

## 结构与工艺

# 结构可靠性分析的通用生成函数法

尹洪举<sup>1</sup>, 蒋建军<sup>1</sup>, 赵录峰<sup>2</sup>, 于水游<sup>1</sup>

(1. 中国人民解放军陆军航空兵军事代表局驻天津地区军事代表, 天津 300143; 2. 空军工程大学装备管理与安全工程学院, 西安 710051)

**摘要:** 提出一种基于通用生成函数( $\mu$ 函数)结构可靠性分析新方法,其基本思路是以离散信号处理的 $z$ 变换为理论基础,将随机变量转换成描述其不确定性分布的 $\mu$ 函数模型,利用 $\mu$ 函数的良好特性和 $\mu$ 函数结构逻辑关系算法,将输入不确定性传递到输出不确定性,根据 $\mu$ 函数可靠性指标,完成可靠性分析,为改进设计提供依据。文中着重解决了随机变量 $\mu$ 函数模型建立以及功能函数的代数运算在 $\mu$ 函数中如何计算问题。与Monte-Carlo方法相比,基于 $z$ 变换的思想将离散实数域中的问题转换到类似离散复数域中进行求解,然后在类似离散复数域进行可靠性分析。文中算例对所提方法的高效性和可行性进行了验证。

**关键词:**  $\mu$ 函数; 结构可靠性; MC;  $z$ 变换; 随机变量

中图分类号: TH161

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-04-0068-07

## Analysis of the Structural Reliability Based on Method of Universal Generating Function

YIN Hong-ju<sup>1</sup>, JIANG Jian-jun<sup>1</sup>, ZHAO Lu-feng<sup>2</sup>, YU Shui-you<sup>1</sup>

(1. Military Representative Office of Army Aviation Division in Tianjin Area, Tianjin 300143, China;

2. The Equipment Management and Safety Engineering School of the Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** A new analysis method of structural reliability based on universal generating function ( $\mu$  function) is produced, its basic thinking is based on the  $z$  transform of discrete signal processing, it transforms random variable into  $\mu$  function model which describes its uncertainty. And it utilizes favorable properties and logical relation algorithm of  $\mu$  function to pass the input uncertainty to the output uncertainty. According to the reliability indexes of  $\mu$  of  $\mu$  function model is established in order to solve the computing problem of functional algebraic operation of  $\mu$  function. Compared to Monte-Carlo method, the idea based on  $z$  transform transforms the problems of discrete real domain into the problems of discrete complex domain, and conducts reliability analysis in domain which is similar to discrete complex domain. The calculating examples verify high efficiency and feasibility of the proposed method.

**Key words:**  $\mu$  function; structural reliability; MC method;  $z$  transform; random variable

结构可靠性分析是结构安全评估的重要组成部分,为改进设计、提高产品质量提供方法和依据。结构可靠性分析<sup>[1]</sup>主要包括两部分内容:一是失效模式确定(即建立结构各失效模式的极限状态方程);二是结构失效概率求解。在随机不确定性模型出现早期,人们的主要精力都放在模式失效概率计算方法上。方法包括两大类:第一类是解析法<sup>[2]</sup>,

如计算单个模式的一次二阶矩法、二次可靠性方法、组合超平面法以及计算多个模式的一阶边界法、二阶窄边界法以及三阶高精度法等;第二类为数值方法,包括数值积分法与数值模拟法,失效概率是基本变量的联合概率密度函数在失效域中的积分,据此定义,人们发展了各种的数值积分法,如“M空间”数值积分法<sup>[8]</sup>,降阶积分法<sup>[9]</sup>等;数值模拟

法是根据基本变量的联合概率密度函数投点来模拟基本变量的分布,以落入失效域的点数与总投点数之比作为  $p_f$  的估计值,由大数定理可知,该估计值依概率收敛于  $p_f$ ,而这种数值模拟法在失效概率较小时计算工作量很大,因为要得到收敛的  $p_f$ ,总的投点数为  $N \geq 100/p_f$ ,而大部分实际结构的  $p_f$  值一般都是很小的,针对直接数值模拟法的缺陷,人们又提出了各种改进的数值模拟方法,包括重要抽样法、分层抽样法、条件期望值法、公共随机数法<sup>[10]</sup>等。这些改进的方法针对不同的具体问题都达到了提高抽样效率、减小估计值方差的目的,其中以重要抽样法的研究最为广泛。同时针对隐式极限状态函数的问题,还研究了各种替代模型,有响应面法<sup>[16]</sup>、支持向量机<sup>[18]</sup>、神经网络<sup>[19]</sup>、kriging方法<sup>[20]</sup>等,来替代未知的功能函数,求解失效概率。虽然解析法结果准确,但是对于复杂问题,难以推导其精确表达式,应用范围有限。数值方法得到广泛应用,并随着计算机技术的发展其结果也越来越准确。

