

# Forearm of Industrial Robot Reliability Analysis Based on Response Surface & Stochastic Finite Element Method

Feng QIN, Qiguo HU, Ting LIU

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, CHINA

**Abstract:** Based on the APDL language of ANSYS industrial robot forearm structure parameters of finite element model is established, and deterministic finite element is analyzed, utilizing the sample point that after Monte Carlo simple sampling to fitting arm structure, getting the analytic expression of response variables (reliability function) with random input variables, instead of the finite element model of a large number of Monte Carlo sampling and obtaining the reliability of the arm structure to overcome the disadvantage that direct Monte Carlo method requires a huge sample and calling the finite element model needs long time.

**Keywords:** industrial robot forearm; response surface; monte carlo; reliability

## 响应面随机有限元的工业机器人小臂可靠性分析

秦 锋, 胡启国, 刘 廷

重庆交通大学, 重庆, 中国, 400074

**摘 要:** 基于 ANSYS 的 APDL 语言建立工业机器人小臂结构参数化有限元模型并进行确定性有限元分析, 并利用蒙特卡洛简单抽样后的样本点作为响应面的拟合样本点拟合小臂结构, 得到响应变量 (可靠性状态函数) 与随机输入变量的近似解析表达式, 代替有限元模型进行大量蒙特卡洛抽样, 得到小臂结构的可靠性, 解决了直接蒙特卡洛法所需样本巨大及调用有限元模型时间长的缺点。

**关键词:** 工业机器人小臂; 响应面; 蒙特卡洛; 可靠性

### 1 引言

工业机器人是面向工业领域的多关节机械手或多自由度的机器装置, 自动执行工作, 是靠自身动力和控制能力来实现各种功能的一种机器[1]。其标准化、模块化、网络化和智能化的程度也越来越高[2], 在汽车制造、机械加工、焊接、搬运码垛、装配、喷涂等作业中得到越来越多的应用[3]。所以当工业机器人一旦失效或发生故障时, 将造成难以预测的后果, 有必要对其进行可靠性分析。蒙特卡洛模拟法需要进行多次样本抽样, 计算量巨大, 在工程上不太适用[4-6]。响应面法以不含交叉项的多项式来模拟隐式功能函数, 以此多项式函数的失效概率代替结构的失效概率[7]。笔者将确定性有限元、响应面方法 (多项式响应面法) 与蒙特卡洛模拟法相结合针对某工业机器人小臂进行静态可靠性分析, 解决了隐性功能函数下机械零部件可靠性分析问题。

### 2 响应面随机有限元法基本原理

响应面法是解决复杂隐式结构表达式输入变量和输出变量之间关系的一种方法。主要途径是通过大量统计抽样模拟试验, 得到的输入变量和输出变量拟合表达式  $Z' = g'(x)$  去代替客观真实的表达式  $Z = g(x)$ 。对随机变量  $x_1, x_2, \dots, x_m$  时, 响应面多用一个不含交叉项的二次多项式表示, 即:

$$Z' = g'(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

式中,  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii} \rightarrow (i=1, 2, \dots, n)$  即为该二项式的待定系数, 可以通过最小二乘法得到每个系数。 $n$  表示待定系数个数。从式(1)可知,  $Z'$  的待定系数个数取决于  $n$  值的大小。

在零件结构可靠性分析时响应值一般指最大应力值, 则零件结构失效率表示为:

$$P_f = \int \dots \int \{g(x) \leq 0\} f_x(x) dx \quad (2)$$

式(2)中,  $g(x)$  为状态函数,  $f_x(x) = f_x(x_1, x_2, \dots, x_m)$  为  $m$  个随机变量组成的联合概率密度。当  $g(x) < 0$  时结构失效,  $g(x) > 0$  时结构安

全。

$Z' = g'(x)$  表达的响应面易于计算, 则  $P_f$  计算易于求解, 可靠度为  $R = 1 - P_f$ 。

响应面法实现的基本思路是通过近似统计分析, 拟合出结构的响应面。然后基于此响应面去替代复杂结构的有限元模型, 设计抽样方法进行大量循环模拟。最后对模拟结果统计即可得到输出结构变量统计特性。

### 3 工业机器人小臂确定性有限元分析

某公司研发的 JR608 型六关节工业机器人主要用于搬运和焊接, 以机器人小臂作为可靠性分析对象, 利用 ANSYS 建立小臂的几何模型, 建模过程中简化部分对结果影响不大的结构, 如图 1 所示。

