

电磁力互动柱塞泵电磁铁轴向位置优化研究

方磊^a,张洪信^a,赵清海^b,王东^a

(青岛大学 a. 机电工程学院; b. 动力集成及储能系统工程技术中心, 山东 青岛 266071)

摘要:在电磁力互动柱塞泵的电磁力输出特性曲线中,有效输出的电磁力只占电磁力曲线中最小的一段,电磁力利用率低。针对这一问题,进行电磁铁线圈在轴向配置空间内的电磁特性仿真,得到仿真结果。建立优化模型,优化后的结果,将电磁铁线圈的轴向位置重新配置,使得电磁力有效输出提高。在电磁泵输出功率不变的前提下,提高了电磁铁的有效输出,使通电时间大幅度下降,提高能量转换效率。

关键词:电磁力互动柱塞泵;电磁铁线圈;轴向位置;优化

中图分类号:TH137.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)02-0018-04

Research on Axial Position Optimization of Electromagnetic Force Interactive Plunger Pump Electromagnet

FANG Lei^a, ZHANG Hongxin^a, ZHAO Qinghai^b, WANG Dong^a

(a. School of Electromechanical Engineering; b. Power Integration and Energy Storage Systems Engineering Technology Center, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: In the electromagnetic force output characteristic curve of the electromagnetic force interaction plunger pump, the effective output electromagnetic force only accounts for the smallest segment of the electromagnetic force curve with low utilization rate of electromagnetic force. The electromagnetic force characteristics of the electromagnet coil in the axial configuration space were initially simulated with results being obtained. The optimized result was achieved through establishment of an optimization model. As the axial position of the electromagnet coil was reconfigured, the effective output of the electromagnetic force was improved. The results indicate that the constant output power of the electromagnetic pump can enhance the output section of the electromagnet effectively, reduce the energization time drastically, and increase the energy conversion efficiency.

Keywords: electromagnetic force interaction plunger pump; electromagnet coil; axial position; optimization

0 引言

电磁力互动柱塞泵的动力驱动结构为两个电磁铁,通过交互通电实现衔铁-柱塞组件的往复移动,两个衔铁-柱塞组件之间通过同步齿轮联动^[1-2]。电磁铁的轴向位置对整个电磁泵结构与性能影响巨大,这方面的研究亟待开展。

电磁铁轴向位置优化需要借助对电磁铁的仿真研究。这方面研究较早的有日本岐阜大学的 OHOACHI Y 等人使用 Ansoft Maxwell 电磁场仿真平台建立了电磁铁的仿真模型,深入研究了铁芯材料的磁化属性对电磁铁磁场的影响^[3],并通过分析后得出铁芯材料 BH 曲线、相对磁导率等参数会影响电磁铁的响应迟滞时间。北京理工大学的吴萌等人利用磁路分割法将电磁铁的磁路简化,建立电磁铁有限元仿真模型^[4],并对该电磁铁结构优化,优化后电磁铁的电磁力随激励电流变化特性曲线的线性度降低幅度较大,优化效果明显^[5]。沈阳化工学院的张齐通过 Ansoft Maxwell 有限元仿真平台建立电磁铁的 2D 平台,研

究了电磁铁的铁芯材料、铁芯吸合面形状等参数是如何影响电磁力的^[6]。孙虎胆等人同样利用该仿真平台对电磁铁各个结构参数进行仿真,得到了电磁力的规律,提供了一种电磁铁仿真优化的方法^[7]。袁洋、左才工等人以双行程螺管式电磁铁为研究对象,提出通过 Ansoft Maxwell 电磁仿真平台和 ADAMS 动力学仿真平台联合仿真的建模方法,得到了双行程螺管式电磁铁的静态特性曲线,并与实验结果对比,误差在允许范围内^[8-10]。

