

文章编号: 1000-8055(2003)03-0363-04

直接喷射分层燃烧转子发动机 工作过程的模拟

李立君, 唐狄毅, 范 静, 王晓锋

(西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072)

摘要: 利用零维热力学模型对直接喷射分层燃烧转子发动机工作过程进行模拟计算, 得到了燃烧室内工质温度、压力随偏心轴转角的变化和性能参数曲线, 并与文献[5]中的计算结果进行了比较。结果表明: 该模型可满足工程应用的需要, 可作为直接喷射分层燃烧转子发动机初步或改进设计的分析工具。

关键词: 航空、航天推进系统; 直接喷射分层燃烧; 转子发动机; 模拟

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

Simulation of the Performance of a Direct-Injection Stratified-Charge Rotary Combustion Engine

LI Li-jun, TANG Di-yi, FAN Jing, WANG Xiao-feng

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A comprehensive computer simulation has been developed to predict the performance of a direct-injection stratified-charge rotary combustion engine by means of the zero-dimensional thermodynamic cycle model. With giving the model, the chamber pressure and temperature are available during a complete engine cycle. By the chamber pressure, the overall engine performance parameters can be calculated. The model can be used as an analytical tool for the preliminary design and development of the direct-injection stratified-charge rotary combustion engine.

Key words: aerospace propulsion system; direct-injection stratified-charge (DISC); rotary combustion engine (RCE); simulation

1 引言

转子发动机与具有一百多年发展历史的往复活塞式发动机相比是一种新型发动机, 直接喷射分层燃烧多种燃料转子发动机的发展历史就更短, 美国莱特(Curtiss-Wright)公司于上个世纪60年代中期研制成功。它可作为直升飞机、小型通勤飞机和军用车辆的动力, 具有结构简单、紧凑、零

件数少、迎风面积小、运转平稳、噪声振动小、升功率大、比重量和体积小、高速性能好的优点; 由于采用点燃着火方式, 可燃用不同类型和不同品质的燃料(主要是航空煤油或柴油); 除此之外, 还具有燃气涡轮发动机无法比拟的优越的工作特性, 如功率的高响应率和零温度直减率, 在战地实战中这是特别重要和期望的。作为一种极具潜力的新型动力装置, 国外研究者对它进行了积极地研

收稿日期: 2002-06-21; 修订日期: 2002-10-31

作者简介: 李立君(1964-), 女, 湖南宁乡人, 西北工业大学航空动力与热力工程系博士生。

究,如 Abraham 等利用三维模型研究其燃烧室内气体的流动、燃油的喷射和燃烧过程^[1,2]及燃烧室几何结构和尺寸对燃烧的影响^[3],Roberts、Bartand 等利用热力学模型从不同的角度来预测转子发动机的性能^[4,5]。我国对转子发动机的研究尚处于初步阶段,但随着转子发动机应用领域的不断扩大,人们对转子发动机的研究与开发越来越重视。本文研究的内容是:利用零维热力学模型对直接喷射分层燃烧转子发动机工作过程进行模拟,编制计算程序计算燃烧室内工质压力、温度等参数随偏心轴转角的变化,并计算发动机性能参数,摸清它的动力性能和经济性能,为改进设计和下一步的实验提供理论依据。

2 基本方程

图 1 为直接喷射分层燃烧转子发动机燃烧室内工质与外界进行质量和能量交换示意图。火花直接点燃引燃喷油器油束的可燃混合气,在引燃喷油器周围形成火源,对主喷油器喷束所形成的

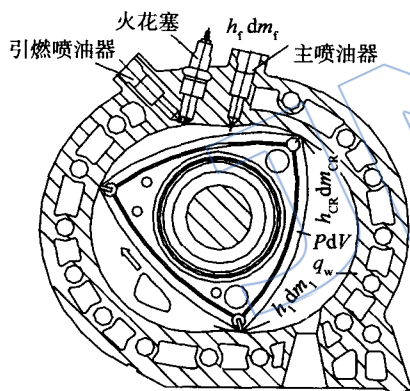


图 1 燃烧室内工质与外界进行质量和能量交换示意图

Fig. 1 Schematic of DISC wankel engine indicating energy transfers and mass flows across chamber boundary

可燃混合气进行点火。在进行燃烧室内热力过程模拟计算时认为工质是理想气体,其比热比 k 、比内能 u 和比焓 h 等参数仅与气体温度 T 和成分 a_0 (瞬时过量空气系数)有关,燃料完全燃烧,气体完全混和,气体流入或流出燃烧室在足够小的计算步长内按稳定流动处理,忽略进气管内压力波动的影响,认为燃烧室内各热力学参数在空间场上是均匀的。在这些假定下,对燃烧室内工质应用热力学第一定律、质量守恒定律及气体状态方程,得

