

基于 Wiener-MM 和 UGF 的多态系统可靠性评估

潘刚, 尚朝轩, 梁玉英, 蔡金燕, 孟亚峰

(军械工程学院电子与光学工程系, 石家庄 050003)

摘要: 为准确描述部件的状态转移过程, 实现对多态系统(MSS)可靠性的准确估计, 采用 Wiener-马尔可夫模型(Wiener-MM)对部件的状态概率进行求解, 利用通用生成函数(UGF)方法对MSS的可靠性进行分析, 提出了基于 Wiener-MM 和 UGF 的 MSS 可靠性评估方法, 并对某雷达功率放大系统的可靠性评估进行了分析。该方法降低了传统方法中部件失效阈值对系统可靠度评估的影响, 提高了系统可靠性评估精度, 为雷达功率放大系统的预防性维修提供了新方法, 具有很强的通用性和工程应用价值。

关键词: 可靠性评估; Wiener-马尔可夫模型; 通用生成函数; 多态系统; 雷达功率放大系统

中图分类号: TB114.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)05-0084-05

Reliability Evaluation of Multi-State System Based on Wiener-MM and UGF

PAN Gang, SHANG Chao-xuan, LIANG Yu-ying, CAI Jin-yan, MENG Ya-feng

(Department of Electronic and Optic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: For the purpose of describing the state transition process of the components and making accurate estimation to reliability of a multi-state system, the Wiener-Markov Model was used to compute the state probability, and the Universal Generating Function (UGF) method was used for reliability analysis of the multi-state system. A Wiener-MM and UGF based method was proposed for reliability evaluation of multi-state system. Verification and illustration were conducted with a certain type of radar power amplifier. The result shows that: this method decreases the effect of component failure threshold on system reliability estimation, and improves the accuracy of system reliability assessment. Thus a new method is provided for preventive repair of radar power amplifier, which is of great engineering application value.

Key words: reliability evaluation; Wiener-Markov Model; UGF; multi-state system; radar power amplifier

0 引言

在实际工程中,某些系统除“正常工作”和“完全失效”两种状态外,可以在多个性能水平下运行,这样的系统称为多态系统(Multi-State System, MSS)^[1],与“二态系统”模型相比, MSS 模型能够准确地描述部件的多态性,能够更加灵活地表征部件性能变化对系统性能和可靠性的影响^[2]。

自 20 世纪 70 年代 MSS 的概念被提出后^[3-4], MSS 可靠性的研究也得到了学者们的广泛关注。在理论方法方面,文献[1-2, 5-6]对 MSS 可靠性的基本概念、

评估方法和优化设计等方面进行了详细的阐述;在工程应用方面, MSS 可靠性的相关理论已经应用到电力^[7-8]、机械^[9-10]等领域。

在传统的 MSS 理论中,通常假设部件的状态转移率为常数。然而在工作过程中, MSS 受到环境应力或其他应力的综合作用,随着时间的推移,部件状态之间的转移更加频繁,且部件的状态转移率呈递增的趋势,此外,由于存在一些不确定性因素,使其具有一定的漂移特性。因此可以用 Wiener 过程去描述部件的状态转移率,采用马尔可夫模型对部件的状态概率进行求解,提出了基于 Wiener-马尔可夫模型(Wiener-Markov Model, Wiener-MM)的状态概率求解方法。由于马尔可夫模型在 MSS 的可靠性分析中存在“维数灾难”的问题,为降低计算的复杂度,在得到状态概率之后,利用通用生成函数(UGF)方法对 MSS 的可靠性进行分析^[11]。鉴于上

收稿日期:2015-05-14

修回日期:2016-03-10

基金项目:国家自然科学基金(61271153, 61372039)

