

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2017.10.017

考虑失效模式相关性的机械系统可靠性分析

涂宏茂^{1,2}, 孙志礼¹, 姬广振², 钱云鹏^{1,2}

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国兵器科学研究院, 北京 100089)

摘 要: 考虑失效模式相关性对机械系统可靠性的影响,提出了一种基于 FORM(first order reliability methods)近似的系统可靠性分析方法及其实施流程.采用 FORM 计算系统各失效模式的可靠度和灵敏度,在此基础上,获得用于衡量失效模式相关性的相关系数矩阵.将系统可靠性模型求解转化为多维正态积分计算,进而采用高效的近似方法获得系统可靠度.给出失效模式灵敏度和随机变量灵敏度的定义及其相应的计算方法.算例结果表明:该方法能够获得较为准确的系统可靠度,且具有较高的计算效率,能够有效识别关键失效模式和随机影响因素.

关 键 词: 失效模式相关性;系统可靠度;可靠性分析;灵敏度分析;相关系数矩阵;多维正态积分
中图分类号: TB 114.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)10-1453-06

Reliability Analysis for Mechanical System with Correlated Failure Modes

TU Hong-mao^{1,2}, SUN Zhi-li¹, JI Guang-zhen², QIAN Yun-peng^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Ordnance Science and Research Academy of China, Beijing 100089, China. Corresponding author: TU Hong-mao, E-mail: bjthm@126.com)

Abstract: To evaluate the effect of failure mode correlations on the mechanical system reliability, a system reliability analysis method and its implementation procedures were proposed based on FORM approximation. FORM was used to calculate the reliabilities and sensitivities of all the failure modes in the system, and then the failure mode correlation coefficient matrix for determining how they are correlated was obtained. The solving of the system reliability model was converted to the integration of multivariate normal distributions, and the efficient approximation algorithm was used to get reliability degree. The definition of failure mode sensitivity and the corresponding calculation method were proposed based on the numerical difference, as well as the definition of random parameter sensitivity and its calculation method through the composite derivative theorem. The results demonstrated the efficiency of the proposed method for quantifying the mechanical system reliability with failure mode correlations, and also the feasibility for identifying the key failure modes and random parameters.

Key words: failure mode correlations; system reliability; reliability analysis; sensitivity analysis; correlation coefficient matrix; multi-normal integration

目前,常用的机械系统可靠性分析方法常假设不同失效模式之间是相互独立的,或者用最薄弱环节代表系统可靠性水平,所得到的可靠性分析结果与实际值存在较大偏差.这些方法一方面忽略了机械系统中存在的失效模式相关性,难以

准确评估系统可靠性水平;另一方面无法提供失效模式或设计参数的重要度信息,难以有效识别影响系统可靠性的关键失效模式或设计参数.可以将这两方面的问题归结为系统可靠度计算问题和可靠性灵敏度分析问题.

在系统可靠度计算方面,可以采用蒙特卡洛法及其改进方法^[1-2]获得精确的可靠度结果,但这类方法的主要问题在于计算成本太高,不适合工程应用. 界限法及其改进方法^[3-4]能够给出系统可靠度的上下限,但这一方法在多数情况下仅适用于串联系统可靠度计算,且在失效模式较多或失效模式相关性较强时,给出的上下界限会明显变宽. 鉴于这两类方法的不足,一些计算效率高、易于实现的系统可靠度计算近似方法得到了发展,主要包括基于矩法的近似方法^[5-6]、FOMN 及其改进方法^[7-10]、PCM (product conditional margin) 及其改进方法^[11-13]等. 其中,基于矩法的近似方法将系统失效概率计算转化为复杂随机变量分布函数值的计算问题,原理简单、易于实施,但其在计算精度方面仍然存在不足. FOMN、PCM 及与二者有关的改进方法是在假设系统各失效模式的发生概率和各失效之间的相关系数已知的前提下,将系统可靠度计算转为多维正态积分问题,原理较复杂,但其在保证计算精度的同时具有较高的计算效率. 在灵敏度分析方面,蒙特卡洛法及其改进方法需要通过样本数据的处理才能获得灵敏度信息,而界限法及其改进方法、基于矩法的近似方法,以及 FOMN 等方法均无法直接给出获得系统可靠度关于各失效模式或随机影响因素的灵敏度结果,文献[5-13]也未给出有关的灵敏度分析方法.

