

自由活塞发动机的活塞运动规律优化与试验

林继铭¹, 徐照平², 闫皓²

(1. 华侨大学机电及自动化学院, 厦门 361021; 2. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为了提高四冲程、点燃式自由活塞发动机系统的输出效率, 该文在分析其工作原理的基础上, 设定边界约束和路径约束, 建立了活塞运动规律优化模型。基于系统工作过程中活塞分阶段运行的特性, 采用高斯伪谱法离散状态与控制变量, 将活塞运动规律优化问题离散化为非线性规划问题, 并结合序列二次规划算法求解最优化问题。仿真结果表明: 采用分阶段的电磁力作用规律, 优化活塞位移与速度曲线, 可提高缸内气体对外做功能力与降低传热损失, 使系统指示效率由 41.0%增加到 45.3%。同时由试验验证了所提出方案的可行性与有效性, 试验中系统发电效率由 28.8%提升到 31.2%, 系统性能明显提升。该文对此类动力装置的后续研究提供了参考。

关键词: 发动机; 优化; 模型; 自由活塞; 运动规律; 高斯伪谱法

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.06.012

中图分类号: TK441

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-06-082-07

林继铭, 徐照平, 闫皓. 自由活塞发动机的活塞运动规律优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 82—88.

Lin Jiming, Xu Zhaoping, Yan Hao. Optimization and experiment on piston motion law of four-stroke free-piston engine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(6): 82—88. (in Chinese with English abstract)

0 引言

自由活塞发动机是将自由活塞式内燃机与直线电机集成一体, 将内燃机缸内燃料燃烧所释放的化学能通过活塞刚性连接的直线电机定子直接转化为电能输出。自由活塞发动机与传统内燃机相比省去了曲柄连杆机构, 机械结构简单、摩擦力小, 具有更高的能量转换效率^[1-3]。这类汽车动力装置具有可变速压缩比, 燃料适应性广等优点, 逐渐成为众多科研机构的研究热点^[4-8], 并可在混合动力汽车、移动电源、便捷式电源等各种场合得到广泛应用。

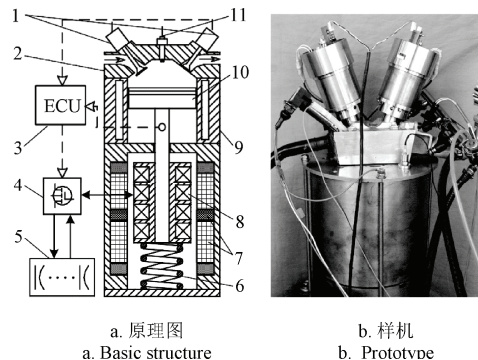
现有的自由活塞发动机优化方向主要集中在缸内燃烧过程分析、电机的电磁结构设计等^[9-13], 活塞运动规律优化的研究较少。Mozurkewich 等^[14]采用庞特里亚金最大值原理优化常规曲轴发动机的活塞运动轨迹, 从摩擦和传热两方面降低能量损失, 但此算法对初始值的猜测较为敏感, 由于曲柄连杆机构的约束, 优化所得的运动轨迹难以实现。Xia 等^[15]建立了二冲程自由活塞发动机的自动机模型, 采用序列二次规划算法优化电磁力, 并结合混合控制方法使系统稳定运行, 但未深入分析活塞运动如何影响系统性能。

为了充分发挥自由活塞发动机活塞运动自由度大的特点, 本文研究了一种四冲程、单活塞式自由活塞发动

机系统。通过调节电机电磁力控制活塞运动, 与燃烧放热规律相结合, 采用高斯伪谱法优化活塞位移与速度曲线, 以期在全局范围内寻得使发动机热力循环效率达到最大值的活塞运动规律, 并分析其对系统性能的影响。

1 系统工作原理

本文所研究的四冲程自由活塞发动机系统^[16-20]基本结构如图 1 所示, 主要由内燃机燃烧室、直线电机、可逆储能装置及电控单元组成。



1.进排气门 2.气缸盖 3.电控单元 4.驱动模块 5.可逆储能系统 6.回复弹簧 7.直线电机定子 8.直线电机定子 9.气缸 10.自由活塞 11.火花塞
1.Intake and exhaust valves 2.Cylinder head 3.Electric unit 4.Driving module 5.Reversible energy storage system 6.Return spring 7.Motor stator 8.Motor mover 9.Cylinder 10.Free-piston 11.Spark plug

