

磁芯材料对电磁阀静态电磁力的影响研究

刘 晨¹, 欧阳璐菲², 刘振明¹

(1. 海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033;

2. 上海船用柴油机研究所, 上海 201108)

摘 要: 利用电磁场有限元分析软件 JMAG Designer 建立了电磁阀有限元仿真模型。经与试验数据对比, 该模型的静态电磁力的平均误差为 4.8%, 仿真模型的正确性得到验证。基于该仿真模型对比分析了在不同工作气隙和电流条件下, 16MnCr5 和 20CrMn 两种磁芯材料对电磁阀磁感应强度的分布以及静态电磁力大小的影响规律。研究表明: 磁芯材料对电磁阀的性能有较大的影响, 不同磁芯材料的电磁阀在相同工况下衔铁表面产生的磁感应强度不同, 进而导致电磁阀产生的静态电磁力不同。相比之下, 以 16MnCr5 作为磁芯材料的电磁阀, 其衔铁表面产生的磁感应强度更大, 从而使得电磁阀产生静态电磁力更大。

关键词: 电磁阀; 静态电磁力; 磁芯; 材料

中图分类号: TK423.8⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)04-0023-06

Research on the Influence of Magnetic Core Material on Static Electromagnetic Force of Solenoid Valve

Liu Chen¹, Ouyang Lufei², Liu Zhenming¹

(1. College of Power Engineering, Navy University of Engineering, Hubei Wuhan 430033;

2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: The finite element simulation model of solenoid valve was established by using the electromagnetic field finite element analysis software JMAG Designer. By comparing with the experimental data, the average error of static electromagnetic force was 4.8%, which verified the correctness of the simulation model. The influence of 16MnCr5 and 20CrMn core materials on the distribution of magnetic induction intensity and static electromagnetic force of solenoid valve under different working air gap and current conditions was compared and analyzed. The results show that the magnetic core material has a great influence on the performance of the solenoid valve. Under the same working condition, the magnetic induction intensity generated by the armature surface of the solenoid valve with different core materials is different, which leads to the different static electromagnetic force produced by the solenoid valve. By comparison, the armature surface of the solenoid valve with 16MnCr5 as the core material can produce greater magnetic induction strength, which makes the solenoid valve produce more static electromagnetic force.

Key words: solenoid valve; static electromagnetic force; magnetic core; material

0 引言

随着能源和环境问题日趋严重, 柴油机的效率、

经济性和废气污染问题得到越来越多的关注。在柴油机的电控燃油喷射系统中, 高速电磁阀对燃油喷射的控制起着关键作用, 其电磁力决定了燃油喷射

量和喷油定时的精确程度,对柴油机的燃油喷射具有重要的意义^[1],而磁芯是其重要的组成部分。

近年来,柴油机喷油器电磁阀的设计以及对其工作特性的研究已经成为热点。刘鹏等^[2]提出了一种永磁并联磁路高速电磁铁,并揭示了不同永磁体高度对电磁力的作用规律和磁场特性的影响;姜盼龙等^[3]采用 MATLAB/Simulink 软件仿真分析和研究了影响电控喷油器电磁阀的工作压力和控制伺服电压的因素;范立云等^[4]采用数值模拟与试验相结合的方法,建立了电磁阀的数值仿真模型并选取影响电磁阀动态响应特性的 5 个关键因素,对电磁阀进行优化;Jianyu Zhang 等^[5]建立了 ECFIS 高速电磁阀三维数值模拟模型,分析了影响电磁阀动态响应特性的主要因素;Shin 等^[6]基于 ANSYS 三维软件建模,采用平方响应面设计方法对电磁阀的动态响应特性进行了优化。

当前对电磁阀的研究主要集中在对其动态性能的分析 and 优化;文献 [7-8] 虽涉及磁性材料,但并未深入研究磁性材料的特性所带来的影响。本文基于 JMAG Designer 软件建立电磁阀三维有限元仿真模型,选取 16MnCr5 和 20CrMn 为电磁阀的磁芯材料,分析磁芯材料对电磁阀静态电磁力的影响,为电磁阀的选取提供参考和依据。

