

电力活塞式电动机电磁驱动系统 数学模型及特性分析^①

赵景波^{1,2}, 鹿麟祥^{1,2}, 陈 森^{1,2}, 张 兵^{1,2}

1. 江苏理工学院 汽车与交通工程学院, 江苏 常州 213001;

2. 四川理工学院 人工智能四川省重点实验室, 四川 自贡 643000

摘要: 为了研究电力活塞式电动机电磁驱动系统电磁转换特性, 基于电磁场相关理论, 采用磁路分析法, 建立了电磁驱动系统的数学模型; 对活塞、电磁驱动系统进行了运动学和动力学分析, 基于 MATLAB/simulink 建立了关键部件的仿真模型, 分析了活塞受力与位移、曲轴转角的关系, 得到了电磁力、活塞所受外力及加速度曲线, 将活塞理论数据与仿真数据进行了对比。结果表明: 理论数据与仿真数据基本吻合, 误差控制在 10% 左右, 验证了电磁驱动系统设计方案和数学模型的有效性; 对电磁驱动系统的设计制造提供了理论依据和技术支持, 具有重要的参考价值。

关 键 词: 电力活塞式电动机; 电磁驱动; 磁路分析; 数学模型

中图分类号: U464

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2016)02-0135-08

电磁驱动作为一种新的驱动方式, 其原理是把电磁能转换成机械能, 驱动活塞做功。传统电磁铁是利用通电的铁心线圈吸引衔铁保持某种机械零件、工件于固定位置的一种电器, 衔铁的动作可使其他机械装置发生联动。当电源断开时, 电磁铁的磁性随着消失, 衔铁或其他零件立即被释放^[1]。目前传统的电磁铁组件主要应用于开关(继电器)、起重机、电铃、电话、包括音响的喇叭。在发动机的应用上, 美国密歇根大学^[2]、南京理工大学^[3-4]所研究的电磁驱动气门机构, 就利用电磁铁产生的电磁力驱动气门, 其控制原理就是根据换气要求, 由电控单元在确定的时刻发出控制脉冲给电磁铁的驱动电路, 控制电磁阀的开关过程, 从而控制气门的开启和关闭。在磁悬浮上, 采用永磁混合悬浮装置^[5-8], 成功实现低功耗控制。青岛大学^[9-10]把传统的内燃机一发电机组, 设计并生产了一种新型热-电转换装置。南京航空航天大学^[11-12]对永磁式、电励磁式、混合励磁式磁通切换电机进行了电机本体设计及相关实验混合, 并对励磁分块转子磁通切换电机电磁特性分析, 其中所涉及的发动机的设计和电磁永磁混合结构的研究将为本课题中电磁铁组件的研究分析提供了良好的借鉴。

基于电磁悬浮系统原理, 提出一种采用电磁驱动活塞做功的电力活塞式电动机的工作方案, 与动力蓄电池一起构成动力源。在传统发动机结构形式和工作原理的基础上, 利用电磁转换做功取代传统发动机的燃料燃烧做功, 设计单缸发动机中电磁驱动系统, 通过分析其工作原理, 建立数学模型, 基于 MATLAB/

① 收稿日期: 2014-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(61503163); 江苏省自然科学基金项目(BK2012586); 江苏省“六大人才”高峰项目(ZBZZ-024); 汽车仿真与控制国家重点实验室开放基金(20111115); 常州市应用基础研究计划(CJ20130015); 人工智能四川省重点实验室开放基金项目(2014RZY01)。

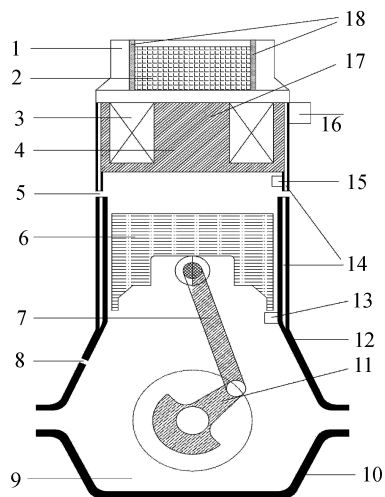
作者简介: 赵景波(1980-), 男, 山东寿光人, 博士, 副教授, 主要从事车辆动力学及控制方面的研究。

simulink 搭建仿真模块, 进行动力学仿真, 并通过计算分析为此提供理论支持。

1 电力活塞式电动机工作原理

电力活塞式电动机的典型结构及工作原理如图 1 所示。电力活塞式电动机在传统发动机的基础上, 将传统发动机内的供气排气装置、供油装置、点火系统等去掉, 以车载蓄电池为动力源, 利用电磁驱动系统的电磁转换和同极相斥原理, 将电能转换成机械能驱动永磁体活塞做功输出转矩, 能量转换工作在电磁驱动系统中完成。电磁驱动系统位于活塞正上方, 主要由软磁磁轭和绕组线圈组成。