1986年,Ushakov提出了通用生产函数(universal generating function,UDF,也称为  $\mu$  函数)的概念<sup>[21]</sup>,Gendenko和Uskakov在文献[22]中介绍该方法的数学推导。基于  $\mu$  函数的可靠性分析近年来主要用于分析系统的可靠性,1996年Lisnianski等将这种方法首次应用到电力系统的可靠性分析中去,后续该方法被广泛应用到电力系统可靠性领域<sup>[23]</sup>。文献[25]主要是用它来分析其他领域的多态系统可靠性,尤其是针对系统具有复杂的逻辑组成关系,该方法的优势明显。同时文献[26]用该方法分析串并联多态系统可靠性。文献[27]综合马尔科夫连和  $\mu$  函数方法分析了核反应堆的多态系统可靠性。

关于  $\mu$  函数方法在结构可靠性分析方面还鲜有研究,主要因为结构可靠性分析中随机变量通常以连续概率分布函数描述,而基于  $\mu$  函数的方法是以  $z$  变化为理论基础,研究对象是离散变量。同时,系统与部件之间的结构逻辑关系用  $\mu$  函数方法有明确的结构逻辑关系算子来描述,而对于结构的极限状态函数代数运算法则,用  $\mu$  函数计算需要重新确定。针对前述问题,提出用  $\mu$  函数方法对结构的可靠性进行研究,首先将连续随机变量进行随机离散化,建立离散随机变量的  $\mu$  函数模型,其次根据结构的极限状态函数,结合  $\mu$  函数的特性,确定

了结构输入和输出不确定性之间的逻辑算法,经过传递计算,得到结构输出的  $\mu$  函数模型,根据可靠性指标,完成可靠性分析,为结构可靠性分析提供了新方法。

## 1 基于 $\mu$ 函数的结构可靠性分析方法

### 1.1 结构可靠性分析问题的描述

假设所研究结构的模型功能函数为  $g(x)$ ,其中  $x=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  是随机输入变量向量,随机输入向量  $x$  的联合概率密度函数为  $f(x)$ ,且记  $g(x) \leq 0$  为失效域  $F$ ,  $g(x) > 0$  为安全域  $S$ 。则失效概率  $p_F$  可表示为下式

$$p_F = \int_{g(x) \leq 0} f(x) dx = \int_{R^d} I_F(x) f(x) dx \quad (1)$$

其中,  $I_F[x]$  为指示函数,当  $x \in F$  时,  $I_F[x]=1$ ; 否则,  $I_F[x]=0$ 。

对于结构可靠度  $A$  表示为

$$A = 1 - p_F \quad (2)$$

其意义为在规定使用条件、时间内,结构完成既定功能的概率。

### 1.2 随机变量的 $\mu$ 函数模型

#### (1) 离散随机变量 $\mu$ 函数模型

设离散随机变量  $X$  的可能实现值为  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$ ,与其对应的概率为  $(p_1, p_2, \dots, p_N)$ 。则离散型随机变量  $X$  的  $\mu$  函数模型定义为

$$\mu_x(z) = \sum_{i=1}^N p_i z^{x_i} \quad (3)$$

$$\text{且 } \sum_{i=1}^N p_i = 1 \quad (4)$$

其中,  $\mu_x(z)$  为离散型随机变量  $X$  的  $\mu$  函数模型;  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, N, N$  为事件总数)是随机变量  $X$  可能存在的状态;  $p_i$  是随机变量  $x_i$  事件的概率。

