

文章编号: 1000-8055(2005) 03-0477-06

燃烧室柱部直径对脉动发动机 工作特性的影响研究

周宏平, 许林云, 茹煜, 周凤芳
(南京林业大学机械电子工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 建立了直接测量Helmholtz型脉动发动机燃烧室内气流压力的压力测试系统,应用该系统可实时监测发动机内气流脉动情况。研究了燃烧室柱部直径对燃烧室内气流压力波形、发动机的工作频率、燃油消耗率和过量空气系数等参数之间的影响关系。结论为在所研究的燃烧室柱部直径变化范围内,燃烧室柱部直径的变化对这些参数的影响并不明显,而油门开度对这些参数的影响却较大。

关键词: 航空、航天推进系统; 脉动发动机; 气流压力波; 工作频率; 燃油消耗率
中图分类号: ; 文献标识码: A

Effect of the Combustion Chamber Cylindrical Section Diameter on the Pulse-Jet Engine Performance

ZHOU Hong-ping, XU Lin-yun, RU Yu, ZHOU Feng-fang
(College of Mechanical and Electronic Engineering,
Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: A test system was established for the testing of the gas pressure in the Helmholtz type pulse-jet engine combustion chamber. The gas pulsating condition can be monitored in a real time manner. Number of impulse, stability of the pressure waves, etc. were used as indices to evaluate the stability of operation, and thus, the operating stability of the pulse-jet engine can be monitored and controlled during testing. The relations between the combustion chamber cylindrical section diameter and the parameters such as the gas pressure wave form in the combustion chamber, the working frequency of the pulse-jet engine, the specific fuel consumption and the excess air coefficient were investigated. It can be concluded that the diameter has no significant effect, but the opening of the throttle remarkably affects the parameters.

Key words: aerospace propulsion system; pulse-jet engine; gas pressure wave; working frequency; specific fuel consumption

脉动燃烧或称振荡燃烧是燃烧与气柱声振相互作用的结果,是与常规稳态燃烧过程不同的特殊周期燃烧过程。众所周知,脉动发动机具有高效、节能、环保等显著特点,可应用于航空飞机、导

弹、靶机、干燥、供暖和病虫害防治等领域。但由于脉动燃烧的许多机理还不清楚,使其应用受到很大的限制。脉动发动机有3种型式,即Helmholtz型、Schmidt型和Rijke型,最有应用前景的就是

收稿日期: 2004- 07- 05; 修订日期: 2004- 10- 08

基金项目: 江苏省科技攻关资助项目(BE 2001391)

作者简介: 周宏平(1964-),男,江苏海安人,南京林业大学机械电子工程学院副教授,主要从事脉冲喷气发动机研究; <http://www.cnki.net>

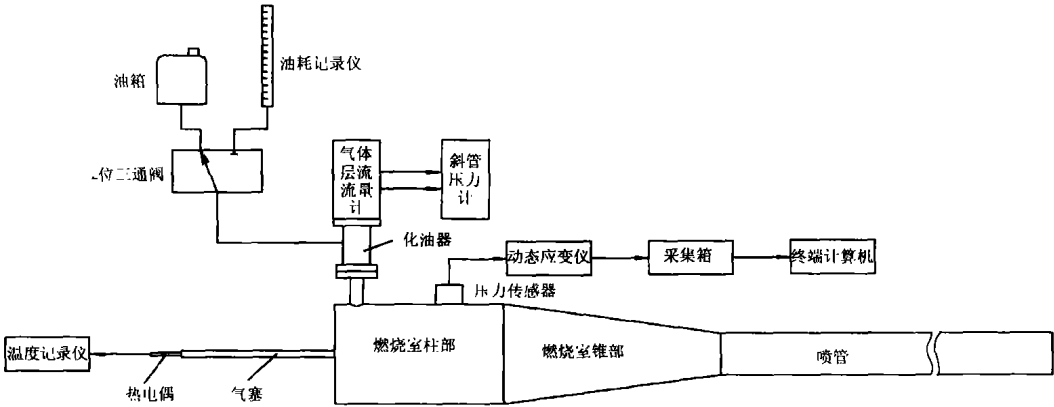


图1 试验装置图
Fig. 1 Test systems

Helmholtz 型。目前,国内主要还是以Rijke 型为研究对象,研究脉动燃烧机理,针对Helmholtz 型的相关研究却较少^[1~6]。本文所研究的Helmholtz 型脉动发动机是不带输油泵和输气泵,而是完全按照脉动发动机自激、自吸的脉动原理,即完全按照发动机本身的结构参数通过供热激振维持脉动工作;所采用的直接测量燃烧室内气流压力研究脉动发动机特性的方法,国内外均鲜有报导。