电力活塞式电动机的工作流程如图 2 所示。工作时, 首先采用相应的启动系统驱动飞轮使曲轴转动, 通过曲轴连杆机构带动活塞运动, 当活塞运行到上止点时, 上止点位置检测传感器检测到活塞到达后, 将信号传送到电控单元, 电控单元控制电磁驱动系统通电产生磁场力, 该磁场力与永磁体活塞相排斥, 驱动活塞做功, 实现电磁能向直线机械能的转变, 通过曲柄连杆装置的运动加以约束, 保证活塞连续往复运动, 将直线机械能转换为旋转机械能输出; 当活塞运行至下止点时, 电控单元控制电磁驱动系统断电, 活塞依靠飞轮的转动惯量, 通过曲柄连杆机构往复运动, 如此循环, 当活塞运行稳定后, 启动系统停止工作。



1. 气缸盖; 2. 电流放大整形装置; 3. 绕组线圈; 4. 软磁磁轭; 5. 上通气孔; 6. 永磁体活塞; 7. 连杆; 8. 下通气孔; 9. 润滑油存储装置; 10. 发动机底壳; 11. 曲柄-飞轮组件; 12. 气缸体; 13. 下止点检测装置; 14. 冷却装置; 15. 上止点检测装置; 16. 电控装置; 17. 电磁永磁混合驱动系统; 18. 电源控制调节器。

图 1 电力活塞式电动机典型结构

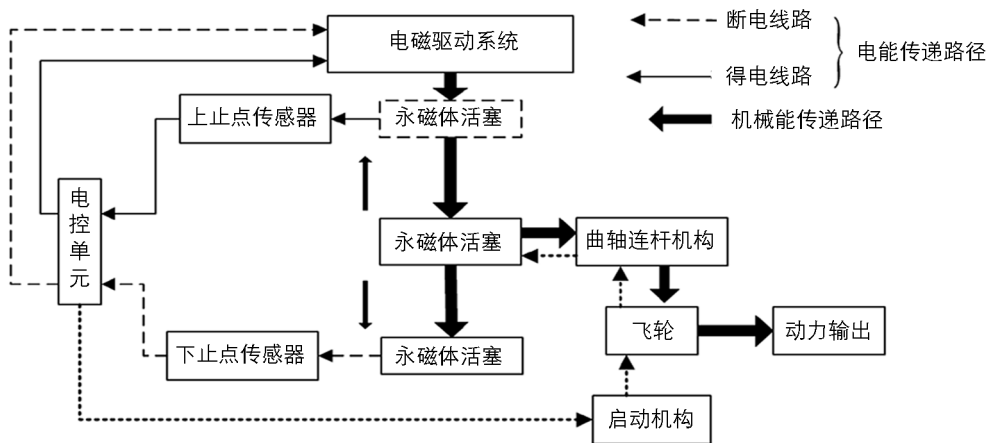


图 2 电力活塞式电动机工作流程

2 电磁驱动系统数学模型的建立

2.1 电磁驱动系统的分析

借鉴应用于磁悬浮列车上的电磁构成的悬浮系统, 提出一种应用电力活塞式电动机内部的电磁驱动系统。在活塞到达上止点时, 螺线管通电, 电磁驱动系统产生排斥力驱动活塞做功, 电磁力作用效果如图 3 (a) 所示。电磁力随着螺线管通过的电流大小、匝数和相互间位移的大小发生变化。

电磁悬浮系统通常是多磁铁结构, 但是通过解耦, 系统可以分解为单个悬浮磁铁的控制问题^[13]。所以单磁铁悬浮系统是磁悬浮系统的基本单元, 分析单磁铁悬浮系统的动态模型和动态特征比分析多磁铁系统更具有一般性, 将上述分析方法应用在电磁驱动系统。