因此,为了能够充分考虑机械系统失效模式的相关性,并在此基础上高效、准确地评估系统的可靠性水平,本文给出了基于 FORM 近似的机械系统可靠性分析方法. 其基本思路是:基于 FORM 近似方法计算系统各失效模式的可靠度和灵敏度,在此基础上进行失效模式相关系数矩阵计算,进而将系统可靠性模型求解转化为多维正态积分计算,再采用 FOMN 等方法进行系统可靠度计算和灵敏度分析.

1 FORM 近似原理

设机械系统含有 $m(m \geq 2)$ 个失效模式,第 i 个失效模式可以用 $g_i(\mathbf{u}) < 0 (i = 1, 2, \dots, m)$ 来表示. 其中, $g_i(\mathbf{u})$ 为独立标准正态空间中的功能函数表达式,关于独立标准正态空间的定义以及有关的转换关系可以参考文献[7]; $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_n)^T$ 为独立标准正态空间中的随机向量, n 为随机变量个数. 串联系统和并联系统的失效概率分别为

$$P_{sf} = P\{ (g_1(\mathbf{u}) < 0) \cup \dots \cup (g_m(\mathbf{u}) < 0) \} = P\{ \bigcup_{i=1}^m (g_i(\mathbf{u}) < 0) \}, \tag{1}$$

$$P_{pf} = P\{ (g_1(\mathbf{u}) < 0) \cap \dots \cap (g_m(\mathbf{u}) < 0) \} = P\{ \bigcap_{i=1}^m (g_i(\mathbf{u}) < 0) \}. \tag{2}$$

更一般地,由串联系统和并联系统组合而成的混联系统可以采用同样的方法得到失效概率的数学表达式:

$$P_f = P\{ \bigcup_{i=1}^k \bigcap_{j=1}^{c_i} (g_{i,j}(\mathbf{u}) < 0) \}. \tag{3}$$

式中: k 为混联系统中具有串联关系的并联子系统的个数; c_i 为第 i 个并联子系统所包含的失效模式数,且有 $\sum_{i=1}^k c_i = m$.

可以采用概率故障树 (probabilistic fault tree)^[14-16]的方式表示式(1),(2)或(3)中各失效模式之间的逻辑关系,以图形化的方式建立系统可靠性模型. 在此基础上,利用 FORM 近似原理进行相关系数的计算,以及系统可靠度和灵敏度的分析.

1.1 功能函数线性化

根据 FORM 的基本思想^[7],对第 i 个功能函数 $g_i(\mathbf{u})$ 在最可能失效点 (most probable point, MPP) 处进行泰勒展开,并省略二次以上的项,可得

$$g_i(\mathbf{u}) \approx \nabla g_i(\mathbf{u}_i^*)^T (\mathbf{u} - \mathbf{u}_i^*). \tag{4}$$

式中: \mathbf{u}_i^* 是第 i 个功能函数的 MPP; $\nabla g_i(\mathbf{u}_i^*)$ 是功能函数 $g_i(\mathbf{u})$ 在 \mathbf{u}_i^* 处的梯度.

