

高压断路器凸轮-轴承碰撞过程动态仿真及应用

李世芸, 邓荣兵

(昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 笔者针对某高压开关厂高压断路器使用中滚动轴承易损问题,建立了碰撞问题的有限元方程,在 UG 中建立凸轮-轴承机构的三维实体模型,并导入到 ANSYS/LS-DYNA 环境中,用有限元方法分析了凸轮和轴承的在碰撞过程中接触力的瞬态变化情况、应力分布以及应力集中情况,分析和说明了轴承破坏的原因,用动画方式仿真了整个碰撞过程以及碰撞过程中凸轮和轴承的受力情况,作为改进设计的依据。仿真结果表明,该方法对高压断路器进行虚拟设计和运动仿真非常有效。

关键词: 高压断路器; 碰撞仿真; ANSYS/LS-DYNA

中图分类号: TP391.72

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)06-0497-04

Dynamic Simulation and Application of Colliding Process of Cam and Rolling Bearing in Circuit Breaker

LI Shi-yun, DENG Rong-bing

(Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: To solve the problem that rolling bearing in a circuit breaker is easy to be worn down, a FEM equation of colliding problem is established, and 3D solid models of cam-bearing mechanism are created in UG environment and are embedded to ANSYS/LS-DYNA. By using the kinematic and dynamic simulation functions of LS-DYNA, the contacting force, stress distribution, and stress concentration in colliding process of cam and bearing are computed and simulated, and the causes of rolling bearing failure are analyzed. Simulation result shows that this method is very effective to analyze and simulate transient colliding process of cam and rolling bearing in circuit breakers.

Key words: circuit breaker; colliding simulation; ANSYS/LS-DYNA

0 引言

高压断路器是电力系统中重要的开关设备,担负着控制和保护电路的双重任务,其性能的好坏决定电力系统是否能安全运行。笔者研究的高压断路器是某开关厂新产品 LW36-126 三相 SF₆ 自能式气体断路器^[1],其工作原理见图 1。利用储能的弹簧为动力使开关实现合、分闸动作,采用小功率的电动机为弹簧储能。合闸弹簧储能,凸轮高速碰撞到滚动轴承后立即产生分离;在分合闸弹簧的共同作用下,凸轮与滚动轴承又接触。每一次分闸、合闸动作,靠凸轮与轴承的接触来实现各种工况。该弹簧操作机构成本低,是断路器中最常用的一种操作机构,但其机构较复杂,且操作过程中存在以下主要问题:由于一

次分、合闸时间是在 30~40 ms 的极短时间内完成,凸轮与轴承的接触成了瞬态的碰撞或冲击,每次分闸和合闸时产生的噪声和振动很大,轴承承受的冲击力最为集中,轴承的破坏形式主要为滚针的断裂、点蚀和轴承外圈的变形,虽然已采用价格昂贵的德国进口滚针轴承,承受冲击的次数也只能达到 2 000 次,国内普通轴承只能达到 1 000 次。每次更换轴承易损件,用户和厂家都费时费力,增加了维护成本^[2]。厂家希望开发出专用的轴承,使得承受碰撞的次数能达到 6 000 次,以提高产品的竞争力。

如何确定凸轮-轴承在开关过程中的接触力、应力分布情况和应力集中情况,并以此作为开发专用轴承的依据,已成了改进高压断路器性能的重要技术问题之一。

收稿日期:2008-01-11; 修回日期:2008-07-02

基金项目:云南省科技厅项目“云南开关厂 CIMS 应用示范过程”(2005.7~2007.9);云南省中青年学术技术带头人培养基金资助论文(2006PY01-03)。

作者简介:李世芸(1965-),女,教授,主要从事 CAD/CAE/CAM 研究。

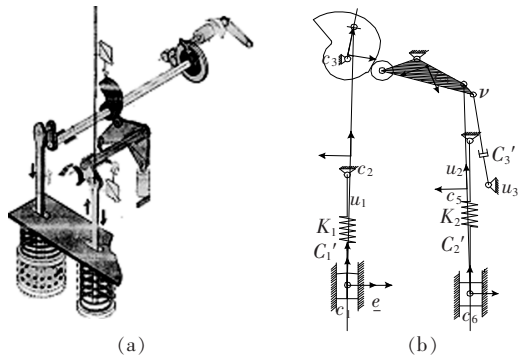


图1 高压断路器中弹簧机构工作原理

1 接触问题有限元方程的建立

凸轮和轴承在分闸、合闸时,处于高速接触运动状态。接触问题是典型的状态非线性问题,很难用解析的方法得到精确解。笔者采用有限元数值模拟的方法求解。两个接触体的有限元方程为

