

基于实测信息的零部件渐变可靠性灵敏度设计

王新刚¹, 王宝艳², 张奎晓³, 朱丽莎³

(1. 东北大学秦皇岛分校控制工程学院, 秦皇岛 066004; 2. 东北大学秦皇岛分校数学与统计学院, 秦皇岛 066004; 3. 东北大学机械工程及自动化学院, 沈阳 110004)

摘要: 目前机械零部件可靠性设计大多以建立纯理论数学模型为目标, 没有把当前工作部件的实测信息和参数渐变性融入到理论模型当中, 给零部件的可靠性设计带来一定的误差。为了对既有零部件可靠性进行正确评估, 该文在考虑零部件强度为独立增量过程的同时, 计算了强度的自相关系数, 并研究了载荷作用效应和强度的渐变特性, 得到了计算零部件渐变可靠度的方法。将渐变可靠性设计理论与灵敏度分析方法相结合, 提出了基于实测信息的零部件渐变可靠性灵敏度设计的计算方法, 给出各参数在任意时刻可靠性灵敏度的变化规律, 分析了设计参数的改变对零部件可靠性的影响, 为机械零部件结构设计和寿命预测提供了理论依据。

关键词: 农业机械, 灵敏度分析, 材料强度, 随机过程, 模型

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.10.011

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-10-0065-05

王新刚, 王宝艳, 张奎晓, 等. 基于实测信息的零部件渐变可靠性灵敏度设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 65-69.

Wang Xingang, Wang Baoyan, Zhang Kuixiao, et al. Sensitivity design for gradual change reliability of mechanical components based on measured information[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(10): 65-69. (in Chinese with English abstract)

0 引言

所谓机械可靠性, 是指机械产品在规定条件下、规定时间内完成规定功能的能力。随着可靠性理论不断完善和研究的深入, 在静力学基础上建立的传统可靠性模型已不能满足当今可靠性知识结构和国家重大战略发展的需求, 可靠性理论已从静态可靠性向动态可靠性跨越发展, 不考虑产品结构的动态特性将难以得到机械产品准确的失效数据和可靠性信息, 这必然迫使可靠性的研究从静态可靠性向动态可靠性转变^[1]。另外, 多数机械产品的特性数值随时间而逐渐变化, 如因疲劳、磨损、腐蚀等造成的机械强度降低等, 使产品的可靠性表现出了渐变(时变)的特征。这种产品特性参数的变化是一个随时间渐变的过程, 必须将其处理为随机过程, 当然产品可靠性也必然是时间的函数。目前其重点正由为设计用的时不变可靠度向结构生命全过程(设计、使用、维修、退化等)的时变可靠度转变。目前已有很多学者对机械时变可靠性做了大量的研究, 但大都以建立纯理论数学模型为目标, 对当前零部件的工作状态和给出的时变信息没有融入到理论模型当中, 对零部件的可靠性设计带来一定的误差。载荷的时变特性现已研究的很深

入, 但对强度的时变特性还有待进一步研究^[2-7], 主要是因为导致零部件强度退化的因素很多, 再加上材料本身物理特性的变化, 很难用一个确定的数学模型来表示强度退化的非平稳随机过程。本文针对这一问题充分利用当前时刻零部件的实测值对假设强度随机过程模型做出修正^[8](假设的是部件到失效时的强度随机过程模型, 再用实测值去修正), 从而得到了既有零部件在未来继续使用时的强度随机过程模型, 进而对其进行可靠性设计。

零部件可靠性灵敏度设计是在矩阵代数理论和可靠性设计理论上进行的参数敏感度计算, 在可靠性优化设计、可靠性稳健设计及其维护等方面均有重要的应用^[9-18]。本文采用可靠性设计方法和灵敏度分析相结合的方法讨论了以地轮轴为例的渐变可靠性灵敏度设计问题。利用既有零部件的实测信息对部件结构参数进行渐变可靠性灵敏度设计, 通过灵敏度与时间的曲线迅速准确地得到地轮轴在不同使用期间的可靠性灵敏度设计信息。该方法的提出对中国现服役的农业机械设计寿命的正确评估以及设备安全性能的提升提供了较完善的理论基础。

