

DOI: 10.3901/JME.2010.14.189

具有随机退化特性的柱塞泵性能可靠性分析*

马纪明 詹晓燕

(北京航空航天大学可靠性与系统工程学院 北京 100191)

摘要: 对于存在性能退化的系统, 以性能指标作为评价可靠度的判据具有实际的工程意义。基于系统组元退化的机理及性能退化的过程, 阐述柱塞泵的性能可靠性分析方法, 该方法综合路径追迹法注重性能退化机理和图解分析法注重退化过程的优点。根据柱塞泵的流量响应面, 对影响柱塞泵流量的组元参数及其退化路径进行分析。受内因(设计参数)和外因(环境、负载)不确定性影响, 柱塞泵组元的退化路径具有随机性, 这也导致作为柱塞泵性能可靠性判据的流量特性的退化具有随机性。根据柱塞泵性能可靠性判据和集理论, 给出柱塞泵性能可靠性的解析方法, 并基于一种高效的 Monte-Carlo 仿真方法得到柱塞泵的性能可靠度的累计分布函数曲线。提出的柱塞泵性能可靠性分析方法以性能为判据, 综合内外因素对组元退化轨迹的影响, 并考虑到了性能退化的随机性, 能够克服传统基于二元逻辑的可靠性分析方法的不足, 可以推广应用与其他存在性能退化的复杂系统中。

关键词: 柱塞泵 性能可靠性 退化 机理 过程

中图分类号: TB114.3

Performance Reliability Analysis of a Piston Pump Affected by Random Degradation

MA Jiming ZHAN Xiaoyan

(Department of System Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract: Taking performance indexes as reliability criterion for systems with performance degradation has practical engineering significance. A performance reliability analysis method based on component regressive mechanism and performance degradation process is presented, which integrates the advantages of path tracing methods and graphical methods. The response surface of the piston pump flow rate is created, and the parameters of the variables and their regressive path are analyzed simultaneously. The degradation path of the component parameter has some randomness caused by the uncertainties of the internal and external factors, this causes the degradation of flow, which is taken as reliability criterion for piston pump performance, also to have randomness. Based on the performance reliability criterion of piston pump and the set theory, the analytical method for the performance reliability of piston pump is given. The cumulative distribution function (CDF) curve of piston pump performance reliability is obtained on the basis of a high-efficiency Monte-Carlo simulation method. The developed method consider the random influence of internal and external uncertainties, it can overcome the disadvantage of the traditional reliability analysis method, and can be popularized and applied in other complex systems with performance degradation.

Key words: Piston pump Performance reliability Degradation Mechanism Process

0 前言

故障通常表现为硬故障和软故障两种形式, 系统功能丧失则表明发生了硬故障, 如果系统出现降级但仍具备设计功能, 则称之为发生了软故障^[1]。

传统可靠性分析方法, 如可靠性框图(Reliability block diagram, RBD), 故障树分析(Fault tree analysis, FTA), 故障模式与影响分析(Failure mode and effects analysis, FMEA)等, 以二元逻辑和概率方法为基础, 预测产品(系统)的可靠性, 没有定量考虑系统随机因素引起的软故障导致的不可靠问题^[2]。在这种理论框架下, 可靠性研究存在两个问题: 一是性能设计与可靠性设计互相脱节, 不能实

* 中央高校基本科研业务费专项资金和国防预研基金资助项目。
20091208 收到初稿, 20100310 收到修改稿

现性能与可靠性的综合设计优化^[3]；二是忽略了元件性能降级、系统部分失效及使用环境等不确定因素对系统性能的影响，由此建立的可靠性分析模型与实际情况存在较大差异，具有不合理性。

