

# 起重机双钩危险区域强度可靠性分析

舒安庆<sup>1</sup>,肖 普<sup>1</sup>,丁克勤<sup>2</sup>,乔 松<sup>2</sup>,魏化中<sup>1</sup>

(1. 武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205,

2. 中国特种设备检测研究院,北京 100013)

**摘 要:**在起重吊装作业中常有因吊钩强度不足而导致事故发生的问题,概率有限元法能清楚地模拟实际问题的真实行为特征,利用该方法可以实现吊钩极限工况下的危险区域强度可靠性分析,并确定敏感性因素,给出可靠性分析结果. 运用通用有限元分析软件,首先根据吊钩的极限载荷工况,对其进行静应力分析,确定其危险区域和最大应力值,然后利用软件提供的概率分析系统模块,根据应力-强度干涉理论,建立极限状态函数,生成概率分析文件,选用蒙特卡罗方法和拉丁抽样法对吊钩进行可靠性分析. 分析结果表明,在置信度为95%时,吊钩可靠度达94.1%,其可靠度在可以接受的范围内.

**关键词:**起重机;吊钩;有限元;可靠性分析;蒙特卡罗法

**中图分类号:**TH218

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2012.07.010

## 0 引 言

吊钩是起重机的三大重要构件之一,在起重作业中,所承受的载荷复杂,环境严酷,一旦发生故障将导致极其严重的后果. 在对某公司SCC10000履带起重机进行风险评估过程中,发现由吊钩引发的安全事故也占到相当比例,除了第三方的原因外,吊钩本身的设计水平及制造质量也是一个重要因素,所以对起重机吊钩进行有限元分析及可靠性评估是十分重要的<sup>[1]</sup>.

用有限元建立机械系统分析的数学模型已成为其理论建模中最重要方法,它对于计算构件性能是一种很有效的方法. 有限元分析软件(ANSYS)提供的概率分析功能能够从有限元分析的角度,计算非确定性输入参数对结构性能的影响,或者确定有限元分析的某些计算结果不满足用户指定设计准则的概率,从而实现“可靠性分析”<sup>[2]</sup>.

文章参考了上海交通大学张长文<sup>[3]</sup>等人对SCC10000履带起重机吊钩的优化设计参数,在有限元分析软件的基础上,利用参数化建模语言(APDL)进行参数化建模,然后利用有限元分析的概率(PDS)模块完成该结构的可靠性分析,从结构和尺寸上分析出影响吊钩危险区域强度可靠性的关键因素及其敏感性,得到的结果可信度高.

## 1 APDL 参数化建模及有限元分析

### 1.1 APDL 参数化建模优势

由于在ANSYS的软件系统中,本身兼容了很多其他计算机辅助设计(CAD)系统(Pro/E、UG等三维软件)的接口,使得目前大多采用第三方软件的建模后导入通用有限元分析软件的方式. 但在实际应用中存在着明显的缺陷,既需要考虑CAD系统的授权和兼容性问题,又无法实现无损失转换,有时需要做大量的修补工作. 运用APDL参数化设计语言在ANSYS环境中直接进行二维或三维建模和网格划分,这样有利于与后续的ANSYS高级分析功能(优化分析、可靠性分析、疲劳分析等)实现无缝连接.

文章除了对起重机双钩进行强度分析外,还利用ANSYS的PDS模块进行可靠性分析,因此实现全参数化即利用APDL建模是不错的选择.

### 1.2 建立有限元模型

起重机承载1000 t的矩形截面吊钩采用双钩对称式锻造结构,材料采用DG20Mn,密度为 $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量 $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ ,泊松比 $\mu = 0.3$ ,抗拉强度 $\sigma_b = 608 \text{ MPa}$ ,屈服点 $\sigma_s = 333 \text{ MPa}$ ,文献[3]的双钩初始设计尺寸(mm)如图1所示.

收稿日期:2012-04-05

基金项目:国家质检总局科技计划项目(2010QK141)

作者简介:舒安庆(1964-),男,浙江宁波人,教授,硕士. 研究方向:流体机械和搅拌设备的研究开发、新型高效过程装备及仿真技术和压力容器、压力管道.

