

脉冲爆震发动机点火起爆控制规律^{*}

于达仁, 王惜慧

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 点火起爆过程对爆震波形成起关键作用。点火起爆过程和充填过程紧密相连, 合理控制点火起爆是保证脉冲爆震发动机稳定工作的前提, 研究中定义了点火起爆控制因素, 给出了点火时刻估算方法, 分析了点火延时和点火频率影响因素, 在理论分析基础上给出脉冲爆震发动机点火起爆控制规律。

关键词: 脉冲爆震发动机; 点火; 点火时间; 点火频率⁺; 控制

中图分类号: V233.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2005) 05-0439-05

Control law of the ignition of a pulse detonation engine

YU Da-ren, WANG Xi-hui

(School of Energy Science and Engineering Harbin Inst. of Technology Harbin 150001, China)

Abstract The ignition process is important in the detonation wave engine. The process of ignition is relevant to the filling and the detonation formation processes. The control factor of the ignition is defined and the method to calculate the ignition delay is given and the law of the ignition delay changing is analyzed. The effect factors of the ignition frequency is analyzed. On the basis of above analysis, the control law of ignition is acquired, which is the base of ignition control system design.

Key words Pulse detonation engine; Ignition; Fire time; Ignition frequency; Control

1 引 言

混合物填充过程和点火起爆过程对脉冲爆震发动机工作起关键作用。混合物填充过程在整个循环周期中占用时间长^[1], 影响发动机工作频率。点火起爆过程决定脉冲爆震发动机燃烧状态和燃料利用率。有关脉冲爆震发动机充填特性和点火特性对发动机性能影响^[2~4]的研究很多, 但大多数研究还是将充填过程和点火过程影响单独研究, 实验中点火延时和点火频率提前设定, 缺少根据环境因素和工作条件动态调节能力。

本文围绕火箭式单爆震管脉冲爆震发动机开展研究, 分析气动热力参数对发动机点火起爆控制因素影响。将填充过程和点火起爆过程联合研究, 理论分析了可燃混合物以预混方式和非预混方式填充时, 温度变化对混合物填充特性的影响, 在分析非预混式填充方式时运用了二维非定常流体力学计算方法。文中最后设计点火起爆控制规律, 为点火控制系统设计

提供理论依据。

2 脉冲爆震发动机点火起爆控制因素

点火起爆控制因素指点火时刻, 点火频率和点火能量等对脉冲爆震发动机点火起爆起关键作用的因素。脉冲爆震发动机点火起爆控制目的是依据上述控制因素随发动机工况和外界环境条件变化规律, 采用合理控制手段, 满足发动机不同工况的性能需求。

通常用点火延时而不用点火时刻描述点火特征。由于脉冲爆震发动机填充过程和点火过程密切关联, 文中定义点火延时为燃料供给电磁阀开启时刻到点火信号开始时刻之间的时段, 即发动机工作时序(图1)充填时序和点火时序在同一周期上升沿之间的时间。定义点火频率和发动机工作频率一致。由于点火能量不方便在线调节, 下面重点分析点火延时和点火频率影响因素, 为发动机点火控制规律设计提供理论依据。

* 收稿日期: 2004-11-10 修订日期: 2005-06-05。

作者简介: 于达仁 (1966—), 男, 博士生导师, 研究领域为动力机械控制。E-mail: yudarer@homs.hit.edu.cn

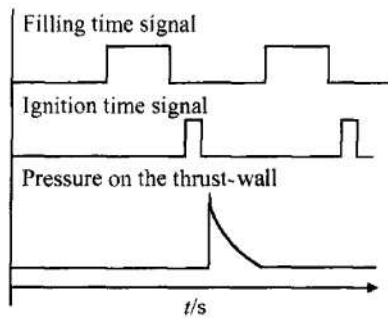


Fig 1 Filling ignition and pressure time

2.1 点火延时及其影响因素

本文重点研究热力气动参数对点火延时的影响,暂不考虑由于电磁阀、喷嘴、点火器等硬件造成的时间延时,所以点火延时可以用填充时间表征。根据燃料不同填充形式,给出点火延时估算方法。

