

双对置二冲程柴油机性能分析方法探讨

刘长振，刘广丰，郝勇刚，李建新

(中国北方发动机研究所廊坊分所，河北廊坊 065000)

摘 要：双对置二冲程发动机内外连杆的特殊结构决定了内外活塞的运动规律不同于传统发动机。基于等容积变化率原理，并对比传统结构形式发动机性能分析方法，探讨 BOOST 软件用于双对置二冲程发动机性能分析的方法及其可行性。研究表明：该方法可行；由于双对置二冲程发动机活塞运动规律的差异，使得 P-V 图更趋于丰满，有利于提高热效率，但同时最高燃烧温度随之升高，热负荷增加。

关键词：双对置二冲程柴油机；性能；BOOST 软件

中图分类号：TK421⁺.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1001 - 4357(2012)01 - 0031 - 04

Method Discussion on Performance Simulation of Opposed Piston and Opposed Cylinder Two-stroke Engine

Liu Changzhen, Liu Guangfeng, Hao Yonggang, Li Jianxin

(Langfang Branch Department of China North Engine Research Institute , HebeiLangfang 065000)

Abstract: The piston motion of the opposed piston and opposed cylinder two-stroke engine is different from the traditional engine because of the special structure of inner and outer connecting rods. Based on the theory of equal cubage change ration, and compared with the performance analysis method of traditional structure engine, how to use BOOST software to analyze the opposed piston and opposed cylinder two-stroke engine and its feasibility are discussed. The research show that this method is feasible; as the piston motion rule of this engine is different, its P-V figure is more well-developed, and can help to improve the heat efficiency; however, at the same time, the highest combustion temperature goes higher, and resulted in thermal load increasing.

Keywords: opposed piston and opposed cylinder two-stroke engine; performance; BOOST software

0 引 言

对置活塞和对置气缸发动机在国外进行了多年的研究和探索，都有典型的成熟产品。而活塞对置气缸对置发动机(双对置发动机)的研究还处于创新阶段。FEV 和 ECOMOTOR 等公司近些年一直致力于该型发动机的研发工作。特殊的结构(图 1)使其具有其它机型所不具备的优点。据 2011 年最新报告，美国“悍马”之后的联轻型战术车辆

(JLTV)把双对置发动机做为备选动力。

双对置发动机结构特点及优势：

- (1) 二冲程工作原理，做功频率高，易于实现高的功率密度，便于小型化、轻量化；
- (2) 没有进排气阀系和气缸盖，零部件数量比传统四冲程四缸发动机少 30% ~ 50%；
- (3) 双对置结构，能够实现理论的全平衡设计，振动小；
- (4) 燃气压力通过内外活塞主要施加到曲轴

上, 机体受力小;

(5) 没有气缸盖, 散热少;

(6) 直流扫气、电控喷油及新型活塞和活塞环设计技术突破了传统二冲程发动机排放差和机油耗高的瓶颈。

双对置发动机特殊的结构形式决定了其燃烧方式不同于传统发动机。本文重点对双对置柴油机性能分析方法进行研究和探讨。

双对置发动机因其气缸内工作容积变化由内外活塞运动规律共同决定, 所以容积变化率与传统发动机不同。内外活塞共同组成扁平燃烧室, 进排气门的启闭分别由内外活塞控制。双对置柴油机的这种结构形式使其燃烧组织形式不同于传统柴油机。

(1) 喷油器的安装位置不同于传统柴油机, 需布置在气缸套侧壁上;

(2) 由内外两个活塞共同组成扁平燃烧室, 其形状必须有利于提高扫气效率和对冲喷油方式的燃烧组织形式;

(3) 缸内容积变化规律由两个活塞运动形式共同决定, 其缸内容积变化率不同于传统发动机;

(4) 进排气开启和关闭时刻分别由内外活塞控制, 曲轴的错拐角度控制进排气门的相位角。



图 1 双对置发动机示意图

1 缸内过程仿真分析的理论依据

一维整机性能分析是基于整个发动机进排气、缸内工作过程的系统匹配分析。对于缸内燃烧过程采用零维模型处理。

零维模型是基于能量守恒定律、质量守恒方程及理想气体状态方程把整个工作过程联立起来。

目前成熟一维仿真分析软件中处理缸内工作过程的基本方程为:

$$\frac{d(m_c u)}{d\alpha} = -p_c \frac{dv}{d\alpha} + \frac{dQ_F}{d\alpha} - \sum \frac{dQ_w}{d\alpha} - h_{BB} \frac{dm_{BB}}{d\alpha} \quad (1)$$

