

基于随机有限元法的装订机精冲板的可靠性分析

戈道川, 潘柏松*, 车良松, 郑立君

(浙江工业大学 机械制造及自动化教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为了研究装订机精冲板的可靠性, 采用有限元和蒙特卡洛相结合的方法对装订机精冲板模型进行了 500 次的模拟抽样, 并对其刚度和强度的可靠度及灵敏度进行了分析。计算结果表明, 除了材料的随机因素外, 影响最大的因素是第 9 个孔上的载荷和精冲板厚度, 这对装订机精冲板的可靠性优化和制造过程中提高其可靠度提供了依据。

关键词: 有限元法; 蒙特卡洛法; 可靠性; 灵敏度; 精冲板

中图分类号: TH123; TH693.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)03-0310-04

Reliability analysis for punch-board of binding machine based on random finite element method

GE Dao-chuan, PAN Bai-song, CHE Liang-song, ZHENG Li-jun

(The MOE Key Laboratory of Mechanical Manufacture and Automation, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the study of the reliability for punch-board model of binding machine, finite element and Monte-Carlo method were adopted to stimulate and 500 times samplings were carried on, and then the reliability and sensitivity of its stiffness and strength were analyzed. The results indicate that, except the random elements of material, the most influential elements are the load of the ninth hole and the thickness of the punch-board. It will provide the necessary evidence for improving its reliability during its optimization and manufacturing stage.

Key words: finite element; Monte-Carlo; reliability; sensitivity; punch-board

0 引言

随机有限元法是一种将随机分析理论与有限元方法相结合的数值分析方法, 该方法既可以处理结构参数随机问题, 也可以处理系统输入随机问题。Armen Der Kiureghian^[1]于 1985 年提出了基于有限元的结构可靠度分析方法, 从而引起了以结构可靠度分析为目的的随机有限元法研究的兴起。我国的武清玺首先将这种方法推广应用到某重力坝的可靠度分析中, 随后李同春将这种方法推广到三维块体结构分析中^[2-3]。

目前, 国内以随机有限元法为基础的可靠性分析方法已经广泛应用于桥梁、水坝等土木结构和机械结构中, 并取得了积极成果。

本研究基于随机有限元法, 对装订机精冲板进行可靠性分析, 得出基于强度和刚度的可靠度, 并对其灵敏度进行分析, 得出对其刚度和强度影响较大的参数。

1 精冲板的可靠性模型

1.1 基本概念

目前, 结构可靠度一般定义为结构在一定的工况

下、一定的时间内完成规定功能的概率,在对结构进行可靠度计算时,结构的极限状态(临界失效状态)是由结构的功能函数来表示的,其表达形式如下^[4-5]:

$$Z = g(X) \tag{1}$$

其中,随机向量 $X = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ 表征了工程中存在的不确定信息,如载荷参数,材料属性,结构尺寸等。在解析几何中,极限状态方程 $g(X) = 0$ 表示在坐标系 $OX_1X_2X_3 \dots X_n$ 中的 n 维极限状态曲面, $g(X) > 0$ 一侧,结构处于可靠状态,极限状态曲面 $g(X) < 0$ 一侧,产品处于失效状态。

结构的失效概率:

$$P_f = P(g(X) < 0) = \int_{\Omega_f} f(X) dX \tag{2}$$

式中: P_f —结构的失效概率, $f(X)$ —随机变量的联合概率密度函数, Ω_f —结构的失效域。

1.2 可靠度计算的 Monte-Carlo 法

Monte-Carlo 法通常又被称之为随机模拟法,是可靠性分析中最基本、使用范围最广的数值模拟方法。该方法对于功能函数的具体形式、变量的维数和分布类型都没有特别的要求,而且利用 Matlab 较易于编程求解。

Monte-Carlo 可靠性分析方法的主要计算步骤如下^[6-9]:

(1) 依据随机变量的分布形式和参数,由随机样本的产生方法产生 N 组随机向量的样本:

$$x_k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn}) \quad (K = 1, 2, \dots, N) \tag{3}$$

(2) 将随机向量样本 x_k 代入极限状态方程 $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 示性函数 $I_g(x_k)$ 统计结果数组中小于零的个数,记作 m 。

(3) 根据 $P_f = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I[g(x_k)] = \frac{m}{N}$ 求得失效概率估计值,其中:

$$\begin{cases} I[g(x_k)] = 1, & (g(x_k) < 0) \\ I[g(x_k)] = 0, & (g(x_k) > 0) \end{cases}$$

Monte-Carlo 法是一种随机抽样模拟法,分析结果的精度与抽样的次数密切相关,抽样的次数越多,分析结果的精度就越高。

1.3 精冲板可靠性的数学建模

装订机精冲板的随机变量包括 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}$, 假设各随机变量相互独立,具体如表 1 所示。