#### (2) 连续随机变量 $\mu$ 函数模型

在结构可靠性分析中,随机变量通常描述材料及载荷的随机、工程数据的不完备、分析模型的不确定以及人为误差等。随机变量不确定性是根据可靠性试验数据的概率统计规律得到的,即服从特定分布类型的连续变量描述。而  $\mu$  函数是以处理离散信号的  $z$  变化为理论基础,因此,为了将  $\mu$  函数方法推广到结构可靠性分析中,需将连续随机变量

进行随机离散化。

设连续随机变量  $v$  的概率密度函数为  $f(v)$ 。变量在任意离散点  $(v_1, v_2, \dots, v_i)$  上的概率理论上为 0。因此,定义离散型随机变量  $x$ , 如果对于任意整数  $k \in (-\infty, +\infty)$ , 变量  $x$  的概率满足下式

$$P(x=k) = P(k \leq v \leq k+1) = \int_k^{k+1} f(v)dv \quad (5)$$

则  $[(x_1, p_1), (x_2, p_2), \dots, (x_n, p_n)]$  是连续型随机变量  $v$  按照随机变量离散化的思想产生的离散型变量。从统计学意义上, 变量  $x$  在一定程度上反映  $v$  变量的统计规律特性, 能替代  $v$  变量进行可靠性分析。因此, 基于离散型变量  $x$ , 对连续型随机变量  $v$  的  $\mu$  函数模型定义为

$$\mu_v(z) = \sum_{i=1}^n p_i z^{x_i} \quad (6)$$

其中,  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n, n$  为事件总数) 是随机变量  $x$  第  $i$  个事件;  $p_i$  为连续型随机变量  $v$  在离散区间  $(i, i+1)$  的概率, 在变量定义域范围内  $\sum_{i=1}^n p_i \approx 1$ ;

$\mu_v(z)$  描述连续型随机变量  $v$  的不确定性。

### (3) 随机变量 $\mu$ 函数模型性质

基于  $\mu$  函数随机变量模型继承了  $\mu$  函数的良好特性, 具有如下性质:

#### 性质 1

$\mu$  函数模型以离散信号  $z$  变化为理论基础。由式(3)知, 任意随机变量可以唯一地表示成  $\mu$  函数模型。拉普拉斯变化中勒奇定律指出如果有两个函数具有相同的拉氏变化, 则它们在任何一个任意小具有正的长度的区间上不可能不同, 即在任意开区间内, 对于所有具有实际意义的函数来说, 具有唯一的拉氏变化, 则其逆拉氏变化本质上也是唯一的。同理, 针对  $\mu$  函数对随机变量的模型定义可知, 勒奇定理同样适用, 因此, 随机变量  $X$  的描述模型  $\mu_x(z)$  在绝大多数情况下可认为和随机变量的概率密度函数存在一一对应的映射关系。

#### 性质 2

根据  $\mu$  函数模型定义, 随机变量  $x$  的各阶原点矩可通过对随机变量  $x$  的  $\mu$  函数模型  $\mu_x(z)$  连续求导获得。

对  $\mu_x(z)$  求一阶导数得

$$\mu_x'(z) = \frac{d}{dz} \left( \sum_{i=1}^n p_i z^{x_i} \right) = \sum_{i=1}^n p_i \times x_i \times z^{x_i-1} \quad (7)$$

令  $z=1$ , 有

$$\mu_x'(1) = \frac{d}{dz} \sum_{i=1}^n p_i z^{x_i} = \sum_{i=1}^n p_i \times x_i = E(x) \quad (8)$$

即在  $z=1$  时,  $\mu_x(z)$  的一阶导数的函数值为  $x$  的一阶原点矩。

对  $\mu_x(z)$  求二阶导数得

$$\mu_x''(z) = \frac{d}{dz} \left( \frac{d}{dz} \left( \sum_{i=1}^n p_i z^{x_i} \right) \right) = \sum_{i=1}^n p_i \times x_i \times x_i \times z^{x_i-2} \quad (9)$$

当  $z=1$  时, 有

$$\mu_x''(1) = \frac{d}{dz} \left( \frac{d}{dz} \left( \sum_{i=1}^n p_i z^{x_i} \right) \right) = \sum_{i=1}^n p_i \times x_i \times x_i = E(x^2) \quad (10)$$

