

1-4-2019

Counterforce Characteristics of Shrapnel in Magnetic Latching Relay Based on Abaqus

Xiuping Su

Institute of Electrical Apparatus, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Jiaying Dong

Institute of Electrical Apparatus, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Yanhua Qiao

Institute of Electrical Apparatus, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Huang Min

Institute of Electrical Apparatus, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Counterforce Characteristics of Shrapnel in Magnetic Latching Relay Based on Abaqus

Abstract

Abstract: A 3D model of contact system in magnetic latching relay was established by the software Pro/E, and the shrapnel deformation by force was analyzed in the contact system using finite element analysis software Abaqus. The advantages of Abaqus software in the multibody system simulation were analyzed and summarized, *a modeling and simulation approach to contact multibody system in magnetic latching relay based on Abaqus was proposed*. The selection of element type, technology of mesh division, definition of boundary condition, and establishment of finite element model were studied. The *non-convergence problems were solved in the simulation analysis by adding binding constraints*. The simulation was verified by experiment and it was shown that *these models could accurately calculate counterforce characteristics of shrapnel in magnetic latching relay by Abaqus software*. The study can provide the basis for the optimization of magnetic latching relay.

Keywords

shrapnel, counterforce characteristics, finite element, abaqus, multibody system

Recommended Citation

Su Xiuping, Dong Jiaying, Qiao Yanhua, Huang Min. Counterforce Characteristics of Shrapnel in Magnetic Latching Relay Based on Abaqus[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(4): 1528-1534.

基于 Abaqus 的磁保持继电器中弹片反力特性研究

苏秀苹, 董家盈, 乔延华, 黄敏

(河北工业大学 电器研究所, 天津 300130)

摘要: 利用软件 Pro/E 建立了磁保持继电器触头系统三维模型, 运用有限元分析软件 Abaqus 对触头系统中柔体部件弹片受力发生形变进行了有限元分析。分析和总结了 Abaqus 软件在多体系统仿真方面的优势, 提出了基于 Abaqus 的继电器触头系统多体结构建模与仿真方法, 对触头系统有限元分析中单元类型的选取、网格划分的技术、边界条件的定义、整体有限元模型的建立等数值模拟技术进行了深入研究, 通过添加绑定约束解决了仿真分析中无法达到收敛的问题。对仿真进行了试验验证, 结果表明利用 Abaqus 软件建立的模型能够准确地计算磁保持继电器触头系统中弹片的反力特性。此研究可为磁保持继电器的优化提供依据。

关键词: 弹片; 反力特性; 有限元; Abaqus; 多体系统

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 04-1528-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201804039

Counterforce Characteristics of Shrapnel in Magnetic Latching Relay Based on Abaqus

Su Xiuping, Dong Jiaying, Qiao Yanhua, Huang Min

(Institute of Electrical Apparatus, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: A 3D model of contact system in magnetic latching relay was established by the software Pro/E, and the shrapnel deformation by force was analyzed in the contact system using finite element analysis software Abaqus. The advantages of Abaqus software in the multibody system simulation were analyzed and summarized, a modeling and simulation approach to contact multibody system in magnetic latching relay based on Abaqus was proposed. The selection of element type, technology of mesh division, definition of boundary condition, and establishment of finite element model were studied. The non-convergence problems were solved in the simulation analysis by adding binding constraints. The simulation was verified by experiment and it was shown that these models could accurately calculate counterforce characteristics of shrapnel in magnetic latching relay by Abaqus software. The study can provide the basis for the optimization of magnetic latching relay.