图 1 四冲程自由活塞发动机原理图及样机

Fig.1 Basic structure and prototype of four-stroke free-piston engine

系统以汽油作为燃料, 换气过程采用电磁驱动气门。一个完整的工作过程为: 首先直线电机工作于电动状态推动活塞组件向缸盖方向运动, 压缩燃烧室内的混

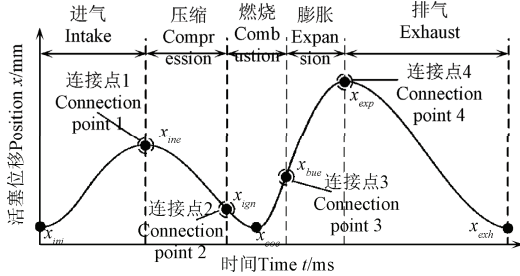
收稿日期: 2014-12-16 修订日期: 2015-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51207071); 中国博士后科学基金特别资助 (2012T50476); 华侨大学科研基金资助项目 (15BS103)。

作者简介: 林继铭, 男, 福建莆田人, 讲师, 博士, 主要研究方向为车辆动力装置的设计、仿真与优化。厦门 华侨大学机电及自动化学院, 361021。

Email: jiming.lin@hotmail.com

合气；电控单元控制火花塞点火；接着混合气在燃烧室内快速燃烧，并膨胀做功推动活塞组件向远离缸盖方向运动，将活塞组件的动能转化为直线电机的电能输出；最后，活塞组件在弹簧和电磁驱动气门的辅助下完成一次直线往复运动以实现换气过程。本文采用类似于米勒循环的内燃机工作过程，各个冲程长度不相等（见图 2）。系统采用较短的进气、压缩冲程，来缩短进气与压缩冲程时间；同时利用较长的膨胀与排气冲程使得缸内气体充分膨胀对外做功。



注： x_{ini} 为进气冲程始点， x_{ine} 为进气冲程终点， x_{ign} 为点火开始位置， x_{coe} 为压缩上止点， x_{bue} 为燃烧终点， x_{exp} 为膨胀冲程终点， x_{exh} 为排气冲程终点。
Note: x_{ini} is the start point of intake, x_{ine} is the end point of intake, x_{ign} is the start point of combustion, x_{coe} is the top dead center of compression, x_{bue} is the end point of combustion, x_{exp} is the bottom dead center of expansion, x_{exh} is the end point of exhaust.

图 2 系统工作循环示意图

Fig.2 Sketch of system working cycle

2 活塞运动规律优化模型

通过对已有样机的分析，可以发现进气与排气 2 个冲程电磁力调节对系统输出性能的影响较小^[21]，因此本优化模型忽略进、排气冲程，只针对压缩、燃烧、膨胀 3 个阶段进行模拟计算，节省优化程序仿真时间，并假设整个仿真阶段进、排气门均处于关闭阶段，气缸内外不存在工质交换过程。

2.1 状态方程

自由活塞发动机系统是由机械、电子及热力学过程组成的复杂系统，通过相关热力学知识及牛顿第二定律可建立起系统缸内气体热力学与活塞运动学模型。活塞组件的运动直接取决于缸内气体压力 p 、摩擦力 F_f 、弹簧力 F_s 和直线电机电磁力 F_e 等综合作用的结果。由牛顿第二定律对活塞组件进行力平衡分析得：

$$m_p \frac{d^2x}{dt^2} = (p - p_0) A_p - F_e - F_f - F_s \quad (1)$$

式中： x 为活塞位移，m； m_p 代表活塞组件质量，kg； A_p 为活塞顶面积， m^2 ； p 为缸内气体压力，MPa， p_0 为大气压力，MPa； F_e 为直线电机电磁力，kN； F_f 为摩擦力，N； F_s 为弹簧力，N； t 为时间，ms。

为了定性描述活塞运动规律对系统动态品质的影响，本文将发动机缸内热力学循环等效为零维模型，在进行优化仿真时，特作适当假设，如缸内气体状态均匀，工质为理想气体。缸内放热过程采用 Wiebe 燃烧函数求取，传热损失采用适用于汽油机的对流传热模型，即 Woschni 传热公式。根据能量守恒、质量守恒以及理想气

体状态方程建立起缸内热力过程的基本方程如下^[18]：

$$\frac{dp}{dt} = \left[\frac{R}{C_v} \left(\frac{dQ_B}{dt} + \frac{dQ_w}{dt} \right) - \left(\frac{R}{C_v} + 1 \right) p A_p \frac{dx}{dt} \right] / (A_p x) \quad (2)$$

式中： Q_B 代表燃料燃烧放热量，J； Q_w 为传热损失，J； R 代表理想气体常数，J/(kg·K)； C_v 为气体定容比热容，J/(kg·K)。

结合式 (1) 和式 (2)，并选取活塞位移 x 、活塞速度 v 、缸内气体温度 T 、缸内气体压力 p 作为状态变量，即 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [x, v, T, p]^T$ ；同时设定电磁力 F_e 作为控制变量 $\mathbf{u}(t)$ ，将活塞运动规律优化模型描述为一阶微分方程组 $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t)$ ，展开如式 (3) 所示，式中电磁力 F_e 、弹簧力 F_s 和摩擦力 F_f 的计算方法参见文献[18]。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{(x_4 - p_0) A_p + u - F_f - F_s}{m_p} \\ \dot{x}_3 = \frac{\frac{dQ_B}{dt} + \frac{dQ_w}{dt} - x_4 A_p x_2}{m C_v} \\ \dot{x}_4 = \frac{m R \dot{x}_3 - x_4 A_p x_2}{A_p x_1} \end{cases} \quad (3)$$