由于 \mathbf{u} 是独立的标准正态随机向量,由正态分布的特性可知 $g_i(\mathbf{u})$ 也必然服从正态分布,那么, $g_i(\mathbf{u})$ 的数学期望和方差分别为

$$E[g_i(\mathbf{u})] = -\nabla g_i(\mathbf{u}_i^*)^T \mathbf{u}_i^*, \\ D[g_i(\mathbf{u})] = \nabla g_i(\mathbf{u}_i^*)^2. \tag{5}$$

因此, $g_i(\mathbf{u} < 0)$ 的概率为

$$P(g_i(\mathbf{u}) < 0) = 1 - \Phi(\beta_i), \\ \beta_i = -\frac{\nabla g_i(\mathbf{u}_i^*)^T \mathbf{u}_i^*}{\|\nabla g_i(\mathbf{u}_i^*)\|} = \boldsymbol{\alpha}_i^T \mathbf{u}_i^*. \tag{6}$$

式中: $\boldsymbol{\alpha}_i = -\nabla g_i(\mathbf{u}_i^*) / \|\nabla g_i(\mathbf{u}_i^*)\|$ 表示 $g_i(\mathbf{u}) = 0$ 曲面的近似切平面的外法线向量; β_i 为第 i 个功能函数的可靠度指数. 可以看出,在获得第 i 个功能函数的可靠度指数 β_i 和 MPP 的基础上,可以得到

$$g_i(\mathbf{u}) \approx \beta_i - \boldsymbol{\alpha}_i^T \mathbf{u}. \tag{7}$$

1.2 相关系数及其几何意义

结合式(7),可以通过功能函数相关系数表征不同失效模式的相关性:

$$\rho_{ij} = \frac{\text{Cov}(g_i(\mathbf{u}), g_j(\mathbf{u}))}{\sqrt{D[g_i(\mathbf{u})]} \sqrt{D[g_j(\mathbf{u})]}} = \boldsymbol{\alpha}_i^T \boldsymbol{\alpha}_j. \quad (8)$$

图 1 给出了功能函数线性化与相关系数几何意义的示例。

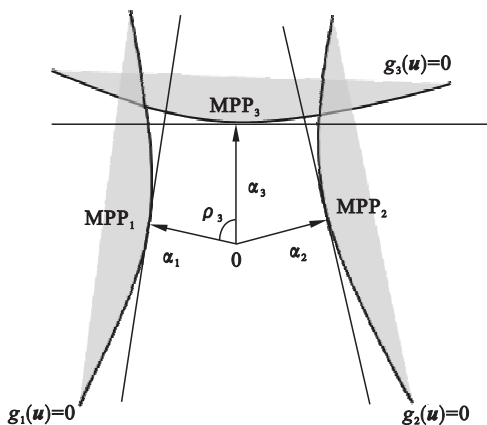


图 1 功能函数线性化与相关系数几何意义示意图
Fig. 1 Schematic diagram of performance function linearization and geometrical interpretation of correlation coefficient

由图 1 可知功能函数相关系数几何意义为 2 个近似切平面法向量夹角的余弦。图 2 给出 2 个近似切平面夹角分别为 0° 、 45° 、 90° 和 180° 的情况下功能函数之间的相关系数，从图中可以看出 $\cos\theta_{ij} = \boldsymbol{\alpha}_i^T \boldsymbol{\alpha}_j = \rho_{ij}$ 。

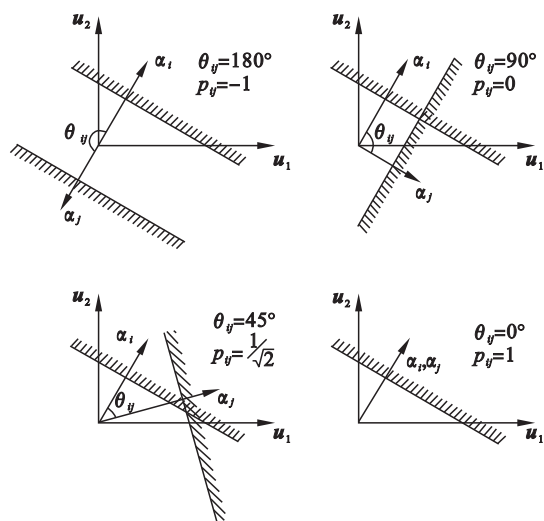


图 2 近似切平面法线夹角与相关系数关系示意图
Fig. 2 Schematic diagram of correlation coefficient and its relationship with normal angle of two different tangent planes