Keywords: shrapnel; counterforce characteristics; finite element; abaqus; multibody system

引言

随着微电子技术和电子元件的飞速发展, 对

电器开关大多要求在完成其控制功能的同时, 尽可能地减小功率消耗^[1-2]。磁保持继电器就是一种能满足低功耗需求的新型控制器。它的电磁系统中含有永久磁铁, 正常工作时, 线圈不通电, 靠永久磁铁将触头保持在某一稳定状态, 达到节能的目的; 要改变触头工作状态, 只需在线圈中通以一定方向、大小的电流脉冲, 就可以完成触头的转换, 即



收稿日期: 2016-04-08 修回日期: 2016-07-15;
作者简介: 苏秀苹(1966-), 女, 河北邯郸, 博导, 教授, 研究方向为电器可靠性及现代设计技术等;
董家盈(1992-), 女, 河北承德, 硕士生, 研究方向为电器现代 CAD 技术; 乔延华(1982-), 女, 河北承德, 博士生, 研究方向为电器现代 CAD 技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 1528 •

采用脉冲来驱动继电器动作, 脉冲消失后可实现自保持功能, 它的这种显著特点使其在多种领域被广泛使用。磁保持继电器在触头转换过程中, 其触头系统在推动杆推动下运动, 其触头系统中的簧片和弹片会发生大的变形, 产生反力。该变形与反力的关系直接影响了继电器的动作过程, 准确分析它们的关系对磁保持继电器的设计具有重要意义。而在工程实际中, 采用商业软件进行仿真分析可明显提高效率, 其中, Abaqus^[3]是功能非常强大的商业通用有限元仿真分析软件, 广泛的模拟性能、强健的计算功能可以分析各个工程和科研领域中的问题, 该软件包括不同种类的大量单元模型, 可以建立任意几何体, 丰富的材料模型可以模拟大多数的工程材料特性。用其对磁保持继电器进行仿真, 不但可以做单一零件的力学和多物理场的分析, 同时还可以完成系统级的分析和研究。缩短研制周期、减少试验投入、避免重新设计, 大幅度地降低了开发成本, 提高了设计质量。

近年来, 国内外诸多学者已经对许多电磁式电器进行研究及 Abaqus 软件的实际应用。微型电磁继电器因其结构尺寸、力等参数均较小, 试验难度较大, 梁慧敏等^[4]设计了一种满足测试要求的专用设备, 不仅提高了继电器静态吸反力特性测试水平, 同时实现了继电器静态吸反力特性的自动测量和数据处理; 陈德为等^[5]结合 Ansys 和 Adams 软件, 仿真分析了智能接触器的动态吸合与释放过程; 刘颖异等^[6-7]针对永磁式接触器, 建立了结合 Ansys 有限元软件和 Adams 动力学软件的多体系统模型, 仿真分析了带电流反馈永磁接触器的闭合过程; 刘向军等^[8]采用一种混合人工鱼群的算法, 对磁保持继电器进行优化设计, 提高了求解速度以及寻优精度, 同时编制了其动态优化计算程序; 其中, 李慧等^[9]将软件 Abaqus 与软件 Adams 相结合, 研究了将 Abaqus 柔性三维模型转译生成可被 Adams 直接读取和处理的 MNF(Modal Neutral File) 柔性模态中性文件的方法是可行的, 为刚柔结合问题的多体动力学研究提供了新的思路和方法; 叶红

玲等^[10-11]通过对有限元软件 Abaqus 后处理进行二次开发, 采用 Python 语言实现单簧片纯弯曲过程的力学性能分析, 得到了簧片结构的最大应力和稳态弯矩; 洪昊等^[12]借助 Abaqus 软件建立某农用车前桥不等臂钢板弹簧有限元模型并对其进行瞬态显示动力学分析, 研究分析了弹簧的最大变形位移及应力特性; Shan 等^[13]应用 Abaqus 分析了高速卧式加工中心的整铸塔的静态和动态性能, 研究不同条件下的应力、变形分布、固有频率和振型。

从上述分析中可以看出, 对系统动态分析而言, 结构本身的弹性变形与系统的宏观刚体运动同等重要, 弹片结构的力学性能分析对于提高结构的稳定性和可靠性具有重要作用。研究磁保持继电器触头系统中弹片的反力特性, 建立磁保持继电器触头系统仿真模型, 运用测量装置对弹片反力特性与其形变位移进行试验, 对比有限元分析及试验测试的结果, 更好的优化系统模型结构, 提高工作的可靠性。针对磁保持继电器触头系统结构的特殊性, 本文利用 Abaqus 软件建立刚柔结合的多体系统模型^[14], 更精确的对柔体弹片进行建模和反力特性仿真分析, 节约设计成本, 为高性能磁保持继电器的优化设计打下基础。