到计算直接喷射分层燃烧转子发动机工作过程的微分方程组:

$$\frac{dE}{d\theta} = \frac{dQ_f}{d\theta} - \frac{dQ_w}{d\theta} + h_f \frac{dm_f}{d\theta} + h_{in} \frac{dm_{in}}{d\theta} - h_{exh} \frac{dm_{exh}}{d\theta} - h_{CR} \frac{dm_{CR}}{d\theta} - h_1 \frac{dm_1}{d\theta} - p \frac{dV}{d\theta} \quad (1)$$

$$\frac{dm}{d\theta} = \frac{dm_f}{d\theta} + \frac{dm_{in}}{d\theta} - \frac{dm_{exh}}{d\theta} - \frac{dm_{CR}}{d\theta} - \frac{dm_1}{d\theta} \quad (2)$$

$$PV = mRT \quad (3)$$

式中: P, T, m, E 和 R 分别为燃烧室内工质的压力、温度、质量、内能和气体常数, V 为燃烧室体积, Q_f 为燃料在燃烧室内燃烧放出的热量, Q_w 通过诸壁面传入或传出的热量, $m_{in}h_{in}$ 和 $m_{exh}h_{exh}$ 为经进/排气口流入/流出燃烧室气体的焓, $m_{CR}h_{CR}$ 和 m_1h_1 分别为流入缝隙和漏入相邻燃烧室气体的焓, m_fh_f 为喷入燃烧室内燃料的焓。 θ 为偏心轴转角,其标识如图 2 所示,图中 1、2 和 3 分别表示第一、二和三燃烧室。



图 2 偏心轴转角标识

Fig. 2 Eccentric shaft angle notation on trochoidal housing

求解上述微分方程组可得到燃烧室内温度 T 、压力 P 等未知量随 θ 的变化关系,其中 dV 、 dQ_w 、 dm_f 和 dQ_f 、 dm_{CR} 和 dm_1 以及 dm_{in} 和 dm_{exh} 可分别由转子发动机几何尺寸关系^[6]、工质与缸壁的传热模型^[7]、燃烧放热模型^[5]、缝隙和漏气模型^[5]以及气流流经面积随时间变化的等效量孔等计算出来。

3 燃烧室内实际工作过程的模拟

直接喷射分层燃烧转子发动机燃烧室内工作过程的模拟分为四个过程—进气、压缩、燃烧膨胀

和排气。进气过程始于进气口开始打开，终于进气口完全关闭；压缩过程始于进气口完全关闭，终于火花塞跳火；燃烧膨胀过程始于火花塞跳火，终于排气口开始打开；排气过程始于排气口开始打开直到进气口再次打开。整个循环历经 1080° 偏心轴转角，对这四个过程分别求解微分方程组，求得第一燃烧室内工质 P 和 T 等，此时与第一燃烧室相邻的二、三两燃烧室内工质的压力分别为 $P(-360+\theta)$ 和 $P(360+\theta)$ 。进行模拟计算时从压缩始点（进气口完全关闭）开始，依次完成一个循环，当

再次回到计算始点时，比较两次计算结果直到满足精度要求为止。计算时压缩过程步长取 2° 偏心轴转角，气口重叠时取 0.25° 偏心轴转角，其它过程取 1° 偏心轴转角。

4 算 例

利用上述方法对一台几何参数如表 1 所示的直接喷射分层燃烧转子发动机进行模拟计算，所得燃烧室内工质压力和温度随 θ 的变化如图 3 所示；预测的性能曲线如图 4 所示，图中 N_e 为有效功率， g_e 为有效耗油率， n 为偏心轴转速；将 n 为 7000 r/min，当量比 ϕ 为 0.6 时的预测结果示于表 2，并与文献[5]中的结果进行了比较。从图 4 和表 2 可以看出：预测的结果与文献[5]中的结果基本吻合，从工程实用的角度来说，用本模型模拟直接喷射分层燃烧转子发动机工作过程是可行。

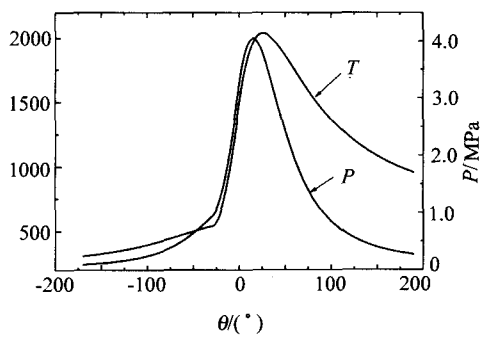


图 3 燃烧室内工质 P 和 T 随 θ 的变化
Fig. 3 Chamber pressure and temperature for DISC engine calculation at 7000 r/min and 0.6 equivalence ratio

