

随机因素作用下动态系统性能可靠性分析方法

马纪明, 詹晓燕, 曾声奎

(北京航空航天大学可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘要: 动态系统的性能可靠性受噪声、干扰等短周期因素和磨损、结构参数退化等长周期因素的综合影响, 并且这些影响因素大都是具有随机性的动态过程。首先阐述了动态系统及影响其性能可靠性的随机因素的描述方法; 然后分别介绍了短周期因素和长周期因素作用下的性能可靠性分析方法; 并综合这两种方法的优点, 提出一种综合考虑长短周期随机因素影响的动态系统性能可靠性分析方法。该方法综合考虑了长短周期随机因素的动态特性, 提出的仿真分析方法合理地实现了模型中的动态不确定因素, 具有更高的精度和仿真效率。最后, 通过舵机案例对提出的方法进行了验证。

关键词: 动态系统; 性能可靠性; 随机因素; 长周期; 短周期; 仿真

中图分类号: TB 114. 3

文献标志码: A

DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-506X. 2011. 04. 45

Performance reliability analysis method of dynamic systems under stochastic processes

MA Ji-ming, ZHAN Xiao-yan, ZENG Sheng-kui

(School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Performance reliability of dynamic systems is influenced by both the long term factors and short term factors, and most of which are dynamic processes with stochastic characteristics. This paper presents a performance reliability analysis method of dynamic systems considering all kinds of random factors. Firstly, the expressing method of the dynamic system and random factors is introduced, then the performance reliability analysis methods under the influence of short term and long term factors are described respectively. Integrating the advantages of the two methods, a performance reliability evaluation method based on the simulation model is developed. Comparing with the traditional theory, the presented method takes the dynamic characteristics of the uncertainties into account, and treats them as the stochastic processes and not the random variables, which delivers much more practicability for this method. Furthermore, the simulation-based method gives a reasonable description of uncertainties for the dynamic system, and has a higher efficiency and precision. Finally, a typical dynamic system, flight actuator system, is selected as the study case, results show that this method is feasible.

Keywords: dynamic system; performance reliability; stochastic characteristic; long term; short term; simulation

0 引言

对于动态系统,其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,如果系统出现性能降级但仍具备设计功能,则称之为发生了软故障^[1]。传统的系统可靠性描述及分析方法,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 effect analysis, FMEA)等,以二元逻辑和概率方法为基础,预测产品(系统)硬故障引起的可靠性问题,没有从性能角度对系统的可靠性进行分析。动态可靠性框图(dynamic reliability block diagram, DRBD)、动态故障树(dynamic fault tree analysis, DFTA)、随机 Petri 网(stochastic Petri net, SPN)、Markov 链

等方法虽能够用于对动态系统进行可靠性分析,然而这些工具同传统方法类似,也是基于二元逻辑描述系统的故障行为,没有考虑性能波动对系统可靠性的影响^[2-5]。在这种理论框架下,使用传统可靠性分析方法对动态系统可靠性研究存在两个方面的问题:一是性能设计与可靠性设计互相脱节,不能实现性能与可靠性的综合设计优化^[6];二是忽略了噪声、结构参数的随机退化及使用环境等不确定因素对系统性能的影响,建立的可靠性分析模型具有不合理性。

动态系统的性能可靠性受噪声、干扰等短周期因素和磨损、结构参数退化等长周期因素的综合影响,并且这些影响因素大都是具有随机性的动态过程。如何考虑各种不确定因素对动态系统的性能与可靠性的影响,近期正逐渐成为研究的热点。

收稿日期:2010-03-10; 修回日期:2010-08-11。

基金项目:国防预研基金;中央高校基本科研业务费专项资金(YWF-10-02-081)资助课题

作者简介:马纪明(1979-),男,讲师,博士,主要研究方向为质量与可靠性工程、机电系统可靠性。E-mail:jiming.ma@buaa.edu.cn

短周期因素影响分析主要针对性能波动对可靠性的影响。文献[6]提出了一种综合考虑性能与可靠性的设计优化方法,对可靠性的评价就考虑到了系统中的各种内外不确定因素对性能的影响。文献[7]以四余度舵机为对象,分析了其部件发生一次故障、二次故障情况下的性能降级特性,并以性能指标为判据,对其可靠性进行分析评价。文献[8]针对容错系统,提出了一种性能可靠性的评价方法,主要考虑故障发生之后系统的性能降级,进而确定系统的可靠性。对系统可靠性的分析同样是基于二元逻辑定义元部件的状态,虽然动态描述了整个系统的故障行为,但在分析过程中没有考虑其他影响性能的不确定因素。