式中： m 为缸内气体质量，kg。

2.2 边界和路径约束

假定缸盖底部为坐标系位置零点，设活塞向下移动为位移正方向，压缩冲程开始为初始时刻 t_0 ，初始位置为进气冲程终点 x_{ine} 。通过对样机试验结果的分析，得到相关参数的边界约束条件，同时为保证良好的燃烧品质和充分利用缸内气体膨胀对外做功，需要将点火位置 x_{ign} （即燃烧开始点）和膨胀冲程终点 x_{exp} 控制进行适当的控制。

为保证模型的有效性，防止数值仿真求得无意义解，避免缸内压力和温度迅速上升引起爆震燃烧，需对压缩比 ε 、缸内压力 p 和缸内温度 T 进行限定。在模型求解的各个阶段过程中，相关变量都不能超出限定范围，需严格满足路径约束的要求。同时考虑到已有样机所用直线电机结构和性能参数，对电机电磁力 F_e 作用范围也需进一步限定。列出边界和路径约束如表 1 所示：

表 1 仿真参数约束
Table 1 Constraints of simulation parameters

约束 Constraints	参数 Parameters	取值 Numerical value
边界约束 Boundary constraints	压缩起始位置 x_{ine}/mm	49
	压缩比 ε	7
	点火位置 x_{ign}/mm	9
	膨胀冲程终点 x_{exp}/mm	77
路径约束 Path constraints	缸内压力 p/MPa	≤ 6
	缸内温度 T/K	≤ 2600
	电磁力 F_e/kN	-4.1~4.1

2.3 性能指标

对四冲程自由活塞发动机系统而言，活塞运动规律优化的一个重要目标就是提高系统循环热效率，故优化模型将缸内压力对活塞做功进行积分，得到的指示功为优化目标，求取指示功的最大值。通常优化算法优化的是性能指

标的最小值, 故此处设指示功的负值为优化目标:

$$\min J = -W_i = -\int_{t_0}^{t_f} (p - p_0) A_p v dt \quad (4)$$

式中: J 为指示功的负值, J ; W_i 为指示功, J ; t_f 为仿真终点时刻, ms。

2.4 模型有效性验证

为了验证模型的有效性, 对前文所建立的数学模型进行数值仿真, 将模拟结果与原型样机的试验结果进行了对比分析。仿真模型与样机采用相同的参数, 系统中所用内燃机为 462Q 型发动机改造而来, 活塞直径为 62 mm, 活塞组件质量 3 kg, 所用直线电机的力常数为 40 N/A, 电枢电感 2.4 mH, 电枢内阻 0.2 Ω , 所用弹簧刚度为 29 000 N/m。

缸内气体温度由于试验条件所限, 暂时无法测得。由于缸内气体满足理想气体状态方程 (5), 可以建立温度和压力之间的关系, 因此通过缸内压力传感器测得缸内气体压力, 与模拟值进行对比分析, 验证仿真模型的有效性。

$$pA_p \frac{dx}{dt} = mR \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

式中: T 为缸内气体温度, K。

由图 3 可知, 仿真模型缸内气体压力的模拟计算结果和试验结果基本能够相互吻合, 因此所建立的仿真模型能够比较准确地模拟实际系统, 仿真结果可信。

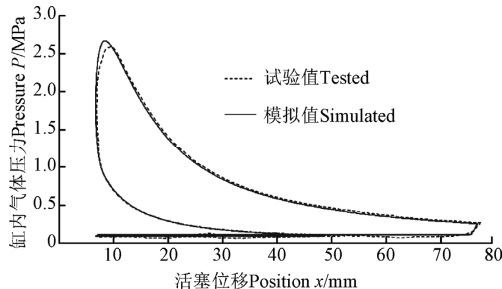


图 3 模拟计算缸内气体压力与试验测量结果对比

Fig.3 Comparison between simulated and tested in-cylinder gas pressure

3 基于高斯伪谱法的最优化过程

本文的活塞运动规律优化问题可描述为在限定的约束范围内, 寻求最佳的活塞运动规律, 使系统性能指标达到最小值。一般的优化方法是通过庞特里亚金最大值原理推导出关于状态及伴随变量的一组方程来进行求解, 但这种方法由于控制变量对误差敏感而使得数值积分呈病态, 同时对初值的猜测也增加了求解困难。而采用高斯伪谱法避开了控制变量与伴随变量之间的关联性, 因而消除了求解对初值的敏感性。同时高斯伪谱法也满足所谓协态映射定理^[22], 避免了一般直接法的缺点, 实现了直接法与间接法的统一, 从理论上保证该方法的收敛性。本文针对自由活塞发动机的活塞运动规律优化问题, 主要分为连续最优化问题的离散和非线性规划问题的求解两部分。