1 电磁阀的结构、材料及工作过程

电磁阀主要是由磁芯、衔铁、励磁线圈、阀杆、弹簧、阀座、导向座及垫片等组成。图 1 为电磁阀三维仿真结构剖面图。

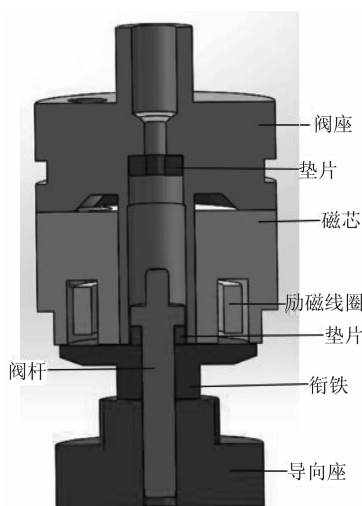


图 1 电磁阀三维仿真结构剖面图

电磁阀的基本尺寸包括:磁芯的大小、衔铁厚度、阀杆长度、衔铁与磁芯的初始距离以及剩余工作气隙的大小。磁芯的大小影响电磁阀的电磁力,

而衔铁以及阀杆的基本尺寸决定了其质量的大小,从而影响电磁阀的动态性能。电磁阀的基本尺寸参数见表 1。

表 1 电磁阀基本尺寸

单位: mm

部位	尺寸
磁芯外径	22.00
磁芯内径	16.60
磁芯厚度	12.00
阀杆长度	20.60
衔铁厚度	4.90
衔铁与磁芯的初始距离	0.12
剩余工作气隙	0.04

电磁阀未通电时,衔铁在阀杆、弹簧、垫片以及自身重力的作用下保持不动,此时燃油喷射过程未开始。电磁阀通电后,磁芯还未吸合衔铁,电磁阀中的电流不断增大,此时产生的电磁力也不断增大。当电磁力大于衔铁、阀杆的重力,运动摩擦力以及弹簧阻力的和时,磁芯开始吸合衔铁,衔铁和阀杆一起向上运动,燃油喷射过程开始。一段时间后,电磁阀完全开启,此时燃油喷射所需的高压已建立。电磁阀断电后,电磁阀中的电流逐渐减小,电磁力也逐渐减小,当电磁力小于衔铁、阀杆的重力以及弹簧弹力的和时,衔铁和阀杆恢复原位,燃油压力减小,燃油喷射过程结束。由此可看出,磁芯、衔铁等组成部件的磁性材料直接影响着电磁阀的工作性能。

磁性材料的磁饱和程度决定了电磁阀最大电磁力的大小^[9]。为使磁芯有足够的电磁力吸合衔铁,并且在吸合的同时建立起燃油喷射所需的高压,须选择具有较大饱和磁化强度的磁性材料。另外,电磁阀的开启以及关闭速度决定着燃油喷射的精确程度,所以快速的响应特性也是选择磁性材料时应考量的重要指标。

根据以上要求,选取 16MnCr5、20CrMn 两种软磁材料进行研究分析。16MnCr5 德国渗碳结构钢有较好的淬透性和切削性;20CrMn 合金结构钢淬透性较好,热处理变形小,低温韧性好。表 2 所示为电磁阀其它组成部件所使用的材料。

表 2 电磁阀其它组成部件使用材料

部件	材料
阀杆	GCr15
垫片	65Mn
励磁线圈	Cu
导向座	GCr15

磁化曲线能够反映出磁性材料的性能以及磁化的难易程度，曲线的斜率即为该磁性材料的磁导率。图 2 为选取的两种软磁材料 16MnCr5 和 20CrMn 的磁化曲线。