作者简介:潘刚(1987—),男,山东新泰人,博士生,研究方向为多态系统可靠性评估与维修决策。

述分析,提出了基于 Wiener-MM 和 UGF 的某雷达功率放大系统可靠性评估,并对该雷达功率放大系统的可靠性进行分析。

1 Wiener - 马尔可夫模型 (Wiener-MM)

假定部件的状态转移率可用漂移 Wiener 过程进行描述,并以此为基础,用马尔可夫模型对部件的状态转移过程进行表征,建立 Wiener-MM。

1.1 漂移 Wiener 过程

设部件状态转移率 $\{\lambda(t), t \geq 0\}$ 满足下列条件: 1) 时刻 t 到时刻 $t + \Delta t$ 之间的增量服从正态分布,即 $\Delta\lambda = \lambda(t + \Delta t) - \lambda(t) \sim N(\mu\Delta t, \sigma^2\Delta t)$; 2) 对任意两个不相交的时间区间 $[t_1, t_2], [t_3, t_4], t_1 < t_2 \leq t_3 < t_4$, 增量 $\lambda(t_4) - \lambda(t_3)$ 与 $\lambda(t_2) - \lambda(t_1)$ 相互独立; 3) $\lambda(0) = 0$ 且 $\lambda(t)$ 在 $t=0$ 连续。则称 $\lambda(t)$ 为漂移 Wiener 过程, μ 为漂移参数, σ 为扩散参数。若 $W(t)$ 为标准 Wiener 过程, $E[W(t)] = 0, E[W(t_1)W(t_2)] = \min(t_1, t_2)$, 通常也可以将 $X(t)$ 表达为

$$\lambda(t) = \mu t + \sigma W(t) \quad (1)$$

因此, $\lambda(t)$ 也被称为带线性漂移的布朗运动。

1.2 马尔可夫模型

假设部件 i 在 t 时刻的状态为 k_i , 则在 Δt 时刻以后其状态为 k'_i 的概率表示为

$$\Pr\{X(t + \Delta t) = k'_i | X(t) = k_i\} = p_{i,(k_i,k'_i)}(t, \Delta t) \quad (2)$$

该概率被称为状态转移概率。

令 $k_i = k'_i$, 则有 $\Pr\{X(t + \Delta t) = k_{ii} | X(t) = k_i\} = p_{i,(k_i,k_i)}(t, \Delta t)$, 其表示 Δt 时刻内部件状态驻留在状态 k_i 的概率, 且有 $\sum_{k_i, (k_i, k'_i)} p_{i,(k_i,k'_i)}(t, \Delta t) + p_{i,(k_i,k_i)}(t, \Delta t) = 1$ 。由此可定义 $\lambda^i_{(k_i,k_i)} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} [1 - p_{i,(k_i,k_i)}(t, \Delta t)] / \Delta t$ 和 $\lambda^i_{(k_i,k'_i)} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} [p_{i,(k_i,k'_i)}(t, \Delta t) / \Delta t]$ 分别表示部件在 t 时刻离开状态 k_i 的转移概率和从状态 k_i 到 k'_i 的转移率。

假设不可修多态部件 i 具有 M_i 个可能的状态, 其马尔可夫模型如图 1 所示。

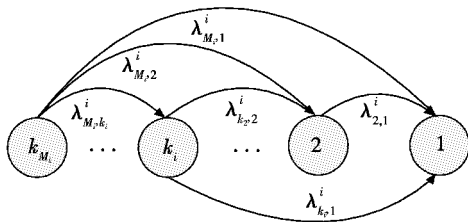


图1 马尔可夫模型

Fig.1 Markovmodel

图中: k_{M_i} 为部件性能最佳状态; 1 为部件性能最低状态; $\lambda^i_{M_i, k_i}$ 表示部件 i 性能从最佳状态 k_{M_i} 到中间状态 k_i 的转移率。则部件 i 的整个状态转移过程可用状态

转移率矩阵 π_i 表示为

$$\pi_i = \begin{bmatrix} \lambda^i_{M_i, M_i} & \lambda^i_{M_i, M_i-1} & \cdots & \lambda^i_{M_i, 1} \\ \lambda^i_{M_i-1, M_i} & \lambda^i_{M_i-1, M_i-1} & \cdots & \lambda^i_{M_i-1, 1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda^i_{1, M_i} & \lambda^i_{1, M_i-1} & \cdots & \lambda^i_{1, 1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $\lambda^i_{k_i, k_i} = - \sum_{k_i \neq k'_i} \lambda^i_{k_i, k'_i}$ 。