3.1 基于高斯伪谱法的离散过程

应用高斯伪谱法可将上述活塞运动规律优化问题中的状态方程离散化, 将状态变量 $\mathbf{x}(t)$ 和控制变量 $\mathbf{u}(t)$ 在一系列高斯点上离散, 并以这些离散点为节点构造拉格朗日插值多项式来逼近状态和控制变量^[21]。通过对全局插值多项式求导来近似状态变量对时间的导数, 从而将微分方程约束转换为一组代数约束。性能指标中的积分项由高斯积分计算, 终端状态也由初始状态和对右函数的积分获得。经上述变换, 将最优化问题转化为具有一系列代数约束的非线性规划问题。

3.2 非线性规划问题的求解

经高斯伪谱法离散化后的非线性规划问题优化参数数目众多, 一般的非线性规划算法不易求解, 而应用序列二次规划算法 (sequential quadratic programming, SQP), 并利用其特殊的稀疏块结构, 把大数目参数问题化成小数目参数的缩减问题之后可降低求解难度。该算法通过将原问题转化为一组二次规划子问题的求解来获得原问题的最优解, 对拉格朗日函数取二次近似, 从而提高二次规划子问题的近似程度, 对于本文这种非线性较强的优化问题能很好的进行计算。

4 仿真结果与分析

仿真过程采用源代码开放的 GPOCS (gauss pseudospectral optimal control software) 程序来离散状态和控制变量, 转化活塞运动规律优化问题为非线性规划问题, 同时结合 SNOPT7.0 (以序列二次规划算法为基础) 软件来求解上述生成的大规模非线性规划问题, 获得系统性能特性, 分析活塞运动规律对系统性能的影响。仿真结果中“优化前”代表优化前采用的活塞运动规律, “优化后”代表优化后的活塞运动规律。优化前后模型均

表 2 仿真结果

Table 2 Simulation results

参数 Parameters	优化前 Before optimization	优化后 After optimization	趋势 Tendency
循环过程总时间 Total cycle period t_{total}/ms	31.5	32.0	延长
压缩过程耗时 Time spent in compression t_{comp}/ms	15.1	16.9	延长
燃烧与膨胀过程耗时 Time spent in combustion and expansion t_{expan}/ms	16.4	15.1	缩短
指示功 Indicated work W_i/J	165.8	182.9	增大
压缩过程耗功 Work consumed in compression W_{comp}/J	-24.9	-24.3	缩小
燃烧与膨胀过程做功 Work consumed in combustion and expansion W_{expan}/J	190.7	207.2	增加
循环燃料放热量 Heat release of fuel Q_B/J	404.0	404.0	不变
指示效率 Indicated efficiency $\eta_i/\%$	41.0	45.3	增大
传热损失 Heat transfer Q_w/J	44.6	41.2	减小
最大活塞速度 Maximum velocity $v_{max}/(m \cdot s^{-1})$	6.9	8.7	增大

注: “优化前”代表优化前采用的活塞运动规律, “优化后”代表优化后的活塞运动规律。

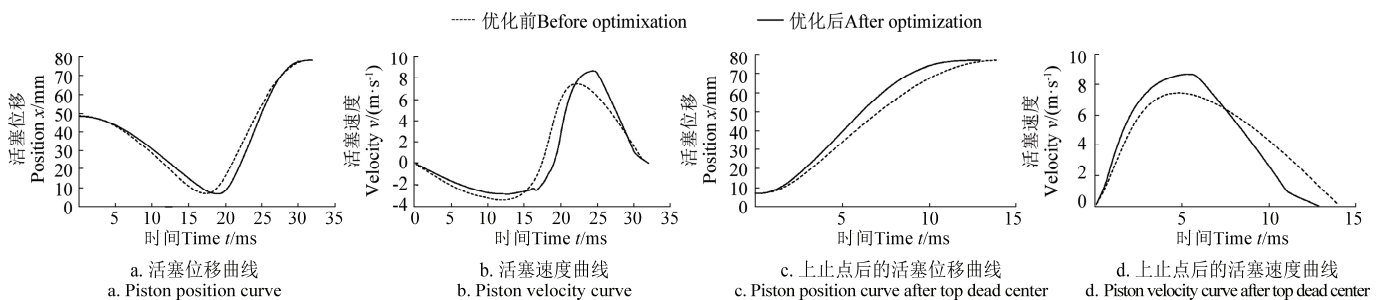
Note: “Before optimization” means the piston motion law before optimization; “After optimization” means the piston motion law after optimization. The same as below.