长周期因素影响分析主要针对系统性能降级引起的可靠性变化。大多数动态系统存在性能降级,由于受各种不确定因素影响,系统的性能降级路径也具有随机性。文献[9]利用试验得到产品的退化信息,提出了不假定退化轨道模型的评估方法,进而获得产品在各检测时刻的可靠度。文献[10]针对存在降级的系统,提出了一种高精度的性能可靠性仿真方法,仍然是考虑性能降级路径中的各种不确定影响因素,并以性能为判据判断其系统可靠性。文献[11]通过实时检测系统的性能降级数据,动态评价系统的可靠性,进而分析其剩余寿命。文献[12]基于传感器采集数据,对纳米器件的氧化引起的性能退化及可靠性进行了分析,提出了一种增进性能可靠性的方法。文献[13]评价系统可靠性时,认为影响可靠性的因素是动态的,但没有从性能角度加以评价。

以上文献针对存在性能降级的系统、容错系统及一些存在随机因素的系统的安全性分析方法进行了阐述。然而对于一个实际的动态系统来说,其性能可靠性受短周期因素、长周期因素和结构参数不确定性的综合影响,最终会导致其短周期和长周期性能与可靠性指标都会发生变化,并且这种变化具有一定的随机性。对动态系统的性能可靠性评价要综合考虑长周期性能指标(退化)和短周期性能指标(快速性、稳定性和准确性),单纯考虑某一种不确定性因素的作用是不合理的^[14]。通过本文的研究,解决动态系统中不确定因素的描述问题,以及提供一种解析或者仿真方法,分析各种随机因素对动态系统性能可靠性的影响,具有工程实际意义。

1 系统描述及性能可靠性影响因素

忽略非线性因素,一个存在噪声的动态系统描述如图 1 所示。

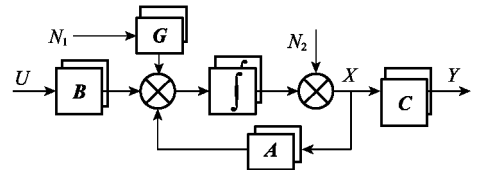


图 1 动态系统结构

A, B, C, G 是描述系统结构特征参数,由系统结构、组成及参数决定。实际系统受各种内外扰动因素的影响,用线性时变方程描述为

$$\begin{aligned} d\mathbf{X}(t)/dt &= \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}(t)U(t) + \mathbf{G}(t)N_1(t) \\ \mathbf{Y}(t) &= \mathbf{C}(t)\mathbf{X}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(t) &= (\mathbf{A}_0 - \xi_A(t)), \mathbf{B}(t) = (\mathbf{B}_0 - \xi_B(t)) \\ \mathbf{G}(t) &= (\mathbf{G}_0 - \xi_G(t)), \mathbf{C}(t) = (\mathbf{C}_0 - \xi_C(t)) \end{aligned}$$

对于图 1 描述的动态系统,有三种因素会引起输出 $\mathbf{Y}(t)$ 出现波动、降级,进而引起系统性能不可靠,分别为(1)输入和输出噪声 $N_1(t), N_2(t)$; (2)系统结构参数初值 $[\mathbf{A}_0, \mathbf{B}_0, \mathbf{C}_0, \mathbf{G}_0]$ 的不确定性; (3)参数退化 $[\xi_A(t), \xi_B(t), \xi_C(t), \xi_G(t)]$ 导致的系统参数变化。

动态系统的性能可靠性分析方法的技术路线如图 2 所示。对于动态系统,输入输出噪声 $N_1(t), N_2(t)$ 是随机过程(见图 2(b)),直接影响系统的输出性能。结构参数的初值 $[\mathbf{A}_0, \mathbf{B}_0, \mathbf{C}_0, \mathbf{G}_0]$ 是具有固定分布特征的随机量(见图 2(c)),这些不确定性会导致系统输出性能与设计要求的偏差。温度、振动等外部环境因素对系统的影响通过两种方式体现,一是这些环境因素直接影响系统的结构参数;另外一种是在存在结构参数退化的系统中,环境因素影响系统的结构、材料属性及加工工艺,进而间接影响系统结构参数的退化轨迹。本论文的研究中把环境因素对系统结构参数的影响统一表现为对系统结构参数的退化量的影响。在外部环境确定的系统中,结构参数的退化轨迹是固定的,然而影响系统性能的外部环境因素是动态的随机过程(见图 2(a)),这就导致结构参数的退化也具有随机性(见图 2(d))。本文研究的重点是分析环境、噪声影响下的动态系统性能指标 $\mathbf{Y}(t)$ 及其分布特征 $f(\mathbf{Y}, t)$,同时分析系统具有失效域值 \mathbf{Z} 时的失效概率密度函数 $f(t)$ 和 t 时刻的性能可靠度 $R(t)$ (见图 2(d))。