对于燃料预混式脉冲爆震发动机,假设可燃混合物在混合室内充分混合,经喷嘴进入爆震室后完全气化,满足理想气体状态方程;假设混合物以低马赫数充填,不考虑气体的可压缩性;由于填充时间短,假设填充过程中喷嘴压降和爆震室内混合气密度随时间变化不明显。依据爆震室充满程度需求,反推得到充填时间。经喷嘴的流量方程为

$$\dot{m} = CA \sqrt{2^* (p_1 - p_0)^*} \rho \quad (1)$$

式中 C 为流量系数, A 为喷嘴通流面积, p_1 , p_0 分别为喷嘴前压力和爆震室内压力, ρ 为气体密度。爆震室内混合气体满足理想气体状态方程为

$$m = p_0 V / RT_0 \quad (2)$$

式中 V 为填充体积, R 为通用气体常数, T_0 为充填时爆震室内温度。将式(1)两端对时间求积分,并将式(2)带入,得到充填时间估算式

$$t = \frac{(p_0 V / RT_0)}{nCA (\sqrt{2^* (p_1 - p_0)^*} \rho)} \quad (3)$$

式中 n 是喷嘴个数。

从式(3)可见,充填时间除了受喷嘴结构、爆震室体积和气体流动参数影响外,主要受爆震室压力和温度影响,即爆震室压力和温度影响点火延时。

为了工作安全,多数发动机可燃混合物采用非预混方式填充,充填时间按式 $t = L / \bar{v}$ 估算,其中 L 为爆震室长度, $\bar{v}$ 混合物平均速度。根据元素运输通用方程式(4)和质量、动量能量守恒方程,可以求解混合物平均速度,进而求解充填时间即点火延时为

$$(\partial / \partial t) (\rho Y_i) + \dots (\rho v Y_i) = - \dots J_i + S_i \quad (4)$$

式中 Y_i 表示元素 i 质量比率, J_i 表示元素 i 质量扩散

流量, S_i 为外加质量率。由式(4)可见,速度除了与可燃混合物成分相关,主要受密度影响。根据理想气体状态方程式 $p = \rho RT$, 密度与爆震室压力和温度相关,所以对燃料非预混方式填充发动机,爆震室压力和温度也影响充填时间,即点火延时。

2.2 点火频率及其影响因素

点火能量充足时,点火频率与发动机工作频率一致,发动机工作频率影响发动机平均推力,火箭式无喷管脉冲爆震发动机工作频率和平均推力关系为^[5]

$$\bar{F} = K (\Delta p_k / U_{CJ}) V f \quad (5)$$

式中 K 为经验系数,当发动机在高频率下工作时经验系数接近常值^[5]; V 为爆震室体积; U_{CJ} 为 CJ 爆震速度; Δp_k 为推力壁等效作用压力与环境压力差。

$$\Delta p_k = \left(\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}} p_{CJ} - p_0 \quad (6)$$

式中 p_{CJ} 为 CJ 爆震压力。以平均推力为自变量的频率

$$f = \bar{F} U_{CJ} / (K \Delta p_k V) \quad (7)$$

由式(7)可见平均推力一定,爆震频率受速度和压力影响。CJ 爆震压力 $p_{CJ} \approx p_0 + \rho U_{CJ}^2 / (\gamma + 1)$ 是 CJ 爆震波速度的二次函数,所以在额定平均推力条件下,爆震频率与爆震速成反比。依据文献[6]中 CJ 爆轰模型, CJ 爆速 $U_{CJ} = \sqrt{2(\gamma^2 - 1)Q}$, 式中 Q 是等容等压条件下单位质量反应热,与系统初态和终态相关,终态一定,初态温度越高反应热越小,爆震速度越小,满足相同推力条件需提高工作频率,即点火频率。

3 脉冲爆震发动机点火起爆控制规律

定义脉冲爆震发动机点火起爆控制规律为:平均推力为一定值时,点火延时和点火频率随外界条件的变化规律。当发动机在高爆震频率下工作,散热过程跟不上产热过程,这时温度成为影响发动机性能主要因素,所以本文主要考察点火控制因素随温度的变化规律。由于脉冲爆震发动机爆震室一端封闭一端开口,可以理解为环境参数即为爆震室初始参数,通过上面点火起爆控制因素理论分析,可以获得点火延时和点火频率与系统初始参数间的关系,获得点火起爆控制因素变化规律。

按照上面控制因素影响理论,以直径 8cm, 长 1m 等截面圆管式无喷管脉冲爆震发动机为例,以氢为燃料和氧为氧化剂,二者按化学当量比混合,环境压力为 0.1MPa, 环境温度为 300K, 分析脉冲爆震发动机点火控制因素变化规律,设计点火起爆控制规律。

