

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.12.012

弹簧操动机构螺线管式电磁铁的计算与分析

刘超¹, 张强¹, 苏菊芳¹, 赵伟涛¹, 耿巍²

(1. 西安西电开关电气有限公司, 西安 710077; 2. 西菱输变电设备制造有限公司, 西安 710016)

摘要: 文中以电磁铁为研究对象,介绍了电磁铁在断路器弹簧操动机构中的作用。根据螺管式电磁铁具体结构,对其磁路进行了分析计算,并对其气隙磁势、磁通、磁感应强度和吸力进行了分析,最后结合实验对其时间特性进行了讨论,为电磁铁的计算和特性优化提供参考。

关键词: 弹簧操动机构; 螺线管式电磁铁; 磁路; 特性优化

Calculation and Analysis of Solenoid Electromagnet for Spring Operating Mechanism

LIU Chao¹, ZHANG Qiang¹, SU Jufang¹, ZHAO Weitao¹, GENG Wei²

(1. Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. Xiling Electric Power Products Manufacturing Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: This article takes electromagnet as the research objectives and introduce the function of electromagnet in circuit breaker with spring operating mechanism. According to the specific structure of the solenoid electromagnet, the magnetic circuit of the electromagnet is calculated, and its magnetic potential, magnetic flux, magnetic induction intensity and suction force are analyzed. Finally, the time characteristics of the electromagnet are discussed in combination with experiments, which provides a reference for the calculation and optimization of the electromagnet's characteristics.

Key words: spring operating mechanism; solenoid electromagnet; magnetic circuit; characteristic optimization

0 引言

操动机构是断路器的重要组成部分,是决定断路器空载特性和带载特性的关键部件。电磁铁作为操动机构的核心元件,其动作特性直接关系到操动机构的动作特性,对断路器的机械特性有重大影响。

按照励磁线圈的通电类型,电磁铁可分为交流电磁铁和直流电磁铁。交流电磁铁因为有交变磁场存在,磁通随时间变化,会产生涡流损耗和磁滞损耗,因此效率低,铁心体积大,发热严重,在工作中还会产生工频震动和噪声,寿命较低。直流电磁铁电流恒定,吸力稳定,基本没有噪音,寿命较长,且磁路和结构在设计时也相对简单。操动机构中的电磁铁应在满足吸力特性的要求下动作时间短,操作可靠。因此,在进行操动机构的电磁铁设计

时,一般会将直流电磁铁作为首选^[1]。

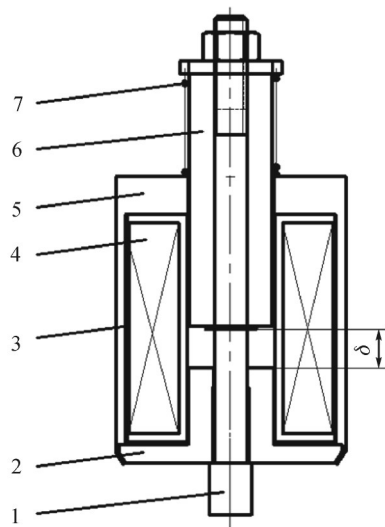
文中以某型号弹簧操动机构中的直流螺线管式电磁铁为对象,对其磁路结构进行了研究,并对电磁铁的吸力特性和时间特性进行了分析。首先针对螺线管式电磁铁具体结构,建立了电磁铁的等值磁路图,之后列出了电磁铁各个部分的磁导及磁阻的计算方法,进而推导出工作磁势,得出了电磁铁的吸力公式,并针对电磁铁的气隙磁势、磁通、磁感应强度和吸力进行了分析,最后结合实验对电磁铁的时间特性进行了讨论。文中为螺线管式电磁铁的结构计算提供一定的参考,也为电磁铁关键参数的优化提供帮助^[2-3]。

1 结构

1.1 电磁铁结构

螺线管式电磁铁的结构图见图1。其动作主要

原理为:撞击杆1与动铁心6螺纹连接。线圈4通电时产生磁场,动铁心6、静铁心2及侧磁轭3被磁化,动铁心6在磁场力作用下带动撞击杆1向下运动,直至走完气隙 δ 后停止。线圈4断电后,在复位弹簧7的作用下,动铁心6与撞击杆1复位。



