

直线发动/发电机启动性能仿真研究

邓 俊¹, 叶晓倩², 尹兆雷³, 王 哲³

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 200092; 2. 上海大众汽车有限公司, 上海 201805; 3. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804)

摘要: 对一台直线发动/发电机的启动过程进行了研究, 提出了基于速度信号的启动方向控制模式, 并通过 Matlab/Simulink 动力学仿真研究了该模式下系统的运行特性及启动性能。结果表明, 启动力的精确换向是直线发动/发电机启动控制的关键; 在基于速度信号的启动方向控制模式下, 系统的能量损耗较小, 经优化的系统启动力约为 135 N; 运动组件在启动过程中作频率、幅值逐渐增大的直线往复运动。

关键词: 直线发动/发电机; 启动; 启动力方向; 速度信号

中图分类号: TK441

文献标志码: A

Simulation on Starting Performance of a Linear Engine/Generator

DENG Jun¹, YE Xiaolian², YIN Zhaolei³, WANG Zhe³

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Volkswagen Automotive Co. Ltd., Shanghai 201805, China; 3. Clean Energy Automotive Engineering Research Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Driving force direction control strategy based on velocity signal for a linear engine/generator system was proposed and the starting performance of this system was studied with Matlab/Simulink software. Results show that the driving force direction needs to be precisely controlled for a successful start. With the control strategy based on velocity signal, system power loss is little and the driving force is optimized at 135 N or so. Furthermore, the working frequency and distance of the moving part increases gradually for a few starting cycles until it reaches a steady state condition.

Key words: linear Engine/Generator; starting; driving force direction; velocity signal

免传统内燃机中曲轴和轴承所消耗的大量摩擦功, 以及由曲柄滑块机构所引起的侧向力造成的活塞与缸壁的摩擦^[1]。直线发动机与直线发电机相结合, 作为串联式混合动力汽车的新型动力装置, 具有效率高、比功率大、结构紧凑、燃料适用性强等特点。

1998 年, 美国 Sandia 国家实验室开发了一种与直线发电机有机结合的内燃发电机, 采用均质压燃燃烧方式, 高效、轻量、有害气体排放低^[2]。美国西弗吉尼亚大学试制了二冲程压燃直喷式自由活塞发动/发电机系统, 并对其样机的运动过程进行了仿真^[3]。澳大利亚潘柏公司的 FP3 系统是一种新型的混合式引擎驱动发电机, 加装该系统的串联式混合动力汽车的市内交通耗油量约为传统汽车的四分之一, 有效减少了有害废气的排放^[4]。Ahmad^[5]针对一台二冲程自由活塞发动/发电机样机的启动方式开展研究, 在启动工况下, 三相永磁直线电机作为电动机向运动组件提供所需的推力, 电磁推力的大小与方向由三相 PWM(pulse width modulation, 脉宽调制)逆变器通过控制电机输入电流来进行调控。Saiful^[6]提出了一种利用永磁无刷直流电机的方波电流控制, 使运动组件往复运动从而实现启动的方法。该研究在进行启动力方向控制时, 使启动力方向始终与运动组件运动方向一致。

本文在前期研究^[7-8]的基础上, 以直线发动/发电机的启动过程为研究对象, 对其启动条件及过程进行了探讨, 建立了直线发动/发电机启动过程的动力学模型, 提出了基于速度信号的启动力方向控制策略。通过 Matlab/Simulink 仿真建模, 对直线发动/发电机的启动运动特性及性能进行了分析。

1 直线发动/发电机系统

所涉及的直线发动/发电机系统由两部分组成,

直线发动机由于省去了用于刚性连接的曲柄连杆机构, 通过液、电等介质实现“柔性”输出, 从而避

收稿日期: 2011-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(51006075); 上海市科委项目(061612075, 08dz1207700)

第一作者: 邓 俊(1978—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制。E-mail: eagledeng@tongji.edu.cn

通讯作者: 王 哲(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为整车技术。E-mail: wangzhe@tongji.edu.cn

结构如图1所示. 直线发动机部分包括活塞、气缸、连杆轴、火花塞等; 直线电机(发电机/电动机)部分包括定子轴、定子永磁体、定子背铁、定子铁芯和定子线圈. 其中, 发动机连杆轴与直线电机定子轴相集成, 作为系统的运动组件.