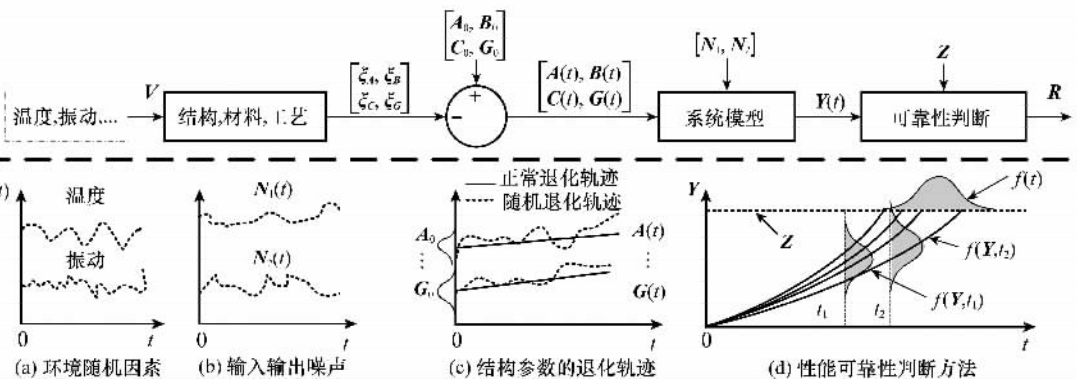


图 2 动态系统性能可靠性分析概念图

2 随机噪声作用下性能可靠性

传统的动态系统分析方法中,系统的输入都被认为是可以确切知道的时间函数。但是在许多实际的工程问题中,影响系统性能的噪声信号并不是十分确切肯定的,需要用表示随机过程的时间函数(随机函数)来描述。随机函数只能用某些统计的特征加以描述,通常用均值、均方差、相关函数和功率密度谱等作为一个随机函数的统计特征量。

假设动态系统的噪声 $N(t)$ 是平稳随机过程,在 t 时刻的均值为 $\overline{N(t)}$, 方差为 $\sigma_{N(t)}^2$ 。

假设系统(1)为线性系统,输出 $Y(t)$ 的均值

$$\overline{Y(t)} = F_{YU}(0) \overline{U(t)} + F_{YN_1}(0) \overline{N_1(t)} + F_{YN_2}(0) \overline{N_2(t)} \quad (2)$$

式中, $F_{YU}, F_{YN_1}, F_{YN_2}$ 分别为系统(1)的输出 $Y(t)$ 与输入 $U(t)$ 、噪声 $N_1(t), N_2(t)$ 之间的传递函数。

根据随机过程自相关函数和功率谱密度(power spectrum density, PSD)的定义^[15],输出的方差为

$$\sigma_Y^2 = R_Y(0) - (\overline{Y(t)})^2 = 2 \int_0^\infty \phi_Y(\omega) d\omega - (\overline{Y(t)})^2 \quad (3)$$

式中, $R_Y(\tau)$ 为 $Y(t)$ 的自相关函数; $\phi_Y(\omega)$ 为 $Y(t)$ 的功率谱密度。

定义输出 $Y(t)$ 大于失效域值 Z 时系统失效。则可以得到 t 时刻系统可靠度 $R(t)$ 。

$$R(t) = P\{Y(t) < Z\}$$

假设 $Y(t)$ 的一阶密度函数服从高斯分布,可以得到改进的高斯不等式为^[16]。

$$P\{|Y(t) - \overline{Y(t)}| \geq k\sigma_Y\} \cong e^{-\frac{1}{2}k^2} / (k\sqrt{2\pi}) \quad (4)$$

假设 $Y(t)$ 的分布函数具有对称性,并设 $k\sigma_Y = Z - \overline{Y}$, 可以得到可靠度

$$R(t) = 1 - F(t) \cong 1 - \frac{1}{2} \frac{e^{-\frac{1}{2}k^2}}{k\sqrt{2\pi}} \quad (5)$$

