

直喷系统建模及点火正时仿真分析^①

朴雅庆, 吴亚锋

(西北工业大学 数据处理中心, 西安, 710072)

摘要: 利用 GT-Power 软件建立了某无人机二冲程发动机直喷仿真模型, 通过实验获取缸压曲线与仿真结果进行对比, 验证了仿真模型的正确性. 基于验证的直喷系统仿真模型, 分析了高低空环境下的点火正时对气缸最高压力、扭矩、燃油消耗率、排气温度和 NOX 排放量的影响规律. 仿真结果可优化无人机直喷系统的点火正时参数, 为在高低空环境下提高发动机性能提供理论依据.

关键词: 无人机发动机; GT-Power 软件; 点火正时; 仿真分析

Modeling of Gasoline Direct Injection System for UAV and Simulation Analysis of Ignition Timing

PIAO Ya-Qing, WU Ya-Feng

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In this paper, the simulated model of an GDI system was created for UAV by GT-Power. This cylinder pressure curves obtained by experiment and simulation results were compared to verify the correctness of the simulation model. The impact of the outbreak of the cylinder pressure, torque, fuel consumption, exhaust gas temperature and NOX emissions with ignition timing was analyzed in high-low altitude based on proved GDI system simulation model. The results of simulation can optimize ignition timing parameters of GDI system for UAV, and provide theoretical guidance to improve engine performance in high-low altitude.

Key words: UAV Engine; GT-Power software; ignition timing; simulation analysis

二冲程发动机具有功率大、旋转平稳、振动小、噪音低、维护简单等优点, 特别适用于低速、中低空的小型无人机、动力翼伞等飞行器的应用. 而传统的化油器式二冲程发动机面临着短路损失严重, 燃油经济性较差、未燃 HC 排放过高等问题.

缸内直喷(GDI)将喷油嘴置于气缸之内, 通过高压燃油泵将燃料精确地喷注进燃烧室内, 使其雾化的更加细致, 并根据不同的点火时刻将燃油混合气点燃, 具有节省燃油、减少废气排放、提升动力性能. 此外, GDI 发动机具有瞬态响应好, 易于实现精确的空燃比控制, 具有快速的冷起动和减速快速断油能力等优点, 对于延长无人机续航时间, 提高机动性能具有重要作用.

目前四冲程汽/柴油机直喷技术相对于二冲程发动机较为成熟, 国内的二冲程直喷系统的研究刚刚起

步, 主要围绕二冲程摩托车发动机进行的研究. 采用二冲程发动机的无人机在设计直喷系统时不仅要满足地面工况条件开发指标, 而且要考虑高低空环境下的参数设计, 增加了开发成本和周期.

GT-Power 是发动机工作过程模拟计算软件, 现在被世界上大多数发动机和汽车制造厂商使用. 该软件采用有限体积法进行流体计算, 计算步长自动可调, 并且有强大的辅助建模前处理工具, 自带有丰富的燃烧模型和优化设计功能, 满足二冲程发动机直喷系统建模和分析的需要.

本文针对一台用于某型无人机四缸对置二冲程发动机, 使用 GT-Power 软件建立发动机的直喷系统仿真模型. 利用 Labview 软件搭建了数据采集系统实验平台, 将地面实验与仿真获得的缸压曲线进行对比, 验证了仿真模型的正确性. 通过模拟发动机在高低空环

^①收稿时间:2013-11-21;收到修改稿时间:2013-12-13

境工况,分析点火正时对发动机性能的影响规律,仿真结果可优化无人机直喷系统点火正时参数,为高空环境下提高发动机性能提供理论依据。

1 直喷系统设计

与进气道喷射工作方式不同,直喷系统工作循环有:空气经由空气滤清器、节气门、进气管、簧片阀、曲轴箱,在扫气口扫气的作用下,进入气缸的空气与燃油混合,按照设定的点火提前角将油气混合气点燃,废气经扫气口扫气排出,循环如框图 1、图 2 所示。