1 基于 Abaqus 的磁保持继电器触头系统三维有限元模型的建立

1.1 Abaqus 软件简介

在机械系统中, 柔体将会对整个系统的运动过程造成重要影响, 在对运动学进行分析时如果忽略柔体的影响, 仿真计算结果会产生很大的误差, 同样整个系统的运动情况也会对每个部件的受力、运动状态造成影响, 从而决定了部件内部的应力应变分布^[15]。因此为了精确地模拟磁保持继电器触头系统的运动状态, 需要考虑柔体部件在触头系统运动过程中产生的影响。

Abaqus 软件是国际上公认的最好的 CAE 大型通用分析软件之一。其拥有更加充足的单元库, 使用者仅需要提供结构的几何形状、材料特性、边界

条件和载荷等数据。在非线性问题的分析中,可以自动挑选比较合适的载荷增量和收敛准则,并在计算过程中不断地调整这些数值,以确保获得准确的计算结果^[16]。

Abaqus 软件相较于 Adams 软件,针对于多体系统或者刚柔耦合动力学仿真分析有着很好的优势。在 Adams 中,所有物体均以刚体定义,忽略结构柔度对系统的影响,要在 Adams 中实现刚体和柔体相结合的系统动态分析可采用如下 3 种方法建立柔性体^[17]: (1) 采用柔性梁单元连接,使用的单元数目越多越能模拟实体部件,但其实质还是刚性构件柔性连接,只适用于简单的构件且不属于真正的柔性体; (2) 利用 Adams/AutoFlex 模块生成柔性体 MNF 文件来代替原来的刚性体。 (3) 直接读取其他有限元分析软件生成的模态中性文件来建立柔性体。这三种方法建立的柔性体在处理大变形问题时均会产生较大的误差。而通过 Abaqus 软件,不仅可以避免 Adams 软件在处理大变形问题中产生的较大误差,还可以直接建立柔体部件。对于复杂机械的零件也同样适用,也不需要借助其它软件的参与,简化建模过程。可以很方便的考虑柔体部件对机械系统运动的影响,并得到基于精确动态仿真结果的分析结果,提高分析精度。针对此次仿真分析,选用 Abaqus 可以获得较精确的计算结果。

以某型磁保持继电器为研究对象,对其触头系统中弹片进行建模和反力仿真分析。磁保持继电器实体模型中动触点、簧片组件及弹片作为运动部件。

1.2 磁保持继电器触头系统结构

磁保持继电器触头系统模型所需部件分别是分流片、动簧片、弹片及动触点,首先利用三坐标测量仪对各个零部件进行精确的尺寸测量,避免建立的模型与真实模型出现一些偏差影响后期的仿真计算结果,然后在 Pro/E 软件中根据部件实际尺寸对各个零部件进行建模,建立磁保持继电器触头系统各部件的三维模型,最后导入软件 Abaqus 中,

设置定义分流片、动簧片及弹片三个部件为柔体部件(Deformable Part)。其中,动触点在模型中起连接固定作用,可以忽略其结构柔度对系统的影响,因此定义为离散刚体部件(Discrete Rigid Part)^[18-19]。对应各部件材料参数如表 1 所示。

表 1 有限元模型参数
Tab. 1 Parameters of finite element model

名称	材料	弹性模量/GPa	泊松比
分流片	纯铜 T2Y2	108.0	0.31
动簧片	铜合金 K57	131.0	0.32
弹片	不锈钢 304	194.0	0.30

磁保持继电器触头系统的主要部分如图 1 所示。分流片和动簧片固定在一起,分流片与动簧片合称簧片组件,通过动触点将弹片与簧片组件固定在一起。当磁保持继电器闭合时,对弹片前端施加垂直作用力,弹片带动簧片组件及动触点向 x 轴负方向运动。闭合过程中可以通过改变弹片受力大小控制弹片的形变量。

