

双缸双自由活塞汽油直线电机的缸内直喷特性和燃烧特性的研究

Research on in-cylinder direct injection and combustion characteristics of two-cylinder double-free piston gasoline linear generarot

闫晓东¹, 冯慧华¹

(1 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 自由活塞直线电机作为一种新型的增程式动力装置, 在结构复杂性、紧凑性、热效率性以及运动特性等方面都比传统发动机具有极大的优越性, 而且由于取消了传统的曲柄连杆机构, 采用传统的曲轴转角描述运动自由活塞直线电机的规律受到限制, 本文使用 Converge 软件利用时间曲线对双缸双自由活塞汽油直线电机的缸内直喷燃烧特性的进行了数值模拟, 结果显示双缸双自由活塞汽油直线电机燃烧迅速, 放热率高, 具有较好的动力性, 但也存在着较为滞后的后燃期, 这些研究成果为进一步推动了双缸双自由活塞汽油直线电机这一新型能源的应用提供了参考。

关键词: 双缸双自由活塞直线电机; 缸内直喷; CFD; 燃烧特性; Converge

Abstract: Free piston linear motor as a new type of power plant, increasing complexity in structure, compact, thermal efficiency and movement characteristics are of great superiority than traditional engine, and because the cancellation of the traditional crank connecting rod mechanism, the traditional crankshaft Angle free piston motion is described in the law of the linear motor is restricted, this paper use Converge software use time curve of double cylinder double linear motor free piston gasoline direct injection (gdi) combustion characteristics are simulated, the results show that duplex double free piston linear motor gasoline burn quickly, heat release rate is high, has a good dynamic performance, However, there is still a lag in the post-combustion period. These results provide a reference for further promoting the application of two-cylinder double-free piston gasoline linear motor as a new energy source.

Keywords: Double cylinder double free piston linear motor; Direct injection incylinder; CFD; Combustion characteristics; Converge

1 引言

随着能源危机和环境污染的日益加剧, 世界各国对环境保护开始越来越重视, 而汽车尾气污染作为大气污染的重要来源, 在面对严格治理空气污染治理的时期, 必须面对日益严格的排放法规的挑战, 因此各个国家的研究学者都开始通过种种途径探索更为高效、节能和低排放的新型动力源, 如自由活塞发动^[1]、氢能发动机、转子发动机^[2-4]等。而自由活塞直线电机作为一种新型的增程式动力装置, 它将发动机与直线发电机相互耦合, 将内燃机提供的机械能直接转化为电能; 与传统内燃机相比, 由于取消了曲轴连杆装置, 极大降低了结构的复杂度和重量, 具有低耗、高效的潜在性能优势; 同时还可以适用多种燃料, 极大拓宽了燃料的来源, 在一定程度上缓解了能源的紧张程度; 因此在当今复杂多变的能源背景和环境政策下, 受到众多研究机构和学者的重视。但是, 大部分研究学者还只是停留在研发设计的初级阶段, 很少对自由活塞汽油直线电机的缸内直喷特性和燃烧特性进行详细的机理研究, 这已经严重限制了自由活塞直线电机的进一步商业化推广和应用, 因此本文以双缸双自由活塞汽油直线电机为研究模型, 对其缸内直喷特性和燃烧特性进行了研究。

研究人员 Scott Gold borough, Peter Van Balbriggan 和 Nicholas Paradise 等来自于桑迪亚国家实验室的研究者们提出了均质压燃模式的自由活塞直线电机, 他们设计了一个可以使用甲烷、氢气、氨气等不同的燃料样, 最大功率可以达到 30kw^[5-7], 最高理论热效率最高可达 56%。但是这些成果仅是在单次循环实验下获得的, 没有考虑循环间波动的影响, 因此还需要通过长期的实验进一步证明。

瑞典查尔姆斯里大学的 Jakob Fredriksson 和 Miriam Bergman 等研究员利用一维数值实验软件 GT-Power 对自由活塞在均质压燃条件下进行了使用柴油、天然气、氢气和汽油时的性能数值实验分析^[8], 根据数值实验结果, 在使用天然气作为燃料时, 理论指示热效率可以达到 59%, 但是这些成果仅限于数值实验研究, 还需要进一步通过实际实验论证。

