

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.09.014

带弹簧负载的电磁铁动态特性仿真与实验研究

黄晓凡, 田忠涛, 梁海彤

(中国航天空气动力技术研究院 测控事业部, 北京 100074)

摘要:针对很多关于电磁铁的计算和仿真模型无法应用在磁路饱和的场合以及没有对仿真结果进行实验验证的问题,建立了包括电磁铁本体和两级回复弹簧在内的整个系统的数学模型,采用了 Maxwell 有限元分析软件进行了仿真。对相应仿真模型的电磁铁实物进行了实验,对比了实验电流-时间曲线和仿真电流-时间曲线。在磁路饱和的情况下,给出了包括电磁铁线圈电流-时间曲线、电磁力-时间曲线等在内的系统动态特性仿真曲线,详细解释了各曲线的含义,提出了在电磁铁断电后回复弹簧作用下的电磁铁发电效应的概念。实验结果表明:实验电流-时间曲线和仿真电流-时间曲线具有较高的吻合度,验证了仿真模型及仿真曲线的准确性,表明了仿真模型不仅适用于磁路不饱和情况,也适用于磁路饱和情况。

关键词:电磁铁;数学模型;有限元分析;动态特性

中图分类号:TH39;TM574

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)09-1024-04

Dynamic characteristics simulation and experiment of solenoid with spring load

HUANG Xiao-fan, TIAN Zhong-tao, LIANG Hai-tong

(Measurement & Control Department, China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China)

Abstract: Aiming at solving problems such as a lot of computation and simulation models of solenoid can't be used in the case of magnetic circuit saturation and test verification wasn't made, a whole system mathematical model including solenoid itself and two-stage return springs was established, and a simulation using Maxwell FEA software was made. An experiment was made with a real solenoid which corresponds to the simulation model, and the experiment current VS time curve and the simulation one were compared. The system's dynamic characteristics simulation curves including the winding current VS time & the electromagnetic force VS time were given in the case of magnetic circuit saturation, and detailed analyses of them were made. The concept of effect of solenoid generating electric power with the action of return springs after solenoid being power off was put forward. The test result shows that the experiment current VS time curve and the simulation one coincided with each other highly, which proves the accuracy of the simulation model and simulation curves and also indicates that this simulation model can be used in both cases of magnetic circuit unsaturation and saturation.

Key words: solenoid; mathematical model; finite element analysis; dynamic characteristics

0 引 言

电磁铁是一种电磁元件,在智能控制、自动化电器等方面有着广泛的应用^[1-3]。目前,很多文献集中于利用磁路和有限元方法对电磁铁静态吸力进行仿真分析和计算^[4],然而作为执行元件,其动态特性(如动电磁力-时间曲线)等直接影响着整个系统的响应时间,仅

仅分析电磁铁的静态特性是不够的。文献[5]利用 Magnet 有限元分析软件对电磁铁进行了动态仿真分析,但是没有进行弹簧加载形成一个完整的机电系统,仅仅对电磁铁本身的电磁力-时间曲线进行了分析,而且整个分析是建立在不计饱和的磁路分析基础上(即只适用于线性磁路),无法应用在磁路材料出现饱和的场合。

本研究将构建电磁铁本体和回复弹簧在内的整个机电系统,建立数学模型,利用 Maxwell 有限元分析软件进行动态特性仿真,对相应模型的电磁铁实物进行实验,以验证仿真模型的准确性。

1 带弹簧负载电磁铁结构组成和工作原理

电磁铁机械结构如图 1 所示。

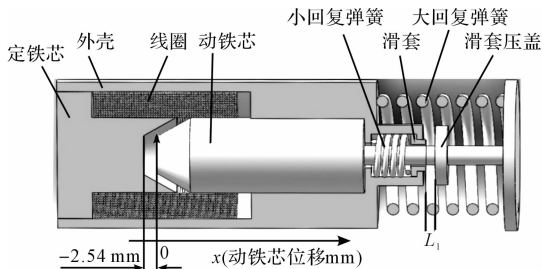


图1 电磁铁机械结构图

电磁铁机械结构主要由定铁芯、外壳、线圈、动铁芯、小回复弹簧、滑套、滑套压盖(与动铁芯固连)、大回复弹簧等组成。其中定铁芯、外壳和动铁芯构成主要铁磁磁路,材料均为电工纯铁。图1中,以动铁芯处于完全打开时的左端面初始位置为坐标原点,并建立 $0x$ 坐标轴(由于是2D模型,并且动铁芯只存在沿着 x 轴的一维直线运动,因此只需要建立 x 轴即可),于是定铁芯位于 $x = -2.54$ mm处,滑套压盖与滑套距离为 $L_1 = 2.2$ mm。

