

基于盲数理论的机械结构复杂时变可靠性计算方法*

郭朋彦¹ 石博强¹ 肖成勇¹ 闫永业¹ 李海鹏²

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中集车辆集团研发中心, 深圳 518067)

【摘要】 运用盲数理论及不确定变量盲数化的基本思想求解了机械结构复杂时变可靠性问题。推导了机械结构基于随机过程的时变特性,使用盲数表达了时变过程中的不确定量,建立了基于盲数理论的机械结构时变可靠度计算模型,在 LabVIEW 平台下编写了相应的计算程序,并用该程序计算了某机械结构的时变可靠度。结果表明:盲数为这种复杂可靠度模型的求解提供了一种简单而高效的计算方法。

关键词: 机械结构 可靠性 盲数 随机过程 时变

中图分类号: TB114.3; TH122 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)07-0210-04

Computing-algorithm for Time-dependent Reliability of Mechanical Structure Based on Blind Number

Guo Pengyan¹ Shi Boqiang¹ Xiao Chengyong¹ Yan Yongye¹ Li Haipeng²

(1. School of Civil & Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. R&D Center, CIMC Vehicles Group Co., Ltd., Shenzhen 518067, China)

Abstract

With the blind number theory, the mechanical structure's time-dependent characteristic based on stochastic process was deduced. The uncertain variables in time-dependent stochastic process of mechanical structure were expressed in blind number, and its time-dependent reliability calculation model based on blind number theory was built. And what's more, the corresponding program in LabVIEW language was given, and a free beam's time-dependent reliability was also computed. The result showed that blind number as a kind of numerical tool is very convenient and effective for solving the complicated reliability calculation model.

Key words Mechanical structure, Reliability, Blind number, Stochastic process, Time-dependent

引言

随着机械设计理论的发展,机械结构可靠性的随机时变特性引起了越来越多的关注,出现了将载荷作用过程考虑为泊松随机过程的研究^[1~2],但结构承受的实际载荷相当复杂且存在很大的不可预知性,同时机械结构的抗力也存在着退化问题^[3~4],其在任何时刻的瞬时值不能预知,均随时间而变,这就需要更为复杂的随机过程来描述。复杂随机过程的应用往往使某一可靠度计算模型内同时存在两种以上不同分布类型的随机量,且各分布类型间要进

行多次复杂运算,对于这种在同一模型内包含多种分布类型的复杂可靠度求解问题,若采用传统方法来计算则十分繁琐甚至可能无法求解,而盲数理论及方法为这种复杂计算模型提供了一种行之有效的求解方法。

盲数作为一种离散化、数字化的表达方法和处理工具,可以从微观的角度表达包括随机变量在内的所有不确定量,盲数化变量的统计值可以来自拟合好的典型分布和实际测量的数据,将其应用于基于随机过程的复杂时变可靠性计算,可为这种复杂模型提供一种简单而有效的求解方法,同时还可减

收稿日期: 2009-03-09 修回日期: 2009-05-08

* 国家自然科学基金资助项目(50475173)和北京市自然科学基金资助项目(3093022)

作者简介: 郭朋彦,博士生,主要从事基于不确定信息的机械设计研究,E-mail: guopengyan1@163.com

少因数据拟合带来的计算误差及便于实现计算的程序化,从而有效提高计算准确性和计算效率。本文将盲数理论应用于基于一般随机过程理论的机械结构复杂时变可靠性的求解计算,从而可快速预知结构在未来时刻的可靠度,为结构的复杂时变可靠性提供求解方法。

1 盲数理论及不确定信息的盲数化

盲数在对不确定变量的表达上吸取了区间灰数和未确知数表达形式的特点^[5~6],是它们表达形式的统一。盲数之间可以进行各种运算,这方便了盲数对不确定变量间复杂关系的描述。盲数的均值和方差刻画了盲数的中心点和分散性特征^[6]。