1 应力的渐变特性

机械零部件在服役期间, 不可避免受到外界条件和材料属性的影响, 载荷和强度都具有很大的随机性, 单一的随机变量已不能很好地表征随机载荷效应和强度退化的变化过程, 必须引入时间概念用随机过程来描述载荷和强度的变化历程。根据应力-强度干涉理论, 其极限状态方程可表示为

收稿日期: 2011-10-15 修订日期: 2012-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51105068); 中央高校基本科研业务费项目(N100323004); 高等学校博士学科点专项科研基金(20110042120017); 中国博士后基金项目(20110491505)

作者简介: 王新刚(1979-), 男, 汉族, 黑龙江齐齐哈尔人, 副教授, 博士, 主要从事机械可靠性设计方面的研究。秦皇岛 东北大学秦皇岛分校控制工程学院, 066004。Email: wangxingang1217@126.com

$$g(t) = r(t) - \sigma(t) \quad (1)$$

式中, $r(t)$ 为材料强度退化的随机过程, $\sigma(t)$ 为载荷作用效应随机过程, $g(t)$ 为零部件结构的状态函数。当 $g(t) > 0$ 时, 为安全状态; 当 $g(t) \leq 0$ 时, 为失效状态。

渐变可靠度计算式为

$$R(t) = \Phi(\beta(t)) = P\{r(t) > \sigma(t) \quad t \in [0, T]\} \quad (2)$$

式中, $R(t)$ 为零部件在服役期内任意时刻 t 的可靠度; $\beta(t)$ 为可靠性指标函数; T 为零部件总的工作时间, h ; $\Phi(\cdot)$ 是标准正态分布函数; $P(\cdot)$ 为概率函数。

由于在计算结构可靠度指标时采用的是考虑基本随机变量概率分布类型的一次二阶矩方法, 所以必须将荷载作用随机过程转换为设计服役期或今后要求的服役期内最大荷载随机变量才能进行分析计算。荷载虽然随时间随机地变化, 但其最大值分布的期望值并不会随着时间的推移而减小。为了确定该随机荷载的等效最大荷载对零部件的影响, 需要把随机荷载从实测时刻 t_i 起到作用某一时段 $(t_i + \Delta t)$ 这一时段的荷载离散成 n 等份, 若结构在最大荷载 S_{\max} 作用下不失效, 则零件结构在这 n 次荷载作用下也不失效, 即

$$P(t) = P\{r > \sigma(S_{\max})\} = P\{r > \sigma(S_1), r > \sigma(S_2), \dots, r > \sigma(S_n)\} \quad (3)$$

式中, r 为材料强度, N/mm^2 ; $\sigma(S_n)$ 为荷载 S_n 引起的响应, $P(t)$ 为 Δt 时段的概率函数。

由顺序统计量理论和最大项的极值分布原理, 最大荷载效应的分布函数为^[19]

$$F_S(x) = P(\max_{1 \leq i \leq n} S_i \leq x) = P(S_1 \leq x)P(S_2 \leq x) \cdots P(S_n \leq x) = \prod_{i=1}^n P(S_i \leq x) = [F_S(x)]^n \quad (4)$$

则可靠度计算式为

$$R(t) = P\{r > \max \sigma(t) \quad t \in [t_i, t_i + \Delta t]\} \quad (5)$$

式中, $\max \sigma(t)$ 为最大等效荷载效应。

2 强度的渐变特性

目前, 对研究机械零部件强度退化的时变模型主要有 2 种, 第一: 直接转换为各时段的随机变量的强度模型, 是用随机过程的某时刻截口随机变量代替随机过程, 该模型并不能反映强度各个时刻相关性等随机特征; 第二: 用某种确定性函数表示强度退化过程, 将非平稳随机过程转换为平稳随机过程模型。由于强度退化过程极其复杂, 所以其退化函数很难用确定的数学模型表达出来, 而且并没有充分利用既有零部件本身的信息。