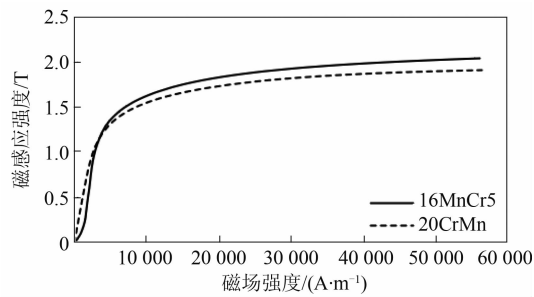


图 2 16MnCr5 和 20CrMn 的磁化曲线

2 电磁阀有限元仿真模型

2.1 仿真模型建立

基于 JMAG Designer 软件，根据电磁阀的实际尺寸进行建模，并用该仿真模型求解电磁阀磁感应强度的大小、分布以及产生的电磁力的大小。为了减少仿真计算的时间，建立的模型只包括电磁阀的主要部件，如：磁芯、励磁线圈（建模时等效为一个线圈环）、阀杆、衔铁、阀座以及导向座，而忽略复位弹簧、外套等非软磁材料。根据电磁阀的基本结构尺寸建立有限元仿真模型（图 3），并对该仿真模型进行干涉检查。

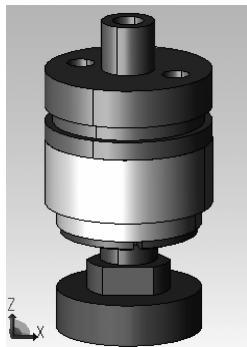


图 3 电磁阀有限元仿真模型

2.2 网格划分及无关性验证

JMAG Designer 软件本身所带的网格划分方式包括：Auto Mesh、Semi Auto Mesh 和 Extruded Mesh 三种，网格划分时无须复杂的设置与处理，只须选择网格划分的方式即可。图 4 为最终得到的电磁阀仿真模型网格划分。

为验证网格无关性，分别设置了 5 套不同的网格，网格数分别为 179 762、293 709、558 080、763 867、928 503。以电磁阀工作气隙 0.08 mm、输入电流 5 A 为测试案例，计算该工况下电磁阀产

生的静态电磁力大小。5 套网格下电磁阀产生的静态电磁力计算结果如图 5 所示。由图 5 可以看出：随着网格数量的增多，计算结果有所差异，网格数 179 762、293 709、558 080 的差别较大，但网格数达到 558 080 之后，计算结果基本保持不变。表明：即使对网格继续加密，求解的精度也不会进一步提升，即验证了网格无关性。

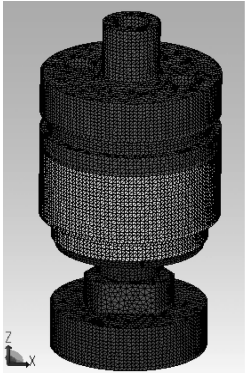


图 4 电磁阀仿真模型网格划分

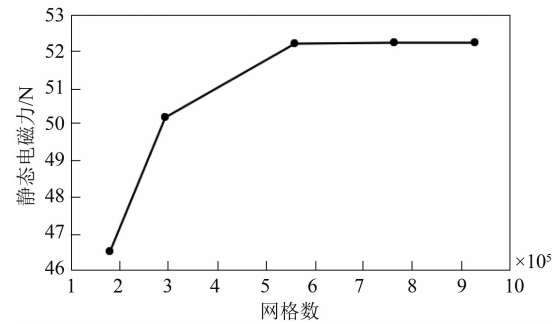


图 5 不同网格数对应的静态电磁力

2.3 仿真模型验证

由于磁性材料实际的 B-H 曲线与在 JMAG Designer 中导入的磁性材料 B-H 曲线有一定的差别，且在仿真模型计算时未考虑漏磁以及涡流效应的影响，所以须进行试验验证。

以 16MnCr5 作为电磁阀磁芯材料为例，对比不同工况下电磁力计算值与试验值，如表 3、表 4 所示。图 6 为电磁阀在 0.06 mm 工作气隙，不同输入电流情况下，仿真计算的电磁力与试验测得电磁力的对比。

表 3 不同工况下试验测得的电磁力

工作气隙/mm	电磁力/N			
	5 A	10 A	15 A	20 A
0.06	68.7	106.0	122.4	131.3
0.08	50.0	91.6	109.8	119.0
0.10	37.2	77.4	97.8	109.0
0.12	29.3	68.8	88.5	100.1

表 4 不同工况下仿真计算得到的电磁力

工作气隙/mm	电磁力/N			
	5 A	10 A	15 A	20 A
0.06	73.3	111.6	128.3	134.4
0.08	53.9	95.2	114.1	121.4
0.10	39.7	80.7	101.5	111.0
0.12	31.1	71.3	92.0	102.9