在任意 t 时刻, 部件在各个状态的概率分布可通过 Kolmogorov 微分方程组得到

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = p_i(t) \pi_i \quad (4)$$

式中, $p_i(t) = \{p_{i, M_i}(t), \dots, p_{i, 2}(t), p_{i, 1}(t)\}$, 方程组的初始条件可根据部件的初始状态确定。

假定初始状态为 $p_{i, M_i}(0) = 1, p_{i, M_i-1}(0) = \dots = p_{i, 2}(0) = p_{i, 1}(0) = 0$, 通常采用拉普拉斯变换对式(4)进行求解, 可得

$$\begin{cases} \tilde{p}_{i, M_i}(s) = \frac{1}{(s + \lambda^i_{M_i, M_i-1})} \\ \vdots \\ \tilde{p}_{i, k_i}(s) = \frac{\lambda^i_{k_i+1, k_i} \dots \lambda^i_{M_i, M_i-1}}{(s + \lambda^i_{k_i, k_i-1}) \dots (s + \lambda^i_{M_i-1, M_i-2})} \frac{1}{(s + \lambda^i_{M_i, M_i-1})} \\ \vdots \\ \tilde{p}_{i, 1}(s) = \frac{\lambda^i_{2, 1}}{s} \frac{\lambda^i_{3, 2} \dots \lambda^i_{M_i, M_i-1}}{(s + \lambda^i_{2, 1}) \dots (s + \lambda^i_{M_i-1, M_i-2})} \frac{1}{(s + \lambda^i_{M_i, M_i-1})} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $k_i = 2, 3, \dots, M_i - 1$ 。

最后可通过逆拉普拉斯变换得到部件 i 的状态转移概率 $p_i(t) = \{p_{i, M_i}(t), \dots, p_{i, 2}(t), p_{i, 1}(t)\}$ 。

2 运算法则

为了降低计算的复杂度, 在采用 Wiener-MM 得到部件的状态概率之后, 采用 UGF 法对部件的可靠性进行分析。

2.1 UGF 定义

定义部件 i 的 UGF 为

$$u_i(z, t) = \sum_{k_i=1}^{M_i} p_{i, k_i}(t) \cdot z^{g_{i, k_i}} \quad (6)$$

式中: $g_{i, k_i}, p_{i, k_i}(t)$ 分别为部件在任意时刻 t 的状态性能和状态概率, $i = 1, 2, \dots, n, k_i = 1, 2, \dots, M_i$ 。

2.2 UGF 运算法则

系统的 UGF 可通过如下运算获得

$$U(z, t) = \Omega(u_i(z, t), u_{i'}(z, t)) = \sum_{i=1}^{M_i} \sum_{i'=1}^{M_i} p_{i, k_i} p_{i', k_{i'}} \cdot z^{f(g_{i, k_i}, g_{i', k_{i'}})} \quad (7)$$

根据系统结构特点定义如下运算符:

1) 当 $[g_k]$ 为 $[g_{i, k_i}]$ 与 $[g_{i', k_{i'}}]$ 的和时, 定义 δ_1 运算

符为 $\delta_1(U_i(z,t), U_{i'}(z,t)) = \sum_{i=1}^{M_i} \sum_{i'=1}^{M_{i'}} p_{i,k_i} \cdot p_{i',k_{i'}} \cdot z^{[g_{i,k_i}] + [g_{i',k_{i'}}]}$;

2) 当 $[g_{k_i}]$ 为 $[g_{i,k_i}]$ 与 $[g_{i',k_{i'}}]$ 的乘积时, 定义 δ_2 运算

符为 $\delta_2(U_i(z,t), U_{i'}(z,t)) = \sum_{i=1}^{M_i} \sum_{i'=1}^{M_{i'}} p_{i,k_i} \cdot p_{i',k_{i'}} \cdot z^{[g_{i,k_i}] \cdot [g_{i',k_{i'}}]}$;