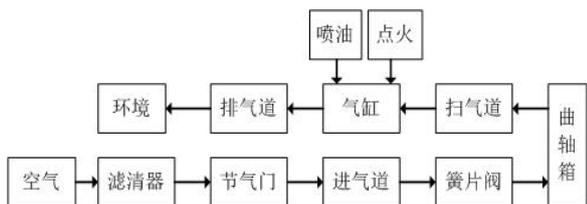


图 1 直喷系统工作循环框图

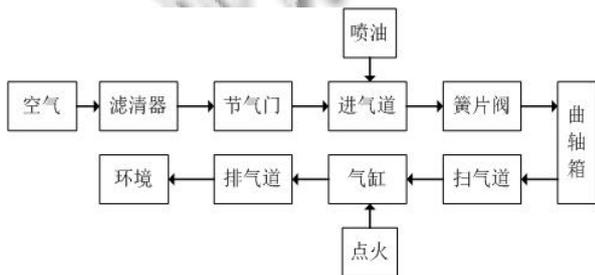


图 2 进气道喷射系统工作循环框图

该直喷系统在设计时,保留了曲轴箱、燃烧室、气缸、活塞等结构尺寸,保证扫气箱的容积、压缩比与原机相同,主要参数如表 1 所示.为了实现对空燃比和点火正时的精确控制,对点火和喷油系统等进行了改进:

表 1 直喷系统主要参数

发动机结构	四缸、2冲程、风冷 水平对置式
缸径×行程/(mm×mm)	65×52
总排量/cm ³	692
压缩比	6.5
点火顺序	1-3-2-4

- 1.在原化油器位置,安装用来调节进气量的节气门体,该节气门体上装有节气门位置传感器;
- 2.缸盖布置喷油器、火花塞、缸压传感器和温度传感器;
- 3.保留 CDI 点火装置,但对磁电机给点火系统供

电进行了改进,使驱动点火信号与曲轴位置和转速传感器相配合。

2 直喷系统建模及验证

GT-Power 基于管内一维流动和缸内容积法进行计算分析,能够模拟分析直喷发动机的性能.作为模块化的仿真软件,GT-Power 涉及到流体流动计算、传热传质模拟、燃烧过程模拟以及控制仿真等内容。

2.1 模型的建立

针对直喷式二冲程发动机建模,准确的燃烧模型能够反映燃烧规律,关系到建模的准确性^[1,2];而点火正时能直接影响燃烧过程^[3-6],对发动机的整机性能产生影响。

GT-Power 软件基于管内一维流动和缸内容积法进行计算分析,能够模拟分析直喷发动机的性能。

利用GT-Power分别建立曲轴箱模块、气缸模块、喷射系统模块、进排气系统模块。

燃烧计算仿真选择了准维燃烧模型^[7,8],该模型可以考虑气缸形状、点火时间及燃料属性等因素,较SIWiebe燃烧模型能更准确地预测点火正时参数对燃烧放热率的影响。

GT-Power 中流动计算从 N-S 方程出发,应用有限体积法将进排气系统流动简化为一维控制体积进行计算^[9].传热计算选用 Woschi 模型^[10],在摩擦损失压力计算中模型采用 Chen-Flynn 的关系式,摩擦损失压力为活塞速度和峰值压力的函数^[11]。

水平对置发动机属于 V 型发动机,在曲轴箱中气缸布置角度设置为 180 度,发动机仿真系统的模型如图 3 所示.在建模时,还要明确如下的参数设置^[12]:

- 1.网格的粗细(离散化长度)应趋于均匀,对进/排气系统离散长度设置分别为 0.4×缸径/0.5×缸径。
 - 2.迭代计算 COURANT 数应选择合适的时间步长,以维持计算的稳定,本文设置 COURANT=0.8。
 - 3.节气门、簧片阀的参考流通面积设置为定值,即零升程时,流量系数为零。
 - 4.由于进排气流动、传热计算比较复杂,本文使用推荐进气端口的温度为 450K;排气端口的温度为 550K。
- 建立模型前需要假定:
- 1)海拔高温 0m 时发动机进气为理想气体,温度和压力分别为 300K 和 0.1MPa;循环初始条件相同。

2)海拔每升高 100m, 气温要降低 0.6 度, 大气压的高低空环境, 温度和压力见表 2. 强减小 1000pa, 分别模拟 0m、1000m、2000m 和 3000m

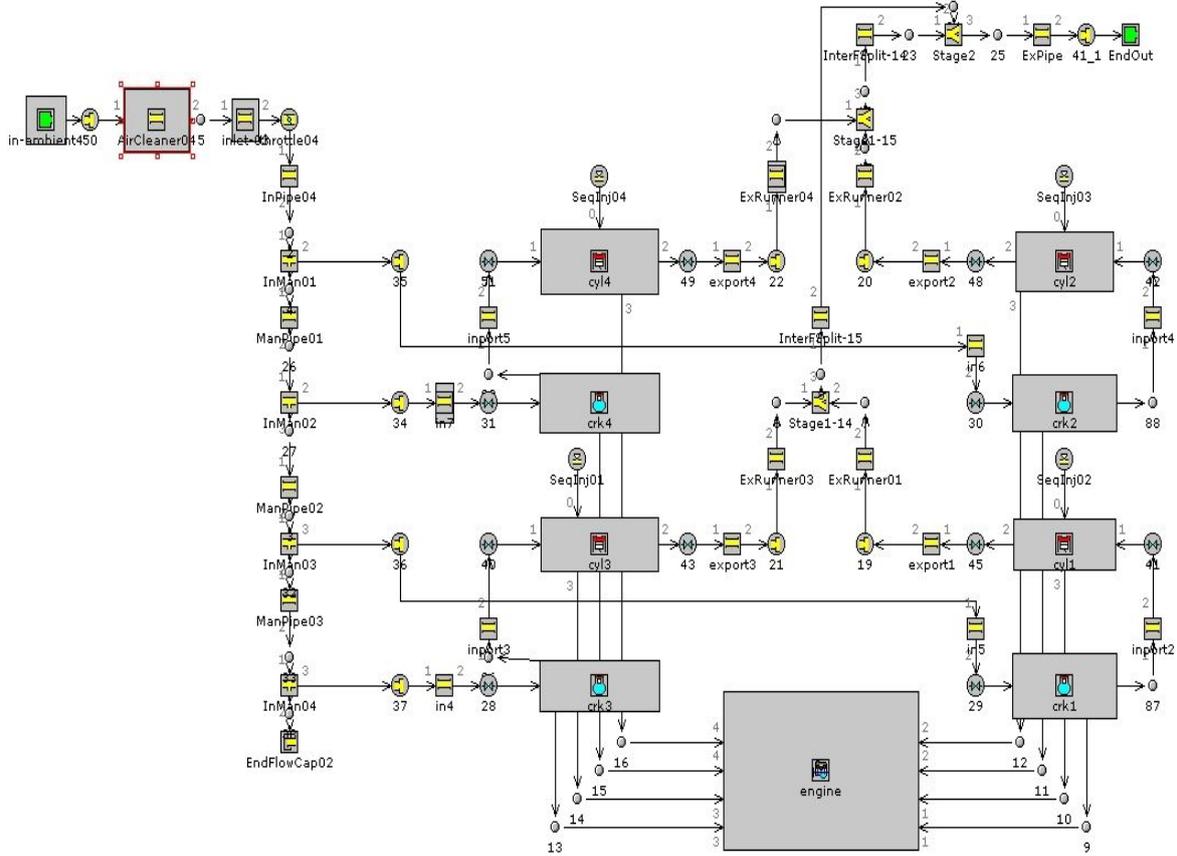


图 3 GT-Power 发动机直喷系统仿真模型

表 2 温度和压力值

高度(m)	温度(K)	压力(MPa)
0	300	0.1
1000	294	0.09
2000	288	0.08
3000	282	0.07

2.2 模型的验证

发动机的汽缸压力反映了汽缸的密封性,是发动机的动力性能指标之一. 本文将仿真结果与实验获取的缸压曲线进行对比, 验证直喷模型的准确性. 实验平台的数据采集系统基于 Labview 软件开发设计的, 其原理如图 4 所示.

压力传感器选用火花塞式传感器, 其传感器可精确测量缸内压力, 并避免燃烧流的纵向共振和热传递

