

船用低速柴油机燃油喷射控制阀的性能仿真与结构优化

贺玉海, 郑 力

(武汉理工大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 以自主研发的电控液力增压式喷油器中的燃油喷射控制电磁阀为研究对象, 在 LMS-AMESim 中搭建了电磁阀液力仿真模型, 在 ANSYS-Maxwell 中搭建了电磁铁仿真模型, 并通过 AMESim 中的电磁铁查询模型对 Maxwell 中的电磁铁数据进行耦合。经电磁阀综合性能试验平台测试, 验证了所建模型的精度满足要求。利用该模型仿真分析了电磁阀动态响应特性、流通能力及泄漏量影响因素, 在此基础上完成了电磁阀结构优化。结果表明: 虽然优化后电磁阀泄漏量增加了 3.57%, 但开启响应速度提升了 10.8%, 关闭响应速度提升了 25.8%。

关键词: 船用低速柴油机; 电磁阀; 动态响应特性; 结构优化

中图分类号: TK423.8⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)02-0007-07

Simulation and Structure Optimization of Marine Low-Speed Diesel Fuel Injection Control Valve

He Yuhai, Zheng Li

(School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430063)

Abstract: To study the electromagnetic valve for fuel injection control in a self-developed electronically controlled hydraulic booster injector, the hydraulic simulation model of the solenoid valve was built in LMS-AMESim, and the electromagnet simulation model was built in ANSYS-Maxwell. The electromagnet data in Maxwell was coupled by the electromagnet query model in AMESim. The test on the comprehensive performance test platform for the solenoid valve verified the accuracy of this model. The model was used to simulate and analyze the dynamic response characteristics, flow capacity and leakage volume factors of the solenoid valve. On this basis, the structure optimization design of the solenoid valve was completed. The results show that although the solenoid valve leakage increases by 3.57% after optimization, the turn-on response speed increases by 10.8%, and the turn-off response speed increases by 25.8%.

Key words: marine low-speed diesel engine; solenoid valve; dynamic response speed; structure optimization

0 引言

柴油机共轨式电控燃油喷射系统可以实现燃油喷射量、压力、定时和速率的灵活控制, 被认为是最佳的电控喷油系统方案。系统中的关键执行部件高速响应电磁阀 (HSV) 可根据发动机电控单元

(ECU) 发出的喷油控制信号, 实现控制信号的电-磁-机-液转换, 从而控制喷油器的针阀动作, 实现喷油的柔性控制。因此, 电磁阀响应特性是精确控制喷油正时、喷油量以及实现多次喷射的关键^[1-4]。对于大功率船用低速柴油机而言, 其循环喷油量较大, 因而要求电磁阀有足够的流通能力; 但

收稿日期: 2019-07-09; 修回日期: 2019-10-23

基金项目: 船用低速机工程 (一期) (工信部联装函 [2017] 21 号)

作者简介: 贺玉海 (1976—), 教授, 主要研究方向为内燃机电子控制技术, hyh@whut.edu.cn。

同时提高电磁阀流通能力和响应速度非常困难。大流量要求增大阀口流通面积, 这会造成运动质量或阀芯行程的增大, 从而限制了电磁阀的快速响应能力。因此, 设计大流量、快速响应的电磁阀, 满足电控喷油器燃油喷射控制要求, 对船用低速柴油机共轨式电控燃油系统的开发具有重要意义。

近年来, 很多学者对 HSV 的电-磁转换能力做了大量研究。刘钱峰等人通过试验和数值方法分析了直动电磁阀的电磁力, 并分析了电流、气隙和平坦接触面对电磁力的影响^[5-7]。胡军等人指出较小的气隙有利于改善阀的动态响应特性^[8]。王齐磊等人采用新开发的铝铁软磁材料重新设计磁路结构, 实现了电磁阀的快速响应和强磁力^[9]。程强等人分析了螺线管喷油器的功率损耗和动态响应之间的关系, 并分析了四种不同驱动策略对功率损耗和动态响应的的影响^[10]。孟非等人研究了重型传动系统的电液阀, 改善了阀的动态特性^[11]。根据上述研究成果可以看出: 电磁铁的静态和动态响应特性决定了电磁阀的响应速度, 其影响因素包括电磁铁的驱动参数(如驱动电流或电压)和结构参数(如电磁铁气隙、安匝数和磁极的横截面积)。以上这些研究虽然为 HSV 优化提供了一定的理论指导, 但 HSV 是一个多物理场耦合的非线性系统, 以上研究大多只针对单物理场或局部耦合场进行优化; 而低速柴油机喷油器控制阀除了要求高速响应, 还要求满足大流量需求。本文拟通过仿真计算和试验研究相结合, 对自主研制的高速大流量电磁阀进行结构参数优化设计。