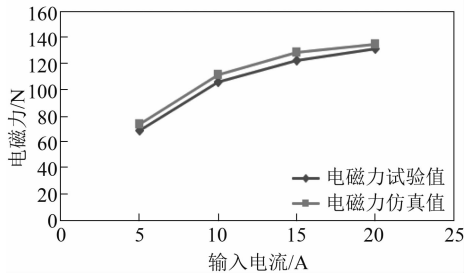


图 6 0.06 mm 工作气隙, 不同输入电流情况下电磁力试验值与仿真值对比

从表 3、表 4 以及图 6 可以看出: 实际试验所测得的电磁力与仿真模型计算得到的电磁力相差较小, 仿真值比试验值稍大; 在输入电流为 5 A 时二者误差最大, 为 6.7%; 平均误差为 4.8%。这是因为衔铁、磁芯以及阀座所选取的磁性材料均为软磁材料, 有限元仿真计算时忽略了所选磁性材料的涡流效应以及磁滞效应, 导致仿真计算结果比实际试验结果稍大。

3 电磁阀仿真结果分析

3.1 不同磁性材料磁感应强度分布规律

在工程领域电磁力的计算方法通常有以下三种: 经验公式法、数值方法以及磁路分割法^[10]。

根据公式计算电磁阀工作时产生的电磁力^[11]:

$$F = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S} = \frac{B^2}{2\mu_0} S \quad (1)$$

式中: B 为工作气隙磁感应强度, T; μ_0 为真空磁导率, 其值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb}/(\text{A} \cdot \text{m})$; Φ 为工作气隙磁通量, Wb; S 为磁路截面积, m^2 。

如果忽略漏磁的影响以及其它部位存在的气隙, 可以认为电磁阀的工作气隙即为衔铁的行程, 此时工作气隙的磁感应强度 B 为

$$B = \frac{NU}{R\delta\mu_0} = \frac{NI}{\delta}\mu_0 \quad (2)$$

式中: N 为线圈匝数; I 为电流强度, A; U 为电源电压, V; R 为励磁线圈电阻, Ω ; δ 为工作气隙长度, m。

将 (2) 式代入式 (1) 可得:

$$F = \frac{(NI)^2 \mu_0 S}{2\delta^2} \quad (3)$$

考虑到电磁阀磁路中存在漏磁, 式 (3) 可以写为

$$F = \frac{(NI)^2 \mu_0 S}{2K_f \delta^2} \quad (4)$$

式中: K_f 为漏磁系数, 取值由电磁阀的磁路决定, 可在 1 ~ 10 范围变化, 通常取 1.2 ~ 5.0。

从式 (1) 可以看出: 电磁阀产生的电磁力, 即衔铁所受到的吸力主要由工作气隙的磁感应强度决定; 从式 (2) 可以看出: 在相同的外部条件下, 工作气隙的磁感应强度主要由电磁阀所选磁性材料本身的特性决定。结合式 (1) ~ 式 (4) 可以看出: 在相同外部条件下, 电磁阀产生电磁力的大小主要由其选取的磁性材料决定。

分别以 16MnCr5 和 20CrMn 作为电磁阀的磁芯材料, 利用电磁阀有限元静态仿真模型研究分析不同磁芯材料条件下磁感应强度的大小、分布以及磁感应强度对静态电磁力的影响。

电磁阀产生的电磁力即为衔铁所受到的吸力, 在研究电磁阀的磁感应强度时, 主要是研究衔铁的磁感应强度。图 7 为衔铁在某工况下磁感应强度分布云图。

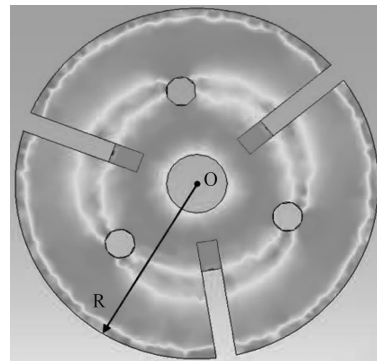


图 7 衔铁在某工况下磁感应强度分布云图

从图 7 可以看出: 电磁阀在正常工作时, 衔铁的磁感应强度分布呈现出一定规律, 以衔铁的中心 O 为圆心, 圆心到衔铁的外边缘的距离为 R , 以不同 R 为半径做的圆所在部位的磁感应强度大小基本相同。