西弗吉尼亚大学作为较早开展自由活塞研究的单位，搭建了火花塞点燃式自由活塞直线电机的数值实验模型^[9]，初步研究了缸径、行程、扫气结构、气流运动形式等参数对性能特性的影响，随后设计了功率为 316W，运动频率为 23Hz 的第一代点燃式自由活塞直线电机，进行了大量的实验研究，研究了喷油时刻、喷油位置、动子质量等参数对燃烧特性的影响^[10,11]，发现自由活塞直线电机比传统发动机具有更低的排放水平，并在指示效率方面具有潜在的优势。

北京理工大学作为最早投入到自由活塞直线电机的研究机构中的一员，自从 2006 年以来，先后设计了采用进气道喷射的双活塞双缸结构的点燃式样机^[12,13]和压燃式^[14,15]样机，历经十几年的传承和发展，全面研究了样机从起动过程，燃烧过程和稳定发电过程等不同工况的运动特性，取得了一系列的研究成果，但是对于缸内直喷的自由活塞直线电机还仅仅处于理论研究阶段。

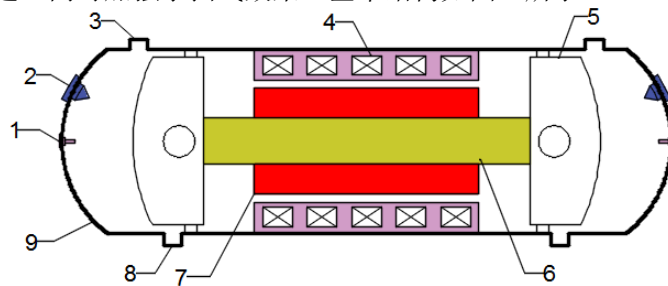
总之，缸内直喷的喷雾特性和燃烧特性作为一项研究自由活塞直线电机的重要参数，迄今为止，仍没有行之有效的参考资料对自由活塞直线电机的喷雾特性和燃烧特性进行深入的研究，因此本文利用 converge 软件，以双缸双自由活塞汽油直线电机为模型，对其缸内直喷特性和燃烧特性进行了数值模拟研究，更直观的认识和了解了双缸双自由活塞汽油直线电机的工作原理和工作特性，获得了重要的研究成果。

2 研究基础

2.1 原理样机研究

本文研究的双缸双自由活塞汽油直线电机模型是有一个永磁直线发电机和两个对置的自由活塞发动机组成^[16]，整个系统的基本工作原理是：活塞向一端运行到指定位置时，固定在缸盖顶部的火花塞开始点火，引燃燃烧室内的燃料，燃料经燃烧瞬时释放热能，推动活塞向另一端移动，当活塞被推到另一端指定位置时，固定在另一端端盖上的火花塞也开始点火，引燃燃烧室内的燃料将活塞顺利推回。如此反复，在活塞来回运动的过程当中带动和活塞固连的由永久磁铁组成的连杆切割线圈，从而将活塞的机械运动转化成电能输出，提供给外部负载，由此实现了将化学能转化为机械能，机械能转化为电能转变过程。

其中扫气过程、排气过程的实现是靠活塞和缸壁的配合完成的。具体工作原理是由活塞的往复循环运动将气口和燃烧室循环连通或隔断。这些气口在缸套的固定位置处开槽加工，有 1 个主扫气口和 2 个辅助扫气口组成，其中主扫气口处于排气口相对位置，形成理论上的横流扫气方式，虽然横流扫气方式结构简单，但换气效果不佳。因为扫、排气口之间容易直接连接形成短路，在气缸内形成扫气死角，而且排气口晚关也增加了新鲜充量的逸出。因此，在缸套上排气口位置的两侧还加工有具有 15° 倾角的两个辅助气口，形成理论上的回流扫气方式，一方面扫气口的倾斜角使得扫气气流不仅纵向朝气缸顶流动，横向也可以保证气流沿缸壁转弯而形成回流。因而避免了横流扫气方式造成的扫气死角问题，同时加强了扫气效果。基本结构如图 1 所示：