盲数可以灵活地表达随机变量、模糊变量、灰数变量和包含主观判断的未确知量。以随机变量为例,其往往表现为在某个区间上的概率密度分布,在工程实际中,常用有限多个“极窄小区间”上概率的集合来近似表达随机变量的概率密度分布,这就是用盲数表达随机变量的基本思想^[7]。例如,服从正态分布的随机变量 X ,位于区间 $[\mu - 6\sigma, \mu + 6\sigma]$ 上的概率基本达到了 100%,所以用该有限区间上的概率分布来刻画整个正态分布足可满足一般的工程需要;将该区间划分为若干个(如 200 个)“极窄小区间”,在每个“极窄小区间”内,随机变量的分布类型均可以看作是某种典型分布(如均匀分布),这样就可以用这 200 个“极窄小区间”上概率的和来近似表达随机变量 X 的概率密度分布。这种离散化的结果,使得原来以概率计算的“强”不确定性转化为“极窄小区间”上的“弱”的不确定性计算,使随机变量的数值表达和计算变得容易实现。在这个原则的指导下,对于任意已知分布类型和分布参数的不确定变量,可以通过离散其分布区间实现盲数化,只要离散后的各区间很“窄”,盲数化后就能很好地逼近原分布函数。对于未知其分布信息的不确定变量,则可以在对现有数据统计分析的基础上给出其盲数表达。

2 机械结构的随机时变特性

因受到工作环境、材料自身和结构参数等确定性因素和诸多不确定性因素的影响,机械结构承受的载荷和结构抗力存在着很大的不确定性,如果考虑产品的整个寿命过程,则作用在结构上的载荷和结构的抗力应分别服从某一随机时变过程。其演变过程可用下述随机过程来模拟。

设 (Ω, F, P) 是一个概率空间, F 为 Ω 上的 σ 代数, P 为 Ω 上的一个概率测度, z 为一个一维布朗运

动,为时间 t 的函数; μ, ω 为常数,且 $\omega \geq 0$,随机过程 S 满足

$$dS = \mu S dt + \omega S dz \quad (1)$$

$$\text{即} \quad dS/S = \mu dt + \omega dz \quad (2)$$

设函数 $G = \ln S$,则根据 Ito 定理有

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial S} \mu S + \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G}{\partial S^2} \omega^2 S^2 \right) dt + \frac{\partial G}{\partial S} \omega S dz \quad (3)$$

$$\text{即} \quad dG = \left(\mu - \frac{\omega^2}{2} \right) dt + \omega dz \quad (4)$$

式(4)表明, G 遵循一个带漂移的布朗运动。由布朗运动的定义知: $G_T - G_t$ (即 $\ln S_T - \ln S_t$) 服从均值为 $(\mu - \omega^2/2)(T - t)$ 、标准差为 $\omega \sqrt{T - t}$ 的正态分布,即

$$\ln S_T \sim \varphi \left[\ln S_t + \left(\mu - \frac{\omega^2}{2} \right) (T - t), \omega \sqrt{T - t} \right] \quad (5)$$

其中 S_T, S_t 分别为未来时刻 T 和当前时刻 t 的随机值, μ 和 ω 分别为该随机过程的漂移率和波动率,前者主要反映确定性因素的影响,后者反映不确定性因素的影响,其值可以通过该随机量的历史数据来估算,即

$$\mu = \bar{\eta} = \frac{1}{n} \sum \ln \frac{S_i}{S_{i-1}} \quad (6)$$

$$\omega = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\eta_i - \bar{\eta})^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

其中

$$\eta_i = \ln \frac{S_i}{S_{i-1}}$$

式中, $\bar{\eta}$ 是 η_i 的平均值, S_i 为第 i 个时间间隔末随机量的观测值 ($i = 1, 2, \dots, n$; 有 $S_0 \sim S_n$ 共 $n + 1$ 个观测数据)。为准确地估算出漂移率和波动率,观测随机量的时间间隔通常是固定的。一般来说,数据越多估算精度就越高,然而过于长远的历史数据对于参数估计可能不起什么作用。一个近似的解决方法是:使用最近时间长度的历史数据来估算将来相同时间长度的随机值情况,例如,用过去 180 天的数据来估算未来半年内的随机值分布情况。

