

基于不同类型冗余配置的导弹测试系统 可靠性评估

肖支才, 李海君, 王瑞奇

(海军航空大学, 山东 烟台 264001)

摘要:通过对导弹测试系统的可靠性结构分析,给出冗余配置方案来提高系统的可靠性。研究了使用不同类型冗余配置方法的导弹测试系统可靠性评估问题,给出了热备系统、冷备系统、温备系统的可靠性评估模型,并将其用于导弹测试系统中。最后通过仿真验证了不同类型冗余配置对导弹测试系统可靠性的影响。

关键词:导弹测试系统;冗余配置;可靠性设计;冷备系统;热备系统;可靠性评估

本文引用格式:肖支才,李海君,王瑞奇.基于不同类型冗余配置的导弹测试系统可靠性评估[J].兵器装备工程学报,2020,41(09):94-98.

Citation format:XIAO Zhicai, LI Haijun, WANG Ruiqi. Reliability Evaluation of Missile Test System Based on Different Types of Redundant Configuration[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(09): 94-98.

中图分类号: TP202

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2020)09-0094-05

Reliability Evaluation of Missile Test System Based on Different Types of Redundant Configuration

XIAO Zhicai, LI Haijun, WANG Ruiqi

(Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: The reliability structure of missile test system was analyzed, and the redundancy configuration scheme was given to improve the reliability of the system. The reliability evaluation problem using different types of redundancy configuration methods was studied. The reliability evaluation models of hot standby system, cold standby system and warm standby system were given and applied to missile test system. The influence of different types of redundancy configuration on the reliability of missile test system was verified by simulation.

Key words: missile test system; redundancy configuration; reliability design; cold standby system; hot standby system; reliability evaluation

导弹测试系统是导弹技术准备环节的重要装备,是导弹技术准备流程中必须使用的装备。导弹测试系统一般通过元器件优选、环境应力筛选和可靠性试验等手段来达到可靠性要求。但是,随着测试系统功能的增加和结构逐渐复杂化,仅仅依靠提高元件的设计与制造工艺来获取可靠度难度

大、成本高。为了保证导弹技术准备的顺利进行,技术阵地一般备份多台套测试设备,这样又显著增加了成本。本文基于现有元件固有可靠性的基础研究提高导弹测试系统可靠性的方法。

提高复杂系统可靠性水平的一个重要方法是采用冗余

收稿日期:2019-09-25;修回日期:2019-12-17

基金项目:军内预研基金项目(41402040201)

作者简介:肖支才(1977—),男,博士,副教授,主要从事导弹测试与控制及可靠性研究,E-mail:xzc96113@sohu.com。

通讯作者:李海君(1978—),男,博士,工程师,主要从事控制科学与工程及可靠性研究,E-mail:16529531@qq.com。

设计。已有诸多学者针对冗余设计进行了研究^[1-5]。相比于热储备系统,冷储备系统中备份元件具有接近于0的失效率,系统具有最高的可靠度^[6]。温储备系统作为热储备系统和冷储备系统的折中选择^[7],比热储备系统消耗较少的电源、元件具有较低的失效率,比冷储备系统备份元件模式转换更迅速。目前,针对导弹测试系统提高可靠性的研究较少,郝鑫刚等^[8]采用可靠性框图技术对油井压力测试系统的可靠性进行分析,得到测试系统的失效率和平均无故障工作时间。提升系统可靠性的研究主要集中在系统的优化配置上,Wang等^[9]运用通用生成函数和遗传算法对元件可靠性指标为区间值的冷储备系统进行优化配置研究。针对导弹测试系统可靠性要求高的特点,本文通过分析不同类型冗余配置的可靠性评估方法,对导弹测试系统结构进行分析,并对其进行可靠性优化冗余设计,给出导弹测试系统不同类型冗余的可靠性评估,最后给出仿真比较结果,为导弹测试系统可靠性设计提供有益的参考。

1 系统冗余配置的可靠性评估

冗余系统分为热备系统、冷备系统和温备系统^[10]:热备系统中,运行元件与储备元件具有相同的失效率,一般用二项概率分布函数进行描述;冷备系统中,储备元件几乎不受外界环境因素的影响,其失效率接近于0,一般用泊松概率分布函数描述;在温备系统中,其失效率相对热储备系统中低,但同时又比冷备系统中高,一般应用泊松二项概率分布函数描述^[11]。在冗余系统中,假设储备元件的工作模式转换瞬间完成,且不存在转换失效情况。当元件的失效分布服从指数分布时,元件失效的概率密度函数为 $f(t) = \lambda_0 e^{-\lambda_0 t}$,通过积分即可确定可靠度函数 $R_u = e^{-\lambda_0 t}$ 。