3 1 点火延时随温度变化规律

以给定实例为对象,研究不同填充方式下脉冲爆震发动机点火延时随温度变化规律图 2 是点火延时随环境温度变化曲线。计算条件:以预混方式充填,混合物经两个直径 $\phi 2\text{mm}$, 阀芯行程 1cm 的喷嘴注入爆震室,喷嘴前后压差 0.5 个大气压计。由图 2 可见,燃料以预混方式填充,点火延时随环境温度升高而减少,以文中实例,温度每升高 1K 点火延时减少 0.064ms 由于温度升高导致气体膨胀,混合物充填质量减少导致充填时间减少。从图中还可以看到,填充度减小时点火延时也减少,这点容易理解。

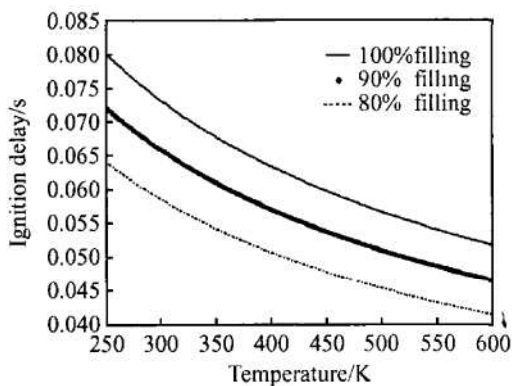


Fig 2 Ignition delay at different surrounding temperature

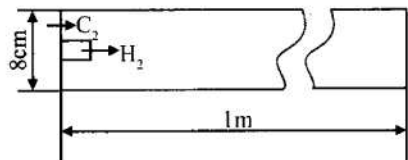


Fig 3 PDE tube example with non-premixed filling

图 3 是非预混填充爆震管实例,爆震管尺寸与非预混方式相同,不同处是燃料和氧化剂不是预先混合而是在填充过程中混合,这时充填时间不能简单推出,需经过数值计算。文中根据上面提到的输运方程联合流体质量、动量、能量方程,采用非定常二维数值计算方法求解。

计算条件:亚声速进气,选取氢气入口速度 100m/s 氧气入口速度 20m/s 环境压力 0.1MPa 计算混合物在不同环境温度下的平均充填速度。

计算方法:选用二维有限体积法划分网格,网格数 45000 个,保证足够计算精度。采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,通过一阶隐式迭代格式求解非定常方程。

图 4 是图 3 实例在环境温度 300K 时爆震管内混合物密度 (ρ) 分布图。由图可见,采用中心注入燃料

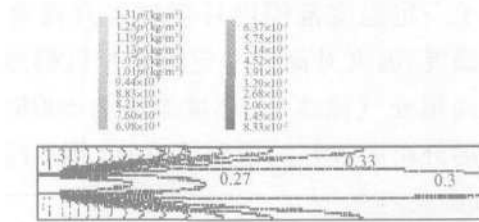


Fig 4 Mixture density contours in the PDE tube

方式时,爆震管中后部混合物混合均匀,前部燃料和氧化剂混合不均,计算结果符合实际物理过程,所以谈计算方法可用于模拟混合物填充和掺混特征。

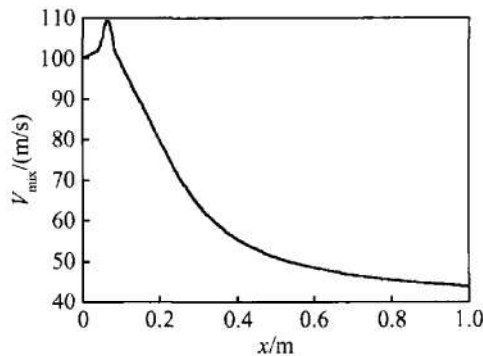


Fig 5 Mixture velocity along x axis

图 5 是相同条件下计算所得轴向速度,由图可见混合气轴向速度不同,从闭端到开口端逐渐递减,是由于燃料和氧化剂采用不同的填充速度,接近开口端二者充分混合,速度接近。图中燃料出口端 (0.1m 处)速度大于给定速度是由于燃料在喷嘴中压力稍大于爆震管内压力,总能量守恒条件下出口速度升高。计算环境温度 300K 时轴向平均速度为 61.9m/s 估算充填时间为 0.016s 。