2 系统可靠性分析

2.1 可靠度计算

在利用 FORM 对系统可靠性数学模型中的各功能函数进行线性化处理之后，可以将式(1)

简化为

$$P_{sf} = P\left\{\bigcup_{i=1}^m (g_i(\mathbf{u}) < 0)\right\} = P\left\{\bigcup_{i=1}^m (\beta_i - \boldsymbol{\alpha}_i^T \mathbf{u} < 0)\right\} = 1 - P\left\{\bigcap_{i=1}^m (\beta_i - \boldsymbol{\alpha}_i^T \mathbf{u} \geq 0)\right\} = 1 - \Phi_m(\boldsymbol{\beta}; \boldsymbol{\rho}). \quad (9)$$

式中： $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_m)^T$ ； $\boldsymbol{\rho} = [\rho_{ij}]_{m \times m}$ 为相关系数矩阵， $\rho_{ij} = \boldsymbol{\alpha}_i^T \boldsymbol{\alpha}_j$ ；

$$\Phi_m(\boldsymbol{\beta}; \boldsymbol{\rho}) = \int_{-\infty}^{\beta_1} \dots \int_{-\infty}^{\beta_m} (2\pi)^{-\frac{m}{2}} |\boldsymbol{\rho}|^{\frac{1}{2}} \times \exp\left[-\frac{1}{2} \mathbf{z}^T \boldsymbol{\rho}^{-1} \mathbf{z}\right] d\mathbf{z}_1 \dots d\mathbf{z}_m; \quad (10)$$

$$\mathbf{z} = (z_1, \dots, z_m)^T, z_i = \boldsymbol{\alpha}_i^T \mathbf{u}, i = 1, 2, \dots, m.$$

同样地，可以将式(2)简化为

$$P_{pf} = P\left\{\bigcap_{i=1}^m (g_i(\mathbf{u}) < 0)\right\} = 1 - \Phi_m(-\boldsymbol{\beta}; \boldsymbol{\rho}). \quad (11)$$

可以看出：①由于相关系数矩阵 $\boldsymbol{\rho}$ 的引入，使得系统可靠度的计算可以充分考虑各失效的相关性；②不论是串联系统还是并联系统，其可靠度计算均可以转化为式(10)所示的多维正态积分求解。FOMN, PCM 等方法基于条件概率的基本思想，将多维正态积分转化为多个条件概率的乘积问题。

因此，在利用式(6)和式(8)分别获得各失效模式的可靠度指数 β 和失效模式相关系数矩阵 $\boldsymbol{\rho}$ 的基础上，利用式(9)或(11)将系统可靠度计算转化为多维正态积分计算，进而利用 FOMN, PCM 等方法获得系统可靠度。由于这一方法源于 FORM 近似原理，因此本文称之为基于 FORM 近似的系统可靠性分析方法。

2.2 灵敏度分析

在系统可靠性灵敏度分析方面，本文主要进行两类灵敏度分析：一是失效模式灵敏度，即各失效模式对系统可靠度的影响情况；二是随机变量灵敏度，即各随机变量对系统可靠度的影响情况。其中，失效模式灵敏度定义为 $\partial\beta/\partial\beta_i$ ($i = 1, 2, \dots, m, \beta$ 为系统可靠度指数)，可以采用向前差分方法进行计算：

$$\frac{\partial\beta}{\partial\beta_i} \approx \frac{\beta' - \beta}{\Delta\beta_i}. \quad (12)$$

式中， β' 表示在 β_i 增加微小波动 $\Delta\beta_i$ 情况下的系统可靠度指数， $\Delta\beta_i$ 常取为 $0.1\beta_i$ 。同样地，可以根据具体问题，采用向后差分或前后差分方式进行失效模式灵敏度计算。

在进行随机变量灵敏度计算时，需要考虑随机变量之间具有相关性的一般情况，将随机变量重要性灵敏度定义为 $\partial\beta/\partial y_j$ ($j = 1, 2, \dots, n$)，其中， y_j 是等效标准正态空间的随机向量 $\mathbf{y} = (y_1,$