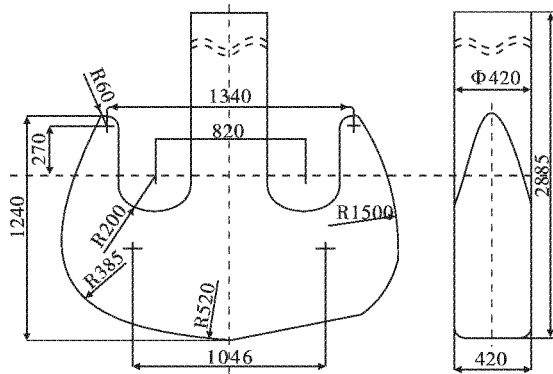


图 1 吊钩初步设计尺寸

Fig. 1 Dimensions of hook preliminary design

分析中,吊钩选用 PLANE82 单元离散分网. PLANE82 是 2 维 8 节点结构实体单元,对于四边形和三角形混合网格,它较高的结果精度,可以适应不规则形状而较少损失精度,建立有限元模型.

### 1.3 吊钩约束及载荷分析

因吊钩在厚度方向的截面是不发生变化的(见图 1),为提高分析效率,采用平面应力分析方法,所以在考虑钢丝绳加载于吊钩上的外载荷时,将钢丝绳在吊钩厚度方向作简化处理,认为在厚度方向是线性分布的. 根据文献[4]的分析,对外载荷转化为等效节点力的处理方法的不同,对分析结果有影响,尤其是局部应力分析. 文献[5]也认为,两接触表面挤压应力一般在  $120^\circ$  范围内按余弦规律分布,在挤压应力合力方向上应力最大,所以这里不能将钢丝绳施加给吊钩的载荷当作简单的集中力来处理. 钢索直径 65 mm,由文献[6]的分析,接触表面的压力分布如图 2 所示,笔者按此作简化等效处理后,取作用区段 35 mm.

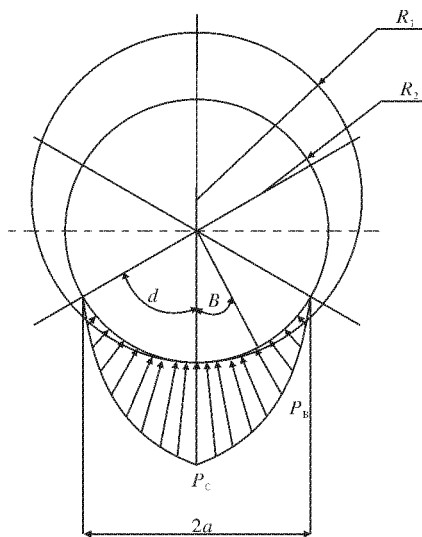


图 2 接触压力分布

Fig. 2 Contact pressure distribution

根据吊钩使用规程,吊装过程中,钢丝绳的拉力角度  $\alpha$  (与垂直方向的夹角)一般在  $30^\circ$  左右,最大不允许超过  $40^\circ$ . 因此,吊钩达到最大起重量 1 000 t,且钢丝绳拉力角度为  $40^\circ$  时,  $F = \frac{500 \times 9.8}{\cos(\frac{\alpha}{2})}$ ,

方向为经过圆心垂直于圆弧面,此时吊钩处于载荷的极限工况.

吊钩的约束设置如图 3 所示,约束施加于上端轴孔内表面,假设吊钩在工作中只能绕 Z 轴旋转,定义约束时将该处除 Z 轴旋转自由度外,其余自由度完全固定. 在工作过程中,载荷施加于左右两个半圆形孔上,由于吊钩的对称特点,在对称面上增加对称约束,以消除结构整体水平位移.

