

SM25电磁铁的设计计算方法

伏春波 骆 参
上海高诗汽车科技有限公司 上海 201804

摘 要: 本文介绍了一款平面挡柱式电磁铁SM25的设计计算过程, 根据我们样机的实际数据, 结合相关电磁理论, 对该电磁铁进行设计设计计算, 以及通过ANSYS软件对该电磁铁进行电磁力的仿真分析, 完善了此类电磁铁的理论计算方法。
关键词: 电磁铁; 设计; 计算; 电磁仿真

Design Calculation and Method Of SM25 Electromagnet

Fu Chunbo , Luo Can
Shanghai Co-Morals Automotive Technology Co., Ltd., ShangHai,201804

Abstract:This document introduces the design and calculation process of a plane retaining column electromagnet. According to the actual data of our prototype, combined with the relevant electromagnetic theory, the electromagnet is designed and calculated, and the electromagnetic force of the electromagnet is simulated and analyzed by ANSYS software, which improves the theoretical calculation method of this kind of electromagnet.

前言

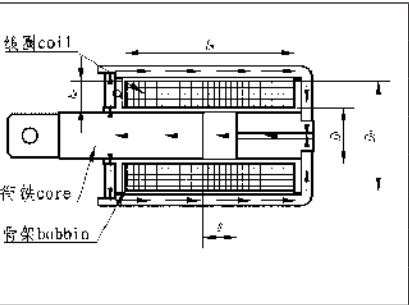
SM25电磁阀是一款控制液路通断的电磁阀, 对行程要求不高, 主要是需要承受较大的流体压力, 所需电磁吸力大, 是一款典型的平面挡柱型的电磁阀, 本文根据电磁阀的已知参数, 进行电磁阀产品结构尺寸和相关参数的正向计算, 并通过MAXWELL电磁仿真比较, 都得到相符合的结论, 形成了一个比较全面准确的电磁阀正向设计计算流程和方法。

1 电磁铁的设计计算过程

1.1 已知参数和求解目标参数

SM25电磁阀为直流电磁铁, 工作制式为短期重复工作制, 即电磁阀工作和停止是交替进行的, 这种工作状况称为短期重复工作制, 在通电时它的温度还来不及达到与它的负载相应的稳定温度, 而在停止的时候内, 因为线圈已断电温度开始下降, 但它的温度却又来不及降到与周围环境的温度相等的数值。电磁阀的工作制对于电磁阀的设计是非常重要的, 直接影响到电磁阀的整个结构设计, 以及漆包线耐温等级的选择, 和产品的使用寿命。根据产品技术条件, 已知电磁铁的工作参数:

表 1.1 电磁铁工作参数

已知参数	目标求解参数	
额定工作电压: $U_H=24V$	衔铁直径 d_c	
工作电流 $I_H \leq 1A$	线圈长度 b_m	
工作行程 $\delta=0.5mm$	线圈高度 l_m	
吸力 $F > 56N$	漆包线直径 d	
容许温升: $100^{\circ}C$	线圈圈数 W	
环境温度: $20^{\circ}C$	线圈内径 D_I	
工作持续率	线圈内径 D_H	

1.2 设计计算过程

根据已测绘出的基本尺寸, 通过理论计算确定线圈的主要参数, 并验算校核所设计出的电磁性能。

1.2.1 确定衔铁直径 d_c

经验指出: 每一种类型磁系统的经济重量 m 的最小值, 都发生在某一结构因数 K_{ϕ} 的范围内。换句话说, 在

某一结构因数 K_ϕ 的范围内,可以使电磁铁在获得所要求的拟定功条件下重量最小。结构因数 K_ϕ 可用下式表示,它代表了电磁铁的结构尺寸之间的关系:

$$K_\phi = \frac{\sqrt{M_F}}{\delta} \quad (\text{式 1-1})$$

式中:

M_F ——电磁力,单位为kg

δ ——电磁阀行程,单位为cm

已知工作行程 $\delta=0.05\text{cm}$ 时的,吸合力 $F=56\text{N}$,换算为公斤 $M_F=5.6\text{Kg}$,则结构因数为:

$$K_\phi = \frac{\sqrt{M_F}}{\delta} = \frac{\sqrt{5.6}}{0.05} = 47.3$$

查表1.2,可知电磁铁的结构形式应为平面挡铁的螺管式。

表 1.2 结构因数与电磁铁形式的关系

结构因数 K_ϕ	电磁铁型式
< 0.2	无挡铁螺管式
1.85~4	具有圆锥形 ($\alpha=60^\circ$) 挡铁的螺管式
4~16.5	具有圆锥形 ($\alpha=45^\circ$) 挡铁的螺管式
16.5~93	具有平面挡铁的螺管式
> 93	衔铁为平板形的盘式电磁铁

根据表1.2结构因数查参考资料图1.1,可得磁感应强度 $B_p=11200\text{Gs}$,考虑到现在铁芯材料用导磁能力较好的DT4系列材料,根据GB/T 6983-2008第7.2.3节(图1.2),可以查到DT4系列材料一般磁感应强度都在12000Gs以上,故此处 B_p 取12000Gs。

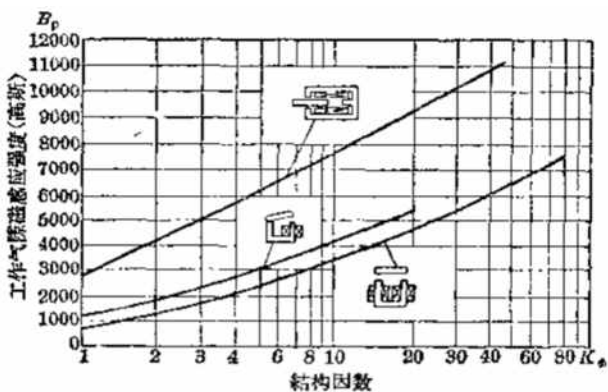


图 1.1 工作气隙和磁感应强度^[5]

7.2.3 电磁铁试验时的新磁时效增值(ΔH_c),是指试验按 6.3 规定进行人工时效处理后的新磁时效增值减去人工时效前的新磁时效增值($\Delta H_c = H_{c\text{新}} - H_{c\text{旧}}$)。

表 2

磁通密度	牌号	解磁力 H_d (A/m)	解磁力时效 增值 ΔH_d (A/m)	最大磁导率 μ_m (H/m)	磁感应强度 B/T						
					B_{20}	B_{30}	B_{40}	B_{50}	B_{60}	B_{70}	B_{80}
普通板	DT4	95.0	3.5	0.0675							
高磁	DT4A	72.0	7.2	0.0983							
铁板	DT4E	45.0	4.5	0.113							
磁板	DT4G	22.0	4.0	0.151							

注: $B_{20}, B_{30}, B_{40}, B_{50}, B_{60}, B_{70}, B_{80}$ 分别表示磁感应强度为 200 A/m, 300 A/m, 400 A/m, 500 A/m, 600 A/m, 700 A/m, 800 A/m 时的磁感应强度。

图 1.2 GB/T 6983-2008

当线圈长度比衔铁行程大的多时,可以不考虑螺管力的作用,认为全部吸力都由表面力产生(螺管式电磁铁的吸力可以分为两部分:其中一部分是有衔铁与静铁芯端面之间的主磁通所产生的吸力,称为表面力;另外一部分是由衔铁与外壳之间的漏磁通所产生的吸力,称为螺管力)。

由麦克斯韦电磁吸力公式

$$M_F = \left(\frac{B_p}{5000} \right)^2 \frac{\pi}{4} d_c^2 \quad (\text{式 1-2})$$

式中: B_p ——磁感应强度 (Gs)

d_c ——活动铁芯直径 (cm)

根据式1-2,可以求得衔铁直径为(设计电磁力取安全系数 $\Delta=1.2$):

$$d_c = \frac{5800}{B_p} \sqrt{\Delta \cdot M_F} = \frac{5800}{12000} \sqrt{5.6 \times 1.2} = 1.25294\text{cm} = 12.5294\text{mm}$$