1—撞击杆; 2—下磁轭; 3—侧磁轭; 4—线圈;
5—上磁轭; 6—动铁心; 7—复位弹簧。

图1 螺线管式电磁铁结构

Fig. 1 Structure sketch of solenoid electromagnet

1.2 等值磁路图

一般认为,当电磁铁工作气隙很小时,工作气隙的磁导和磁通很大,相比之下漏磁导和漏磁通就可以忽略。但实际上漏磁通还是比较大,甚至会超过主磁通,因此在计算时应予以考虑。另外由于电磁铁气隙较小,铁磁件的磁阻也不能忽略。简化后的电磁铁磁路图见图2。

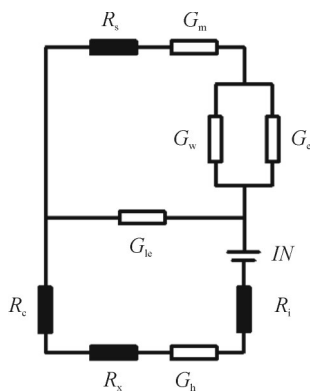


图2 简化磁路图

Fig. 2 Simplified magnetic circuit diagram

图2中 IN 为线圈安匝数,也是磁路总磁势, G_w 为工作磁导, G_e 为散磁导, G_m 为上磁轭与侧磁轭铆接处间隙磁导, G_{le} 为等值漏磁导, R_s 为上磁轭磁阻, R_c 为侧磁轭磁阻, R_x 为下磁轭磁阻, G_h 为下磁轭与动铁心之间环缝间隙磁导, R_i 为铁心磁阻^[4-5]。

2 磁路计算

由图2可知,总磁势 IN 由回路中各部分分担。总磁通 Φ 由漏磁通 Φ_l 和主磁通 Φ_m 两部分构成。由基尔霍夫第二定律可得磁路方程

$$IN = \Phi_m \left(\frac{1}{G_w + G_e} + \frac{1}{G_m} + R_s \right) + (\Phi_m + \Phi_l) \left(R_c + R_x + \frac{1}{G_h} + R_i \right) \quad (1)$$

2.1 工作磁导

工作磁通区域截面是一个圆环,其磁导计算公式为

$$G_w = \mu_0 \frac{\pi(d^2 - d_1^2)}{4\delta} \quad (2)$$

式(2)中: μ_0 为空气磁导率,近似等于真空磁导率; δ 为工作气隙; d 为动铁心外径; d_1 为动铁心内径。

2.2 散磁导

散磁通分布在工作磁通的周围,是一个半圆柱体,其磁导计算公式为

$$G_e = 0.26\mu_0 \pi d \quad (3)$$

2.3 铆接间隙磁导

上磁轭与侧磁轭通过铆接固定,铆接正常,气隙为零,磁导无穷大。但考虑存在铆接不良的情况,按铆接间隙 $\delta_1 = 0.1$ mm算,其磁导计算公式为

$$G_m = \mu_0 \frac{\pi(D^2 - D_1^2)}{4\delta_1} \quad (4)$$

式(4)中: D 为侧磁轭外径; D_1 为侧磁轭内径。

2.4 上磁轭磁阻

上磁轭为圆形压板,其磁阻计算公式为

$$R_s = \frac{1}{\mu_i \pi n} \quad (5)$$

式(5)中: n 为上磁轭厚度; μ_i 为上磁轭磁导率。由于上下磁轭、侧磁轭及铁心均为低碳钢,因而可以认为铁磁件磁导率都相同。在计算时,应该以磁轭材料磁饱和时磁导率的数值进行计算,根据低碳钢的磁化曲线,其磁饱和时磁导率取 $\mu_i = 25 \sim 50, \text{Mx}/(\text{A} \cdot \text{cm})$ 。

