

DOI: 10.7652/xjtuxb201407008

自由活塞直线发电机总体参数设计方法

袁晨恒, 冯慧华, 李延骁, 左正兴
(北京理工大学机械与车辆学院, 100081, 北京)

摘要: 为获得自由活塞直线发电机总体参数的设计方法,基于发电机工作特点和运行规律,研究了主要结构参数与性能参数之间的匹配关系,包括气缸工作容积与输出功率、最高燃烧压力与气缸工作容积、压缩比与活塞质量及电磁负载与输出功率,由此构建了一种自由活塞直线发电机总体参数匹配模型,进而总结出一种利用振动特性的自由活塞直线发电机总体结构参数设计方法。利用该方法完成了一台原理样机的设计,并通过仿真和试验进行了验证,试验结果表明:仿真和试验的运行频率与设计目标最大误差为 13.4%,最高燃烧压力最大误差 10.5%,输出功率最大误差为 6%,接近设计目标值。

关键词: 自由活塞;直线发电机;参数匹配;设计方法

中图分类号: TK441 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)07-0041-05

Structural Parameters Matching Design for Free-Piston Linear Alternator

YUAN Chenheng, FENG Huihua, LI Yanxiao, ZUO Zhengxing
(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To propose a designing strategy for free-piston linear alternator, the matching relationships between the structural parameters and the performance parameters were analyzed following the moving characteristics of free piston, including the cylinder displacement and output power, the maximum combustion pressure and cylinder displacement, the compression ratio and output power, and the piston mass and electromagnetic load. According to the matching relationships, a designing strategy with total system parameters for free-piston linear alternator was constructed, and the main structural parameters of a test prototype, including piston mass, stroke length, compression ratio, bore and electromagnetic load, were determined. The effectiveness of the designing strategy was verified by simulations and tests of the prototype. It indicates that the maximum error of frequency between the operating observation and designing objective reaches 13.4%, the maximum error of combustion pressure 10.5% and the maximum error of output power 6%.

Keywords: free-piston; linear alternator; parameter matching; designing strategy

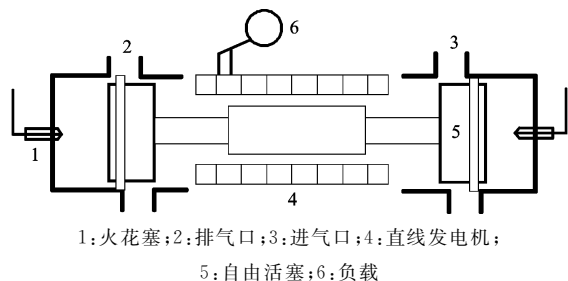
自由活塞直线发电机(FPLA)是自由活塞发动机和直线发电机经耦合形成的一种新型直线内燃发动/发电混合动力装置,结构如图 1 所示。该装置主要由分置于两端的 2 个两行程自由活塞发动机和连

接在 2 个发动机中间的直线电机组成。工作时,两侧的自由活塞发动机交替燃烧做功,推动自由活塞组件往复运动,切割直线电机磁导线,产生感应电动势,由此对外输出电能。这种新型动力装置与传统

收稿日期: 2013-10-09。 作者简介: 袁晨恒(1984—),男,博士生;冯慧华(通信作者),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51006010);高等学校学科创新引智计划资助项目(B12022)。

网络出版时间: 2014-04-16 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140416.1746.008.html>

曲柄连杆式内燃机外加旋转发电机的混合动力系统的最大区别在于,FPLA 通过直线发电机将活塞的往复直线运动直接转换为输出电能,没有曲柄、飞轮等旋转运动部件,活塞运动规律不受机械机构的限制,工作过程中压缩比可以灵活变化,具有功率密度高、燃料类型广、排放污染少等潜在优势,已经引起了国内外多家研究机构和相关研究人员的重视^[1-5]。