$$\begin{cases} [K_1][u_1] = \{P_1\} + \{R_1\} \\ [K_2][u_2] = \{P_2\} + \{R_2\} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, K_1 和 K_2 为两接触体的总刚度矩阵; u_1 和 u_2 为两接触体的总位移列阵; P_1 和 P_2 为两接触体的总载荷列阵; R_1 和 R_2 为两接触体的总接触力列阵。

由于接触力 $\{R_1\}$ 、 $\{R_2\}$ 未知,因此在式(1)中,未知数的个数多于方程的个数,无法直接求解,必须补充相应的接触条件,为此,应首先假定接触点对的接触连接状态,并代以相应的接触定解条件才能求解方程(1)。凸轮和轴承的接触和碰撞属于滑动接触状态,接触条件为

$$\begin{cases} \bar{R}_{n1i} + \bar{R}_{n2i} = 0 \\ \bar{R}_{t1i} + \bar{R}_{t2i} = 0 \quad i=1, 2 \\ u_{1i} = u_{2i} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, \bar{R}_{n1i} 、 \bar{R}_{n2i} 和 \bar{R}_{t1i} 、 \bar{R}_{t2i} 分别代表接触点处接触力的切向和法向分量, u 为位移列阵;将式(2)代入式(1)整理,从而可以求得

$$\begin{cases} [u_1^*] = [K_1^e]^{-1} + \{P_1^*\} \\ [u_2^*] = [K_2^e]^{-1} + \{P_2^*\} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $[K_i^e]$ 为把补充方程(2)代入方程(1)后形成的修正刚度矩阵 ($i=1, 2$); $\{P_i^*\}$ 为把补充方程(2)代入方程(1)后形成的修正载荷向量,其中也包含了接触力 ($i=1, 2$)。

根据求出的节点位移,再用求节点力的方法求出接触点对上的接触力向量。然后,根据接触点对上的位移和接触力向量,依次按接触判定条件判定各个接触点对的接触状况是否和假定的接触条件相符合,如果不相符合,应该重新修改接触状态,重新把接触条件代入式(1)的方程中。经反复的迭代求

解,直到该次计算前后的接触状态完全吻合为止。

以上过程即为有限元法求解工程接触问题的基本原理和步骤,但具体建立几何模型、有限元模型、求解和显示结果,需借助于专业分析软件和工具。

2 基于UG和ANSYS/LS-DYNA的碰撞仿真分析

笔者采用大型有限元分析软件 ANSYS 的高度非线性瞬态动力分析模块 ANSYS/LS-DYNA,对凸轮与滚动轴承的碰撞过程进行仿真分析。

2.1 有限元模型的生成

ANSYS/LS-DYNA 是一种通用显式动力分析程序,特别适合求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等非线性动力冲击问题^[3]。其仿真功能强大,但对较复杂的三维实体建模,步骤非常复杂和繁琐。笔者在专业的三维 CAD 软件 UG 环境中生成凸轮和轴承的几何模型,然后导出到 ANSYS/LS-DYNA 中划分单元,添加约束并进行求解^[4]。

图2为在UG环境中生成的经过简化后的凸轮和轴承的几何模型^[5]。由于笔者研究重点为盘形凸轮与滚动轴承高速碰撞的瞬间,本着反映结构主要力学特性和控制解题规模的原则,对实际凸轮机构进行了简化,提取主要与碰撞相关的零部件:凸轮、储能轴、与盘形凸轮相碰撞的滚动轴承、转臂、支撑轴作为研究对象,见图2,初始时处于非接触状态。