3 参数退化与性能可靠性

系统(1)的性能可靠性不但受噪声影响,同时结构参数的不确定性也会影响系统的性能输出,进而影响其性能可靠性。图 2 中,系统结构参数 $[A(t), B(t), C(t), G(t)]$ 是时间 t 的函数,由参数初值 $[A_0, B_0, C_0, G_0]$ 和 t 时刻系统结构参数的退化量 $[\xi_A(t), \xi_B(t), \xi_C(t), \xi_G(t)]$ 共同决定。由于退化量受环境及其他扰动因素影响,退化轨迹也具有随机性。退化轨迹可以描述为。

$$A(t) = f_1(\mathbf{V}, \mathbf{A}_0, t) \quad (6)$$

类似的

$$B(t) = f_2(\mathbf{V}, \mathbf{B}_0, t), C(t) = f_3(\mathbf{V}, \mathbf{C}_0, t),$$

$$G(t) = f_4(\mathbf{V}, \mathbf{G}_0, t)$$

式中, $\mathbf{V} = [v_1, v_2, \dots, v_r]$ 表示系统内部扰动因素,在时刻 t , 可以描述为具有确定分布特征的随机变量或者随机向量。

对式(6)中的 $[\mathbf{V}, \mathbf{A}_0]$ 进行 Rosenblatt 变换,转化为独立

标准正态向量 $[P_{VA}, U_{VA}]$ 。其中 $P_{VA} = [P_V, P_A]$ 为分布特征参数; $U_{VA} = [U_V, U_A]$ 为转换之后的特征向量。式(6)可以转化为另外一种形式^[17]

$$A(t) = f_1(\mathbf{V}, \mathbf{A}_0, t) = h_1(P_{VA}, U_{VA}, t) \quad (7)$$

类似

$$B(t) = h_2(P_{VB}, U_{VB}, t)$$

$$C(t) = h_3(P_{VC}, U_{VC}, t)$$

$$G(t) = h_4(P_{VG}, U_{VG}, t)$$

系统(1)的输出性能参数 $Y(t)$ 是结构参数 $[A, B, C, G]$ 和系统输入 U 的函数,对于固定输入的动态系统,其性能输出由结构参数确定,函数 y 描述系统结构与输出之间的函数关系。

$$Y(t) = y(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{G}, t) \quad (8)$$

由式(8),可以定义

$$Y(t) = y(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{G}, t) = y(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t) \quad (9)$$

式中, \mathbf{P} 分布特征参数, \mathbf{U} 为 Rosenblatt 转换之后的特征向量

$$\mathbf{P} = [P_{VA}, P_{VB}, P_{VC}, P_{VG}]$$

$$\mathbf{U} = [U_{VA}, U_{VB}, U_{VC}, U_{VG}]$$

定义极限状态函数

$$g(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t) = Y(t) - Z \quad (10)$$

Z 是系统性能可靠的性能指标失效域值,性能指标大于 Z 则定义为系统失效。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 $g(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t) < 0$, 基于此定义,性能可靠度可以表示为

$$R(t) = \Pr\{Y(t) < Z\} =$$

$$\int_0^Z f(\mathbf{Y}, t) d\mathbf{Y} = \int_{g(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t) \leq 0} f_U(u) du \quad (11)$$

式中, $f_U(u)$ 为状态空间 U 的概率密度函数。

4 可靠性分析方法

通过第 2 节所介绍的解析方法分析短周期因素作用下的系统性能可靠性时,要求影响性能可靠性的噪声因素是平稳过程,并且系统是线性时不变系统,同时系统输出性能特征参数具有对称性分布特征,然而在实际系统中,很难同时满足这些要求。

第 3 节介绍的方法介绍了长周期因素作用下的动态系统性能可靠性分析方法。此方法要求准确描述系统性能输出 Y 与结构参数 $[A, B, C, G]$ 之间的解析关系,并已知输出特征参数的概率分布特征,然而在实际系统中,由于影响性能的参数很多且大多系统都具有非线性因素,很难得到准确的性能参数的解析表达式,只能通过仿真分析或者试验得到。

综合这两者的优点与缺点,提出了一种动态系统的性能可靠性的综合仿真分析方法,既能分析系统的长周期影响因素下的性能可靠性指标,比如环境条件的变化,参数退化等;又能分析短周期影响因素下的性能可靠性指标,比如动态系统中的物理过程、随机过程、操作等。具体分析流程如图 3 所示。