目前, 单体永磁体的组合形式有很多结构, 产生的磁场也不一样^[14-15], 基于上述思想, 在电力活塞式电动机的研究中, 对电磁驱动系统进行分析时, 将电磁驱动系统从发动机内分离出来, 简化成单体电磁系

统, 采用圆柱体电磁结构, 其磁场沿中心轴均匀分布, 单体电磁驱动系统的物理模型如图 3(a)所示. 并作假设: ① 磁路中铁磁材料的磁导率无穷大, 磁势均匀地降落在气隙和永磁体活塞上; ② 忽略磁铁的漏磁及边缘效应; ③ 铁芯的磁导率各向同性, 不计磁滞效应, 同时忽略涡效应流; ④ 视永久磁铁的性能参数为常数. 电磁驱动结构采用的是直流通电形式, 磁芯本身损耗小, 故用圆柱形永磁体影响不大. 在上述假设下, 电磁驱动系统的磁路模型如图 3(b)所示. 上述模型系统参数见表 1.

表 1 电磁驱动系统参数

符号	定 义	单位	符号	定 义	单位
$U(t)$	线圈两端电压	V	S_1	电磁铁基体有效横截面积	m^2
$i(t)$	线圈输入电流幅值	A	S_2	永磁体活塞有效横截面积	m^2
h_1	电磁铁基体的有效厚度	m	μ_r	永磁体相对磁导率	
h_2	永磁体活塞的有效长度	m	N	绕组线圈匝数	
R_1	电磁铁基体的内部磁阻	Ω	μ_0	真空磁导率	H/m
R_2	永磁体活塞的内部磁阻	Ω	c	初始气隙	m
R_c	极处气隙的磁阻	Ω	H_c	磁軛矫顽力	kA/m

对等效磁路模型进行分析, 有

$$R_c = \frac{x(t)}{\mu_0 S_2} \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{h_1}{S_1 \mu_{\text{pm}}} = \frac{h_1}{S_1 \mu_r \mu_0} \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{h_2}{S_2 \mu_{\text{pm}}} = \frac{h_2}{S_2 \mu_r \mu_0} \quad (3)$$

$$U_m = \phi R_m \quad (4)$$

式中, $\mu_r = \frac{\mu_{\text{pm}}}{\mu_0}$, 为永磁体的相对磁导率; $x(t)$ 为电磁永磁混合驱动系统与永磁体活塞的距离, $x(t) = x_1(t) + c$, c 为活塞位于上止点位置时与电磁永磁混合驱动系统的距离.

由图 3(b)所示的等效磁路模型, 根据磁路的欧姆定律, 计算气隙磁路磁通:

$$\phi_1(x, i) = \frac{\mu_0 S_1 (Ni + H_c h_1)}{x(t) + \frac{h_1}{\mu_r}} \quad (5)$$

气隙磁密为

$$B_1 = \frac{\phi(x, i)}{S_1} = \frac{\mu_0 (Ni + H_c h_1)}{x(t) + \frac{h_1}{\mu_r}} \quad (6)$$

电磁铁绕组回路的电压方程为

$$U(t) = Ri(t) + \frac{d}{dt} [N\phi(x, i)] = Ri(t) + L_i \frac{di(t)}{dt} - \frac{2\mu_0 NS(Ni + H_c h_1)}{(x(t) + h/\mu_r)^2} \frac{dx(t)}{dt} \quad (7)$$

2.2 发动机活塞部件受力分析

发动机的工作机构采用中心式曲柄连杆机构, 其气缸中心线通过曲轴的旋转中心, 活塞在电磁永磁混合驱动系统产生的电磁力作用下做往复直线运动, 并通过连杆将活塞的往复直线运动转化为曲轴的旋转运

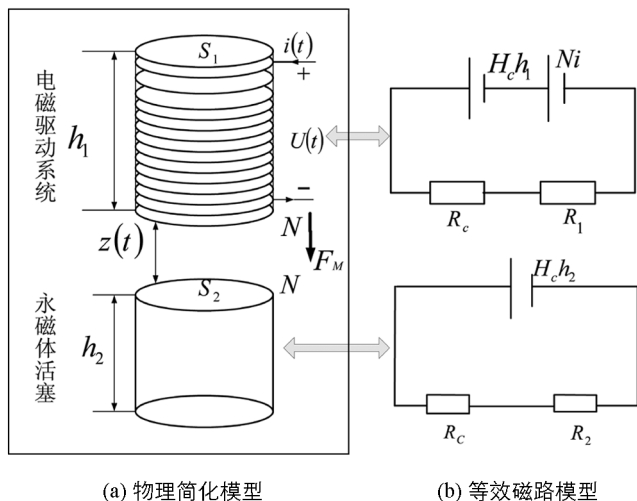


图 3 电磁驱动系统的模型

动. 在分析活塞动力学、运动学的同时, 近似地认为曲轴作匀速旋转运动, 如图 4 所示, 将活塞作为隔离体, 分析其受力情况. 图 4 模型系统参数见表 2.