1) 热备系统可靠性评估

对于 $M+N$ 热备系统,工作元件与储备元件的失效率相同,即 $\lambda_s = \lambda_0$;应用二项概率密度函数或者负二项概率密度函数计算热储备系统的可靠度^[12]。热储备系统的可靠度用二项概率密度函数表示为

$$R_{M+N} = \sum_{n=0}^N \binom{M+N}{n} [1 - e^{-\lambda_0 t}]^n [e^{-\lambda_0 t}]^{M+N-n} \quad (1)$$

式(1)表示热备系统从一开始的 $M+N$ 个元件工作运行到只有 M 个元件工作运行时的可靠度。相比于二项概率密度函数,应用负二项概率密度函数表示热备系统的可靠度时可以减少计算量:

$$R_{M+N} = \sum_{n=0}^N \binom{n+M-1}{n} [1 - e^{-\lambda_0 t}]^n [e^{-\lambda_0 t}]^M \quad (2)$$

2) 冷备系统可靠性评估

冷储备系统为冗余系统提供了最大的可靠度^[13]。对于 $1+1$ 冷储备系统,系统处于工作运行状态的情况可以分为两种:元件1一直处于正常运行状态;元件1失效后元件2

继续工作直到任务结束。对于第1种情况,系统可靠度函数为 $R_1 = R_u = e^{-\lambda_0 t}$;对于第2种情况,系统可靠度函数表示为

$$R_{12} = \int_0^t [e^{-\lambda_0 t_1} \cdot \lambda_0 dt_1] [e^{-\lambda_0(t-t_1)}] = \lambda_0 t e^{-\lambda_0 t} \quad (3)$$

式中: $t_1 \in [0, t]$ 。则 $1+1$ 冷储备系统的可靠度函数表示为

$$R_{1+1} = R_1 + R_{12} = (1 + \lambda_0 t) e^{-\lambda_0 t} \quad (4)$$

采用类推法确定 $M+N$ 冷储备系统的可靠度函数:

$$R_{M+N} = e^{-M\lambda_0 t} \sum_{n=0}^N \frac{(M\lambda_0 t)^n}{n!} \quad (5)$$

3) 温储备系统可靠性评估

作为热储备系统与冷储备系统的折中,温储备系统中的储备元件处于休眠状态,由于元件处于一个相对温和的环境中,其失效率比处于工作状态时低^[14]。如图1所示, $1+2$ 温储备系统完成任务存在4种情况:元件1一直处于工作运行状态,直到任务结束;元件1在 t_1 时刻失效,随即元件2从休眠状态转入工作状态,一直运行至任务结束;元件1在 t_2 时刻失效,随即元件3(元件2失效)从休眠状态转入工作状态,一直运行至任务结束;元件1在 t_3 时刻失效,随即元件2从休眠状态转入工作状态,运行至 t_4 时刻时失效,此时元件3从休眠状态转入工作状态,一直运行至任务结束。

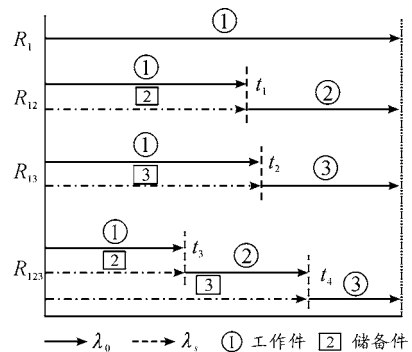


图1 $1+2$ 温储备系统可靠性框图

类似于 $1+1$ 冷储备系统,在 $1+1$ 温储备系统中路径 R_{12} 的可靠度函数表示为^[13]

$$R_{12} = \int_0^t [e^{-\lambda_0 t_1} \cdot \lambda_0 dt_1] [e^{-\lambda_s t_1}] [e^{-\lambda_0(t-t_1)}] = e^{-\lambda_0 t} (\lambda_0 / \lambda_s) (1 - e^{-\lambda_s t}) \quad (6)$$

则 $1+1$ 温储备系统的可靠度函数为

$$R_{1+1} = e^{-\lambda_0 t} [1 + (\lambda_0 / \lambda_s) (1 - e^{-\lambda_s t})] \quad (7)$$

