

文章编号:1006-2343(2005)01-004-04

非正态分布参数的机械联接件的可靠性灵敏度设计

张义民, 刘仁云, 贺向东

(吉林大学南岭校区 机械科学与工程学院, 长春 130025, E-mail: zhangym @public. cc. jl. cn)

摘 要: 将可靠性设计理论与灵敏度分析方法相结合, 讨论了机械联接件的可靠性灵敏度设计问题, 提出了可靠性灵敏度设计的计算方法, 给出了可靠性灵敏度的变化规律, 研究了设计参数的改变对机械联接件可靠性的影响, 为机械联接件的可靠性设计提供了理论依据。

关键词: 机械联接件; 可靠性灵敏度; 任意分布参数

中图分类号: TH122, U463

文献标识码: A

Reliability Sensitivity of Mechanical Joints With Non-normal Distribution Parameters

ZHANG Yi-min, LIU Ren-yun, HE Xiang-dong

(College of Mechanical Science and Engineering, Nanling Campus, Jilin University, Changchun, 130025, China)

Abstract Based on the reliability design theory and sensitivity analysis method, the reliability sensitivity of the mechanical joints is extensively discussed and a numerical method for reliability sensitivity design is presented. The variation regularities of reliability sensitivity are obtained and the effects of design parameters on reliability of the mechanical joints are studied. The method presented in this paper provided the theoretic basis for the reliability design of the mechanical joints.

Key words: mechanical joints; reliability sensitivity; arbitrary distribution parameters

为满足生产工艺的要求,并考虑到制造、运输、安装、检修工作的方便,大量的压缩机、风机、阀门与管道、流体密封等设备往往做成可拆结构,联接件是可拆结构中使用最为普遍的类型。在机械联接件的设计中,为了得到既有足够的安全可靠性又有适当经济性的优化产品,可靠性(优化)设计和可靠性灵敏度设计无疑起着重要的作用。可靠性(优化)设计^[1~11],是运用概率统计理论和优化方法设计机械联接件的某一(某些)设计参数;可靠性灵敏度设计^[12~16],是在可靠性基础上进行灵敏度设计,给出设计参数的变化对系统可靠度的影响。事实上,若某因素对机械联接件失效有较大的影响,则在设计制造过程中就要严格加以控制,使其变化较小以保证足够的安全可靠性;反之,如果某因素的变异性对机械联接件可靠性的影响不显著,则在进行可靠性设计时,就可以将其当作确定量值处理以减少随机变量的数目。本文采用摄动技术、可靠性设计和灵敏度分析方法讨论了机械联接件的可靠性灵敏度设计问题。在基本随机变量的概率特性已知的前提下,可以迅速准确地得到机械联接件的可靠性灵敏度设计信息。

1 可靠性设计

可靠性设计的一个目标是计算可靠度

$$R = \int_{(X) > 0} f_X(X) dX \quad (1)$$

式中, $f_X(X)$ 为基本随机参数向量 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ 的联合概率密度,这些随机参数代表载荷、零部件的特性等随机量。 $g(X)$ 为状态函数,可表示零部件的两种状态

$$\begin{cases} g(X) \leq 0 & \text{为失效状态} \\ g(X) > 0 & \text{为安全状态} \end{cases} \quad (2)$$

这里基本随机变量向量 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ 的均值 $E(X)$ 、方差 $\text{Var}(X)$ 、三阶矩 $C3(X)$ 、四阶矩 $C4(X)$ 是已知的,但是无法确定有些随机参数的分布概型。

把随机参数向量 X 和状态函数 $g(X)$ 表示为

$$X = X_d + \varepsilon X_p \quad (3)$$

$$g(X) = g_d(X) + \varepsilon g_p(X) \quad (4)$$

这里 ε 为一小参数,下标为 d 的部分表示随机参数中的确定部分,下标为 p 的部分表示随机参数中的随机部分,且具有零均值。显然这里要求随机部分要比确定部分小得多。分别对上面两式取数学期望和取方差、三阶矩和四阶矩,根据 Kronecker 代数及相应的随机分析理论,可以推导出

$$\mu_g = E[g(X)] = \bar{g}(X) = g_d(X) \quad (5)$$

$$\sigma_g^2 = \text{Var}[g(X)] = \left\{ \frac{\partial g_d(X)}{\partial X^T} \right\}^{[2]} \text{Var}(X) \quad (6)$$

$$\theta_g = C3[g(X)] = \left\{ \frac{\partial g_d(X)}{\partial X^T} \right\}^{[3]} C3(X) \quad (7)$$

$$\eta_g = C4[g(X)] = \left\{ \frac{\partial g_d(X)}{\partial X^T} \right\}^{[4]} C4(X) \quad (8)$$