的影响, 可在发动机在 6000r/min 的范围内检测气缸压力. 旋转编码器的转角信号作为数据采集卡的外部时钟, 保证采集的压力信号与曲轴的角度是一一对应. 在电控系统中(ECU 控制面板如图 5), 转速设定为 2900r/min 进行实验, 此时喷油脉宽为 2.44ms, 采集和记录发动机在该转速下的缸压数据.

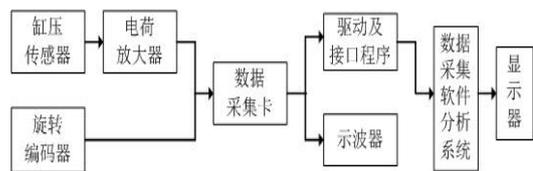


图 4 数据采集系统原理图

在仿真模型中设置相同转速, 点火正时 30°CA 和节气门开度为 8.24%, 得到仿真缸压变化曲线, 并

与实验结果进行对比,如图 6 所示.



图 5 ECU 控制面板

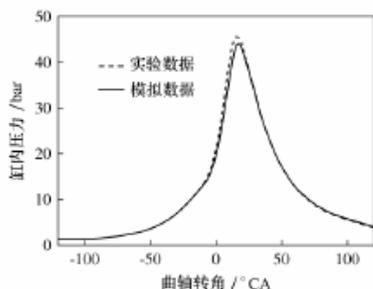


图 6 仿真结果与试验结果对比

从图中可以看出,两者曲线并没有完全重合,但考虑到试验测量误差和直喷燃烧模型的复杂性,所建立模型能够正确反映缸内燃烧的趋势,满足点火正时性能分析的要求.

3 仿真结果分析

调整点火正时可以影响发动机输出功率、扭矩和燃油消耗率,不同的转速和节气门(负荷)条件下都对应着一最佳点火正时.在建模仿真地面环境时,选取进气门开度 70%,转速为 5000r/min.由于原机点火正时固定在 18°CA,数值计算时点火正时分别选择 10°CA、15°CA、20°CA、25°CA、30°CA、35°CA 共 6 个点.环境参数按照 0m、1000m、2000m、3000m 四个高度的气压和温度进行设置.

3.1 点火正时对缸内最大压力的影响

缸内最大压力随着点火正时的增大而增大,且向上止点(TDC)方向移动;减小点火正时,推迟混合气燃烧,最高燃烧压力会向下止点(BDC)方向移动,并且最大燃烧压力随着高度的增加而减小.