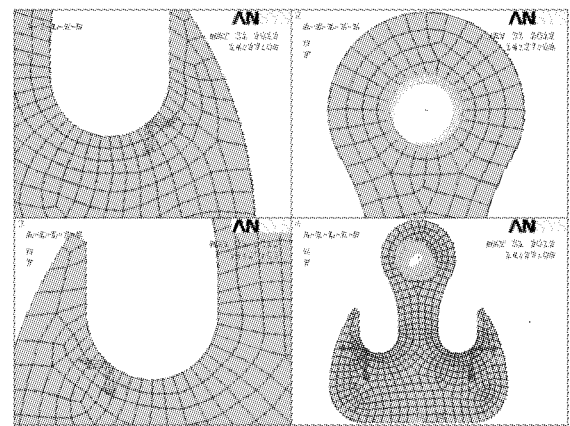


图 3 载荷约束分布图

Fig. 3 Load constraint maps

## 2 吊钩危险区域强度可靠性分析

### 2.1 概率有限元分析技术

不同于一般的有限元理论,概率有限元法面临的困难来自于对随机算子和随机矩阵求逆运算. 但与确定的有限元法一样,概率有限元法必须依赖计算机来求解问题. 在概率有限元分析中,最常用的是蒙特卡罗方法,该方法能清楚的模拟实际问题的真实行为特征. 在 ANSYS 的理论系统中,蒙特卡罗模拟技术可以选择直接抽样法或是拉丁方法进行抽样处理. 一个分析循环代表一个加工制造的零件承受一个特定系列的载荷和边界条件的作用. 其基本分析过程:首先建立一个概率模型,使所求问题的解正好是该模型参数或其他有关的特征量;然后通过模拟和统计,即用多次的计算机模拟代替真实的实验,统计出某事件的发生百分比,由统计学知识可以得出,当实验次数足够多时,该百分比将十分接近事件的发生概率.

在结构强度可靠性分析中,结构的极限状态

是由功能函数表达的,其形式为  $Z = g(\mathbf{X})$ , 其中随机矢量  $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  表征了工程中存在着的不确定信息、结构尺寸和载荷的随机性等。当  $g(\mathbf{X}) > 0$  时, 结构处于安全状态; 当  $g(\mathbf{X}) = 0$  时, 结构处于极限状态; 当  $g(\mathbf{X}) < 0$  时, 结构失效。结构失效概率  $p_f$  为:

$$p_f = P[g(\mathbf{X}) < 0] = \int_{g(\mathbf{X}) < 0} f(\mathbf{X}) d\mathbf{X}$$

式中:  $f(\mathbf{X})$  为随机矢量的联合概率密度函数。

当以强度  $\sigma$  和应力  $S$  来表示结构的失效模式, 且为正态分布, 结构功能函数可以表示为:  $Z = g(\sigma, S) = \sigma - S$  将  $Z \sim N(m_z, \sigma_z)$  转换为标准正态分布  $Y \sim N(0, 1)$ , 由文献[7]知结构的可靠度指标  $\beta = m_z / \sigma_z$  其几何含义如图4所示。

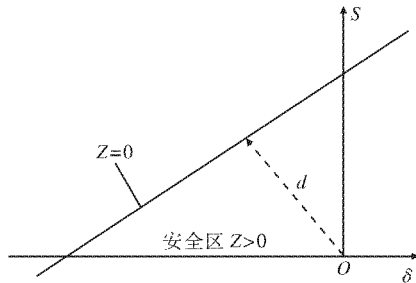


图4 标准正态变量空间中可靠指标的几何含义

Fig. 4 Geometric meaning of reliable indicator in standard normal variable space

## 2.2 相关统计参数分布的确定

**2.2.1 载荷** 研究对象的随机性是由很多互不相干的随机因素的乘积所引起的, 且每一个随机因素的影响都很微小, 可以认为该随即变量服从对数正态分布<sup>[2]</sup>。吊钩在工作时主要承受的是所吊重物的重量, 在结构可靠度分析中, 载荷通常可以假设为该种分布。

**2.2.2 结构尺寸** 研究对象的随机性是由很多独立的随机因素之和引起的, 每一个随机因素不起主要作用, 可以认为该随机变量服从正态分布(又称高斯分布)<sup>[2]</sup>。结构尺寸  $x$  的变化仅受机械加工条件中的偶然因素的影响, 只要加工处于稳定状态, 尺寸抽样值出现在期望值  $3\sigma$  左右范围的概率为99.73%, 可以假定其服从正态分布。结构尺寸分布函数为

$$f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2}$$

**2.2.3 材料性能** 吊钩所用材料为 DG20Mn, 应用的结构安全极限指标有屈服极限  $r$  和断裂韧性  $k_{th}$ 。由文献[2]可知材料性能也可以假定为对数正态分布。 $R$  及  $k_{th}$  的分布密度函数分别为:

$$f_r(r) = \frac{1}{\xi_r r \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{\ln r - \lambda_r}{\xi_r})^2};$$

$$f_{k_{th}} = \frac{1}{\xi_{k_{th}} k_{th} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{\ln k_{th} - \lambda_{k_{th}}}{\xi_{k_{th}}})^2}$$