取 $d_c=12.5\text{mm}$

1.2.2 确定线圈厚度

根据线圈的容许温升 θ ,填充系数 f_k 和散热系数 μ_m 值,可以求的线圈宽度 b_m ^[6]

$$b_m = \sqrt[3]{\frac{(IW)^2 \cdot \rho \cdot \tau}{20\mu_m \cdot f_k \cdot \theta \cdot \beta^2}} \quad (\text{式 1-3})$$

式中: b_m ——线圈厚度 (mm);

$\rho_{120^\circ\text{C}}$ ——铜的电阻率 $0.02443 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;

表 1.3 铜导线的电阻系数 ρ 值

工作温度 ($^\circ\text{C}$)	电阻系数 ρ ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	工作温度 ($^\circ\text{C}$)	电阻系数 ρ ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)
20	$\rho_{20}=0.01754$	90	$\rho_{90}=0.02236$
35	$\rho_{35}=0.01857$	105	$\rho_{105}=0.02339$
40	$\rho_{40}=0.01991$	120	$\rho_{120}=0.02448$

f_k ——填充系数,是指线圈中导体铜截面与线圈的总截面积之比值;取决于导线形状(圆线或扁线)、导线直径、绝缘厚度、绕线方法等(本文根据经验,取0.74)

θ ——最高容许温升(已知参数为 100°C)

β ——线圈长高比,根据表3.31,螺线管取6~8(取

6.7)

τ —— 通电持续率 ($\tau = \frac{t_1}{t} \cdot 100\%$, 式中 t_1 : 工作时通电时间; t : 工作周期时间, 即通电和停止时间之和。)

μ_m —— 散热系数, 根据表3.2.2取 $14.7 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

表 1.4 线圈的散热系数 μ_m 值的经验数据

线圈温升 $\theta/^\circ\text{C}$	μ_m ($\text{W/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)	
	A类	B类
	当线圈到铁芯柱之间 热传导良好时	当线圈到铁芯柱之间 热传导不良时
40	11.00×10^{-4}	9.84×10^{-4}
45	11.20×10^{-4}	10.01×10^{-4}
50	11.41×10^{-4}	10.19×10^{-4}
55	11.62×10^{-4}	10.37×10^{-4}
60	11.80×10^{-4}	10.54×10^{-4}
65	12.04×10^{-4}	10.72×10^{-4}
70	12.25×10^{-4}	10.99×10^{-4}
75	12.46×10^{-4}	11.17×10^{-4}
80	12.68×10^{-4}	11.35×10^{-4}
85	12.89×10^{-4}	11.52×10^{-4}
100	14.7×10^{-4}	

IW —— 线圈总磁势 (安匝), 由以下三部分组成:

$$IW = (IW)_\delta + (IW)_{cm} + (IW)_k$$

式中: $(IW)_\delta$ —— 消耗在气隙中的磁势

$$(IW)_\delta = \frac{B_p \cdot \delta}{\mu_0} \times 10^{-8} \text{ (安匝)} \quad (\text{式 1-4})$$

$(IW)_{cm}$ 和 $(IW)_k$ —— 消耗在铁芯中和非工作气隙中磁势的安匝数, 约为总磁势的15~40%即 $(IW)_{cm} + (IW)_k = \alpha(IW)$

式中: $\alpha = 0.15 \sim 0.4$, 此处取 $\alpha = 0.4$

由此可得线圈的磁势为

$$IW = \frac{B_p \cdot \delta}{\mu_0(1-\alpha)} \times 10^{-8} \text{ (安匝)} \quad (\text{式 1-5})$$