即在  $z=1$  时,  $\mu_x(z)$  的二阶导数的函数值为  $x$  的二阶原点矩。依次类推, 有下式

$$\mu_x^{(r)}(1) = E(x^r) \quad (11)$$

因此, 在  $z=1$  时,  $\mu_x(z)$  的  $r$  阶导数的函数值为随机变量  $x$  的  $r$  阶原点矩。

#### 性质 3

独立随机变量之和的  $\mu$  函数等于各随机变量  $\mu$  函数的乘积。即: 变量  $x, y$  相互独立, 则有

$$\mu_{x+y}(z) = \mu_x(z) \times \mu_y(z) \quad (12)$$

上式可以通过  $\mu$  函数模型的定义和指数乘法法则证明。

## 1.3 多变量结构 $\mu$ 函数算法

基于  $\mu$  函数的方法在系统可靠性分析中应用广泛, 主要是因为系统可靠性的结构逻辑关系在  $\mu$  函数中有特定算子描述<sup>[28]</sup>, 但是  $\mu$  函数对结构极限状态函数的代数计算目前没有准确的描述, 因此基于  $\mu$  函数结构可靠性研究的关键就是如何对输入不确定性和输入输出关系的研究, 来确定输出不确定性的问题。所以建立基于  $\mu$  函数的输入和输出不确定性模型的传递关系是重点。

在传统结构可靠性分析中, 输入输出的关系通过结构极限状态函数来描述, 即  $Y=g(x)$ ,  $g(x)>0$  认为结构安全,  $g(x)=0$  认为结构处在失效面上,  $g(x)<0$  认为结构失效。在基于  $\mu$  函数可靠性分析方法中, 针对结构输出和输入的极限状态函数关系, 引入算子  $\Pi$  来描述输出  $\mu$  函数和输入  $\mu$  函数运算关系, 定义如下

$$\mu_Y(z) = \pi(u_{x_1}(z), u_{x_2}(z), \dots, u_{x_N}(z)) \quad (13)$$

式中,  $u_{x_i}(z)$  表示随机变量  $x_i$  的  $\mu$  函数;  $\mu_Y(z)$  是结构输出  $Y$  的  $\mu$  函数。

随机变量  $x_i$  概率密度函数为  $f(x_i)$ , 经过式(5)的随机离散化, 得到随机变量的离散化模型。离散点  $x_{ik}$  代表独立的随机事件, 而  $p_{ik}$  代表该事件对应的概率。随机变量  $x_i$  离散模型记为  $[(x_{i1}, p_{i1}), (x_{i2}, p_{i2}), \dots, (x_{in_i}, p_{in_i})]$ , 按照式(6)中的定义, 得到随机变量  $x_i$  的  $\mu$  函数模型。

根据系统可靠性分析的  $\mu$  函数方法中定义串并联结构逻辑关系的方法<sup>[28]</sup>, 得到系统输出  $\mu$  函数模型的模式。对结构可靠性分析中各离散型随机变量的  $\mu$  函数模型分解为概率项和事件项, 各变量之间按照随机组合的方法进行组合, 变量中被组合的事件项按照原极限状态函数  $g(x)$  的运算法则计算, 所得结果作为输出的新事件项, 输出新事件的概率项按照各变量被组合事件项所对应的概率项相乘求得。因此, 结构输出的  $\mu$  函数模型为

$$\mu_Y(z) = \mu_{x_1}(z) \otimes \dots \otimes \mu_{x_N}(z) = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \dots \sum_{h=1}^{n_N} p_{1i} \times p_{2j} \dots \times p_{Nh} z^{\psi(x_{1i}, x_{2j}, \dots, x_{Nh})} \quad (14)$$

其中,  $(n_1, n_2, \dots, n_N)$  表示各随机变量独立事件的个数;  $x_{1i}$  表示随机变量  $x_1$  中的第  $i$  个独立事件;  $p_{1i}$  表示随机变量  $x_1$  中的  $x_{1i}$  事件所对应的概率。多项式中  $z$  的系数项为结构输出的概率部分;  $z$  的指数项为结构输出的事件部分;  $\psi(x_{1i}, x_{2j}, \dots, x_{Nh})$  为定义的输出事件项和输入事件项的关系, 其中运算法则参照结构的极限状态函数  $g(x)$ 。