3) 当 $[g_{k_i}]$ 为 $[g_{i,k_i}]$ 与 $[g_{i',k_{i'}}]$ 的最小值时, 定义 δ_3 运

算符为 $\delta_3(U_i(z,t), U_{i'}(z,t)) = \sum_{i=1}^{M_i} \sum_{i'=1}^{M_{i'}} p_{i,k_i} \cdot p_{i',k_{i'}} \cdot z^{\min\{[g_{i,k_i}], [g_{i',k_{i'}}]\}}$ 。

3 基于 UGF 的 MSS 可靠性分析

据上述运算法则的分析, 假定得到的 MSS 区间 UGF 为

$$U(z,t) = \sum_{k_i=1}^{M_i} p_{k_i} \cdot z^{[g_{k_i}]} \quad (8)$$

式中, $[g_{k_i}]$ 为状态性能区间。

定义 MSS 的最小性能需求为 w , 则系统的可靠度为

$$R(t) = P\{G(t) \geq w\} = \sum_{k_i=1}^{M_i} p_{k_i} \cdot p\{[g_{k_i}(t)] - w \geq 0\} \quad (9)$$

式中, $P\{G(t) \geq w\}$ 表示 $G(t) \geq w$ 的概率, $G(t) = \{[g_1(t)], \dots, [g_n(t)], \dots, [g_{w_i}(t)]\}$ 。

4 算例分析

某雷达功率放大(分)系统主要由 4 个分系统构成, 包含 9 个性能退化部件和 2 个二态部件, 具体如图 2 所示。

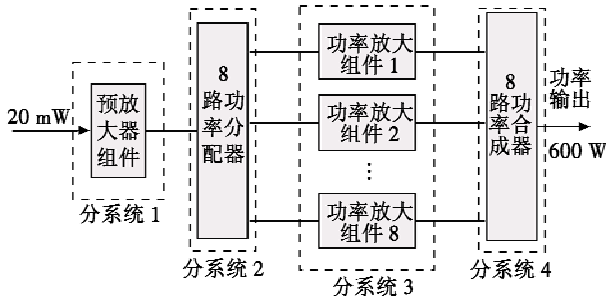


图2 某雷达功率放大(分)系统

Fig. 2 The radar power amplifying system

图中: 分系统 1 为性能退化部件预放大器组件组成; 分系统 2 为二态部件 1:8 功率分配器组成; 分系统 3 为性能退化部件功率放大器组件 1~8 组成, 且均为同型部件, 分系统 4 为二态部件 8:1 功率合成器。部件的状态水平, 根据部件处于不同性能水平时对整个雷达功率放大(分)系统正常工作性能的贡献比率进行划分。求系统的最小性能需求 w 为 80% 时系统的可靠度。

各部件的状态分布参数如表 1 所示。

表 1 部件状态分布参数

Table 1 Component state distribution parameters

部件	部件状态性能/%	初始状态	状态转移率
预放大器组件	100	$p_{1,4}(0) = 1$	$\lambda_{(4,3)}^1 = 0.07 \cdot t + 0.0075 \cdot W(t)$
	85	$p_{1,3}(0) = 0$	$\lambda_{(3,2)}^1 = 0.105 \cdot t + 0.0105 \cdot W(t)$
	65	$p_{1,2}(0) = 0$	$\lambda_{(2,1)}^1 = 0.135 \cdot t + 0.0175 \cdot W(t)$
1:8 功率分配器	100	$p_{2,2}(0) = 1$	$\lambda_{(2,1)}^2 = 0.01$
	0	$p_{2,1}(0) = 0$	
功率放大器组件	12.5	$p_{3,4}(0) = 1$	$\lambda_{(4,3)}^3 = 0.05 \cdot t + 0.0045 \cdot W(t)$
	11	$p_{3,3}(0) = 0$	$\lambda_{(3,2)}^3 = 0.08 \cdot t + 0.0105 \cdot W(t)$
	8	$p_{3,2}(0) = 0$	$\lambda_{(2,1)}^3 = 0.105 \cdot t + 0.0135 \cdot W(t)$
	0	$p_{3,1}(0) = 0$	
8:1 功率合成器	100	$p_{4,2}(0) = 1$	$\lambda_{(2,1)}^4 = 0.01$
	0	$p_{4,1}(0) = 0$	