1 试验测试系统

1.1 试验测试系统

试验装置如图1所示。为使图中各测试系统清晰表达出来,只画出脉动发动机的主体部分,即燃烧室-喷管,以及各测试系统,而未将起动系统、供油系统、点火系统在图中表示出来。该试验装置图包含4个测试系统。

(1) 温度测试系统由一根高温测量热电偶通过气塞直接插入燃烧室中,测试燃烧室内的温度变化情况,由温度记录仪将所测温度显示、记录下来。

(2) 压力测试系统由压力传感器,动态应变仪、采集箱、终端计算机组成。压力传感器安装在如图所示的燃烧室壁上某一固定位置感应燃烧室内气流压力信号。由于燃烧室内压力较小,温度较高,此处选用BPR 型水冷式压力传感器。

(3) 油耗测试系统由精度可达1 ml 的油耗计量器和二位三通阀组成,用以测量进入化油器的燃油消耗量,同时记录对应的油耗时间,可计算得到脉动发动机的燃油消耗率。

(4) 空气流量测试系统由气体层流流量计与斜管压力计组成的空气流量测试系统,测量进入

化油器的空气流量,根据测得的油耗值还可算出空燃比值。

1.2 燃烧室柱部直径

本文只研究燃烧室柱部直径参数改变时引起发动机工作特性的变化情况。

试验用燃烧室柱部直径参数变化的5种尺寸情况见表1。

表1 燃烧室柱部直径尺寸
Table 1 The diameter of the cylindric part of the combustion chamber

燃烧室柱部直径 Φ /mm	对应发动机型号
50	CD 50
55	CD 55
60	CD 60
65	CD 65
70	CD 70

1.3 发动机工况

为了深入研究发动机的工作特性,对应每种燃烧室柱部直径的脉动发动机,试验时设定3种工况,即稳态工况、小油门开度工况和大油门开度工况。油门开度的大小是通过手动调节化油器上油针实现的。所谓稳态工况是在整个油门开度范围内调节油门,使发动机处于最佳工作状态;小油门开度和大油门开度工况是指在整个油门开度范围内,发动机能脉动工作不致引起熄火的最小油门开度位置和最大油门开度位置。由于脉动燃烧是靠发动机本身结构参数构成的声学条件和油门开度构成的加热条件一起构成脉动发动机激励和

反馈条件引起的自激振动而工作。影响发动机正常工作的不确定因素很多,任何微小变化都可能较大地改变发动机的工作特性。因此,稳态、小油门、大油门3种油门开度都具有相对性。测定油门3种开度下的压力值,主要是用来确定脉动发动机起动及正常脉动燃烧工作时,油门开度的调整范围有多大。

2 参数测定与分析

2.1 压力测试结果与分析

具有不同燃烧室柱部直径尺寸的5种发动机,油门开度处于3种工况下运行时,由图1中的压力测试系统测量燃烧室内压力。

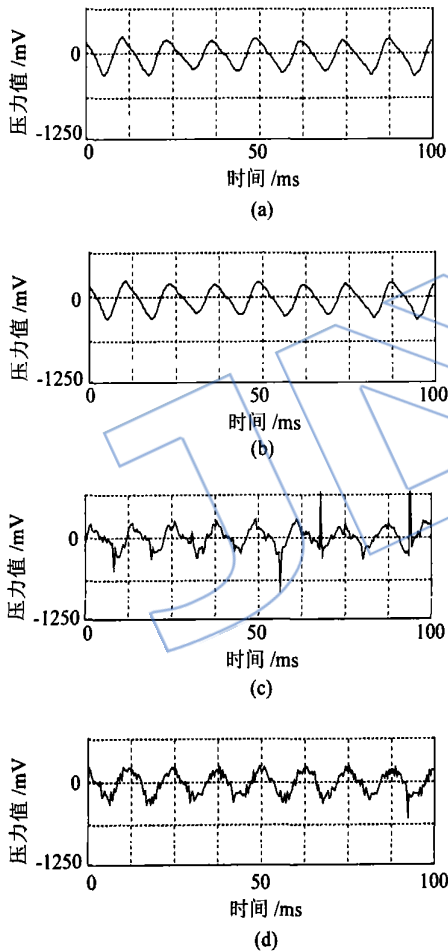


图2 具有不同平滑度的压力波形

Fig. 2 The pressure waves with different smoothness

发动机正常工作时,燃烧室内燃气的理想压力波形为图2(a)所示的典型正(余)弦波。但实际工作过程中,任一参数的微小改变都会改变可燃

动机声学条件,改变油门开度的大小,即改变加热条件,发动机自激脉动工作的条件就发生变化,气体燃烧工作过程也随之发生变化,稳态的正余弦波形也会发生改变。因此,在压力测试过程中,对应不同燃烧室柱部直径尺寸的脉动发动机,在不种工况下,测出的压力波波形相差很大。在此将它们用3个指标来评价波形状态,即波形平滑度,脉冲波数和波幅稳定性。