由于强度在任意时刻都具有相关性, 而且这种相关性很难确定, 为此本文利用随机过程的独立增量原理, 考虑强度各时刻相关性的独立增量随机过程, 并利用当前时刻的实测值对原设计强度随机过程模型做出修正, 从而形成了零部件在未来继续使用时的强度退化随机过程模型。设强度退化的随机过程为 $\{r(t), t \in [t_i, t_i + \Delta t]\}$,

在当前时刻 t_i 处的强度 $r(t_i)$ 为一随机变量, 其均值和方差分别为 $E[r(t_i)]$ 和 $D[r(t_i)]$ 。设计的强度退化随机过程为 $\{r_0(t), t \in [t_i, t_i + \Delta t]\}$, 其均值函数和方差函数分别为 $E[r_0(t)]$ 和 $D[r_0(t)]$, 在统计和理论意义上, 在当前时刻 t_i 处均值和方差 $E[r(t_i)]$ 、 $D[r(t_i)]$ 应分别等于设计强度 $r_0(t)$ 在 t_i 时刻的均值 $E[r_0(t_i)]$ 和方差 $D[r_0(t_i)]$, 那么强度的随机过程可表示为

$$r(t) = r(t_i) + [r_0(t) - r_0(t_i)] \quad (6)$$

零部件强度退化的随机过程 $\{r(t), t \in [t_i, t_i + \Delta t]\}$ 的均值函数和方差函数分别为

$$E[r(t)] = E[r(t_i)] + E[r_0(t)] - E[r_0(t_i)] \quad (7)$$

$$D[r(t)] = D[r(t_i)] + D[r_0(t)] + D[r_0(t_i)] - 2 \operatorname{cov}[r_0(t), r_0(t_i)] \quad (8)$$

式中, $\operatorname{cov}[r_0(t), r_0(t_i)]$ 为强度退化的协方差函数。若 $\{r(t), t \in [t_i, t_i + \Delta t]\}$ 为独立增量过程, 则强度的自相关系数

$$\rho_r[r(t_i), r(t_i + \Delta t)] = \frac{\operatorname{cov}[r(t_i), r(t_i + \Delta t)]}{\sqrt{D[r(t_i)]D[r(t_i + \Delta t)]}} \quad (9)$$

利用独立增量过程的性质可证明

$$\rho_r[r(t_i), r(t_i + \Delta t)] = \sqrt{\frac{D[r(t_i)]}{D[r(t_i + \Delta t)]}} \quad (10)$$

将式 (9) ~ (10) 带入式 (8) 中可得强度退化的方差函数为

$$D[r(t)] = D[r(t_i)] + D[r_0(t)] - D[r_0(t_i)] \quad (11)$$

在当前时刻 t_i 实测样本值的前提下, 机械零部件的强度在未来继续服役期 $t \in [t_i, t_i + \Delta t]$ 时段内的均值和方差及自相关系数函数的计算公式可由式 (7)、(10) 和 (11) 确定。

3 渐变可靠性设计

由式 (2) 可知, 零部件结构可靠度其功能方程应表示为

$$R(t) = P\{g(t) > 0, t \in [0, T]\} \quad (12)$$

式 (11) 说明在设计服役期 T 内每一时刻 t 的 $r(t) > \sigma(t)$ 时零部件结构是安全可靠的, 其失效概率为

$$F(t) = 1 - R(t) = P\{r(t) < \sigma(t), t \in [0, T]\} \quad (13)$$

零部件在当前时刻 t_i 具有实测值, 则其在未来继续工作期 $[t_i, t_i + \Delta t]$ 内的可靠度可以表示

$$R(t) = P\{r(t_i) - \sigma(t_i) > 0, t_i \in [t_i, t_i + \Delta t]\} \quad (14)$$