$y_2, \dots, y_n)^T$ 的第 j 个元素. 由随机变量变换方法^[10]可以得到 \mathbf{y} 与独立标准正态空间的随机变量的关系:

$$\mathbf{y} = \mathbf{L}\mathbf{u}.$$

(13)

式中, \mathbf{L} 为随机变量相关系数矩阵 $\boldsymbol{\rho}_0$ 经过 Cholesky 分解得到的下三角矩阵. 根据复合求导法则, 可以得到

$$\frac{\partial \beta}{\partial y_j} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial \beta}{\partial \beta_i} \frac{\partial \beta_i}{\partial y_j}.$$

(14)

式中: $\partial \beta / \partial \beta_i$ 为失效模式灵敏度; $\partial \beta_i / \partial y_j$ 为各失效模式关于随机变量的灵敏度. 结合式(6)和式(13), 可以得到其向量形式的表达式:

$$\frac{\partial \beta_i}{\partial \mathbf{y}} = \frac{\partial \beta_i}{\partial (\mathbf{L}\mathbf{u})} = (\mathbf{L}^{-1})^T \frac{\nabla g(\mathbf{u})}{\|\nabla g(\mathbf{u})\|}.$$

(15)

若不考虑随机变量的相关性, 则 $\partial \beta / \partial y_j$ 将等价于 $\partial \beta / \partial u_j$. 可以看出, 采用 FORM 近似方法进行系统可靠度计算时, 结合式(14)和式(15)就可以得到随机变量的重要性灵敏度.

3 算 例

某圆柱齿轮传动系统的基本组成结构如图 3 所示, 其中仅考虑由 4 个齿轮失效所引起的系统失效问题, 每个齿轮均包含齿根弯曲疲劳失效和

齿面接触疲劳失效两类失效模式. 分析该系统的可靠性水平, 确定主要的失效模式与影响因素.

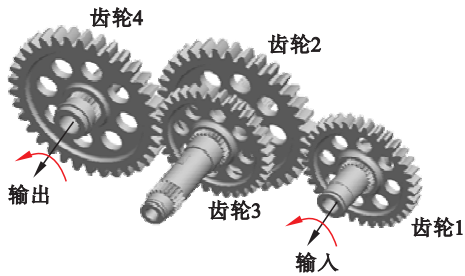


图 3 某圆柱齿轮减速器系统结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of cylinder gear reducer

1) 功能函数建立与分析: 表征各齿轮齿根弯曲疲劳失效和齿面接触疲劳失效的功能函数分别为

$$G_{i1} = S_{Fi} - \frac{2K_{Fi}T_i}{bd_i m} Y_{Fa} Y_{Sa} Y_{\epsilon i},$$

(16)

$$G_{i2} = S_{Hi} - Z_{Ei} Z_{Hi} Z_{\epsilon i} \sqrt{\frac{2K_{Hi}T_i}{bd_i^2} \frac{u+1}{u}}.$$

(17)

式中: $i = 1, \dots, 4$; S_{Fi} 和 S_{Hi} 分别为第 i 个齿轮材料的弯曲疲劳强度和接触疲劳强度; d_i 为第 i 个齿轮材料的分度圆直径. 取 $m = 8, b = 42, u = 2$. 随机变量及其分布函数如表 1 所示, 各变量及其取值如表 2 所示.

