



杨书仪

基于神经网络与遗传算法的移动硬盘 耐撞性能多目标优化设计

杨书仪¹, 刘德顺¹, 赵继云²

(¹湖南科技大学 机电工程学院 湘潭 411201; ²中国矿业大学 徐州 221116)

摘要:针对移动硬盘复杂的内部结构,遵循质量等效原则,建立有限元模型,结合均匀设计试验方法,进行移动硬盘跌落冲击有限元仿真。将试验数据作为训练样本,建立移动硬盘传动臂厚度、悬臂厚度及枢轴轴承刚度与磁盘接触面应力、磁头与磁盘间距之间的BP神经网络,运用遗传算法对移动硬盘结构参数进行多目标优化。研究表明:在考虑耐撞性能方面,运用该方法建立的设计变量与跌落冲击响应的非线性映射关系,对移动硬盘的关键零件参数设计具有理论指导意义。

关键词:移动硬盘;多目标优化;均匀设计;神经网络;遗传算法

中图分类号:TP183 文献标识码:A 文章编号:1003-8728(2012)08-1295-06

Multi-objective Optimization for Mobile Hard Disk Crashworthiness Based on ANN and GA

Yang Shuyi¹, Liu Deshun¹, Zhao Jiyun²

(¹ College of Electromechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201;

² China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116)

Abstract: In view of inner structure and complying with quality equivalent principle, a 2.5 inch mobile hard disk was modeled based on ANSYS/LS-DYNA. The non-linear mapping relation between structural parameters of the key components and drop impact response was built using FEM (finite element method) and experimental design. Drop impact processes of different head actuator arm thickness, cantilever thickness and pivot bearing stiffness were simulated in order to obtain training specimen for the ANN (artificial neural network). The BP ANN prediction model was established. Multiple objective optimization algorithms for crashworthiness of mobile hard disk were analyzed based on ANN and GA (genetic algorithm). The results indicate that the method is effective and may provide theory gist of preferences in key part parameter design.

Key words: mobile hard disk; multi-objective optimization; uniform design; ANN; GA

移动硬盘是一个精密的微机电系统,由磁头组件和磁盘组件两大部分组成。磁头组件包括浮动磁头、悬臂、传动臂、枢轴轴承和音圈电机等;磁盘组件包括磁盘、驱动轴承和驱动电机等部件。当硬盘处于稳定工作状态时,高速旋转的磁盘与浮动磁头之间存在着气流效应,两者之间存在间隙而不直接接触,磁头飞行在磁盘上方。随着硬盘主轴速度的提

高,为了保证磁头对盘面记录信号的敏感性,磁头与盘面的间隙变得很小,已达到5 nm~10 nm。外界环境任何微细的扰动都有可能直接导致磁头偏离磁道而出现信号错误,严重的会直接导致磁头撞击盘面,发生毁灭性的破坏。然而硬盘在运输、使用过程中,不可避免的会受到外部振动、碰撞冲击、跌落冲击。所以,如何设计高性能、高品质的移动硬盘,提高其耐撞性能,是硬盘生产商所期待解决的问题。如林大超^[1]利用数值模拟方法分析了在正弦半波激励条件下头盘系统的动力学响应过程;谢正义^[2]使用有限元分析软件ANSYS对磁头驱动机构的悬架进行了模态分析和计算;Edwards^[3]运用有限元方法探讨了硬盘驱动器头盘系统在不同接触刚度下的跌落冲

收稿日期:2011-04-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51075139),教育部科学技术研究重点项目(211120),湖南省教育厅科学研究青年项目(10B030)和湖南省高校科技创新团队支持计划项目资助

作者简介:杨书仪(1972-),副教授,博士,研究方向为冲击动力学和优化设计, ysy822@126.com, deshunliu@hotmail.com

击响应。Shu、Shi^[4,5] 分别对硬盘传动臂在各种脉冲激励下的动态响应进行了有限元仿真和理论分析。然而,在影响移动硬盘耐撞性能的关键零部件结构参数优化设计方面的研究甚少。