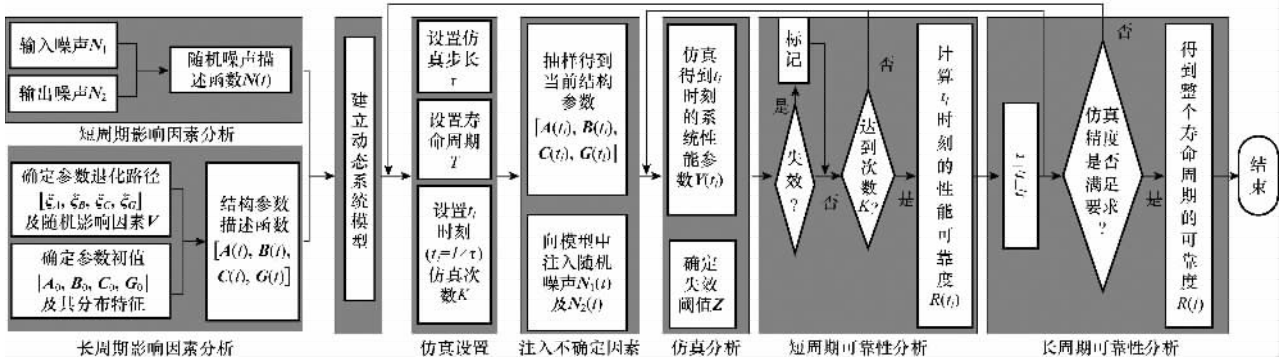


图 3 动态系统性能可靠性分析流程

在对动态系统进行性能可靠性分析之前,首先要对影响系统可靠性的长周期因素和短周期因素进行分析,最终得到系统结构参数的描述函数 $[A(t), B(t), C(t), G(t)]$ 和随机噪声的描述函数 $[N_1(t), N_2(t)]$;然后建立动态系统的数学模型,由于动态系统中影响其可靠性的结构参数的描述函数和随机噪声的描述函数都是随时间变化的,建立的数学模型要能够合理地注入这些不确定因素。仿真设置环节主要是设置系统需要仿真的寿命周期 T 、在每个时刻的仿真次数 K 及仿真的步长 τ 等参数。在向模型中注入不确定因素的基础上,进行当前时刻的仿真分析,得到当前状态下的系统性能输出 $Y(t)$,并根据失效阈值判断系统在当前时刻是否失效。短周期分析采用蒙特卡罗方法,在当前时刻经过 K 次仿真得到一个当前时刻的可靠度。长周期分析是在模型中考虑参数退化等不确定因素的前提下,综合每个时刻仿真分析得到的可靠度结果,最终得到整个仿真周期的系统性能可靠度。

系统的可靠性分析采用仿真分析方法,短周期可靠性分析不考虑结构参数的退化,只考虑噪声影响;长周期效应考虑退化及噪声影响,系统性能输出通过仿真分析得到。本文通过一种高精度的蒙特卡罗仿真方法分析系统的性能可靠性。具体流程如下。

把系统的整个寿命周期 T 分成 L 个时间区间, $T=L \times \tau$, 步长为 τ , $t_l = l \times \tau$, 在 t_l 时间范围内系统可靠度

$$R(t_l) = 1 - F(t_l) = \Pr \left\{ \bigcup_{i=0}^l g(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t_i) \leq 0 \right\} \quad (12)$$

(1) 构造函数

基于式(10)定义的极限状态函数,构造示性函数

$$\phi_1(\mathbf{U}, t_l) = \begin{cases} 1, & g(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t_l) \geq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

$$\phi_2(\mathbf{U}, t_l) = \begin{cases} 1, & g(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t_l) \text{ 或 } g(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t_{l+1}) \geq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

(2) t_l 时刻仿真 K 次,系统性能不符合指标要求的次数为

$$K_f(t_l) = \sum_{i=1}^K \phi_1(\mathbf{U}, t_l) \quad (15)$$

t_l 和 t_{l+1} 时刻系统性能不符合指标要求的次数为

$$K_f(t_l, t_{l+1}) = \sum_{i=1}^K \phi_2(\mathbf{U}, t_l) \quad (16)$$

在 t_l 时刻系统不可靠度为

$$\Delta F(t_l) = \frac{K_f(t_l, t_{l+1}) - K_f(t_l)}{K} \quad (17)$$

(3) 假设在 0 时刻,系统性能完全可靠,则 T 时刻系统性能失效的累计分布函数(cumulative distribution function, CDF)为

$$F_T(t_L) = \sum_{l=0}^{L-1} \Delta F(t_l) \quad (18)$$

通过式(18)计算 T 时刻系统不可靠度存在一定的误差 E , 误差大小同仿真步长 τ 和 t_l 时刻的仿真次数 K 相关,步长越短,每个时刻的仿真次数越多,则仿真的精度越高。