1 原电磁阀结构和工作原理

1.1 原电磁阀结构

原电磁阀适用于船用低速二冲程柴油机的电控燃油喷射系统, 通过控制电控液力增压式喷油器的喷油动作, 实现燃油喷射量、定时、压力和喷油速率的灵活控制。其结构如图 1 所示。

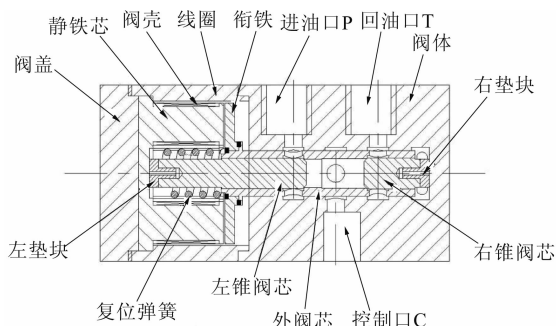


图 1 双内锥阀芯高速电磁阀结构

1.2 工作原理

该电磁阀属于常开式高速大流量开关阀。其进油口与进油管路连接, 回油口与回油管路连接, 控制口和阀腔连接。初始状态时电磁阀未通电, 衔铁在弹簧力作用下紧压在衔铁阀座上, 外阀芯的右端密封锥面与右锥阀芯的密封锥面紧贴, 进油口和控制口连通, 阀腔内压力和进油压力一致。线圈通电后, 衔铁在电磁阀磁力的作用下克服弹簧弹力, 带动外阀芯向左运动, 外阀芯左端的密封锥面与左锥阀芯的密封锥面紧贴; 同时, 右端密封锥面与右锥阀芯的密封锥面分开。此时, 外阀芯将进油口与控制口之间的油路切断, 回油口和控制口连通, 完成开阀动作。

2 电磁阀模型的建立与试验验证

2.1 静态电磁铁模型

ANSYS Maxwell 是一种常用的电磁场分析软件, 其特点是能够有效地考虑铁芯和衔铁的涡流效应, 因而计算比较精确。在 ANSYS Maxwell 中建模须综合考虑计算量和计算效率。如果模型复杂, 网格划分太细会导致计算量巨大, 计算周期长^[12-13]。虽然电磁阀模型的局部结构复杂, 但考虑到其电磁铁为环形六极柱对称结构, 本文在进行电磁铁三维建模时, 在保证计算精度的前提下, 将其简化为 1/6 电磁铁模型。实际仿真计算表明: 简化后模型的计算结果与完整模型计算结果基本相同, 而计算量和仿真时间下降 80%。采用有限元分析方法在 Maxwell 中建立的电磁铁 3D 仿真模型如图 2 所示。

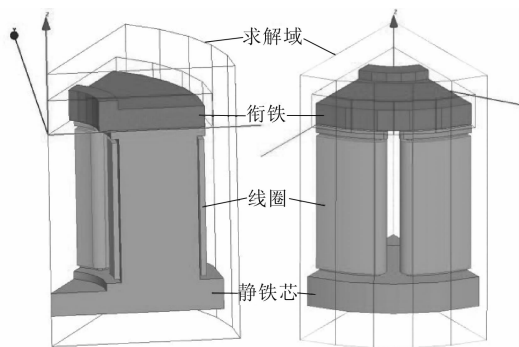


图 2 电磁铁静态磁场仿真模型

图 2 中, 从下至上依次是静铁芯、线圈、衔铁以及求解域。6 个简化模型可以组成一个完整的电磁铁三维模型。作为高压共轨喷射系统的电-磁-机-液转换部件, 电磁铁直接产生电磁力。一些部件(弹簧座和密封环)未被考虑进模型, 因为它们的材料为非磁性材料, 其磁导率与空气的磁导率接近。电磁铁各部件的材料属性如表 1 所示。电磁铁主要结构参数如表 2 所示。