在工程实际中,机械结构承受的载荷及结构的抗力受到确定性因素和不确定性因素的共同作用,确定性因素反映了载荷及抗力的变化趋势,不确定性因素反映了载荷及抗力的随机差异,二者的耦合行为对载荷及抗力产生的效应以概率演化的形式出现,即呈现为时变随机过程。根据机械结构承受的载荷(结构抗力)的历史数据可以依照上述随机过程来预测未来时刻 T 时的随机量情况。

3 基于盲数的强度应力时变可靠度计算模型与程序

假设机械结构承受的载荷和结构的强度分别服

从式(1)所述的随机过程,设当前时刻 $t = 0$,则由上分析可知,在未来时刻 T 时,作用在结构上的载荷和结构强度的对数分别服从一个正态分布

$$\ln W_T \sim \varphi \left[\ln W_0 + \left(\mu_w - \frac{\omega_w^2}{2} \right) T, \omega_w \sqrt{T} \right] \quad (8)$$

$$\ln \delta_T \sim \varphi \left[\ln \delta_0 + \left(\mu_\delta - \frac{\omega_\delta^2}{2} \right) T, \omega_\delta \sqrt{T} \right] \quad (9)$$

本文主要考虑载荷和强度的时变特性对结构可靠性的影响,故将载荷和强度考虑为两个独立的随机过程,而将几何尺寸等参数看作随机变量(服从正态分布或其他分布),即,在未来某个时刻强度、载荷及几何尺寸等随机量的分布类型及分布参数为已知的,可按随机变量的盲数化规则把它们离散整理成各种盲数,然后按照盲数的运算法则分别计算出此时盲数应力 $\tilde{\sigma}_T$ 和盲数强度 $\tilde{\delta}_T$,则定义此刻的盲数可靠度为

$$\tilde{R}(T) = P(\tilde{\delta}_T > \tilde{\sigma}_T) = P\left(\frac{\tilde{\delta}_T}{\tilde{\sigma}_T} > 1\right) \quad (10)$$

盲数化的强度-应力模型如图 1 左侧所示。

对于这种在同一模型里存在两种以上不同分布类型且各种分布类型间要进行多次运算的复杂可靠度计算,若采用传统方法来计算则十分繁琐甚至可能无法求解,而盲数求解方法的应用则使这种问题迎刃而解,盲数的应用还可使几何尺寸等变量的统计值不仅仅来自拟合好的典型分布,还可以来自实际测量的数据,这样可有效减少因近似拟合或由拟合过程中出现的误差而带来的可靠度计算误差,从而使计算更加贴近客观实际。

复杂可靠度的盲数化强度-应力模型及盲数化结果如图 1 所示,该图为文献[8]算例 7-8 的计算结果,盲数计算结果 86.184 289% 与文献中的传统

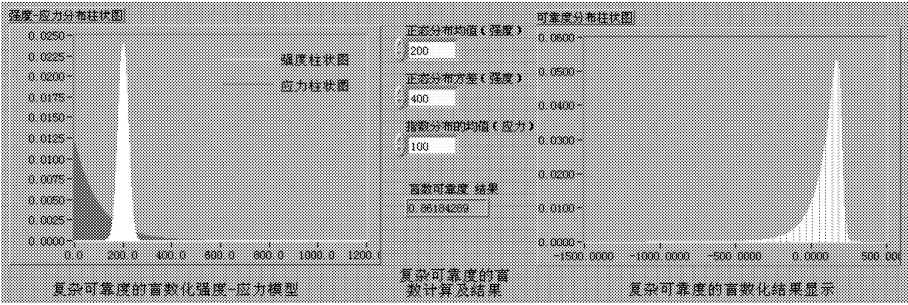


图 1 复杂可靠度的盲数化强度-应力模型及盲数计算结果

Fig.1 Stress-strength interference model and the reliability processed by the blind number