式(7)为 $1+1$ 温储备系统的泊松二项概率密度函数,当 $\lambda_s \rightarrow 0$ 时函数转化为泊松概率密度函数,即冷储备系统的可靠度函数,当 $\lambda_s \rightarrow \lambda_0$ 时函数转化为负二项概率密度函数,即热储备系统的可靠度函数。可见,冷储备系统和热储备系统是温储备系统的特殊形式。

类似地,可以确定路径 R_{13} 和 R_{123} 的可靠度函数,则 $1+2$ 温储备系统的可靠度函数为

$$R_{1+2} = e^{-\lambda_0 t} \left[1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_s} (1 - e^{-\lambda_s t}) + \frac{\lambda_0}{\lambda_s} \left(1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_s} \right) \frac{(1 - e^{-\lambda_s t})^2}{2} \right] \quad (8)$$

令 $\alpha = M(\lambda_0/\lambda_s)$, $\beta = 1 - e^{-\lambda_s t}$, $R_u = e^{-\lambda_0 t}$, 则式(8)可以简化为

$$R_{1+N} = R_u [1 + \alpha\beta + (\alpha + 1)\alpha(\beta^2/2)] \quad (9)$$

对于 $1 + N$ 温储备系统有:

$$R_{1+N} = \sum_{n=0}^N \binom{n + \alpha - 1}{n} \beta^n (1 - \beta)^\alpha \quad (10)$$

式中: $(1 - \beta)^\alpha = e^{-\lambda_0 t} = R_u$, $\alpha > 0$ 但不一定为整数。

式(10)中的二项系数 $\binom{x}{r}$ 适用于所有的整数值 r 和任意值 x , 将其表示成 gamma 函数形式:

$$\binom{n + \alpha - 1}{n} = \frac{\Gamma(n + \alpha)}{n! \Gamma(\alpha)} \quad (11)$$

将 R_u 替换成 $R_u^M = (1 - \beta)^\alpha$, 使用通式 $\alpha = M(\lambda_0/\lambda_s)$, 式(10)进一步推广确定 $M + N$ 温储备系统的泊松二项概率密度函数, 表示为

$$R_{M+N} = \sum_{n=0}^N \binom{n + \alpha - 1}{n} \beta^n (1 - \beta)^\alpha \quad (12)$$

式(12)表示了 M 个元件正常运行、 N 个元件处于储备状态

的温储备系统可靠度函数, 该式为泊松分布概率密度函数和二项分布概率密度函数的通用形式, 当 $\lambda_s = \lambda_0$ 时, 函数转化为负二项概率密度函数或者二项概率密度函数, 即为热储备系统的可靠度函数, 当 $\lambda_s = 0$ 时, 函数转化为泊松概率密度函数, 即为冷储备系统的可靠度函数。

2 导弹测试系统结构及冗余配置

1) 导弹测试系统可靠性结构模型

以某型导弹测试系统为例, 测试系统主要由电源组件、电子线路、继电器板、激励信号生成器、导弹模拟器、信号采集板、计算机系统和显示器组成。冗余配置后, 可以得到系统可靠性简化框图如图2: 1) 测试系统信号生成单元, 包含4个继电器板与6个激励信号生成器; 2) 包含相同底板、伺服板和机构的冗余电子线路; 3) 导弹模拟器; 4) 用于采集导弹模拟器输出数据、进行信号转换和数据传输的冗余信号采集电路板; 5) 电源组件; 6) 两台信号处理计算机。