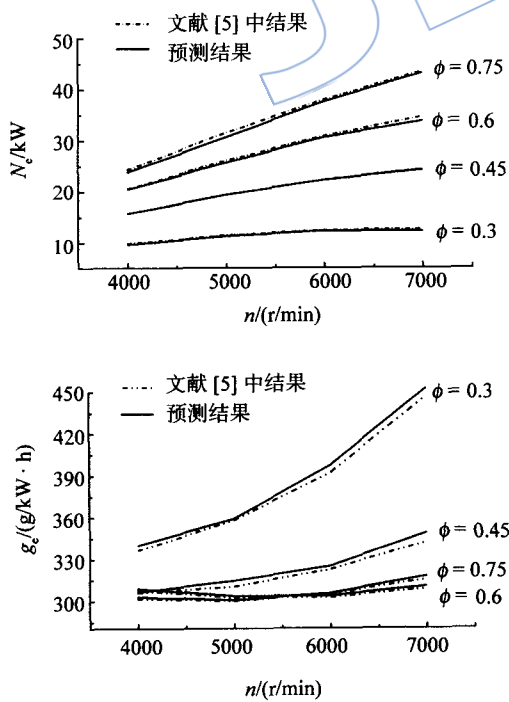


图 4 预测的 DISC 转子机的性能曲线
Fig. 4 Predicted DISC engine map

表 1 DISC 转子机几何尺寸

Table 1 DISC Engine geometry for simulation calculations

项 目	数 值
转子数	1
排量/ cm^3	577
压缩比	7.27
创成半径/cm	10.5
偏心距/cm	1.5
燃烧室宽度/cm	7.0
漏气面积/ cm^2	0.01/每径向密封
缝隙体积/ cm^3	0.4/每径向密封
转子凹坑体积/ cm^3	50/燃烧室
进气口面积/ cm^2	13.8/转子
进气口开/ $^\circ$	459.9
进气口关/ $^\circ$	839.9
排气口面积/ cm^2	9.0/转子
排气口开/ $^\circ$	199.1
排气口关/ $^\circ$	588.5

5 结 论

从以上分析可得出以下结论：用零维热力学模型对直接喷射分层燃烧转子发动机的工作过程的模拟计算结果是可信的，能满足工程实用的要求。该模型可用作直接喷射分层燃烧转子发动机概念设计和改进设计的分析工具。

表 2 预测结果与文献[5]中结果的比较

Table 2 Comparison of predicted values and ref. [5] ones

指 标	预测值	文献[5]中结果
指示压力/kPa	729.4	734.6
平均机械损失压力/kPa	218.7	216.3
平均有效压力/kPa	510.7	518.3
机械效率	0.70	0.706
有效功率/kW	34.39	34.92
指示热效率	0.3622	0.364
指示耗油率/(g/(kW·h))	223.72	222.55
有效耗油率/(g/(kW·h))	319.60	315.22
燃烧最高温度/K	2058.8	2112.6
最高温度对应的角度/(°)	30.0	29.98
燃烧室最高压力/kPa	4001.2	3963.5
最高压力对应的角度/(°)	21.0	22.0
喷入燃料量/(g/cycle)/燃烧室	0.02617	0.02621
吸入空气量/(g/cycle)/燃烧室	0.663	0.669
排出废气量(g/cycle)/燃烧室	0.689	0.695
残余废气系数	0.026	0.022
质量平均排气温度/K	991.9	990.7
时间平均排气温度/K	831.6	830.0
排气管内平均压力/kPa	96.8	96.2
指示轴功(kJ/cycle)/燃烧室	0.421	0.424
指示功率/kW	48.0	49.435
每循环总放热量/J	1161.6	1163.375

参考文献:

- [1] Abraham J, Wey M J, Bracco F V. Pressure Non-Uniformity and Mixing Characteristics in Stratified-Charge Rotary Engine Combustion[R]. SAE880624, 1988.
- [2] Abraham J, Bracco F V. Fuel-Air Mixing and Distribution in a Direct-Injection Stratified-Charge Rotary Engine [R]. SAE890329, 1989.
- [3] Abraham J, Bracco F V, Epstein P. 3-D Computations to Improve Combustion in a Stratified-Charge Rotary Engine Part IV: Modified Geometries[R]. SAE930679, 1993.
- [4] Roberts J A, Normal T J, et al. Computer Models for Evaluating Premixed and DISC Wankel Engine Performance[R]. SAE Paper 860613, 1986.
- [5] Bartand T A, Willis E A. Rotary Engine Performance Computer Program (RCEMAP and RCEMAPPC) User's Guide [R]. NASA-CR-191192, 1993.
- [6] 卢法, 余乃彪编. 三角转子发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [7] Gorla R S R, Bartrand T A. Couette Flow Heat Loss for the Rotary Combustion engine[J]. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 1996, 210: 587-596.