方法计算结果 86.194% 非常接近,该算例的计算证明了可靠度盲数化计算思想的正确性,所以,该盲数化方法可用来求解复杂的可靠度计算模型。基于上述时变可靠性计算模型,根据复杂可靠度的盲数化计算方法,在 LabVIEW 平台下编写了基于盲数理论的时变可靠度计算程序。由于盲数在实际计算过程中阶数有急剧增加的趋势,为了减少计算量,在程序实现中进行了降阶处理。另外对小可靠度区间也进行了必要的合并处理,LabVIEW 时变可靠度盲数计算总程序如图 2 所示。

4 基于盲数的时变可靠性计算实例

以受集中载荷 W 作用的承载式重型车架(可简化为简支梁)为例,其为焊接工字型梁,将作用在结构上的载荷 W 和结构强度 δ 考虑为随机过程,跨度 l 和载荷作用点位置 a 考虑为随机变量。载荷和强度的 200 个历史观测数据如图 3 所示,观测点的间隔相等,此数据由 LabVIEW 软件随机产生,假设第 200 个观测点的数据为最近一次的数据(即最后观测值),此时载荷和强度值为: $W_0 = 319\,682.112\,6\,\text{N}$,

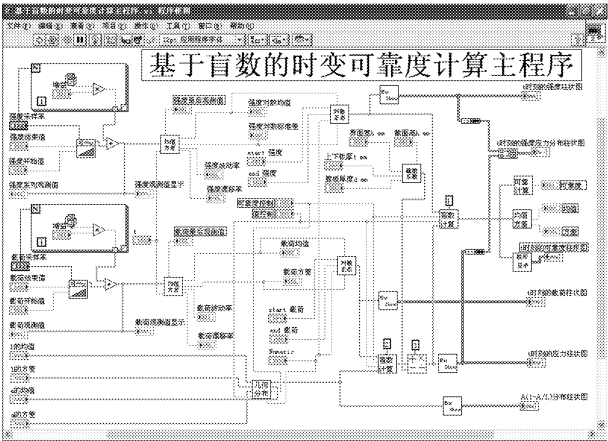


图 2 时变可靠性盲数计算程序总代码图

Fig.2 Diagram of time-dependent reliability computing-program based on blind number

$\delta_0 = 643.611\,7\,\text{MPa}$;跨距 l 和作用点与车架前端的距离 a (单位 mm) 分别服从正态分布 $l \sim N(13\,090, 4.234^2)$, $a \sim N(8\,450, 3.745^2)$;车架截面尺寸为:高 $h = 500\,\text{mm}$,宽 $b = 150\,\text{mm}$,上下板厚 $c = 20\,\text{mm}$,腹板厚 $d = 10\,\text{mm}$;分别估算从最近一个观测点开始未来第 200 个、400 个观测点时结构可靠度 $R(200)$ 、

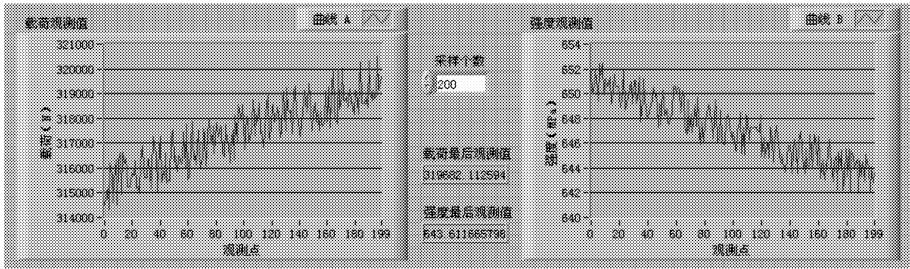


图 3 载荷及强度过去 200 个观测点的历史数据
Fig. 3 History data of load and strength

$R(400)$ 的值。

将图 3 的数据代入式 (6) 和式 (7) 可以分别得到载荷和强度的漂移率和波动率,将 W_0, δ_0 、对应漂移率和波动率、 $T=200$ 代入到式 (8) 和式 (9), 可以分别得到载荷和强度在时刻 $T=200$ 时的对数正态分布参数,且跨度 l 和力作用点位置 a 的分布类型和分布参数已知,梁的最大应力为