### 1.4 $\mu$ 函数的结构可靠性指标

文中在系统  $\mu$  函数可靠性指标<sup>[29]</sup>的基础上, 定义  $\mu$  函数结构可靠性指标结构可靠度  $A(w)$ , 输出满足阈值  $w$  的剩余响应均值  $D(w)$  等, 其中  $w$  为输出响应门限值。

当结构输出  $\mu$  函数为  $\mu_Y(z) = \sum_{i=1}^k p_i z^{g_i}$  ( $i = 1, \dots, k$ ),  $i$  为输出可能的  $k$  个事件项中的  $i$  事件,  $p_i$  为事件  $g_i$  对应的概率时, 两种可靠性指标的求解如下

$$A(w) = \sum_{i=1}^k p_i |g_i - w \geq 0| \quad (15)$$

式(15)表示  $g_i - w \geq 0$  的所有状态的概率和, 即

当系统的输出响应水平  $g_i$  达到或者超过所要求  $w$  门限值时, 结构能够可靠完成任务的概率。

$$D(w) = \sum_{i=1}^k p_i \times \max((g_i - w, 0)) \quad (16)$$

其中,  $D(w)$  为输出响应量剩余期望, 表示当输出  $g_i$  超过要求输出门限值  $w$  时, 所剩余的输出响应余量均值。

### 1.5 基于 $\mu$ 函数的结构可靠性分析流程图

为了便于理解, 将上述的结构可靠性分析步骤进行总结, 得到基于  $\mu$  函数的结构可靠性分析流程图, 如图1所示。

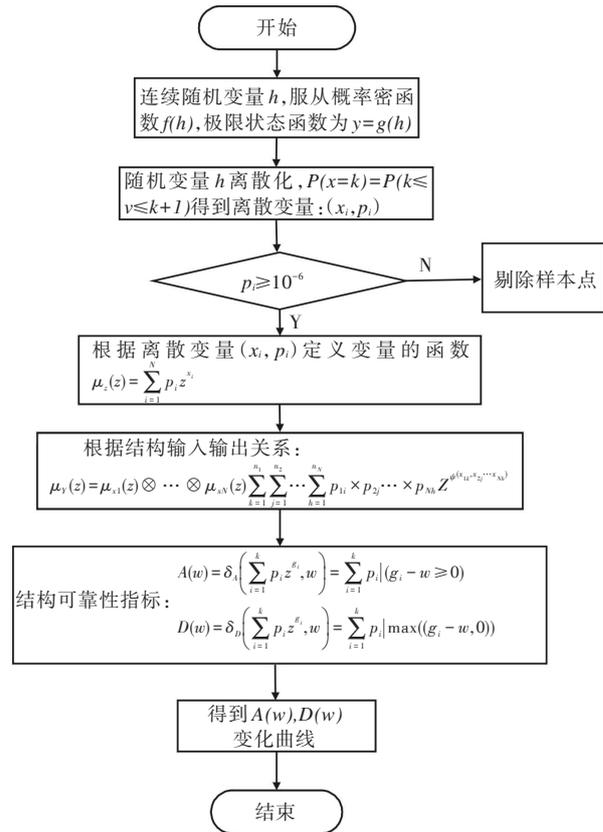


图1 基于  $\mu$  函数的结构可靠性分析流程图

## 2 算例分析

本节通过两个算例验证在结构可靠性分析中  $\mu$  函数方法的效率和精度。运用传统的 Monte Carlo 数字模拟法对算例极限状态函数进行计算, 在大样本条件下, 结构可靠度估计值看作近似精确解, 记为 MC 方法; 文中基于  $\mu$  函数的结构可靠性分析方法, 记为 U 函数方法。

算例1:含有正态分布变量的线性功能函数为  $Y=g(x)=18x_1+5x_2$ , 其中随机变量  $x_1$  和  $x_2$  相互独立, 且  $x_1 \sim N(5, 1), x_2 \sim N(6, 1)$ 。当给定  $w$  取不同的门槛值时, 对应 MC 和 U 函数方法离散点可靠度计算结果见表1。