(1) 分别以 16MnCr5 和 20CrMn 作为磁芯材料, 利用有限元静态仿真模型, 计算电磁阀在工作气隙为 0.08 mm, 输入电流为 5 A 和 15 A 时, 磁感应强度的大小和分布, 如图 8 ~ 图 11 所示。

(2) 分别以 16MnCr5 和 20CrMn 作为磁芯材料, 利用有限元静态仿真模型, 计算电磁阀在工作气隙为 0.04 mm, 输入电流为 5 A 和 15 A 时, 磁感应强度的大小和分布, 如图 12 ~ 图 15 所示。

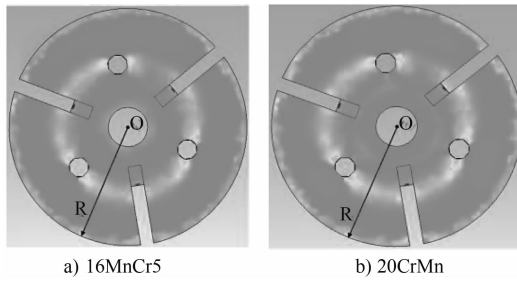


图 8 电磁阀磁感应强度分布图
($I=5$ A, 工作气隙为 0.08 mm)

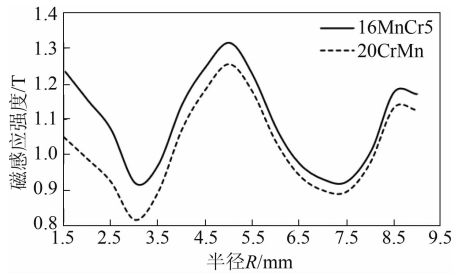


图 9 电磁阀磁感应强度分布对比图
($I=5$ A, 工作气隙为 0.08 mm)

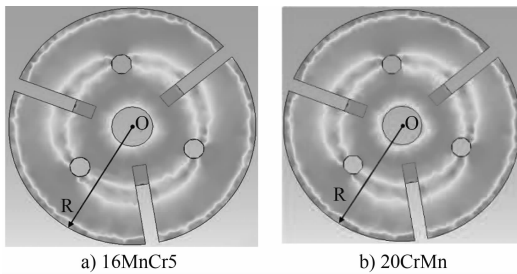


图 10 电磁阀磁感应强度分布图
($I=15$ A, 工作气隙为 0.08 mm)

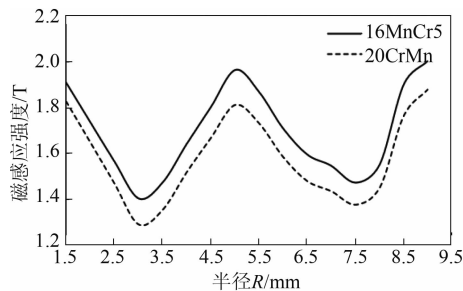


图 11 电磁阀磁感应强度分布对比图
($I=15$ A, 工作气隙为 0.08 mm)

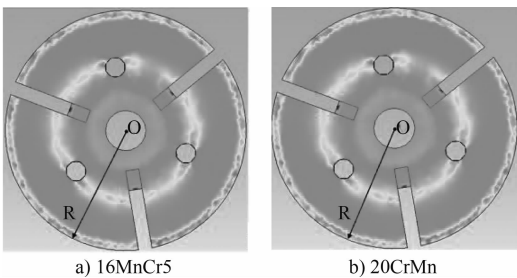


图 12 电磁阀磁感应强度分布图
($I=5$ A, 工作气隙为 0.04 mm)