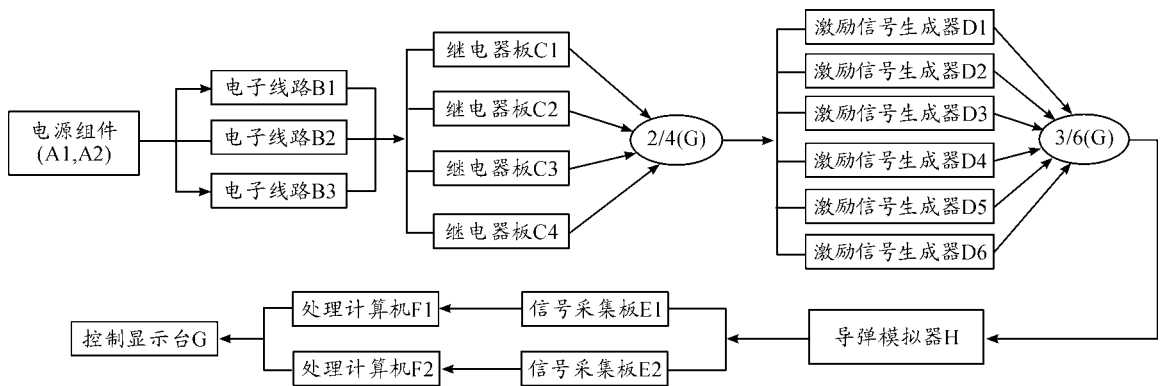


图2 导弹测试系统可靠性简化框图

2) 导弹测试系统冗余组件优化设计

通过对该导弹测试系统可靠性结构分析中可以看出, 电源、电子线路组合、计算机与信号采集板为导弹测试系统的薄弱环节, 设计中重点考虑提高导弹测试系统这些冗余组件的可靠度水平。如图3所示: 在冗余组件中配置电源(A1、A2)、电子线路(B1、B2、B3)、计算机与信号采集板组合(E1F1、E2F2)。

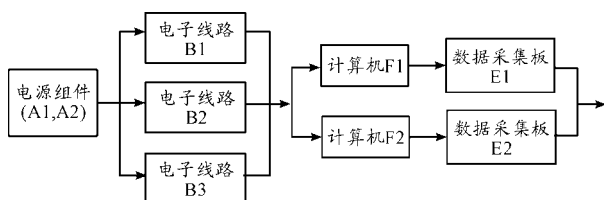


图3 导弹测试系统冗余组件优化配置框图

3 多类型综合冗余配置的导弹测试系统可靠性评估

在导弹测试系统冗余组件中, 主备电源设置为温储备、电子线路组合设置为热储备、综合计算机与信号采集板组合设置为冷储备, 元件的瞬时状态转移概率信息如表1所示。

表中 $\lambda_{i,j}$ 为元件从状态 i 转移到状态 j 的瞬时概率。对于2状态元件而言, 只存在 $\lambda_{2,1}$, 表示元件从完好状态2向故障失效状态1转移的瞬时概率; 对于3状态元件而言, $\lambda_{3,2}$ 表示元件从完好状态3向退化状态2转移的瞬时概率, $\lambda_{3,1}$ 表示元件从完好状态3向故障失效状态1转移的瞬时概率, 并假设 $\lambda_{3,2} = \lambda_{2,1}$ 。以 $\Delta t = 1$ h 为采样时间, 通过元件的瞬时状态转移概率来构建导弹测试设备各单元的状态转移 Markov 过程, 确定各单元处于不同状态的概率。

表1 元件的瞬时状态转移概率信息

符号	单元	状态数	瞬时状态转移概率($\times 10^{-6}$ h)		
			$\lambda_{3,2}$	$\lambda_{3,1}$	$\lambda_{2,1}$
A1、A2	主备电源	2	-	-	17
B1、B2	主备电子线路	2	-	-	15
C1 - C4	继电器板 1-4	3	22	13	22
D1 - D6	激励信号器 1-6	3	33	12	33
E1、E2	信号采集板 1,2	2	-	-	20
F1、F2	处理计算机 1,2	3	6	4	6
G	控制显示台	3	5	2	5

1) 导弹测试系统电源可靠度

主电源 A1 处于正常工作状态,备用电源 A2 处于温储备状态,其休眠因子为 0.1,即 $\lambda_s = 0.1 \times \lambda_0 = 1.8 \times 10^{-6}$,其可靠度函数表示为

$$R_{wsp} = e^{-\lambda_0 t} [1 + (\lambda_0 / \lambda_s)(1 - e^{-\lambda_s t})] = e^{-18 \times 10^{-6} t} \cdot [1 + 10 \times (1 - e^{1.8 \times 10^{-6} t})] \quad (15)$$

当主备电源为热储备时,其可靠度函数表示为:

$$R_{hsp} = \sum_{n=0}^1 \binom{2}{n} [1 - e^{-\lambda_0 t}]^n [e^{-\lambda_0 t}]^{2-n} = 2e^{-18 \times 10^{-6} t} - [e^{-18 \times 10^{-6} t}]^2 \quad (16)$$

当采用近似计算方法时,主备电源的可靠度函数为:

$$R_{appr} = \sum_{n=0}^1 \binom{11}{n} [1 - e^{-\lambda_s t}]^n [e^{-\lambda_s t}]^{11-n} = 11 \cdot [e^{-1.8 \times 10^{-6} t}]^{10} - 10 [e^{-1.8 \times 10^{-6} t}]^{11} \quad (17)$$