式中:  $\xi_r = \ln(1 + c_r^2)$ ;  $\lambda_r = \ln \mu_r - \frac{1}{2} \xi_r$ ;

$$\xi_{k_{th}} = \ln(1 + c_{k_{th}}^2); \lambda_{k_{th}} = \ln \mu_{k_{th}} - \frac{1}{2} \xi_{k_{th}}$$

## 2.3 计算分析与结果提取

经过对吊钩的极限工况下的强度分析, 可知其最大应力达 215 MPa, 且最大应力出现在钢丝绳和钩体的接触区, 由 Von Mises 等效应力云图(见图5)可以看到在该载荷工况下吊钩的应力分布呈现出很强的区域特征, 在钢丝绳作用区附近也出现了较大的变形, 在满足材料变形极限的情况下, 这种变形也起到改善钩柄受力的作用<sup>[8]</sup>。在钩体的中间有明显的低应力区, 对该低应力区在设计时可以考虑进行优化设计。考虑到起重机工作级别和极限载荷工况, 取安全系数  $n_s = 13$ ,  $[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n_s} = 256.2$  MPa, 但最大应力小于最大许用应力, 钩体强度是安全的。

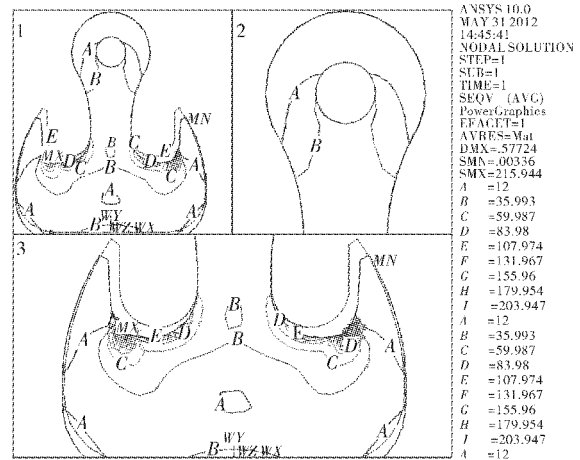


图5 吊钩的 Von Mises 等值线图

Fig. 5 Hook effect of contour plots

进行结构强度分析后, 虽然最大应力在许用应力范围内, 但在实际工程应用中, 设计中的任何参数的波动或制造配合中的误差都会使钩体的实际应力状况发生较大改变。因此在以上静力分析的基础上, 要对危险区域的强度进行进一步的可靠性分析。使用 \*GET 命令提取计算结果, 将其作为输入变量的参数, 生成分析文件。指定输入变量及输出结果变量, 输入随机输入参数服从的分布类型及数字特征, 取钩孔半径  $R_1$ , 钩柄半厚度  $D$ , 钩柄高度  $H_2$ , 起吊质量  $m$ , 沟沿高度  $H$ , 材料弹性模量  $E_{X1}$ , 屈服极限  $\sigma_s$ , 如表1所示, 取最大应力点所对应的应力  $S_{max}$  作为随机输出变量。



表 1 随机输入变量及参数特征表

Table 1 Random input variables and parameters characteristic table

项目	变 量						
	$R_1/\text{mm}$	$D/\text{mm}$	$H/\text{mm}$	$M/\text{t}$	$H_2/\text{mm}$	$E_{\text{H}}/\text{MPa}$	$\sigma_s/\text{MPa}$
分布类型	GAUS	GAUS	GAUS	GAUS	GAUS	GAUS	GAUS
均值	220	210	1 240	1 000	1 100	$2.1 \times 10^5$	256
标准差	4.986	4.894	12.347	9.347	11.599	$0.1 \times 10^5$	24