1. 火花塞 2. 喷油器 3. 排气口 4. 线圈 5. 活塞 6. 连杆 7. 永磁铁 8. 扫气口 9. 缸套

图 1 自由活塞直线电机原理图

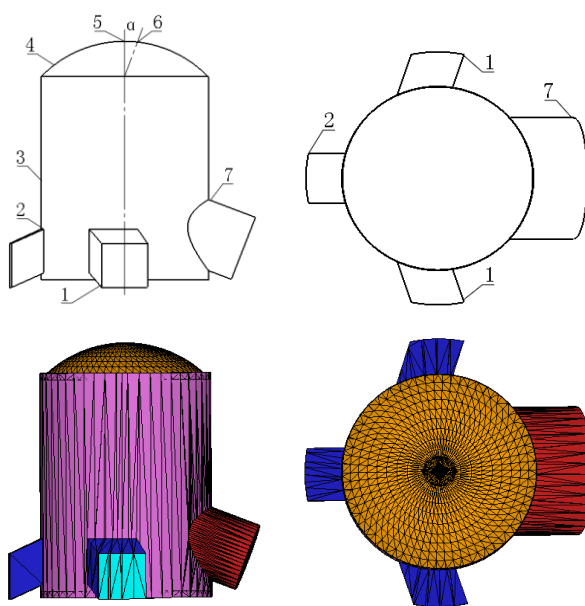
原型样机的工作参数如表 1 所示：

表 1 自由活塞结构参数

参数	参数值
工作形式	2 冲程
缸径	52.5 mm
最大行程	70 mm
动子质量	5.0 Kg
喷雾形式	GDI
点燃方式	SI
运动频率	25Hz

2.2 数值实验模型

我们知道，实际样机的结构比较复杂，从图 1 就可以明显看出来，实际的样机由多个系统组合而来的，而且各个系统又相互制约，从而保证了整个系统稳定高效的运行。但是当我们建立模型进行数值实验时，为了高效、准确的对整个系统进行高效研究，必须合理利用计算机资源，因此只需要保留关键结构，采用简化后的模型进行数值实验，简化模型如图 2 所示。其中火花塞和喷油器之间的夹角 α 为 20° 。



1 辅助扫气口 2 主扫气口 3 缸套 4 缸盖 5 火花塞 6 喷油器 7 排气口

图 2 自由活塞直线电机数值实验模型图

2.3 数值实验条件

缸内的气流运动除了涡流、滚流和挤流外，还存在着一种随机、非定常、有旋的流动，即湍流。湍流是自然界普遍存在的流体运动，它只有在流体高速流动（高雷诺数）的情况下才会产生，它对可燃混合气的燃烧速度和火焰传播有着十分重要的影响。特别是火花点火式发动机中的湍流能够促进火焰面附近已燃气体和未燃气体的交换，扩大火焰前锋表面积，从而提高火焰传播速率；同时湍流还可以改善燃油尤其是壁面附近燃油与空气的混合。Converge 具有标准 $k-\epsilon$ 模型，RNG $k-\epsilon$ 模型， $k-\epsilon$ 模型， $k-\epsilon$ SST 等多种模型可以模拟这种湍流运动，其中 RNG $k-\epsilon$ 模型是目前数值实验当中应用最为普遍的模型，与其它模型相比，它可以计算更小尺度范围内的气流运动，而且更加高效^[17]，因此本文采用此模型模拟缸内复杂的气流运动。

燃料的喷雾过程是一个极其复杂的过程，涉及到燃料在喷嘴内部的流动状况、燃料受到缸内湍

流的作用和液粒之间的相互碰撞等因素, Converge 软件当中的则采用 KH+RT 模型, 它不依赖于经验公式, 而是建力在对喷雾机理的分析基础之上提出的, 它认为燃油的破碎主要是由于液滴与气体之间的速度差造成的, 它能很好的模拟高压喷射燃油的油滴破碎和雾化的过程, 具有很高的模拟精度, 被广泛用来模拟中等喷射压力的多孔喷油器。本文采用的喷油器参数如表 2 所示。