表 2 活塞组参数

符号	定 义	单位	符号	定 义	单位
F_M	混合驱动系统对活塞的作用力	N	$x_1(t)$	活塞位移	m
P_j	活塞的往复惯性力	N	β	连杆摆角	rad
F_t	连杆对活塞销的推力	N	$m_j g$	活塞组重力	N
F_r	汽缸壁对活塞销的侧向力	N	a	活塞组加速度	N/m ²

对发动机活塞部件受力进行分析:

1) 在 t 时刻的电磁驱动系统得电后瞬时排斥力 $F_T(x, i)$

为

$$F_T(x, i) = \frac{1}{2} \frac{B_1^2 S_1}{\mu_0} = \frac{1}{2} \mu_0 S_1 \left[\frac{Ni + H_c h_1}{x(t) + \frac{h_1}{\mu_r}} \right]^2$$

同理: 永磁体活塞与电磁驱动系统的瞬时排斥力 $F_L(x)$ 为

$$F_L(x) = \frac{1}{2} \frac{B_2^2 S_2}{\mu_0} = \frac{1}{2} \mu_0 S_2 \left[\frac{H_c h_2}{x(t) + \frac{h_2}{\mu_r}} \right]^2$$

所以电磁驱动结构与永磁体活塞之间的排斥力 F_M 为

$$F_M = F_T(x, i) + F_L(x) = \frac{1}{2} \frac{B_1^2 S_1}{\mu_0} + \frac{1}{2} \frac{B_2^2 S_2}{\mu_0} = \frac{1}{2} \mu_0 S_1 \left[\frac{Ni + H_c h_1}{x(t) + \frac{h_1}{\mu_r}} \right]^2 + \frac{1}{2} \mu_0 S_2 \left[\frac{H_c h_2}{x(t) + \frac{h_2}{\mu_r}} \right]^2 \quad (8)$$

式中, $L_i = \frac{\mu_0 N^2 S_1}{x(t) + \frac{h_1}{\mu_r}}$, 是气隙为 $x(t)$ 时的线圈电感.

2) 活塞的往复惯性力为

$$P_j = -m_j a = -m_j R \omega^2 \cos \alpha - m_j R \omega^2 \lambda \cos 2\alpha \quad (9)$$

式中 α 按近似式; m_j 为作往复运动的活塞组质量; ω 为曲轴的角速度; P_{j1} 为一次往复惯性力; P_{j2} 为二次往复惯性力(假定曲轴作匀速旋转运动).

沿气缸中心线方向上写出永磁体活塞上的力学方程为

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = F_M + mg + P_j - F_\mu \quad (10)$$

式中 P_j 为往复惯性力, F_μ 为摩擦力,

由活塞的平衡条件可得

$$F_t = \frac{(F_M + P_j)}{\cos \beta}$$

$$F_r = (F_M + P_j) \tan \beta$$

综上所述, 得出电磁驱动系统动态模型的方程组表达式为

$$\begin{cases} F_M = \frac{1}{2} \mu_0 S_1 \left[\frac{Ni + H_c h_1}{x(t) + \frac{h_1}{\mu_r}} \right]^2 + \frac{1}{2} \mu_0 S_2 \left[\frac{H_c h_2}{x(t) + \frac{h_2}{\mu_r}} \right]^2 \\ P_j = -m_j a = -m_j R \omega^2 \cos \alpha - m_j R \omega^2 \lambda \cos 2\alpha \\ m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = F_M + mg + P_j - F_\mu \end{cases} \quad (11)$$