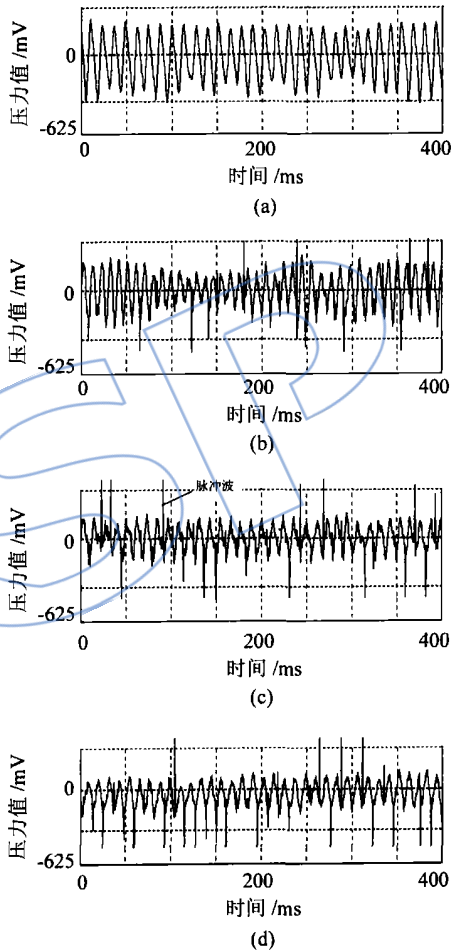


图3 具有不同脉冲波数的压力波形

Fig. 3 The pressure waves with different impulse number

图2~图4分别对应所测的压力波形具有不同波形平滑度、含有不同脉冲波数和不同波幅稳定性由好至差的4种情况,并由“++”、“+”、“-”、“--”4种符号分别对应各图中(a),(b),(c)和(d)4种波形。图2~图4中各图形的纵坐标标值即压力值,因在本文研究中其绝对值意义不大,因此未进行标定。

将压力测试结果,处理形成表2。表中除了CD60发动机工作时压力波形的平滑度、脉冲波

数和稳定性易达到良好状态, 其它型号发动机在不同油门开度时, 压力波形的平滑度、脉冲波数和

冲波数和稳定性的影响关系, 但油门开度即加热条件直接影响着发动机的工作特性。

2. 2 发动机工作频率的测试与分析

对压力测试系统测得的压力波进行频谱分析, 可得到燃烧室内燃气的脉动频率, 即发动机的工作频率。

表2 压力波形分析

Table 2 Analyzing pressure waves

发动机 型号	油门 开度	波形状态		
		平滑度	脉冲波数	稳定性
CD50	稳态	++	++	++
	小油门	++	++	+
	大油门	-	-	++
CD55	稳态	++	++	++
	小油门	+	--	+
	大油门	+	+	-
CD60	稳态	++	++	++
	小油门	+	+	+
	大油门	+	+	+
CD65	稳态	+	--	+
	小油门	+	+	--
	大油门	+	--	-
CD70	稳态	-	++	+
	小油门	++	+	+
	大油门	+	-	+

图5 为脉动发动机在 3 种工况下的工作频率与燃烧室柱部直径之间的关系曲线。发动机工作频率理论计算公式为^[1, 2, 4, 5]

$$\omega = \frac{\bar{c}^2 S}{VL}$$

式中: $\bar{c}$ 为本地音速; S 为喷管截面积; V 为燃烧室体积(包括柱部体积和锥部体积); L 为喷管长度。

该式表明发动机工作频率随燃烧室柱部直径的增大, 即随体积元 V 的增大应呈减小趋势。虽然 ω 同时还受本地音速的影响, 但由于燃烧室内平均燃烧温度的变化引起本地音速的变化不大, 因此总体趋势是受体积元 V 的影响。实际测试结果表明(见图 5), 燃烧室柱部直径的变化, 即体积元 V 的增大, 发动机的实际工作频率并没体现 ω 与 V 之间的趋势关系。相反, 在不同工况即不同油门开度情况下, 引起工作频率的波动较大, 其中燃烧