表 2 喷油器工作参数

喷油器参数	参数值
喷油器孔径	0.32m m
喷油器孔数	6 孔
喷射压力	10Mpa
喷射脉宽	1ms
当量比	1.2

燃烧模型采用详细化学机理反应模型 SAGE, 用来模拟精确的燃烧过程, 而破碎模型和壁面模型分别采用 O' Rourke 和 Frossling 模型。

总起来说, 采用模型的如表 3 所示

表 3 数值实验模型

数值实验参数	数值实验模型
湍动能模型	RNG $k-\varepsilon$
喷雾模型	KH+RT
燃烧模型	SAGE
破碎模型	O Rourke
蒸发模型	Frossling

除了实验模型的选择对数值实验的仿真精确度和高效性产生重要影响以外, 初始条件和边界条件的选择也对数值模拟的影响起着重要影响, 本文采用的初始条件和边界条件如表 4 所示:

表 4 初始条件和边界条件

边界条件	参数值
进气压力	1.2bar
进气温度	300.0K
排气压力	1.0bar
排气温度	300.0K
活塞顶面温度	450.0K
壁面温度	400.0K
缸盖温度	430.0K
缸内初始温度	350.0K
缸内初始压力	1.1bar
进气道初始温度	450.0K
进气道初始压力	1.2bar
排气道初始温度	450.0K
排气道初始压力	1.0bar

3 结果及讨论

3.1 数值研究验证

自由活塞直线电机缸内气流运动数值实验、喷雾数值实验和燃烧数值实验是一个极其复杂的过程，为了保证数值实验的精确性和可靠性，需要综合考虑网格的大小，数值实验采用的模型、使用的步长以及采用的初始条件和边界条件等，因此为了排除网格尺寸的影响，本文对尺寸为 1.5mm 网格和 2mm 网格进行了数值实验对比，数值实验结果如图 3 所示，从图中可以明显看出，在 1.5mm 基本网格尺寸下数值实验得出的缸内压力和 2mm 基本网格尺寸下数值实验得出的缸内压力几乎没有差别，基本上可以排除采用不同基本网格尺寸对数值实验产生的误差。因此综合考虑数值实验效率的精确性和高效性，本文数值实验采用基本尺寸为 2mm 的网格。

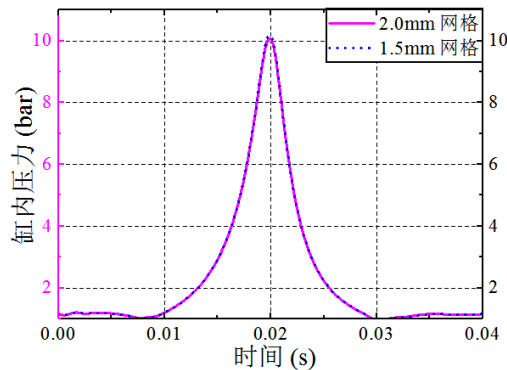


图 3 不同网格尺寸缸内压力对比

3.2 数值研究结果

图 4 显示的是采用 Converge 软件提供的 KH+RT 喷雾模型数值实验的喷雾发展过程，图中展示了喷雾从 0.0088s 排气口刚刚关闭时刻开始喷雾的阶段到 0.011s 喷雾结束阶段的整个过程。由于液滴喷射后液滴直径通常在微米范围，为了保证数值实验的精确性，本文采用了 Converge 软件提供的自适应网格以及喷嘴附近网格加密的综合策略，从图中也可以看出，液滴喷射范围内的网格被加密，同时随着喷雾的发展过程，液滴经过处也会自动加密，从而保证了数值实验的精确性和高效性。