表 1 电磁铁各部件的材料及其属性

部件模型	材料/介质	属性
线圈	铜	相对磁导率 1、电导率 $5.7 \times 10^7 \text{ S/m}$
静铁芯、衔铁	DT4C	电导率 $1 \times 10^7 \text{ S/m}$
求解域	空气	相对磁导率 1

表 2 电磁铁主要结构参数

绕组匝数 n	20
极柱外径 d_w/mm	35
极柱内径 d_n/mm	16
衔铁厚度 h_{xt}/mm	2.8
工作气隙 μmm	0.42

2.2 电磁铁瞬态仿真模型

铁磁材料在磁场中运动存在磁滞损耗和涡流效应，所以须通过电磁铁瞬态磁场仿真分析涡流效应对电磁铁响应性能的影响。在瞬态仿真模型中衔铁会运动，所以须设置运动区域将其包围起来。模型和静态仿真模型一样为 1/6 电磁铁简化模型。根据电磁阀工作时受到的液压力和弹簧力的情况，设置电磁铁的负载力。电磁铁瞬态仿真模型如图 3 所示。

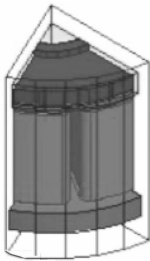


图 3 电磁铁瞬态磁场仿真模型

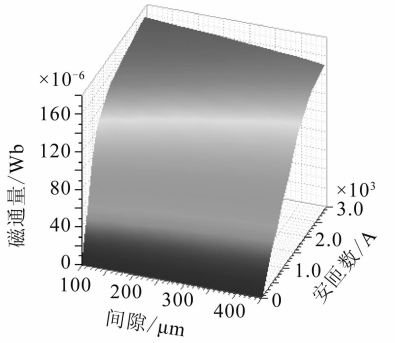
2.3 电磁阀动态仿真模型

LMS-AMESim 软件中提供了两种电磁力仿真计算模型。（1）第一种方案，选用 EMLtrans 模块。该模块可选择其它仿真软件计算或者试验得到的电磁力数据进行查询获取，如可在 ANSYS-Maxwell 软件中仿真得到电磁力、磁通与电流和气隙的对应关系数据，再导入 AMESim 的 EMLtrans 模块中，同时在该模块中完成对气隙、磁阻、线圈匝数等参数的设置。（2）第二种方案，从 LMS-AMESim 软件的机电模块库中挑选磁阻、线圈、气隙等模块构建电磁回路，并分别设置参数。

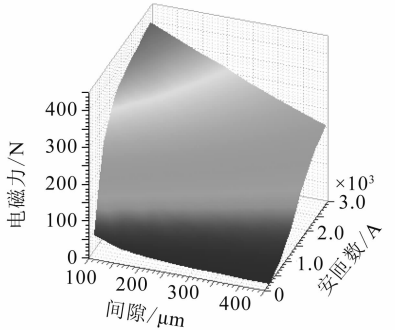
两种模型的仿真结果对比分析显示：第一种方案计算更为精确。因为数据查询模型采用了 ANSYS-Maxwell 计算结果，而 Maxwell 中考虑了铁芯和衔铁内的涡流效应，比较符合电磁铁的实际工作情况。第二种方案操作简单，可以节约大量时间，但计算准确性比第一种方案低很多。因此本文