式中, $r(t_i)$ 和 $\sigma(t_i)$ 分别为工作部件在 t_i 时刻的强度和随机荷载效应, N/mm^2 。

由公式 (14) 可知, 零部件在整个设计服役期相当于 n 个样本串联在一起, 组成了一个串联系统。由串联系统的可靠性定义可知, 要使得整个系统不失效, 那么每个子系统也不失效, 机械零部件时变可靠度为

$$R(t) = P\left\{\bigcap_{i=1}^n g(t_i) > 0, t_i \in [t_i, t_i + \Delta t]\right\} \quad (15)$$

设 $\beta(t_i) = \Phi^{-1}\{g(t_i) > 0, i = 1, 2, \dots, n\}$; ρ^T 为各等时段

功能函数之间的相关系数矩阵，即 $\rho^T = \rho_g[g(t_i), g(t_j)]_{n \times n}$ ； $\Phi_n(\cdot, \cdot)$ 是 n 维标准正态分布函数， $\Phi_n^{-1}(\cdot, \cdot)$ 是 $\Phi_n(\cdot, \cdot)$ 的反函数，根据独立增量过程性质可知，功能函数之间的相关系数

$$\rho_g[g(t_i), g(t_j)] = \frac{\text{cov}[g(t_i), g(t_j)]}{\sqrt{D[r(t_i)]D[r(t_j)]}} = \frac{\rho_r[r(t_i), r(t_j)]\sqrt{D[r(t_i)]D[r(t_j)]}}{\sqrt{\{D[r(t_i)]+D[\sigma(t_i)]\}\{D[r(t_j)]+D[\sigma(t_j)]\}}} \quad (16)$$

($i \neq j, i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n$).

零部件的可靠度表示为

$$R(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) \prod_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\beta'(t_i)} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \right\} dt \quad (17)$$

式中， $\beta'(t_i) = \frac{\beta(t_i) - \sqrt{\rho_{g_i}} t}{\sqrt{1 - \rho_{g_i}}}$ ， $\varphi(\cdot)$ 为标准正态分布的密度函数。

4 渐变可靠性灵敏度设计

当参数为正态分布时，机械产品的渐变可靠度对基本随机参数向量 $\mathbf{X}=(X_1 X_2 \dots X_n)^T$ 均值的渐变可靠性灵敏度定义为

$$\frac{dR(t)}{d\mathbf{X}^T} = \frac{\partial R(t)}{\partial \beta'(t_i)} \frac{\partial \beta'(t_i)}{\partial \beta(t_i)} \frac{\partial \beta(t_i)}{\partial \mu_{g(t_i)}} \frac{\partial \mu_{g(t_i)}}{\partial \mathbf{X}^T} + \frac{\partial R(t)}{\partial \beta'(t_i)} \frac{\partial \beta'(t_i)}{\partial \beta(t_i)} \frac{\partial \beta(t_i)}{\partial \sigma_{g(t_i)}} \frac{\partial \sigma_{g(t_i)}}{\partial \mathbf{X}^T} \quad (18)$$

式中

$$\frac{\partial R(t)}{\partial \beta'(t_i)} = \varphi(\beta(t_i)) \quad (19)$$

$$\frac{\partial \beta'(t_i)}{\partial \beta(t_i)} = \frac{1}{\sqrt{1 - \rho_{g_i}}} \quad (20)$$

$$\frac{\partial \beta(t_i)}{\partial \mu_{g(t_i)}} = \frac{1}{\sigma_{g(t_i)}} \quad (21)$$