1:火花塞;2:排气口;3:进气口;4:直线发电机;
5:自由活塞;6:负载

图1 自由活塞直线发电机结构示意图

作为一种新型动力装置,FPLA 具有新的结构形式,工作时自由活塞具有比较特殊的运动规律,需要一种相应的方法来指导设计。但是,对于 FPLA 的研究,目前尚未充分关注样机的结构参数设计,仅有少部分文献指出能量传递过程是样机参数设计的纽带^[4]。因此,本文通过分析 FPLA 工作特点,研究主要结构参数与性能参数之间的匹配关系,拟提出一种基于特殊运动规律的总体结构参数设计方法,为原理样机的设计提供理论依据。

1 运动特性分析

自由活塞直线发电机运行过程中,活塞组件在两侧发动机止点间进行往复运动,运动规律仅受发动机缸内气体作用力 F_p 、电机电磁阻力 F_e ^[6] 和摩擦力 F_f ^[3] 的影响。运动方程为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + F_f + F_e - F_p = 0 \quad (1)$$

$$F_f = -C_f \frac{dx}{dt}$$

$$F_e = -C_e \frac{dx}{dt}$$

式中: m 为活塞运动组件的质量; x 为活塞位移; t 为时间; C_f 为黏性摩擦系数; C_e 为等效电磁负载。

已有相关研究表明^[7],发动机缸内气体压力由两部分组成:一部分是由燃料燃烧释放的热量引起的压力变化,用 p_c 表示;另一部分是缸内体积变化导致的气体压力变化,用 p_v 表示。因此,缸内气体作用力可以表示为

$$F_p = A(p_{cl} + p_{vl} - p_{cr} - p_{vr})$$

式中: A 为活塞截面积;下标 l 和 r 分别表示左、右。

对于 F_p 中的非线性压力项 $p_v A$,通过等效处理后可视为线性弹力,所以 $p_v A$ 可用等效弹力 $K_p x$ 代替^[6-8]。等效刚度

$$K_p = \left(\frac{2p_0 A \epsilon^2}{L + x_0} \right) \frac{\epsilon^{\gamma-1} - 1}{(\gamma-1)(\epsilon-1)^2}$$

式中: ϵ 为发动机压缩比; γ 为多变指数; L 为 $1/2$ 活塞行程长度; x_0 为燃烧室长度; p_0 为进气压力。

如果将燃烧产生的气体压力看作是系统的激励力,那么活塞的运动过程便可看成是单自由度强迫振动过程。活塞的运动频率与外部激励的频率相同,系统的振动幅值(活塞行程)与外部激励力、阻尼、刚度和活塞组件质量有关^[8],则有

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + K_p x = A(p_{cl} - p_{cr})$$

式中: $C = C_e + C_f$,为阻尼系数。

2 总体参数匹配模型

对于 FPLA,当发动机缸径、行程、压缩比、活塞质量和电机电磁负载这 5 项参数确定后,总体结构便可基本确定。由此可见,本文拟提出的设计方法需要确定出这 5 项结构参数,同时还要保证所设计的总体参数能够满足一定的性能目标要求。性能目标参数主要包括 FPLA 输出功率、工作频率和最高燃烧压力,通过对结构参数和性能参数之间的匹配关系进行分析,可以获得总体结构参数设计模型。

2.1 工作频率

由振动理论,强迫振动系统的工作频率应等于外界激励力的频率,因此针对 FPLA 工作频率的设计,就是对发动机着火燃烧放热频率的设计。发动机点火机构的跳火频率或者喷油装置的燃油喷射频率通过控制来保证,发动机在跳火或喷油后仍需达到一定燃烧条件,该条件通常为缸内气体温度和可燃混合气的浓度。为了便于分析,本文将此条件假设为压缩比。因此,对 FPLA 工作频率的设计,重点是保证自由活塞能够按照额定的频率运动到预定压缩比的位置。

2.2 气缸工作容积与输出功率

从振动系统能量平衡角度来看,自由活塞直线发电机运行了一个工作循环后,活塞回到初始状态,运动速度和动能保持不变。整个循环过程中两侧燃烧室内燃料燃烧所释放的能量将转化为直线电机负载电能、摩擦能和废气热能。因此,要保证自由活塞直线发电机正常工作,设计时要求发动机燃烧产生