电源的可靠度曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出,当电源采用温储备冗余方式时,其可靠度比采用热储备时高;电源温储备冗余设置时,其可靠度近似计算结果与精确计算结果十分接近。

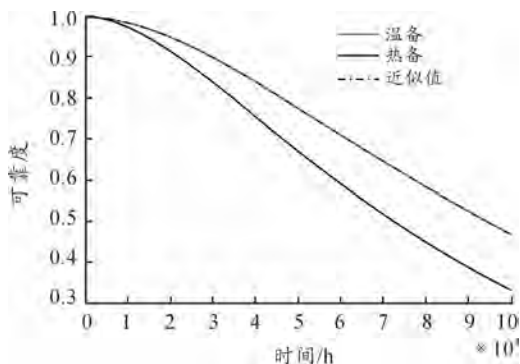


图4 电源可靠度曲线

2) 导弹测试系统电子线路组合可靠度

电子线路组合为热储备系统,在现有测试系统中为 2 部件热储备,在优化配置方案中为 3 部件热储备,满足 $1/k$ 配置条件,其可靠度函数分别为

$$R_{hsp:1+1} = \sum_{n=0}^1 \binom{n}{n} [1 - e^{-\lambda_0 t}]^n [e^{-\lambda_0 t}]^1 = 2e^{-15 \times 10^{-6} t} - [e^{-15 \times 10^{-6} t}]^2 \quad (18)$$

$$R_{hsp:1+2} = \sum_{n=0}^2 \binom{n}{n} [1 - e^{-\lambda_0 t}]^n [e^{-\lambda_0 t}]^1 = 3e^{-15 \times 10^{-6} t} - 3[e^{-15 \times 10^{-6} t}]^2 + [e^{-15 \times 10^{-6} t}]^3 \quad (19)$$

电子线路组合的可靠度曲线如图 5 所示。由于增加了一个储备元件,1+2 热储备系统比 1+1 热储备系统可靠度高,随着部件使用时间的增加二者的差异更加明显。因此,在原电子线路组合中增加冗余部件是提高可靠度的有效方法。

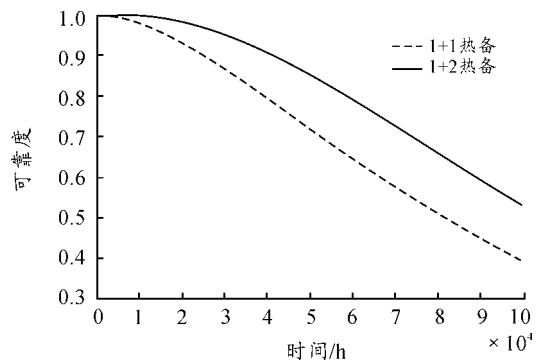


图5 电子线路组合可靠度曲线

3) 测试计算机与信号采集板组合可靠度

在测试系统中计算机与信号采集板串联后热储备,现考虑将二者串联后冷储备。当组合为热储备时,可靠度函数为

$$R_{hsp} = \sum_{n=0}^1 \binom{n}{n} [1 - e^{-\lambda_0 t}]^n [e^{-\lambda_0 t}]^1 = 2e^{-30 \times 10^{-6} t} - [e^{-30 \times 10^{-6} t}]^2 \quad (20)$$

当组合为冷储备时,可靠度函数为

$$R_{rsp} = (1 + \lambda_0 t) e^{-\lambda_0 t} = (1 + 30 \times 10^{-6} t) e^{-30 \times 10^{-6} t} \quad (21)$$

近似计算时假设 $K=2, l=5$, 则 $\lambda_s = \frac{\lambda_0}{K^l} = \frac{1}{2^5} \lambda_0$, 可以近似为 32 个元件处于工作运行状态、1 个元件处于热储备状态,元件失效率为 λ_s , 则计算机与信号采集板的近似可靠度为

$$R_{appr} = \sum_{n=0}^1 \binom{n+31}{n} [1 - e^{-\lambda_s t}]^n [e^{-\lambda_s t}]^{32} = 33 \cdot [e^{-0.9375 \times 10^{-6} t}]^{32} - 32 [e^{-0.9375 \times 10^{-6} t}]^{33} \quad (22)$$