电磁铁绕组的外接电路如图2所示。

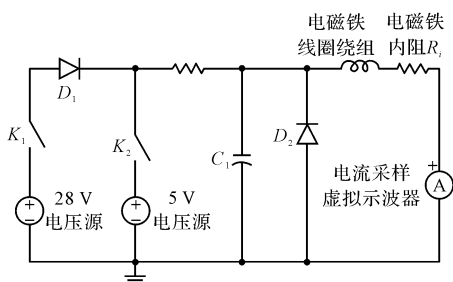


图2 电磁铁线圈绕组外接电路图

系统工作过程和原理如下:如图1和图2所示,初始时刻,闭合开关 K_1 (开关 K_2 处于打开状态),线圈绕组上加上28 V电压,由于绕组中产生电流,动铁芯从初始位置($x = 0$)开始向左吸合,压缩大回复弹簧(大回复弹簧开始对动铁芯产生反作用力),当动铁芯运动 L_1 ($L_1 = 2.2$ mm)距离后,由于滑套压盖与滑套开始接触而压缩小回复弹簧(小回复弹簧开始对动铁芯产生反作用力),此后大小两个回复弹簧均对动铁芯产生反作用力,直到最后动铁芯吸合到位(称为闭合,此

时动铁芯位置为 $x = -2.54$ mm)。吸合到位后,电路断开开关 K_1 ,闭合开关 K_2 ,也就是说在线圈绕组上加上5 V电压,这样就只有一个较小的电流使得动铁芯处于闭合的保持位置(保持电压改为较小的5 V,是因为在动铁芯闭合位置时,只需要较小的电流就可以有较大的保持电磁力,实际应用中可以省电)。以上是电磁铁的吸合过程。

在5 V电压下,动铁芯在闭合位置保持500 ms,之后将开关 K_2 也打开,线圈绕组电流逐渐下降,直到电磁力小于两个弹簧的反作用力时,动铁芯开始向右打开,回到初始位置($x = 0$)。这是电磁铁的打开过程。

2 带弹簧负载电磁铁数学模型和有限元分析模型

2.1 带弹簧负载电磁铁数学模型

根据电机学机电能量转换原理^[6-7],不论磁路是否饱和(即是否非线性),对于特定线圈匝数 N (本研究中 $N = 1\ 000$)的电磁铁都有电磁力表达式(F_{em} 为矢量,即变量字符 F_{em} 本身包含正负号):

$$F_{em} = \frac{\partial W'_m(i, x)}{\partial x} = \frac{\partial \left[\int_0^i \psi(i, x) di \right]}{\partial x} = F_{em}(i, x) \quad (1)$$

线圈回路电路方程为:

$$U = iR_i + \frac{d\psi}{dt} = iR_i + \frac{d\psi(i, x)}{dt} \quad (2)$$

运动方程为:

$$F_{em}(i, x) + F_f = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3)$$

F_f 为大小两个回复弹簧的反作用力矢量,矢量表达式如下:

$$F_f = K_1(24 - x) + 2.8 * \left(-\text{int} \left(\frac{x}{2.2} \right) \right) \quad (4)$$

对以上公式的说明:

(1) 式(1~4)中: F_{em} —电磁力,N; i —线圈中电流,A; x —动铁芯位移,mm; ψ —磁路磁链,Wb; W'_m —系统磁共能,J; U —线圈供电电压,V; R_i —线圈内阻, $R_i = 12 \Omega$; F_f —弹簧反作用力,N; m —动铁芯及其它运动部分的质量, $m = 0.112$ kg; K_1 —大回复弹簧弹性系数, $K_1 = 3.6$ N/mm;int—取整函数。

(2) 考虑到动铁芯运动路径光滑(动铁芯与外壳之间的滑动接触表面粗糙度很光滑),且系统处于空气中,因此在运动方程中忽略了阻尼力;

(3) 关于式(2)的解释。当动铁芯从完全打开位

置($x = 0$)到闭合($x = -2.54$ mm)之前, $U = 28$ V,当动铁芯闭合及其后 500 ms 内, $U = 5$ V,之后 $U = 0$;

(4)对式(4)的解释。大、小回复弹簧均处于预紧状态; k_1 为大回复弹簧的弹性系数,由公式可见,在整个动铁芯位移内($x = 0 \sim -2.54$ mm),大回复弹簧反作用力从 85 N 增加到 95 N;而小回复弹簧在动铁芯运动在 $x = -2.54$ mm \sim -2.2 mm 区间内提供 28 N 的反作用力(由于小回复弹簧在此区间的压缩变化量仅为 $2.54 - 2.2 = 0.34$ mm,所以反作用力近似为恒定的 28 N)。