拟采用一种基于神经网络与遗传算法的多目标优化方法,在不改变硬盘驱动器内部结构的前提下,通过优化关键零件的结构尺寸、性能参数来提高其耐撞性能。具体的结构参数优化设计流程如图 1 所示。

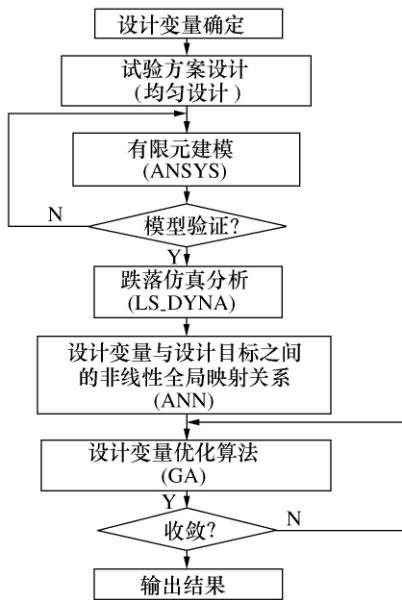


图 1 结构参数优化设计流程

1 有限元仿真

1.1 有限元模型建立

1.1.1 硬盘驱动器内部结构

硬盘内部结构主要由固定面板、控制电路板、硬盘驱动器、接口及其它附件组成,其中硬盘驱动器是构成硬盘的核心,它封装在硬盘的净化腔体内,包括有磁头传动臂组件(包括音圈电机、传动臂、枢轴轴承)、悬臂、磁头、磁盘和驱动电机等,其内部结构如图 2 所示。

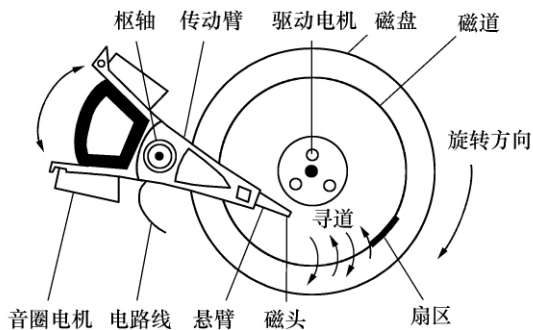


图 2 硬盘驱动器结构示意图

1.1.2 有限元模型

本文建立的数值仿真模型是移动硬盘在非工作

状态下的整体跌落有限元模型,主要由移动硬盘和刚性地面两部分组成,采用实体建模方法生成。由于移动硬盘处于非工作状态时,磁头是停放在磁盘表面,磁头与磁盘接触处有限元模型如图 3 所示。

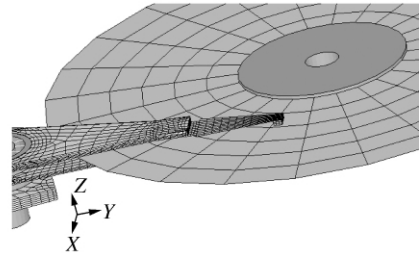


图 3 磁头与磁盘接触处有限元模型

为了减少计算工作量,有限元模型建立过程中最大程度遵照实际结构,作如下简化:

- 1) 略去对计算结果影响不大的结构尺寸,如硬盘外壳中一些细小的圆角、圆孔、凸台等;
- 2) 硬盘中部分垫片、端盖等零件质量采用等效质量方法分摊到简化的外壳上;
- 3) 地面简化为刚性材料。

在有限元模拟分析中,对于跌落冲击载荷的施加通常采用自由落体法^[6],结合能量守恒,将外壳、磁盘盘片、传动臂组件等作为一个系统来模拟自由跌落的整个过程,图 4 为移动硬盘自由落体的有限元模型(为了能全面观察到移动硬盘内部结构,该有限元模型图中去除了部分外壳和零件)。