同时，从图中也可以看出，燃料经喷雾器喷射后，迅速在缸内雾化，随着时间的运行，燃油迅速沿着缸壁四周汽化，形成燃油蒸汽，与缸内空气形成混合气，为后续燃烧做准备。

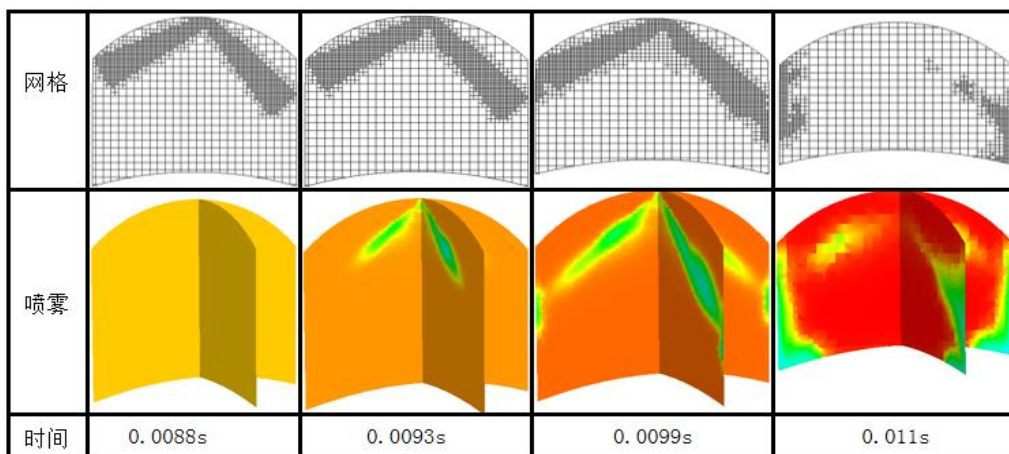


图 4 喷雾发展过程

图 5 显示的是采用 Converge 软件提供的 SAGE 模型模拟燃烧的整个过程，从点火时刻 0.0183s, (相当于传统发动机的 16.5° 上止点前)，球形火核迅速形成，顺利点燃缸内的混合气，在 0.02s (相当于传统发动机的上止点) 时，火焰几乎传遍缸内顺利完成燃烧。

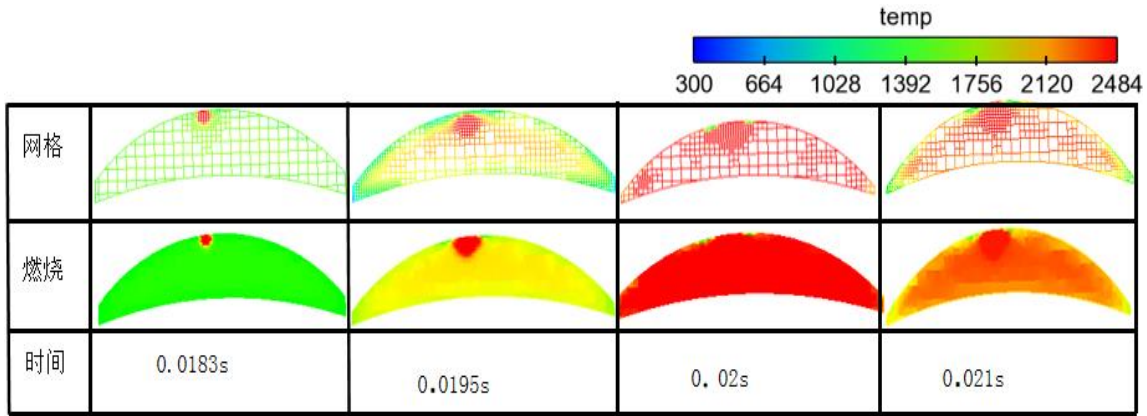


图5 燃烧发展过程

从图6所示的缸内压力曲线和温度曲线，可以明显看出，在一个循环周期内，缸内最高压力点出现在上止点后，达到40bar，保证了自由活塞直线电机的动力性和经济性，同时从缸内温度曲线也可以看到，在接近上止点时，缸内产生的热量也几乎达到了最高点，但最高温度不超过2500K，远低于传统的火花点火发动机，这非常有利于降低NO_x的排放。