则建立基于强度和刚度可靠性的功能函数如下:

$$\begin{cases} Z_Q = \phi(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}) \\ Z_G = \phi(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}) \end{cases} \tag{4}$$

由于精冲板的结构和受载比较复杂,难以建立显式功能函数,本研究通过随机有限元的 Monte-Carlo 法进行结构可靠度求解。

表 1 精冲板随机变量信息表

变量名称	变量符号	分布类型	均值(u)	方差(δ)
杨氏模量	x_1	正态分布	219 000 MPa	10 950 MPa
第四过孔上载荷	x_2	正态分布	170 N	2.24 N
第五过孔上载荷	x_3	正态分布	155 N	2.87 N
第六过孔上载荷	x_4	正态分布	40 N	0.95 N
第九过孔上载荷	x_5	正态分布	260 N	3.48 N
精冲板厚度	x_6	正态分布	4 mm	0.008 mm
截面尺寸宽	x_7	正态分布	30 mm	0.001 mm
前面板高度	x_8	正态分布	10 mm	0.003 3 mm
后面板高度	x_9	正态分布	15 mm	0.002 2 mm
前伸板长度	x_{10}	正态分布	5 mm	0.006 7 mm

2 精冲板可靠性分析模型

精冲板外形结构简图如图 1 所示,根据编程计算结果显示,当精冲板处在最危险的工况时,左边第 4 个孔受力为 value_1,第 5 个孔受力为 value_2,第 6 个孔受力为 value_3,第 9 个孔受力为 value_4,由于精冲板受载沿中间线对称(精冲板共有 21 个过孔),因而在对称的另一侧相对应的位置上受到的力是一样的。利用 ANSYS 建立精冲板的有限元模型,其中材料为 08F 优质碳素结构钢,930 °C 正火热处理,泊松比为 0.3,杨氏模量为 219 kN/mm²,材料的屈服极限为 255 MPa,精冲板的许用挠度为 0.62 mm。

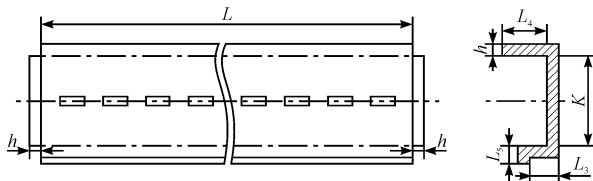


图 1 精冲板的外形结构简图

2.1 精冲板的有限元分析模型

考虑到精冲板结构的复杂性,在应用 ANSYS 软件进行有限元分析时,选择有二次方位移和能很好划分不规则网格的 SOLID92,网格精度划分等级为 3 级,精冲板有限元模型如图 2 所示。

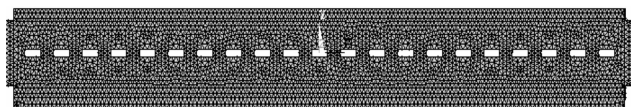


图 2 精冲板有限元模型

2.2 加载和边界条件

约束精冲板左端面上各节点 x 方向上的位移,约束另一个端面的各节点 y 方向的位移,模型加载采用分布载荷,载荷加载在过孔的边缘处。

3 基于随机有限元的精冲板可靠性计算与分析

在 ANSYS 的 PDS 模块中,本研究利用 Monte-Carlo 法对精冲板进行 500 次抽样,求出了置信度为 95% 的精冲板刚度和强度的可靠度值,并对其灵敏度进行了分析^[10]:

(1) 经过随机有限元分析,得到置信度为 95% 的精冲板刚度可靠度为 1,强度可靠度为 0.994 7。

(2) 根据输出随机变量最大应力 s_{max} 、最大挠度 d_{max} 在置信度为 95% 时的分布图(如图 3、图 4 所示)可知,最大应力 s_{max} 虽然分布范围大,但都分布在区间 $[100, 256.5]$ 内;而 d_{max} 的取值都远小于许用挠度,这与上面的可靠度计算结果是相符的。