公式(1~4)构成了带弹簧负载电磁铁的完整方程,原则上可以解出电磁铁的电流 i ,位移 x ,电磁力 F_{em} 等参数,但是通过分析法求解极为困难(尤其是在磁路饱和和无法给出线性简化方程情况下),利用能量增量法等也只能给出基本近似的解,因此需要利用有限元分析软件如 Maxwell 进行建模求解。

2.2 带弹簧负载电磁铁有限元分析模型

Maxwell 软件有限元建模仿真步骤为:根据机械结构参数建立有限元几何模型 \rightarrow 定义材料属性 \rightarrow 设定激励源等求解参数(包括外电路和负载设置) \rightarrow 网格剖分 \rightarrow 选定合适的求解器仿真计算及后处理。

由对称性,本研究在 Maxwell 中建立电磁铁一半的有限元几何模型如图 3 所示。

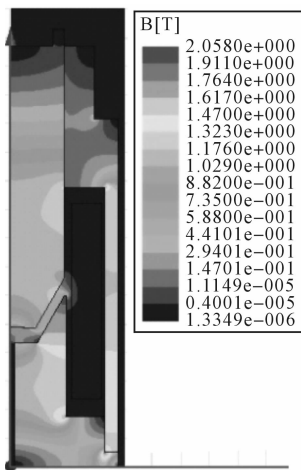


图 3 电磁铁有限元几何模型及磁路磁密 B 分布图

动铁芯等磁路材料均为电工纯铁。大、小两个回复弹簧并没有出现在模型中,而是在软件的“Motion Setup”界面中的“Load Force”栏中定义^[8],具体设置为: $3.6 * ((-Position) * 1000 + 24) + 28 * (\text{int}((-Position * 1000)/2.2))$,其中 Position 为动铁芯位移,而电磁铁外接仿真电路与图 2 一致。

3 带弹簧负载电磁铁动态特性仿真分析

(1)磁路磁密 B (T)分布图

动铁芯处于打开位置($x = 0$)且线圈电流为 $i = 1$ A 左右时,磁路的磁密分布如图 3 所示。可见,定铁芯的局部磁密达到 1.8 T \sim 1.9 T,而电工纯铁的饱和磁密 B 约在 1.6 T 左右,可见已经饱和。

(2)线圈电流 i 的时间曲线($i = i(t)$)

线圈电流 i 的时间曲线($i = i(t)$)如图 4 所示。

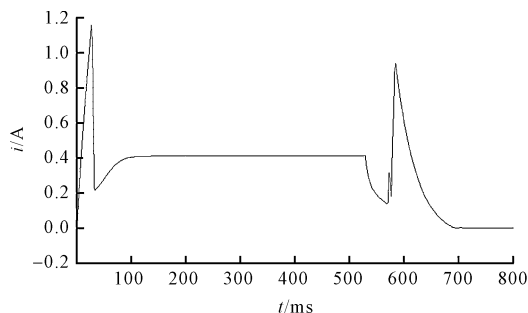


图 4 线圈电流 i 的时间曲线($i = i(t)$)

横坐标为时间 t (ms),纵坐标为线圈电流 i (A)。第一个峰值电流为 1.16 A,动铁芯闭合保持电流为 0.42 A。峰值电流发生在 28 毫秒,在 34 ms 进入闭合保持状态时间,此时关闭 28 V 电压,接通 5 V 电压,之后持续约 500 ms 也关闭 5 V 保持电压。由于线圈内电流不能突变,开始通过图 2 中二极管 D2 续流,电流从 0.42 A 开始下降,下降到一定程度(电磁力开始小于两个回复弹簧的反作用力时),在 575 ms 时,弹簧弹开动铁芯,电磁铁处于发电状态(反电势方向变为反向,弹簧势能转化为电能,对应图中 575 ms 处和 586 ms 处两个尖峰,其中小尖峰为大小两个回复弹簧共同弹开作用所致,对应约 0.3 A,大尖峰为大回复弹簧弹开作用所致,对应约 0.9 A;本来续流电流是逐渐减小的,但是发电状态的反电势助长了电流的增加,因此会出现两个尖峰电流值),随后电流通过续流回路持续减小为 0。

(3)电磁力的时间曲线($F_{em} = F_{em}(t)$)

电磁力 F_{em} 的时间曲线($F_{em} = F_{em}(t)$)如图 5 所示。横坐标为时间 t (ms),纵坐标为电磁力 F_{em} (N)。由图 4 和图 5 知,在 26 ms 时线圈电流约 1 A,且动铁芯还未动作(即 $x = 0$ mm,动铁芯和定铁芯之间气隙为 $\delta = 2.54$ mm),此时的电磁力 F_{em} 约为 -90 N。而在闭合位置($x = -2.54$ mm,动铁芯和定铁芯之间气隙为 $\delta = 0$)且保持电流为 0.4 A 时,电磁力 $F_{em} = -193$ N。