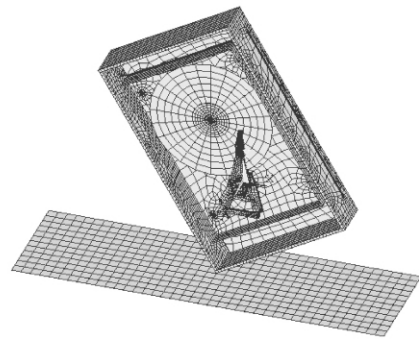


图 4 移动硬盘跌落冲击有限元模型

移动硬盘的跌落高度为 800 mm、跌落角度为移动硬盘轴线与地面夹角 30° 。离散单元采用 3 节点或 4 节点壳单元及 8 节点实体单元,各零部件材料及单元类型如表 1 所示。模型中任何正在接触及跌落冲击后可能发生接触的部件都定义了接触界面,如外壳与地面、磁头与磁盘盘片、悬臂与磁盘盘片等。在计算时主要使用了 3 种材料模式:弹塑性材料模型、刚性材料模型以及线弹性弹簧模型。数值模型采用 mm-ms-kg 单位制。移动硬盘跌落冲击有限元模型中 part 组数为 14、单元数为 29 558,节点数为 42 515。

表 1 材料属性

名称	单元类型	材料	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3}$)
外壳、传动臂	Solid164	铝	73.1	0.33	2.7×10^{-6}
悬臂	Shell163	铝	73.1	0.33	2.7×10^{-6}
PCB 板	Solid164	覆铜箔板	11.1	0.28	1.9×10^{-6}
端盖	Solid164	酚醛树脂	2.2	0.38	1.2×10^{-6}
音圈电机	Solid164	铜	88	0.29	8.1×10^{-6}
轴承内外圈	Solid164	不锈钢	200	0.28	7.6×10^{-6}
磁盘盘片	Shell163	铝合金	68	0.34	2.7×10^{-6}
地面	Shell163	铁	207	0.28	7.83×10^{-6}

在模拟过程中, 移动硬盘从一定高度自由跌落, 当移动硬盘与刚性地面相碰时, 在移动硬盘上产生一个加速度脉冲作用在外壳、PCB 板、传动臂组件、磁盘盘片等零部件上。在实际跌落过程中, 移动硬盘跌落冲击变形和破损一般发生在与地面碰撞接触后, 在跌落前的自由落体过程中受力和变形不会变化。所以, 在跌落模拟中, 为了减少计算时间, 这里假设移动硬盘以某一初速度在距离地面 1 mm 处开始跌落。当模拟跌落高度为 h 时, 跌落初速度由 $v = \sqrt{2g(h - 0.001)}$ 确定。