表1 算例1 MC和U函数方法离散点可靠度对比

输出门槛值	50	75	100
可靠度(MC)	1	0.992 0	0.853 5
可靠度(U函数)	1	0.995 3	0.863 4
误差/%	0.5	0.3	1.1
输出门槛值	125	150	175
可靠度(MC)	0.399 0	0.045 5	0.001 0
可靠度(U函数)	0.426 1	0.064 7	0.002 0
误差/%	6.7	42	100

$A(w)$  和  $D(w)$  的变化曲线如图2、图3所示。

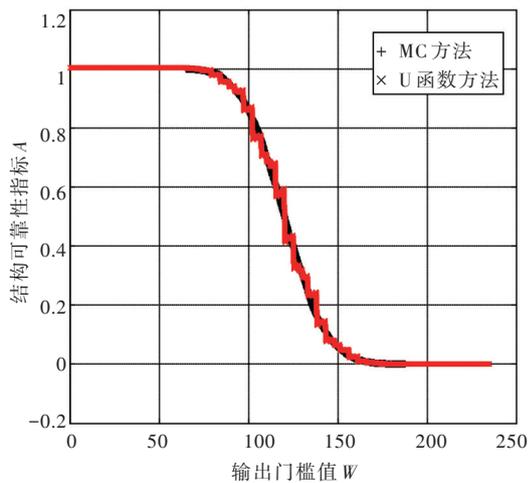


图2 算例1可靠性分析结果

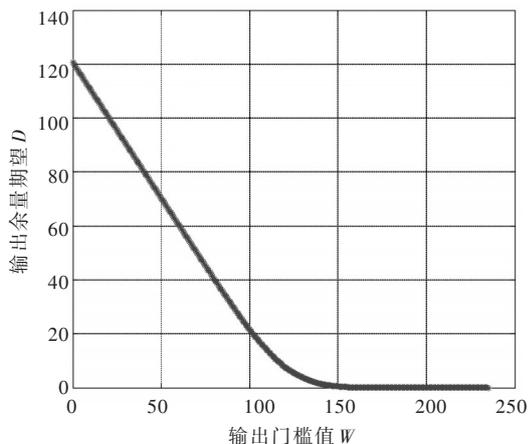


图3 算例1输出余量期望变化曲线

算例1按照 MC 方法计算抽样的样本点为 30 000, 调用极限状态函数的次数为 30 000 次, 而  $\mu$  函数方法通过概率约束条件得到离散随机变量, 建立输入不确定性的  $\mu$  函数模型, 调用函数的计算仅为  $11 \times 12$  次, 大大提高了计算效率。由图2知, 基于  $\mu$  函数的结构可靠性分析方法与 MC 法的计算结果基本一致, 在可靠度满足实际要求范围内 ( $0.4 \leq A \leq 1$ ), 最大误差为 6.7%, 达到工程要求。产生误差的原因可能为: ①为保证曲线的平滑性使用了数值拟合手段, ②连续性随机变量离散化思想的离散区间选择对曲线结果有影响, ③概率约束条件对离散变量的筛选有一定作用, 但由于算例中涉及变量为正态分布, 概率分布较集中, 故影响不大。

图3中输出门槛  $w$  要求越低, 结构满足要求的输出余量期望越大, 随着输出门槛增大, 余量期望减小, 最后到 0。  $D(w)$  指标反应结构在满足一定输出要求时, 结构的储备能力大小。为结构合理设计提供依据。避免高能力的结构完成低要求的任务, 造成浪费。

算例2:含有正态分布变量的非线性功能函数为  $Y=g(x)=2x_1^2+x_2^2$ , 其中随机变量  $x_1$  和  $x_2$  相互独立, 且分别服从  $x_1 \sim N(5, 1), x_2 \sim N(6, 1)$ 。当给定  $w$  取不同的门限值时, 对应 MC 和 U 函数方法离散点可靠度计算结果见表2。

表2 算例2 MC和U函数方法离散点可靠度对比

输出门槛值	25	50	75	100
可靠度(MC)	1	0.979 5	0.755 5	0.330 5
可靠度(U函数)	1.005 9	0.966 5	0.769 8	0.312 5
误差/%	0.59	1.33	1.89	5.4
输出门槛值	125	140	180	
可靠度(MC)	0.071 2	0.027 0	0.000 1	
可靠度(U函数)	0.067 2	0.026 8	0.000 6	
误差/%	5.62	0.74	500	