收稿日期:2004-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50175043);吉林大学创新基金资助项目。

式中, $\text{Var}(X)$, $C3(X)$, $C4(X)$ 为基本随机参数的方差、三阶矩和四阶矩向量。

可靠性指标定义为

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{E[g(X)]}{\sqrt{\text{Var}[g(X)]}} \tag{9}$$

在基本随机参数向量 x 服从正态分布时,可以获得可靠度的一阶估计量

$$R = \Phi(\beta) \tag{10}$$

式中, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

对于服从任意分布和无法确定分布概型的情况下,而有足够的资料来确定设计参数的前四阶矩(即均值、方差和协方差、三阶矩、四阶矩)时,作为可供选择的实用方法,采用摄动法求得可靠性指标,然后应用四阶矩技术和 Edgeworth 级数(及相应的经验修正公式^[17])把未知的状态函数的概率分布展开成标准的正态分布的表达式,进而可以确定了机械结构件的可靠度和可靠性灵敏度。

根据 Edgeworth 级数方法,可以把服从任意分布的标准化的随机变量的概率分布函数近似地展开成为标准正态分布函数,即

$$F(y) = \Phi(y) - \varphi(y) \left[\frac{1}{6} \frac{\theta_g}{\sigma_g^3} H_2(y) + \frac{1}{24} \left(\frac{\eta_g}{\sigma_g^4} - 3 \right) H_3(y) + \frac{1}{72} \left(\frac{\theta_g}{\sigma_g^3} \right)^2 H_5(y) + \dots \right] \tag{11}$$

$H_j(y)$ 为 j 阶 Hermite 多项式,其递推关系为

$$\begin{cases} H_{j+1}(y) = yH_j(y) - jH_{j-1}(y) \\ H_0(y) = 1, H_1(y) = y \end{cases} \tag{12}$$

据此结构件的可靠度为

$$R(\beta) = P[g(X) > 0] = 1 - F(-\beta) \tag{13}$$

Edgeworth 级数可以任意精确地逼近随机参数的真实分布,但通常取级数的前四项即可得到较好的近似。用上式计算可靠度时,有时会出现 $R > 1$ 的情况。根据计算实践表明,当有 $R > 1$ 情况出现时,采用下述经验修正公式要比使用 Edgeworth 级数所获得的计算结果更接近于 Monte Carlo 数值模拟结果,当没有 $R > 1$ 情况出现时,Edgeworth 级数可以获得足够精确的解。

$$R^*(\beta) = R(\beta) - \frac{R(\beta) - \Phi(\beta)}{\{1 + [R(\beta) - \Phi(\beta)]\beta\}^\beta} \tag{14}$$

可以看出,在推导过程中放松了对随机参数的分布概型的限制,使之更接近于工程实际。

2 可靠性灵敏度设计

机械系统的可靠度对基本随机参数向量 x 均值和方差的灵敏度为

$$\frac{DR}{D\bar{X}^T} = \frac{\partial R(\beta)}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \mu_g} \frac{\partial \mu_g}{\partial \bar{X}^T} \tag{15}$$

$$\frac{DR}{D\text{Var}(X)} = \left[\frac{\partial R(\beta)}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \sigma_g} + \frac{\partial R(\beta)}{\partial \sigma_g} \right] \frac{\partial \sigma_g}{\partial \text{Var}(X)} \tag{16}$$

式中

$$\begin{aligned} \frac{\partial R(\beta)}{\partial \beta} &= \varphi(-\beta) \left\{ 1 - \beta \left[\frac{1}{6} \frac{\theta_g}{\sigma_g^3} H_2(-\beta) + \frac{1}{24} \left(\frac{\eta_g}{\sigma_g^4} - 3 \right) H_3(-\beta) + \frac{1}{72} \left(\frac{\theta_g}{\sigma_g^3} \right)^2 H_5(-\beta) \right] - \right. \end{aligned}$$

$$\left. \left[\frac{1}{3} \frac{\theta_g}{\sigma_g^3} H_1(-\beta) + \frac{1}{8} \left(\frac{\eta_g}{\sigma_g^4} - 3 \right) H_2(-\beta) + \frac{5}{72} \left(\frac{\theta_g}{\sigma_g^3} \right)^2 H_4(-\beta) \right] \right\} \tag{17}$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \mu_g} = \frac{1}{\sigma_g} \tag{18}$$