式中: B_p 单位为Gs, δ 单位为厘米, 空气到此系数 $\mu_0 = 1.25 \times 10^{-8} \text{ H/cm}$

电磁铁在实际应用时, 电压可能降低至 $70\%U_H$, 为了保证电压降低后, 电磁铁仍然能够可靠地工作, 上式1-5, 计算所得安匝数应该是指电压降低至 $0.7U_H$ 时的磁势, 用 $(IW)_1$ 表示。

$$(IW)_1 = \frac{12000 \times 0.05}{1.25 \times 10^{-8} \times (1-0.4)} \times 10^8 = 800 \text{ 安匝} \quad (\text{式 1-6})$$

显然, 电源电压为额定值时的磁势为

$$IW = \frac{(IW)_1}{0.7} = 1142 \text{ 安匝} \quad (\text{式 1-7})$$

将以上数据代入公式1-3, 可得:

$$b_m = \sqrt[3]{\frac{(IW)^2 \cdot \rho \cdot \tau}{20\mu_m \cdot f_k \cdot \theta \cdot \beta^2}} = \sqrt[3]{\frac{(1142)^2 \cdot 0.02443 \cdot 0.2}{20 \cdot 14.7 \times 10^{-4} \cdot 0.74 \cdot 100 \cdot 6.7^2}} = 4.024 \text{ mm}$$

今取 $b_m = 4.0 \text{ mm}$

1.2.3 确定线圈长度

线圈的高度 l_m 与厚度 b_m 比值为 $\beta^{[6]}$, 则线圈高度

$$l_m = \beta \cdot b_m \quad (\text{式 1-8})$$

式中: l_m —— 线圈长度 (mm)

β 值根据参考资料选取经验数据为 $\beta = 6.7$ (查表1.5)^[6]

则线圈高度 $l_m = \beta \cdot b_m = 4.0 \times 6.7 = 26.8 \text{ mm}$

表 1.5 电磁铁长高比

电磁铁型式		β 值	
		直流电磁铁	交流电磁铁
拍合式	带极靴	4~6	2
	不带极靴	5~7	
盘式		2~4	1~2
螺线管式		7~8	3~4

1.2.4 确定导线直径

根据电阻率公式 $R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{\pi d^2 / 4}$, 可以求得导线直径:

$$d = \sqrt{\frac{4\rho D_{cp} IW}{U}} \quad (\text{式 1-9})$$

式中: 平均直径 $D_{cp} = d_c + b_m = 0.0125 + 0.004 = 0.0165 \text{ m}$

电阻系数 $\rho_{20^\circ\text{C}} = 0.01754 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ (查表1.3), 由式1-9可得

$$d = \sqrt{\frac{4\rho D_{cp} IW}{U}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.01754 \times 0.0165 \times 1142}{24}} = 0.234 \text{ mm}$$

查线规表, 其最邻近的直径为 $d = 0.24 \text{ mm}$, 带绝缘后的直径 $d = 0.26 \text{ mm}$ 。同时根据最高容许温升 $\theta = 100^\circ\text{C}$, 可知电磁阀最高允许温度为最高允许温升 θ 加上环境温度, 也就是说电磁阀最高允许使用温度为 120°C , 根据我国国家标准试行草案, 把绝缘材料分为七级, 各级绝缘材料的最高容许温度如下表3.3.2, 为保证产品的可靠性, 选择耐温等级高一个级别的漆包线, 即选择F级漆包线。

表 1.6 各级绝缘材料的最高容许温度

绝缘等级	最高容许温度 ($^\circ\text{C}$)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	> 180

1.2.5 确定线圈匝数 W

根据线圈填充系数公式 $f_k = \frac{Q_q}{Q_m} = \frac{q \cdot W}{b_m \cdot l_m}$ (其中 Q_q 铜截面面积, Q_m 线圈的总截面积), 可以求得线圈匝数 W

$$W = \frac{4 \cdot b_m \cdot l_m \cdot f_k}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 4 \cdot 26.8 \cdot 0.74}{\pi \cdot 0.26^2} = 1494 \text{ 匝 (式 1-10)}$$