$A(w)$  和  $D(w)$  的可靠性分析结果见图4、图5所示。

算例2中的功能函数为高度非线性。按照 MC 方法抽样的样本点为 30 000, 调用极限状态函数的次数为 30 000 次, 所得分析结果作为精确解。  $\mu$  函数方法按照流程图计算, 调用功能函数的计算仅为  $11 \times 11$  次, 计算效率高。图4中通过对两种方法分析结果的对比, 在可靠度满足实际要求范围内

( $0.4 \leq A \leq 1$ ), 最大误差为 5.4%, 基本达到工程要求。误差产生的原因如算例一所述。由此可见, 文中方法能够处理极限状态函数为高度非线性的问题, 同时以较小的计算资源, 获得可靠性分析结果。

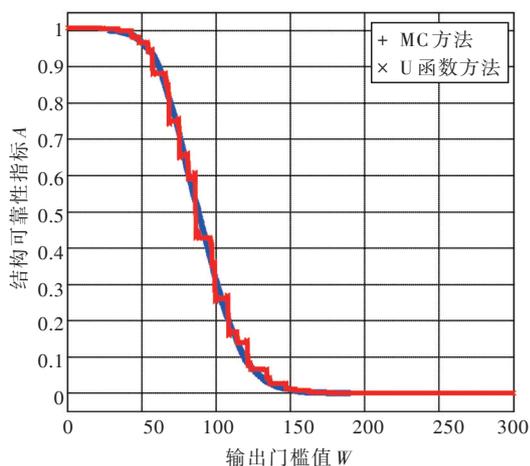


图4 算例2可靠性分析结果

图5中输出响应余量期望变化曲线和图3中的趋势大致一致, 结构响应余量期望随着输出阈值  $w$  增大而减小, 最后到0。该指标反映结构完成既定输出要求的任务储备能力大小, 为选择合适结构提供了依据。

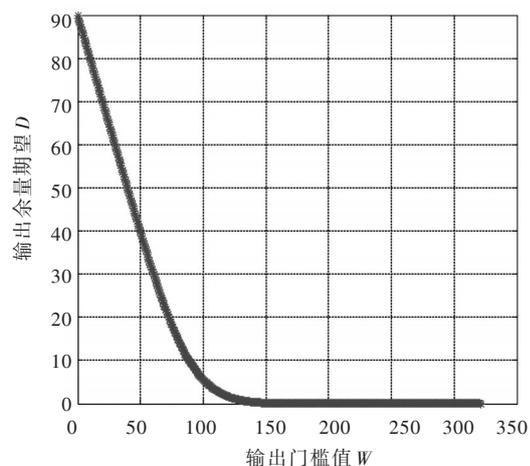


图5 算例2输出余量期望变化曲线

### 3 结论

将  $\mu$  函数的思想用于结构可靠性分析, 提出基于  $\mu$  函数的结构可靠性分析方法。通过对连续随机变量进行随机离散化的处理, 结合  $\mu$  函数的定

义, 建立了输入随机变量不确定性的  $\mu$  函数模型, 同时对结构极限状态函数的代数运算法则对于  $\mu$  函数运算进行研究, 经过传递, 得到输出不确定性的  $\mu$  函数模型, 根据  $\mu$  函数可靠性指标, 完成可靠性分析。算例计算结果表明, 该方法结果准确, 计算成本大幅度减小。同时具有一定的工程适用性。由于该方法可直接处理离散型数据, 因此该方法处理可靠性试验数据具有优势。  $A(w)$  变化曲线一定意义上能反应结构输出的统计特征, 如何对输出分布进行研究, 更多挖掘结构的信息是下一步工作。