4.1 基于 Wiener-MM 的多态部件状态概率求解

在 $t=2$ a 时, 首先根据 1.2 节性能退化部件状态概率求解方法, 以预放大器组件对应的状态概率过程为例进行说明。

$$\begin{cases} \frac{dp_{1,4}(t)}{dt} = -\lambda_{(4,3)}^1 \cdot p_{1,4}(t) \\ \frac{dp_{1,3}(t)}{dt} = \lambda_{(4,3)}^1 \cdot p_{1,4}(t) - \lambda_{(3,2)}^1 \cdot p_{1,3}(t) \\ \frac{dp_{1,2}(t)}{dt} = \lambda_{(3,2)}^1 \cdot p_{1,3}(t) - \lambda_{(2,1)}^1 \cdot p_{1,2}(t) \\ \frac{dp_{1,1}(t)}{dt} = -\lambda_{(2,1)}^1 \cdot p_{1,2}(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中, 初始状态 $p_{1,4}(0) = 1, p_{1,3}(0) = p_{1,2}(0) = p_{1,1}(0) = 0$ 。

通过拉普拉斯变化可得

$$\begin{cases} \tilde{p}_{1,4}(s) = \frac{1}{s + \lambda_{(4,3)}^1} \\ \tilde{p}_{1,3}(s) = \frac{\lambda_{(4,3)}^1}{(s + \lambda_{(3,2)}^1)(s + \lambda_{(4,3)}^1)} \\ \tilde{p}_{1,2}(s) = \frac{\lambda_{(3,2)}^1 \lambda_{(4,3)}^1}{(s + \lambda_{(2,1)}^1)(s + \lambda_{(3,2)}^1)(s + \lambda_{(4,3)}^1)} \\ \tilde{p}_{1,1}(s) = \frac{\lambda_{(2,1)}^1 \lambda_{(3,2)}^1 \lambda_{(4,3)}^1}{(s + \lambda_{(2,1)}^1)(s + \lambda_{(3,2)}^1)(s + \lambda_{(4,3)}^1)} \end{cases} \quad (11)$$

通过逆拉普拉斯变化可得

$$\begin{cases} p_{1,4}(t) = e^{-\lambda_{(4,3)}^1 t} \\ p_{1,3}(t) = \frac{\lambda_{(4,3)}^1}{\lambda_{(4,3)}^1 - \lambda_{(3,2)}^1} (e^{-\lambda_{(3,2)}^1 t} - e^{-\lambda_{(4,3)}^1 t}) \\ p_{1,2}(t) = \frac{\lambda_{(3,2)}^1 \lambda_{(4,3)}^1 (\lambda_{(4,3)}^1 - \lambda_{(3,2)}^1) e^{-\lambda_{(3,2)}^1 t}}{(\lambda_{(4,3)}^1 - \lambda_{(3,2)}^1) (\lambda_{(3,2)}^1 - \lambda_{(2,1)}^1) (\lambda_{(2,1)}^1 - \lambda_{(4,3)}^1)} + \\ \frac{\lambda_{(3,2)}^1 \lambda_{(4,3)}^1 (\lambda_{(2,1)}^1 - \lambda_{(4,3)}^1) e^{-\lambda_{(4,3)}^1 t}}{(\lambda_{(4,3)}^1 - \lambda_{(3,2)}^1) (\lambda_{(3,2)}^1 - \lambda_{(2,1)}^1) (\lambda_{(2,1)}^1 - \lambda_{(4,3)}^1)} + \\ \frac{\lambda_{(3,2)}^1 \lambda_{(4,3)}^1 (\lambda_{(3,2)}^1 - \lambda_{(2,1)}^1) e^{-\lambda_{(2,1)}^1 t}}{(\lambda_{(4,3)}^1 - \lambda_{(3,2)}^1) (\lambda_{(3,2)}^1 - \lambda_{(2,1)}^1) (\lambda_{(2,1)}^1 - \lambda_{(4,3)}^1)} \\ p_{1,1}(t) = 1 - p_{1,2}(t) - p_{1,3}(t) - p_{1,4}(t) \end{cases} \quad (12)$$