1.2.6 确定电阻

线圈平均匝长

$$l_{cp} = \frac{\pi(D_H + D_1)}{2} \quad (\text{式 1-11})$$

$$D_H = D_1 + 2b_m \quad (\text{式 1-12})$$

$$D_1 = d_c + 2\Delta \quad (\text{式 1-13})$$

式中: D_H ——线圈外直径(mm)

D_1 ——线圈内直径(mm)

Δ ——绝缘层厚度, 根据经验取 0.5mm

根据式 3-10, 3-11, 3-12 得:

$$D_1 = d_c + 2\Delta = 12.5 + 2 \times 0.5 = 13.5 \text{ mm}$$

$$D_H = D_1 + 2b_m = 13.5 + 2 \times 4 = 21.5 \text{ mm}$$

$$l_{cp} = \frac{\pi(D_H + D_1)}{2} = \frac{\pi(21.5 + 13.5)}{2} = 55 \text{ mm} = 0.055 \text{ m}$$

线圈电阻, 根据电阻率公式 $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$, 得:

$$R = \rho_{20} \cdot \frac{l_{cp} W}{\frac{\pi}{4} d^2} = 0.01754 \times \frac{0.055 \times 1494}{\frac{\pi}{4} \times 0.24^2} = 31.9 \Omega$$

现在已初步确定了电磁铁的结构尺寸。

2 特性验算

根据设计要求, 已完成了初步设计, 考虑初始代入得参数是按照经验取值, 所以在获得电磁阀设计尺寸之后, 要根据计算所得的数据, 做电磁吸力和容许温升的验算, 以确保我们的设计是符合要求的。

2.1 吸力计算

考虑到气隙的对电磁吸力的影响, 在验算的过程中, 也可以用式 1-2, 不过要加入一个修正系数 α , 用来修正在大气隙时由于磁通的不均匀分布所引起的误差, 这时式 1-2 可写成:

$$M_F = \left(\frac{\Phi_\delta}{5000} \right)^2 \frac{1}{S(1 + \alpha\delta)} \quad (\text{式 2-1})$$

忽略铁磁阻和漏磁通, 这样气隙中的磁通 Φ_δ :

$$\Phi_\delta = IW G_\delta \times 10^8 \text{ ——磁路欧姆定律 (式 2-2)}$$

式中磁导 G_δ :

$$G_\delta = \mu_0 \frac{\pi d_c^2}{4\delta} \text{ ——磁导计算 (式 2-3)}$$

式中: 空气导磁系数 $\mu_0 = 1.25 \times 10^{-8} \text{ H/cm}$, 故磁导 G_δ :

$$G_\delta = \mu_0 \frac{\pi d_c^2}{4\delta} = 1.25 \times 10^{-8} \times \frac{\pi \times 1.25^2}{4 \times 0.05} = 30.66 \times 10^{-8} \text{ H}$$

$$\Phi_\delta = IW G_\delta \times 10^8 = 1142 \times 0.7 \times 0.6 \times 30.66 \times 10^{-8} \times 10^8 = 14706 \text{ Mx}$$

(此处安匝按照前面设定式电压降低到 0.7Uh, 所以乘以 0.7; 总磁势左右在气隙的磁势我们前面设定的为 0.6, 所以乘以 0.6;)

式中: α ——修正系数, 取 $\alpha = 4$

S ——铁芯截面积

$$S = \frac{\pi d_c^2}{4} = \frac{\pi}{4} \times 1.25^2 = 1.2266 \text{ cm}^2$$

代入公式 4-1

$$M_F = \left(\frac{\Phi}{5000} \right)^2 \frac{1}{S(1 + \alpha\delta)} = \left(\frac{14706}{5000} \right)^2 \frac{1}{1.2266(1 + 4 \times 0.05)} = 5.88 \text{ kg} = 58.8 \text{ N}$$

设计要求大于 5.6kg (56N), 可见吸力是满足设计要求的。

2.2 线圈温升计算

线圈容许温升 $\theta = 100^\circ\text{C}$, 查参考资料表 1.4, 可得散热系数为

$$\mu_m = 14.7 \times 10^{-4} \text{ W / cm} \cdot ^\circ\text{C}$$

线圈的散热表面积 S 的计算公式如下:

$$S = S_H + \eta_m S_e \quad (\text{式 4-4})$$

式中:

S_H : 线圈的外表面面积 (cm^2)

S_e : 线圈的内表面面积 (cm^2)

η_m : 表面系数, 依结构确定。

塑料骨架线圈其传导能力一般, 表面系数 $\eta_m \approx 1$

线圈的散热表面 S

$$S = S_H + \eta_m S_e = \pi D_H l_m + \eta_m D_1 l_m$$

$$S = \pi(2.15 + 1 \times 1.35) \times 2.68 = 29.45 \text{ cm}^2$$

线圈温升 θ

$$\theta = \frac{P}{\mu_m S} \quad (\text{式 2-5})$$

$$\theta = \frac{0.2 \times 24 \times 24 / 31.9}{14.7 \times 10^{-4} \times 29.45} = 83.4^\circ\text{C}$$

温升小于 100°C , 可见是合格的。

3 Maxwell 电磁仿真验算

3.1 电磁铁建模

一般定铁芯取线圈长度 40% 位置, 请看图 5.1.1, 当衔铁在不同位置时, 其吸力也不相同。当衔铁的位移 x 从零开始逐渐增大时, 其螺管力也随之增加。当衔铁进入线圈的距离为某一值, 例如约为全长的 40% 时, 吸力达到最大值 $F_{\max}$ 。此后吸力几乎维持不变, 最后当衔铁

再深入线圈约为80%后,螺管力便开始减小。当衔铁完全进入线圈后螺管力等于零。

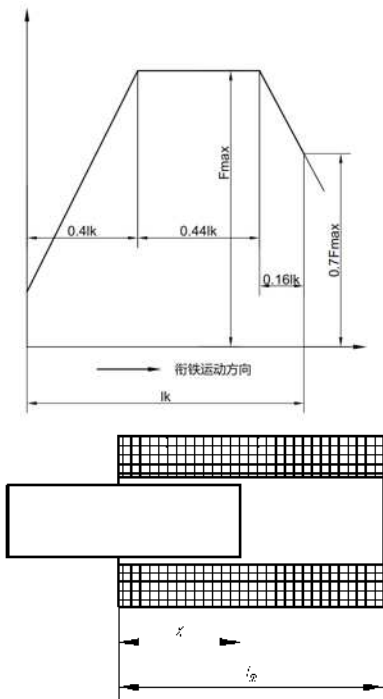


图 3.1 没有外壳的螺管式电磁铁理想吸力特性

实际电磁阀动铁芯取 $0.45 \cdot l_m$,长12mm,按照理论计算尺寸建模如下:

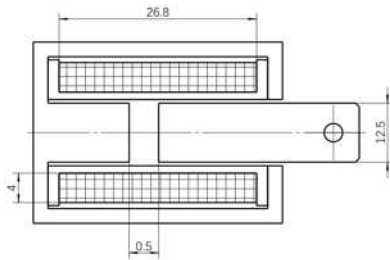


图 3.2 电磁铁结构图

3.2 电磁仿真

3.2.1 激励安匝数

计算安匝数为1142,这是对于0.7U_h的情况下,而在额定电压24V的情况下,我们设置为 $0.7 \cdot 1142 = 800$ 安匝,如如图3.3所示。