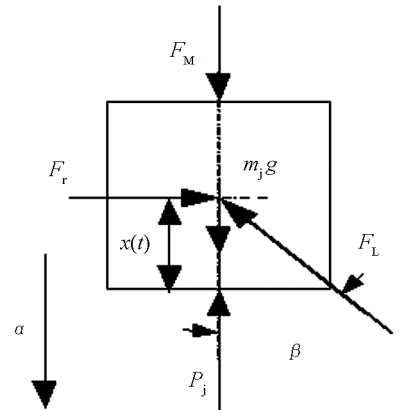


图 4 活塞受力简图

上述 $x(t)$ 为变量，随着活塞位置的变化呈现周期性的变化. 其值为：

$$x(t)=R(1-\cos \alpha)+L\left(1-\sqrt{1-\lambda^2 \sin ^2 \alpha}\right)+c$$

(12)

3 电磁驱动系统的动力学仿真

根据上述设定的参数值和动力学方程组，忽略 F_{μ} 摩擦力的影响，建立公式组(10)的子系统模块，搭建电磁驱动系统仿真模块框图如图 5 所示.

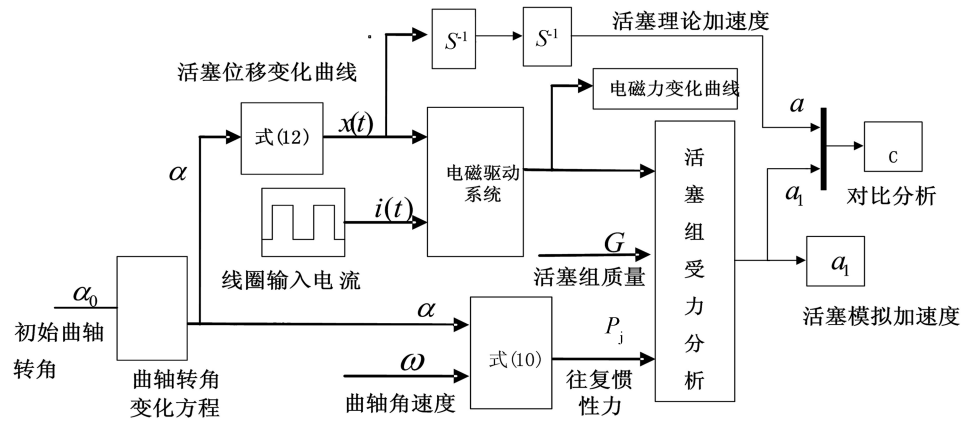


图 5 电磁驱动系统仿真框图

在应用 MATLAB/simulink 进行仿真前，电磁驱动系统和活塞组相关数据分别见表 3、表 4.

表 3 电磁驱动系统的仿真参数

参 数 名 称	参 数 值	参 数 名 称	参 数 值
绕组匝数(N)	500	永磁体矫顽力(H_c)/(A · m ⁻¹)	100
电磁铁磁极面积(S)/m ²	1.6π×10 ⁻³	永磁体相对磁导率(μ_r)	1
电流幅值(I)/A	120	真空磁导率(μ_0)/(H · m ⁻¹)	4π×10 ⁻⁷
初始气隙(c)/m	0.005	永磁体厚度(h_1)/m	0.05

表 4 活塞组仿真参数

参 数 名 称	参 数 值	参 数 名 称	参 数 值
活塞组质量(m_j)/kg	5.5	连杆长度(L)/m	0.147 5
永磁体活塞面积(S)/m ²	1.6π×10 ⁻³	曲柄半径(R)/m	0.047 5
永磁体活塞高度(h_2)/m	0.035		

将设计的控制对象参数代入仿真模型，设定电流周期 T=0.02 s，如前面所述，假定曲轴作匀速旋转运动，在电磁驱动系统绕组线圈电流处于稳定的情况下，得到活塞的位移、加速度仿真曲线，电磁力仿真曲线. 其中，工作电流变化曲线和活塞往复运动位移变化曲线如图 6、图 7 所示，活塞呈现周期性的往复运动，从图 8 可以看出，随着时间和活塞位移的周期性变化，电磁力的大小呈现周期性的变化，与传统发动机的压缩、做功两个行程相同，完成电磁力驱动式活塞发动机的一个工作循环，期间活塞在上、下止点间往复移动两个行程，曲轴旋转一周.