$$S_{beam} = \frac{6hWa(l-a)}{l[bh^3 - (b-d)(h-2c)^3]}$$

将其分别盲数化后并编制可靠度计算程序 (如图 2 所示), 程序计算结果为: $R(200) = P(\tilde{\delta}_T > \tilde{\sigma}_T) = 98.828\%$ 。其强度-应力及可靠度盲数化分布如图 4 所示。同理可得 $R(400) = 96.387\%$ 。

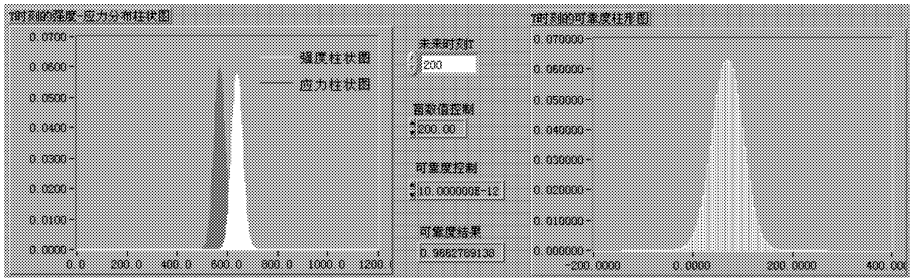


图 4 未来第 200 个观测点的强度-应力及可靠度盲数化分布图
Fig. 4 Stress-strength interference model and the reliability at the 200th observation point in future

5 结束语

将更为一般的随机过程应用于机械结构的时变不确定性特性分析中,把盲数理论应用于时变可靠性的复杂计算中,建立了基于盲数理论的机械结构时变可靠度计算模型,基于 LabVIEW 平台编写了该复杂模型的计算程序,并用该程序求解

了某机械结构的时变可靠度。结果表明:盲数作为一种数字化、离散化的处理工具,为这种复杂可靠度模型的求解提供了一种简单而高效的计算方法,同时,该计算方法可以通过对结构的载荷、强度等时变随机量观测值 (或时变曲线) 的分析来快速预知结构未来的可靠性,即可快速求得结构可靠度随时间变化的曲线。

参 考 文 献

1 Ditlevsen O. Stochastic model for joint wave and wind loads on offshore structures[J]. Structural Safety, 2002, 24(2~4): 139~163.

2 Li J P, Thompson G. A method to take account of inhomogeneity in mechanical component reliability calculations[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005, 54(1):159~168.

3 Jayaram J S R, Girish T. Reliability prediction through degradation data modeling using a quasi-likelihood approach[C]// Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2005 Proceedings (International Reliability Physics Symposium Proceedings), 2005:193~199.

4 Huang W, Ronald G A. A generalized SSI reliability model considering stochastic loading and strength aging degradation[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2004, 53(1):77~82.

5 王光远. 未确知信息及其数学处理[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报,1990,5(4):1~10.