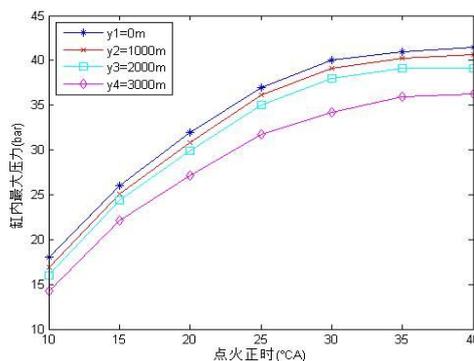


图 7 点火正时与缸内最大压力的关系曲线

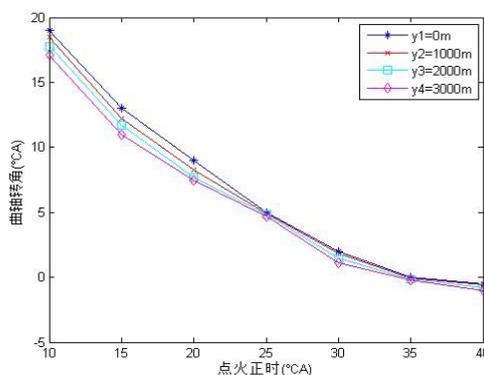


图 8 缸内最大压力与曲轴转角变化曲线

若最高燃烧压力点到达过早,即点火正时角大,则混合气早点火,会导致压缩过程负功的增长,使得有效功率减小,增加燃油消耗,如图 7、图 8 所示.在点火正时大于 30°CA 时,最高爆发压力出现在上止点前,形成与曲轴旋转方向相反的推力.若活塞已向下止点运动时还有未燃混合物会使得燃烧产物的膨胀比减小,损失膨胀功,这说明最高燃烧压力点到达过迟.由于高海拔进气压力低,空气稀薄,燃料燃烧不完全且燃烧速度慢导致缸内最大压力降低,并且达到最大压力的曲轴转角滞后.

3.2 点火正时对发动机扭矩的影响

发动机扭矩大小与推动活塞向下运动的力有关.增大点火正时角时,扭矩会先增大后减小,并在中间某一角度时,扭矩处于最大值,当增大高度时,扭矩会有明显的降低.

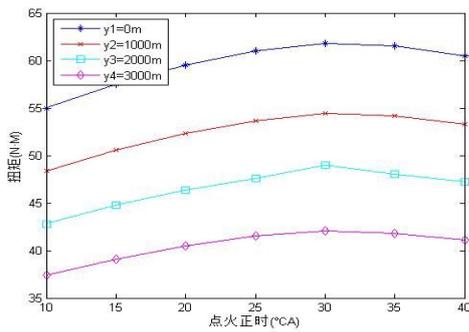


图 9 点火正时与扭矩的关系曲线

如图 9, 对于不同高度时, 点火正时为 30°CA 时, 发动机的输出扭矩均达到最大值, 此时发动机动力性达到最佳。

3.3 点火正时对燃油消耗率的影响

在理论定容燃烧中, 由于燃烧加热, 气缸压力从压缩压力急剧增高至最高压力, 此时功率和效率均最高, 燃油的消耗率也最低^[13]。由于高海拔含氧量低, 燃料燃烧不完全使得油耗急剧增加与获得最大扭矩时所对应的曲轴转角相比, 燃油消耗率最低时对应着一个不同的点火正时角度, 如图 10。

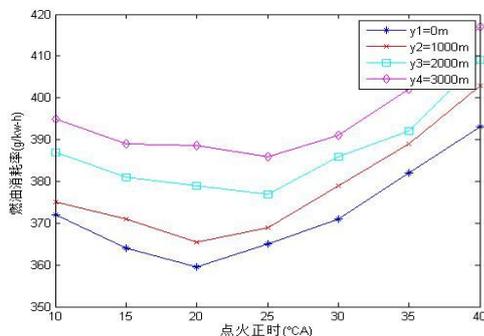


图 10 燃油消耗率与点火正时变化曲线

3.4 点火正时对排气温度、NO_x 排放的影响

随着点火正时角的增大和高度的增加, 排气温度降低。当点火正时角较小时, 燃烧推迟, 排气行程前燃气温度增高, 从而增加发动机的热负荷, 减小有效功率, 燃油消耗率增加和动力性变差。当高度增加时, 燃油燃烧不充分, 燃烧放热损失, 排气温度有明显的降低, 如图 11。