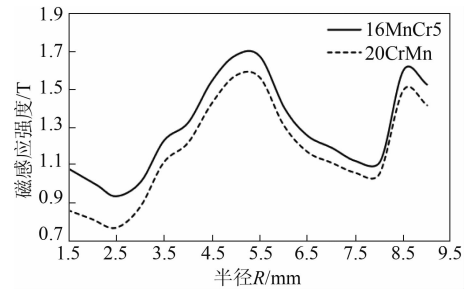


图 13 电磁阀磁感应强度分布对比图
($I=5$ A, 工作气隙为 0.04 mm)

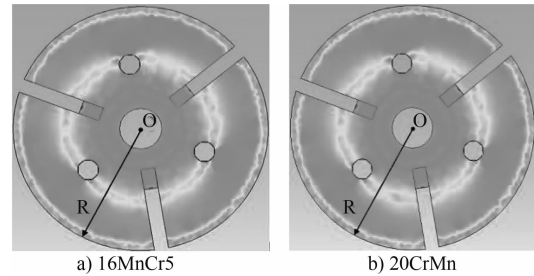


图 14 电磁阀磁感应强度分布图
($I=15$ A, 工作气隙为 0.04 mm)

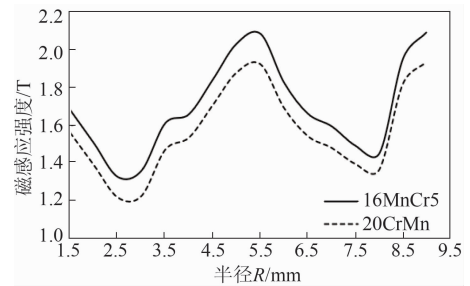


图 15 电磁阀磁感应强度分布对比图
($I=15$ A, 工作气隙为 0.04 mm)

综上所述可以看出: 不同磁芯材料的电磁阀在相同工况下, 衔铁表面产生的磁感应强度有所不同, 从而导致电磁阀产生的静态电磁力存在差异。以 16MnCr5 作为磁芯材料的电磁阀衔铁表面产生的磁感应强度要大于以 20CrMn 作为磁芯材料的电磁阀, 从而使得以 16MnCr5 作为磁芯材料的电磁阀产生的静态电磁力大于以 20CrMn 作为磁芯材料的电磁阀。对比图 9 与图 11、图 13 与图 15 可以看出: 工作气隙相同时, 输入电流增大, 衔铁表面的磁感应强度也随之增大。而对比图 9 与图 13、图 11 与图 15 可以看出: 在输入电流相同的情况下, 衔铁表面的磁感应强度随工作气隙的减小而增大。因此, 为增大衔铁表面的磁感应强度, 可以通过增大输入电流以及减小电磁阀的工作气隙实现, 进而还可使电磁阀产生更大的静态电磁力。

3.2 不同磁芯材料对静态电磁力的影响

静态电磁力的大小决定了电磁阀工作性能的好

坏, 基于电磁阀有限元静态仿真模型并选取部分工况点, 研究分析不同的磁芯材料对电磁阀产生静态电磁力的影响。图 16、图 17 分别为 16MnCr5、20CrMn 作为磁芯材料时, 电磁阀在不同工况下产生的静态电磁力。可以看出: 输入电流对电磁阀产生的电磁力影响较大, 在工作气隙相同的情况下, 静态电磁力的大小随着输入电流的增大而增大。这是因为随着励磁线圈中电流的增大, 其产生的磁通量也逐渐增大, 衔铁表面的磁感应强度增大, 因此衔铁受到的静态电磁力逐渐增大。而在输入电流相同的情况下, 静态电磁力的大小随工作气隙的减小而增大, 即衔铁与磁芯的距离越近, 静态电磁力越大。这是因为在电流相同的情况下, 随着衔铁与磁芯距离的缩短, 穿过衔铁表面的磁力线增多, 即通过衔铁的磁通量越大, 磁感应强度也越大, 因此衔铁受到的静态电磁力也逐渐增大。