表 1 随机变量及其分布函数
Table 1 Probabilistic variables and their distributions

变量	分布函数	变量	分布函数
$T_1 / (\text{N} \cdot \text{mm})$	$N(5.547\text{e} + 6, (5.547\text{e} + 5)^2)$	S_{F1} / MPa	$N(547.52, 16.43^2)$
$T_2 / (\text{N} \cdot \text{mm})$	$2T_1$	S_{F2} / MPa	$N(547.52, 16.43^2)$
$T_3 / (\text{N} \cdot \text{mm})$	$2T_1$	S_{F3} / MPa	$N(690.42, 19.51^2)$
$T_4 / (\text{N} \cdot \text{mm})$	$4T_1$	S_{F4} / MPa	$N(690.42, 19.51^2)$
d_1 / mm	$N(224, 2.24^2)$	S_{H1} / MPa	$N(1478.56, 44.36^2)$
d_2 / mm	$N(448, 4.48^2)$	S_{H2} / MPa	$N(1478.56, 44.36^2)$
d_3 / mm	$N(224, 2.24^2)$	S_{H3} / MPa	$N(1546.78, 46.4^2)$
d_4 / mm	$N(448, 4.48^2)$	S_{H4} / MPa	$N(1546.78, 46.4^2)$

采用 FORM 进行各失效模型的可靠性分析, 得到如表 3 所示的结果. 其中, β_{ik} 为功能函数 G_{ik} 对应的可靠度指数, $\boldsymbol{\alpha}_{ik}$ 为表示 $G_{ik} = 0$ 在 MPP 处的近似切平面的外法线向量, 且 $i = 1, 2, 3, 4, k = 1, 2$. 当 $k = 1$ 时, $\boldsymbol{\alpha}_{i1}$ 是 G_{i1} 关于 $(T_1, d_i, S_{Fi})^T$ 的负梯度信息; 当 $k = 2$ 时, $\boldsymbol{\alpha}_{i2}$ 是 G_{i2} 关于 $(T_1, d_i, S_{Hi})^T$ 的负梯度信息.

2) 系统可靠性建模: 由于任意一个失效模式的发生都将导致传动系统的失效, 因此, 该系统为串联系统, 相应的概率故障树如图 4 所示. 可以看出, 与一般故障树的不同之处在于各底事件是与

表 2 变量及其取值
Table 2 Deterministic variables and their values

变量	取值	变量	取值
$Y_{Fa1} Y_{Sa1} Y_{\epsilon 1}$	1.60	$Z_{E1} Z_{H1} Z_{\epsilon 1}$	314.62
$Y_{Fa2} Y_{Sa2} Y_{\epsilon 2}$	1.46	$Z_{E2} Z_{H2} Z_{\epsilon 2}$	314.62
$Y_{Fa3} Y_{Sa3} Y_{\epsilon 3}$	1.26	$Z_{E3} Z_{H3} Z_{\epsilon 3}$	240.31
$Y_{Fa4} Y_{Sa4} Y_{\epsilon 4}$	1.25	$Z_{E4} Z_{H4} Z_{\epsilon 4}$	263.01
K_{F1}	1.81	K_{H1}	2.19
K_{F2}	1.97	K_{H2}	4.41
K_{F3}	1.49	K_{H3}	2.08
K_{F4}	1.48	K_{H4}	3.42

表 3 各失效模式可靠性分析结果

功能函数	$\Phi(\beta_{ik})$	α_{ik}
G_{11}	0.995 4	$(0.927\ 7, -0.114\ 3, -0.355\ 5)^T$
G_{21}	0.996 1	$(0.927\ 0, -0.114\ 7, -0.357\ 0)^T$
G_{31}	0.989 8	$(0.937\ 3, -0.113\ 2, -0.329\ 6)^T$
G_{41}	0.993 6	$(0.935\ 7, -0.114\ 5, -0.333\ 8)^T$
G_{12}	0.985 3	$(0.792\ 5, -0.185\ 2, -0.581\ 0)^T$
G_{22}	0.982 6	$(0.794\ 2, -0.184\ 8, -0.579\ 0)^T$
G_{32}	0.980 3	$(0.795\ 4, -0.184\ 5, -0.577\ 4)^T$
G_{42}	0.986 2	$(0.791\ 9, -0.185\ 4, -0.581\ 8)^T$

失效模式相对应的功能函数,它不仅提供了失效模式发生的概率信息,还给出了随机因素函数关系等信息,这些都可以用于分析各底事件的相关性.为区别于一般的故障树,文献[14]称之为概率故障树.