应用 ANSYS 软件,选择蒙特卡罗法进行分析,抽样方法为拉丁超立方方法(LHS)进行可靠性分析。

#### 2.4 可靠性分析

2.4.1 模拟次数确定 利用蒙特卡罗法进行可靠性分析,抽样次数的多少直接影响计算精度。因此确定合理的抽样次数对计算精度至关重要。图 6 和图 7 分别显示对随机变量进行 500 次抽样后的随机输出变量 MAXSTR 的样本均值历史和样本标准差历史。由图可知该样本值已趋于收敛,故采用 500 次拉丁超立方抽样进行蒙特卡罗计算吊钩在极限工况下的可靠度是可行的。

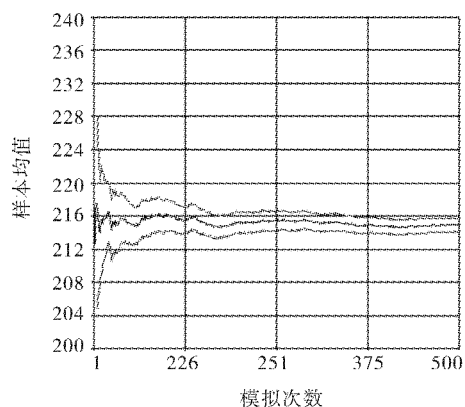


图 6 MAXSTR 样本均值历史

Fig. 6 Mean value history for output parameter MAXSTR

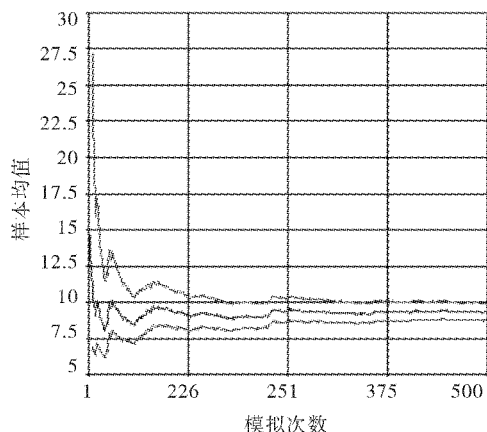


图 7 MAXSTR 样本标准差历史

Fig. 7 Standard deviation history for output parameter MAXSTR

2.4.2 结构可靠度 结构可靠性分析表明:在置信度为 95% 时结构可靠性为 94.1%。

2.4.3 随机输入参数对输出变量的影响 通过敏感性分析,得到设计变量与输出变量的敏感图如图 8、图 9 所示。线性相关性表格如表 2 所示,这些结果可清晰的反映不同的设计参数的影响程度。在 ANSYS 的敏感性分析中,输入参数对输出参数影响水平在 2.5% 以下时归为相对影响不大的因素;在 2.5% 以上时归为显著影响因素。由敏感性示意图可知,钩柄尺寸对最大应力的变化趋势有很大的影响,相关性很强,在吊钩的设计分析中应多加注意。