Wang Guangyuan. Uncertain information and its mathematical dealing with [J]. Journal of Harbin institute of Civil Engineering and Architecture, 1990, 5(4): 1~10. (in Chinese)

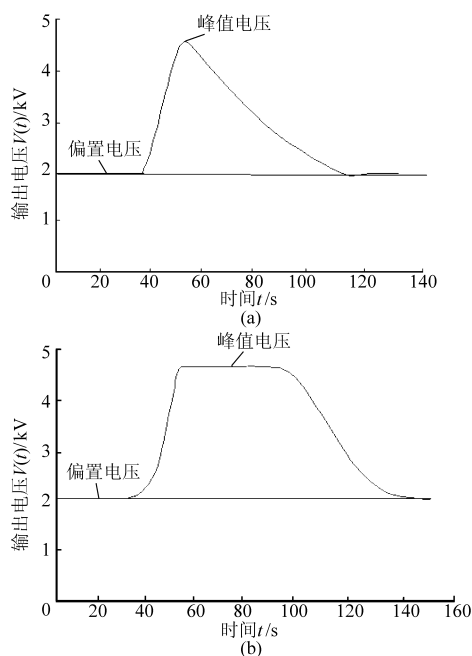


图 6 介电弹性体薄膜发电过程

Fig.6 Generation process of dielectric elastomer

(a) 较小泄放电阻 (b) 较大泄放电阻

在一个平台。平台曲线表明:介电弹性体薄膜收缩到达场维持期,电场场压使收缩进程放慢,此时只有电荷泄放之后收缩过程才能继续。这个结果一方面证实了场维持期的存在,同时也可证实介电弹性体薄膜两种工作模式的转换过程。

依据以上发电周期、即伸展与收缩的交替过程分析,电能存储的时机对发挥材料的最大潜能、获得最大电能转换效率是非常重要的。在介电弹性体薄膜下一个转换周期的伸展之前,应将电能转移。否则,介电弹性体材料将以驱动器模式消耗机-电转换获得的电能,减小发电的比能量及转换效率。

5 结束语

分析了介电弹性体材料的电能转换过程,通过仿真及实验的方式,验证了介电弹性体材料的可变电容的发电机理。为了充分发挥介电弹性体材料的发电性能,提高材料的机-电耦合效率至关重要,关键问题涉及薄膜材料的机械模型和电气边界条件等。本文为进一步的研究工作打下了基础。

参 考 文 献

- 1 Bar-Cohen Y. Electroactive polymers(EAP) actuators as artificial muscles-reality, potential and challenge[M]. Washington: SPIE Press, 2001.
- 2 Penglin Niu, Patrick Chapman, Raziel Riemer, et al. Evaluation of motions and actuation methods for biomechanical energy harvesting[C] // 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004, 3: 2 100 ~ 2 106.
- 3 Ron Pelrine, Roy D Kornbluh, Joseph Eckerle, et al. Dielectric elastomers: generator mode fundamentals and applications [C] // Yoseph Bar-Cohen. Smart Structures and Materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices: Proceedings of SPIE, 2001, 4329: 148 ~ 156.
- 4 Liu Y, Ren K, Hofmann H F, et al. Electrostrictive polymer for mechanical energy harvesting[C] // Yoseph Bar-Cohen. Smart Structures and Materials 2004: Electroactive Polymer Actuators and Devices: Proceedings of SPIE, 2004, 5358: 17 ~ 18.
- 5 Moretti P M. Tension in fluttering flags[C] // 23rd Oklahoma AIAA/ASME Symposium, University of Oklahoma, Norman, 2003.
- 6 Landau L D, Lifshitz E M. Electrodynamics of continuous media[M]. Oxford: Pergamon Press Ltd., 1970.
- 7 ANSI/IEEE Std 176 - 1987. IEEE standard on piezoelectricity[S]. New York: IEEE, 1988.

(上接第 213 页)

- 6 刘开第,吴和琴,庞彦军,等. 不确定性信息数学处理及应用[M]. 北京:科学出版社,1999:163 ~ 173.
- 7 石博强,肖成勇. 系统不确定性的数值计算方法[J]. 北京科技大学学报,2003,25(4): 374 ~ 376.
Shi Boqiang, Xiao Chengyong. Numerical calculation of system uncertainty[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2003, 25(4): 374 ~ 376. (in Chinese)
- 8 刘维信. 机械可靠性设计[M]. 北京:清华大学出版社,1996: 169 ~ 171.