$$\frac{\partial \mu_g}{\partial \bar{X}^T} = \left[\frac{\partial \bar{g}}{\partial X_1} \quad \frac{\partial \bar{g}}{\partial X_2} \quad \dots \quad \frac{\partial \bar{g}}{\partial X_n} \right] \tag{19}$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \sigma_g} = - \frac{\mu_g}{\sigma_g^2} \tag{20}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial R(\beta)}{\partial \sigma_g} &= \varphi(-\beta) \left[\frac{1}{2} \frac{\theta_g}{\sigma_g^4} H_2(-\beta) + \frac{1}{6} \frac{\eta_g}{\sigma_g^5} H_3(-\beta) + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{12} \frac{\theta_g^2}{\sigma_g^7} H_5(-\beta) \right] \end{aligned} \tag{21}$$

$$\frac{\partial \sigma_g}{\partial \text{Var}(X)} = \frac{1}{2\sigma_g} \left[\frac{\partial \bar{g}}{\partial X} \odot \frac{\partial \bar{g}}{\partial X} \right] \tag{22}$$

把已知条件和可靠性分析的计算结果代入式(15)和式(16),就可以获得可靠性灵敏度 $DR/D\bar{X}^T$ 和 $DR/D\text{Var}(X)$ 。

当应用 Edgeworth 级数估算系统的可靠度出现 $R > 1$ 的情况时,根据计算实践表明,采用经验修正公式(14)要比使用 Edgeworth 级数所获得的计算结果更接近于 Monte Carlo 数值模拟结果,而所得的分布函数曲线也是在 $[0, 1]$ 范围内单调的。可见,当 $R > 1$ 时,应用经验修正公式的导数来替换式(15)和式(16)中的 $\partial R(\beta)/\partial \beta$ 会比直接使用式(15)和式(16)所获得的结果更加精确。当有 $R > 1$ 情况出现时,对可靠性指标 β 的灵敏度为

$$\frac{\partial R^*}{\partial \beta} = \frac{\partial R(\beta)}{\partial \beta} + \left[\frac{\partial R(\beta)}{\partial \beta} - \varphi(\beta) \right]$$

$$\frac{\beta(\beta - 1)[R(\beta) - \Phi(\beta)] - 1}{\{1 + [R(\beta) - \Phi(\beta)]\beta\}^{\beta+1}} + A$$

$$A = [R(\beta) - \Phi(\beta)]\{1 + [R(\beta) - \Phi(\beta)]\beta\}$$

$$\ln\{1 + [R(\beta) - \Phi(\beta)]\beta\} + [R(\beta) - \Phi(\beta)]\beta$$

$$/\{1 + [R(\beta) - \Phi(\beta)]\beta\}^{\beta+1} \tag{23}$$

用上式替换式(15)和式(16)中的 $\partial R(\beta)/\partial \beta$,即获得可靠性灵敏度 $DR/D\mu_r$ 和 $DR/D\sigma_r$ 。

3 螺栓的力学模型

联接件的可靠性设计之一是螺栓联接的设计。圆形螺栓的工作应力为

$$\sigma = \frac{4p}{\pi N d^2} \tag{24}$$

式中, p 为螺栓承受的剪切载荷; d 为螺栓截面的直径; N 为剪切面数。

根据应力—强度干涉理论,以应力极限状态表示的状态方程为

$$g(X) = r - \sigma \tag{25}$$

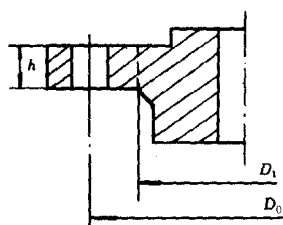
式中, r 为螺栓的材料剪切强度,基本随机变量向量 $x = (r \ p \ d)^T$ 。这里基本随机变量向量 x 的均值 $E(X)$ 、方差 $\text{Var}(X)$ 、三阶矩 $C3(X)$ 、四阶矩 $C4(X)$ 是已知的,可以认为基本随机变量是相互独立的随机变量,但是无法确定基本随机变量向量 x 的分布概型。