采用数据查询模块进行建模。

首先在 ANSYS 中建立电磁铁三维有限元模型，并对模型进行足够精度的网格划分；然后加载边界条件，定义单元类型和材料特性，并通过设置电磁阀、线圈和衔铁尺寸参数，计算出电磁力特性 Map 图；最后将该 Map 图数据转化为 AMESim 可识别的查询数据。电磁铁静态参数化计算得到的工作气隙和安匝数对应的电磁力和磁通如图 4 所示。



a) 磁通随工作气隙和安匝数的变化



b) 电磁力随工作气隙和安匝数的变化

图 4 磁通和电磁力随工作气隙和安匝数的变化

根据 ANSYS-Maxwell 瞬态磁场有限元分析结果，在 EMLtrans 部件中将涡流电阻设置为 4.5Ω ，涡流电感设置为 1.2 mH 。

图 5 所示为基于 H 桥驱动电路的电流控制电路与整个电磁阀的耦合仿真模型（AMESim 模型）。考虑到电磁阀阀芯位移（本文研究的电磁阀阀芯行程为 0.28 mm ）变化对弹簧弹力影响极小，在阀芯运动时可将弹簧的弹力视为近似不变，故模型中采用固定输出力元件模拟弹簧预紧力。

2.4 模型的试验验证

试验条件：极柱外径 35 mm ，极柱内径 16 mm ，线径 0.67 mm ，线圈匝数 18，线圈电阻 0.5Ω ，工作频率 5 Hz ，通电时间 30 ms ，驱动时间 3 ms ；改变不同工作间隙和电流。试验测得的电磁力随驱动电流和工作间隙变化的曲线如图 6 所示。可见试验所得电磁力总体符合：电流一定，工作间隙越小电磁

力越大的趋势；但中间略有波动，曲线不够平滑。这可能是因为在电磁铁实际运动过程中，衔铁在磁场中运动受到涡流、漏磁、温度等因素的影响，导致电磁力不是严格按照二次曲线变化；再则试验测试装置客观上会存在灵敏度误差和测量误差。

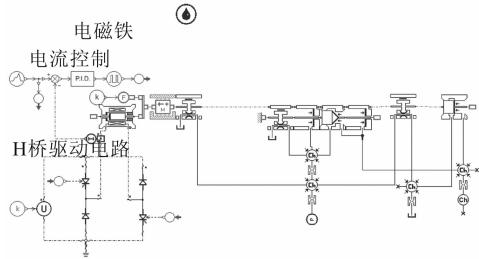


图5 AMESim 模型

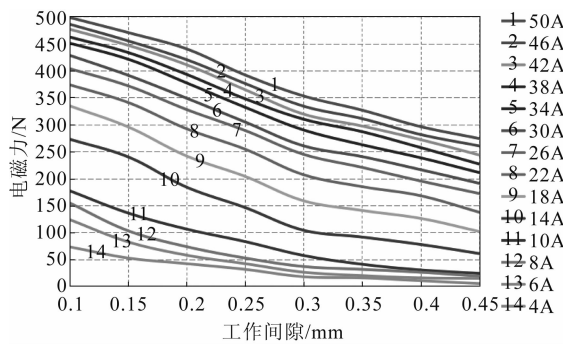


图6 不同电流下电磁力随工作间隙的变化（试验）

对 Maxwell 仿真模型设置和试验相同的条件，仿真分析不同电流下电磁力随工作间隙的变化情况。结果如图7所示，仿真值与试验值的变化趋势基本一致。随机抽取10个点计算其差值，如表3所示。可见：仿真结果与试验结果的误差率在5%左右；仿真结果在某些情况下误差较大，并且通常大于试验值。这是由于有限元分析软件没有考虑温度等因素对电磁力的影响。但关键工况的仿真值与试验值误差都比较小，因此，所建模型可以用来分析和优化电磁阀的设计。