的有效功完全来自直线发电机,此过程中电机所消耗的能量为电机推力所做的功,即

$$W_e = \int_0^{4L} C_e \frac{dx}{dt} dx = \int_0^{4L} C_e \bar{v} dx = 16C_e L^2 f = P_e / f$$

式中: f 为工作频率; P_e 为发电机输出功率; $\bar{v}$ 为活塞平均速度, $\bar{v}=4fL$ 。

每一循环自由活塞发动机气缸内燃料燃烧所释放的全部能量为^[4]

$$Q_c = m_c H_u$$

式中: m_c 为每一循环燃料供给量; H_u 为燃料低热值。

根据燃空比关系,每一循环燃料供给量可由换气过程结束后进入气缸的新鲜充量计算得到。由理想气体状态方程,换气过程结束后,留在发动机气缸内的新鲜充量的质量及吸入气缸内的燃料质量分别为

$$m_a = \frac{p_0 V_0}{R_m T_0} \eta_s = \frac{\pi p_0 D^2 L}{2 R_m T_0} \eta_s$$

$$m_c = \frac{m_a}{l_0 \varphi_a} = \frac{\pi p_0 D^2 L}{2 R_m T_0 l_0 \varphi_a} \eta_s$$

式中: T_0 为进气温度; V_0 为气缸最大有效容积; η_s 为扫气效率; D 为发动机缸径; φ_a 为过量空气系数; R_m 为气体常数; l_0 为燃料化学计量空燃比。

结合自由活塞发动机和直线电机之间的能量传递关系,即

$$Q_c \eta_e = W_e$$

可以得到自由活塞发动机缸径、行程、气缸工作容积与直线电机输出功率、工作频率的匹配关系,即

$$\frac{\pi p_0 D^2 L}{2 l_0 R_m T_0 \varphi_a} H_u \eta_e \eta_s = \frac{p_0 V_s H_u \eta_e \eta_s}{l_0 R_m T_0 \varphi_a} = \frac{P_e}{f} \quad (2)$$

式中: η_e 为FPLA有效效率; V_s 为气缸工作容积。

由式(2)可见,FPLA输出功率与自由活塞发动机缸径的平方近似成正比关系,因此在设计过程中如果需要FPLA输出较大的功率,则可以通过合理设计发动机缸径来满足。

2.3 最高燃烧压力与气缸工作容积

在自由活塞直线发电机设计中,为了保证所设计的FPLA样机能够输出额定功率,自由活塞发动机的有效功率应满足一定的条件,考虑到必然存在摩擦损耗和电机内阻损耗,自由活塞发动机的设计功率应大于直线发电机的额定功率。关于直线发电机与自由活塞发动机之间的功率关系用匹配比表示,该匹配比实际上就是直线电机的发电效率 η ,文献[9]中给出了该匹配比的参考取值范围。因此,由匹配比和直线电机输出功率可以计算出发动机的额定有效功率,即

$$P_{ee} = P_e / \eta$$

根据发动机有效功率的定义,发动机单位时间所发出的有效功,可用平均有效压力表示,即

$$P_{ee} = \frac{2ip_m V_s f}{\tau}$$

式中: p_m 为发动机平均有效压力; i 为气缸数; τ 为发动机行程数。

考虑到自由活塞运动时几乎没有侧偏力,相应的摩擦力较小,该摩擦损耗在有效效率中可以加以考虑,因此认为平均有效压力为发动机的平均指示压力,即为循环指示功与气缸工作容积的比值,且与最高燃烧压力满足如下关系

$$p_m = \frac{x_0^\gamma (p_p - p_0 \epsilon^\gamma) [(\epsilon x_0)^{1-\gamma} - x_0^{1-\gamma}]}{2x_0 (\epsilon - 1)(1 - \gamma)}$$