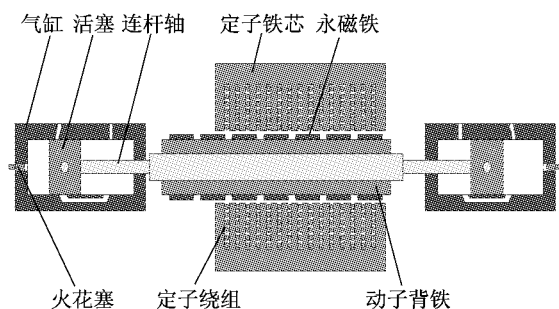


图1 双活塞对置式直线发动/发电机系统示意图

Fig.1 Schematic of dual piston linear engine/generator system

当系统处于启动工况时, 直线电机作为电动机向运动组件提供其所需的启动推力, 驱动运动组件往复运动, 直至满足点火要求, 点燃可燃混合气, 系统进入正常运行状态.

当系统正常运行时, 左右两缸内的可燃混合气轮流燃烧做功, 推动运动组件作直线往复运动. 同时, 固定于运动组件上的定子永磁体将产生运动磁场, 使布置于定子外部的定子线圈中产生感应电流, 输出电能.

1.1 启动要求分析

由于直线发动机的特殊结构型式, 其启动过程除了必须满足传统发动机的启动条件(转速、混合气浓度、缸内压力和温度)之外, 还须注意以下特殊要求:

(1) 足够的压缩比. 传统发动机中活塞的上止点位置固定, 由于启动时缸内的压缩压力主要取决于发动机压缩比, 因此只需保证发动机能够达到一定的启动转速. 而对于直线发动机来言, 由于不受曲柄连杆机构的机械约束, 其运动组件的上、下止点位置均不固定. 故在启动过程中, 不仅需保证足够高的启动运动频率, 还必须确保运动组件能够被拖动到合适的上止点位置, 以获得足够的压缩比与缸内压力, 从而使直线发动机成功点火启动. 考虑到本文所涉及发动机原机压缩比为 6.6, 对应的直线发动机的可着火压缩比范围约为 6.0~9.0.

(2) 精确的启动力换向控制. 由于在启动过程中直线发动机若要在左、右两缸内将可燃混合气准备完毕, 至少需要经历 3 个冲程. 因此, 在启动第一行

程便拖动运动组件至预定上止点位置的做法不仅对直线电机的工作能力提出了很高的要求, 也并非必需的. 对直线发动机的启动过程作如下假设: 令运动组件在启动过程中做若干次循环的往复直线运动, 使其行程在各循环中逐渐增加, 直至达到合适的压缩比位置, 满足混合气的燃烧条件. 这就需要启动力能够适时地在直线发动机启动过程各冲程间进行换向, 意味着直线电机的精确换相控制是启动控制的关键.

1.2 启动过程动力学分析

直线发动/发电机在启动过程中的受力情况如图2所示. 忽略扫气腔压力差的影响, 运动组件所受到的作用力包括电磁推力 F_e 、两缸气体压力差 ΔF_p (即启动压缩阻力) 以及运动组件与气缸间的摩擦力 F_f (即启动摩擦阻力). 图中 F_{fL} 为左缸摩擦力; F_{fR} 为右缸摩擦力; m 为运动组件质量; a 为加速度; p_L 为左缸压力; p_R 为右缸压力; S_p 为活塞面积; x_0 为组件位置.