当活塞运行至上止点时，电磁驱动系统得电，电磁力迅速增大，此时活塞所受到的电磁力最大，驱动活塞向下运动，与传统发动机的做功行程相似. 随着活塞位移的增大电磁力逐渐降低，当活塞到达下止点时，电磁驱动系统断电，此时电磁力最小为零，当活塞到达上止点时，电磁驱动系统得电，活塞所受到的排斥力瞬间增大. 活塞依靠飞轮的转动惯量，通过曲柄连杆机构带动活塞往复运动，类似于传统二冲程发动机的压缩和做功行程. 活塞在所受合力状态下加速度曲线变化规律如图 9.

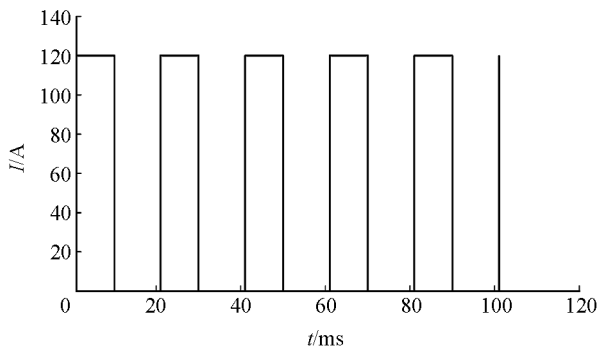


图 6 电流周期变化曲线

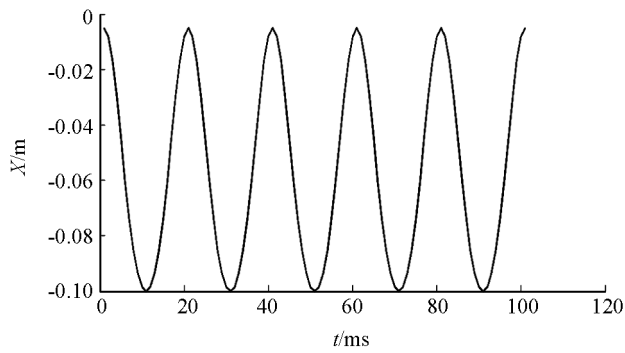
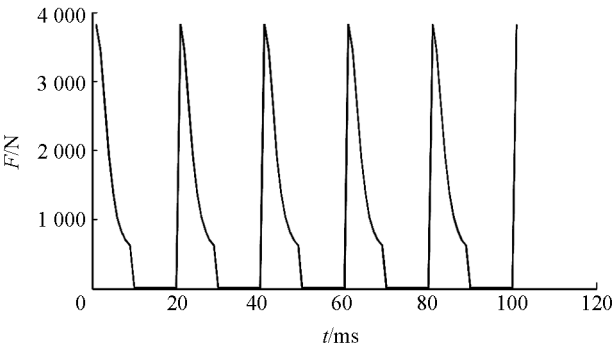
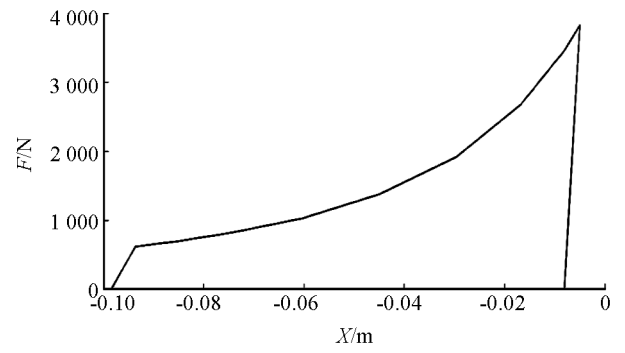