式中: p_p 为最高燃烧压力。

将上式所得的平均有效压力带入式(2),可以获得发动机缸径、行程与输出功率的另外一种匹配关系,即

$$\frac{x_0^\gamma (p_p - p_0 \epsilon^\gamma) [(L + x_0)^{1-\gamma} - x_0^{1-\gamma}]}{2(1 - \gamma)} = \frac{P_e \tau}{\pi D^2 i f \eta} \quad (3)$$

2.4 压缩比与活塞质量

自由活塞直线发电机工作过程为一强迫振动过程,尽管通过对外部激励力进行Fourier级数展开可以获得振动响应的一般解,但理论上展开阶数是无穷多个,难以在实际中应用。为了分析自由活塞发动机压缩比与活塞组件质量的匹配关系,在此将式(1)右边的激励力等效到左边的阻尼项中^[10],这样活塞振动方程(式(1))变换为

$$m\ddot{x} + c_1 \dot{x} + K_p x = 0$$

其阻尼项为非线性激励力、电机电磁阻力及摩擦力的等效值,满足如下关系

$$\oint A(p_{cl} - p_{cr}) - C\dot{x}dx = \oint c_1 \dot{x}dx = \Delta E$$

式中: ΔE 为系统从外部获得的净能量。

当FPLA稳定工作时,外界激励输入的能量完全被阻尼项所消耗,系统获得的净能量 $\Delta E=0$,因此阻尼 $c_1=0$,此时振动系统为无阻尼自由振动,振动方程为

$$m\ddot{x} + K_p x = 0$$

对于线性自由振动方程,振动规律完全取决于系统本身的固有特性,其解析解为

$$x_1 = L \sin \omega t$$

$$\omega = \left(\frac{2Ap_0}{(L+x_0)m} \left(\frac{\epsilon^2 (\epsilon^{\gamma-1} - 1)}{(\epsilon - 1)^2 (\gamma - 1)} \right) \right)^{1/2}$$

式中: ω 为系统的固有圆频率; x_1 为振动响应。

由上述解析解便可得出自由活塞直线发电机的工作频率

$$f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{2Ap_0}{(L+x_0)m} \left(\frac{\epsilon^2(\epsilon^{\gamma-1}-1)}{(\epsilon-1)^2(\gamma-1)} \right) \right)^{1/2}$$

经变换处理后得到质量与压缩比的关系为

$$m = \frac{Ap_0}{2\pi^2 f^2 (L+x_0)} \left(\frac{\epsilon^2(\epsilon^{\gamma-1}-1)}{(\epsilon-1)^2(\gamma-1)} \right) \quad (4)$$

由上述两式可见,当系统工作频率设计完成后,活塞组件质量与压缩比也存在一定的匹配关系。由于 FPLA 压缩比不受机械机构的限制,所以工作过程中可以灵活变化。当发动机点火或喷油燃烧放热频率保持不变时,如果压缩比发生了变化,则必然要求活塞组件质量、缸径采取相应的变化措施。然而,对于已经设计完成的自由活塞直线发电机,其工作状态时的活塞运动质量、气缸缸径通常是不能调节的,因此如果需要压缩比在工作过程中发生变化,则必然要求发动机工作频率发生改变。由此可见,在 FPLA 设计完成后,活塞组件的工作频率可以看成是发动机压缩比的函数,也就是振幅(行程)的函数。

2.5 电磁负载与输出功率

自由活塞直线发电机的输出功率是指电磁阻力在单位时间内所做的功,即

$$P_e = 4C_e \bar{v} L f$$

因此,对直线电机输出功率的设计亦为对等效电磁负载的设计,即

$$C_e = \frac{P_e}{16L^2 f^2} \quad (5)$$

对于特定的直线电机,电磁负载通常由外部电阻决定^[4],因为

$$C_e = k_f k_e \frac{1}{R_s + R_L + jL_e}$$

式中: k_f 为电机推力系数; k_e 为反电动势系数; R_s 为线圈内阻; L_e 为电机电感。这些参数一般是不能变化的,只有负载电阻 R_L 是可以设计的,因此对 FPLA 输出功率的设计,即为对负载电阻的设计。