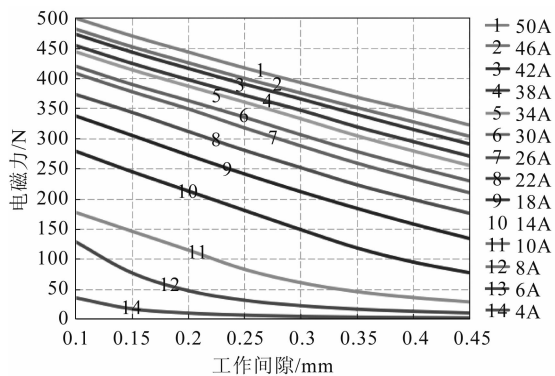


图7 不同电流下电磁力随工作间隙变化（仿真）

表3 随机10点试验与仿真误差分析

编号	工作电流 I/A	工作间隙 δ/mm	电磁力仿 真值 F/N	电磁力试 验值 F/N	差值 E/N	误差 $e/\%$
1	6	0.10	128.6	122.0	6.6	5.4
2	10	0.10	177.3	172.0	5.3	3.0
3	22	0.25	278.3	254.1	24.2	9.5
4	38	0.40	284.6	267.3	17.3	6.4
5	6	0.40	14.3	13.7	0.6	4.3
6	46	0.20	425.4	420.0	5.4	1.3
7	30	0.35	268.2	255.0	13.2	5.1
8	50	0.10	499.2	496.0	3.2	0.6
9	34	0.15	413.8	420.9	7.1	1.6
10	42	0.20	416.1	410.5	5.6	1.3

3 电磁铁结构优化

3.1 静态电磁力仿真

电磁铁最重要的性能指标是电磁力。基于在 ANSYS-Maxwell 软件中建立的电磁铁静态模型对静态电磁力进行仿真，结果如图8、图9和图10所示。由图可知：电磁力随线圈匝数、极柱外径和衔铁厚度增加而增大，但当线圈匝数增加到24匝后电磁力提升不明显。这是因为过大的安培匝数会导致磁饱和现象，且激励线圈的欧姆损耗增加。衔铁外径增加对电磁力的提升十分有利，但是过大的外径会导致磁路磁阻及漏磁增加，且会增加衔铁的质量，从而降低阀芯响应速度，因此须综合考虑和电磁阀阀体的尺寸配合。增加衔铁厚度也可以提高电磁力，但与增加衔铁外径类似，衔铁厚度增加也会使衔铁体积变大，导致运动惯性质量增加，影响到电磁阀的开启响应速度。因此选择合适的线圈匝数、极柱外径和衔铁厚度对提高电磁阀的整体性能至关重要。

由上面的分析可以看出：线圈匝数、极柱外径和衔铁厚度是影响驱动电流-电磁力特性的三个主要因素。

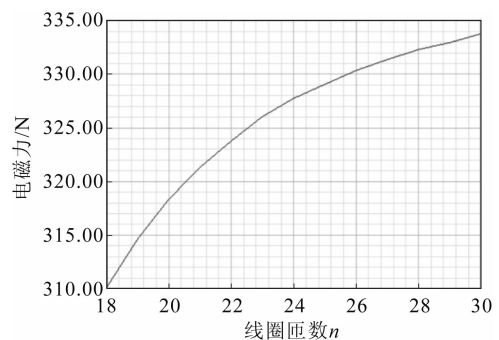


图8 线圈匝数对电磁力的影响

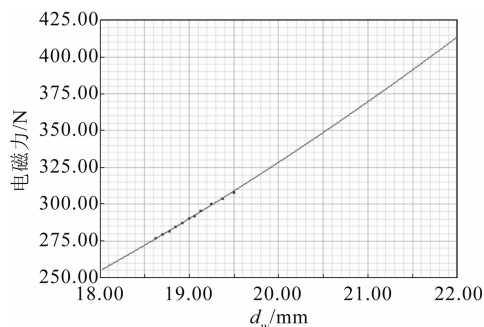


图9 极柱外径对电磁力的影响

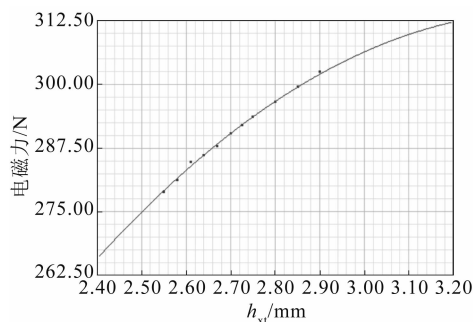


图10 衔铁厚度对电磁力的影响

3.2 优化方法

最速下降法和拟牛顿法是比较常见的两种解决无约束问题的方法,很多有约束的优化问题也经常转化为无约束问题,从而能采用这两种方法求解。最速下降法的优点是算法简单,对初始点的要求不高,即使从一个不好的初始点开始,最终也能收敛到局部最小点;缺点是收敛速度慢。拟牛顿法的优点是收敛速度快,但对初始点的要求非常严格,一般要求比较接近极小点。因本文的电磁铁之前已经优化过几次,初始点已比较接近极小点,所以本文采用拟牛顿法对电磁铁结构进行优化设计。