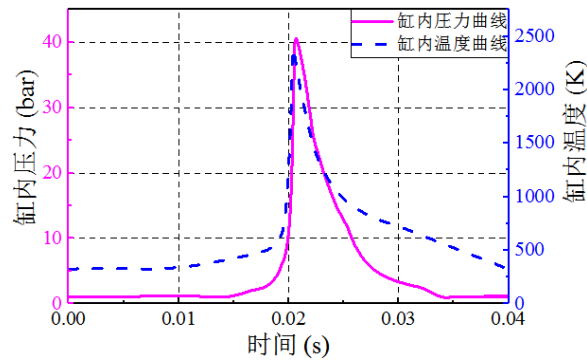


图6 缸内温度和压力曲线

从图7和图8所示的缸内瞬时放热率曲线和缸内累积放热曲线也可以明确看出，在0.015s时，缸内热量开始脱离平缓趋势，缓慢升高，这主要是此后火花塞开始跳火，顺利引燃缸内燃料，在接近0.02s时，缸内燃烧几乎达到最大强度，此时缸内瞬时放热率此时也达到最大值。从累积燃烧放热曲线可以明显看出，此后累积放热曲线曲率开始变得缓慢，缸内燃烧也逐步结束，累积放热曲线达到最大值。

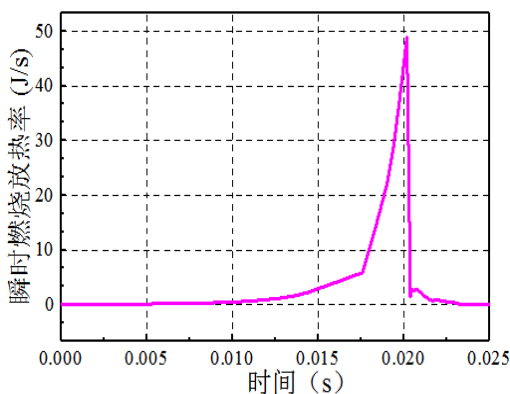


图7 缸内瞬时燃烧放热率曲

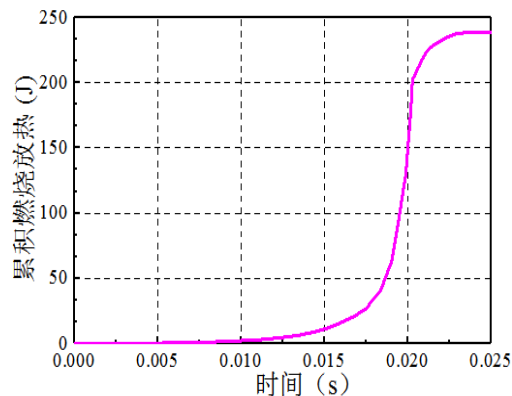


图8 缸内累积燃烧放热曲线

结合以上图5、图6、图7和图8综合分析，可以对缸内燃烧过程明显分析出图9所示的缸内燃烧结果，缸内延迟期相对较短，也就是说缸内混合气在1ms内顺利被引燃，混合气迅速进入急燃期，

90%热量在 1.7ms 内瞬间释放完毕，但是相对来说，自由活塞直线电机就有相对较长的滞燃期，滞燃期占据了 2ms 的时间。

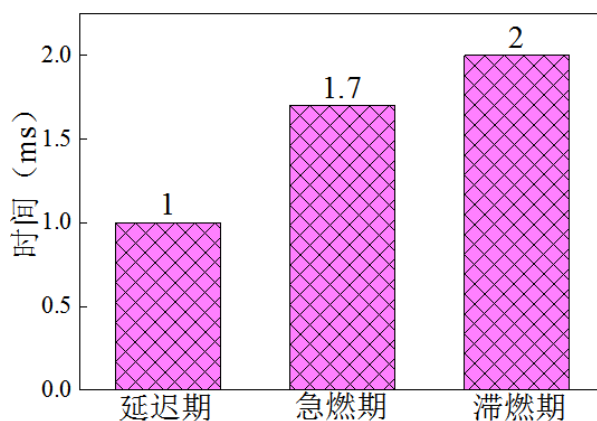


图 9 缸内燃烧分析

4 总述

总起来说，本文对双缸双自由活塞汽油直线电机的工作原理进行了分析，并根据工作原理，搭建了数值模拟工作模型，利用 CONVERGE 软件，运用时间规律对其缸内直喷的喷雾特性和燃烧特性进行了分析，结果表明，双缸双自由活塞汽油直线电机后燃期存在滞后现象，为进一步研究双缸双自由活塞汽油直线电机提供了参考。