3 总体参数设计方法

根据第 2 节的总体参数匹配模型,总结出自由活塞直线发电机总体结构参数设计流程,如图 2 所示。设计顺序为:根据输出功率、工作频率和最高燃烧压力设计出发动机的平均有效压力和气缸工作容积,如式(3),此平均有效压力是关于行程的函数,结合工作频率、输出功率、缸径和行程的匹配关系,如式(2),共同确定出发动机的压缩比,进而得出缸径

和行程;根据设计出的压缩比、缸径和行程,结合工作频率,得到活塞组件的总质量,如式(4);结合工作频率、行程和输出功率设计等效电磁负载,如式(5)。

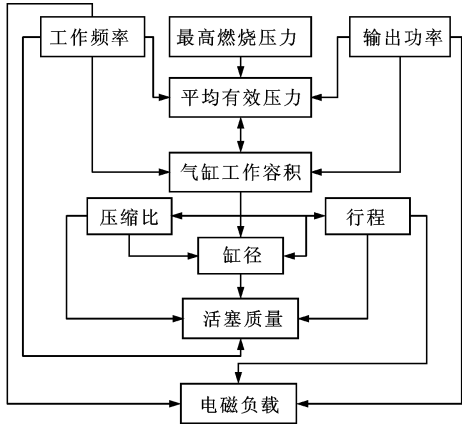


图 2 自由活塞直线发电机总体结构参数设计流程

为了验证设计方法的正确性,根据设计流程、结合参数匹配模型,选择以工作频率 $f=25\text{ Hz}$ 、最高燃烧压力 $p_p=4\text{ MPa}$ 、输出功率 $P_e=0.5\text{ kW}$ 为设计目标,拟设计出一台点燃式自由活塞直线发电机。经过计算,设计样机主要结构参数如表 1 所示。

表 1 设计样机主要结构参数

参数	数值	参数	数值
压缩比	7.7	活塞质量/kg	0.93
缸径/mm	31.9	等效电磁负载/ $\text{N} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$	142.06
行程/mm	37.6		

在设计过程中,计算所用相关初始参数主要以传统内燃机经验值为参考,具体内容如表 2 所示。

表 2 传统内燃机经验参数和边界条件

参数	数值	参数	数值
额定燃烧室长度/mm	2.8	扫气效率/%	75
过量空气系数	1.1	有效效率/%	20
多变指数	1.3	匹配比/%	80
化学计量空燃比	14.8		

4 设计方法验证结果

将所设计的总体结构参数带入 FPLA 仿真模型中,可以计算出 FPLA 工作过程的性能状况,该仿真模型的详细表述见文献[3]。根据设计参数组配了一台点燃式试验样机,如图 3 所示,其发动机部分由一款二行程汽油机改装而成,电机部分为一台 U 型直线电机。由于发动机和直线电机受改装原件的限制,部分结构参数不能完全按照第 3 节设计,

这些结构参数包括缸径为 34 mm,活塞组件质量为 1.2 kg,等效电磁负载为 $127\text{ N/m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