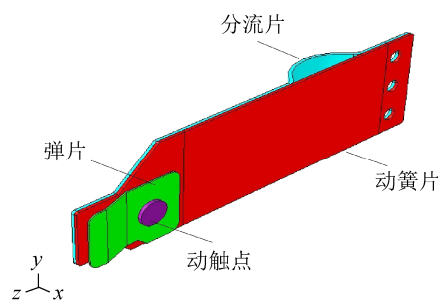


图 1 磁保持继电器触头系统模型

Fig. 1 Model of contact system in magnetic latching relay

1.3 磁保持继电器触头系统的网格划分

Abaqus/CAE 的网格划分,首先是生成三维几何部件,再通过布置种子和设置单元形状来控制网格密度和位置,最后使用自动算法直接生成三维网格。

利用 Abaqus 建立的模型网格剖分如图 2 所示。Abaqus 中的非协调模式单元在单元扭曲比较小的情况下,不仅克服了剪切自锁问题,同时在厚度方向上只需很少的单元,就可以得到在弯曲问题中与二次单元相当的结果,很明显的降低了计算

成本并且得到很精确的位移结果。根据簧片组件及弹片受力和变形的特点, 本文选用非协调模式 (Incompatible Modes) 单元来模拟柔体部件, 所选的三维实体单元均为 C3D8I (8 节点六面体线性非协调模型单元), 以解决剪切自锁问题。其中, 离散刚体部件三维实体单元为 R3D4 (4 节点三维线性刚体单元)。Abaqus 中几何模型的建立采用基于特征参数化建模方法。由于弹片在受力过程中弯曲变形较大, 因此需要细化网格, 即对弹片部件进行较密的网格划分, 同时, 细化网格也是解决收敛问题的一个重要方法, 而触头系统中的簧片组件变形较小, 可以将全局种子 (global seed) 设置较大, 缩短软件仿真计算时间。考虑到动触点形状的不规则化, 采用自由网格灵活的网格划分技术, 弹片与分流片采用扫掠网格的网格划分技术。根据动簧片的结构规则特点, 可采用结构化网格和扫掠网格相结合的划分技术。

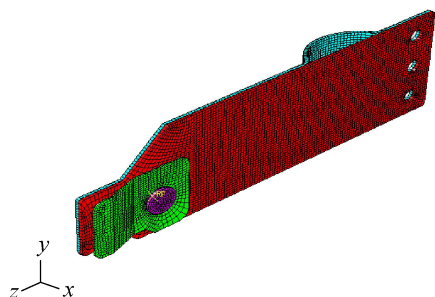


图 2 磁保持继电器触头系统的网格剖分图
Fig. 2 Mesh division of contact system
in magnetic latching relay

1.4 磁保持继电器触头系统的边界条件

Abaqus 软件 Load 功能模块中含有多种类型的边界条件^[3]: 对称/反对称/固支、位移/速度、加速度/角加速度等。其中, Abaqus 模型中的 6 个自由度, 坐标轴编号不是常用的 X、Y、Z, 而是 1、2、3, 因为模型的坐标系也可以是球坐标系或柱坐标系等。自由度 1、2、3 (U_1 、 U_2 、 U_3) 分别代表沿坐标轴 1、2、3 方向上的平移自由度; 自由度 4、5、6 (UR_1 、 UR_2 、 UR_3) 分别代表坐标轴 1、2、3 上的旋转自由度。

根据弹片反力特性测试情况, 对簧片组件及动触点添加相应的边界条件。由测试试验简图 4 可知, 模具将固定簧片组件前端, 模拟其装配到磁保持继电器外壳时的状态, 同时在实验过程中保证动触点的固定位置。因此, 约束簧片组件前端及整个动触点的所有自由度, 即添加固支边界条件 (ENCASTRE), 这样就使得模型中相应自由度 $U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$, 与实际试验情况吻合。