1.2 跌落冲击数值计算结果

图 5a) ~ 图 5d) 分别为移动硬盘接触地面等效应力变化图以及相应时刻的传动臂组件与磁盘盘片等效应力变化图。

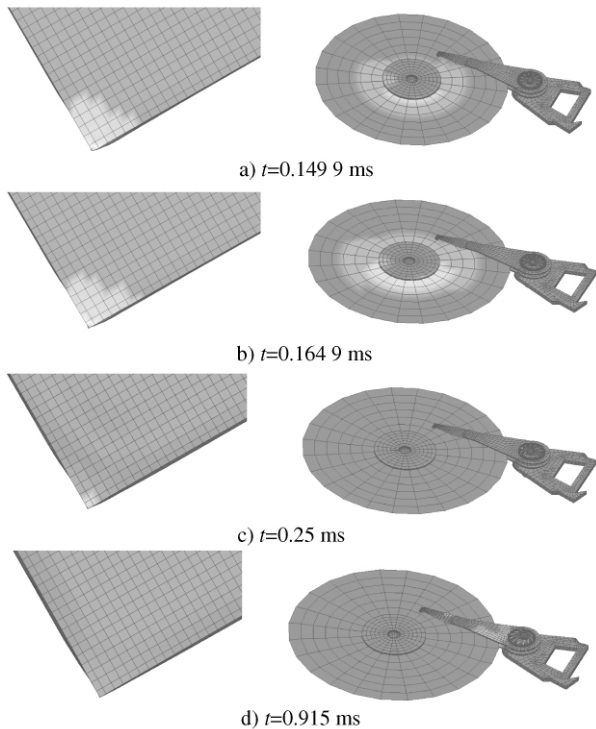


图 5 不同时刻下的等效应力图

2 试验设计

产品耐撞性能是其直接抵抗冲击造成的外形美感丧失和内在功能失效的能力。在跌落冲击作用下, 影响移动硬盘外形美感的损坏形式有: 外形结构上的划痕、塑性变形、断裂和联接松动等, 引起损坏的原因是产品跌落冲击造成外形结构局部应力太大。导致移动硬盘功能退化甚至失效的损坏形式除电路板上的各个焊点松动、脱落、电子元器件的破裂外, 主要是磁头磁盘等构成的工作机构的变形、断裂。单一的动态响应指标是不能较好地表征产品耐撞性能。本文中, 选择移动硬盘跌落冲击过程中外壳最大应力、磁盘盘片接触面等效应力、磁头与磁盘间距作为评价其设计方案耐撞性能的试验指标。外壳厚度、传动臂厚度、悬臂厚度以及轴承刚度为试验因子, 各设计变量的意义和取值范围如表 2 所示。

表 2 设计变量取值范围

	外壳厚度 /mm	传动臂厚度 /mm	悬臂厚度 /mm	轴承刚度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)
上限	1.9	1.5	0.26	5.8
下限	0.7	0.3	0.02	3.4
原设计值	1.4	0.8	0.08	3.4

均匀设计是一种试验设计方法, 它的数学原理是数论中的一致分布理论, 属于伪蒙特卡罗方法的范畴。由于均匀设计只考虑试验点的“均匀散布”, 而不考虑“整齐可比”, 保证试验点具有均匀分布的统计特性, 因而其试验次数比正交设计明显减少, 均匀设计特别适合于多因素多水平的试验和系统模型完全未知的情况^[7]。为了能全面反映试验因子对试验指标的影响, 在每个试验因子的上下限值之间确定多个水平值。同时, 由于外壳厚度、传动臂厚

度、悬臂厚度以及轴承刚度 4 个试验因子与外壳最大应力、磁盘盘片接触面等效应力、磁头与磁盘间距 3 个试验指标之间没有明确的数学关系,因此本文采用均匀设计方法,通过较少试验次数获得较多试验因子与试验指标间的相关信息。

本文试验方案选择均匀设计表为 $U_{25}^*(25^{11})$,选取其中的 3、4、5、11 这 4 列,具体的试验方案如表 3 所示。

表 3 移动硬盘跌落测试试验方案(括号内为试验值)

试验号	外壳厚度 /mm	传动臂厚度 /mm	悬臂厚度 /mm	轴承刚度 /(kN·m ⁻¹)
1	5(0.9)	7(0.6)	9(0.10)	25(5.8)
2	10(1.15)	14(0.95)	18(0.19)	24(5.7)
3	15(1.4)	21(1.3)	1(0.02)	23(5.6)
4	20(1.65)	2(0.35)	10(0.11)	22(5.5)
5	25(1.9)	9(0.7)	19(0.20)	21(5.4)
6	4(0.85)	16(1.05)	2(0.03)	20(5.3)
7	9(1.1)	23(1.4)	11(0.12)	19(5.2)
8	14(1.35)	4(0.45)	20(0.21)	18(5.1)
9	19(1.6)	11(0.8)	3(0.04)	17(5.0)
10	24(1.85)	18(1.15)	12(0.13)	16(4.9)
11	3(0.8)	25(1.5)	21(0.22)	15(4.8)
12	8(1.05)	6(0.55)	4(0.05)	14(4.7)
13	13(1.3)	13(0.9)	13(0.14)	13(4.6)
14	18(1.55)	20(1.25)	22(0.23)	12(4.5)
15	23(1.8)	1(0.3)	5(0.06)	11(4.4)
16	2(0.75)	8(0.65)	14(0.15)	10(4.3)
17	7(1.0)	15(1.0)	23(0.24)	9(4.2)
18	12(1.25)	22(1.35)	6(0.07)	8(4.1)
19	17(1.5)	3(0.4)	15(0.16)	7(4.0)
20	22(1.75)	10(0.75)	24(0.25)	6(3.9)
21	1(0.7)	17(1.1)	7(0.08)	5(3.8)
22	6(0.95)	24(1.45)	16(0.17)	4(3.7)
23	11(1.2)	5(0.5)	25(0.26)	3(3.6)
24	16(1.45)	12(0.85)	8(0.09)	2(3.5)
25	21(1.7)	19(1.2)	17(0.18)	1(3.4)