预放大器组件为 $\{p_1\} = \{0.0011, 0.0117, 0.1177, 0.8695\}$, 1:8 功率分配器对应的状态概率为 $\{p_2\} = \{0.0198, 0.9802\}$, 功率放大器组件对应的状态概率为 $\{p_3\} = \{0.0011, 0.0119, 0.1166, 0.8703\}$ 和 $\{p_4\} = \{0.0198, 0.9802\}$ 。

4.2 雷达功率放大系统可靠性评估

4.2.1 基于 UGF 的雷达功率放大系统可靠性评估

根据部件的状态性能定义和状态概率求解方法, 可得部件 1~6 的区间 UGF 为

$$u_1(z, t) = 0.0011 \cdot z^0 + 0.0119 \cdot z^{65\%} + 0.1175 \cdot z^{85\%} + 0.8695 \cdot z^{100\%},$$

$$u_2(z, t) = 0.0198 \cdot z^0 + 0.9802 \cdot z^{100\%},$$

$$u_3(z, t) = 0.0011 \cdot z^0 + 0.0118 \cdot z^{8\%} + 0.1169 \cdot z^{11\%} + 0.8701 \cdot z^{12.5\%},$$

$$u_4(z, t) = u_5(z, t) = u_6(z, t) = u_7(z, t),$$

$$u_7(z, t) = u_8(z, t) = u_9(z, t) = u_{10}(z, t),$$

$$u_{11}(z, t) = 0.0198 \cdot z^0 + 0.9802 \cdot z^{100\%}。$$

由图 1 可知:分系统 1 是由部件组成, 可得分系统 1 的区间 UGF 为 $U_{sub1}(z, t) = u_1(z, t)$; 分系统 2 的区间 UGF 为 $U_{sub2}(z, t) = u_2(z, t)$; 分系统 3 由部件 3~10 构成, 其性能为部件 3~10 的性能和, 根据 2 节运算法则定义的 δ_1 运算符, 可得分系统 3 的区间 UGF 为 $U_{sub3}(z, t) = \delta_1(u_3(z, t), u_4(z, t), \dots, u_{10}(z, t))$; 分系统 4 的区间 UGF 为 $U_{sub4}(z, t) = u_{11}(z, t)$ 。

对分系统 1 和分系统 3 采用 2 节运算法则定义的 δ_2 运算符, 可得分系统 a 的 UGF 为 $U_a(t) = \delta_2(U_{sub1}(z, t), U_{sub3}(z, t))$; 对分系统 a 、分系统 2、分系统 4 采用 2 节运算法则定义的 δ_3 运算符, 可得系统的 UGF 为 $U(t) = \delta_3(U_a(z, t), U_{sub2}(z, t), U_{sub4}(z, t))$; 最后可得 $t = 2$ a 时, 系统的可靠度为 $R(t) = P\{G(t) \geq w\} = \sum_{k=1}^M p_k \cdot p([g_k(t)] - w \geq 0) = 0.9398$ 。

4.2.2 基于“二态”模型的雷达功率放大系统可靠性评估

如果采用传统方法进行系统可靠性分析, 一般假设部件仅有 2 个状态, 根据系统总的性能输出要求, 确定部件的失效阈值。预放大器组件功能完好时分系统 1 正常, 由表 1 可知, 该部件的状态转移率具有漂移 Wiener 过程, 且具有 4 个状态, 为了能够充分地表征其“二态”特性, 在此取 3 个状态转移率的均值作为传统方法分析时的状态转移率, 所求的正常和失效的概率分别为 p_{tradi} 和 $1 - p_{tradi}$ 。该思路同理可用于功率放大器组件, 其正常和失效的概率分别为 p_{trad3} 和 $1 - p_{trad3}$, 分系统 3 中, 8 个功率放大器组件并不是简单的串并联关系, 因系统的最小性能需求为 $w = 80\%$, 则 8 个功率放大器组件最多