$$\mu_{g(t_i)} = E[g(t_i)] \quad (22)$$

$$\sigma_{\sigma(t_i)}^2 = D[\sigma(t_i)] \quad (23)$$

$$\frac{\partial \beta(t_i)}{\partial \sigma_{g(t_i)}} = -\frac{\mu_{g(t_i)}}{\sigma_{g(t_i)}^2} \quad (24)$$

$$\frac{\partial \sigma_{g(t_i)}}{\partial \mathbf{X}^T} = \frac{1}{2\sigma_{g(t_i)}} \left[\frac{\partial^2 g}{\partial (\mathbf{X}^T)^2} \otimes \frac{\partial g}{\partial \mathbf{X}^T} + \left(\frac{\partial^2 g}{\partial (\mathbf{X}^T)^2} \otimes \frac{\partial g}{\partial \mathbf{X}^T} \right) (\mathbf{I}_q \otimes \mathbf{U}_{q \times q}) \right] (\mathbf{I}_q \otimes \text{Var}(\mathbf{X})) \quad (25)$$

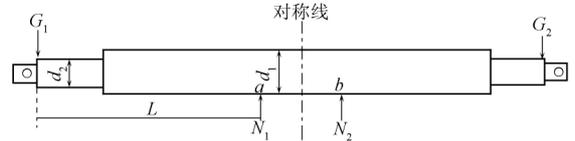
式中， \mathbf{I}_q 为 $q \times q$ 维的单位矩阵， $\mathbf{U}_{q \times q}$ 为 $q^2 \times q^2$ 维的矩阵。 $(\cdot)^{[2]} = (\cdot) \otimes (\cdot)$ 为 (\cdot) 的 Kronecker 幂，符号 \otimes 代表 Kronecker 积，

定义为 $(\mathbf{A})_{p \times q} \otimes (\mathbf{B})_{s \times t} = (\mathbf{a}_{ij} \mathbf{B})_{ps \times qt}$ 。把获得的渐变可靠度函数代入式 (18)，就可以获得基于全随机过程的渐变可靠性灵敏度。

5 算例

5.1 地轮轴的力学模型

2BQ-3 型播种机的地轮轴处于 2 个地轮之间，连接 2 个地轮，播种机身通过拉杆与该轴中间部分相连接，其受力如图 1 所示



注： G_1 、 G_2 为播种机重力产生的随机载荷 G 的 2 个分力； N ； N_1 、 N_2 为地轮轴所受的支持力， N ； L 为 N_1 到 G_1 的距离，mm； d_1 和 d_2 分别为地轮轴的阶梯轴直径，mm。

图 1 地轮轴受力图
Fig.1 Force of land axle

地轮轴所受最大应力及由重力产生的弯矩分析过程见参考文献[20]。地轮轴 3 个随机变量参数以向量的形式表示为 $\mathbf{X}=(d_1, d_2, L)^T$ ，其均值 $\mathbf{E}(\mathbf{X})$ 和方差 $\text{Var}(\mathbf{X})$ 是已知的。根据式 (1) 即可得到地轮轴以应力极限状态表示的状态方程。

5.2 数值算例

2BQ-3 型播种机地轮轴已工作 500 h，经检测后其强度的均值函数和方差函数分别为 $E[r(t)]=2.6e^{-0.00003t}$ ， $D[r(t)]=5.3\exp(-2 \times 10^{-9}t^2)$ 。地轮轴直径的前二阶矩为 $d_1=(10.24, 0.087)$ ， $d_2=(7.92, 0.06)$ ， $L=(128, 0.18)$ ，在该时刻所测载荷的前二阶矩 $S=(310.88 \times 10^3, 3.5 \times 10^3)$ ，载荷随机过程最大等效载荷效应服从极值分布，设 t_i 时刻地轮轴的强度服从指数分布，试计算此地轮轴继续工作 5 000 h 的可靠度及参数 d_1 、 d_2 、 L 的渐变可靠性灵敏度。