基于性能降级特征进行可靠性分析，其优点在于考虑到了系统失效的机理，而不是单纯的通过统计失效的概率进行可靠性的评价^[4]。常用的方法有两种：一种叫路径追迹法；另一种是图解分析法或集理论方法。SON 等^[5-6]在分析可信度及性能可靠性时，基于路径追迹法分析性能参数退化的轨迹。CHANG 等^[7]对嵌入式系统性能进行评价，LU 等^[8]根据退化参数分析失效模型，也是基于路径追迹法。在 HUANG 等^[9-12]基于性能退化数据的可靠性分析与评价方法研究中，由于不能准确描述参数的退化机理和轨迹，可靠性模型的建立是基于图解分析方法完成。

路径追迹法须已知元部件或系统性能降级的机理，也就是性能降级特征与时间的函数关系，然后通过具体判据进行可靠性的动态分析。性能降级路径通常描述为时间的函数，并且包含有常量系数或随机变量系数，对其中随机变量系统的统计特征分析也是需要重点研究的内容。图解分析法是一种所谓的“黑箱”分析方法，通过对各个时间点性能数据的观测和统计归纳得到性能降级特征。包括两个步骤：① 估计每个时刻的性能分布特征参数；② 拟合参数分布与时间的函数，所以这种方法需要大量的观测数据为基础。

液压柱塞泵是一种典型的性能降级的系统。受磨损、温度、负载等环境环境因素的影响，其元部件的特征参数(柱塞间隙、弹簧刚度、阻尼等)会出现退化，并且这种退化最终导致柱塞泵的主要性能指标—输出流量发生降级。由于导致柱塞泵元部件退化的环境、负载等因素具有不确定性，所以元部件的退化轨迹也具有一定的随机性。本文对柱塞泵性能可靠性的分析综合了路径追迹法和图解分析法的优点，在已知元部件降级路径的基础上，对路径函数中的具有不同随机分布特征的系数进行状态空间转换，在标准正态空间中进行统一处理。而对柱塞泵的流量特性分析是基于图解分析的技术思路，通过仿真分析得到性能可靠度的累计分布函数(Cumulative density function, CDF)。

该方法综合路径追迹法注重性能退化机理和图解分析法注重退化过程的优点，将柱塞泵的流量作为其性能退化量，基于参数退化的轨迹分析柱塞泵性能降级特征，并借助于 Monte Carlo 仿真方法，实现其性能可靠性评估。该方法能够克服传统基于

二元逻辑的可靠性分析方法的不足，可以推广应用于其他存在性能退化的复杂系统中。

1 性能可靠性分析方法

1.1 概述

图 1 是具有随机退化特征产品或系统的性能可靠性分析方案。影响系统可靠性的各种内外扰动因素 $c(c_1, c_2, \dots, c_r)$ 可以用随机过程或具有固定分布特征的随机变量表示(图 2a)。由于生产加工过程中的不确定性，系统设计参数 $v(v_1, v_2, \dots, v_m)$ 也是具有某种分布特征的随机变量(图 2b)。系统状态变量 $x(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 是 c 和 v 的函数，在使用过程中，系统状态会发生退化，并且由于 c 和 v 都具有一定的随机性，所以状态 x 的退化路径也具有随机性(图 2b)。系统输出性能指标 $z(z_1, z_2, \dots, z_n)$ 由状态变量确定，输出 $z_i(t)$ 是状态变量 x 的函数， x 的随机性也导致 z 具有不确定性(图 2c)。针对具体系统，每项输出 $z_i(t)$ 都有对应的上限(Upper specification level, USL)和下限(Lower specification level, LSL)要求(图 2c)，根据系统输出特性的退化特征和具体判据，可以得到动态可靠度水平 $R(t)$ (图 2d)。