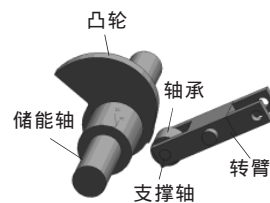


图2 凸轮机构在UG中的实体模型

图3为导入到 ANSYS/LS-DYNA 中并划分单元后的有限元模型。其中轴承采用8节点空间六面体单元,其他结构采用4节点空间四面体单元。各零件的材料和材料属性为:轴承内外圈和轴销均为20CrMnTi,密度为7.86e3 kg/m³,弹性模量为2.12e5 MPa,泊松比为0.298;滚针为GCr15,密度为7.83e3 kg/m³,弹性模量为2.19e5 MPa,泊松比为0.30;凸轮和储能轴为40Cr,密度为7.87e3 kg/m³,弹性模量为2.11e5 MPa,泊松比为0.277;转臂和输出轴为30CrMnTi,密度为7.85e3 kg/m³,弹性模量为2.05e5 MPa,泊松比为0.25^[6]。考虑到碰撞接触发生在盘形凸轮表面和滚动轴承表面,划分单元时对这两个表面上的接触单元进行了细化,以期得到接触表面较精确的解。

2.2 添加约束和求解控制

对图3的凸轮-轴承机构有限元模型添加约

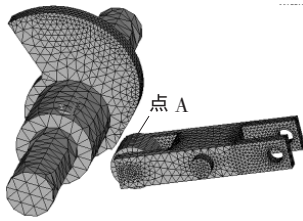


图3 凸轮机构在LS-DYNA中的有限元模型

束,约束所有零件的各个方向的平动,约束各零件沿 X 和 Y 方向的转动,指定旋转轴线分别为凸轮轴线和输出拐臂轴线。

设定完成一次分闸、合闸的时间为 90 ms,时间积分采用显式中心差分法,每一时刻的时步长由当前构形的稳定性条件控制,先计算每一个单元的极限时步长 $\Delta t_{ei}, i=1, 2, \dots, m$ (显式中心差分法稳定性条件允许的最大时步长),下一时间步长取其极小值,即

$$\Delta t = \min(\Delta t_{e1}, \Delta t_{e2}, \dots, \Delta t_{em}) \quad (4)$$

式(4)中, Δt_{ei} 为第 i 个单元的极限时步长; m 是单元数目。

2.3 碰撞仿真结果和应力分布

在 ANSYS/LS-DYNA 中求解完成后,可得到每一个节点在每一时间步长上的位移、3 个主应力和主应变,可以按任意强度理论进行强度校验。笔者主要关心轴承和其内的滚针的接触应力情况,又根据

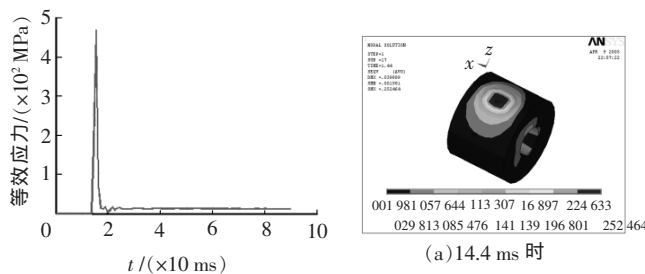


图4 轴承上距凸轮最近点的等效 von Mises 应力-时间曲线

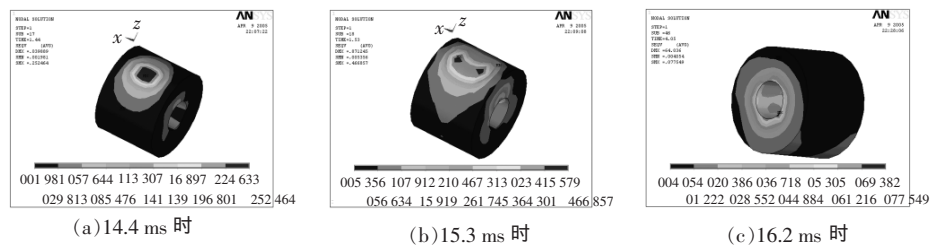


图5 14.4、15.3、16.2 ms 时轴承等效 von Mises 接触应力分布(GPa)

图6为轴承中滚针在 15.3 ms 时的 von Mises 等效接触应力分布情况。最大接触应力 $\sigma_{\max} = 299.858 \text{ MPa} < [\sigma] = 800 \text{ MPa} (\text{GCr15})^{[7]}$, 出现在滚针与外圈的接触区域。

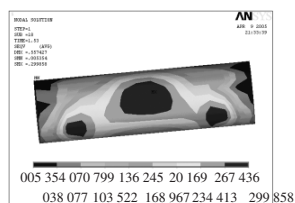


图6 15.3 ms 时轴承中滚针的等效 von Mises 接触应力(GPa)