可见,在闭合位置时,即使电流很小,但是由于动铁芯和定铁芯之间气隙 δ 为 0,电磁力也比动铁芯处于打开位置电流较大时大很多。

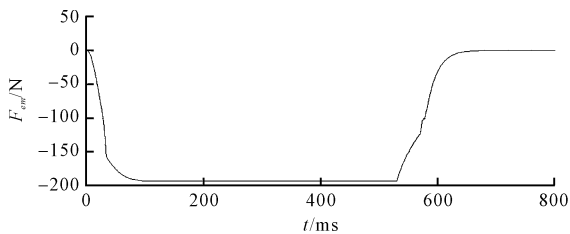


图5 电磁力的时间曲线($F_{em} = F_{em}(t)$)

4 带弹簧负载电磁铁动态特性的实验验证与结果分析

本研究搭建图 1 和图 2 所示的电磁铁结构和电路图进行实验,通过示波器测量线圈电流采样电阻上的电压,得到采样电压曲线如图 6 所示(采样电阻为 0.08Ω)。

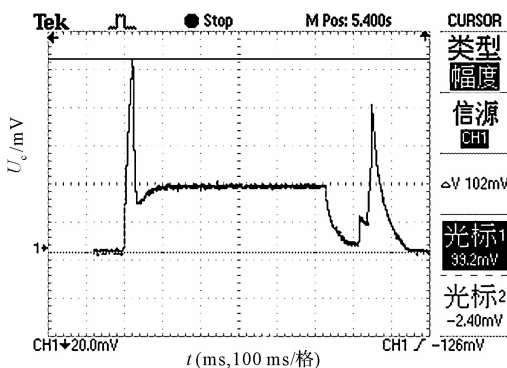


图6 线圈电流采样电阻上的采样电压 u_c 的时间曲线($u_c = f(t)$)

本研究将采样电压换算为电流(电流波形与采样电压形状一致),第一个峰值电流 1.25 A,保持电流 0.45 A;峰值电流时间发生在 28.4 毫秒,在 33 ms 进入吸合保持状态时间。

在 530 ms 时开始通过图 2 中二极管 D2 续流,电流从 0.45 A 开始下降,下降到一定程度,在 570 ms 时,弹簧弹开铁芯,电磁铁处于发电状态(弹簧势能转化为电能,对应图中 570 ms 处和 582 ms 处两个尖峰),随后电流通过续流回路持续减小为 0。

对比图 4 和图 6,可见电流波形的试验结果与仿真结果基本一致,验证了 Maxwell 仿真模型的正确性。

5 结束语

对于电磁铁系统,由于磁路饱和,给其数学模型的解析式求解带来了很大难度。利用 Maxwell 有限元分析软件可以方便的建立磁路饱和情况下的有限元模型,对动态特性方程进行求解。

本研究构建了包括线圈在内的电磁铁本体和大、小两级回复弹簧加载的整个系统,建立了数学模型,利用 Maxwell 有限元分析软件进行仿真。给出了系统的典型动态特性仿真曲线,并进行了详细的分析。另外对相应模型的电磁铁实物进行实验,实验结果表明二者具有较高的吻合度,验证了仿真模型的准确性。显然,本研究提出的仿真模型和分析方法不仅适用于磁路不饱和情况,也适用于磁路饱和情况,具有较广泛的实用性。

参考文献 (References):

- [1] 王扬彬,徐兵,刘英杰. 基于 Maxwell 及 AMESim 的电磁铁动态特性仿真分析[J]. 机床与液压,2008,36(9):104.
- [2] 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.
- [3] 孟跃进. 直流电磁铁磁路的分析和计算[J]. 上海电器技术,2008(4):22.
- [4] 丁玉红. 一种小型直流电磁铁的结构设计[J]. 机电元件,2008,28(4):35-36.
- [5] 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.
- [6] 陈世元. 电机学[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [7] 王宝龄. 电磁电器设计基础[M]. 北京:国防工业出版社,1989.
- [8] 赵博. Maxwell 12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

黄晓凡,田忠涛,梁海彤. 带弹簧负载的电磁铁动态特性仿真与实验研究[J]. 机电工程,2017,34(9):1024-1027.

HUANG Xiao-fan, TIAN Zhong-tao, LIANG Hai-tong. Dynamic characteristics simulation and experiment of solenoid with spring load[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(9):1024-1027.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>