2.5 侧磁轭磁阻

侧磁轭为圆柱体,其磁阻计算公式为

$$R_c = \frac{4}{\mu_i \pi (D^2 - D_1^2)} \quad (6)$$

2.6 下磁轭磁阻

下磁轭为圆形压板,其磁阻计算公式为

$$R_x = \frac{1}{\mu_i \pi m} \quad (7)$$

式(7)中, m 为下磁轭厚度。

2.7 环缝间隙磁导

动铁心与下磁轭之间存在间隙,按同心圆柱面之间的磁导分析,其计算公式为

$$G_h = 2\pi\mu_0 m \ln \frac{d}{d_2} \quad (8)$$

式(8)中, d_2 为下磁轭与动铁心配合内径。

2.8 铁心磁阻

铁心磁阻随气隙变化,其计算公式为

$$R_i = \frac{4(s + \frac{m+n}{2} - \delta)}{\mu_t \pi (d^2 - d_1^2)} \quad (9)$$

式(9)中, s 为上下磁轭之间距离。

2.9 等值漏磁导

等值漏磁导计算公式为

$$G_{le} = \frac{\pi\mu_0(s-\delta)}{\ln \frac{D_1}{d}} \quad (10)$$

2.10 漏磁通

漏磁通计算公式为

$$\Phi_l = G_{le} \Phi_m (\frac{1}{G_w + G_e} + \frac{1}{G_m} + R_s) \quad (11)$$

2.11 气隙磁势

线圈总磁势 IN 除了铁磁件和非工作气隙分担外,其余都作用在工作气隙上,因此,工作气隙磁势为

$$U_w = \frac{\Phi_m}{G_w + G_e} \quad (12)$$

2.12 吸力

根据文[8],考虑漏磁及铁心磁阻的电磁铁吸力计算公式为^[6-12]

$$F = 64U_w^2 [\frac{\pi(d^2 - d_1^2)}{4\delta^2} + 0.8 \times \frac{2\pi\mu_0}{\ln \frac{D_1}{d}} \times (\frac{s-\delta}{s})^2] \times 10^{-8} \quad (13)$$

由式(1)-(13)可以计算出电磁铁吸力及磁通等变量。

根据标准规定,在直流条件下,分闸电磁铁在65%额定电压要能脱扣,合闸电磁铁在85%额定电压要能脱扣,分、合闸电磁铁在小于或等于30%额定电压下都不能脱扣。

因此,在进行设计时,应使电磁铁铁心在规定的最低脱扣电压下已经磁饱和。这样可以保证电磁铁在最低脱扣电压下工作时,磁路即使受到外加磁场的干扰也不会发生很明显的变化,能够保证脱扣时间比较稳定且和额定电压以及高电压下脱扣时间相近,即在工作电压范围内脱扣时间变化不大。

另外在设计之初,要考虑30%操作电压不能脱扣,应对弹簧操动机构的脱扣力值进行计算,以该力值为电磁铁设计基础,同时考虑一定设计裕度。

例如,假设某弹簧操动机构需要电磁铁提供的脱扣力为10 N,按标准30%额定电压下电磁铁的力值应不大于10 N,考虑设计裕度之后,可以40%额定电压下电磁铁的力值不大于10 N为基础进行设计。这样可以使电磁铁在满足30%额定电压不脱扣的要求下力值较大,动作稳定、可靠^[13-15]。

3 特性分析

计算得到的电磁铁参数见表1。

表1 电磁铁主要参数

Table 1 Main parameters of electromagnet

参数	数值
线圈匝数/匝	2 510.00
导线直径/mm	0.18
动铁心外径/mm	13.00
撞击杆外径/mm	5.00
最大工作气隙/mm	6.00
侧磁轭外径/mm	36.00
侧磁轭内径/mm	33.00
上磁轭厚度/mm	3.00
下磁轭厚度/mm	6.00
上下磁轭距离/mm	40.00

3.1 气隙磁势

电磁铁通电工作后,动铁心在磁场力作用下运动,气隙逐渐减小,直到动铁心吸合停止。在此过程中,总磁势保持不变,铁件磁阻越来越大,导致气隙磁势越来越小。

气隙磁势占总磁势百分比,见图3。气隙最大的时候,气隙磁势最大,占总磁势50%左右。气隙从7 mm减小到0.5 mm的过程中,气隙磁势占比越来越小,直到动铁心吸合,气隙磁势占总磁势10%左右,剩余磁势都降在铁磁件上,说明工作气隙较小时铁件磁阻对磁路影响比较大。从占比可以看出电磁铁的工作效率并不是很高。