以同样的入口速度条件和压力条件,分别计算环境温度从 300K 到 600K 时的填充时间,每间隔 100K 记录一次,计算结果见表 1。

Table 1 Filling time at different environment temperature

Temperature/K	Mean axis velocity/(m/s)	Filling time/s
300	61.9	0.0162
400	62.3	0.0161
500	63.54	0.0157
600	52.45	0.0191

由表 1 可见,当环境温度升高时填充时间减少,但是当温度升高到一定程度,填充时间不再减少反而

增加。由于一定温度范围内环境温度升高有利于改善混合物掺混,温度升高到一定程度开口端热气流回流影响正向填充气流速度,环境温度为 600K 时爆震管内温度场分布图很好的说明了这点(图 6)。



Fig 6 Temperature contours in the PDE tube at 600K surrounding temperature

图 6 是当环境温度在 600K 时爆震管内混合物的温度分布图,由图可见,出口端高温气流回流和高温管壁对爆震管内温度分布构成影响,同时影响混合气充填速度。

3.2 点火频率随温度变化规律

根据上节分析,给定发动机平均推力条件和相应参数,可以获得点火频率与环境温度之间的关系。仍以上面实例为研究对象,化学反应式 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + \Delta H$, 其中 H_2 , O_2 和 H_2O 均为气态,式中 ΔH 为热焓差,根据 CJ 爆轰模型和频率影响因素理论分析, CJ 爆速和点火频率随温度变化规律如图 7 和图 8。

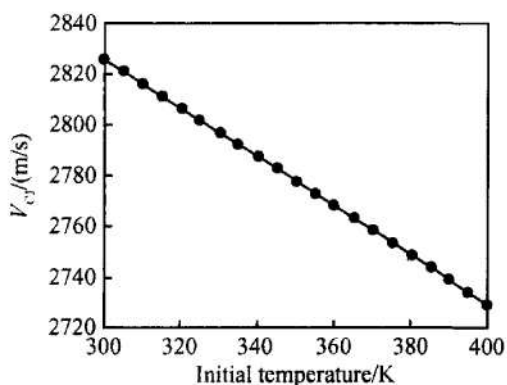


Fig 7 CJ velocity at different surrounding temperature

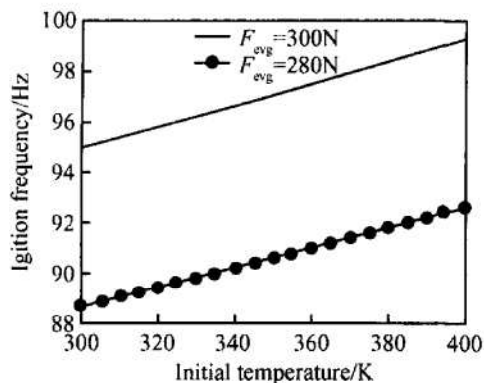


Fig 8 Ignition frequency at different surrounding temperature

由图 8 可见发动机推力一定条件下,当环境温度升高时,点火频率升高,原因是 CJ 爆速随温度升高略有降低(如图 7 所示)。以文中实例,温度每升高 1K 频率需提高 0.036Hz。

根据以上分析,设计如图 9 所示脉冲爆震发动机点火控制逻辑

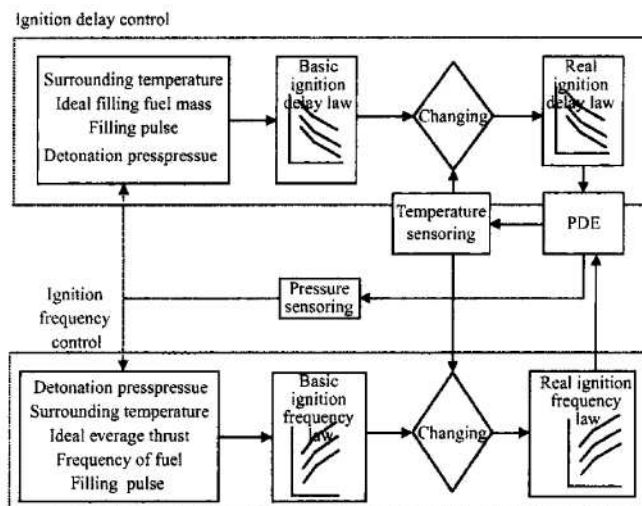


Fig 9 Ignition delay and frequency control process

图 9 是点火延时和点火频率在线控制逻辑图,基本点火延时和点火频率的设定以及根据温度传感器调整数值都可以通过本文提供方法初步估算。温度传感器和压力传感器安装在爆震室内壁上,用于测量填充时爆震室内温度和压力,作为点火延时和点火频率在线控制反馈信息。压力变化对点火特征的影响本文未作详细研究,图中用虚线绘出该反馈回路。