从以上分析中可看出,轴承外圈和滚针的强度能满足要求。在所有零件中,轴承外圈与凸轮的接触应力最大,轴承外圈的变形相应较大。由于工况复杂,凸轮对轴承的冲击为非对称和瞬态的,轴承中的滚针除了承受冲击力和接触力外,还需进行滚动、摩

擦力的影响计算。另外,从图6可看出,在滚针承受冲击的瞬间,由于轴承内外圈的弹性变形,使得滚针的接触变为中部与外圈的接触和两端与内圈的接触,并非为设计时假设的理想线接触,这说明滚针还存在着弯曲,滚针的断裂和变形很可能是由于弯曲引起的,滚动体材料的选取主要考虑耐磨性、耐压性和强度,而不考虑抗弯能力。笔者用仿真的方法得出了轴承和滚针在受冲击时的受力情况,用可视的方式分析和说明了轴承破坏曾不被重视的原因,为进一步分析和研究轴承、提高其使用寿命提供参考和依据。

轴承材料为复合钢,故按 von Mises 强度理论进行应力计算。在 ANSYS 的通用后处理 POST1 中可查看指定时刻的接触情况、接触点处的接触应力分布,在时间历程后处理中可查看指定点在整个时间过程中接触应力的变化情况^[7]。

图4为轴承上距离凸轮最近点(图3中点A)的 von Mises 应力-时间变化曲线,该点最先进入接触状态。从图4和结果文件中可看出,凸轮转动后 13.5 ms 时进入接触状态。14.4 ms 时, A 点受到碰撞,产生的接触力瞬间增大,此时的等效接触应力分布见图5(a),从图5(a)可看出,接触应力集中在轴承上的点A与凸轮接触的局部,最大接触应力为 252.464 MPa。利用后处理中的提取结果极值功能,可得出在整个碰撞过程中,最大接触应力出现的时间为 15.3 ms,接触应力分布见图5(b),该时刻轴承的 von Mises 最大接触应力 $\sigma_{\max} = 466.857 \text{ MPa} < [\sigma] = 835 \text{ MPa} (20\text{CrMnTi})^{[7]}$, 出现在轴承外圈与凸轮的接触区域处;碰撞区域和接触应力影响范围增大。17.1 ms 时(在图4中),轴承上的点A与凸轮脱离接触,接触力骤减并随后维持在较低水平,图5(c)为 17.1 ms 点A与凸轮脱离接触时的 von Mises 接触应力分布情况,从图5(c)可看出,最大接触应力仅为 77.549 MPa,且在后续的转动接触中基本保持不变。

用同样的方法可得到其他零件如凸轮、转臂等零件在指定时刻的应力、应变分布,由于笔者主要关心轴承的破坏问题,其他零件的受力情况将不赘述。在整个碰撞过程中,凸轮与轴承表面的接触力变化见图7,凸轮与滚动轴承初次碰撞的瞬间,轴承瞬间接触力的增幅最大,受到的冲击力最大,轴承的

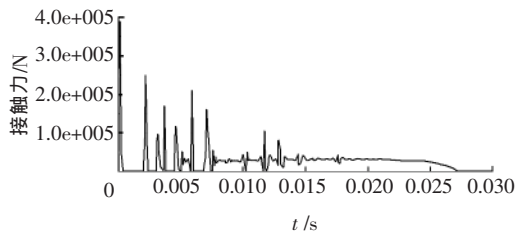


图7 滚动轴承与盘形凸轮碰撞整个过程接触力的变化

破坏是由于反复的冲击力引起的。

在 ANSYS 的 POST1 后处理中, 整个碰撞过程以及接触力随时间变化过程可生成动画, 用动画的方式可仿真和模拟碰撞过程, 图 8 为凸轮-轴承碰撞过程的动画仿真, 所形成的动画文件为“.avi”格式, 可在 Windows 的媒体播放器中播放。

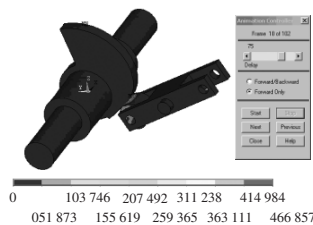


图8 凸轮机构动画示意

3 结语

笔者针对某高压开关厂高压断路器使用中滚动轴承易损问题, 采用当今主流的三维 CAD/CAE 技术, 建立了碰撞问题的有限元方程, 在 UG 中建立凸轮-轴承机构的三维实体模型, 并导入到 ANSYS/