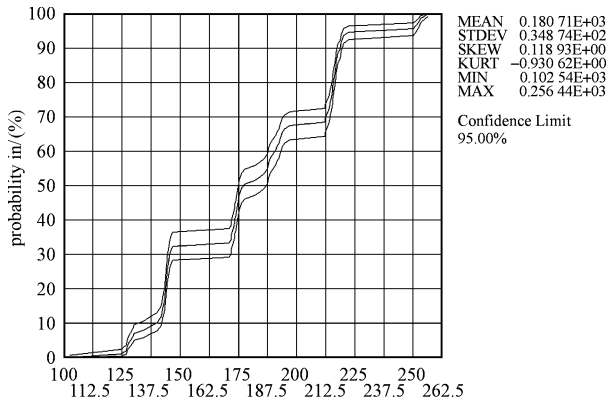


图 3 最大应力 s_{max} 的累积分布函数

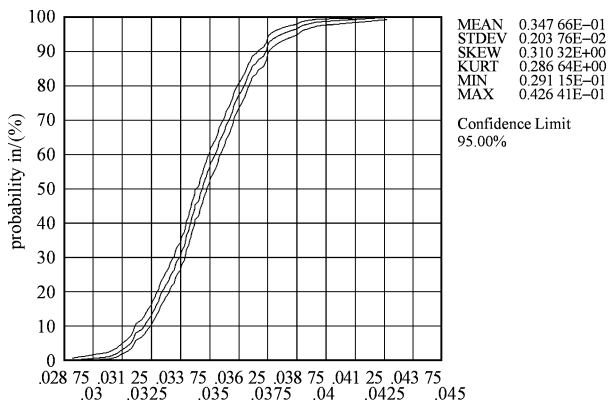


图 4 最大挠度 d_{max} 的累积分布函数

(3) 根据输出随机变量 s_{max} 、 d_{max} 的抽样过程图(如图 5、图 6 所示)可知。随着模拟抽样次数的增加,

各输出随机变量平均值收敛,表明模拟次数已经足够。

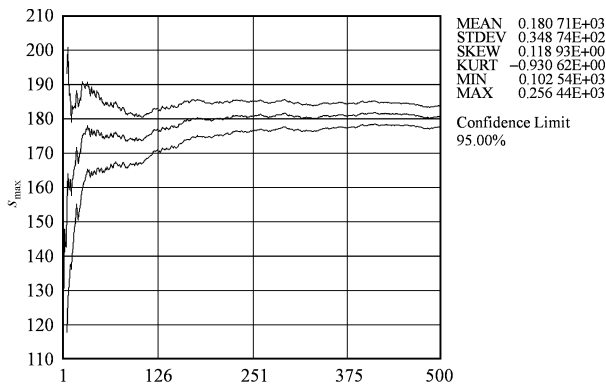


图 5 最大应力 s_{max} 的抽样过程显示

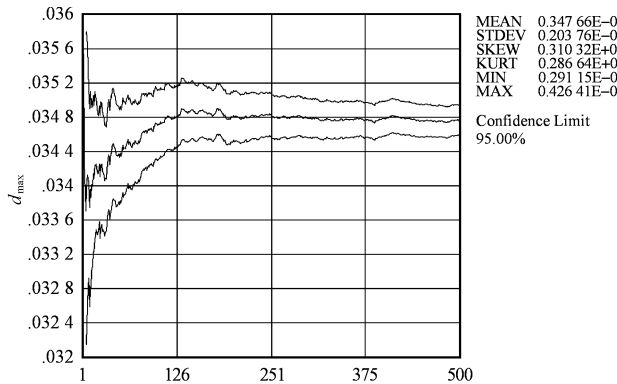


图 6 最大挠度 d_{max} 的抽样过程显示

(4) 根据输出随机变量最大应力 s_{max} 和最大挠度 d_{max} 的灵敏度曲线(如图 7、图 8 所示)可知,精冲板的厚度 H 和第 9 个孔上的载荷 value_4 对最大应力 s_{max} 影响最大,其它参数影响较小;材料的杨氏模量 YOUNG 和精冲板的厚度 H 对最大挠度 d_{max} 影响最大,其它参数影响相对较小;综合考虑以上因素,精冲板厚度 H 对精冲板的整体可靠度影响最大。

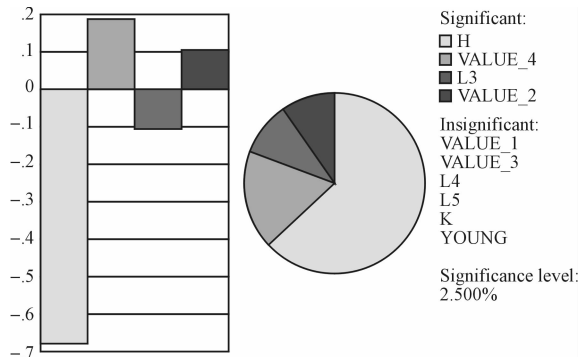


图 7 最大应力 s_{max} 的灵敏度分析图

(5) 对输出随机变量最大应力 s_{max} 和最大挠度 d_{max} 影响最大的两个参数分别为精冲板厚度 H 和材料杨氏模量 YOUNG,其取值分布图成柱状(如图 9、图 10 所示),且取值都不存在较大的间隙和跳跃,也表明模