采用如图 2 所示的循环过程, 主要的仿真参数直接从样机的试验参数中获取。表 2 为优化前后一个循环过程中的仿真结果。

从表 2 中可以看出, 活塞运动轨迹经过优化后, 系统指示效率 η_i 从 41.0% 提升至 45.3%, 这是由优化后系统在燃烧与膨胀过程的做功量 W_{expan} 的显著增加引起的。从优化前后各阶段消耗的时间来看, 优化后的活塞运动虽然延长了压缩过程时间, 但缩短了膨胀过程的时间, 活塞运动呈现一种快速膨胀现象, 这间接导致系统传热损失在优化后有适当的下降 (从 44.6 减少到 41.2 J)。这一方面是由于在相同膨胀冲程长度的条件下, 活塞平均速度的增加, 缩短了高温气体对外传热的时间, 另一方面膨胀冲程中较大的活塞运动速度也导致

缸内气体温度迅速下降, 与缸壁间的温差减小, 对流传热损失减少。

图 4 给出了优化前后活塞运动规律曲线。从图 4 可知, 在压缩冲程中, 优化后的活塞组件具有更慢的运动速度, 延长气体压缩时间, 有利于燃油和空气的充分混合。而在膨胀冲程的中期, 优化后活塞运动最高速度 (从 6.9 增大到 8.7 m/s) 与平均速度均高于原模型, 在相同膨胀冲程的条件下, 实现了缸内气体的快速膨胀, 缩短了膨胀时间, 可有效的降低缸内高温气体对外传热时间, 提升系统输出效率。然而活塞平均速度的增大引起摩擦损失的相应增加, 考虑到自由活塞发动机的活塞组件受到的侧向作用力小, 摩擦系数较小, 因此在计算过程中可以忽略其影响。



注: 设活塞向下移动为位移正方向, 压缩冲程开始为初始时刻 t_0 , 初始位置为进气冲程终点 x_{ine} 。下同。

Note: Assume piston move down to the positive direction of displacement, the start time of compression is t_0 , x_{ine} is set as the start point. The same as below.

图 4 活塞运动曲线
Fig.4 Piston motion curve

比较上止点后缸内气体的热力学状态如图 5 所示。在膨胀冲程前期, 优化后的缸内气体峰值压力和温度都较原模型有显著提高, 这是由于活塞运动规律的优化导致上止点前燃烧放热量增大引起的。在膨胀冲程中后期, 优化后的缸内气体压力、温度下降速度明显高于优化前模型, 使后续燃烧过程远离上止点, 不利于热效率的提高, 但优化后膨胀冲程终点的缸内压力、温度略低于原模型, 有利于降低排气门开启时的工作负荷。活塞运动规律的优化对传热过程有着重要影响, 特别当活塞运动处于膨胀冲程中前期时 (如活塞位移小于 45 mm), 此时缸内气体处于高温阶段, 加快活塞运动速度可缩短发动机处在高温高压阶段的传热时间, 减小传热损失, 有利于提升系统输出效率。由此可知, 通过优化膨胀冲程的活塞运动规律, 协调气体膨胀对外做功量与传热损失之间的比例, 尽量增大缸内气体对外做功与减少传热损失, 使系统输出效率达到最佳值。

图 6 描述了优化前后的电磁力作用规律。从图 6 可以看出, 在压缩冲程中, 优化后开始施加电磁力的时刻相对于优化前开始施加电磁力的时刻更靠后, 且电磁力更大, 作用时间更短, 这直接导致优化后压缩过程中的速度比优化前的小, 压缩时间更长。优化后的电磁力在上止点后的膨胀过程中采取分阶段作用的规律, 膨胀初期采用短时的大电磁力, 降低活塞运动速度, 使缸内气体接近等容燃烧膨胀过程, 使缸内气体压力和温度大幅

增加, 提升对外做功能力。膨胀中期, 不施加电磁力, 使活塞快速膨胀, 以避免高温高压环境引起传热损失过大。膨胀后期再施加较大的电磁力保证优化前后的膨胀冲程长度相同。