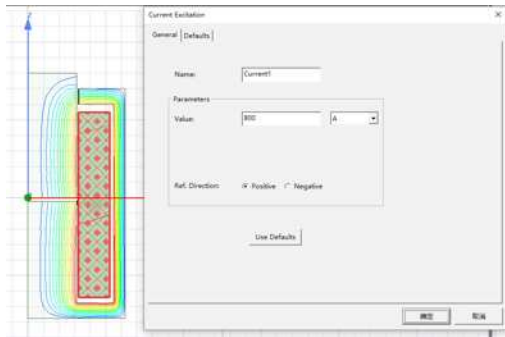


图 3.3 安匝数设置

3.2.2 设置位移步

动铁芯Plunger从0.5mm移动到0mm,每步0.1mm,如图3.4所示。

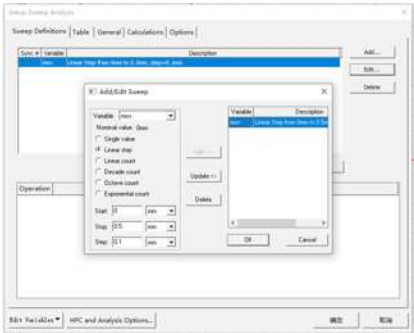
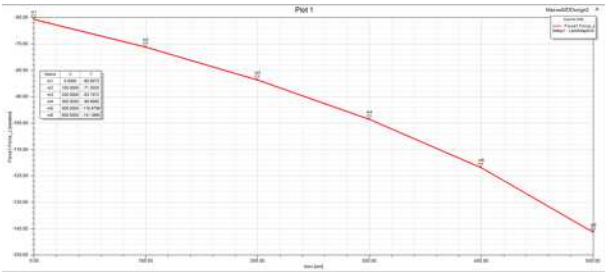


图 3.4 位移步设置

3.2.3 求解,计算电磁力

如图3.5所示,可知,电磁铁通电后在气隙为0.5mm的位置,电磁力为60.8073N,满足设计要求,与理论计算值58.8N相差较小,两种计算方法均可靠。



Name	X	Y
m1	0.0000	-60.8073
m2	100.0000	-71.3028
m3	200.0000	-83.7472
m4	300.0000	-98.6665
m5	400.0000	-116.9798
m6	500.0000	-141.3960