1.5 仿真过程中出现的问题与解决方案

根据仿真分析得出, 初始结果无法收敛, 出现刚体位移的现象, 通过检查已有的边界条件和约束关系, 为消除刚体位移进行以下两种方案对比仿真。

(1) 方案一

在部件上的任意一点和地面之间定义一个很软的弹簧, 来约束刚体位移。将对应出现刚体位移的自由度定义为一个较小的数值 (太小则不足以约束刚体位移, 太大则会影响变形)。如果在多个方向上出现了刚体位移, 就要分别在相应的自由度上添加弹簧。

仿真效果: 动触点、弹片及动簧片三个部件建模仿真, 解决了收敛问题, 可消除刚体位移; 但四个部件整体建模进行仿真, 仿真结果仍然无法消除刚体位移。

(2) 方案二

使用绑定约束 (Tie)。当某一对接触面在整个仿真计算过程中都是紧密接触的或是此对接触面的接触状态对整体模型的影响不大, 可以考虑将它们之间的接触关系改为绑定约束, 这样会有利于消除刚体位移, 并且大大减少计算接触状态所需要的迭代。

根据实物运动过程, 弹片与动簧片及动簧片与分流片之间接触面不存在相对运动, 所以在 Abaqus 分析过程中选择绑定约束模拟它们的接触面。将弹片与动簧片定义绑定约束 1, 动簧片和分流片之间定义为绑定约束 2。设置位置误差限为 0.02 mm, 略大于绑定约束中主面与从面在模型中

的距离, 确保绑定约束的成功建立。施加绑定约束的模型效果图如图3所示。

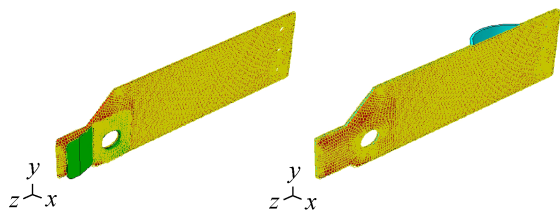


图3 定义绑定约束的模型效果图
Fig. 3 Model of binding constraints

仿真效果: 解决了收敛问题, 可消除刚体位移。

(3) 方案总结

根据两组仿真结果得出, 使用绑定约束可以很好的消除刚体位移, 大大减少计算接触状态所需要的迭代, 缩短了软件仿真运行时间。综上所述, 采用方案二。由此, 完成了磁保持继电器触头系统刚柔结合的多体系统模型的建立。

2 弹片反力特性的测试

磁保持继电器触头系统中弹片的反力特性反映的是弹片前端受力与此处形变位移之间的关系。本次测试中测量装置采用 KH-30 电子数显拉压弹簧测试仪, 用相应模具固定实物部件。测量过程中, 通过转动手柄使测试仪上模下端面与弹片前端接触, 根据弹片所受的力值数据将手柄下压, 记录此时的压缩距离。试验测试简图如图4所示。

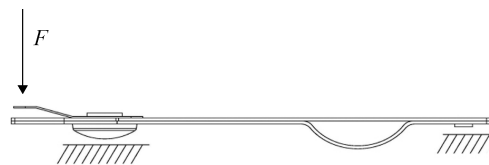


图4 试验测试简图
Fig. 4 Schematic diagram of the experiment

3 仿真结果与试验结果的比较

本文利用 Abaqus 软件在多体系统仿真方面的优势, 针对该模型, 采用其 Abaqus/Standard 求解器进行分析计算。建立弹片部件处于自然弯曲状态的磁保持继电器触头系统模型, 仿真分析弹片从自由弯曲状态到变形所得到的压缩量。通过对弹片前端表面添加一垂直外力 F , 当弹片前端由自由状态到受力变形最大时, 该位移 U 即为弹片从自由弯曲状态到形变所产生压缩量的大小。施加外力 F 约为 4.75N 时的弹片形变仿真结果云纹图如图5所示。对弹片施加的外力为 4.75N 时, 弹片的最大位移为 -0.8533 mm, 即在外力作用下, 弹片前端向 x 轴负方向运动了 0.8533 mm。而图6给出的是弹片受力变形垂直方向及其局部放大的图示。

根据试验实测数据, 通过改变弹片所受外力 F 的取值, 本文进行了若干次仿真分析, 计算出相应外力作用下对应的弹片变形量。根据有限元分析结果, 选择了 20 组有限元仿真计算值与试验曲线进行对比, 如图7所示。