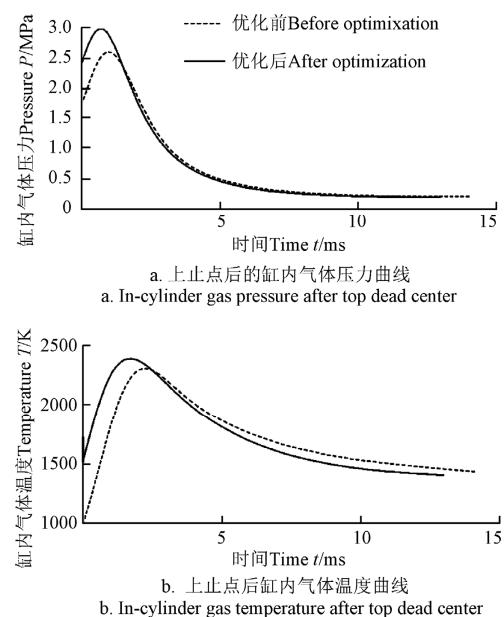


图 5 缸内气体压力、温度曲线

Fig.5 In-cylinder gas pressure and temperature

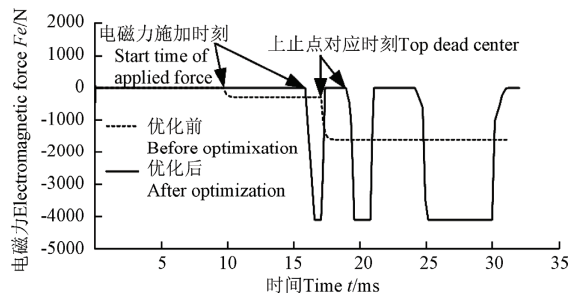


图 6 优化前后电磁力曲线

Fig.6 Electromagnetic force before and after optimization

5 样机试验

为了验证优化活塞运动规律提升系统性能的可行性和有效性,对采用不同活塞运动轨迹的样机进行了对比试验研究。试验时采用自然进气方式(进气压力 0.1 MPa),过量空气系数为 1.05,进气温度为 303 K。目标进气冲程终点 49 mm,目标压缩上止点 7 mm,目标膨胀冲程终点 77 mm。在保持相同工况的条件下,进行多次重复试验,试验结果取其统计平均值。

试验过程中通过控制电机枢电流来改变电磁力大小和加载位置,设定了 2 组活塞运动规律曲线,并进行了对比试验研究,其采用的样机电流曲线如图 7 所示。活塞运动规律 1 为优化前样机试验研究时所采用的电磁力加载特性:压缩冲程中电磁力较小、作用距离较长,而膨胀冲程中电磁力作用于整个冲程范围内,大小较为平均。活塞运动规律 2 为结合活塞运动规律优化结果而提出的电磁力控制方法:压缩冲程后期施加相对较大的电磁力以达到目标压缩终点,而在膨胀冲程中采取分阶段施加电磁力的方法,膨胀前期和后期施加较大的电磁力,膨胀中期不施加电磁力。

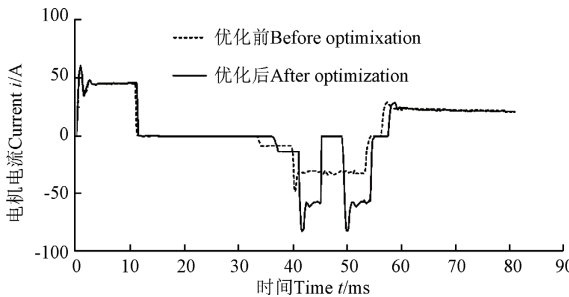
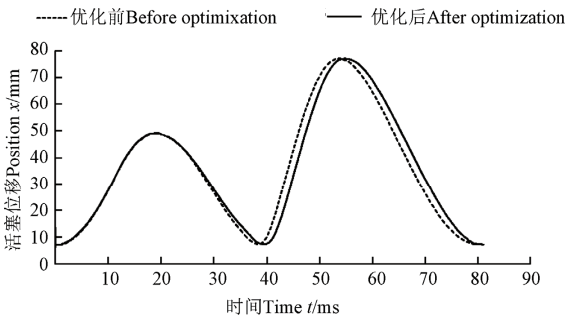


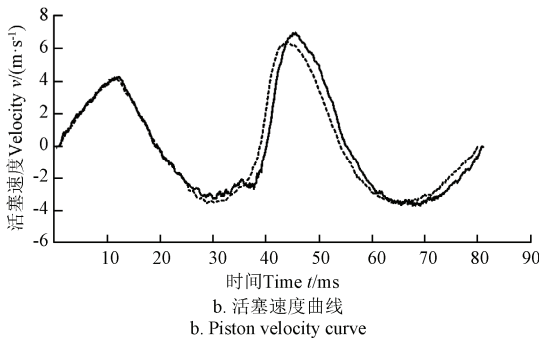
图 7 不同活塞运动规律下的电机电流曲线

Fig.7 Current of system under different piston motion laws

图 8 展示了采用 2 种活塞运动规律时的样机活塞运动特性曲线。从图 8 中可得,当采用分阶段电磁力控制时,样机工作循环周期略有增大,这主要是由于压缩冲程电磁力加载位置靠后,活塞组件在压缩冲程的速度下降造成的。同时在压缩上止点之后,采用分阶段电磁力控制时,膨胀冲程初期由于电磁力较大因此活塞运动速度较低,而在膨胀冲程中期不施加电磁力,因而活塞运动速度迅速增大,这加快了气体膨胀速度,膨胀过程时间略有减小,降低了缸内高温气体与气缸壁的热交换时间,有利于降低传热损失。



a. 活塞位移曲线
a. Piston position curve



b. 活塞速度曲线
b. Piston velocity curve

图 8 活塞运动曲线

Fig.8 Piston motion curve

图 9 展示了样机不同活塞运动规律时的缸内气体压力曲线。由图 9 可知,当采用分阶段电磁力控制时,缸内气体峰值压力有明显上升,这是因为膨胀初期采用较大的电磁力,使得缸内混合气燃烧更接近等容燃烧过程,引起压力的快速上升。同时,在膨胀冲程的中后期,较快的活塞运动速度引起活塞组件的快速膨胀现象,缸内气体压力迅速下降。