t_l 和 t_{l+1} 时刻的极限状态函数分别为 $g(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t_l)$ 和 $g(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t_{l+1})$, 它们之间的相关系数 $\rho(t_l, t_{l+1})$ 用式(19)描述。如果 $0.95 < \rho(t_l, t_{l+1}) < 1$, 则可以假设 $E=0^{[18]}$ 。

$$\rho(t_l, t_{l+1}) = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^K g(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t_l) \cdot g(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t_{l+1}) - \frac{1}{K} \left[\sum_{i=1}^K g(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t_l) \right] \left[\sum_{i=1}^K g(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t_{l+1}) \right] \right\}}{\left\{ \sqrt{\sum_{i=1}^K g^2(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t_l) - \frac{1}{K} \left[\sum_{i=1}^K g^2(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t_l) \right]^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^K g^2(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t_{l+1}) - \frac{1}{K} \left[\sum_{i=1}^K g^2(\mathbf{P}, \mathbf{U}, t_{l+1}) \right]^2} \right\}} \quad (19)$$

5 案例介绍

5.1 舵机介绍及其性能可靠性影响因素分析

舵机作为典型的动态系统,是飞行控制系统的重要部

件,其性能可靠性是影响飞行器性能与可靠性的关键因素。图 4(a)所示是一种常用的电动舵机结构组成,由控制器、功率放大单元、电机、减速机构、舵面和传感器组成。图 4(b)为舵机数学模型。

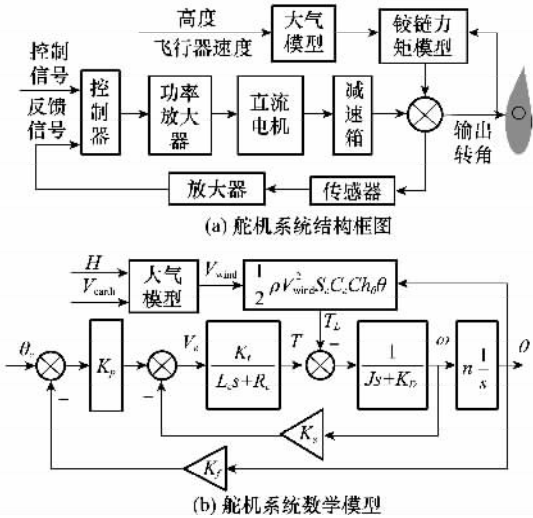


图 4 舵机结构及数学模型舵机

性能可靠性受随机风、噪声等短周期影响因素和结构参数退化等长周期影响因素的综合影响,本文的研究过程中考虑的舵机不确定因素如表 1 所示。

表 1 舵机性能可靠性影响因素

长周期因素		短周期因素	
电枢电阻	传感器增益	传感器噪声	紊流风
$R_c(t^*)$	$K_s(t^*)$	$N_s(t)$	$V_w(t)$

短周期因素为风速 $V_w(t)$ 和传感器噪声 $N_s(t)$,其中风速只考虑紊流风^[19],传感器噪声是一个平稳随机过程,使用功率谱密度表示。长周期因素考虑电机电枢阻值的变化和传感器增益的变化,用 Wiener 过程描述这两个长周期影响因素的退化量。表 1 中的 t 代表短周期时间量, t^* 代表长周期时间量。

$$R_c(t^*) = R_c(0) + \xi_{RC}(t^*), K_s(t^*) = K_s(0) + \xi_s(t^*),$$

$$\Phi_{N_s}(\omega) = q, R_{V_w}(\tau) = \sigma_w^2 \exp\left(-\frac{\tau}{L_{V_w}/V_s}\right)$$

式中, $R_c(0)$ 为电枢电阻初值; $K_s(0)$ 为传感器增益初值; $\xi_{RC}(t^*)$ 为电枢电阻退化过程(Wiener 过程); $\xi_s(t^*)$ 为传感器增益退化过程(Wiener 过程); $\Phi_{N_s}(\omega)$ 为传感器噪声功率谱密度函数; q 为传感器噪声强度; $R_{V_w}(\tau)$ 为紊流风相关函数; σ_w 为紊流强度; L_{V_w} 为紊流尺度; V_s 为飞行器飞行速度。

5.2 舵机性能可靠性仿真分析

按照图 3 描述的分析流程,在 Matlab 软件环境下实现舵机系统的性能可靠性仿真。其中短周期影响因素在模型中通过 s 函数编程实现;在对系统的长周期影响因素进行分析时,为了提高仿真分析的效率,通过改变时间比例尺模拟舵机的实际工作时间。本文研究的舵机的设计寿命为 $T=200$ h,短周期仿真时间设置为 $t=4$ s,主要模拟舵机对阶跃输入信号的输出特性。长周期仿真时通过改变比例尺,把 4 s 的短周期仿真时间比例放大为 1 h,并把每次短周期仿真作为一个长周期的仿真区间,也就是长周期仿真的步长为 $\tau=1$ h,在 200 个仿真区间内,每个区间的仿真次数 $K=1000$ 。