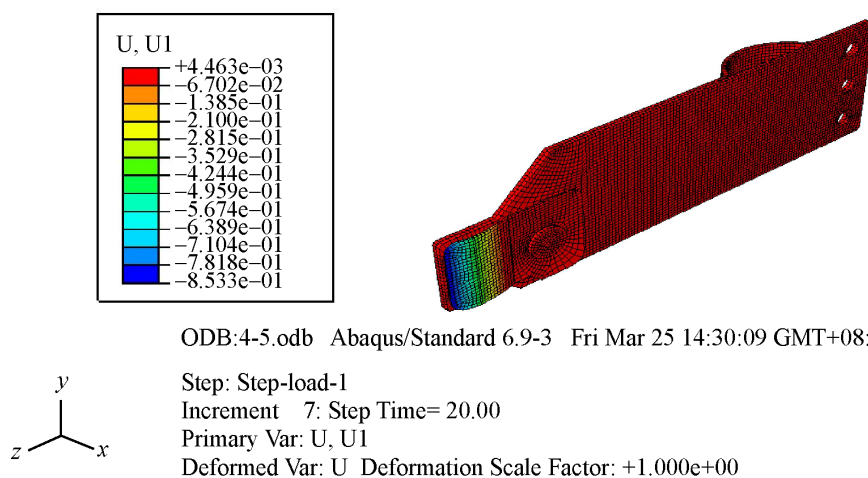


图5 4.75N 时弹片的形变情况云纹图
Fig. 5 The shrapnel deformation at 4.75N

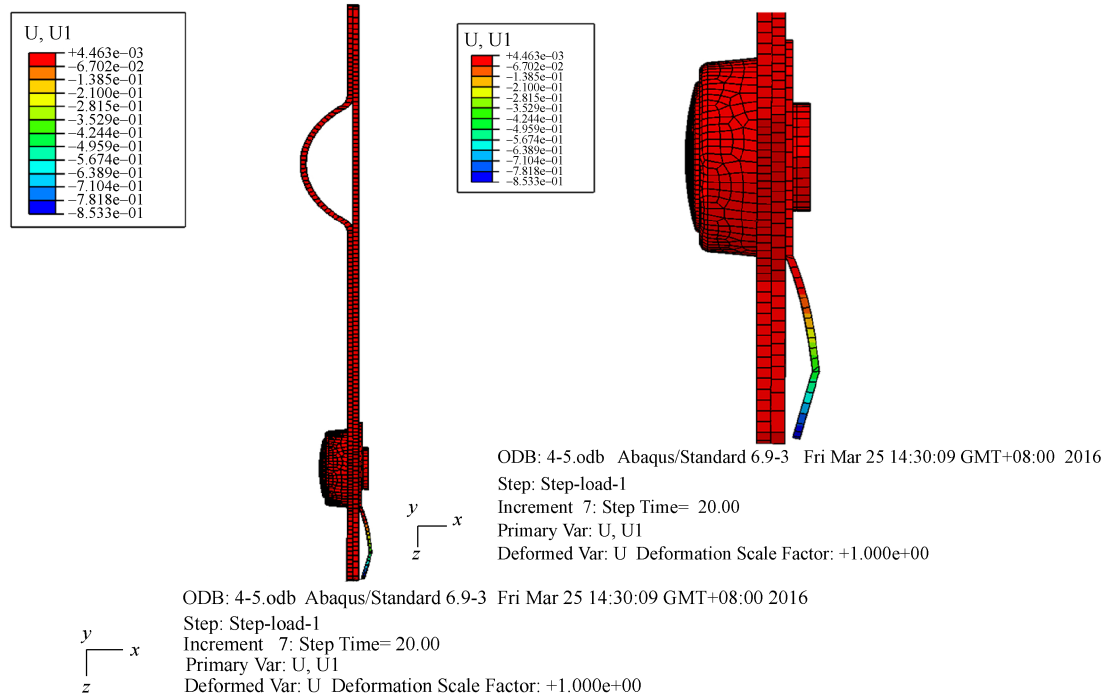


图 6 4.75N 时弹片的形变情况垂直方向云纹图

Fig. 6 The shrapnel deformation of the vertical direction at 4.75N

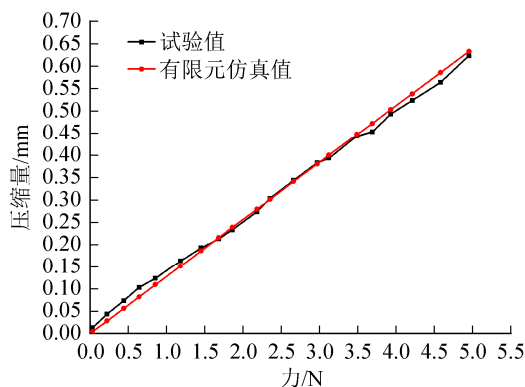


图 7 试验值与有限元仿真值的对比

Fig. 7 Comparison between test result and FE result

对比发现有限元仿真的曲线与试验值能较好吻合, 柔体部件弹片的压缩量随着力的幅值的增大而增大。说明有限元分析的磁保持继电器触头系统中弹片反力特性与试验情况相符, 可以用于模拟试验结果。

4 结论

本文利用 Pro/E 软件建立了磁保持继电器触头系统模型, 重点介绍了基于 Abaqus 的磁保持继电器触头系统中弹片的建模及仿真分析方法。通过实

物测试试验以及材料特性分析, 选择了适用的与实际材料相符的有限元模型参数, 得到了较为精确的仿真模型; 通过对接触部件定义绑定约束的方法, 控制了刚体位移的现象, 解决了收敛问题; 通过对磁保持继电器触头系统模型中弹片进行仿真分析, 仿真结果与试验结果对比, 有限元分析的磁保持继电器触头系统中弹片反力特性与试验情况相符, 表明利用 Abaqus 软件建立的模型能够准确地计算磁保持继电器触头系统中弹片的反力特性。本文研究可为磁保持继电器的优化提供依据。

参考文献:

- [1] Ruan M, Shen J, Wheeler C B. Latching microelectromagnetic relays [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2001, 91(3): 346-350.
- [2] Li D S, Liu B D. Research on Microelectromagnetic Relays [J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2006, 1(1): 111-114.
- [3] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 2-3.
Shi Yiping, Zhou Yurong. ABAQUS Finite Element Analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 2-3.
- [4] 梁慧敏, 张玉成, 翟国富, 等. 小微型电磁继电器静态