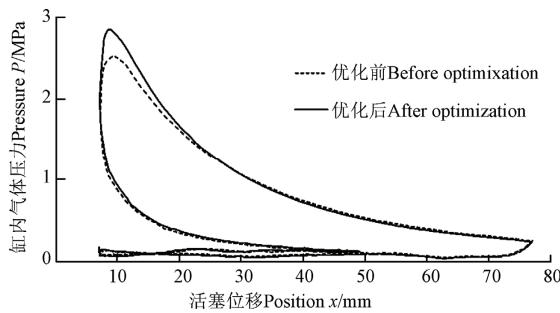


图 9 不同活塞运动规律下的缸内气体压力曲线

Fig.9 In-cylinder gas pressure under different piston motion laws

样机不同活塞运动规律下的系统性能参数如表 3 所示。

表 3 不同活塞运动规律下的性能对比

Table 3 Performance results under different motion law		
参数 Parameters	优化前 Before optimization	优化后 After optimization
循环周期 Cycle period/ms	80	81.8
峰值压力 Peak pressure/MPa	2.51	2.88
输出电功率 Output electric power/kW	1.6	1.7
发电效率 Electric efficiency/%	28.8	31.2

由表3可知,缸内气体峰值压力的显著增大,引起系统发电效率明显增加,但由于循环周期的延长,导致输出功率提升幅度有限。通过以上2种活塞运动规律的试验研究,验证了通过电磁力优化活塞运动规律来提升系统性能的可行性和有效性。

6 结 论

1) 提出了一种基于高斯伪谱法的自由活塞发动机活塞运动规律优化方案。仿真结果表明:优化活塞位移与速度曲线,提高了缸内气体燃烧过程的等容度,增大缸内气体峰值压力,实现缸内气体的快速膨胀,系统指示效率由41.0%增加到45.3%,相对于采用原有活塞运动轨迹的系统,性能上有显著提升。

2) 通过优化活塞运动规律,结合缸内气体状态(如压力、温度),提高缸内气体在膨胀冲程中的对外做功量并降低传热损失,提高系统指示效率。

3) 四冲程自由活塞发动机为活塞运动提供了广泛的控制自由度与优化空间,试验表明:采用不同的电磁力作用规律,改变活塞运动轨迹,系统发电效率由28.8%提升至31.2%,验证了通过优化活塞运动规律来提升系统性能的可行性和有效性。

[参 考 文 献]

- [1] Mikalsen R, Roskilly A P. Performance simulation of a spark ignited free-piston engine generator[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(14): 1726—1733.
- [2] Mikalsen R, Roskilly A P. A review of free-piston engine history and applications[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(14/15): 2339—2352.
- [3] 李庆峰, 肖进, 黄震. 两冲程 HCCI 自由活塞式内燃发电机仿真[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(2): 42—45.
Li Qingfeng, Xiao Jin, Huang Zhen. Simulation of two stroke HCCI free piston linear alternator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(2): 42—45. (in Chinese with English abstract)
- [4] Ren Haoling, Xie Haibo, Yang Huayong, et al. Asymmetric vibration characteristics of two-cylinder four-stroke single-piston hydraulic free piston engine[J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21(10): 3762—3768.
- [5] 魏超, 吴维, 荆崇波, 等. 发动机液压自由活塞下止点运动机理[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 119—123.
Wei Chao, Wu Wei, Jing Chongbo, et al. Movement mechanism of hydraulic free-piston of engine around bottom dead centre[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(11): 119—123. (in Chinese with English abstract)
- [6] Mao Jinlong, Zuo Zhengxing, Liu Dong. Numerical simulation of a spark ignited two-stroke free-piston engine generator[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2009, 18(3): 283—287.
- [7] 栾延龙, 李理光, 王哲. 自由活塞发动机关键设计参数及其性能的仿真优化研究[J]. *内燃机工程*, 2010, 31(2): 15—21.
- [8] Xu Shuaiqing, Wang Yang, Zhu Tao, et al. Numerical analysis of two-stroke free piston engine operating on HCCI combustion[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(11): 3712—3725.
- [9] Wang Jiabin, West M, Howe D, et al. Design and experimental verification of a linear permanent magnet generator for a free-piston energy converter[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, 22(2): 299—306.
- [10] Shoukry E, Taylor S, Clark N. Numerical simulation for parametric study of a two-stroke direct injection linear engine[C]//2002 Society of Automotive Engineers World Congress, Warrendale PA, 2002.
- [11] Mao Jinlong, Zuo Zhengxing, Li Wen, et al. Multi-dimensional scavenging analysis of a free-piston linear alternator based on numerical simulation[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(4): 1140—1152.
- [12] Zhao Zhenfeng, Zhang Fujun, Huang Ying, et al. Determination of TDC in a hydraulic free-piston engine by a novel approach[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 70(1): 524—530.
- [13] 刘福水, 姜一通, 张长岭, 等. 自由活塞内燃发电机低速不稳定性影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(18): 109—115.
Liu Fushui, Jiang Yitong, Zhang Changling, et al. Analysis on influence factors of low-speed instability in free-piston engine-generator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(18): 109—115. (in Chinese with English abstract)
- [14] Mozurkewich M, Berry R S. Optimal paths for thermodynamic systems: the ideal otto cycle[J]. *Journal of Applied Physics*, 1982, 53(1): 34—42.
- [15] Xia H, Pang Y, Grimble M. Hybrid modeling and control of a free-piston energy converter[C]//Proceeding of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications, Munich, 2006: 373—378.
- [16] 常思勤, 徐照平. 内燃-直线发电集成动力系统概念设计[J]. *南京理工大学学报*, 2008, 32(4): 449—452.
Chang Siqin, Xu Zhaoping. Conceptual design of internal combustion-linear generator integrated power system[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2008, 32(4): 449—452. (in Chinese with English abstract)
- [17] Xu Zhaoping, Chang Siqin. Prototype testing and analysis of a novel internal combustion linear generator integrated power system[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(4): 1342—1348.
- [18] Lin Jiming, Xu Zhaoping, Chang Siqin, et al. Thermodynamic simulation and prototype testing of a four-stroke free-piston engine[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2014, 136(5): 051505.
- [19] Lin Jiming, Xu Zhaoping, Chang Siqin, et al. Finite-time thermodynamic modeling and analysis of an irreversible Miller cycle working on a four-stroke engine[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2014(54): 54—59.