### 参考文献

- [1] 吕震宙, 冯蕴雯. 结构可靠性问题研究的若干进展[J]. 力学进展, 2000, 30(2): 21-27.
- [2] Hmsofer A M, Lind N C. Exact and invariant second-moment code format[J]. Engineering Mechanics, Div ASCE, 1974, 100(EMI): 111-121.
- [3] Fiessler B, Neumann H J. Quadratic limit states in structural reliability[J]. Engineering Mechanics, Div. ASCE, 1979, 105(EM4): 661-676.
- [4] Feng Y S. The computation of failure probability for non-linear safety margin equations[J]. Reliability Engineer and System Safety, 1989, 28: 1-9.
- [5] Cornell C. A bounds oil the reliability of structural systems [J]. Structural Engineering and Mechanics Div, ASCE, 1967, 93(1): 171-200.
- [6] Ditlevsen O. Narrow reliability bounds for structural systems[J]. Structural Engineering and Mechanics, 1979, 7: 453-472.
- [7] Feng Y S. A method for computing structural system reliability with high accuracy[J]. Computer and Structure, 1989, 33(1): 1-5.
- [8] 宋笔锋. 结构体系失效概率计算方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 1994.
- [9] 张立. 结构可靠性的近似解析法和数值一解析混合解法的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 1995.
- [10] Bucher C G. Adaptive sampling-an iterative fast Monte Carlo procedure[J]. Structural Safety, 1988, 5: 119-126.
- [11] Meldlers R E. Importance sampling in structural system [J]. Structural Safety, 1989, 6: 3-10.
- [12] Melchers R E. Search-based importance sampling[J]. Structural Safety, 1990, 1: 117-128.
- [13] Du G. Variance reduction by truncated multimodal importance sampling[J]. Structural Safety, 1994, 13: 267-

- 283.
- [14] Pulido J E, Jacobs T L, Prates E C. Structural reliability using Monte- Carlo simulation with variance reduction techniques on elastic-plastic structures[J]. Computer and Structural, 1992, 43:419-430.
- [15] Ayyub B M, Cbiu C Y. Generalized conditional expectation for structural reliability assessment[J]. Structural Safety, 1992, 11: 131-146.
- [16] Irfan Kaymaz, Chris A, McMahon. A response surface method based on weighted regression for structural reliability analysis[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2005(20):11-17.
- [17] Gupta S, Manohar CS. An improved response surface method for the determination of failure probability and importance measures[J]. Structural Safety, 2004, 26 (2):123-139.
- [18] 李洪双, 吕震宙. 结构可靠性分析的支持向量机响应面法[J]. 计算力学, 2009, 26(4):199-203.
- [19] DENG Jian, GU De-sheng. Structural reliability analysis for implicit performance functions using artificial neural network[J]. Structural Safety, 2005, 27: 25-48.
- [20] Kaymaz I. Application of Kriging method to structural reliability problems[J]. Structural and Safety, 2005, 27: 133-151.
- [21] Ushakov I. Optimal standby problem and a universal generating function[J]. Computer System Science , 1987, 25 (4):61-73.
- [22] Gnedenko B, Ushakov I. Probabilistic reliability engineering[M]. New York Wiley Inc, 1995.
- [23] Lisnianski A, Levitin G. Power system structure optimization subject to reliability constraints[J]. Electronic Power System Research, 1996, 39(2):145-52.
- [24] Levitin G, Lisnianski A, Elmakis D. Structure optimization of power system with different redundant elements[J]. Electronic Power System Research, 1997, 43(1):19-27.
- [25] Lisnianski A, Levitin G. Multi-state System Reliability: assessment, optimization and applications[M]. Singapore: World Scientific, 2003.
- [26] 李春洋, 陈循. 基于向量通用生成函数的多性能参数多态系统可靠性分析[J]. 兵工学报, 2010, 31(12): 1604-1610.
- [27] 尚彦龙, 蔡琦. 基于UGF和SemI-Markov方法的反应堆泵机组多状态可靠性分析[J]. 核动力工程, 2012, 33 (1):117-123.
- [28] Gregory Levitin. A universal generating function approach for the analysis of multi-state systems with dependent elements[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004 (84): 285-292.
- [29] Anatoly Lisnianski. Extended block diagram method for a multi-state system reliability assessment[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2007(92):1601-1607.

### 《光电技术应用》期刊栏目介绍

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管,中国电子科技集团公司光电研究院主办,公开发行的学术性中文科技期刊。以光电技术为主要专业特色,传播光电技术、光电系统应用技术专业领域的先进科技信息,报道新型科技成果,推动工程技术交流,促进行业科技进步与发展。

期刊所设栏目主要有:综述,光电系统,光学设计,红外技术,激光技术,光电探测,光电器件与材料,信号与信息处理,电路与控制,测试、试验与仿真等。