拟的次数是足够的,结果是可信的。

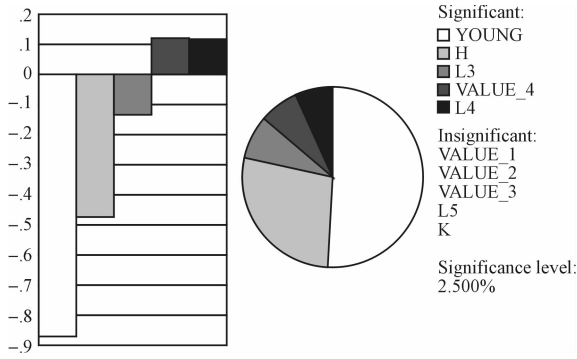


图8 最大挠度 d_{max} 的灵敏度分析图

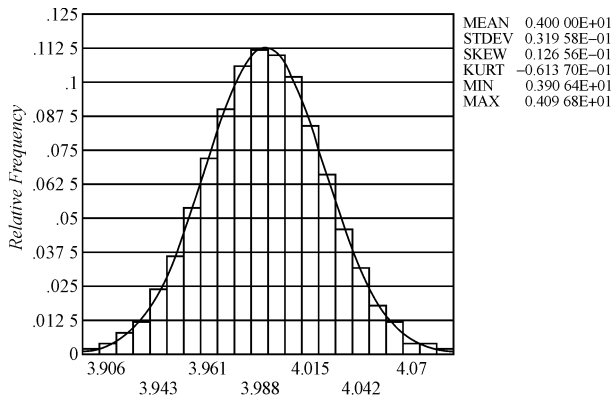


图9 精冲板厚度 H 取值分布柱状图

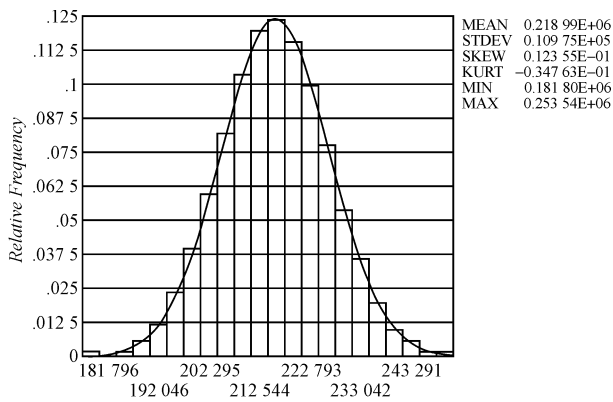


图10 材料杨氏模量 YOUNG 取值分布柱状图

4 结束语

由于精冲板结构很复杂,随机参数较多,难以建立显式极限状态函数,故本研究采用了随机有限元的方法对其进行结构可靠性计算分析,计算结果和计算过

程表明,相对精冲板的简化显式可靠性求解数学模型,随机有限元法求出的结果更可靠、更精确,由此可见,随机有限元的数值模拟法是求解装订机精冲板等复杂结构的有效方法。

通过对装订机精冲板的随机有限元分析,找出了除材料随机因素外对其可靠度影响较大的参数分别是精冲板第九个孔上的载荷和精冲板的厚度,这为精冲板在可靠性优化和制造过程中提高结构的可靠度提供了参考,同时也为装订机整体刀的优化设计提供了依据。

参考文献 (References) :

- [1] DER K A. Finite element methods in structural safety studies [C]//In: Structural Safety Studies, Proceeding of ASCE, Symposium, Denver, Co., 1985:40-52.
- [2] 武清玺,吴世伟,吕泰仁. 基于有限元法重力坝可靠度分析[J]. 水利学报,1990(1):58-64.
- [3] 武清玺. 结构可靠性分析及随机有限元法[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [4] 张建国,苏多,刘英卫. 机械产品可靠性分析与优化[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- [5] DAI Hong-zhe, WANG Wei. Application of low-discrepancy sampling method in structural reliability analysis[J]. **Structural Safety**,2009,31(1):55-64.
- [6] 戚松,赵洪伦,王社峰. 运用 ANSYS 软件与蒙特卡罗法相结合的随机有限元方法进行车辆构件强度可靠性分析[J]. 铁道车辆,2009,47(2):6-8.
- [7] CARDOSO J B, ALMEIDA J R, DIAS J M, et al. Structural reliability analysis using Monte Carlo simulation and neural networks [J]. **Advances in Engineering Software**, 2008,39(6):505-507.
- [8] SUDRET B, KIUREGHIAN A D. Comparison of finite element reliability methods [J]. **Probabilistic Engineering Mechanics**,2002,17(4):339-341.
- [9] 王建军,于长波,李其汉. 工程中的随机有限元方法[J]. 应用力学学报,2006(2):298-300.
- [10] 高红霞,王树林. 基于有限元法的加氢精制反应器的可靠性分析[J]. 机械设计与制造,2010(6):4-5.

[编辑:柴福莉]