3.3 优化目标和优化参数

电磁力对阀的响应的影响并不是单调的,如衔铁厚度增大电磁力增大,但从阀的角度,运动质量变大,响应速度不一定提高。所以优化目标考虑电磁力、电磁力密度以及磁通效率。

本文采用多目标优化。多目标优化问题的常用求解方法是使用权重系数,从而把多目标问题转变成单目标优化问题进行求解。此次优化目标是电磁力 $F(x)$ 、电磁力密度 $f_{md}(x)$ 以及磁通效率 $f_{xl}(x)$ 最大。电磁力密度以及磁通效率的定义如下:电磁吸力与衔铁体积 (mm^3) 的比值记为电磁力密度;有限元计算得到的电磁力与仅考虑工作气隙磁阻情况下计算得到的电磁力(理想最大)之间的比值记为磁通效率。

优化参数包括:线圈匝数 n 、极柱外径 d_w 、极柱内径 d_n 和衔铁厚度 h_{xl} 等。数学描述为:

$$\max F(x),$$

$$\max f_{md}(x),$$

$$\max f_{xl}(x)。$$

$$x = (n, h_{xl}, d_w, d_n)^T, F(x)、f_{md}(x)、f_{xl}(x)$$

为目标函数, x 为设计变量。

ANSYS-Maxwell 软件与多目标优化平台 Isight 间可以传递数据,因此可以实现在 Isight 软件中使用拟牛顿法对电磁铁进行优化。首先在 ANSYS-Maxwell 软件中录制脚本文件,将相关的参数记录到脚本文件中,实现 Isight 软件将参数写入到 ANSYS-Maxwell 软件中;然后将 ANSYS-Maxwell 软件集成到 Isight 软件中;最后优化初始点,采用现有的电磁铁数据,在 Isight 软件中设定电磁力、电磁力密度以及磁通效率的权重和合适的约束条件,即在工作间隙 0.4 mm,驱动电流 24 A 的状况下进行优化。

3.4 多目标优化结果分析

从优化结果中选取罚函数比较小的值,得到一组优化数据。优化前和优化后的参数对比如表 4 所示。

表4 优化前后的参数对比

参数	优化前	优化后
匝数	20	21
极柱外径/mm	35.00	40.32
衔铁厚度/mm	2.8	2.8
极柱内径/mm	16	18

电磁铁工作间隙为 0.4 mm 时,优化前后电磁力的对比如图 11 所示。由图可知,驱动电流在 10 A 以下时电磁力提升不明显;在 20 A 以上时电磁力得到大幅提升。

在 ANSYS-Maxwell 中进行参数化计算,得到磁通和电磁力随工作气隙和安匝数变化的对应关系,将上述计算得到的数据导入 AMESim 中的电磁阀模型,得到优化后磁通和电磁力随工作气隙和安匝数变化的关系,如图 12 所示。

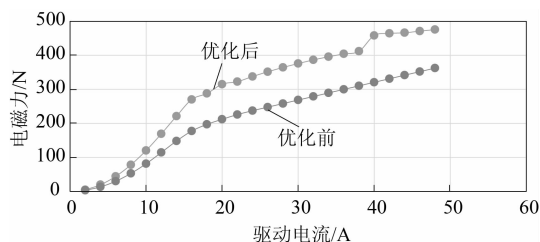
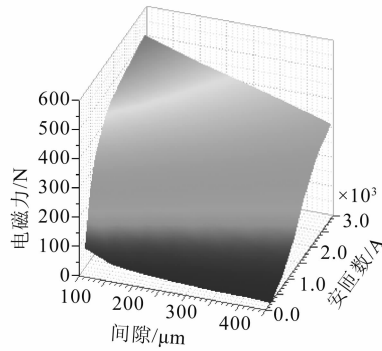
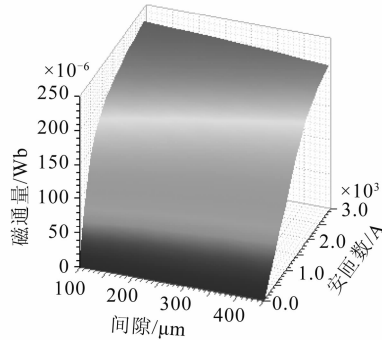