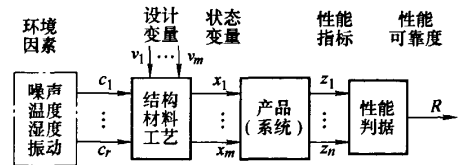


图 1 性能可靠性分析方案

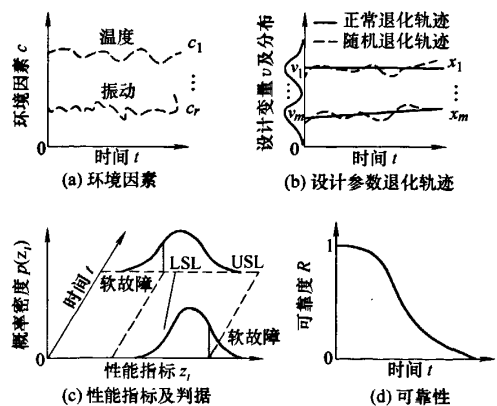


图 2 随机因素及可靠性描述示意

1.2 性能可靠性的解析分析方法

图 1 中，系统状态 x 是时间 t 的函数，并且受环境因素 c 和设计参数 v 的影响，退化轨迹可以描述为

$$x_i(t) = f_i(c, v, t) \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (1)$$

式中 $c=(c_1, c_2, \dots, c_r)$ 表示系统内部或环境的不确定因素, $v=(v_1, v_2, \dots, v_m)$ 表示设计参数, 都是具有随机性的变量。

在这里, c 和 v 具有固定分布特征。对矢量 (v, c) 进行 Rosenblatt 变换^[13], 转化为独立标准正态矢量 (p, u) 。其中 $p=(p_v, p_c)$, 为分布特征参数; $u=(u_v, u_c)$, 为转换之后的特征矢量。式(1)可以转化为另外一种形式

$$x_i(t)=f_i(c, v, t)=h_i(p, u, t) \quad i=1, 2, \dots, k \quad (2)$$

举例说明, 假设状态变量 x 的退化路径为

$$x=f(v, c, t)=v+ct$$

并假设 v, c 互相独立。

设计参数 v 服从正态分布, 环境变量 c 服从对数正态分布。

$$v \sim N(\mu_1, \sigma_1^2) \lg c \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$$

分布特征参数

$$p=[p_v, p_c]=[\mu_1, \sigma_1; \mu_2, \sigma_2]$$

经过 Rosenblatt 变换

$$u=[u_1, u_2]=T[v, c]$$

u_1, u_2 服从标准正态分布, T 表示 Rosenblatt 变换。则

$$x=h(p, u, t)=(\mu_1+\sigma_1 u_1)+\exp(\mu_2+\sigma_2 u_2)t$$

图 1 中的性能指标 $z(t)$ 是状态变量 X 的函数

$$z(t)=z(x, t)$$

由式(2)可以定义

$$z(t)=z(x, t)=z(p, u, t) \quad (3)$$

定义极限状态函数

$$g(x, t)=z(p, u, t)-\zeta_L \quad (4)$$

ζ_L 是保证系统可靠的性能指标下限要求。性能可靠可以定义为在 t 时刻之前, 系统的性能指标满足判据要求 $g(x, t)>0$, 基于此定义, 性能可靠度可以表示为

$$R_T(t)=1-F_T(t)=\Pr\{g(x)>0, \exists T \in [0, t]\} = \Pr\{g(p, u, t)>0, \exists T \in [0, t]\} \quad (5)$$