$\frac{d(m_c u)}{d\alpha}$ 为气缸内能变化, kJ; $-p_c \frac{dv}{d\alpha}$ 为活塞功,

kJ; $\frac{dQ_F}{d\alpha}$ 为燃料输入热量, kJ; $\sum \frac{dQ_w}{d\alpha}$ 为缸壁热量

损失, kJ; $h_{BB} \frac{dm_{BB}}{d\alpha}$ 为进排气焓流, kJ。

式中: m_c 为缸内物质质量, kg; u 为特定内能, kJ; p_c 为缸内压力, MPa; v 为缸内容积, m^3 ; Q_F 为燃料能, kJ; Q_w 为壁面热损失, kJ; α 为曲轴转角, ($^\circ$); h_{BB} 为进排气焓值, kJ; $\frac{dm_{BB}}{d\alpha}$ 为进排气质量流量, kg。

由式(1)得到, 发动机一维性能仿真缸内总能等于活塞功、燃料输入热量、壁面热损失、进排气焓流值的叠加。其中燃料输入热量决定于缸内喷入燃料量及放热规律; 壁面热损失主要受壁面温度和缸内涡流比影响; 进排气焓流受进排气参数以及活塞漏气量的控制; 而活塞功决定于缸内压力变化及容积变化率; 压力变化规律除受燃料放热率的影响外还受容积变化率的影响, 见式(2)。

$$p_c = \frac{1}{v} m_c R_o T_c \quad (2)$$

式中: p_c 为缸内压力, MPa; m_c 为缸内物质质量, kg; R_o 为气体常数; T_c 为缸内气体温度, K; v 为缸内容积, m^3 。

因此正确模拟缸内燃烧过程, 确定合理的活塞位移曲线是保证性能计算准确的前提。

2 双对置柴油机性能分析

2.1 计算模型建立

本文利用 BOOST 计算软件对双对置二冲程柴油机的性能进行分析。利用 BOOST 建立单模块双对置二冲程柴油机性能分析的模型, 如图 2。

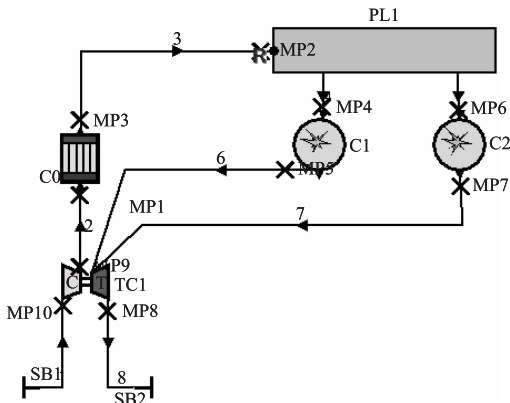


图 2 BOOST 计算模型

2.2 活塞运动规律设置

传统曲柄连杆机构发动机的活塞位移规律完全由连杆长度和曲柄半径决定, 而对于双对置发动机而言, 其缸内容积变化规律由两活塞运动共同作用, 因此如果采用常规的设定连杆长度和冲程不能真实地模拟缸内的容积变化规律。以合成的缸内容

积变化率定义活塞运动规律就可以较好地解决这一问题。通过内外活塞运动规律合成得到缸内容积变化率。

2.3 燃烧参数设置

燃料在缸内燃烧产生的能量是发动机输出动力的源泉，燃烧过程中压力和温度的变化决定于热量随时间放出的规律。即：

$$Q=f(t)$$
(3)

(3) 式对时间 t 微分，就得到缸内燃烧过程的放热速度。

在性能计算中能否相对准确地得到燃烧函数是保证计算精度的关键。目前一维性能分析中，暂时无法通过试验得到相对精确放热规律的情况下，最常用的就是韦伯模型。双对置发动机计算同样选用该计算模型。

$$\frac{dx}{d\alpha}=\frac{a}{\Delta\alpha_c}(m+1)y^me^{-ay(m+1)}$$
(4)

$$dx=\frac{dQ}{Q}$$
(5)

$$y=\frac{\alpha-\alpha_o}{\Delta\alpha_c}$$
(6)