图11 电磁铁工作间隙为 0.4 mm, 优化前后电磁力对比



a) 优化后的电磁力随工作气隙和安匝数的变化



b) 优化后的磁通随工作气隙和安匝数的变化

图12 优化后磁通和电磁力随工作气隙和安匝数的变化

电磁铁结构尺寸优化前后,电磁阀开启、关闭和泄漏性能对比如表5所示。

表5 电磁铁结构尺寸优化前后,电磁阀性能对比

参数	优化前	优化后
开启响应/ms	1.95	1.74
关闭响应/ms	0.85	0.63
泄漏/(mL·ms ⁻¹)	0.001 2	0.001 2

对优化前的电磁阀进行仿真,电磁阀开启响应速度提升了10.8%,关闭响应速度也提升了25.8%,泄漏量没有明显变化。在软件中对泄漏量进行时间积分,对比优化前后,泄漏量增加了3.57%。优化后的泄漏量仍在电磁阀的工作允许范围。电磁阀各阀口液压油瞬时流量如图13和图14所示。可知:电磁阀开启时伴随着控制口回油,少量的液压油由进油口P流向控制口C;电磁阀关闭时伴随着控制口充油,少量液压油经回油口T流入油箱。这是由于电磁阀阀芯在移动过程中,进、回油口和控制油口同时相通。通过对阀口液压油流量积分可得:每次喷油须消耗0.018 2 L液压油,其中,进、回油口叠开瞬间损失液压油0.002 8 L。

优化后的电磁阀在关闭过程中,阀口液体流动分别如图15和图16所示。对阀口液压油流量积分可得:每次喷油须消耗0.016 2 L液压油,其中,进、回油口叠开瞬间损失液压油0.002 9 L。