式中 $F_T(t)$ 为 t 时刻性能不可靠的概率。

把 t 分成 L 个步长为 τ 的时间区间, $t_L=L\tau$, 在 t_L 时间范围内系统累计失效概率函数

$$F(t_L)=\Pr\left\{\bigcup_{i=0}^L g(p, u, t_i) \leq 0\right\} \quad (6)$$

t_i 时刻的瞬时失效概率

$$\Pr\{g(p, u, t_i) \leq 0\} = \int_{g(p, u, t_i) \leq 0} f_U(u) du \quad (7)$$

式中 $f_U(u)$ 为状态空间 u 的分布概率密度函数。

根据极限状态函数构建可靠度函数时, 由于设计参数 v 随时间退化, 极限状态函数 $g(x, t)$ 同样随

时间变化。通过 Rosenblatt 转换就可以保证时间变化时, 极限状态面随时间变换而变换, 但是概率空间 $f_U(u)$ 保持不变, 如图 3 所示。

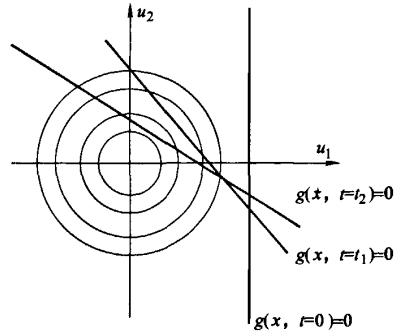


图 3 极限状态函数的退化轨迹

1.3 性能可靠性的仿真分析方法

大多数工程实际中, 性能参数 $z(t)$ 的解析表达式比较复杂, 通过式(7)得到性能可靠度的难度很大。所以本文通过 Monte-Carlo 仿真方法分析系统的性能可靠性。具体流程如下所述。

(1) 构造函数。基于(4)定义的极限状态函数, 构造函数如下

$$\phi_1(u, t_i) = \begin{cases} 1 & g(p, u, t_i) \leq 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$\phi_2(u, t_i) = \begin{cases} 1 & g(p, u, t_i) \text{ 或 } g(p, u, t_{i+1}) \leq 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

(2) 在 t_i 时刻仿真 N 次, 系统性能不符合指标要求的次数为

$$N_f(t_i) = \sum_{k=1}^N \phi_1(u, t_i) \quad (10)$$

在 t_i 和 t_{i+1} 时刻系统性能不符合指标要求的次数

$$N_f(t_i, t_{i+1}) = \sum_{k=1}^N \phi_2(u, t_i) \quad (11)$$

在 t_i 时刻系统不可靠度为

$$\Delta F(t_i) = \frac{N_f(t_i, t_{i+1}) - N_f(t_i)}{N} \quad (12)$$

(3) 假设在 0 时刻, 系统性能完全可靠, 则 t_L 时刻系统性能失效的累计分布函数

$$F_T(t_L) = \sum_{i=0}^{L-1} \Delta F(t_i) \quad (13)$$

2 柱塞泵性能可靠性分析

本文所研究的液压柱塞泵用于无线随钻脉冲发生器, 其输出流量特性直接影响到无线随钻脉冲

发生器的性能，柱塞泵结构如图 4 所示。影响流量的因素很多，比如柱塞间隙、柱塞阻尼、弹簧刚度和预紧力、负载压力、入口单向阀钢球与阀座的间隙、出口单向阀钢球与阀座的间隙等。

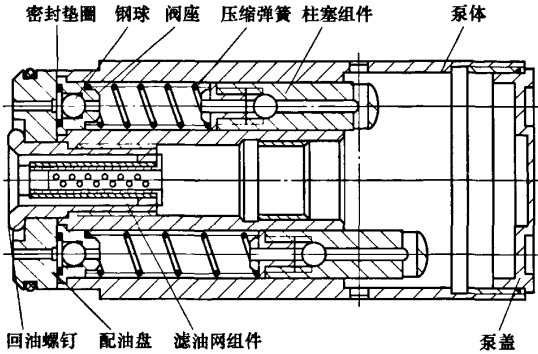


图 4 柱塞泵结构示意图

2.1 柱塞泵流量特性分析

柱塞泵的理论流量

$$Q = n_z R_s D_f \tan \gamma F_z \times 10^{-3} = 6.27 \times 10^{-4} R_s \quad (14)$$

实际流量受泄漏、压缩、阻尼等因素的影响，与理想流量会存在较大的误差，根据试验和仿真数据，使用响应面分析方法，得到柱塞泵的实际流量方程为

$$Q = 6.27 \times 10^{-4} R_s - 0.394 99 \eta - 2.241 57 \times 10^{-4} \eta n - 5.245 57 \times 10^{-5} \times \delta P_L - 3.891 61 \times 10^{-6} n P_L - 0.085 106 \eta^2 - 1.173 7 \times 10^{-5} \delta^2 - 8.333 27 \times 10^{-9} R_s^2 - 0.037 899 \quad (15)$$