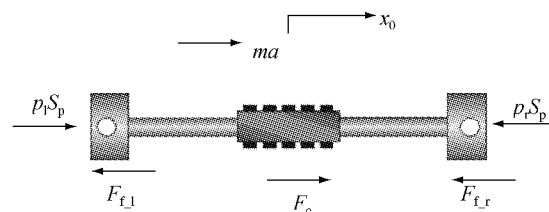


图2 运动组件的受力分析图

Fig.2 Force analysis diagram of moving parts

根据牛顿第二定律, 可得到质量为 m 的运动组件的动力学模型如下:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_e + \Delta F_p - F_f \quad (1)$$

$$\Delta F_p = [p_L(t) - p_R(t)] \frac{\pi D^2}{4} \quad (2)$$

式中: $p_L(t)$ 和 $p_R(t)$ 分别为左、右两缸内的气体压力; D 为缸径.

2 启动过程建模与仿真分析

为简化控制, 假定启动过程中电机施加的驱动力为某一定值. 当运动组件由一侧向另一侧加速运动过程中, 气缸内密封的气体压力逐渐升高并超过电机驱动力, 从而迫使运动组件速度下降. 由此提出一种基于速度信号的直线发动机启动力换向策略, 即控制器在运动组件的速度为零时控制启动力换向.

为研究该换向策略下系统运动组件的运动特性

及启动性能,在已建立数学模型^[7]的基础上对直线发动机启动过程进行动力学建模,其控制流程图如图 3 所示.模型的输入参数如表 1 所示.

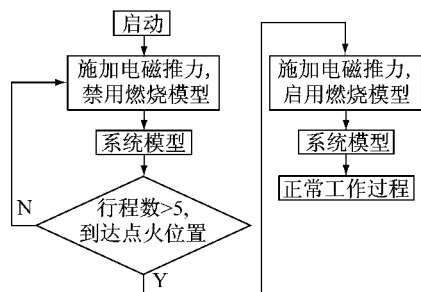


图 3 系统启动过程流程图

Fig.3 Flow chart of system starting process

表 1 仿真基本输入参数表

Tab.1 Input parameters for simulation

输入参数	数值
发动机缸径/mm	50
最大可能行程/mm	63
排气口开启位置/mm	±12.75
运动件质量/kg	3.6
进气压力/MPa	0.117 7
点火提前位置/mm	2.25
循环喷油量/g	0.005

采用基于速度信号的启动力换向策略时,控制器将根据运动组件的速度信号自动判断启动电流方向,故除启动力大小 $|F_e|$ 外无需事先设定其他控制参数.

图 4 给出了 $|F_e|=135\text{ N}$ 的启动工况下运动组件的速度(v)-位移(x)曲线.图 5 为此时运动组件运动频率的变化趋势.

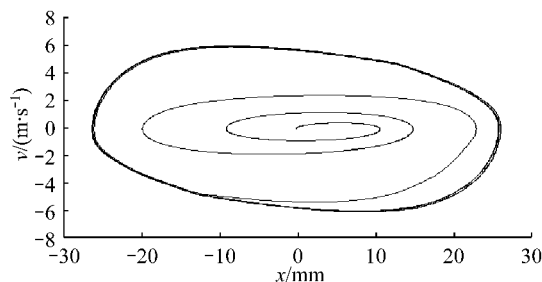


图 4 $|F_e|=135\text{ N}$ 时运动组件的速度-位移曲线

Fig.4 Velocity and displacement of moving parts, $|F_e|=135\text{ N}$

由图 4,5 可见,随着启动过程的进行,运动组件直线往复运动的频率及每循环的行程长度逐渐增大.当启动过程进行到第 5 行程接近结束时,运动组件成功到达点火位置,火花塞首次点火,右缸中被压缩的混合气燃烧产生爆发压力,运动组件加速向左运动.此时,直线发动机虽已点火成功,但电磁启动