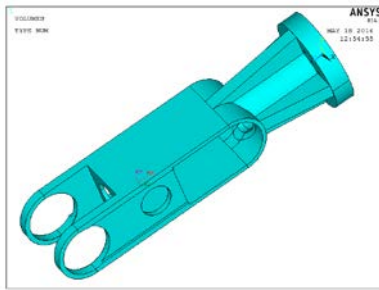


图 1. 机器人小臂有限元模型

#### 3.1 小臂的材料属性及网格划分

小臂的材料是 ZL201, 性能参数如表 1 所示。

表 1. ZL201 性能参数

材料	密度	弹性模量	泊松比	抗拉强度	屈服强度
ZL201	2.70g/cm <sup>3</sup>	72GPa	0.33	295MPa	200MPa

选择 SOLID92 的四面体单元来进行自由网格划分, 划分网格后共有 92730 个节点。

#### 3.2 小臂加载计算及后处理

可靠性分析文件是在确定性有限元分析命令后面加上最大应力提取命令, 同时定义可靠性分析的极限状态函数。得到 JR608 小臂可靠性分析文件基本结构。

有限元前处理后进行的是小臂的边界条件设置, 边界条件包括载荷边界条件和位移边界条件两个部分。载荷边界包含两部分: 第一部分是小臂本体直接承载的载荷, 包括小臂自重 7.436kg、安装在小臂上

驱动手腕运动的多摩川驱动电机 0.9kg 及谐波减速器 0.56kg; 第二部分是末端负载及手腕体组件, 通过小臂末端间接连接方式的载荷, 包括手腕自重 1.263kg、末端负载 8kg、末端多摩川驱动电机 0.9kg 及谐波减速器 0.68kg。位移边界条件约束, 以小臂同电机座装配螺纹孔全约束, 接触面轴向约束。小臂的边界条件施加结果如图 2 所示。



图 2. 臂载荷及位移边界条件

设置完小臂边界条件后, 求解有限元模型, 得到确定性有限元分析结果, 如图 3 所示。

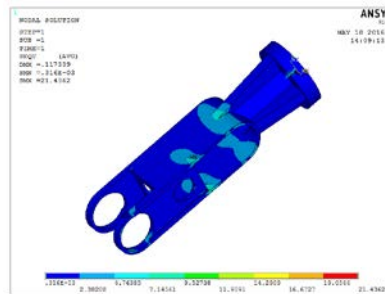


图 3. 小臂有限元结构应力云图

由图 3 可知, 小臂的最大应力出现在筋连接处和手腕体驱动电机座处, 最大应力值 21.4362MPa 远远小于小臂材料 ZL201A 的屈服强度 200MPa, 满足静强度设计要求。

### 4 工业机器人小臂响应面随机有限元可靠性分析

拟合结构响应面是整个响应面法的基础。拟合响应面的基本原理是以特定次数 (随机输入变量个数决定) 的 Monte Carlo 模拟样本值为数据, 建立输入变量与输出变量的结构响应面关系。基于 ANSYS 进行随机有限元可靠性模拟, 具体流程图如图 4 所示。

#### 4.1 建立可靠性分析文件

可靠性分析模拟基础文件即是以前面确定有限元

分析全部过程编辑的 APDL 命令流形成的分析文件，在完成确定性有限元分析后加上最大应力提取命令，同时定义小臂可靠性分析的极限状态函数。

### 4.2 拟合小臂结构响应面

考虑材料和载荷相关的变量作为随机输入变量，将随机变量特性全部考虑为正态分布，材料的变异系数均取值在 0.01-0.1 之间。弹性模量和密度的变异系数取可取为 0.03[8]。屈服强度变异系数取 0.1。等效到刚性节点的主矢集中力和等效转矩变异系数均取 0.3。参数设置如表 2 所示。

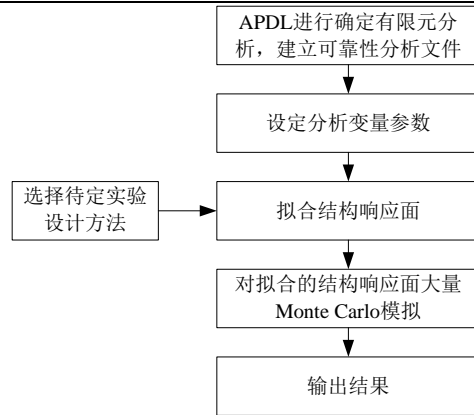


图 4. 响应面随机有限元法模拟结构图

表 2. 随机变量概率分布特性

变量类别	变量名称	变量符号	分布类型	均值	标准差
输入变量	弹性模量	E	正态分布	0.72e5MPa	0.216e4MPa
	密度	DENSITY	正态分布	2.7g/cm3	0.081g/cm3
	屈服强度	S	正态分布	200MPa	20MPa
	等效力	F	正态分布	111.75N	33.525N
	等效转矩	M	正态分布	12.47N · mm	3.741N · mm
输出变量	最大等效应力	MAXVON	—	—	—
	状态函数	Z	—	—	—

拟合响应面选择中心合成设计抽样法(CCD)[9]拟合，输入变量为 5 个，拟合样本数为 27 个。得到小臂结构响应面拟合所需的 Monte Carlo 模拟值后，以拟合样本点为基础，拟合出整个小臂结构的响应面。部分拟合的响应面如图 5 所示。