柱塞泵参数及不确定参数的分布特征见下表。

表 柱塞泵参数

序号	参数	数值
1	柱塞泵流量 $Q/(L \cdot \text{min}^{-1})$	—
2	柱塞数 n_z	6
3	分布圆直径 D_f/cm	2
4	斜盘倾角 $\gamma/(\circ)$	9
5	转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	$\sim N(3\ 600, 100^2)$
6	柱塞面积 F_z/cm^2	0.33
7	柱塞间隙 $\delta/\mu\text{m}$	—
8	出口阀开度 η/mm	—
9	出口压力 p_L/MPa	$\sim U(1, 7)$
10	工况条件系数 $1\ K_1/(\mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$	$\sim N(0.25, 0.05^2)$
11	柱塞间隙初值 $\delta_0/\mu\text{m}$	$\sim N(8, 2^2)$
12	工况条件系数 $2\ K_2/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	$\sim N(1.5 \times 10^{-3}, (1.5 \times 10^{-4})^2)$
13	出口阀开度初值 η_0/mm	$\sim N(0.2, 0.05^2)$
14	柱塞泵运行时间 t/h	—

2.2 元部件性能退化轨迹

经过灵敏度分析，发现柱塞泵的流量特性与柱

塞间隙 δ 、出口阀开度 η 密切相关，所以本文重点研究这两个设计参数的退化特性。

定义状态变量

$$x = (x_1, x_2) = (\delta, \eta)$$

根据试验数据和工程经验，得到柱塞间隙的退化轨迹为

$$x_1(t) = \delta(t) = f_1(c, v, t) = \delta_0 + K_1 t \quad (16)$$

$$x_2(t) = \eta(t) = f_2(c, v, t) = \eta_0 + K_2 t \quad (17)$$

经过 Rosenblatt 变换，可得

$$x(t) = f(c, v, t) = h(p, u, t) \quad (18)$$

式中， p 代表 $K_1, K_2, \eta_0, \delta_0$ 的分布特征参数， $u=(u_1, u_2, u_3, u_4)$ 为标准正态空间。

2.3 定义极限状态函数

根据设计要求，在柱塞泵转速 $n=3\ 600\ \text{r/min}$ 时，定义 $Q>1.45\ \text{L/min}$ 为性能可靠，所以 $\zeta_L=1.45$ ，定义极限状态函数

$$g(x(t)) = Q - \zeta_L \quad (19)$$

2.4 仿真分析

无线脉冲发生器的设计寿命为 200 h，设置仿真时间 $T_L=300\ \text{h}$ ，步长 $\tau=0.5\ \text{h}$ ，把整个仿真时间分成 600 个仿真区间， $L=600$ ，每个时刻仿真次数 $N=10\ 000$ 。

根据式(5)、(8)~(13)，得到柱塞泵性能可靠度 $R(t)$ 及 t 时刻的失效概率 $F(t)$ 的累计分布函数曲线如图 5 所示。

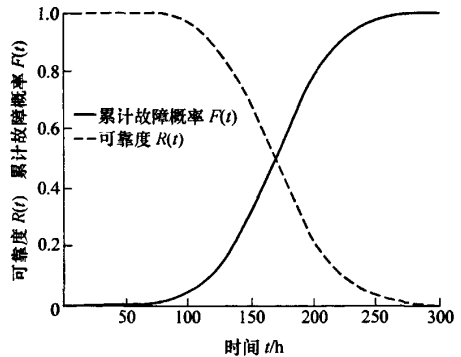


图 5 柱塞泵可靠度的累计分布函数

由于柱塞泵的设计参数存在退化，所以柱塞泵的性能(输出流量)也存在一个退化的轨迹，并且这个轨迹由于各种不确定因素的存在，同样也具有随机性。图 5 所示的柱塞泵性能可靠度曲线 $R(t)$ 就是在考虑各种随机因素的前提下，以流量指标作为可靠性判据情况下得到的。从图 5 中也可以看出，由于间隙和出口阀开度的退化，可靠性在逐渐降低。