根据式 (3) ~ (5) 把地轮轴继续工作 5 000 h 分成 $n=5 000$ 等份，推导出强度不退化下地轮轴的可靠度，然后将实测的强度信息带入式 (6) ~ (17) 推导出地轮轴强度退化模型和渐变可靠性度计算公式，再带入式 (18) 中即可得到相应参数的灵敏度数值，结果如图 2 和图 3 所示。

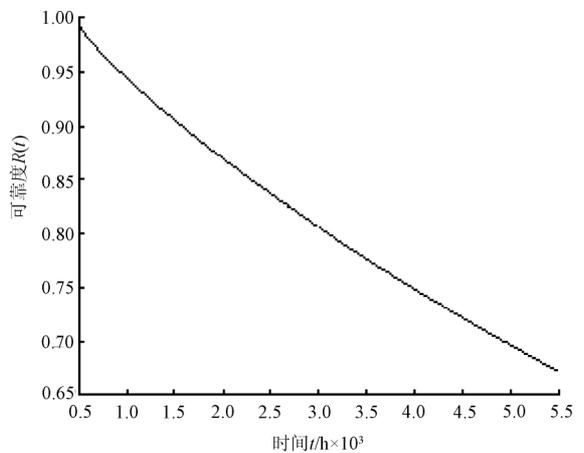


图 2 地轮轴渐变可靠度

Fig.2 Curve of time-dependent reliability of land axle

从图 2 中可以看出,地轮轴服役时间越长,其结构可靠度变得越低,这是比较符合实际工况的。图 3 显示了参数 d_2 、 d_1 和 L 灵敏度随时间变化的历程。可以看出,任意时刻可靠度 R 对变量 d_1 的灵敏度都大于对 d_2 和 L 的灵敏度, d_1 的变化最敏感。随着地轮轴阶梯直径 d_1 、 d_2 均值的增加,其结果将使地轮轴趋于更加可靠。 L 的灵敏度数值为负数,则说明随着 L 的均值增加,其结果将使地轮轴趋于不可靠,即失效概率增加。所以再对地轮轴进行结构设计时要考虑参数 L 对整体结构可靠性的影响。

