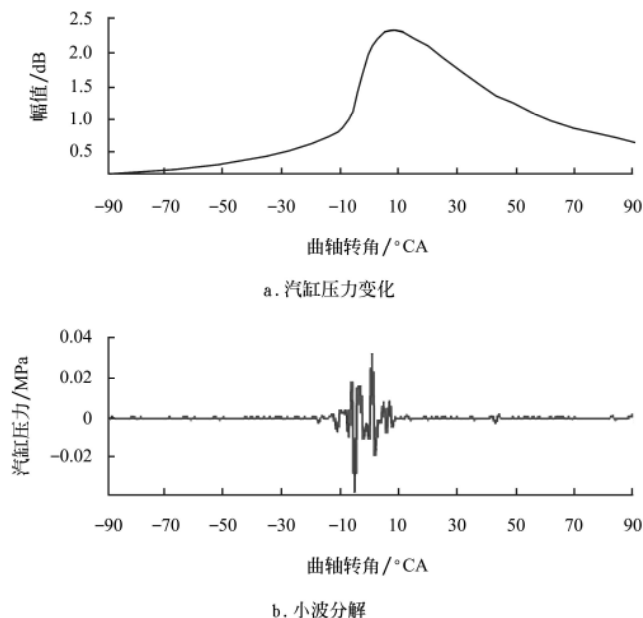


图 2 压力升高率为 0.0974 的小波分解
Fig.2 Wavelet analysis with pressure rise rate in 0.0974

从图 2 可以看出,此时氢发动机的压力在上止点附近达到最大值。经过小波变换,该信号发生急剧变化的阶段也在上止点附近,即此时频率变化最快,且变化系数相对较小,属氢发动机的正常燃烧现象。上止点后还存在微小的压力波动主要是由于氢发动机的混合气不均匀或被挤入气缸内间隙的混合气回流所引起的后燃所致。

图 3 是压力升高率为 0.1813 的压力信号和小波分解图。从图 3 可看出,此时压力在上止点前 26°CA 就达到最大值。经过小波变换,该信号发生急剧变化的阶段在上止点前 29°CA 到上止点前 15°CA 范围内,即此时频率变化最快,变化系数也较大(如图知,其系数是压力升高率为 0.0974 的 3 倍),属于典型的早燃现象,而且该

值越大,氢发动机早燃越严重。这和压力升高率为 0.0974 的小波分解信息是明显不同的。即通过对燃烧压力信号进行小波分解可以获得压力升高率与燃烧状况关联的信息。通过上述 2 个典型不同压力升高率的压力信号进行小波分析得出,压力升高率越大,氢发动机越易发生早燃,且早燃随着压力升高率的增大其严重程度增加,随之而引起的回火、工作粗暴现象也变得更为严重。