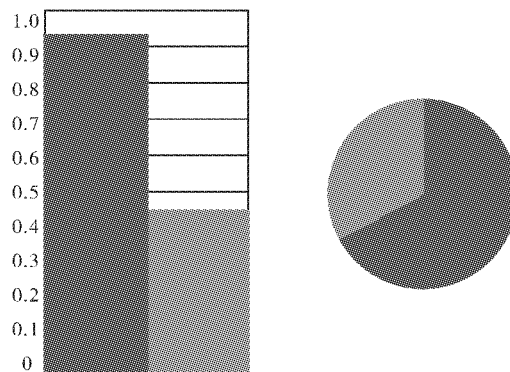


图 8 可靠度敏感性分析示意图

Fig. 8 Sensitivity plot for Z

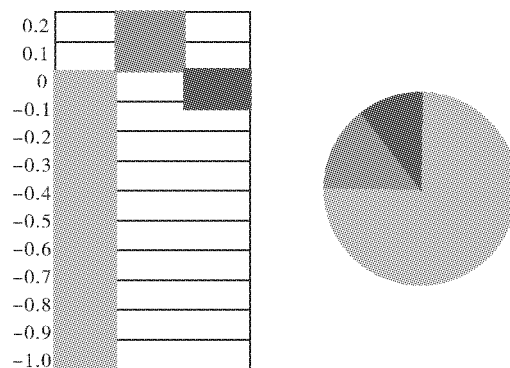


图 9 MAXSTR 敏感性分布示意图

Fig. 9 Sensitivity plot for MAXSTR

表2 随机输入参数对 MAXSTR 的线性相关性

Table 2 Linear correlation coefficients between input and output variables

	变 量						
	$R_1$	$D$	$H$	$M$	$H_2$	$E_{x1}$	$\sigma_s$
与 MAXSTR 的相关性	-0.071	-0.970	-0.014	0.198	0.021	0.036	-0.114

综合上述分析,吊钩在极限载荷作用下的强度可靠性主要由吊钩柄宽度和材料的屈服极限控制.因为材料屈服极限均值的增加,会提高屈服极限大于吊钩最大等效应力的概率,而吊钩柄宽度的增加,会使吊钩的应力水平降低,从而导致吊钩可靠度的增加.

### 3 结 语

通过有限元分析计算,可以明确的知道最大应力的大小和分布状况,计算结果与实际情况也十分吻合,根据应力分布的区域性特点,也能为吊钩的优化设计提供参考,对产品质量检查中确定重点检查部位有一定的指导作用.

根据强度失效准则,建立极限状态功能函数进行可靠性分析时,概率有限元法可以准确地确定结构应力最大位置,利用参数化设计语言实现吊钩极限工况下的危险区域强度可靠性分析,并确定敏感性因素,考虑了输入变量的随机性,最后给出可靠性分析结果.其结果可供起重机吊钩设

计和结构分析时参考,具有一定的工程应用价值.

### 参考文献:

- [1] 舒安庆,张鹏,丁克勤,等. 门座式起重机臂架折断故障木对分析与对策[J]. 武汉工程大学学报,2012,34(6):69-73.
- [2] 戴树和. 可靠性工程及其在化工设备中的应用[M]. 北京:化学工业出版社,1987:30-50.
- [3] 张长文,鲁国富. 工字形吊钩优化设计研究[J]. 机械研究与应用,2010(5):15-18.
- [4] 张杰,冯培恩. 履带式液压挖掘机有限元分析节点外载荷计算[J]. 工程机械,1992(12):2.
- [5] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京:人民教育出版社,1979:287-294.
- [6] 黄义. 弹性力学基础及有限单元法[J]. 西安冶金建筑学院学报,1980(6):162-165.
- [7] 王明强,朱彤. 应用 ANSYS 概率有限元法的连杆结构强度可靠性分析[J]. 现代制造工程,2008(3):54-57.
- [8] 李菁,靳慧,丁克勤. 300 t 造船龙门起重机结构动力特性分析[J]. 武汉理工大学学报,2010,32(6):54-58.

## Assessment of strength reliability for crane double hook based on finite element analysis

SHU An-qing<sup>1</sup>, XIAO Pu<sup>1</sup>, DING Ke-qin<sup>2</sup>, QIAO Song<sup>2</sup>, WEI Hua-zhong<sup>1</sup>

(Mechanical and Electrical Engineering College, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;  
Special Equipment Testing Research Institute of China, Beijing 100013, China)

**Abstract:** To prevent accidents in the lifting operation because of the insufficient strength of the hook, we used finite element method to simulate the real behavior characteristics of practical problems, and realize the analysis of strength reliability of dangerous zone of hook in the limit condition by using parameter design language. Meanwhile, we confirmed the sensitive factors and provided the result of reliability analysis. According to the hook's maximum load condition, a static stress analysis was made and the dangerous zone and maximum stress value was confirmed by using the universal finite element analysis software. Then according to the stress-strength interference theory, the limit state function was established and the probability analysis file was generated by using the probability analysis system module provided by the software. The Monte Carlo method and Latin sampling method were employed to conduct the reliability analysis of hook in this paper. The results show that the degree of reliability of hook is 94.1% when the degree of confidence is 95%, and the degree of reliability is acceptable.

**Key words:** crane; hook; finite element; reliability analysis; Monte Carlo method

本文编辑:陈小平