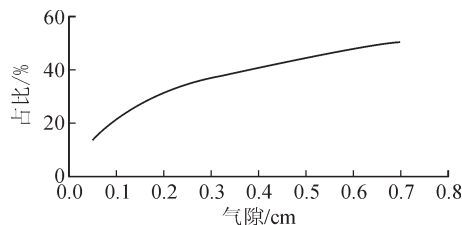


图3 气隙磁势占总磁势百分比

Fig. 3 The ratio of gap magnetic potential to total magnetic potential

3.2 磁通

磁路总磁通、漏磁通和主磁通变化趋势,见图4。由图4可以看出,电磁铁漏磁通很大,已经超过了主磁

通,对磁路影响较大,因而在计算过程中是不能忽略的。

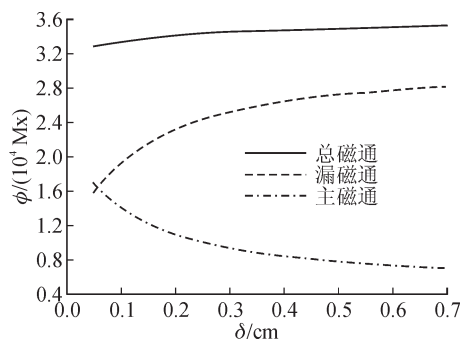


图4 磁通变化图

Fig. 4 The diagram of magnetic flux

3.3 磁感应强度

铁心的磁感应强度是电磁铁计算中的重要内容。一方面,根据磁感应强度计算结果反向核算在计算时取的铁件磁导率是否合适;另一方面,要确保电磁铁在低电压下的磁感应强度接近饱和。

电磁铁在不同电压下的磁感应强度曲线见图5。由图5可以看出,该电磁铁在65%电压时磁感应强度已达2.2 T,接近低碳钢的饱和值,符合设计要求。根据计算结果,在65%电压时铁心磁感应强度达到2.2 T,对应的磁导率为30,而气隙磁导率为1.26,二者仅相差24倍,说明铁磁件的磁阻影响较大,不能忽略。

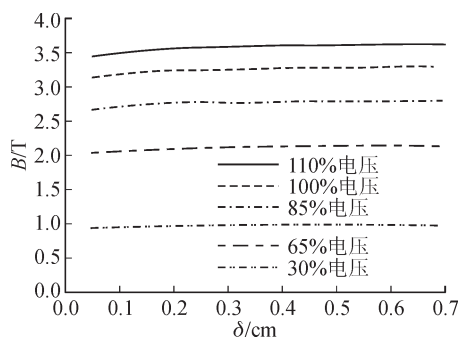


图5 磁感应强度变化图

Fig. 5 The diagram of magnetic induction intensity

3.4 吸力

电磁铁在不同电压等级下的吸力变化图见图6。当气隙减小时,虽然气隙磁势减小,但电磁铁吸力却在增大,尤其是当气隙接近于0时,吸力急剧增大。

3.5 时间特性

电磁铁典型动作电流见图7。图7中: i_1 为动铁心不动的情况下线圈电流; i_2 为动铁心动作时线圈电流; i 为线圈稳定电流。 i_1 随时间变化变化关系为:

$$i_1 = i(1 - e^{-\frac{t}{L/R}}) \quad (14)$$

式(14)中: R 为线圈电阻; L 为线圈电感。

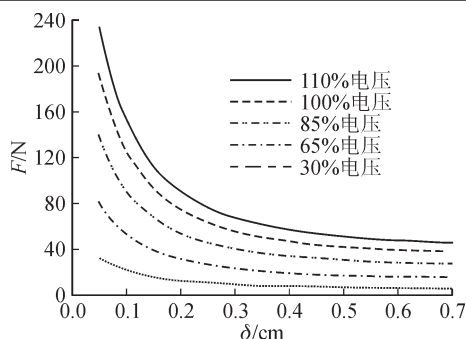


图6 吸力变化图

Fig. 6 The diagram of suction force

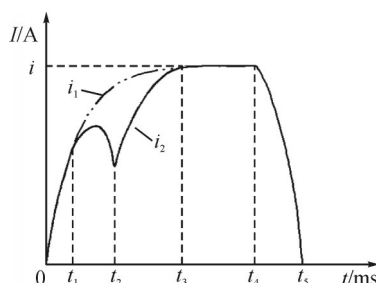


图7 电磁铁线圈电流

Fig. 7 The diagram of coil current

带铁心多层绕组线圈的电感计算公式为

$$L = \frac{4\pi\mu_r r N^2}{10l} [\pi r k - t(0.693 + C)] \quad (15)$$

式(15)中: r 为线圈平均半径; μ_r 为铁心相对磁导率; N 为线圈匝数; l 为线圈长度; t 为线圈绕层厚度; k 为长冈系数,由 $2r/l$ 决定; C 为计算系数,由 $1/t$ 决定。气隙越小,铁心磁感应强度越大,相对磁导率越大,线圈电感越大。

0- t_1 阶段,动铁心不动,电感 L_0 恒定,线圈电流 i_2 按照 i_1 上升。

t_1-t_2 阶段,电磁铁吸力不断增大,当吸力大于摩擦力和复位弹簧力,动铁心开始动作。假设到 t_1 时刻,动铁心开始动作,根据法拉第电磁感应定律,电磁铁线圈会产生一个反向感应电流,反向感应电流阻碍线圈电流的上升,与此同时,随着气隙的减小,线圈电感逐渐增大。在动铁心动作初期,反向电流增长率较小, i_2 小于 i_1 ;当动铁心速度达到一定值,反向电流增长率与 i_1 增长率大小相等, i_2 到达峰值不再增加。再往后,反向电流增长率大于 i_1 增长率, i_2 开始下降,直到 t_2 时刻动铁心运动停止, i_2 减小到最小。

t_2-t_3 阶段,动铁心吸合且保持, i_2 按照式(14)重新上升,此时线圈电感 L_0 比动铁心动作前电感 L_0 大,因此这一阶段 i_2 上升率低于0- t_1 阶段 i_2 上升率。

t_3-t_4 阶段, i_2 稳定并保持。对于常规触头的辅助

开关,该段时间长短与操动机构脱扣系统触发后的动作快慢有关。操动机构动作越快,辅助开关切换点越早, t_4 越小。对于有延时触头的辅助开关,该段时间还与延时触头的切换点有关,切换点越靠后, t_4 越大。

t_4-t_5 阶段,为辅助开关切换后,线圈电流从稳定值降为 0 的时间。对于常规触头的辅助开关,该段时间与操动机构分闸/合闸末端的速度有关,速度越大, t_4-t_5 时间越小。对于有延时触头的辅助开关,该段时间与延时装置有关。

$0-t_2$ 阶段为电磁铁动作时间, t_2-t_4 阶段由操动机构自身动作快慢决定。对于弹簧操动机构,在不改变脱扣结构情况下,一般通过减小 $0-t_2$ 这一段时间来降低分闸时间。

3.5.1 气隙对时间影响

同一电磁铁在不同气隙下的电流波形实验图见图 8。从电气方面考虑,气隙越大,线圈电感越小,电流上升率越大,电磁铁 $0-t_1$ 时间越短;从机械方面考虑,气隙越大,电磁铁吸力越小,电磁铁 t_1-t_2 越长。通常情况下,机械方面的原因是影响电磁铁动作时间的主要因素,实验也验证了这一结论。如图 8 所示,电磁铁气隙从 6~8 mm 调整过程中,其吸合到底时间即 $0-t_2$ 时间越来越长。

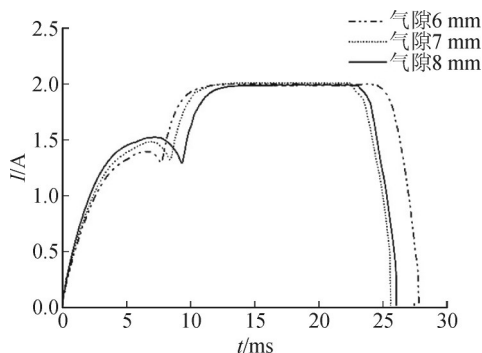


图 8 不同气隙下电磁铁电流波形图

Fig. 8 The current diagram of coils under different air gaps

反过来说,气隙越小,动铁心动作越快,但不一定能够使弹簧操动机构脱扣时间最短。气隙过小,会导致动铁心吸合到底时其工作行程不能使脱扣掣子完全脱离保持状态,从而导致脱扣时间更长。如图 8 所示,电磁铁气隙为 6 mm 时其吸合到底时间最短,但线圈电流经辅助开关切换最晚,脱扣时间最长。