按照舵机设计要求,单位阶跃输入信号情况下上升时间

$T_r < 0.1$ s,超调量 $\text{pos} < 5\%$ 和稳态误差 $E_{ss} < 0.1^\circ$ 时,舵机系统视为性能可靠。使用蒙特卡罗分析方法,对每个时刻的 1000 次仿真结果进行可靠性分析,得到每个时刻的性能可靠度,最后在整个仿真周期内拟合得到整个周期的可靠度。

仿真分析过程中注入的短周期扰动因素见图 5 和图 6,长周期因素如图 7。在短周期因素和长周期因素的综合影响下,舵机在 $t^*=0$ h 时刻和 $t^*=200$ h 时的阶跃响应如图 8 所示。

从图 8 可以看出,由于舵机的结构参数存在退化,其性能输出参数也随时间的推移发生退化。图 9 所示的舵机性能可靠度曲线 $R(t)$ 就是在考虑各种随机因素的前提下,以阶跃输入下的性能参数作为可靠性判据得到。从图 9 中也可以看出,由于传感器增益和电枢电阻值的退化,可靠度在逐渐降低。

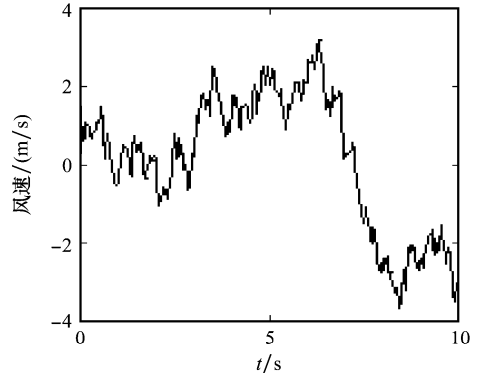


图 5 紊流风

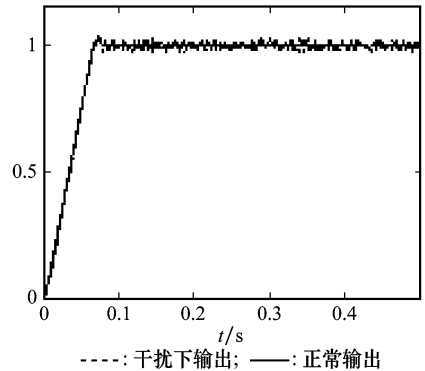


图 6 传感器噪声

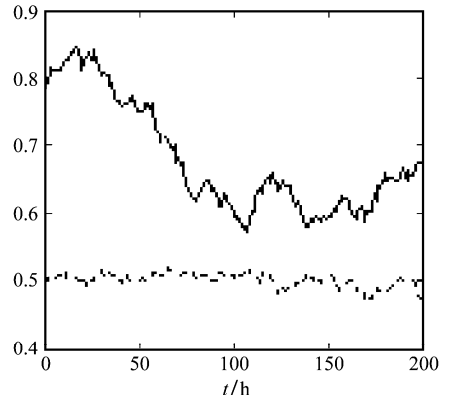


图 7 增益退化轨迹

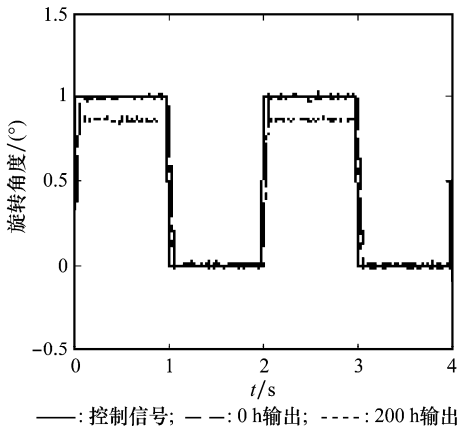


图 8 系统响应

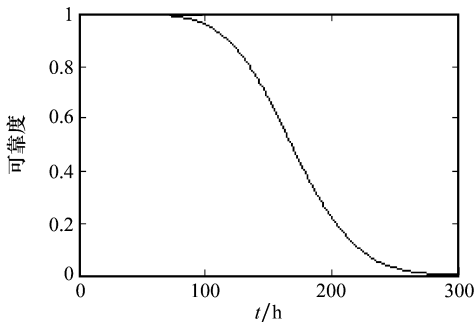


图 9 舵机系统的性能可靠性变化曲线

6 结 论

动态系统的性能可靠性受短周期因素(噪声)和长周期因素(参数退化)的综合影响。这些影响因素都具有随机性,同时也是随时间变化的动态过程。以性能为判据判断动态系统的可靠性,综合考虑这些因素对系统性能的影响,具有工程实用性。本文提出的基于仿真的性能可靠性分析方法,考虑了影响动态系统性能可靠性的随机因素的动态特性,把它们当作随机过程而非随机变量进行处理,合理地实现了模型中的动态不确定因素。这种方法综合了解析分析和传统蒙特卡罗抽样分析的优点,即能够应用于存在非线性因素和非平稳噪声干扰的系统,也具有更高的精度。通过对舵机案例的应用也验证了这种方法的可行性。

此方法以仿真模型为基础,基于仿真结果对系统可靠性进行分析。对于复杂动态系统,仿真分析要耗费的计算机资源巨大,提高仿真分析的效率是有待解决的重点问题。同时对于容错系统,系统故障之后的结构重构也会带来性能的变化,对结构变化引起的性能可靠性问题,仍然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] Salvatore D, Xing L D. A new approach to modeling the system reliability: dynamic reliability block diagrams[C]//*Proc. of Reliability*

and Maintainability Symposium, 2006;189-195.
 [3] Salvatore D, Antonio P. Dynamic reliability block diagrams VS dynamic fault trees[C]//*Proc. of Reliability and Maintainability Symposium*, 2007;71-76.
 [4] Ryan R, Xu H P. Automated modeling of dynamic reliability block diagrams using colored Petri nets[J]. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 2010,40(2):337-351.
 [5] Phuc D V, Anne B, Christophe B. From differential to difference importance measures for Markov reliability models[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010,204(3):513-521.
 [6] Zeng Shengkui, Ma Jiming, Li Feixia. Design optimization considering performance and reliability[C]//*Reliability and Maintainability Symposium*, 2009;201-205.
 [7] Wang S P, Cui M S. Performance degradation and reliability analysis for redundant actuation system[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2005,18(4):359-365.