通过仿真分析方法，得到的柱塞泵可靠度的精

度同仿真步长 τ (各个时刻之间的时间间隔长度)、每个时刻点的仿真次数 N 密切相关。并且步长越短、仿真次数越多, 结果的精度也就越高。关于误差的分析, 可以参考文献[5]。

3 结论

(1) 柱塞泵的流量特性受元部件设计参数退化的影响, 存在降级的问题。并且这种降级会导致软故障的发生。

(2) 以柱塞泵性能指标作为可靠性判据, 基于元部件参数退化的机理和性能降级的过程, 分析其性能可靠性具有现实的工程意义。

(3) 论文提出的性能可靠性分析方法综合路径追迹法和图解分析方法的优点, 对元部件设计参数及性能退化过程中的不确定因素处理方法进行了详细阐述, 给出了判断系统性能可靠性的分析方法, 并通过仿真对柱塞泵寿命周期内的性能可靠度进行了分析。

本项研究是基于元部件设计参数的退化机理开展的性能可靠性分析工作, 其中了解元部件设计参数退化的机理是进行性能可靠性分析工作的基础。同时, 系统的性能指标输出同状态变量之间的函数关系, 也是开展分析工作的前提条件。对于非线性复杂系统, 性能指标同状态变量之间的显性函数关系往往很难得到, 这也需要通过响应面技术等近似方法, 在前期开展性能分析的工作。通过仿真分析获取可靠性数据, 也需要设计合适的步长和仿真次数以保证分析结果具有较高的精度水平。柱塞泵性能可靠性只是通过单独的流量指标判断, 然而复杂系统的性能往往是由多元性能参数综合描述, 考虑这些参数之间的相关性以及对可靠性分析结果的综合影响, 是有待进一步研究的内容。

参 考 文 献

- [1] MEEKER W Q, ESCOBAR L A. Reliability: The other dimension of quality [J]. *Quality Technology & Quantitative Management*, 2004, 1(1): 1-25.
- [2] 尹晓伟, 钱文学, 谢里阳. 基于贝叶斯网络的多状态系统可靠性建模与评估[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(2): 206-212.
YIN Xiaowei, QIAN Wenxue, XIE Liyang. Multi-state system reliability modeling and assessment based on Bayesian networks [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(2): 206-212.
- [3] ZENG Shengkui, MA Jiming, LI Feixia. Design optimization considering performance and reliability [C]//*Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium 2009, RAMS 2009 Annual*, January 26-29,