- [20] 尹凝霞, 常思勤. 基于膨胀比的自由活塞发动机理想热力循环分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 37—43.
- Yin Ningxia, Chang Siqin. Ideal thermodynamic cycle analysis of free piston engine based on expansion ratio[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(11): 37—43. (in Chinese with English abstract)
- [21] 徐照平. 内燃-直线发电集成动力系统的關鍵技术研究及其系统实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- Xu Zhaoping. Research on Internal Combustion-linear Generator Integrated Power System and Its Implementation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [22] Benson D A, Huntington G, Thorvaldsen T P, et al. Direct trajectory optimization and costate estimation via an orthogonal collocation method[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2006, 29(6): 1435—1449.

Optimization and experiment on piston motion law of four-stroke free-piston engine

Lin Jiming¹, Xu Zhaoping², Yan Hao²

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The free-piston engine has an advantage of changeable piston motion trajectory because of its lack of mechanical constraint. The motion law of a four-stroke ignited free-piston engine was studied in order to improve the efficiency of the system. Based on analyzing the working principle of the system and setting boundary constraints and path constraints of the system, an optimized model of the piston motion was established. The working cycle of the free-piston engine was composed of intake, compression, combustion, expansion and exhaust phases. Based on the characteristics of separate phase of the piston motion, a trajectory optimal method called gauss pseudospectral method (GPM) was used to separate the states and control variables. In this method, the piston position, the piston velocity, the in-cylinder gas pressure and the in-cylinder gas temperature were set as the state variables and the electromagnetic forces were set as the control variables. Then the optimal problem of piston motion was discretized to nonlinear programming problem. Then the nonlinear programming problem was solved by the sequential quadratic programming method (SQP). Furthermore, the parameters of the 462 engines were taken as the computing parameters. The fuel used in the simulation was gasoline. The simulation results showed that by adjusting the separate electromagnetic force and optimizing the piston position and velocity curves, the output work increased while the heat-transfer loss reduced with the rapid piston motion. It indicated that the efficiency reached as high as 45.3% in the simulation. During the compression process, the applied time of the optimized electromagnetic force was delayed compared with the original. And the time spent in the optimized compression process was shorter than the original. During the early expansion process, the optimized amplitude of the electromagnetic force was bigger than the original, which made the in-cylinder combustion close to constant volume combustion and the gas pressure and temperature increase quickly. During the middle expansion process, the electromagnetic force was not applied, which made the piston move fast and avoid more losses of heat transfer under the condition of high temperature and high pressure. During the late expansion process, the big electromagnetic force was applied in order to meet the target expansion length. Then comparison experiments of different piston trajectories were studied under the natural aspirate. The intake air pressure was 0.1 MPa, the temperature was 303 K and the excess air coefficient was 1.05. The results were derived from repeat experiments, which validated that the optimal method was feasible and valid. The in-cylinder peak pressure had a notable increase when the electromagnetic forces were applied by separate phase. The output electrical efficiency reached 31.2% and the system performance was remarkably improved. The output electric power had a small increase, because the cycle period was extended. As a result, the proposed optimization method of the piston motion law has an important significance for the system development.

Key words: engines; optimization; models; free-piston; motion law; gauss pseudospectral method