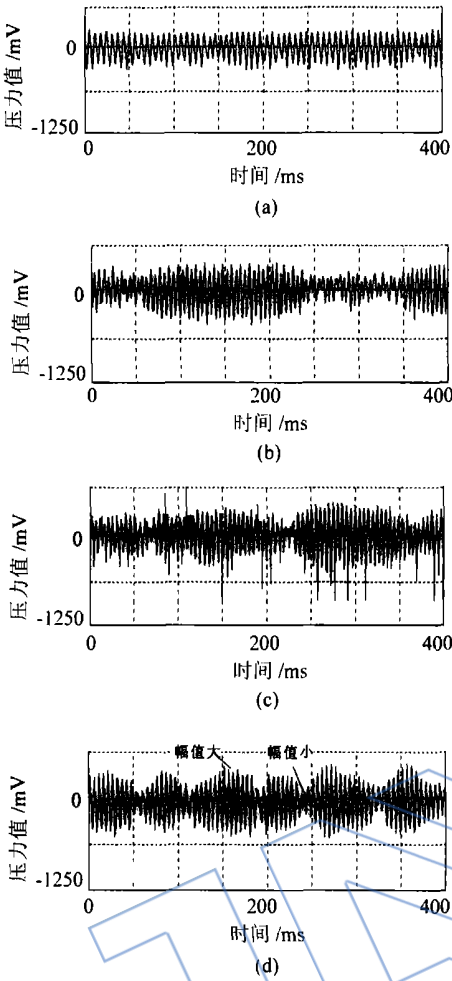


图4 具有不同波幅稳定性的压力波形

Fig. 4 The pressure waves with different stability of wave amplitude

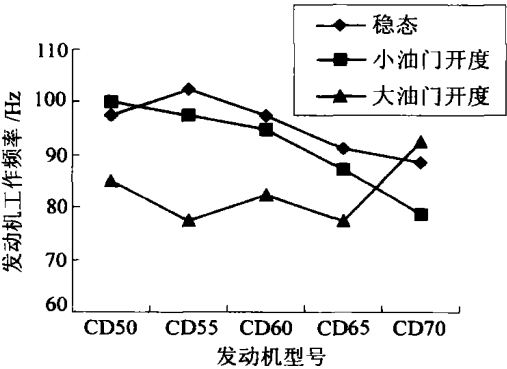


图5 发动机的工作频率

Fig. 5 The oscillating frequency of pulse engines

稳定性变化均较大, 且表中所示分析结果没有显示出燃烧室柱部直径变化对压力波形平滑度、脉

室柱部直径为 $\Phi 55\text{ mm}$ 的变化最大,即油门稳态与大油门开度时的工作频率实测值相差达 25 Hz 。由于发动机工作频率的理论计算公式 $\omega_r = \sqrt[3]{c S/VL}$,只是无加热时的理论计算公式。可见,加热条件对脉动发动机激励和反馈过程的影响相当大。

2.3 燃油消耗率和过量空气系数的测定与分析

燃油消耗率的测定是当发动机开始工作时,将油门开度调整好后,打开时间记录仪的同时,读取油耗计量器上的初始读数,发动机工作一段时间后,关闭时间记录仪,同时读取油耗计量器上的终结读数。2次读数之差即为对应时间内的燃油消耗量,计算可得燃油消耗率。空气流量测定是在油耗测定时间内,读取斜管压力计上的读数,记录3次读数,取平均值,经过一系列公式计算得空气质量流量、空燃比和过量空气系数,一并列入表3中。

图6为燃油消耗率和过量空气系数随燃烧室柱部直径变化的情况。图中3条实线为燃油消耗率与燃烧室柱部直径之间的关系,3条虚线为进入燃烧室内新鲜混合气的过量空气系数与燃烧室

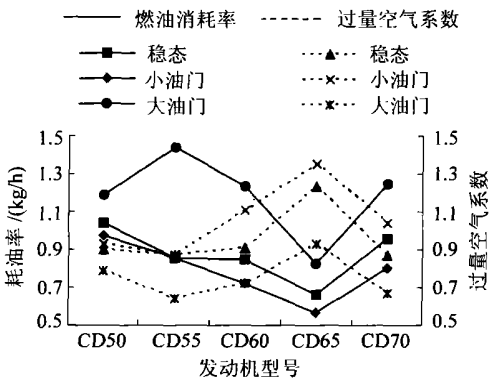


图6 燃油消耗率和过量空气系数与燃烧室柱部直径之间关系

Fig.6 The relation between specific consumption of fuel and the diameter of the cylindric part of the combustion chamber and between excess air coefficient and it