4 法兰的力学模型

根据巴赫 (Bach) 方法, 采用拟梁结构模型 (附图), 对于整体法兰, 可求得在 D_1 直径上, 即危险截面处的弯应力为

$$\sigma = \frac{3P(D_0 - D_1)}{\pi D_1 h^2} \quad (26)$$

式中, P 为法兰受力的总和; D_0 为螺钉分布圆的直径; D_1 为危险截面的直径; h 为法兰的厚度。



根据应力—强度干涉理论, 以应力极限状态表示的状态方程为

$$g(X) = r - \frac{3P(D_0 - D_1)}{\pi D_1 h^2} \quad (27)$$

式中, r 为法兰的材料强度, 基本随机变量向量 $X = (r, D_0, D_1, h, P)^T$ 。这里基本随机变量向量 X 的均值 $E(X)$ 、方差 $\text{Var}(X)$ 、三阶矩 $C_3(X)$ 、四阶矩 $C_4(X)$ 是已知的, 可以认为基本随机变量是相互独立的随机变量, 但是无法确定基本随机变量向量 X 的分布概率。

▲附图 整体法兰

5 数值算例

例 1 一般情况下, 在工程实际中构件的几何尺寸和材料的特性是服从正态分布的随机变量, 某螺栓承受剪切载荷为服从任意分布的随机变量, 其前四阶矩为 $(\mu_p, \sigma_p, \theta_p, \eta_p) = (24.134 \times 10^3 \text{ N}, 1.4435 \times 10^3 \text{ N}, 3.4224 \times 10^9 \text{ N}, 2.3148 \times 10^{13} \text{ N})$, 截面直径为 $(\mu_d, \sigma_d) = (12.5, 6.25 \times 10^{-2}) \text{ mm}$, 材料的强度为 $(\mu_r, \sigma_r) = (143.3, 11.5) \text{ MPa}$, 剪切面数 $N = 2$ 。试计算此螺栓的可靠度和可靠性灵敏度。

计算得到此螺栓的可靠性指标、可靠度和可靠性灵敏度分别为

$$\beta = 3.471445, R_E = 1.00068, R^* = 0.9997516$$

$$\begin{aligned} \frac{DR}{DX^T} &= \begin{bmatrix} R(r) \\ R(p) \\ R(d) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 7.105 \times 10^{-5} \\ -2.895 \times 10^{-7} \\ 1.118 \times 10^{-3} \end{bmatrix}^T \\ \frac{DR}{D\text{Var}(X)} &= \begin{bmatrix} R\text{Var}(r) \\ R\text{Cov}(r, p) \\ R\text{Cov}(r, d) \\ R\text{Cov}(p, r) \\ R\text{Var}(p) \\ R\text{Cov}(p, d) \\ R\text{Cov}(d, r) \\ R\text{Cov}(d, p) \\ R\text{Var}(d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.302 \times 10^{-5} \\ 1.753 \times 10^{-7} \\ -6.768 \times 10^{-4} \\ 1.753 \times 10^{-7} \\ -7.142 \times 10^{-10} \\ 2.758 \times 10^{-6} \\ -6.768 \times 10^{-4} \\ 2.758 \times 10^{-6} \\ -1.065 \times 10^{-2} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

这里 R_E 为使用 Edgeworth 级数计算的可靠度, R^* 为采用 Edgeworth 级数的经验修正公式计算的可靠度, R_{MCS} 为应用 Monte Carlo 数值技术模拟的可靠度, $R(\cdot)$ 表示可靠度 R 对 $(\cdot)$ 的灵敏度。

从灵敏度矩阵 $DR/D\bar{X}^T$ 可以看出, 螺栓的材料剪切强度 r 和截面直径 d 的均值增加, 其结果将使结构件趋于更加可靠, 而螺栓承受的剪切载荷 p 的均值增加, 其结果将使结

构件趋于更加不可靠 (失效), 其变化率最大的为 d , 最小的为 p , 也就是说, 使结构件趋向可靠 (或失效) 的速度为直径比材料强度的大、材料强度比载荷的大。从灵敏度矩阵 $DR/D\text{Var}(\bar{X})$ 可以看出, 基本随机参数方差的增加, 都会使结构件趋于更加不可靠 (失效), 但基本随机参数的协方差的变化对结构件的可靠与否的影响却不尽相同。可见, 上面的计算结果与通常的定性分析结果完全一致, 如在状态函数的表达式中可以同样看出螺栓的直径是以平方速率变化的, 所以其对结构件的可靠 (或失效) 设计是最灵敏的。