该表有外壳厚度、传动臂厚度、悬臂厚度以及轴承刚度 4 个因素(设计变量),每个因素取 25 个水平,(其中各因素变化间距分别是:外壳厚度 = 0.05 mm;传动臂厚度 = 0.05 mm;悬臂厚度 = 0.01 mm;轴承刚度 = 0.1 kN/m)共进行 25 组试验,即可生成 25 个样本,其中选 20 个样本作为训练集,用于训练神经网络,5 个样本作为测试集,用于检测网络。

3 神经网络设计

由于外壳厚度、传动臂厚度、悬臂厚度及轴承刚度 4 个因素与外壳最大应力、磁盘盘片接触面等效应力、磁头与磁盘间距是一种复杂的非线性映射关系,难以运用传统的多元线性回归方法来建立目标与变量间确定的函数关系。而人工神经网络具有非常强的非线性映射能力,它不需要任何先验公式就可通过学习(或训练)自动总结出数据间的函数关系,是一种有效的建模手段^[8]。在 ANSYS/LS_DYNA 中按照表 3 所确定的试验值分别进行 25 组移动硬盘跌落仿真分析,对应获取外壳最大应力、磁盘盘片接触面等效应力、磁头与磁盘间距在跌落冲击下的动态响应值。

该 BP 神经网络拓扑结构如图 6 所示,网络的隐含层神经元的传递函数为 tansig,输出层神经元的传递函数为 purelin,训练函数是 trainrp。

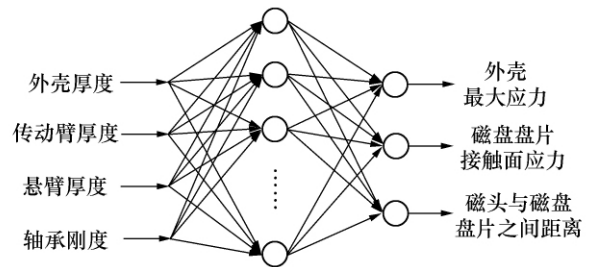


图 6 BP 神经网络拓扑结构示意图

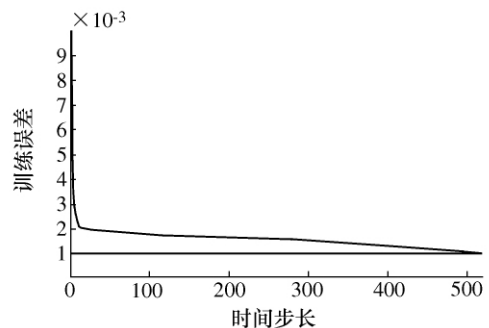


图 7 网络训练误差曲线

本网络中输入层节点数为 4 ,输出层节点数为 3 ,隐含层节点数为 9 ,学习率为 0.01 ,学习次数 5000 ,许可误差 0.001。通过在 Matlab 中编制程序 ,建立 BP 神经网络并对其进行训练。训练过程误差曲线如图 7 所示 ,网络训练较快 ,经过 512 步后 ,网