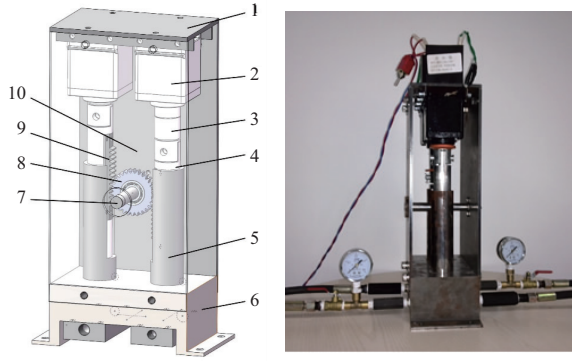
虽然许多学者和科研机构都在进行电磁铁优化的相关工作,研究了电磁铁各个参数对电磁铁动力特性的影响,但是针对电磁力驱动往复柱塞泵的电磁铁性能分析与结构优化的相关研究还比较少,尤其是电磁铁在轴向位置的优化。

1 电磁铁轴向位置优化分析

研制的电磁力互动柱塞泵三维模型与样机如图 1 所示。

基金项目:国家自然科学基金项目(51575286)

第一作者简介:方磊(1994—),男,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为车辆新型动力传动技术。



1—上支撑板;2—电磁铁;3—衔铁;4—柱塞;5—油缸;
6—底座;7—齿轮轴;8—齿轮;9—齿条;10—侧支撑板。

图1 电磁力互动柱塞泵三维模型与样机

衔铁的结构尺寸和上下运动行程固定,考虑电磁线圈在衔铁轴向位置的变化,利用 COMSOL Multiphysics 的 AD/DC 模块建立的电磁铁模型如图 2 所示。

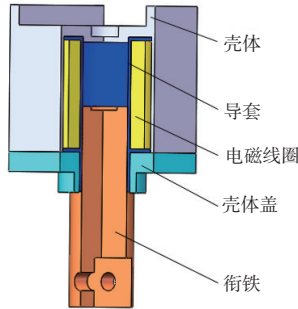


图2 电磁铁三维模型

电磁铁的电磁线圈与衔铁工作行程的相对位置,决定了电磁力互动柱塞泵在工作时所利用的电磁铁输出特性曲线,即决定了电磁铁的有效输出。因此必定存在一个最优的电磁线圈位置,使电磁力互动柱塞泵在满足柱塞行程 30 mm、工作无冲击的同时,输出最高的液压能以及尽可能减少电能消耗^[11]。

当电磁铁线圈的轴向位置发生变化时,相当于衔铁的行程空间发生了相应变化,由前面仿真可知,影响电磁铁输出电磁力大小很大程度上取决于衔铁和电磁线圈的相对位置。为了方便仿真与优化,将线圈的轴向位置优化转化为选择最优的衔铁行程。电磁铁有效输出及衔铁行程示意图如图 3 所示。设计的电磁力互动柱塞泵的柱塞行程为 35 mm,衔铁和柱塞连接在一起,因此衔铁的行程 $S=35$ mm,即 $S_p-S_i=35$ mm,其中 S_i 为衔铁行程起点, S_p 为衔铁行程终点。设计的 P_i-P_p 段为 14 mm,其中 P_i 为电磁线圈激励在半个周期内开始施加时的位移点; P_p 为电磁线圈激励在半个周期内停止施加时的位移点。由电磁力互动柱塞泵的工作原理可知, S_i 点和 P_i 点是重合的。

由电磁力互动柱塞泵样机的电磁铁输出曲线可以看出,在柱塞行程开始时电磁力很小,仅 42 N。随后因为衔铁的运动而使工作气隙减小,电磁力越来越大,电磁铁的有效输出仅为电磁力最小的那一段。因此,需要将电磁铁线圈的轴向位置重新配置,使得 P_i-P_p 段对应的电磁力为最大