例 2 一般情况下, 在工程实际中构件的几何尺寸和材料的特性是服从正态分布的随机变量, 设某一法兰的几何尺寸的为 $D_0 = (1200.0, 6.0) \text{ mm}$, $D_1 = (1000.0, 5.0) \text{ mm}$, $h = (50.0, 0.25) \text{ mm}$, 材料强度为 $(\mu_r, \sigma_r) = (135.0, 5.265) \text{ MPa}$ 。法兰承受的载荷为服从任意分布的随机变量, 其前四阶矩为 $(P) = (1.3025 \times 10^6 \text{ N}, 1.2021 \times 10^5 \text{ N}, 1.9872 \times 10^{15} \text{ N}^3, 1.1347 \times 10^{21} \text{ N}^4)$ 。

计算得到的此法兰的可靠性指标、可靠度和可靠性灵敏度分别为

$$\beta = 3.102912, R_E = 0.9973398, R_{MCS} = 0.99349$$

$$\begin{aligned} \frac{DR}{D\bar{X}^T} &= \begin{bmatrix} R(r) \\ R(D_0) \\ R(D_1) \\ R(h) \\ R(p) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 4.876 \times 10^{-4} \\ -2.426 \times 10^{-4} \\ 2.911 \times 10^{-4} \\ 1.941 \times 10^{-3} \\ -3.725 \times 10^{-8} \end{bmatrix} \\ \frac{DR}{D\text{Var}(X)} &= \begin{bmatrix} R\text{Var}(r) \\ R\text{Cov}(r, D_0) \\ R\text{Cov}(r, D_1) \\ R\text{Cov}(r, h) \\ R\text{Cov}(r, p) \\ R\text{Cov}(D_0, r) \\ R\text{Var}(D_0) \\ R\text{Cov}(D_0, D_1) \\ R\text{Cov}(D_0, h) \\ R\text{Cov}(D_0, p) \\ R\text{Cov}(D_1, r) \\ R\text{Cov}(D_1, D_0) \\ R\text{Var}(D_1) \\ R\text{Cov}(D_1, h) \\ R\text{Cov}(D_1, p) \\ R\text{Cov}(h, r) \\ R\text{Cov}(h, D_0) \\ R\text{Cov}(h, D_1) \\ R\text{Var}(h) \\ R\text{Cov}(h, p) \\ R\text{Cov}(p, r) \\ R\text{Cov}(p, D_0) \\ R\text{Cov}(p, D_1) \\ R\text{Cov}(p, h) \\ R\text{Var}(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3.019 \times 10^4 \\ 1.502 \times 10^{-4} \\ -1.802 \times 10^{-4} \\ -1.202 \times 10^{-3} \\ 2.306 \times 10^{-8} \\ 1.502 \times 10^{-4} \\ -7.473 \times 10^{-5} \\ 8.967 \times 10^{-5} \\ 5.978 \times 10^{-4} \\ -1.147 \times 10^{-8} \\ -1.802 \times 10^{-4} \\ 8.967 \times 10^{-5} \\ -1.076 \times 10^{-4} \\ -7.174 \times 10^{-4} \\ 1.377 \times 10^{-8} \\ -1.202 \times 10^{-3} \\ 5.978 \times 10^{-4} \\ -7.174 \times 10^{-4} \\ -4.782 \times 10^{-3} \\ 9.179 \times 10^{-8} \\ 2.306 \times 10^{-8} \\ -1.147 \times 10^{-8} \\ 1.377 \times 10^{-8} \\ 9.179 \times 10^{-8} \\ -1.762 \times 10^{-12} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

从灵敏度矩阵 $DR/D\bar{X}^T$ 可以看出, 法兰的材料强度 r 、

几何尺寸 D_1 和 h 的均值增加,其结果将使法兰趋于更加可靠,而法兰承受的载荷 P 和几何尺寸 D_0 的均值增加,其结果将使法兰趋于更加不可靠(失效),其变化率最大的为法兰的厚度 h ,其后依次为危险截面的直径 D_1 、螺钉分布圆的直径 D_0 ,法兰的材料强度 r ,最小的为法兰的受力总和 P ,也就是说,使法兰趋向可靠(或失效)的速度为几何尺寸比材料强度的大、材料强度比载荷的大。从灵敏度矩阵 $D R / D \text{Var}(X)$ 可以看出,基本随机参数方差的增加,都会使法兰趋于更加不可靠(失效),但基本随机参数的协方差的变化对法兰的可靠与否的影响却不尽相同。而上面的计算结果与通常的定性分析结果完全一致,如在状态函数的表达式中可以同样看出法兰的厚度是以平方速率变化的,所以其对法兰的可靠(或失效)设计是最灵敏的,这进一步说明了灵敏度矩阵对法兰各因素分析的全面性和正确性。