络的误差达到要求。

通过检验样本对网络进行仿真 ,误差均很小 ,都控制在 5% 以内。检验样本对网络的仿真结果见表 4(仅列出 5 组)。

表 4 检验样本神经网络仿真结果

序号	外壳厚度 /mm	传动臂厚度 /mm	悬臂厚度 /mm	轴承刚度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	外壳最大应力 /GPa			磁盘盘片接触面等效应力 /MPa			磁头与磁盘间距 /mm		
					网络解	有限元解	误差 /%	网络解	有限元解	误差 /%	网络解	有限元解	误差 /%
1	0.7	1.1	0.08	3.8	0.293 5	0.300 0	2.17	1.526 3	1.507 9	1.22	0.308 3	0.308 8	0.16
2	0.95	1.45	0.17	3.7	0.287 6	0.277 5	3.64	1.836 9	1.787 4	2.77	0.255 8	0.244 9	4.45
3	1.2	0.5	0.26	3.6	0.269 9	0.269 3	0.22	2.144 6	2.137 3	0.34	0.336 9	0.340 1	0.94
4	1.45	0.85	0.09	3.5	0.263 2	0.261 2	0.76	2.831 1	2.876 9	1.59	0.516 9	0.489 9	2.7
5	1.7	1.2	0.18	3.4	0.255 2	0.250 2	1.99	2.122 9	2.141 5	0.87	0.434 3	0.428 6	1.33

4 基于 GA 的多目标优化

在建立起外壳厚度、传动臂厚度、悬臂厚度以及轴承刚度与外壳最大应力、磁盘盘片接触面等效应力、磁头与磁盘间距神经网络模型之后 ,还要求解由该函数作为目标函数的最优化问题 ,在实际的移动硬盘耐撞性能优化设计过程中 ,希望在冲击振动环境下的外壳最大应力、头盘间距和磁盘盘片应力等综合目标的最优化。因此 ,必须考虑使多个目标在给定区域上均尽可能最佳的优化问题 ,即实现多目标优化^[9]。

一般说来 ,多目标优化问题中各目标之间通过决策变量相互制约 ,对其中一个目标优化必须以其它目标作为代价 ,而且各目标的单位又往往不一致 ,因此很难客观地评价多目标问题解的优劣性。本算例中外壳最大应力、磁盘盘片接触面等效应力、磁头与磁盘间距 3 个目标值均希望其越小越好。

使用遗传算法对移动硬盘结构参数进行优化的过程中 ,外壳结构不仅要考虑自身的耐撞性 ,还要考虑其在跌落冲击条件下对硬盘驱动器磁头组件、传动臂组件运动的影响。本文拟将外壳最大应力作为约束条件 ,磁盘盘片接触面等效应力及磁头与磁盘间距采用不同的加权系数组合 ,进行外壳厚度、传动

臂厚度、悬臂厚度以及轴承刚度 4 个结构参数的优化。本例采用 Matlab 遗传算法工具箱 ,以不同加权系数下的优化目标最小编写相应的适应度函数 ,将已经训练好的神经网络模型集成到程序中 ,取种群数为 400 ,交叉率为 0.6 ,变异率为 0.001 进行 1 000 次迭代计算。表 5 为不同加权系数下的设计变量优化结果。

表 5 不同权重系数优化后的设计变量值

加权系数		外壳厚度 /mm	传动臂厚度 /mm	悬臂厚度 /mm	轴承刚度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
$a=0$	$b=1.0$	1.299 7	1.001 4	0.084 6	4.405 3
$a=0.2$	$b=0.8$	1.202 8	1.086 3	0.102 5	4.465 5
$a=0.4$	$b=0.6$	1.275 3	0.900 6	0.090 4	4.791 3
$a=0.5$	$b=0.5$	1.310 8	1.048 6	0.084 6	4.831 8
$a=0.6$	$b=0.4$	1.305 9	1.006 9	0.080 5	4.797 7
$a=0.8$	$b=0.2$	1.302 5	1.071 4	0.080 1	4.086 6
$a=1.0$	$b=0.0$	1.309 5	0.913 2	0.097 4	4.255 1