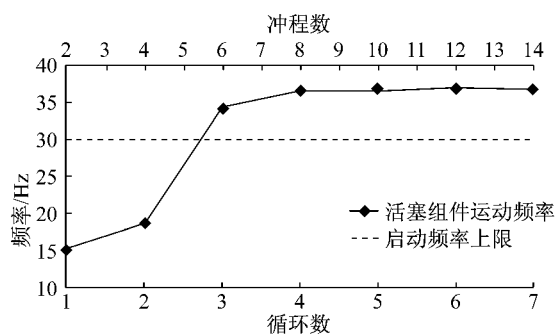


图 5 $|F_e|=135\text{ N}$ 时运动组件的频率变化曲线

Fig.5 Frequency of moving parts, $|F_e|=135\text{ N}$

力尚未撤去,直至霍尔传感器检测到运动组件的运行频率超过预定上限后,电控单元自动切断启动回路,撤消启动力.至此,直线发动机完成启动,开始正常工作.

另外,从图 5 还可发现,直线发动机从第 4 循环开始运行频率基本稳定,进入稳定怠速运转状态.

图 6,7 为运动组件的位移和电磁力随时间变化曲线以及速度和电磁力随时间变化曲线.可以看出,采用基于速度信号的启动力换向策略时,直线发动机的启动运动特点如下:

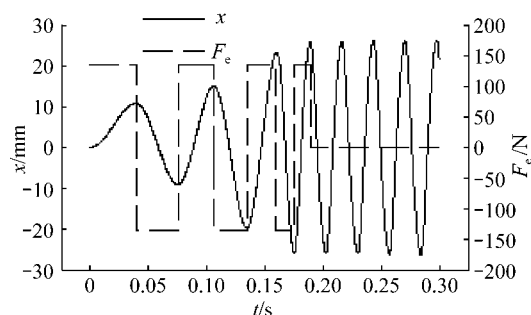


图 6 $|F_e|=135\text{ N}$ 时运动组件的位移和电磁力随时间的变化

Fig.6 Displacement and electromagnetic force of moving parts, $|F_e|=135\text{ N}$

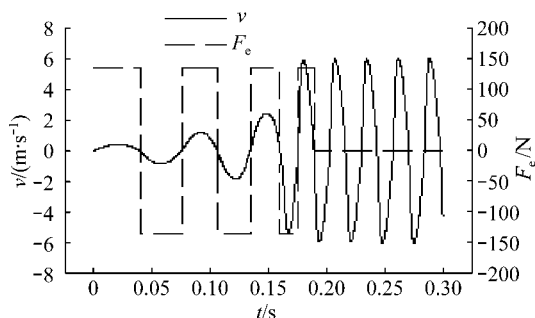


图 7 $|F_e|=135\text{ N}$ 时运动组件的速度和电磁力随时间的变化

Fig.7 Velocity and electromagnetic force of moving parts, $|F_e|=135\text{ N}$

(1)启动过程中,运动组件的位移-时间曲线近似于正弦分布,且频率、幅值随时间明显逐渐增大.可见,该换向策略下启动过程是直线发动机逐渐积累启动能量的过程.该启动能量来自于启动蓄电池,能量以运动组件动能和发动机气缸内气体压缩能的形式积累储存.

(2)启动动力换向频率与运动组件往复运动频率相同.由图7可看出,启动动力方向始终与运动组件的运动方向相一致,表明电磁启动力在整个启动过程中始终对运动组件作正功,即蓄电池所提供的电能完全用于拖动发动机运动组件启动,除直线电机效率损失外,理论上无电能的浪费.

为保证直线发动机能够正常启动,需要对启动动力控制参数的范围进行限定.一方面,考虑到功能的实现,要求运动组件在第5行程末期能够达到预设的初次点火位置.由图8可知,第5行程末最大位移无法达到点火位置.结合图4,可取启动力下限值为135 N.