5 参考文献：

- [1] Mikal Sen R, Rosily. A review of free-piston engine history and applications.[J].Apply Therm Eng 2007; 27(1):39-52.
- [2] Cheng Shi, Changwei Ji, Shuofeng Wang, et al. Numerical simulation on combustion process of a hydrogen direct-injection stratified gasoline Winkler engine by synchronous and asynchronous ignition modes.[J]. Energy Conversion and Management 2019; 183:1-25.
- [3] Cheng Shi, Changwei Ji, Shuofeng Wang, et al. Effect of dual-spark plug arrangements on ignition and combustion processes of a gasoline rotary engine with hydrogen direct-injection enrichment.[J]. Energy Conversion and Management 181 (2019) 372-381.
- [4] Cheng Shi, Changwei Ji, Shuofeng Wang, et al. Effects of hydrogen direct-injection angle and charge concentration on gasoline-hydrogen blending lean combustion in a Winkler engine.[J]. Energy Conversion and Management 187 (2019) 316-327.
- [5] S. Scott Goldsborough, Peter Van Blarigan. A Numerical Study of a Free Piston IC Engine Operating on Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion.[C]. SAE Paper, 1999, 1999-01-19.
- [6] S. Scott Goldsborough, Peter Van Blarigan. Optimizing the Scavenging System for a Two-Stroke Cycle, Free Piston Engine for High Efficiency and Low Emissions: A Computational Approach.[C]. SAE Paper, 2003, 2003-01-0001.
- [7] Peter Van Blarigan, Scott Goldsborough, Nicholas Paradise, Janson Wu. Homogeneous Charge Compression ignition Free Piston Linear Alternator.[J]. Sandia: Sandia National Laboratories,

- 1998.11.
- [8] Fredriksson J, Bergman M, Golovitchev, V. Modeling the effect of injection schedual change on free piston engine operation.[C].SAE Paper, 2006, 2006-01-49.
 - [9] Houdyschell D. A diesel two-stroke linear engine.[D]. West Virginia: West Virginia University, 2000.
 - [10] Parviz. Famouri, N. Clark, C. Atkinson. Free-piston diesel-fueled linear alternator for auxiliary power unit applications[R].Texas: West Virginia University, 2001.10.
 - [11] Clark N, Nandkumar S, Atkinson C, et al. Operation of a small bore two-stroke linear engine.[J]. American Society of Mechanical Engineers, Internal Combustion Engine Division (Publication) ICE. 1998, 31: 33-42.
 - [12] Jia B,Zuo Z,Tian G,Feng H,Roskilly AP.Development and validation of a free piston engine generator numerical model.[J].Energy Conversion and Management 2015; 91:33-41.
 - [13] Yuxi Miao, Zhengxing Zuo, Huihua Feng, Chendong Guo, Yu Song, Boru Jia,Yuyao Guo, Research on the combustion characteristics of a free-piston gasoline engine linear generator during the stable generating process,[J]. Energies 9 (8) (2016)655.
 - [14] Chendong Guo, Huihua Feng, Jia Boru, et al. Research on the operation characteristics of a free-piston linear generator: numerical model and experimental results.[J].Energy Conversion and Management 2016;122:53-64.
 - [15] Feng Huihua, Guo Chendong, Yuan Chenheng, Guo Yuyao, Zuo Zhengxing,Roskilly Anthony Paul, Jia Boru. Research on combustion process of a free piston diesel linear generator.[J].Apply Energy 2016;161: 395-403.
 - [16] Mikalsen R, Roskilly AP. The control of a free-piston engine generator.[J].Fundamental analyses.Apply Energy 2010;87(4):1273-1280.
 - [17] 周秀亚, 韩连任, 徐震. 基于 CONVERGE 的船用气体机仿真分析. [J]. Diesel Engine. 39 (2017) .