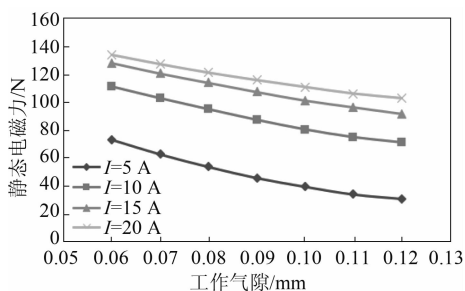


图 16 16MnCr5 电磁阀在不同工况下产生的静态电磁力

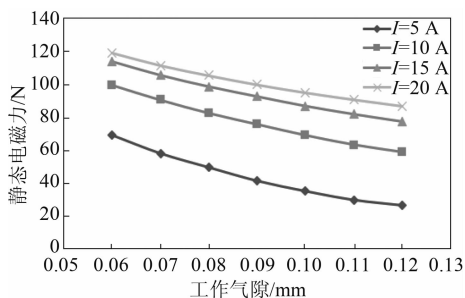


图 17 20CrMn 电磁阀在不同工况下产生的静态电磁力

对比图 16、图 17 还可以发现: 用不同的软磁材料作为电磁阀的磁芯材料, 在相同的工作气隙及相同的输入电流的情况下, 电磁阀产生的静态电磁力大小不同。在相同工况下, 以 16MnCr5 作为磁芯材料的电磁阀产生的静态电磁力比以 20CrMn 作为磁芯材料的电磁阀产生的静态电磁力大。这是因为不同的磁性材料其材料特性不同, 即有着不同的磁导率、饱和磁感应强度、电阻率、剩磁以及矫顽力, 从而影响电磁阀的工作性能。

4 结论

在 JMAG Designer 环境下建立了电磁阀三维有

限元仿真模型, 通过试验对比验证了该仿真模型的正确性, 为研究不同磁芯材料电磁阀的静态电磁力提供了有效平台。相关研究表明:

(1) 输入电流的大小对衔铁表面的磁感应强度以及电磁阀的静态电磁力影响较大。随着输入电流的增大, 衔铁表面的磁感应强度增大, 静态电磁力随之增大。

(2) 电磁阀的工作气隙对衔铁表面的磁感应强度以及电磁阀的静态电磁力有较大影响。随着电磁阀工作气隙的减小, 衔铁表面的磁感应强度增大, 静态电磁力随之增大。

(3) 磁芯材料对电磁阀的性能影响较大。对比以 16MnCr5 和 20CrMn 作为磁芯材料的电磁阀, 在相同工况下, 以 16MnCr5 作为磁芯材料的电磁阀衔铁表面的磁感应强度要高于以 20CrMn 作为磁芯材料的电磁阀, 其产生的静态电磁力也更大。

参考文献

- [1] 周伟. 新型永磁高速电磁铁设计与性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [2] 刘鹏, 范立云, 周伟, 等. 永磁并联磁路高速电磁铁的静态特性 [J]. 内燃机学报, 2016, 34 (5): 449-455.
- [3] 姜盼龙, 张欢仁, 杨明. 船用低速柴油机电控喷油器电磁阀仿真研究 [J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2018, 41 (1): 41-44.
- [4] 范立云, 周伟, 刘鹏, 等. 高速电磁阀动态响应的多目标优化 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39 (1): 53-59.
- [5] ZHANG J Y, LIU P, FAN LY, et al. Analysis on dynamic response characteristics of high-speed solenoid valve for electronic control fuel injection system [J/OL]. Mathematical Problems in Engineering, 2020. [2020-01-06]. <http://doi.org/10.1155/2020/2803545>.
- [6] SHIN Y, LEE S, CHOI C, et al. Shape optimization to minimize the response time of direct-acting solenoid valve [J]. Journal of Magnetism, 2015, 20 (2): 193-200.
- [7] 刘晖, 顾宏斌. 高速开关阀非线性模型及其仿真研究 [J]. 机械科学与技术, 2008 (7): 866-870.
- [8] 张廷羽, 张国贤. 高速开关电磁阀的性能分析及优化研究 [J]. 机床与液压, 2006 (9): 139-142.
- [9] 李成亮, 苏明. 磁性材料对高速电磁开关阀动静态特性影响的仿真研究 [J]. 贵州师范大学学报 (自然科学版), 2013, 31 (6): 85-91.
- [10] 娄路亮, 王海洲. 电磁阀设计中电磁力的工程计算方法 [J]. 导弹与航天运载技术, 2007 (1): 40-45.
- [11] 李泉凤. 电磁场数值计算与电磁铁设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.