计算机与信号采集板组合的可靠度曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出:当计算机与信号采集板组合采用冷储备冗余方式时,其可靠度比采用热储备时高;计算机与信号采集板组合为冷储备冗余设置时,其可靠度精确计算结果与近似计算结果随参数选取的不同出现不同程度的误差,当设置 $K=2, l=5$ 时,在 $t=1 \times 10^5$ h 时,二者之间相差 6.8×10^{-3} , 当设置 $K=4, l=5$ 时,在 $t=1 \times 10^5$ h 时,二者之间相差 2.1858×10^{-4} 。因此,在冷储备系统中适当地增大参数 K 和 l 取值就可以获取误差较小的可靠度近似值。

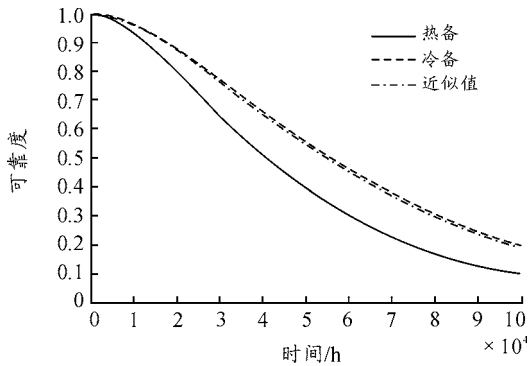


图6 计算机与采集板组合可靠性曲线

4 结论

本文通过分析导弹测试系统的结构,给出提高系统可靠性的冗余优化配置方案,并根据不同类型组件给出热备、冷备和温备配置的可靠性评估。给出了可靠性不同类型冗余配置的计算方法,分析了某导弹测试系统可靠性结构及可靠性优化冗余配置,并对影响可靠性的关键部件进行了可靠性评估,最后给出仿真结果。根据测试系统不同部件的功能及特点,综合选择多类型的冗余配置,更能符合设备的实际,达到比较好的冗余配置的可靠性要求。

参考文献:

- [1] 马龙,代超璠,裴昕,等. MEMS陀螺仪冗余配置故障检测方法[J]. 系统工程与电子技术,2017,39(10):2298-2304.
- [2] CHIN-CHIH C. Optimum preventive maintenance policies for systems subject to random working times, replacement, and minimal repair[J]. Computers & Industrial Engineering,2014,67(07):185-194.
- [3] 刘志君,高亚奎,章卫国. 成本约束的表决冗余系统可靠性优化与分配[J]. 北京航空航天大学学报,2014,40(12):1747-1753.
- [4] 刘宏志,高立群,孔祥勇,等. 改进差分进化算法在可靠性冗余分配问题中的应用[J]. 控制与决策,2015,30(5):917-922.

- [5] 袁宇翔,邹斌. 高可靠性车载惯性传感器冗余配置方案优化技术研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2018,39(08):1369-1375.
- [6] 陈童,狄鹏,尹东亮. 考虑维修优先权的多状态冷储备系统可靠性模型[J]. 兵工学报,2017,38(7):1422-1429.
- [7] 蔡晓丽,唐应辉. 具有温储备失效特征和单重休假 $Min(N, V)$ 控制策略的 M/G/1 可修排队系统[J]. 应用数学学报,2017,40(5):702-726.
- [8] 郝鑫刚,李新城,等. 油井压力测试系统可靠性框图分析[J]. 传感技术学报,2016,29(1):64-68.
- [9] WANG W, XIONG J L, XIE M. A study of interval analysis for cold-standby system reliability optimization under parameter uncertainty[J]. Computers & Industrial Engineering,2016,97(11):93-100.
- [10] WANG C N, XING L D, SUPRASAD V A. A fast approximation method for reliability analysis of cold-standby systems[J]. Reliability Engineering and System Safety,2012,106(05):119-126.
- [11] YUAN L, MENG X Y. Reliability analysis of a warm standby repairable system with priority in use[J]. Applied Mathematical Modeling,2011,35(08):4295-4303.
- [12] 李志强,徐廷学,安进,等. 冗余系统共因失效动态贝叶斯网络建模[J]. 仪器仪表学报,2018,39(3):190-198.
- [13] MONIKA T, RAJIV N R, NOMESH B. Imperfect repair modeling using Kijima type generalized renewal process[J]. Reliability Engineering and System Safety,2014,124(12):24-31.
- [14] DINH T N, YANN D, MITRA F. Analytical properties of an imperfect repair model and application in preventive maintenance scheduling[J]. European Journal of Operational Research,2017,256(01):439-453.
- [15] MAXIM F. On the optimal degree of imperfect repair[J]. Reliability Engineering and System Safety,2015,138(11):54-58.

科学编辑 杜博军 博士(中国白城兵器试验中心高级工程师)
责任编辑 周江川