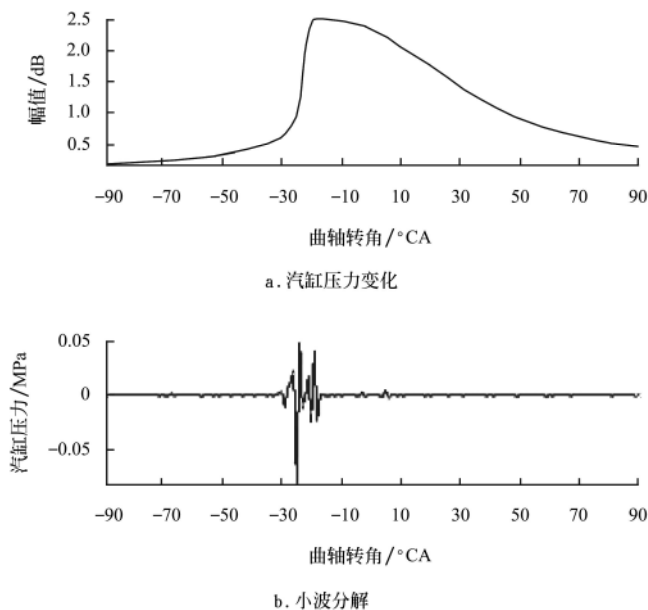


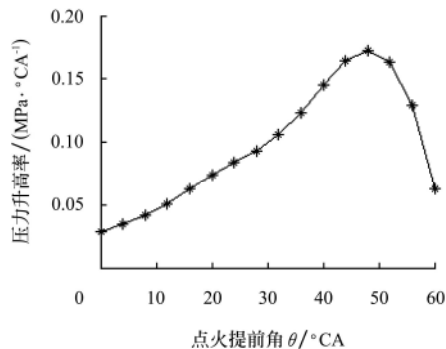
图 3 压力升高率为 0.1813 的小波分解图

Fig.3 Wavelet analysis with pressure rise rate as 0.1813

2 影响压力升高率的因素

1) 点火提前角与压力升高率的关系

图 4 示出,点火提前角过小时,上止点以前的压力升高率比较小,缸内压力较小,此时氢发动机的输出功率下降,且后燃增加,热效率降低。随着点火提前角的增大,压力升高率的增大速度逐渐增大,这是缸内压力与点火能量的共同结果,但是若压力升高率过大时,氢发动机产生缸震,并且导致早燃;另外,过大的压力升高率还会导致过高的氢发动机工作温度,使得 NO_x 的排放增加,此时应对其加以控制;当点火提前角 θ 大于



注: 压缩比 $\varepsilon=8.5$, 过量空气系数 $\alpha=1.5$

图 4 点火提前角对压力升高率的影响

Fig.4 Impact of ignition advance angle on pressure rise rate

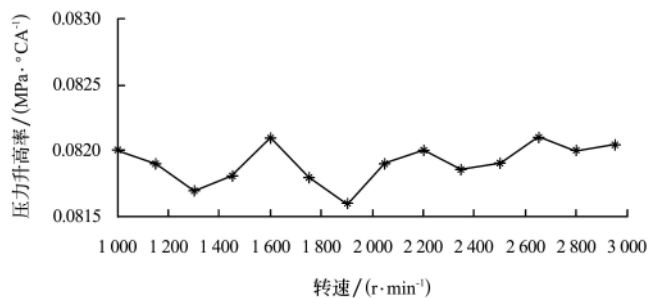
48°CA 时,压力升高率开始减小,且输出功率大大下降,这主要是由于点火过早,压缩负功增加,热效率减小,而且当点火提前角过大时,由于氢发动机工作时的进、排气门叠开过程及氢气的强扩散能力,回火现象产生,伴随强烈的震动噪音甚至导致失火。

2) 转速 n 与压力升高率的关系

图 5 示出氢发动机转速与压力升高率的关系,从该图可以看出,最大压力升高率与最小压力升高率之差 $\left| \left(\frac{dp}{d\varphi} \right)_{\max} - \left(\frac{dp}{d\varphi} \right)_{\min} \right| \leq 0.0004$, 误差很小,而且误差变化无任何规律,经计算得到转速 n 与压力升高率的相关系数小于 0.1。由此可推断该曲线的微小变化完全是由随机误差所致,所以压力升高率与转速基本无关,其原因如下:

①氢气扩散能力强,在极短时间内就能形成很好的均质混合气。

②转速增大时,气缸内湍流强度增强,但此时还存在以下因素:(1)转速较大时,单位时间内曲轴转过的角度增大,此时以转角计的压力升高率相对减小;(2)不能在上止点附近及时、完全燃烧,后燃增加,热损失增大。这些因素相互抵消,使得转速对压力升高率基本无影响。



注: 压缩比 $\varepsilon=4.8$, 点火提前角 $\theta=34$ °CA, 过量空气系数 $\alpha=1.8$

图 5 转速对压力升高率的影响

Fig.5 Impact of speed on pressure rise rate

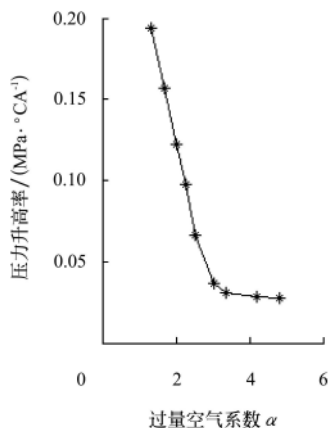
3) 过量空气系数与压力升高率的关系

图 6 所示压力升高率随着过量空气系数 α 的增大而迅速减小,当 $\alpha \geq 3.4$ 时,压力升高率逐渐趋于稳定;反之,当过量空气系数 $\alpha \leq 2$ 时,氢发动机压力升高率很高,此时氢发动机极易发生早燃、回火甚至导致氢发动机失火,这限制了氢发动机的输出功率增加。