图 7 活塞往复位移运动曲线

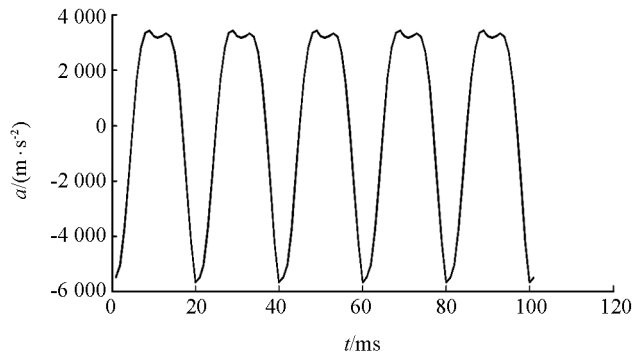


(a) 电磁力随时间变化曲线

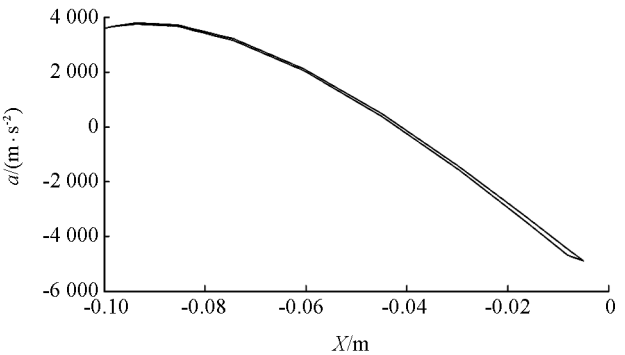


(b) 电磁力随位移变化曲线

图 8 理论电磁力随时间和位移变化的仿真曲线



(a) 加速度随时间变化曲线



(b) 加速度随位移变化曲线

图 9 理论加速度随时间和位移变化的仿真曲线

上述分析结果中,活塞相对于气缸运动的加速度曲线出现“削顶”现象,这是曲柄匀速转动的对心曲柄连杆机构所共有的运动规律,与传统发动机的活塞运行轨迹相似。

将活塞的理论加速度与模拟加速度进行对比,如图 10、图 11 所示,在对活塞进行受力分析时,忽略活塞侧向力的影响,主要考虑活塞轴向受力的作用,使得理论曲线与实际曲线略有偏差,在活塞运行的前期,理论曲线数值迅速增大,几乎与 y 轴重合,这是由于电磁永磁混合驱动系统得电后反应比传统内燃式发动机迅速造成的结果,实际曲线的变

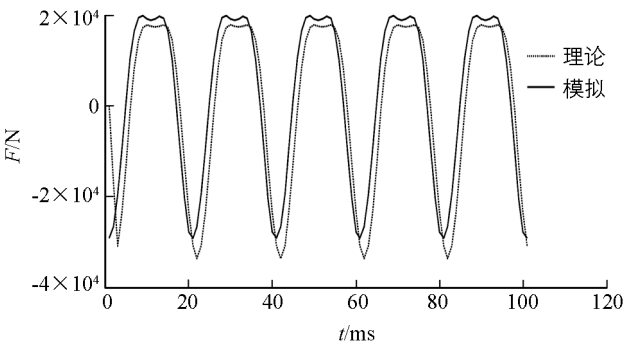


图 10 理论运行所受合力与模拟合力的对比

化曲线在前期显示略有波动,很快呈现周期性运行.经计算,误差控制在 10% 左右,从整体上看,活塞的理论曲线与实际曲线变化轨迹基本吻合,从侧面说明通过活塞进行受力分析所建立的数学模型正确,验证了对活塞受力分析是切实可行的.

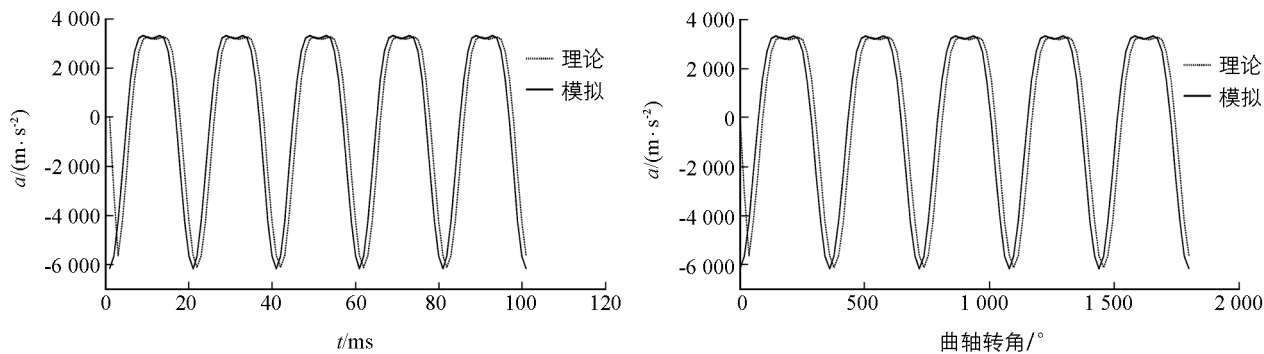


图 11 活塞理论加速度与模拟加速度的对比

4 结 论

提出了一种应用于电力活塞式电动机内的电磁驱动活塞做功的方案,针对电磁驱动系统的电磁转换特性进行了研究,通过仿真结果对比分析,证明了电磁驱动系统驱动活塞做功的方案具有可实施性.电力活塞式电动机工作时无需供气排气装置、供油装置、点火系统等装置,系统响应速度快,且发动机无需严格密封,克服了传统二冲程发动机不容易将废气自气缸内排除干净的最大缺点,具有低碳环保的优点,是对能源的一种新的利用方式,在理论和工程实践中都有一定的价值.