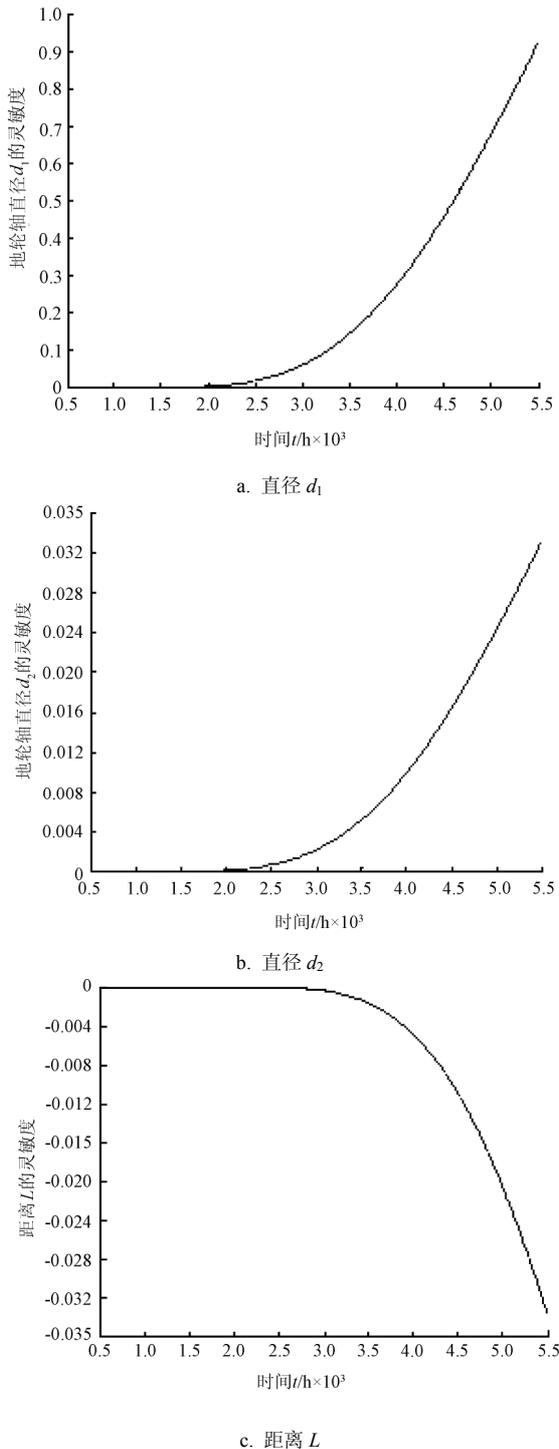


图 3 可靠度对地轮轴直径 d_1 、 d_2 和距离 L 的灵敏度曲线
 Fig.3 Curve of sensitivity of reliability to diameter d_1 , d_2 and distance L of land axle

6 结论

1) 本文以地轮轴为例,充分利用了当前时刻地轮轴的强度实测信息对原有的强度随机过程模型做出修正,从而得到了地轮轴在未来继续使用时的强度随机过程模型,进而可对其进行正确的可靠性评估。在此基础上,又进一步推导出地轮轴的渐变可靠性灵敏度计算方法,给出了地轮轴结构参数的变化对其整体结构可靠性的敏感程度,为合理地确定地轮轴的结构参数和安全工作时间奠定了理论基础。

2) 本文推导的渐变可靠性及灵敏度数学模型考虑了零部件的实测信息和设计参数的动态变化特性,计算结果更接近于零部件真实工作状态,可见该方法是合理有效的。同时,该方法也适用于其他行业的机械零部件渐变可靠性设计。

[参 考 文 献]

- [1] 张义民. 机械可靠性设计的内涵与递进[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 167-188.
Zhang Yimin. Connotation and development of mechanical reliability-based design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 167-188. (in Chinese with English abstract)
- [2] Salvatore Benfratello, Livia Cirone, Francesco Giambanco. A multicriterion design of steel frames with shakedown constraints[J]. Computers and Structures, 2006, 84(5/6): 269-282.
- [3] 张俊芝, 金本清, 李桂青. 在役结构随机时变可靠性分析[J]. 南昌水专学报, 2000, 19(4): 5-10.
Zhang Junzhi, Jin Benqing, Li Guiqing. The random time-dependent reliability analysis method of existing structure[J]. Journal of Nanchang College of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2000, 19(4): 5-10. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张义民, 贺向东, 刘巧伶, 等. 非正态分布参数前轴的可靠性优化设计[J]. 农业工程学报, 2003, 19(5): 60-63.
Zhang Yimin, He Xiangdong, Liu Qiaoling, et al. Reliability-based optimization of front-axle with non-normal distribution parameters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(5): 60-63. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王新刚, 张义民, 王宝艳. 机械零部件的动态可靠性分析[J]. 兵工学报, 2009, 30(11): 1510-1514.
Wang Xingang, Zhang Yimin, Wang Baoyan. Dynamic reliability analysis of mechanical components[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(11): 1510-1514. (in Chinese with English abstract)
- [6] Wang X G, Zhang Y M, Wang B Y. Reliability-based design of automobile components[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 223(C2): 483-490.
- [7] 张俊芝. 验证荷载条件下的在役结构动态可靠度[J]. 武汉工业大学学报, 2000, 22(6): 75-77.