式中： Q 为燃料总输入热量，kJ； α 为曲轴转角，(°)； α_o 为燃烧起始角度，(°)； $\Delta\alpha_c$ 为燃烧持续期，(°)； m 为形状因子； a 为 Vibe 系数。

本文对于双对置发动机的性能计算主要基于国外某相似机型的放热规律，结合三维缸内燃烧过程分析，得到本双对置发动机的缸内放热规律曲线，进行参数设置。

2.4 扫气模型设置

与传统二冲程发动机相比，沿气缸周向布置进排气口，优化直流扫气，提高扫气效率为该发动机的主要特点，因此合理设置进排气参数为正确分析的另一关键。

BOOST 计算中扫气模型直接反应扫气效率的高低，决定缸内新鲜空气充量。二冲程发动机都需要用户自定义扫气曲线。

对于双对置二冲程发动机而言，可借鉴传统机型有限，因为传统二冲程柴油机大多为低速船机，其扫气模型不适用于这样的高速发动机。具有同样速度或更高速度的发动机大都为小缸径汽油机，其所需空气量等参数也不同于柴油机，因此扫气效率曲线可借鉴性有限。

本文针对这一问题，运用 CFD 三维计算软件 FIRE 进行直流扫气效率计算，得到双对置发动机直流扫气模型的扫气效率曲线，见图 3。

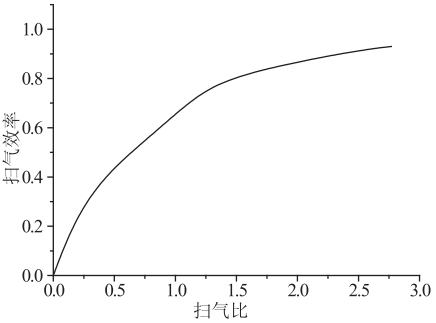


图 3 扫气效率曲线

利用 BOOST 软件中扫气效率自定义模式，直接把 FIRE 计算结果导入一维性能计算模型。

2.5 进排气设置

进排气过程通过内外活塞的运动控制缸壁周围进排气口的开启和关闭角度来实现，故活塞运动规律和气口的结构参数是影响双对置柴油机换气过程的重要因素。所以，在用 BOOST 计算时，就需要定义进排气口开启面积随活塞位移变化的规律，以便准确描述柴油机实际工作时的进排气过程。

BOOST 软件中气口的实际有效流通面积按下式计算：

$$A_{\text{eff}}=\mu A_g$$
(7)

式中： A_{eff} 为实际有效流通面积，mm²； μ 为气口流通系数； A_g 为几何流通面积，mm²。

流通系数也是影响通量的一个关键参数，本文中进排气口的流通系数通过三维流动计算得到。

根据活塞运动规律和位移变化，能够得出气口开启面积随着曲轴转角的变化规律，从而得出有效流通面积曲线。

3 仿真结果与分析

本文针对该机型(基本性能参数见表 1)设计目标 2 500 (r·min⁻¹)、160 kW 额定工况点进行了分析计算，结果见图 4~6。图 7、图 8 为保持缸径和冲程不变，采用传统设定连杆长度方式进行分析得到的 P-V、缸内温度曲线对比图。

表 1 基本性能参数

转速/(r·min ⁻¹)	2 500
功率/kW	160
增压比	3.5
过量空气系数	2.0
最高燃烧压力/MPa	14.5
最高燃烧温度/K	1 720
排气温度/K	900