图 3.5 电磁铁吸力和位移曲线

注:本实例跟电磁阀实际运行情况均相差均符合。

3.2.4 磁场矢量云图

如图3.6(a)~3.6(d)所示,为电磁铁动铁芯运动过程中的磁通量矢量变化图

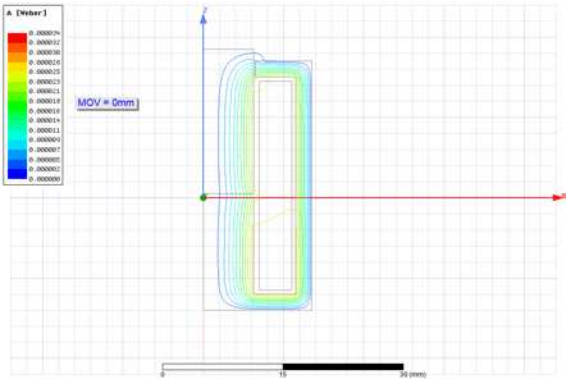


图 3.6 (a) 位移0mm时磁场云图

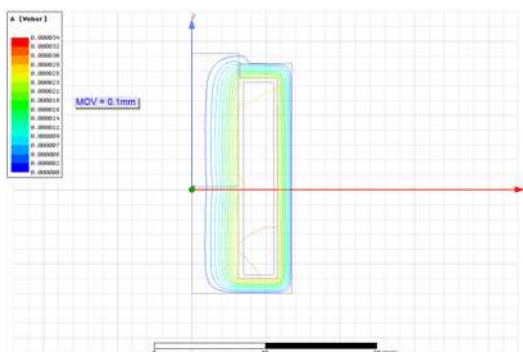


图 3.6 (b) 位移 0.1mm 时磁场云图

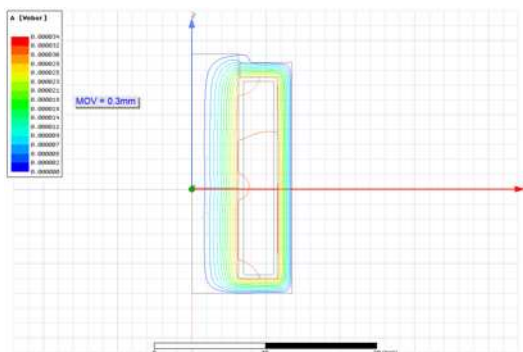


图 3.6 (c) 位移 0.3mm 时磁场云图

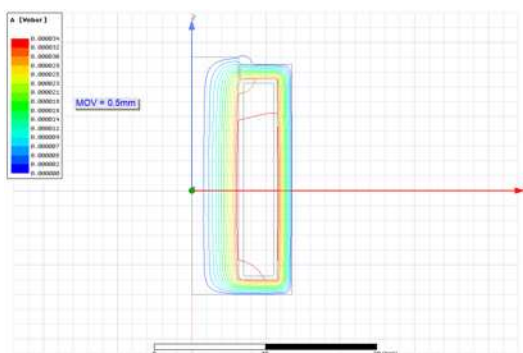


图 3.6 (d) 位移 0.4mm 时磁场云图

从图中可以看出, 动铁芯在 0 位置, 逐渐运动到 0.1mm, 0.3mm, 0.5mm 位置的时候, 最后动铁芯和静铁芯完全接触, 可以看出随着空气隙的逐渐减小, 磁通量在逐渐增大, 电磁铁的电磁吸力也随之逐渐增大。

如图 3.7 和图 3.8 所示, 通过仿真得到电磁铁的磁场强度矢量图 (左) 和磁感应强度云图 (右)

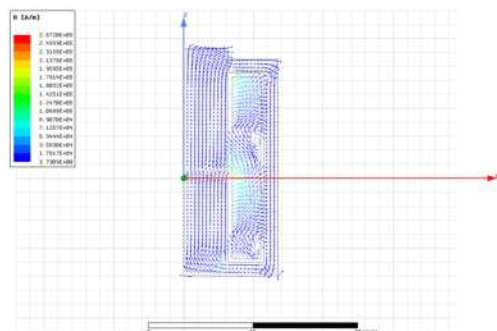


图 3.7 磁场强度矢量图

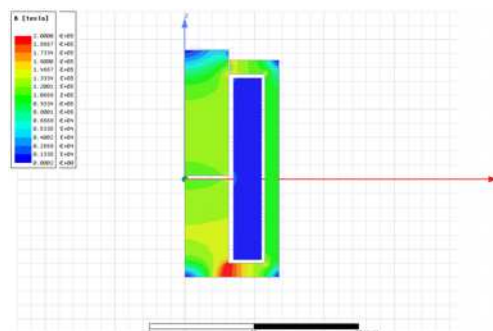


图 3.8 磁感应强度云图

在磁场强度矢量图中我们可以清晰的看到电磁铁内部磁力线的走向和分布; 在磁感应强度云图中我们通过观察磁感应强度的饱和度, 以便于我们选择合适的材料, 以及对磁饱和的位置进行相应的尺寸设计。

4 结论

根据理论计算和电磁仿真, 电磁力计算结果如下表 4.1 所示:

表 4.1 电磁铁理论计算和仿真参数比较

电压 (v)	工作行程 (mm)	吸合力 (N)	电阻 (Ω)	备注
24	0.5	58.8	31.9	理论计算
24	0.5	60.8	31.9	电磁仿真

理论计算的结果和电磁仿真的结果, 比实际测试数据相差 4% 以内, 理论计算比仿真结果大 2N, 这在合理的制造偏差范围内。该理论计算的方法是可靠的, 这对于平面挡铁式螺管式电磁阀的设计计算可以起到一定的参考作用。

参考文献:

- [1] 蔡国廉. 电磁铁[M]. 上海科学技术出版社, 1985
- [2] 崔学琴. YDF-42 电磁铁的设计计算[J]. 中国航空学会控制与应用学术年会, 2004
- [3] 左全璋. 各种结构形式电磁铁通用的磁路计算公式和方法[J]. 华中工学院
- [5] 蔡国廉. 电磁铁[M]. 上海科学技术出版社, 1985, P131
- [6] 蔡国廉. 电磁铁[M]. 上海科学技术出版社, 1985, P93
- [7] GB/T 6983-2008 电磁纯铁