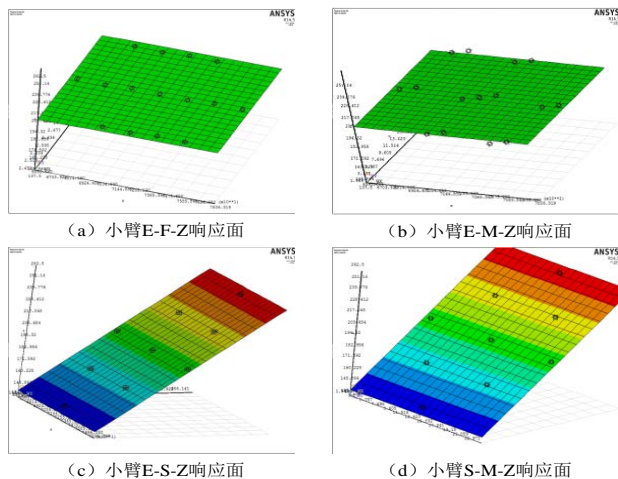


图 5. 小臂可靠性部分拟合响应面

图 5 中均匀分布在响应面周围的数据点即是 Monte Carlo 模拟的拟合响应面样本点。每个输入参

数拟合的响应面均是以小臂可靠性状态函数 Z 作为输出变量。可以通过这些输入变量与输出变量建立的响应面为模拟对象，替代确定性有限元建立的有限元模型进行大量模拟，最终可以较高效率的得到大量模拟输出结果。

### 4.3 可靠性模拟计算及后处理

基于拟合的结构响应面大量模拟，选择 10000 次基于小臂结构可靠性响应面的 Monte Carlo 模拟。

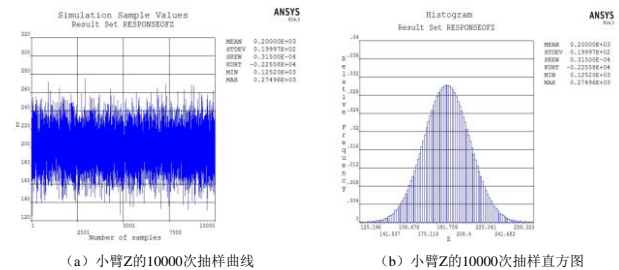


图 6. 小臂结构可靠性状态函数 Z 的 10000 模拟结果

模拟对象从小臂的有限元模型直接模拟转换为了结构的响应面模拟，将耗时极大的建模和确定性有限元分析过程直接转变为类线性关系的响应面表达式模拟。经过极短时间，10000 次循环抽样模拟后，得到

大量可靠性输出结果。输出可靠性状态函数  $Z$  如图 6 所示。

图 6 可初步看出输出变量  $Z$  的模拟结果，最大值为 0.27496366MPa，最小值为 0.125196MPa， $Z$  均大于零，即小臂结构失效概率为零，可靠度  $R=1$ 。

## 5 结论

以结构的拟合响应面去替代有限元模型进行大量高效率可靠性模拟，适合于结构复杂且输入变量较少的零部件可靠性分析。基于拟合的响应面，可进行大量次数模拟，可靠性分析效率和准确性都有较好效果。在能够减少其输入随机变量的情况下，可达到高效率对零部件可靠性分析的应用，而且在一般硬件的普通计算机即可完成可靠性分析，适合大量工程应用。

## 致谢

感谢我的导师胡启国老师的指导和刘廷同学在作图上的帮助。

## 资助项目

资助信息：重庆市基础科学与前沿技术研究专项 (cstc2015jcyjB0333)

## References (参考文献)

- [1] International Federation of Robotics. Industrial robot as defined by ISO 8373[EB/OL]. [2013-10-12]. <http://www.ifr.org/industrial-robots/>.
- [2] Chunbo Liao. Discussion on the application of industrial robot in modern production[J]. Urban construction theory research, 2015(29):19-19(Ch).
- [3] Tianmiao Wang, Yong Tao. Research Status and Industrialization Development Strategy of Chinese Industrial Robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9):1-13(Ch).
- [4] Junyuan Fang, Xikun Ma. The study of L elbow's probabilistic reliability and sensitivity based on response surface methodology[J]. Instrumentation Analysis Monitoring, 2014(4):20-23(Ch).
- [5] Wei Duan, Zhangqi Wang. Vibration reliability analysis of steam turbine blade using response surface method[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2012, 32(1):84-90(Ch).
- [6] MD Sciuva, D Lomario. A comparison between Monte Carlo and FORMs in calculating the reliability of a composite structure[J]. Composite Structures, 2013, 59(1):155-162(Uk).
- [7] Hurtado JE. An examination of methods for approximating implicit limit state functions from the viewpoint of statistical learning theory[J]. Structural Safety, 2004, 26(3):271-293(Ned).
- [8] Jianguo Zhang, Duo Su, Yingwei Liu. Reliability analysis and optimization of mechanical products[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008:30-31(Ch).
- [9] Achintya H, Sankaran M. Reliability assessment using stochastic finite element analysis[M]. New York: John Wiley & Sons, 2000:105-123(Am).