4) 压缩比对压力升高率的影响

从图 7 可以看出,氢发动机的压力升高率随压缩比 ε 的增加而缓慢增长,当压缩比从 4.8 增加到 8.5 时,压力升高率变化 $\left| \left(\frac{dp}{d\varphi} \right)_{\max} - \left(\frac{dp}{d\varphi} \right)_{\min} \right| \leq 0.0426$,但压缩比 ε 对最大压力值影响较大,增加的原因主要是随压缩比增加,氢发动机缸内湍流强度有所加强。燃烧速度增加。但当压缩比 ε 达到一定值以后,氢发动机的热效率将随着压缩比 ε 的增加而几乎不增加,甚至下降。这是由于当压缩比 ε 达到一定值时,氢发动机的缸内最大压力过大,且由于

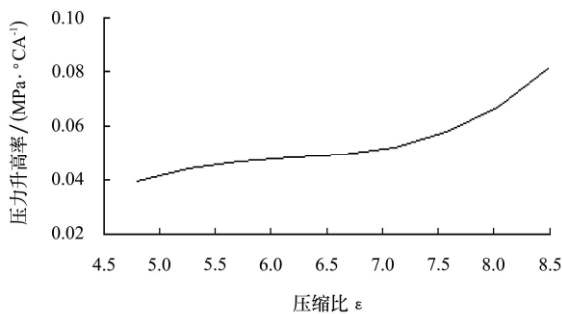
过大的压缩比 ε ，燃烧室容积减小，导致气缸内混合气混合不均匀，且爆燃倾向增加，燃烧时产生过大的压力波动，燃烧不稳定且传热损失增加。此外，由于氢气的自燃温度较高，可采用比普通汽油机更大的压缩比 ε 工作。



注：点火提前角 $\theta=34^\circ\text{CA}$ ，压缩比 $\varepsilon=4.8$

图 6 过量空气系数对压力升高率的影响

Fig.6 Impact of excess air ratio on pressure rise rate



注：点火提前角 $\theta=34^\circ\text{CA}$ ，发动机转速 $n=1100\text{ r/min}$ ，过量空气系数 $\alpha=1.8$

图 7 压缩比 ε 对压力升高率的影响

Fig.7 Impact of compression ratio on pressure rise rate

由以上试验结果得出，对压力升高率影响最为显著的 2 个参数是点火提前角 θ 和过量空气系数 α 。但是为了能够从压力升高率的角度研究氢发动机的异常燃烧，并能够据此对氢发动机异常燃烧进行有效控制，还必须获得压力升高率与点火提前角 θ 和过量空气系数 α 的定量描述和实施控制时它们关系的表达式。

尽管压力升高率与点火提前角 θ 和过量空气系数 α 客观上存在某种关系。但是由于压力升高率与点火提前角 θ 和过量空气系数 α 的非线性关系比较强，建立它们之间的通用解析表达式目前尚很困难。为了不失一般性，本文提出一种基于部分试验的建立定量关系式的思路和方法。

3 压力升高率与点火提前角和过量空气系数的关系

3.1 点火提前角与压力升高率关系

对各种曲线拟合方法进行比较的基础上，采用高斯

曲线拟合法 ($y = \sum_{i=1}^n a_i e^{\frac{-(x-b_i)^2}{c_i}}$) 对二者的关系进行定量

描述，其结果为

$$\frac{dp}{d\varphi} = 0.04708 \times e^{-\left(\frac{\theta-55.08}{5.701}\right)^2} + 0.1207 \times e^{-\left(\frac{\theta-47.68}{10.86}\right)^2} + 0.03481 \times e^{-\left(\frac{\theta-13.38}{24.55}\right)^2} + 0.07137 \times e^{-\left(\frac{\theta-33.29}{17.62}\right)^2} \quad (1)$$

用另一组试验数据对该拟合曲线进行检验，图 8 示出拟合曲线与试验结果的对比情况。由图 8 可见，拟合精度非常高，逼近程度非常好，这是因为采用这种方法拟合时运用了精确的雅可比矩阵进行求解，其处理误差非常小，能够反映氢发动机压力升高率随点火提前角 θ 的变化规律。表 1 给出了压力升高率随点火提前角 θ 的变化规律的拟合值与试验结果的具体对比数据。

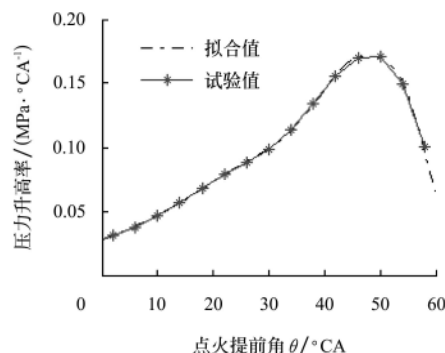


图 8 拟合曲线与试验结果对比

Fig.8 Comparing results between experiment and fitting curve

表 1 压力升高率随点火提前角 θ 的变化规律的拟合值与试验结果的对比

Table 1 Comparing results of pressure rise changing with the ignition advance angle changing between experiment and fitting