NO_x 的生成量主要取决于两个因素: 富氧程度和燃烧温度。高度升高, 排气温度降低, 当推迟点火, 降低最高燃烧温度, 缩短燃气高温燃烧时间, 能够减少

NO_x 的排放量, 如图 12。

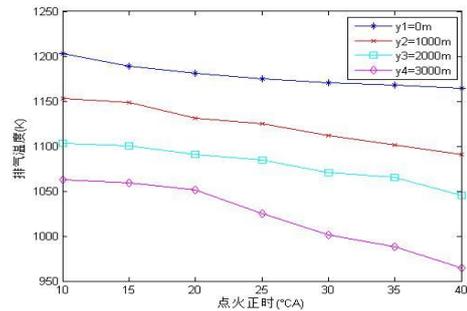
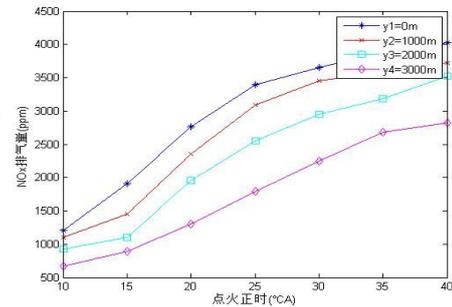


图 11 点火正时与排气温度的关系曲线

图 12 点火正时与 NO_x 排气量的关系曲线

4 结语

1) 采用有限体积法对二冲程直喷系统管道流动、燃烧和传热工作过程进行了建模, 应用 GT-Power 软件对模型进行了仿真计算, 可以方便和较快地对直喷系统进行优化设计, 缩短开发时间。

2) 分析了不同高度点火正时对缸内最大爆发压力、扭矩、燃油消耗率、排气温度和 NO_x 排放值的影响规律。这表明, 在直喷设计上, 可以通过设计不同的点火正时参数提高发动机性能。

3) 本仿真结果可为高空实验提供借鉴, 在以后的研究中, 可以分别考虑压力和温度对发动机性能的影响, 并进行进气增压和增温设计。

参考文献

- 1 陈林林, 魏民祥, 杨海青. 航空二冲程汽油发动机均值模型的试验与仿真. 航空动力学报, 2008, 23(12): 2249-2255.
- 2 徐波, 张煜盛. DME 发动机准维直喷燃烧模型. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 41(3): 110-114.
- 3 李冰林, 魏民祥. 二冲程煤油发动机整机建模与初始点火提前角计算分析. 机械科学与技术, 2013, 32(5): 704-708.
- 4 Nielsen L. Automotive Control Systems. For Engine, Drive-line, and Vehicle. Second edition. Berlin: Springer,

- 2005: 56-146.
- 5 Salimi F, et al. Effects of Spark Advance, AF Ratio and Valve Timing on Emission and Performance Characteristics of Hydrogen Internal Combustion Engine. SAE Paper, 2009-01-1424.
- 6 高莹,李书华,杨世春,等.点火时刻对缸内直喷汽油机燃烧过程影响的研究.汽车技术,2011(2):1-9.
- 7 伍小军.缸内直喷汽油机的准维燃烧模型研究[学位论文].武汉:华中科技大学,2002.
- 8 李向荣.内燃机燃烧科学与技术.北京:北京航空航天大学出版社,2012.
- 9 朱访君,吴坚.内燃机工作过程数值计算及其优化.北京:国防工业出版社,1997.
- 10 周松,王银燕,等.内燃机工作过程仿真技术.北京:北京航空航天大学出版社,2012.
- 11 戴正兴.汽油机可变气门正时技术仿真及方案分析.汽车技术,2008(3):22-26.
- 12 黎幸荣.发动机排气噪声模拟及测试方法的研究[学位论文].合肥:合肥工业大学,2010.
- 13 杨建华,龚金科,吴义虎.内燃机性能提高技术.北京:人民交通出版社,2000.