参考文献:

- [1] 梅 亮,刘景林,付朝阳.电磁铁吸力计算及仿真分析研究[J].微电机,2012,45(6):6—7.
- [2] PETERSON K S, STEFANOPOULOU A G, FREUDENBERG J. Current Versus Flux in the Control of Electromechanical Valve Actuators [C]. Proceedings of the 2005 American Control Conference USA: AACC, 2005: 5021—5026.
- [3] 常思勤,刘梁,李子非,徐照平.一种发动机电磁驱动配气机构应用研究[J].南京理工大学学报(自然科学版),2011,35(5):585—589.
- [4] 刘 梁.发动机电磁驱动配气机构的研究[D].南京:南京理工大学,2012.
- [5] RAKIB I, IRBIL H. Analytical Model for Predicting Noise and Vibration in Permanent Magnet Synchronous Motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(6): 2346—2354.
- [6] 程 虎,张 晓,李云钢,等.电磁永磁混合悬浮系统的控制特性分析[J].机车电传动,2010(2):18—21.
- [7] 龙鑫林,余龙华,常文森.电磁永磁混合型 EMS 磁悬浮非线性控制算法研究[J].铁道学报,2011,33(9):36—38.
- [8] 杨治平,刘晓燕,周 彬.无传感器感应电机模糊自校正速度控制[J].西南大学学报(自然科学版),2014,36(4):162—168.
- [9] 熊 树,邓智泉,王 宇,等.混合励磁分块转子磁通切换电机电磁特性分析[J].电机与控制学报,2012,16(10):52—57.
- [10] 王 宇,邓智泉,王晓琳.新型电励磁磁通切换电机励磁绕组结构分析[J].中国电机工程学报,2011,31(24):97—104.
- [11] 侯亚楠,程 强.单缸电力约束活塞发动机仿真研究[J].新技术新工艺,2011(8):71—74.
- [12] 朱 健,张铁柱.单缸电力约束活塞发动机空载电磁分析[J].中国制造业信息化,2009,38(19):54—57.
- [13] 张志洲,余龙华,张玲玲,等.考虑多约束条件的磁浮列车节能型永磁电磁磁铁优化设计[J].机械工程学报,2012,48(2):147—149.

[14] 肖帅飞. 单体电磁永磁混合结构排斥力的试验研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2011.

[15] 肖帅飞, 何培祥, 李庆东, 等. 电磁永磁混结构排斥力的特性 [J]. 科技创新导报, 2010(29): 71—72.

Mathematical Models and Characteristics Analysis of the Electromagnetic Drive System of Electromagnetic Piston Motors

ZHAO Jing-bo^{1,2}, LU Lin-xiang^{1,2},
CHEN Sen^{1,2}, ZHANG Bing^{1,2}

1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou Jiangsu 213001, China;

2. Sichuan University of Science and Engineering, Artificial Intelligence Key Laboratory of

Sichuan Province, Zigong Sichuan 643000, China

Abstract: A study was conducted to provide theoretical basis and technical support for the development of electromagnetic hybrid drive systems. First, based on the theories concerning electromagnetic fields and adopting the magnetic circuit analysis method, mathematical models describing electromagnetic hybrid drive systems were established to study the electromagnetic conversion characteristics of the electromagnetic engine's electromagnetic drive system. Then, simulink models for the critical components were set up by using Matlab/simulink, via the kinematics and dynamic analysis of the piston and the electromagnetic drive system. The relationship between the external force suffered by the piston and displacement and crank angle was analyzed, and the simulation curves for electromagnetic force, the external force suffered by the piston and acceleration were obtained. Finally, the piston theoretical data and simulation data were compared. The results showed that theoretical data agreed satisfactorily well with the simulation data, error control was about 10%, and thus the validity of the structure design of electromagnetic drive system and the validity of the mathematical models developed were verified.

Key words: electromagnetic engine; electromagnetic drive; magnetic circuit analysis; mathematical model

责任编辑 汤振金