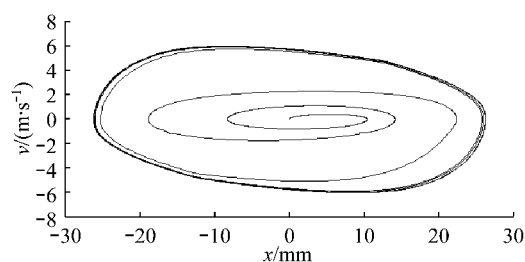


图8 $|F_e| = 130$ N时运动组件的速度-位移曲线

Fig.8 Velocity/displacement of moving parts, $|F_e| = 130$ N

另一方面,由于没有曲柄连杆机构的约束,直线发动机点火后容易因为启动推力的继续作用而造成压缩比过大的现象,引起爆燃,造成零件损坏.故考虑到运行安全性,应使直线发动机在首次点火成功后、电机启动力撤消前的过渡阶段中,压缩比始终保持在合适的范围内.由图9可知,第6,7行程结束时,活塞位移显著超出稳定运行位置,导致此时压缩比已接近9.0,则启动力上限值取为150 N.

图10为不同启动动力大小作用下运动组件的运动特性图.从图中可以看出,直线电机所施加的启动动力越大,运动特性曲线的幅值与频率也越大,这就意味着运动组件在启动的各个行程中所能到达的极限位置越远,且启动时间更短.

加大启动动力可缩短直线发动/发电机的启动时间,但这是以增大启动平均功率为代价的.图11为系统采用不同大小的启动力启动时,相应启动性能

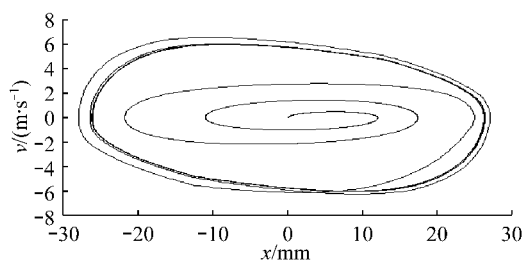


图9 $|F_e| = 150$ N时运动组件的速度-位移曲线

Fig.9 Velocity/displacement of moving parts, $|F_e| = 150$ N

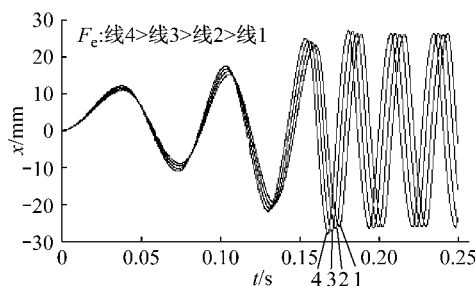


图10 不同启动动力大小作用下运动组件的运动特性

Fig.10 Kinetic characteristics of moving parts, different driving forces

参数的变化趋势.可以看出,样机启动所需的平均功率在111.60~145.36 W范围内变化,而启动时间为0.181~0.189 s,均满足小于0.4 s的一般要求.因此,在可用范围的下限附近选取启动力大小有利于启动系统的优化.

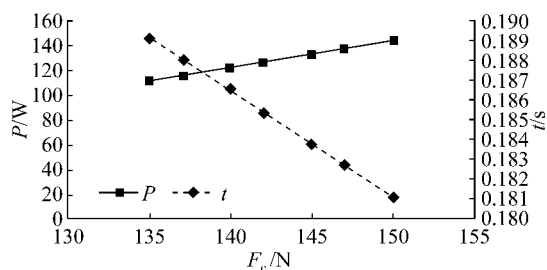


图11 启动功率、启动时间与启动力大小的关系

Fig.11 The relationship among starting frequency, time and driving force

3 结论

本文对直线发动/发电机的启动条件及过程进行了研究,提出了基于速度信号的启动力换向策略,并通过 Matlab/Simulink 仿真建模,对该策略下直线发动/发电机的启动运动特性及启动性能进行了分析,得出以下结论:

(下转第 613 页)