结合表 3 的分析结果,利用式(8)可以得到表 4 所示的失效模式相关系数矩阵,这一矩阵将作为后续系统可靠度计算的输入.

3) 可靠度计算与灵敏度分析:结合图 4 的概率故障树,利用 GFOMN(改进的 FOMN 法)^[7]进行系统可靠度计算,并将结果与蒙特卡洛法和不考虑失效相关性的系统可靠度方法进行对比,如表 5 所示.需要指出的是,表 5 中各方法的计算时间均包含了利用 FORM 进行各失效模式可靠性分析的时间.对应的模式灵敏度和随机变量重要性灵敏度结果分别如图 5 和图 6 所示.

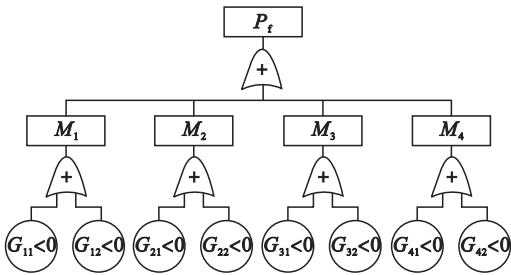


图 4 某圆柱齿轮减速器系统故障树

Fig. 4 Probabilistic fault tree of cylinder gear reducer

表 4 失效模式相关系数矩阵

功能函数	G_{11}	G_{21}	G_{31}	G_{41}	G_{12}	G_{22}	G_{32}	G_{42}
G_{11}	1	0.86	0.87	0.87	0.76	0.74	0.74	0.73
G_{21}	0.86	1	0.87	0.87	0.73	0.76	0.74	0.73
G_{31}	0.87	0.87	1	0.88	0.74	0.74	0.77	0.74
G_{41}	0.87	0.87	0.88	1	0.74	0.74	0.74	0.76
G_{12}	0.76	0.73	0.74	0.74	1	0.63	0.63	0.63
G_{22}	0.74	0.76	0.74	0.74	0.63	1	0.63	0.63
G_{32}	0.74	0.74	0.77	0.74	0.63	0.63	1	0.63
G_{42}	0.73	0.73	0.74	0.76	0.63	0.63	0.63	1

表 5 不同方法下的系统可靠度

方法	系统可靠度	计算时间/s
本文采用的方法	0.950 7	6
不考虑失效相关性的方法	0.912 6	4
蒙特卡洛法(抽样次数为 10^6)	0.949 2	2 145

注:蒙特卡洛方法模拟的是由原始功能函数构成的系统的可靠度,这些功能函数未进行线性化处理.

从表 4 可以看出,各失效模式之间具有较强的相关性(相关系数均不小于 0.63),如齿轮 1 的弯曲疲劳失效与齿轮 2 的弯曲疲劳失效之间的相关系数为 0.86,这种相关性主要源自于二者具有相同的随机载荷 T_1 .由表 5 可知,与蒙特卡洛法相比,本文方法可以获得较高精度的系统可靠度;不考虑相关性的系统可靠度结果则存在较大误差,且这一误差将随失效模式数目的增加而增加.由图 5 可知,各齿轮的接触疲劳失效对系统可靠性影响较大,弯曲疲劳失效的影响相对小些;在齿轮的接触疲劳失效中,齿轮 3 接触疲劳失效($G_{32} < 0$)对该传动系统可靠性影响最大,次之为齿轮 2 的接触疲劳失效($G_{22} < 0$).由图 6 可知,影响系统可靠性的最主要因素是外部载荷,次之为各齿轮接触疲劳强度.因此,在系统设计时,需要重点控制这些关键因素的离散性,提高系统可靠性水平.