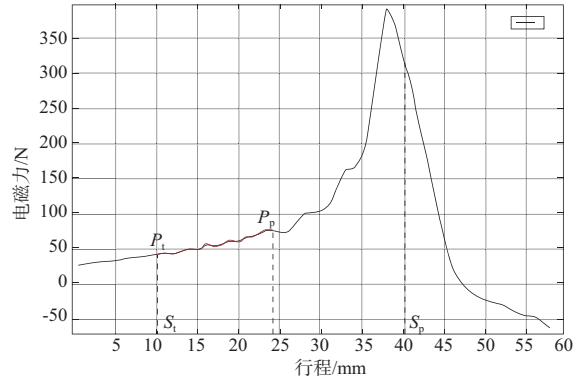


图3 电磁铁有效输出及衔铁行程示意图

的一段,这样电磁力有效输出便能提高。在电磁力互动柱塞泵输出功率不变的前提下,提高了电磁铁的有效输出段,使通电时间大幅度下降,节省电能,提高能量转换效率。

在电磁力特性曲线已知的情况下,通过优化算法,便能得到最佳的 P_i 和 P_p 点^[12]。

2 电磁铁轴向位置优化

2.1 优化模型

1) 目标函数的确立

在衔铁行程 S_i-S_p 内,将柱塞的运动行程微分化,即将 S_i-S_p 平均分成 $1/d_{\text{eltx}}$ 份, d_{eltx} 为步长,当步长 d_{eltx} 趋向非常小的情况下,可以假设在每一个步长内将柱塞的运动简化为所受合力不变,也就是运动加速度不变,柱塞做匀加速运动,则在第 k 个步长内:

$$d_{\text{eltx}_k} = \frac{-v_{k-1} + \sqrt{v_{k-1}^2 + 2a_{k-1} \times d_{\text{eltx}}}}{a_{k-1}} \quad (1)$$

$$F_{\text{em}_k} = \text{dis}2F(S - \text{dis}_k) \quad (2)$$

$$F_{t_k} = \frac{F_{\text{em}_k} - F_{t_1} + F_{t_2}}{2} \quad (3)$$

$$F_{\mu_k} = F_{t_k} \times \tan \frac{\pi \times \mu}{9} \quad (4)$$

$$a_k = \frac{F_{\text{em}_k} - F_{t_k} - F_{\mu_k} - F_{t_1}}{m} \quad (5)$$

式中: d_{eltx_k} 为时间步长,表示第 k 个步长内柱塞的运动时间; v_k 为第 k 个步长内柱塞速度的大小; F_{em_k} 为第 k 个步长内电磁力大小; $\text{dis}2F(\cdot)$ 为电磁力曲线的拟合函数; S 为柱塞的行程,为 35 mm; F_{t_k} 为第 k 个步长内互动齿轮对切向力大小; F_{t_1} 、 F_{t_2} 为左右泵腔内流质对柱塞的作用力; F_{μ_k} 为第 k 个步长内右柱塞所受摩擦阻力的大小; μ 为柱塞与泵体之间摩擦系数,取 0.06; a_k 为第 k 个步长内柱塞加速度的大小; m 为单个柱塞的质量。

将式(2)~式(4)代入式(5)可求得在第 k 个步长内加速度 a_k ,则目标函数 v_k 为

$$v_k = v_{k-1} + d_{\text{eltx}_k} \times a_{k-1} \quad (6)$$

为了方便表达,把目标函数记为 $\min \text{imize } |v_k|$ 。

2) 约束条件

$$g1: \sum d_{\text{eltx}} = 35$$

柱塞运动到行程终点约束。

$$g2: v_k = 0$$

行程终点速度为 0。

3) 建立优化模型

根据对电磁力互动柱塞泵期望的运动状态,即要求柱塞在运动到上止点时速度为 0 为优化目标,以消除在上止点时的冲击。由上述确定的目标函数以及约束条件,该优化问题可描述为

$$\begin{aligned} \min \text{imize } & |v_k| \\ \text{s.t. } & g1: \sum d_{\text{ext}} = 35 \\ & g2: v_k = 0. \end{aligned}$$