 [8] Alejandro D D. An integrated methodology for the dynamic performance and reliability evaluation of fault-tolerant systems[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2008,93(11):1628-1649.
 [9] 钟强晖,张志华,吴和声. 基于退化数据的可靠性评估方法探讨[J]. *系统工程与电子技术*, 2009,31(9):2280-2284. (Zhong Q H, Zhang Z H, Wu H S. Research on methods reliability assessment based on degradation data[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009,31(9):2280-2284.)
 [10] Young K S, Gordon J S. A new sample-based approach to predict system performance reliability[J]. *IEEE Trans. on Reliability*, 2008,57(2):322-340.
 [11] Ke W, Ren C, Jin K, et al. System performance, degradation, and reliability assessment[C]//*Proc. on IEEE International Conference of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2007;1216-1220.
 [12] Prashant S, Cheng Z, Eric K, et al. Sensor-driven reliability and wearout management[J]. *Design and Test of Computers*, 2009,26(6):40-49.
 [13] 汤胜道,汪凤泉. 失效率随时间而变的 n 中取 k 表决系统可靠性分析[J]. *系统工程学报*, 2005,20(5):556-559. (Tang S D, Wang F Q. Reliability analysis for a k-out-of-n: (G) system with time-varying failure rates[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2005,20(5):556-559.)
 [14] Eric K, David B, Dennis S, et al. Multi-mechanism reliability modeling and management in dynamic systems[J]. *IEEE Trans. on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2008,16(4):476-487.
 [15] 帕普里斯 A, 佩莱 S U. 概率、随机变量与随机过程[M]. 保铮, 冯大政, 水鹏朗, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2004. (Papoulis A, Pillai S U. *Probability, random variables and stochastic processes*[M]. Bao Z, Feng D Z, Shui P L, trans. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004.)
 [16] 钱学森. 工程控制论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2006. (Qian X S. *Engineering cybernetics*[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2006.)
 [17] Rosenblatt M. Remarks on a multivariate transformation[J]. *Annual of Mathematical Statistics*, 1952,23:470-472.
 [18] Gordon J S, Young K S. Dependability-based design optimization of degrading engineering systems[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2009,131(1):011002.
 [19] MIL-F-8785C. Military specification-flying qualities of piloted airplanes[S]. America: MIL, 1980.