点火提前角 $\theta/^\circ\text{CA}$	拟合值	试验值	误差
2	0.0311	0.0312	-0.0001
8	0.0423	0.0416	0.0007
26	0.0891	0.0881	0.001
38	0.1337	0.1344	-0.0007
44	0.1654	0.1642	0.0012
48	0.171	0.1725	-0.0015
54	0.1516	0.1497	0.0019
58	0.0964	0.1005	0.0041

为了使式 (1) 既具有较高的控制精度，又具有实际实施控制的简洁性，将式 (1) 按照 Taylor 公式展开，并保留前 3 项则得

$$\frac{dp}{d\varphi} = 221.273 - 16.557\theta + 0.465\theta^2 \quad (2)$$

式 (2) 是与具体的氢发动机相关联的，针对不同的氢发动机，也可以获得类似式 (2) 的表达式。为了使式 (2) 具有通用性，可将其写成如下通用表达式 (3)。

$$\frac{dp}{d\varphi} = k_0 - k_1\theta + k_2\theta^2 \quad (3)$$

式中 k_0 、 k_1 、 k_2 为常数。

3.2 过量空气系数 α 与压力升高率关系

对试验结果进行分析后，选用傅立叶法 ($y = a_0 +$

$\sum_{i=1}^n a_i \cos(nwx) + b_i \sin(nwx)$ 进行拟合, 其结果为

$$\frac{dp}{d\varphi} = 0.09605 + 0.07321 \times \cos(0.8962\alpha) + 0.06034 \times \sin(0.8962\alpha) + 0.005571 \times \cos(1.7924\alpha) + 0.02736 \times \sin(1.7924\alpha) \quad (4)$$

同理, 对式 (4) 按照 Taylor 公式展开, 并保留前 3 项则得

$$\frac{dp}{d\varphi} = 0.175 + 0.103\alpha - 0.038\alpha^2 \quad (5)$$

试验值与拟合值的对比结果如图 9 所示, 具体对比数据见表 2。结果显示拟合曲线精度较高, 逼近程度也很好。

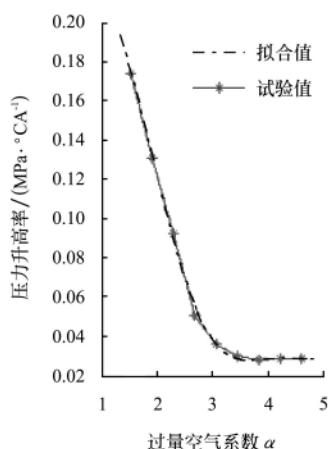


图 9 拟合曲线与试验结果对比

Fig.9 Comparing results between experiment and fitting

表 2 压力升高率随过量空气系数 α 的变化规律的拟合值与试验结果的对比

Table 2 Comparing results of pressure rise changing with the excess air ratio changing between experiment and fitting

过量空气系数 α	拟合值	试验值	误差
1.5326	0.1749	0.1738	0.0011
1.9170	0.1317	0.1306	0.0011
2.3014	0.0888	0.0920	-0.0032
2.6858	0.0555	0.0508	0.0047
3.0702	0.0360	0.0358	0.0004
3.4546	0.0287	0.0297	-0.0010
4.2234	0.0291	0.0289	0.0002
4.6078	0.0283	0.0289	0.0004

式 (5) 的通用表达式如下

$$\frac{dp}{d\varphi} = k'_0 + k'_1\alpha - k'_2\alpha^2 \quad (6)$$

式中 k'_0 、 k'_1 、 k'_2 为常数。

式 (3)、(6) 给出了氢发动机压力升高率与点火提前角和过量空气系数的定量关系。为优化控制点火提前角和过量空气系数来控制氢发动机的压力升高率, 从而抑制氢发动机的异常燃烧提供了理论支持。

4 结 论

1) 当早燃发生时, 最高燃烧压力值降低, 且随着氢发动机工作循环的进行, 早燃现象越来越严重, 燃烧产生位置不断提前, 最高燃烧压力值不断降低, 压力升高率逐步增加。当早燃产生位置发生在进气门未关闭时, 容易导致回火。