6 结 论

在机械联接件可靠性研究的基础上,提出一种计算联接件可靠性灵敏度的数值方法,有效地反映了机械联接件各因素对其失效的影响程度。本数值方法在随机参数前四阶矩已知的情况下,放松了对随机参数的分布概型的限制,使之更接近于工程实际中的机械联接件的可靠性问题,为联接件的设计、制造、使用和评估,为分析和修改机械联接件的可靠性水平提供了理论依据。可见本文方法是对机械行业产品进行可靠性灵敏度设计的通用的、实用的和有效的方法。

参考文献:

- [1] 牟致忠. 机械零件可靠性设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1983.
- [2] 卢玉明. 机械零件的可靠性设计[M]. 北京:高等教育出版社, 1989.
- [3] 胡宗武,乐晓斌. 机械结构概率设计[M]. 上海:上海交通大学出版社,1995.
- [4] 张义民. 汽车零部件可靠性设计[M]. 北京:北京理工大学出版社,2000.
- [5] 张义民,闻邦椿. 设计是安全的保证 设计是质量的灵魂——本课题组有关汽车零部件可靠性设计研究成果的回顾[J]. 机械设计,2004,21,(专辑):19~20.
- [6] Zhang Y M, Chen S H, Liu Q L, Liu T Q. Stochastic perturbation finite elements[J]. Computers & Structures,1996,59(3):425~429.
- [7] Zhang Y M, Wen B C, Chen S H. PFEM formalism in Kronecker notation[J]. Mathematics and Mechanics of Solids, 1996,1(4):445~461.
- [8] Zhang Y M, Liu Q L, Wen B C. Quasi-failure analysis on resonant demolition of random structural systems[J]. AIAA Journal, 2002,40(3):585~586.
- [9] Zhang Y M, Liu Q L. Practical reliability-based analysis of coil tube-spring[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C, Journal of Mechanical Engineering Science, 2002,216(C2):179~182.
- [10] Zhang Y M, Liu Q L. Reliability-based design of automobile components[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineer Part D, Journal of Automobile Engineering, 2002,216(D6):455~471.
- [11] 张义民,王顺,刘巧伶,闻邦椿. 具有相关失效模式的多自由度非线性随机结构振动系统的可靠性分析[J]. 中国科学(E 辑),2003,33(9):804~812.
- [12] 张义民,刘巧伶,闻邦椿. 非线性随机系统的独立失效模式可靠性灵敏度[J]. 力学学报,2003,35(1):117~120.
- [13] 张义民,刘巧伶,闻邦椿. 单自由度非线性随机参数振动系统的可靠性灵敏度分析[J]. 固体力学学报,2003,24(1):61~67.
- [14] 张义民. 机械零件的可靠性分析的参数灵敏度分析[J]. 机械强度,2003,25(6):657~660.
- [15] 张义民,刘巧伶,闻邦椿. 后桥的可靠性分析的参数灵敏度[J]. 农业工程学报,2003,19(3):95~98.
- [16] 张义民. 任意分布参数的机械零件的可靠性灵敏度设计[J]. 机械工程学报,2004,40(8):100~105.
- [17] Zhang Y M, Wen B C, Liu Q L. First passage of uncertain single degree-of-freedom nonlinear oscillators[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1998,165(4):223~231.

作者简介:张义民(1958-),男,力学博士,机械工程博士后;教授,博士生导师,主要从事随机结构振动与可靠性、汽车零部件可靠性设计等方面的研究。

欢迎破季订阅 2005 年《机械设计与研究》

欢迎订阅 欢迎刊登广告 欢迎赐稿

全国机械仪表类核心期刊

中国科技论文统计源期刊

主要栏目:综合评述,设计理论与方法,机电一体化技术,机构学与机械动力学,传动技术,CAD/CAM/CAE,零部件设计,制造工艺与技术,测试与实验技术,产品开发、分析与设计,专题讲座等。

国内总发行:上海市报刊发行局(邮发代号 4-577)

双月刊大 16 开,每册定价 12.00 元,全年 72 元

全国邮局均可订阅,也可直接向本刊邮购

杂志社地址:上海市华山路 1954 号上海交通大学内,邮编 200030

开户银行:上海市工商银行徐汇支行华山路分理处

户名:机械设计与研究杂志社

帐号:022715 - 1001271509014434315

刊号:ISSN1006 - 2343

CN31 - 1382/ TH

电话:(021)62932023,传真:(021)62932023

■本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、“中国期刊网”、“万方数据资源系统”、“中文科技期刊数据库”