不同气隙下脱扣示意图见图 9。图 9(a)电磁铁气隙较小,电磁铁撞击杆吸合到底,一级脱扣掣子受撞击杆作用逆时针运动,但未完全脱离保持状态,二级脱扣掣子还不能自由释放,需要依靠二级脱扣掣子将一级脱扣掣子“挤开”完成后续脱扣动

作,因此脱扣时间较长。图 9(b)电磁铁气隙较大,撞击杆吸合到底,一级脱扣掣子已经完全打开,二级脱扣掣子可以比较顺利的进行脱扣动作,脱扣时间相对较短。

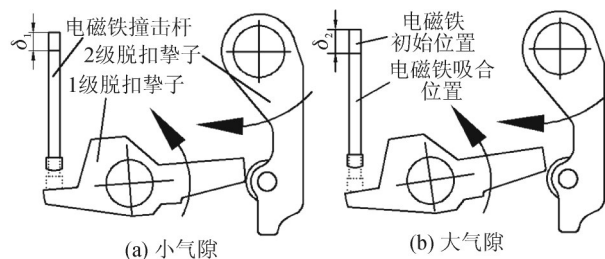


图 9 不同气隙下操动机构脱扣示意图

Fig. 9 The diagram of tripping operation mechanism under different air gaps

3.5.2 匝数对时间影响

阻值相同、匝数不同的 3 个电磁铁在同一气隙下的电流波形实验图见图 10。根据分析,匝数越小,线圈电感越小,总安匝数越大,因此匝数小的电磁铁脱扣时间最小,实验电流波形也验证了上述分析。图 10 中,1 670 匝的电磁铁电流上升率最大,同时吸力最大,撞击杆吸合到底时线圈电流触底时间最短,整个脱扣时间也是最短。

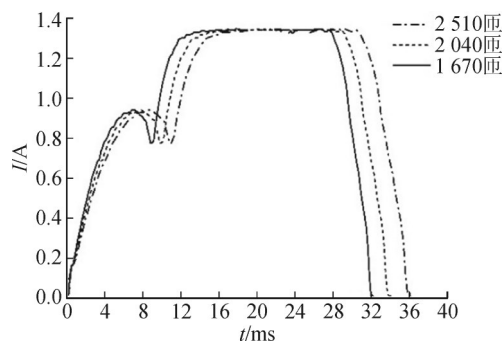


图 10 不同匝数下电磁铁电流波形图

Fig. 10 The current diagram of coils under different turns

4 结论

文中以弹簧操动机构用螺线管式电磁铁为研究对象,对其磁路进行了计算,并结合试验对其力值特性和时间特性进行了分析,主要得出以下结论^[18-20]:

1) 气隙过大或过小都不利于电磁铁发挥最佳时间特性,需要结合具体结构进行试验验证,得出电磁铁最优气隙。

2) 线圈匝数对于电磁铁力值特性和时间特性都有重大影响,一般情况下,减小匝数会使电磁铁特性朝着有利于工程需要的方向改变。

文中在计算中做了一些近似处理,在实际应用时需要根据具体结构和试验数据对计算参数做一定的修正。

参考文献:

- [1] 邹继斌. 磁路与磁场[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
ZOU Jibin. Magnetic circuit and magnetic field[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998.
- [2] 戴道生, 钱昆明. 铁磁学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
DAI Daosheng, QIAN Kunming. Ferromagnetic[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [3] 杨祚新. 电磁铁应用设计计算方法[J]. 机床电器, 1996, 1(5): 44-46.
YANG Zuoxin. The design and calculation method of electromagnet[J]. Machine Tool Electric Apparatus, 1996, 1(5): 44-46.
- [4] 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): 6-9.
MEI Liang, LIU Jinglin, FU Chaoyang. Calculation of electromagnet attractive force and simulation analysis[J]. Micromotors, 2012, 45(6): 6-9.
- [5] 陈保伦, 文亚宁. 断路器弹簧操动机构介绍[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 75-80.
CHEN Baolun, WEN Yaning. Introduction of spring operating mechanism for CB[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 75-80.
- [6] 苑舜. 高压断路器弹簧操动机构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
YUAN Shun. Spring operating mechanism for circuit breaker[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [7] 张冠生, 陆俭国. 电磁铁与自动电磁元件[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
ZHANG Guansheng, LU Jianguo. Electromagnet and automatic electromagnetic component[M]. Beijing: China Machine Press, 1982.
- [8] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
XU Guozheng, ZHANG Jierong, QIAN Jiali, et al. Principle and application of high voltage circuit breaker[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [9] 赵靖英, 姚帅亮, 赵纪新, 等. 一种螺管式电磁铁的设计及静态特性研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(16): 22-27.
ZHAO Jingying, YAO Shuailiang, ZHAO Jixin, et al. Structure design and static characteristics analysis of a kind of solenoid electromagnet[J]. Low Voltage Apparatus, 2017(16): 22-27.
- [10] 吴倩, 李建, 苏秀苹. 一种螺管式电磁铁的静态特性及其影响因素分析[J]. 电器与能效管理技术, 2017(1): 8-12.
WU Qian, LI Jian, SU Xiuping. Static characteristics and influencing factors of a solenoid magnet[J]. Low Voltage Apparatus, 2017(1): 8-12.
- [11] 王强. 螺管式电磁铁设计与仿真分析[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2013.
WANG Qiang. The solenoid electromagnet design and simulation analysis[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2013.
- [12] 蔡国廉. 电磁铁[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1965.
CAI Guolian. Electromagnet[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1965.
- [13] 白志红, 周玉虎. 电磁铁的动态特性的仿真与分析[J]. 电力学报, 2004, 19(3): 200-201.
BAI Zhihong, ZHOU Yuhu. Dynamic simulation and analysis of electromagnetic actuator[J]. Journal of Electric Power, 2004, 19(3): 200-201.
- [14] 王淑红, 肖旭亮, 熊光煜. 直流恒力电磁铁特性[J]. 机械工程学报, 2008, 44(2): 244-247.
WANG Shuhong, XIAO Xuliang, XIONG Guangyu. Direct current electromagnets with constant traction characteristic[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(2): 244-247.
- [15] 周小擎. 直流电磁铁的优化设计[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1994, 22(5): 138-146.
ZHOU Xiaoqing. Optimal design of DC electromagnet[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 1994, 22(5): 138-146.
- [16] 钱家骊. 电磁铁吸力公式的讨论[J]. 电工技术, 2001(1): 59-60.
QIAN Jiali. Discussion on formula of electromagnet suction[J]. Electrical Technology, 2001(1): 59-60.
- [17] 李泉凤. 电磁场数值计算与电磁体设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
LI Quanfeng. Numerical calculation of Electromagnetic Field and electromagnetic body design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [18] 马立玲, 王军政, 赵江波, 等. 电磁铁静态性能测试系统研究与应用[J]. 液压与气动, 2004(7): 34-36.
MA Liling, WANG Junzheng, ZHAO Jiangbo, et al. The study and application of the test system for static and dynamic character of proportional solenoid[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2004(7): 34-36.
- [19] 朱占山, 于生宝, 陈旭, 等. 气隙对电感磁芯内部磁场分布及电感的影响[J]. 磁性材料及器件, 2016, 47(1): 57-60.
ZHU Zhanshan, YU Shengbao, CHEN Xu, et al. Influence of air-gap on the magnetic flux density and inductance of magnetic core inductor[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2016, 47(1): 57-60.
- [20] 倪光正. 工程电磁场原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
NI Guangzheng. Principle of engineering electromagnetic field[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.

刘超(1988—), 男, 工程师, 主要从事高压断路器设备的技术改进及操动机构的研发工作(E-mail: Dgzxlc@163.com)。