只能有 1 个部件失效, 因此分系统 3 正常的概率为 $C_8^1(1 - p_{trad3})(p_{trad3})^7 + (p_{trad3})^8$, 采用传统方法可得系统的可靠度为 $R_{trad}(t) = p_{tradi} \cdot p_{2,2}(t) \cdot (C_8^1(1 - p_{trad3}) \cdot (p_{trad3})^7 + (p_{trad3})^8) \cdot p_{4,2}(t)$, 最后在 $t = 2$ a 时, 系统的可靠度为 $R_{trad}(t) = 0.4315$ 。

当系统的最小性能需求为 $w = 80\%$ 时, 系统的可靠度如图 3 所示。

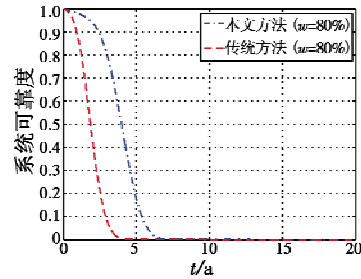


图 3 两种方法所得可靠度结果对比

Fig. 3 Reliabilities obtained by the two methods

由图 3 可以得出以下结论: 1) 传统方法与本文方法相比, 所得结果过于保守, 同时刻所得可靠度偏低; 2) 以传统方法为指导进行预防性维修, 增加维修次数, 造成维修资源的浪费, 影响雷达的正常工作。

4.3 进一步分析

实际中, 雷达在执行不同目标搜索任务时, 所需功率也有所不同, 对于本文所分析的全功率雷达而言, 雷达功率放大系统的性能满足最小性能需求 $w = 80\%$ 时, 该雷达能够正常完成所有功能; 但是在重大演习或者战时, 不能及时对其进行维修, 雷达功率放大系统的性能不满足最小性能需求时, 雷达只能完成部分搜索任务, 执行任务的能力将降低。因此在执行不同任务时, 对雷达发射系统的性能要求也不相同, 故分析研究在不同最小性能需求下功率放大系统的可靠性具有重要意义, 具体如图 4 所示。

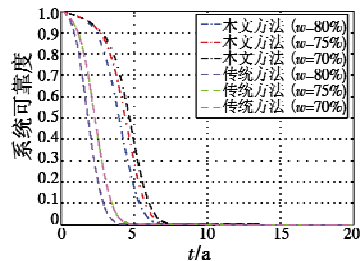


图 4 系统最小任务性能需求取不同值时系统可靠度的变化

Fig. 4 Changes of MSS reliability when the minimum performance requirement of the system is changed

由图 4 可以得出以下结论:

1) 显然随着最小任务性能需求的降低, 同时刻系统的可靠度逐渐增加;

2) 传统方法在最小任务性能需求 $w = 75\%$ 和 $w = 70\%$ 时系统可靠度曲线重合, 因为当系统的最小任务性能需求降低到 $w = 75\%$ 和 $w = 70\%$ 时, 分系统 3 中 8 个功率放大器组件最多只能有 2 个部件失效, 则分系统 3 正常的概率为 $C_8^2(1 - p_{\text{trad3}})^2(p_{\text{trad3}})^6 + C_8^1(1 - p_{\text{trad3}})(p_{\text{trad3}})^7 + (p_{\text{trad3}})^8$, 在此最小任务性能需求下采用传统方法可得系统的可靠度为 $R_{\text{trad}}(t) = p_{\text{trad1}} \cdot p_2^2(t) \cdot (C_8^2(1 - p_{\text{trad3}})^2(p_{\text{trad3}})^6 + C_8^1(1 - p_{\text{trad3}})(p_{\text{trad3}})^7 + (p_{\text{trad3}})^8) \cdot p_2^4(t)$ 。

5 总结

本文提出了基于 Wiener-MM 和 UGF 的雷达功率放大系统可靠性评估方法, 给出了通用的多态串-并联系统可靠性的分析流程, 并对某雷达功率放大系统进行分析, 本文方法与传统方法相比, 传统方法所得结果过于保守, 不能正确地表征系统可靠性随时间的变化关系, 因此, 本文方法降低了传统方法中部件失效阈值对系统可靠性的影响, 提高了系统可靠性的分析精度, 为雷达功率放大系统的预防性维修提供了理论指导。