- Zhang Junzhi. The dynamic reliability of proof load for existing structures[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2000, 22(6): 75—77. (in Chinese with English abstract)
- [8] 杜斌. 结构时变可靠度计算的全随机过程模型[J]. 中国工程科学, 2010, 12(3): 108—112.
- Du Bin. Fully stochastic analysis method for structural time-independent reliability[J]. Engineering Sciences, 2010, 12(3): 108—112. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张义民, 刘巧伶, 闻邦椿. 后桥可靠性分析的参数灵敏度[J]. 农业工程学报, 2003, 19(5): 60—63.
- Zhang Yimin, Liu Qiaoling, Wen Bangchun. Parametric sensitivity in reliability analysis of rear axle casing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(5): 60—63. (in Chinese with English abstract)
- [10] Zhang Yimin, Zhu Lisha, Wang Xingang. Advanced method to estimate reliability-based sensitivity of mechanical components with strongly nonlinear performance function[J]. Applied Mathematics and Mechanics: English Edition, 2010, 31(10): 1325—1336.
- [11] Shiraishi F, Tomita T, Iwata M et al. Hirayama H. A Reliable Taylor series-based computational method for the calculation of dynamic sensitivities in large-scale metabolic reaction systems: Algorithm and software evaluation[J]. Mathematical Biosciences, 2009, 222(2): 73—85.
- [12] 李民, 舒歌群, 梁兴雨. 4100QB 柴油机机体的形状优化及灵敏度分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 160—164.
- Li Min, Shu Gequn, Liang Xingyu. Shape optimization and sensitivity analysis for cylinder block of 4100QB diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(2): 160—164. (in Chinese with English abstract)
- [13] De Lataillade A, Blanco S, Clergent Y et al. Monte Carlo method and sensitivity estimations[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2002, 75(5): 529—538.
- [14] Melchers R E, Ahammed M. A fast approximate method for parameter sensitivity estimation in Monte Carlo structural reliability[J]. Computers and Structures, 2004, 82(1): 55—61.
- [15] Zhao Y G, Ono T. Moment methods for structural reliability[J]. Structural Safety, 2001, 23(1): 47—55.
- [16] Wu Y T, Mohanty S. Variable screening and ranking using sampling--based sensitivity measures[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2006, 91(6): 634—647.
- [17] Zhang Y M, Liu Q L, Wen B C. Re-liability-based sensitivity computation and analysis of automobile components[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(11), 1026—1029.
- [18] Kim C, Wang S, Choi K K. Efficient response surface modeling by using moving least-squares method and sensitivity[J]. AIAA Journal, 2005, 43(11): 2404—2411.
- [19] 王新刚, 张义民, 王宝艳. 机械零部件的动态可靠性灵敏度分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 187—193.
- Wang Xingang, Zhang Yimin, Wang Baoyan. Dynamic reliability sensitivity analysis of mechanical components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 187—193. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张洋, 王新刚. 林业机械结构的动态可靠性灵敏度设计[J]. 林业机械与木工设备, 2011, 39(3): 41—44.
- Zhang Yang, Wang Xingang. Dynamic reliability sensitivity design of forestry mechanical structure[J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2011, 39(3): 41—44. (in Chinese with English abstract)

Sensitivity design for gradual change reliability of mechanical components based on measured information

Wang Xingang¹, Wang Baoyan², Zhang Kuixiao³, Zhu Lisha³

(1. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 2. School of Mathematics and Statistics, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 3. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Reliability design of mechanical components mostly focused on establishing pure theoretical mathematical model at present, without involving measured information for working components and gradual characteristics of parameters into theoretical model, which caused some errors for reliability design of components. In order to access reliability of existing components correctly, by taking strength of components as a process of independent increments, autocorrelation coefficient of strength was calculated, and effect of loading action and gradual change characteristics of strength was studied, thus a method for computing gradual change reliability was proposed. Combining the reliability design theory with sensitivity analysis method, a numerical method for gradual change reliability sensitivity design of components based on measured information was proposed, and the variation rules of reliability sensitivity of parameters at any moment and effects of design parameters on reliability of components were obtained, which provides the theoretical basis for structural design and life prediction of mechanical components.

Key words: agricultural machinery, sensitivity analysis, strength of materials, stochastic programming, models