从表 5 中可以看出,加权系数 a 、 b 的不同取值反映了磁盘盘片接触面等效应力及磁头与磁盘间距这两个优化目标函数在优化模型中所占的不同比重。由于移动硬盘内部结构的复杂性,各设计变量与优化目标之间存在着非线性关系。随着某一项加权系数的增大,优化的结果就会有利于该目标。然而在移动硬盘受到跌落冲击后,我们希望一方面磁盘盘片接触面等效应力愈小愈好,这样磁盘盘面不会被划伤;另一方面磁头与磁盘间距愈小愈好,不至

于影响磁头对磁盘盘片信息的读取。因此,在实际设计中,要综合考虑两者的影响。本设计中将磁盘盘片接触面等效应力及磁头与磁盘间距这两个耐撞性能视为同等重要,因此权重系数 $a = b = 0.5$ 。依据表 5 可知,将各设计变量圆整后分别取值为 1.3 mm、1.0 mm、0.08 mm、4.8 kN/m。将各设计变量取优化值进行有限元仿真的结果与原设计值在相同冲击参数下进行比较,如表 6 所示。结果表明,优化结果均较原设计值有所改进。

表 6 优化前后结果对比

	外壳厚度 /mm	传动臂厚度 /mm	悬臂厚度 /mm	轴承刚度 /(kN·m ⁻¹)	外壳最大 应力/GPa	磁盘盘片接触面 等效应力/MPa	磁头与磁盘 间距/mm
优化前	1.1	0.8	0.08	3.4	0.265 8	2.130 4	0.452 2
优化后	1.3	1.0	0.08	4.8	0.213 0	1.841 8	0.354 1

5 结论

针对跌落冲击下的移动硬盘耐撞性问题,建立了移动硬盘整体跌落冲击有限元模型,兼顾不同的优化目标函数,提出了基于均匀设计、BP 神经网络以及遗传算法的多目标参数优化方法。研究表明:

1) 由于移动硬盘结构的复杂性,在试验中很难检测到关键部件的跌落冲击响应,更难建立结构参数与响应之间的关系。采用有限元分析与试验设计相结合方法,建立移动硬盘关键零件的结构参数与跌落冲击响应之间的非线性映射关系,使结构参数优化与耐撞性能实现有机的结合,从而为零件结构参数优化提供了有力的理论依据。

2) 优化后的结构参数值进行跌落冲击仿真,其结果要优于原设计值仿真结果。这表明通过对关键部件进行结构参数优化,可以提高移动硬盘的耐撞性能。同时,本文基于有限元模型的耐撞性能优化设计方法大大提高了优化效率,也为复杂机械结构的优化提供了新途径。

[参考文献]

- [1] 林大超,施惠基,曾德斌等. 硬盘驱动器冲击激励的头盘碰撞分析[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(2): 122~126
- [2] 谢正义,陈云飞. 有限元分析在磁头悬架动态特性研究中的应用[J]. 机械制造与自动化, 2005, 34(5): 21~24
- [3] Edwards J R. Finite element analysis of the shock response and head slap behavior of a hard disk drive[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999, 35(2): 864~867
- [4] Shu D W, Shi B J, Meng H, et al. Shock analysis of a head actuator assembly subjected to half-sine acceleration pulses[J]. *Impact Engineering*, 2007, 34: 253~263
- [5] Shu D W, Shi B J, Meng H, et al. The pulse width effect of single half-sine acceleration pulse on the peak response of an actuator arm of hard disk drive[J]. *Materials Science and Engineering*, 2006, 42(3): 199~203
- [6] 李裕春,时党勇,赵远. ANSYS10.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006
- [7] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994
- [8] 飞思科技产品研发中心. 神经网络理论与 Matlab7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006
- [9] 孙伟,张呈林. 基于多目标遗传算法的直升机总体参数优化设计[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(2): 265~269