参考文献

- [1] LISNIANSKI A, LEVITIN G. Multi-state system reliability: assessment, optimization and applications [M]. Singapore: World Scientific, 2003.
 - [2] 李春洋. 基于多态系统理论的可靠性分析与优化设计方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010. (LI C Y. Research on reliability analysis and optimization based on the multi-state system theory [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.)
 - [3] BARTON R M, DAMON W W. Reliability in a multi-state system [C]//Proceedings of the Sixth Annual Southeastern Symposium on Systems Theory, Louisiana, 1974: 1-16.
 - [4] BARLOW R E, WU A S. Coherent systems with multi-state components [J]. *Mathematica of Operations Research*, 1978, 3 (4): 275-281.
 - [5] NATVIG B. Multistate systems reliability theory with applications [M]. New Jersey: Wiley Series in Probability and Statistics, 2011.
 - [6] LEVITIN G. The universal generating function in reliability analysis and optimization [M]. London: Springer, 2005.
 - [7] LI Y F, ZIO E. A multi-state model for the reliability assessment of a distributed generation system via universal generating function [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2012, 106: 28-36.
 - [8] BILLINTON R Y G. Adequacy assessment of composite power generation model for reliability evaluation [J]. *International Journal of Reliability and Safety*, 2008, 2(1): 79-98.
 - [9] 史新红, 齐先军, 王治国. 基于 UGF 的发电系统区间可靠性评估及其仿射算法改进 [J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2014, 37 (3): 286-291. (SHI X H, QI X J, WANG Z G. Interval reliability estimation of power generating system based on UGF method and its modification by using affine arithmetic [J]. *Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition*, 2014, 37 (3): 286-291.)
 - [10] 尚彦龙, 蔡琦, 赵新文, 等. 基于 UGF 和 Semi-Markov 方法的反应堆泵机组多状态可靠性分析 [J]. *核动力工程*, 2012, 33 (1): 117-123. (SHANG Y L, CAI Q, ZHAO X W, et al. Multi-state reliability for pump group in nuclear power system based on UGF and Semi-Markov process [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2012, 33 (1): 117-123.)
 - [11] LISNIANSKI A, FRENKEL I, DING Y. Multi-state system reliability analysis and optimization for engineers and industrial managers [M]. London: Springer, 2010.
- (上接第 83 页)
- [4] 周强, 熊华钢. 新一代民机航空电子互连技术发展 [J]. *电光与控制*, 2009, 16 (4): 1-6. (ZHOU Q, XIONG H G. Development of the new generation civil avionics interconnection technology [J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, 16 (4): 1-6.)
 - [5] 程学军, 雷国志. 航空电子系统基于需求的自动测试方法 [J]. *电讯技术*, 2010, 50 (8): 165-169. (CHENG X J, LEI G Z. An automatic test method based on avionics system requirement [J]. *Telecommunication Engineering*, 2010, 50 (8): 165-169.)
 - [6] 林凯, 何川, 毛乐山. 基于 LabVIEW 的多通道振动测试与分析系统 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2003, 43 (5): 659-661, 665. (LIN K, HE C, MAO L S. Multi-channel system for vibration measurement and analysis based on LabVIEW [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2003, 43 (5): 659-661, 665.)
 - [7] 周汝胜, 焦宗夏, 王少萍, 等. 基于专家系统的导弹发射车液压系统故障诊断 [J]. *航空学报*, 2008, 29 (1): 197-203. (ZHOU R S, JIAO Z X, WANG S P, et al. Fault diagnosis expert system for hydraulic system of missile launcher [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29 (1): 197-203.)
 - [8] BORLEA I, BUTA A, DUSA V, et al. DIASE-expert system fault diagnosis for timisoara 220 kV substation [C]//Proceedings of the International Conference on Computer as a Tool, 2005: 221-224.