4 结论

(1) 发动机以预混方式填充,环境温度升高,脉冲爆震发动机爆震室填充质量下降,为保证发动机推力性能需要加大点火延时。以非预混方式填充,点火延时随环境温度升高先减少后增大,为满足发动机推力性能需要根据环境温度适当调节点火延时。

(2) 发动机点火频率和工作频率相关,较高环境温度下满足发动机推力需要适当提高点火频率。

本文给出的点火控制规律适用于气态燃料或物化状态良好的液态燃料脉冲爆震发动机,所获结果在合理假设和理论基础上完成,实际应用中还要考虑电磁阀和点火系统等硬件设备对点火特征的影响。

以液滴的形式经发动机出口流出;后喷射点处,在液雾贯穿内,流场的温度和速度明显升高,液滴破碎和蒸发的效率增强,在液滴尚没有到达上盖板以前,大量的液滴就已完全蒸发,在发动机尾部发生剧烈燃烧,加热效果明显,流场速度提高,引射火箭推力增强,由于气相的抽吸,流道内压强较低,引射比提高。

4 结 论

本文基于平滑粒子流体动力学方法的基本思想,建立了描述液滴间碰撞和聚合过程的数学模型,将液滴相互碰撞的概率看成是液滴间相对距离的函数,从根本上摆脱了 O'Rourke 模型对计算网格的依赖性,模型计算结果稳定、可靠,对计算网格的大小没有明显的依赖性.通过对 RBCC 进行三维两相喷雾燃烧流场的数值模拟,表明在自由引射模态,燃料喷射位置的适当后移会使燃料利用率提高,引射比增加,引射火箭推力增加。

参考文献:

- [1] Kitron A, Elperin T, and Tamir A. Stochastic modeling of the effects of the liquid droplet collisions in impinging streams absorbers and combustors[J]. *Int J. Multiphase Flow*, 1991, 17(2): 274
- [2] Marion G, Dicharry C, Mendiboume B. Contribution of the modelization of the surfactant concentration influence on droplet size distribution in oil/water emulsion[J]. *Progress in Collid & Polymer Science*, 1993, 307~ 311.
- [3] O'Rourke P J. Collective drop effects on vaporizing liquid sprays[D]. *Princeton University*, 1981.
- [4] Ashem J P, Peters J E. Modeling of a hollow-cone liquid spray including droplet collisions[J]. *J. Propulsion*, 1988, 44(5).
- [5] Bird G A. Molecular gas dynamics[M]. *Clarendon Press Oxford*, 1994.
- [6] Schmidt David P, and Rutland C J. A new droplet collision algorithm [J]. *Journal of Computational Physics*, 2000, 164, 62~ 80.
- [7] KIVA-3. A KIVA program with block-structured mesh for complex geometries[M]. *LA-12503-MS. Los Alamos National Laboratory*.
- [8] 刘佩进,何国强,李宇飞,等. RBCC 引射火箭模态二次燃烧实验 [J]. 推进技术, 2004, 25(1). (LIU Pei-jin, HE Guo-qiang, LI Yu-fei et al. Effect of secondary combustion in rocket ejector[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(1).)

(编辑: 刘萝威)

(上接第 442 页)

参考文献:

- [1] Dora Elia Musielak. Injection and mixing of gas propellants for pulse detonation propulsion [R]. *34th AAA /ASME /SAE /ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 1998.
- [2] Eidelman S. Pulse detonation engine: a status review and technology development road map[R]. *AAA* 97-274Q.
- [3] 张 群,严传俊,范 玮,等. 填充系数对脉冲爆震发动机压力波影响的实验研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(5): 411~ 414.
- [4] Zhang F Y, Fujiwara T, Miyasaka T, et al. Detonation studies of high-frequency-operation pulse detonation engine with air/hydrogen[R]. *AAA* 2003-1169.
- [5] 张 群,严传俊,范 玮,等. 多循环脉冲爆震发动机概念化设计 [J]. 推进技术, 2003, 24(6): 500~ 504. (ZHANG Qun, YAN Chuan-jun, FAN Wei et al. Conceptual design of multi-cycle pulse detonation engines[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(6).)
- [6] 孙承伟,卫玉章,周之奎. 应用爆轰物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

(编辑: 梅 瑛)