2) 小波变换具有能同时保持信号的时域信息和信号的频域信息的特点, 通过对缸内压力升高率信号的分析能够准确识别出发生异常燃烧的时间和严重程度。

3) 分析了氢发动机主要结构参数和运转参数与压力升高率的关系, 结果表明: 点火提前角和过量空气系数是影响压力升高率的关键因素。

4) 在对压力升高率与点火提前角和过量空气系数的关系进行分析研究的基础上, 得出了具有较高精度的描述它们关系的定量表达式。通过控制这些关键参数, 实现对压力升高率的控制, 进而从根本上抑制氢发动机的各种异常燃烧。

[参 考 文 献]

- [1] Gomes Antunes J M, Mikalsen R, Roskilly A P. An insight on hydrogen fuel injection techniques with SCR system for NO_x reduction in a hydrogen-diesel dual fuel engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(21): 8785—9032.
- [2] White C M, R R Steeper, A E Lutz. The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(10): 1292—1305.
- [3] Hirokazu Akagawa, Hiroyuki Ishida, Sinnosuke Osafune, Development of Hydrogen Injection Clean Engine[C]// Proceedings of the 15th World Hydrogen Energy Conference. Yokohama, 2004.
- [4] Das L M. Hydrogen engine: research and development (R&D) programmes in Indian Institute of Technology (IIT). Elhi ARTICLE[C]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 27(9): 953—965.
- [5] T. Nejat Veziroglu. Quarter Century of Hydrogen Movement 1974-2000[C]// Hydrogen Energy Progress XIII, Proceedings of the 13th World Hydrogen Energy Conference. Beijing, China, June 12—15, 2000.
- [6] David Hart, Ausilio Bauen. Opportunities for Hydrogen Energy Systems in Europe[C]//Hydrogen Energy Progress XIII, Proceedings of the 13th World Hydrogen Energy Conference. Beijing, China, June 12—15, 2000: 30—34.
- [7] Nafiz Kahraman, Bilge Çeper, S. Orhan Akansu, Kadir Aydin. Investigation of combustion characteristics and emissions in a spark-ignition engine fuelled with natural gas-hydrogen blends[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(2): 1026—1034.
- [8] Matthew G. Shirk, Thomas P. McGuire, Gary L. Neal, Daniel C. Haworth. Investigation of a hydrogen-assisted combustion system for a light-duty diesel vehicle[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(23): 7237—7244.
- [9] Vincent Knop, Adlène Benkenida, Stéphane Jay, et al. Modelling of combustion and nitrogen oxide formation in

- hydrogen-fuelled internal combustion engines within a 3D CFD code[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(19): 5083—5097.
- [10] Yang Zhenzhong, Wang Lijun, Li Jingding, et al. Research on the optimizing control technology based on fuzzy-neural network for hydrogen fueled engines[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(15): 2370—2377.
- [11] Yang Zhenzhong, Wang Lijun, Li Shilei. Investigation into the optimization control technique of hydrogen fueled engines based on genetic algorithms[J]. International Journal of Hydrogen Energy. 2008, 33(22): 6780—6791.
- [12] Furuhashi S. Research on hydrogen-fueled engines[C]// Omnibus of Furuhashi S, 1990.
- [13] 杨振中. 氢燃料发动机燃烧与优化控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- Yang Zhenzhong Combustion and Optimizing Control in Hydrogen-fueled Engines[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese with English abstract)

Analysis and control of abnormal combustion of hydrogen fueled engines based on pressure rise rate

Yang Zhenzhong, Shi Sujuan, Song Maojiang

(School of Mechanical Engineering, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: The mechanism of abnormal combustion of hydrogen fueled engines was discussed in this paper for controlling abnormal combustion of hydrogen fueled engines, and providing references to resolve the contradiction between abnormal combustion and power output. Moreover, the relationship between pre-ignition of hydrogen fueled engine and its pressure rise rate was analyzed, and diagnosed method on the pre-ignition was investigated. The experiment results showed that the time and the severe degree of pre-ignition under different pressure rise rate could be diagnosed by using the wavelet analysis method. Based on the experiment it is found that the most important factors effecting pressure rise rate of hydrogen fueled engines are spark advance and excess air ratio. Finally, the formulae between the pressure rise rate of the engine and spark advance, and between the pressure rise rate of the engine and excess air ratio, were respectively established by data fitting, so that control law about the pressure rise rate of the engine was also formed. This can provide a mensurable method for restraining the abnormal combustion of the engine.

Key words: hydrogen fuels, engines, wavelet analysis, pressure rise rate, ignition advance angle, excess air ratio