柱部直径之间关系。总体来说,燃油消耗率随燃烧室柱部直径增大呈减小的趋势,只有CD70发动机在3种油门开度下,燃油消耗率相对于CD65发动机均有所增加。图中表明,油门开度对燃油消耗率的影响较大,尤其在大油门开度状态下,燃油

表3 燃油消耗率和过量空气系数测定值
Table 3 The test datum of specific consumption of fuel and excess air coefficient

发动机型号	油门开度	燃油消耗率/(kg/h)	空气流量/(kg/h)	空燃比	过量空气系数
CD50	稳态	1.19	13.93	11.7	0.79
	小开度	0.974	13.36	13.7	0.93
	大开度	1.039	13.90	13.4	0.90
CD55	稳态	0.853	10.97	12.9	0.87
	小开度	0.854	11.06	12.9	0.87
	大开度	1.442	13.76	9.5	0.64
CD60	稳态	0.846	11.38	13.5	0.91
	小开度	0.725	11.90	16.4	1.11
	大开度	1.236	13.12	10.6	0.72
CD65	稳态	0.569	11.38	20.0	1.35
	小开度	0.664	12.07	18.2	1.23
	大开度	0.827	11.44	13.8	0.93
CD70	稳态	1.246	12.35	9.9	0.67
	小开度	0.806	12.43	15.4	1.04
	大开度	0.961	12.38	12.9	0.87

消耗率明显增大。当燃烧室柱部直径为 $\Phi 65\text{ mm}$ 时,燃油消耗率在 3 种油门开度状态下均达到最小值。将图中在同种油门开度时的燃油消耗率曲线和过量空气系数曲线对照比较,可发现燃油消耗率与过量空气系数之间近似成反比关系。这主要是由于随着油门开度的增大,在化油器内形成较浓的混合气,从而使过量空气系数下降。

3 结 论

(1) 首次建立脉动发动机燃烧室内燃气压力测试系统,应用该系统可实时监测发动机的工作特性。

(2) CD60 发动机在油门可调范围内均能保持良好的压力波形,说明 CD60 发动机形成了良好的声学条件和较宽的加热条件。

(3) 脉动发动机工作频率的理论计算公式 $\omega = \sqrt{\frac{c^2 S}{VL}}$,只是反映了发动机无加热时的工作频率与燃烧室-喷管结构参数之间的关系。本文中的研究,当燃烧室柱部直径改变时,即体积元 V 与 ω 之间并没如公式中所示两者之间的显著函数变化关系。相反,油门开度改变却引起脉动发动机的实际工作频率较大的改变。

(4) 耗油率和过量空气系数与燃烧室柱部直径之间的关系不明显。

(5) 油门开度范围即小油门开度和大油门开度 2 种工况下,油门的可调范围,可近似用 2 种工况下的耗油率之差来表示。油门开度范围越大,说

明脉动发动机能在一个较宽的范围内脉动燃烧工作,可用它来衡量发动机起动性和工作稳定性。本文所研究的具有较大油门开度范围的发动机为 CD55 和 CD60。

参考文献:

- [1] 许林云. Helmholtz 型脉动发动机激励和反馈条件的研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2003.
- [2] 许林云, 周宏平. 脉冲烟雾机燃烧室-喷管工作频率的研究 [J]. 农业机械学报, 2001, 32(4): 45~47.
XU Linyun, Zhou Hongping. Study on frequency of the Pulse Combustor of a Fogger [J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2001, 32(4): 45~47.
- [3] 许林云, 周宏平. 高效能烟雾机的反求设计 [J]. 南京林业大学学报, 2001, 25(1): 53~55.
XU Linyun, Zhou Hongping. The Converse-Design of Pulse Foggers with High Performances [J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2001, 25(1): 53~55.
- [4] 程显辰. 脉动燃烧 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994.
- [5] 邱景. 烟雾机喷管出口结构参数对性能影响的研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 1999.
- [6] 周宏平. 烟雾机燃烧室-喷管性能及参数的研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 1995.
- [7] JOHN E DEC, JAY O KELLER, ICHIRO HONGO. Time-Resolved Velocities and Turbulence in the Oscillating Flow of a Pulse Combustor Tail Pipe [J]. *Combustion and Flame*, 1991, 83: 271~292.
- [8] Hanson Garry O. Pulsed Air Combustion High Capacity Boiler [Z]. *United States Patent* 6161506, 2000.