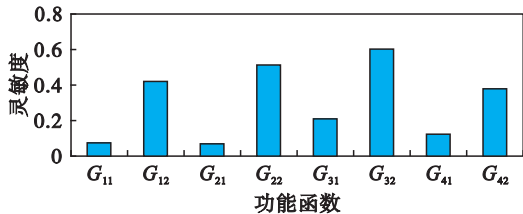


图 5 失效模式灵敏度

Fig. 5 Sensitivities of failure modes

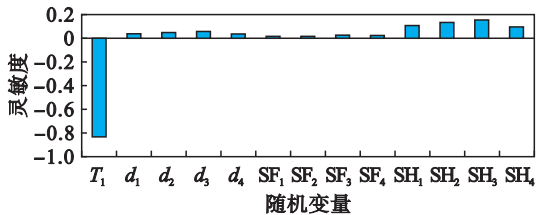


图 6 随机变量灵敏度

Fig. 6 Sensitivities of probabilistic variables

4 结 论

1) 基于 FORM 近似的系统可靠性分析方法给出了各失效模式之间相关系数的计算方法,并在此基础上建立了能够考虑失效模式相关性的系

统可靠性模型.

2) 基于 FORM 近似的系统可靠性分析方法相比于基于独立假设的系统可靠性分析方法,能够获得更准确的可靠度结果,且相对于蒙特卡洛法,具有较高的计算效率,更适用于复杂机械系统可靠性分析与评估.

3) 本文给出了失效模式灵敏度和随机变量灵敏度的计算方法,可以实现机械系统各失效模式和各随机变量重要性的横向对比,有利于提出更具针对性的系统改进建议.

参考文献:

- [1] Grooteman F. An adaptive directional importance sampling method for structural reliability [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2011, 26(2): 134 – 141.
- [2] 佟操,孙志礼,杨丽,等. 一种基于 Kriging 和 Monte Carlo 的主动学习可靠度算法 [J]. *航空学报*, 2015, 36(9): 2992 – 3001.
(Tong Cao, Sun Zhi-li, Yang Li, et al. An active learning reliability method based on Kriging and Monte Carlo [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(9): 2992 – 3001.)
- [3] Ahmed S, Koo B. Improved reliability bounds of structural systems [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1990, 116(11): 3138 – 3147.
- [4] Phani R. Bounds on structural system reliability in the presence of interval variables [J]. *Computers & Structures*, 2007, 85(5/6): 320 – 329.
- [5] Xu L, Cheng G D. Discussion on moment methods for structural reliability [J]. *Structural Safety*, 2003, 25(3): 193 – 199.
- [6] Ditlevsen O, Madsen H O. Structural reliability methods [M]. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2007: 94 – 101.
- [7] Melchers R E. Structural reliability: analysis and prediction [M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1999: 87 – 110.
- [8] Melchers R E. Modeling complex engineering structures [M]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2007.
- [9] Pandey M D, Sarkar A. Comparison of a simple approximation for multinormal integration with importance sampling-based simulation method [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2002, 17: 215 – 218.
- [10] Nadarajah S. On the approximations for multinormal integration [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2008, 54(3): 705 – 708.
- [11] Pandey M D. An effective approximation to evaluate multinormal integrals [J]. *Structural Safety*, 1998, 20: 51 – 67.
- [12] Yuan X X, Pandey M D. Analysis of approximation for multinormal integration in system reliability computation [J]. *Structural Safety*, 2006, 28: 361 – 377.
- [13] 涂宏茂,钱云鹏,姬广振,等. 改进的结构系统可靠度的条件边缘乘积法 [J]. *工程力学*, 2012(10): 321 – 326.
(Tu Hong-mao, Qian Yun-peng, Ji Guang-zhen, et al. An improved product of conditional marginal method for structural system reliability analysis [J]. *Engineering Mechanics*, 2012(10): 321 – 326.)
- [14] Torng T Y, Wu Y T, Millwater H R. Structural system reliability calculation using a probabilistic fault tree analysis method [C]// 33rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Washington D C, 1992: 603 – 613.
- [15] Ben H. Probabilistic engineering analysis using the NESSUS software [J]. *Structural Safety*, 2006, 28: 83 – 107.
- [16] Georgios P. Efficient method for probabilistic finite element analysis with application to reinforced concrete slabs [J]. *Engineering Structures*, 2015, 103: 85 – 101.