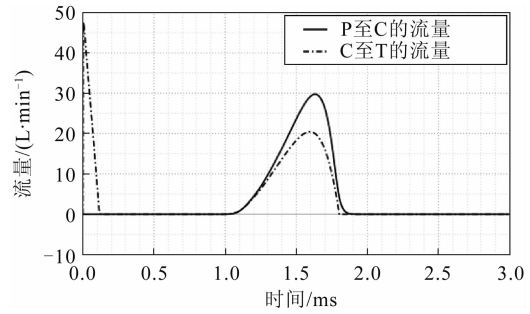


图13 电磁阀开启过程中各阀口间流量

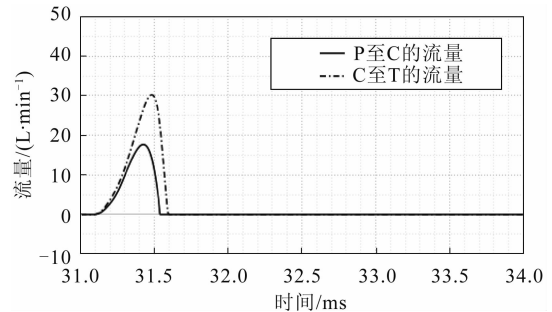


图14 电磁阀关闭过程中各阀口间流量

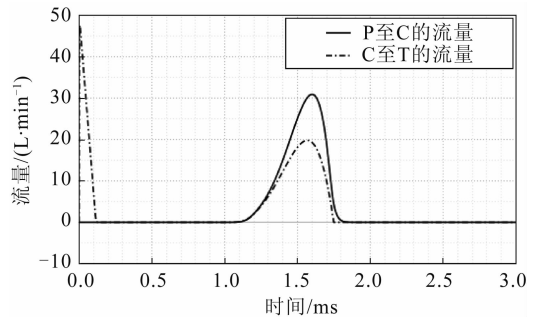


图15 优化后电磁阀开启过程中各阀口间流量

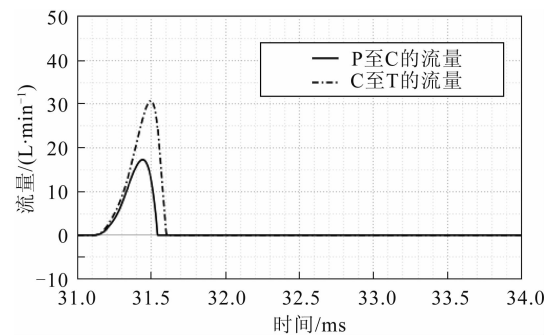


图16 优化后电磁阀关闭过程中各阀口间流量

4 结论

(1) 在Maxwell软件中建立了喷油器控制电磁铁的三维仿真模型,通过有限元计算,分析了三个主要参数:线圈匝数、极柱外径和衔铁厚度对电磁力的影响规律;并通过电磁铁性能试验装置验证了模型的计算精度。

(2) 在 I sight 软件中集成 ANSYS-Maxwell 软件, 以电磁力、电磁力密度以及磁通效率最大为目标优化了电磁铁的主要结构尺寸。基于 AMESim 软件, 优化前后电磁阀的泄漏和流量情况比较显示: 泄漏量仅增加 3.57%, 仍在电磁阀的工作允许范围内; 开启响应速度提升 10.8%; 关闭响应速度也提升 25.8%。电磁阀动态响应特性得到了提高, 为其设计优化提供了理论指导。

参考文献

- [1] WANG X R, ZHU M M, LIU C P, et al. Effect of the fuel injector parameters on combustion performance and emissions in a marine diesel [J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2015, 12: 2897-2902.
- [2] SUN Z Y, LI G X, CHEN C, et al. Numerical investigation on effects of nozzle's geometric parameters on the flow and cavitation characteristics within injector's nozzle for a high pressure common rail diesel engine [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 843-861.
- [3] QIU T, SONG X, LEI Y, et al. Influence of inlet pressure on cavitation flow in diesel nozzle [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109: 364-372.
- [4] CHENG Q, XU M, ZHANG Z, et al. Investigation on the spray characteristics of standard gasoline, N-pentane, Iso-octane and ethanol with a novel heated tip SIDI injector [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 539-552.
- [5] LIU Q F, BO H L, QIN B K. Experimental study and numerical analysis on electromagnetic force of direct action solenoid valve [J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240 (12): 4031-4036.
- [6] LIU Q F, BO H L, QIN B K. Design and analysis of direct action solenoid valve based on computational intelligence [J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240 (10): 2890-2896.
- [7] LIU Q F, BO H L, QIN B K. Optimization of direct action solenoid valve based on CloudPSO [J]. Annals of Nuclear Energy, 2013, 53: 299-308.
- [8] HU J, WU W, YUAN S, et al. Opening and closing of a novel high-speed switching valve [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical, 2012: 226-466.
- [9] WANG Q L, YANG F Y, YANG Q. Experimental analysis of new high-speed powerful digital solenoid valves [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52 (5): 2309-2313.
- [10] CHENG Q, ZHANG Z D, XIE N. Power losses and dynamic response analysis of ultra-high speed solenoid injector within different driven strategies [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 91: 611-621.
- [11] MENG F, SHI P, HAMID R H, et al. Optimal design of an electro-hydraulic valve for heavy-duty vehicle clutch actuator with certain constraints [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 68: 491-503.
- [12] SUN Z Y, LI G X, WANG L, et al. Effects of structure parameters on the static electromagnetic characteristics of solenoid valve for an electronic unit pump [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 113: 119-130.
- [13] CHENG Q, ZHANG Z D, GUO H, et al. Simulation and analysis on electro-magnetic thermal coupling of solenoid GDI injector [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2014, 46 (4): 775-792.