LS-DYNA 环境中, 用 LS-DYNA 强大的显式动力有限元分析功能, 分析了凸轮和轴承在碰撞过程中接触力的瞬态变化情况、应力分布以及应力集中情况, 用可视的方式分析和说明了轴承破坏曾不受重视的原因, 用动画方式仿真了整个碰撞过程以及碰撞过程中凸轮和轴承的受力情况, 作为改进设计的依据。

由于碰撞为瞬间动作, 时间非常短暂, 用传统的设计方法无法得出整个碰撞过程冲击力变化情况, 难以对轴承强度和疲劳情况进行分析。笔者所做的研究探索出一种对高压断路器进行虚拟设计和运动仿真的有效方法, 运用该研究思路和分析方法, 对提高高压断路器设计水平和设计质量有重要的意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 崔景春, 袁大陆, 杜彦明. SF₆ 断路器操动机构的运行可靠性和选型探讨[J]. 高压电器, 2001, 37(2): 17-20.
- [3] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [4] 马秋成, 韩利芬, 聂松辉. UG 实用教程 CAD 篇 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [5] 孙江宏, 黄小龙, 吴平良. Unigraphics V18.0 入门与实例应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [6] 陈大先. 机械设计手册-常用工程材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [7] 叶先磊, 史亚杰. ANSYS 工程分析软件应用实例 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

(上接第 496 页)

- [2] 16(2): 259-264.
- [3] 袁佳歆, 陈柏超, 万黎, 等. 利用配电网静止无功补偿器改善电网电能质量的方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 81-84.
- [4] 罗安, 李涓, 漆铭钧. 智能型无功最优补偿及装置[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3): 45-46.
- [5] LEE W C, LEE T K, HYUN D S. A Three-phase Parallel Active Power Filter Operating with PCC Voltage Compensation with Consideration for an Unbalanced Load[J]. IEEE Tran. on Power Electronics, 2002, 17(5): 807-814.
- [6] 李庚银, 陈志业, 丁巧林, 等. dq0 坐标系下广义瞬时无功功率定义及其补偿[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 177-179.
- [7] 丁洪发, 段献忠, 何仰赞. 同步检测法的改进及其在不对称无功补偿中的应用 [J], 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 17-20.
- [8] 王茂海, 孙元章. 通用瞬时功率理论在三相不平衡负荷补偿中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 56-59.
- [9] 彭辉, 黄亦农, 王茂海. 配电网中三相不平衡负荷补偿[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(1): 32-34.
- [10] 纪飞峰, 周荔丹, 姚钢, 等. 基于同步对称分量法的静止无功补偿装置[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 24-29.
- [11] 翁利民, 陈允平, 舒立平. 大型炼钢电弧炉对电网及自身的影响和抑制方案[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 64-67.
- [12] 苏得良, 孙会. 大容量电弧炉对电网干扰的抑制方法[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 64-66.
- [13] 李鹏, 石新春, 梁志瑞. 对电弧炉平衡化补偿实用公式推导及验证[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 77-80.
- [14] NABAE A, YAMAGUCHI M. Suppression of Flicker in an Arc-furnace Supply System by an Active Capacitance—a Novel Voltage Stabilizer in Power Systems [J]. IEEE Trans. on Industry Application, 1995, 31(1): 107-111.
- [15] 孙驰, 魏光辉, 毕增君. 基于同步坐标变换的三相不对称系统的无功与谐波电流的检测[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 43-48.
- [16] 陈东华, 谢少军, 周波. 用于有源电力滤波器谐波和无功电流检测的一种改进同步参考坐标法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 62-67.
- [17] CUTRI R, MATAKAS Jr L. A New Instantaneous Method for Harmonics, Positive and Negative Sequence Detection for Compensation of Distorted Currents with Static Converters Using Pulse Width Modulation[C]// International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2005: 374-378.
- [18] 张桂斌, 豫政, 王广柱. 基于空间矢量的基波正序、负序分量及谐波分量的实时检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 1-5.
- [19] 李红雨, 吴隆辉, 卓放, 等. 一种新型的快速电流检测方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 57-62.