2.2 优化过程与结果分析

整个优化过程以上面的电磁力分析模型为学科分析工具,每一步优化迭代的电磁力都要调用该学科分析工具。

因为优化设计变量只有一个,这里选择序列二次规划法(NLPQL)。NLPQL 算法将目标函数以二阶泰勒级数展开,并把约束条件线性化,通过解二次规划得到下一个设计点,然后根据两个可供选择的优化函数执行一次线性搜索。序列二次规划法(NLPQL)具有在涉及点局部进行快速搜索、对工程设计具有普遍的适用性、计算可以以并行的方式进行等优点^[13-14]。

优化过程如图 4 所示。首先定义好初始值和相关参数输入给数值仿真模型,数值仿真模型根据所给参数确定电磁力特性曲线,通过仿真得到该参数下的电磁铁通电时间;数据记录模块将数值仿真的结果记录下来,然后将数据传递给优化模型,优化模型通过其优化算法规划出自变量下一个设计点并返回给数值仿真模块,如此循环直至找到满足约束条件下的最优解。迭代过程如图 5 所示。

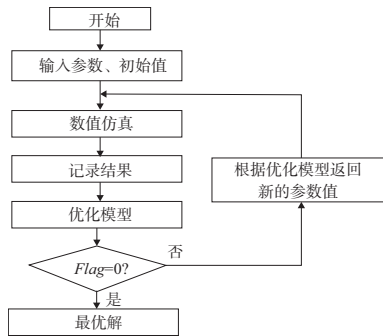


图 4 优化模型示意图

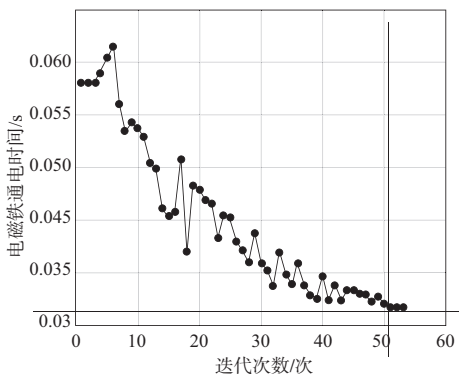
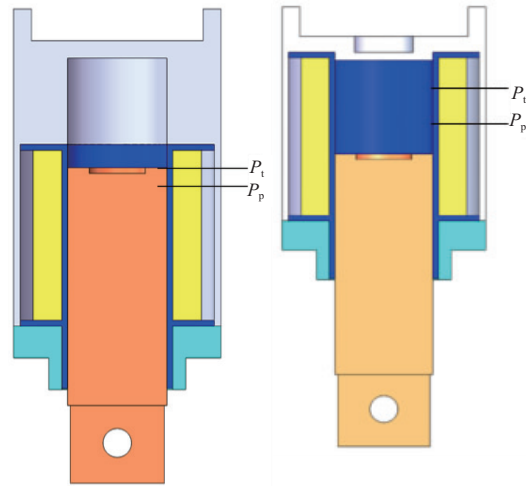


图 5 优化模型迭代过程图

最优迭代自变量 $S_1 = 33 \text{ mm}$, 结合图 3 可知, $S_1 = 38 \text{ mm}$ 时电磁铁电磁力最大,且此时衔铁与电磁线圈端面平齐;则优化后电磁线圈端面距离衔铁下止点的距离为 5 mm,衔铁位于下止点时电磁铁的结构如图 6(a) 所示。图 6 是优化前与优化后衔铁位于下止点时电磁铁电磁线圈与衔铁位置的示意图。



(a) 优化后线圈与衔铁位置 (b) 优化前线圈与衔铁位置

图 6 电磁线圈与衔铁位置示意图

由图 3 可知,优化前 P_1 与 P_p 均位于最大电磁力位置的左侧, P_1 到 P_p 这一段行程为 14 mm, 所对应的电磁力较小。优化后电磁力互动柱塞泵工作过程中的电磁力特性曲线如图 7 所示。优化后 P_1 与 P_p 位于最大电磁力位置的两侧,此时 P_1 到 P_p 这一段行程仅为 4 mm, 所对应的电磁力最大。故电磁铁轴向位置优化后一个周期内的线圈通电时间会缩短,电能消耗会降低,且通电时产生的电磁力会大幅提高。