(1) P-V 图

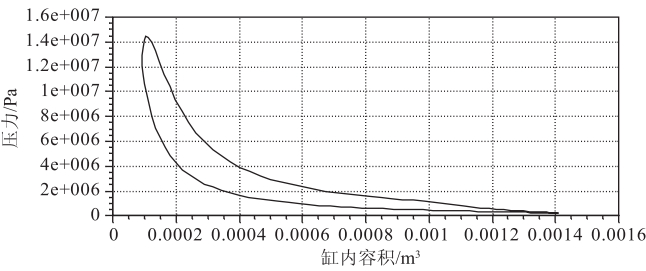


图 4 P-V 图

(2) 缸内温度变化曲线

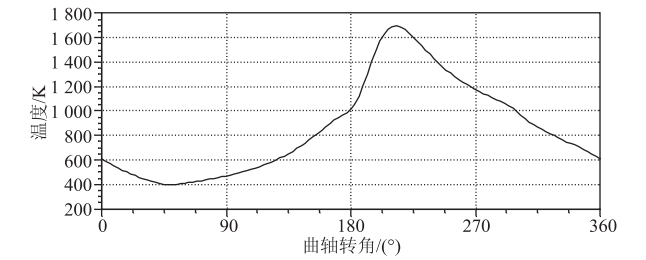


图 5 缸内温度曲线

(3) 不同进气歧管直径对 IMEP 的影响

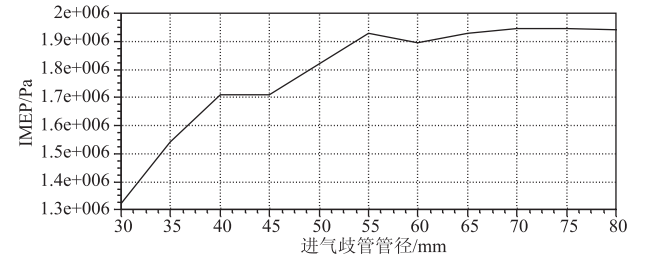


图 6 进气歧管直径对 IMEP 的影响曲线

(4) P-V 图对比

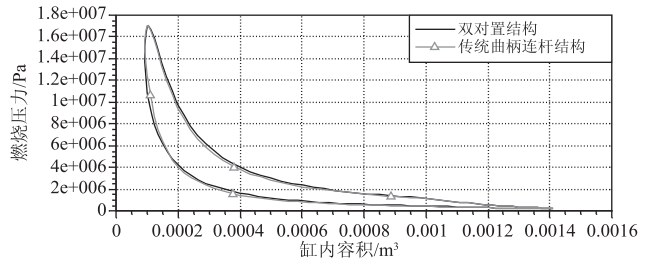


图 7 P-V 图对比曲线

(5) 缸内温度对比

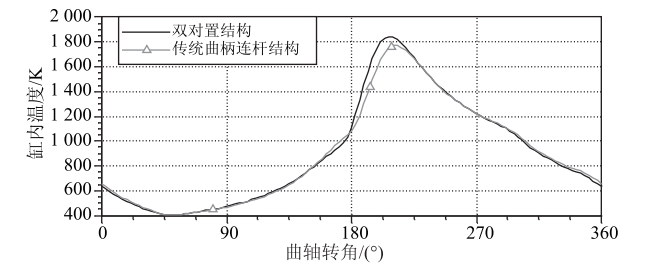


图 8 缸内温度对比曲线

由计算结果分析可得：

(1) 该发动机基本能够实现既定的性能指标，缸内温度和燃烧压力保持在一个合理的范围内。

(2) 由图 6 可以看出，当进气歧管直径达到 50 mm 以上，对发动机性能的影响趋于平缓。这符合传统发动机进排系统优化分析的理论规律。

(3) 在保持缸径、冲程不变的情况下，以传统曲柄连杆机构的活塞运动规律代替双对置柴油机的运动规律，进行对比分析可见：双对置柴油机的 P-V 图略微趋于丰满；但最高燃烧温度要高于传统曲柄连杆机构运动规律的最高温度。其最主要原因是曲轴错拐使得内外活塞不同时到达上止点，在缸内容积最小点附近，两个活塞要保持十几度的同向运动，这就使得缸内容积变化率在上止点附件更加平缓，更趋近于等容燃烧，有利于整机热效率的提高。如果采用传统的设定方式，双对置发动机的这一工作特点就无法得到正确的模拟。

4 结 论

(1) 基于一维缸内分析数学模型，采用等效容积原理，以活塞运动规律曲线作为输入条件进行对置二冲程发动机的性能分析的方法是可行的。

(2) 由于双对置二冲程发动机活塞运动规律的差异，使得 P-V 图更趋于丰满，有利于提高热效率，但同时最高燃烧温度随之升高，热负荷增加。

参考文献

[1] 蒋德明. 内燃机原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
[2] 朱仿君、吴坚. 内燃机工作过程数值计算及其优化 [M]. 北京: 国防工业出版社. 1997.
[3] Peter Hofbauer. Opposed piston opposed cylinder engine for military ground vehicles [C]. SAE World Congress , Detroit, Michigan. April 11 - 14, 2005.