- 吸反力特性测试装置[J]. 机电元件, 2004, 24(4): 3-16.
- Liang Huimin, Zhang Yucheng, Zhai Guofu, et al. Testing apparatus of static attractive force and spring force characteristics of micro electromagnetic relay[J]. Electromechanical Components, 2004, 24(4): 3-16.
- [5] 陈德为, 张培铭. 基于图像测量的智能交流接触器设计技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 108-112.
- Chen Dewei, Zhang Peiming. Image measuring-based intelligent AC contactor design technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36): 108-112.
- [6] 刘颖异, 陈德桂, 袁海文, 等. 带电流反馈的永磁接触器动态特性仿真与分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(15): 118-124.
- Liu Yingyi, Chen Degui, Yuan Haiwen, et al. Simulation and analysis on dynamic characteristics of permanent magnetic contactor with current feedback[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(15): 118-124.
- [7] Fang Shuhua, Lin Heyun, Ho S L. Transient co-simulation of low voltage circuit breaker with permanent magnet actuator [J]. IEEE Transactions on Magnetics (S0018-9464), 2009, 45(3): 1242-1245.
- [8] 张志枫, 谢宝河, 刘向军. 基于混合人工鱼群算法的磁保持继电器优化设计[J]. 低压电器, 2010(23): 28-32.
- Zhang zhifeng, Xie Baohe, Liu Xiangjun. Optimization design of magnetic latching relay based on hybrid artificial fish school algorithm[J]. Low Voltage Apparatus, 2010(23): 28-32.
- [9] 李慧, 杨雪, 赵广生. 基于 ABAQUS 柔性模型的 ADAMS 模型研究[J]. 科技创新与应用, 2012(30): 20-21.
- Li Hui, Yang Xue, Zhao Guangsheng. Study on ADAMS model based on ABAQUS flexible model[J]. Technology Innovation and Application, 2012(30): 20-21.
- [10] 叶红玲, 胡腾, 赵春华, 等. 基于 Python 的 Abaqus 二次开发在空间可展单簧片结构仿真分析中的应用[J]. 计算机辅助工程, 2016, 25(1): 50-54.
- Ye Hongling, Hu Teng, Zhao Chunhua, et al. Application of abaqus secondary development based on python in simulation and analysis of deployable simple tape spring space structure[J]. Computer Aided Engineering, 2016, 25(1): 50-54.
- [11] BOURGEOIS S, COCHELIN B, GUINOT F, et al. Bucking analysis of tape springs using a rod model with flexible cross-section[J]. European Journal of Computational Mechanics. 2012, 21(3): 184-194.
- [12] 洪昊, 王孝鹏, 吴龙. 基于 ABAQUS 的某农用车不等臂钢板弹簧有限元显示动力分析[J]. 太原大学学报, 2014, 15(3): 138-140.
- Hong hao, Wang Xiaopeng, Wu Long. Finite element explicit dynamic analysis of agricultural vehicles unequal arm leaf spring based on ABAQUS[J]. Journal of Taiyuan University, 2014, 15(3): 138-140.
- [13] Shan D, Li Y. The finite element analysis on static and dynamic performance for the welded-structure column of a certain horizontal machining center[C]//Information Management and Engineering (ICIME), 2010 The 2nd IEEE International Conference on IEEE, 2010: 372-376.
- [14] 方喜峰, 吴洪涛, 刘云平, 等. 基于空间算子代数理论计算多体系统动力学建模[J]. 机械工程学报, 2009, 45(1): 228-234.
- Fang Xifeng, Wu Hongtao, Liu Yunping, et al. Computational dynamics of multi-body system modeling based on spatial operator algebra theory[J]. JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING, 2009, 45(1): 228-234.
- [15] 刘兴龙. 内燃机主轴承耦合动力学的润滑分析[D]. 山东大学, 2011, : 32-33.
- Liu Xinglong. Lubrication analysis coupling with shaft dynamics of internal-combustion engine main bearing [D]. Shandong University, 2011: 32-33.
- [16] 王璐, 欧瑾, 王曙光, 等. ABAQUS 软件在弹性滑移支座非线性有限元分析中的应用[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2010, 32(4): 49-53.
- Wang Lu, Ou Jin, Wang Shuguang, et al. Nonlinear finite element analysis of elastic sliding bearing based on ABAQUS[J]. JOURNAL OF NANJING UNIVERSITY OF TECHNOLOGY(Natural Science Edition), 2010, 32(4): 49-53.
- [17] 余翊妮. 基于多体动力学的大型正铲液挖挖掘机工作装置的动载特性研究[D]. 浙江: 浙江工业大学, 2013: 73.
- She Yini. A research on the dynamic load characteristics of a large face-shovel hydraulic excavator attachment based on the muti-body dynamics[D]. Zhejiang: Zhejiang University of Technology, 2013: 73.
- [18] 王其亚, 陈庆, 翟国富. 拍合式继电器簧片折弯角度对反力特性的影响分析[J]. 低压电器, 2012, (22): 1-3.
- Wang Qiya, Chen Qing, Zhai Guofu. The influence of clapper relay spring's bending angle to reaction force characteristics[J]. Low Voltage Apparatus, 2012(22): 1-3.
- [19] 李一全, 吴雅博. 双平行簧片结构弹性元件的抗扭转优化设计[J]. 长春大学学报, 2014, 24(6): 722-724.
- Li Yiquan, Wu Yabo. Optimized design for the anti-torison of elastic element in double parallel spring structure[J]. JOURNAL OF CHANGCHUN UNIVERSITY, 2014, 24(6): 722-724.