比较图 3 和图 7 可以看出,优化前电磁泵的启动电磁吸力为 42 N, 优化后电磁泵的启动电磁吸力为 160 N, 增大了近 3 倍。这主要是对电磁铁高输出的电磁特性加以利用的结果。

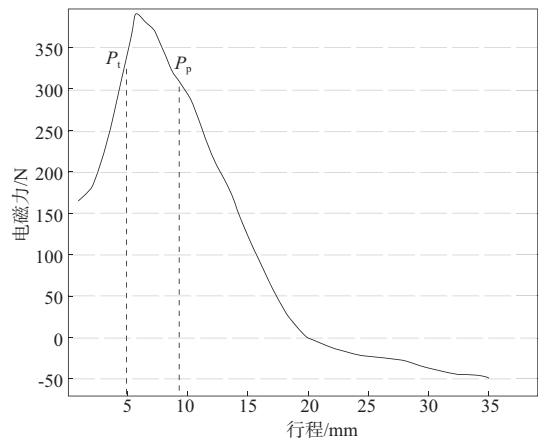


图 7 优化后电磁铁电磁力特性曲线

优化后衔铁运动速度随位移变化曲线如图 8 所示,衔铁运动速度随时间变化曲线如图 9 所示。由图可知:优化

后当衔铁处于下止点时,线圈开始通电,当衔铁行程为 9 mm 时电磁线圈断电。此时线圈通电时间 $t=0.04$ s,此后衔铁做匀减速运动,在行程终点 $S=35$ mm 时正好速度为 0,行程终点时无冲击。对比优化前可知,半个周期内电磁线圈通电时间由优化前的 0.07 s 降低到了 0.04 s,电能消耗降低了 43%。

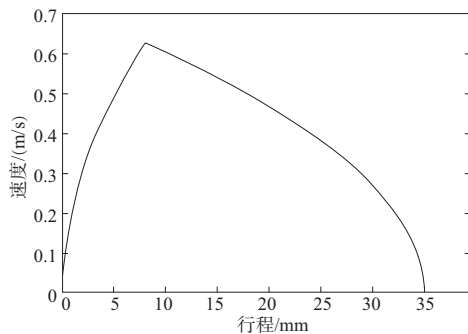


图 8 优化后衔铁运动速度随位移变化曲线

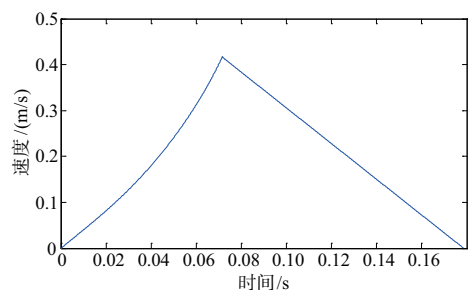


图 9 优化后衔铁运动速度随时间变化曲线

3 结语

为充分利用电磁铁输出特性曲线的高输出段,提高电磁泵的工作效率,基于 COMSOL 低频电磁场平台建立电磁铁的有限元仿真模型,得到衔铁轴向位移的电磁力特性曲线。根据得到的电磁力特性曲线以线圈轴向位置为设

计变量建立优化模型,通过优化,得到最优的线圈轴向位置。优化后,电磁力互动柱塞泵的能量转换效率提高了 43%,启动电磁吸力增大了近 3 倍。

参考文献:

- [1] 王新亮,张洪信,赵清海,等. 长行程直流电磁铁电磁力仿真分析与实验研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版),2018,33(2):75-79.
- [2] 张洪信,王新亮,张延君,等. 一种电磁力互动柱塞泵:中国, CN205370891U[P]. 2016-07-06.
- [3] OHDACHI Y, KAWASE Y, MURAKAMI Y, et al. Optimum design of dynamic response in automotive solenoid valve[C]// IEEE Transactions on Magnetics, IEEE, 1991:5226-5228.
- [4] 吴萌,周友国,陶刚. AT 换挡回路比例阀电磁铁结构设计[J]. 液压与气动,2016(5):78-82.
- [5] 刘艳明,徐宏,毛红奎. 直流电磁泵电磁铁磁场 ANSYS 数值模拟[J]. 铸造技术,2008,29(11):1525-1529.
- [6] 张齐. 基于 Ansoft 的比例电磁铁电磁力的有限元分析[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版),2009,27(3):306-309.
- [7] 孙虎胆,刘鸿凌. 基于 Ansoft 的电磁铁建模仿真及结构优化设计[J]. 液压气动与密封,2018,38(8):32-34.
- [8] 袁洋,武建文,蒋原,等. 双行程螺管式电磁铁动态仿真分析及实验[J]. 电工技术学报,2018,33(增刊):453-460.
- [9] 左才工,左全璋. 对一种电磁泵计算的探讨[J]. 电气开关,2001,39(3):5-7.
- [10] 左才工,左全璋. 对一种电磁泵计算的探讨(续第3期)[J]. 电气开关,2001,39(3):8-10.
- [11] 徐威,张洪信,舒培,等. 缸间齿轮联动液压发动机柱塞泵运动学研究[J]. 机械传动,2016(5):5-8,29.
- [12] 王东,张洪信,赵清海,等. 基于灵敏度分析的缸间齿轮联动液压发动机曲轴结构优化设计[J]. 机械制造,2017,55(2):16-18,23.
- [13] 党惊知,杨晶,程军. 铝合金电磁泵低压铸造技术[J]. 兵工学报,2003,24(2):286-288.
- [14] 王勇,王杰. 电磁泵定量压铸系统定量控制及电磁泵的结构设计[J]. 机电信息,2011(6):25-26.

收稿日期:2020-05-29

(上接第 12 页)

参考文献:

- [1] BROWN E N, DATTELBAUM D M. The role of crystalline phase on fracture and microstructure evolution of polytetrafluoroethylene (PTFE)[J]. Polymer,2005,46(9):3056-3068.
- [2] WANG K P, HOU D Y, WANG J, et al. Hydrophilic surface coating on hydrophobic PTFE membrane for robust anti-oil-fouling membrane distillation[J]. Applied Surface Science,2018,450:57-65.
- [3] PENG S G, ZHANG L, XIE G X, et al. Friction and wear behavior of PTFE coatings modified with poly(methyl methacrylate)[J]. Composites Part B:Engineering,2019,172:316-322.
- [4] SON S J, HONG S K, LIM G. Emulsion electrospinning of hydrophobic PTFE-PEO composite nanofibrous membranes for simple oil/water separation[J]. Journal of Sensor Science and Technology,2020,29(2):89-92.
- [5] MAZHAR S I, SHAFI H Z, SHAH A, et al. Synthesis of surface

modified hydrophobic PTFE-ZnO electrospun nanofibrous mats for removal of volatile organic compounds (VOCs) from air[J]. Journal of Polymer Research,2020,27(8):1-13.

- [6] ZHU X, FENG S S, ZHAO S F, et al. Perfluorinated superhydrophobic and oleophobic SiO₂@PTFE nanofiber membrane with hierarchical nanostructures for oily fume purification[J]. Journal of Membrane Science,2020,594:117473.
- [7] GAO M L, WU X B, GAO P P, et al. Properties of hydrophobic carbon-PTFE composite coating with high corrosion resistance by facile preparation on pure Ti[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2019,29(11):2321-2330.
- [8] YE X, ZHOU M, JIANG D L, et al. Transition of super-hydrophobic states of droplet on rough surface[J]. Journal of Central South University of Technology,2010,17(3):554-559.
- [9] 赵亚涛. 表面与界面物理力学[M]. 北京: 科学出版社,2012.

收稿日期:2020-12-18