2009. Fort Worth, Texas: 2009: 201-205.
- [4] ZUO Ming, JIANG Renyan, RICHARD C M Y. Approaches for reliability modeling of continuous-state devices[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1999, 48(1): 9-18.
- [5] SON Y K, SAVAGE G J. A new sample-based approach to predict system performance reliability [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2008, 57(2): 322-330.
- [6] SAVAGE G J, SON Y K. Dependabilitybased design optimization of degrading engineering system[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2009, 131(1): 011002-1-011002-10.
- [7] CHANG N, LEE K B, JEN C W. Trace-path analysis and performance estimation for multimedia application in embedded system[J]. *ISCAS*, 2004(2): 129-132.
- [8] LU C J, PARD J, YANG Q. Statistical inference of a time to failure distribution derived from linear degradation data [J]. *Technometrics*, 1997, 39: 391-400.
- [9] HUANG Wei, DUANE L D. An alternative degradation reliability modeling approach using maximum likelihood estimation [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2005, 54(2): 310-317.
- [10] YANG Kai, XUE Jianan. Continuous state reliability analysis[C]// *Reliability and Maintainability Symposium, 1996 Proceedings, 'International Symposium on Product Quality and Integrity'*, Annual. January 22-25 1996, Las Vegas, NV, 1996: 251-257.
- [11] 张永强, 刘琦, 周经纶. 基于性能退化数据的可靠性评定方法研究[J]. *飞行器测控学报*, 2005, 24(5): 54-58.
ZHANG Yongqiang, LIU Qi, ZHOU Jinglun. Reliability evaluation based on performance degradation data [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2005, 24(5): 54-58.
- [12] 赵建印. 基于性能退化数据的可靠性建模与应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
ZHAO Jianyin. Study on reliability modeling and applications based on performance degradation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [13] ROSENBLATT M. Remarks on a multivariate transformation[J]. *Annual of Mathematical Statistics*, 1952, 23: 470-472.
- [14] 陶建峰, 王少萍, 焦宗夏. 考虑性能的三余度舵机系统可靠性分析[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(1): 38-41.
TAO Jianfeng, WANG Shaoping, JIAO Zongxia. Reliability analysis with performance for triple redundant actuator[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(1): 38-41.

作者简介: 马纪明(通信作者), 男, 1979年出生, 博士。主要研究方向为机电系统性能可靠性、系统性能与可靠性协同设计。

Email: Jiming.ma@buaa.edu.cn

詹晓燕, 女, 1986年出生。主要研究方向为性能可靠性分析方法。

Email: zhan_xiaoyan@yeah.net

具有随机退化特性的柱塞泵性能可靠性分析

作者: [马纪明](#), [詹晓燕](#), [MA Jiming](#), [ZHAN Xiaoyan](#)
作者单位: [北京航空航天大学可靠性与系统工程学院](#), 北京, 100191
刊名: [机械工程学报](#) [ISTIC](#) [EI](#) [PKU](#)
英文刊名: [JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING](#)
年, 卷(期): 2010, 46(14)

参考文献(14条)

1. [ZUO Ming;JIANG Renyan;RICHARD C M Y Approaches for reliability modeling of continuous-state devices](#)[外文期刊] 1999(01)
2. [ZENG Shengkui;MA Jiming;LI Feixia Design optimization considering performance and reliability](#) 2009
3. [尹晓伟;钱文学;谢里阳 基于贝叶斯网络的多状态系统可靠性建模与评估](#)[期刊论文]-[机械工程学报](#) 2009(02)
4. [陶建峰;王少萍;焦宗夏 考虑性能的三冗余舵机系统可靠性分析](#)[期刊论文]-[系统仿真学报](#) 2004(01)
5. [HUANG Wei;DUANE L D An alternative degradation reliability modeling approach using maximum likelihood estimation](#)[外文期刊] 2005(02)
6. [LU C J;PARD J;YANG Q Statistical inference of a time to failure distribution derived from linear degradation data](#)[外文期刊] 1997
7. [CHANG N;LEE K B;JEN C W Trace-path analysis and performance estimation for multimedia application in embedded system](#) 2004(02)
8. [SAVAGE G J;SON Y K Dependabilitybased design optimization of degrading engineering system](#) 2009(01)
9. [SON Y K;SAVAGE G J A new sample-based approach to predict system performance reliability](#)[外文期刊] 2008(02)
10. [MEEKER W Q;ESCOBAR L A Reliability:The other dimension of quality](#) 2004(01)
11. [ROSENBLATT M Remarks on a multivariate transformation](#)[外文期刊] 1952
12. [赵建印 基于性能退化数据的可靠性建模与应用研究](#) 2005
13. [张永强;刘琦;周经纶 基于性能退化数据的可靠性评定方法研究](#)[期刊论文]-[飞行器测控学报](#) 2005(05)
14. [YANG Kai;XUE Jianan Continuous state reliability analysis](#) 1996

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jgxcb201014026.aspx