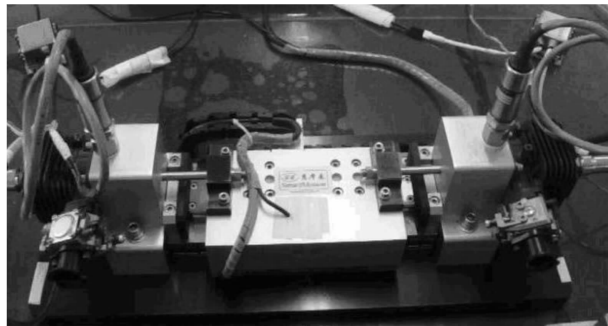


图 3 点燃式自由活塞直线发电机试验样机

计算和试验结果如图 4、5 所示,图 4 为发动机

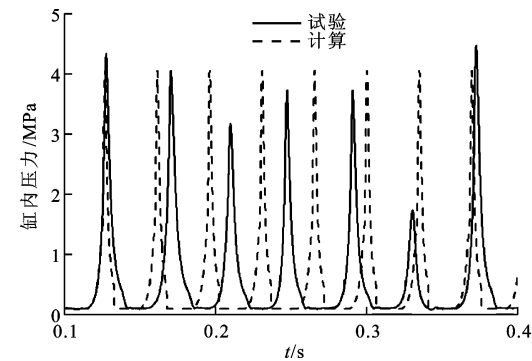
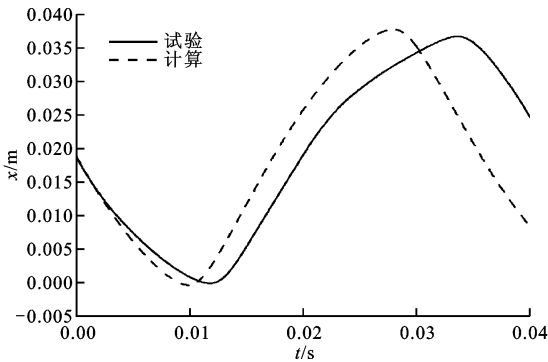
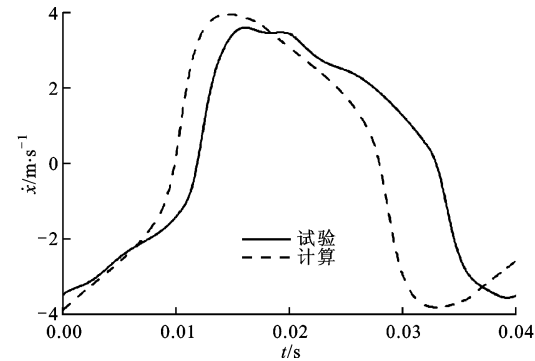


图 4 发动机缸内压力变化曲线



(a)活塞位移



(b)活塞速度

图 5 自由活塞运动曲线

缸内压力变化曲线,图 5 为活塞运动曲线。由于试验过程中存在失火现象,所以选取了良好的燃烧循环。设计目标和仿真结果对比如表 3 所示。从工作频率的最大误差来看,仿真和试验结果与设计目标的最大误差为 13.4%和 4.5%,最高燃烧压力的误差分别相差 2.8%和 10.5%,仿真得出的直线电机输出功率为 0.53 kW,试验获得的输出功率为 0.47 kW,均接近设计目标,能够满足设计目标的要求,由此验证了设计方法的正确性。

表 3 设计目标和仿真结果对比

参数	目标值	仿真结果	试验结果
工作频率/Hz	25.00	28.36	23.94
行程/mm	37.60	37.78	37.66
压缩比	7.70	7.94	7.79
输出功率/kW	0.50	0.53	0.47
最高燃烧压力/MPa	4.00	4.11	4.42

5 结 论

本文通过对自由活塞直线发电机工作过程中活塞运动的理论分析,研究了相关结构参数与性能参数的匹配关系,提出了一种自由活塞直线发电机总体结构参数的设计方法,所得结论如下。

- (1)基于振动方程的结构参数匹配设计方法可以完成自由活塞直线发电机总体结构参数的设计。
- (2)对于已经完成设计的 FPLA,工作过程中活塞组件的运动频率为发动机压缩比的函数,两者之间满足一一对应的关系。

参考文献:

[1] MIKALSEN R, ROSKILLY A P. A review of free-piston engine history and applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(14): 2339-2352.

[2] ATKINSON C M, PETREANU S, CLARK N N, et al. Numerical simulation of a two-stroke linear engine, SAE 1999-01-0921 [R]. Washington DC, USA: SAE, 1999.

[3] MAO J, ZUO Z, LIU D. Numerical simulation of a park ignited two-stroke free-piston engine generator [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2009, 18(3): 283-287.

[4] MAO J, ZUO Z, FENG H. Parameters coupling designation of diesel free-piston engine with linear alternator [J]. Applied Energy, 2011, 88(12): 4577-4589.

(下转第 52 页)