

航空装备故障风险分析与趋势预测方法

李飞敏

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘要: 针对还未系统形成飞行试验故障风险分析与趋势预测方法的问题, 提出基于可拓学的飞行试验故障后果定量分析方法, 综合应用蒙特卡洛抽样以及层次分析法的飞行试验故障可能性评定方法以及基于灰色波形的故障风险综合预警信号预测方法; 通过实例验证结果表明: 基于灰色波形的故障风险综合预警信号预测方法预测航空装备故障风险趋势有效, 并且更适合于短期预测; 飞行试验期间可以根据装备故障发生的时间先后, 建立设备、系统或整机的风险综合预警指数曲线, 实现实时监控与短期内的趋势预测, 该方法为后续飞行试验故障风险监测与预警提供了一种可行的思路。

关键词: 航空装备; 飞行试验; 风险等级; 故障风险; 趋势预测

本文引用格式: 李飞敏. 航空装备故障风险分析与趋势预测方法[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(02): 102-107.

Citation format: LI Feimin. Fault Risk Analysis and Trend Prediction Method of Aviation Equipment [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(02): 102-107.

中图分类号: V217; E926.3; U8

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2021)02-0102-06

Fault Risk Analysis and Trend Prediction Method of Aviation Equipment

LI Feimin

(China Flight Test Research Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: In order to solve the problem that the method of fault risk analysis and trend prediction of flight test has not been formed systematically, a quantitative analysis method of flight test fault consequence based on extenics method, the flight test fault possibility assessment method based on Monte Carlo sampling and analytic hierarchy process (AHP) and the comprehensive early warning signal prediction method of fault risk based on Grey waveform were proposed. The results show that the method based on Grey waveform is effective in the trend prediction of aviation equipment fault risk, and it is more suitable for short-term prediction. During the flight test, the comprehensive early warning index curve of the fault risk of equipment, system or whole aircraft can be established according to the time sequence of fault, so as to realize real-time monitoring and short-term trend prediction. This method provides a feasible idea for subsequent flight test fault risk monitoring and early warning.

Key words: aviation equipment; flight test; risk level; fault risk; trend prediction

飞行试验是航空器充分暴露故障的一个必经阶段, 具有高风险性, 被人们称为“刀尖上的舞蹈”。飞行试验故障风险评估手段和方法的不到位, 无形中给试飞员、试飞航空装备

带来了较大的安全风险。另外, 随着试飞任务量的增加以及试飞综合化程度的提升, 对故障风险的评估也提出了更高的要求。

收稿日期: 2020-06-20; **修回日期:** 2020-07-18

基金项目: 航空科学基金项目(民用飞机安全性评估技术研究和2012ZA20003)

作者简介: 李飞敏(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事适航与安全性研究。

文献[1]和文献[3]将可拓学方法应用于后果等级评价中,为本论文研究提供了方法参考;文献[2]以及文献[4-7]从标准角度对失效可能性和失效后果等级进行规范;文献[8-11]和文献[14]针对失效可能性或故障率给出了评价或预测的方法;文献[13]给出了灰色理论和非参数回归分别在维修经费投入和航材消耗中的预测应用。但是,针对飞行试验来说,还未系统性形成故障风险分析与趋势预测方法。

针对上述问题提出了适用于试飞阶段的故障风险评估定量化计算方法及综合预警预测方法,为后续开展飞行试验故障风险监测与预警提供了技术支撑。

1 航空装备故障风险分析与趋势预测原理

针对航空装备风险难以定量化描述以及风险趋势预测等问题,利用航空装备风险是故障后果和故障可能性的联合度量,从而首先针对航空装备故障后果和故障可能性分别进行定量化表征,然后根据风险指数矩阵法确定航空装备目前风险状态,并根据历史风险状态,采用灰色模型进行风险趋势预测。具体方法原理见图1。

2 算法实现

2.1 故障后果定量分析

参考相关标准^[3]及国内外资料^[2,4-7],本文针对民用航

空装备飞行试验阶段故障后果进行等级划分,并做了适当改进,将故障后果分为Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级和Ⅴ级,即不严重、不太严重、一般、比较严重和非常严重。具体划分情况见表1。

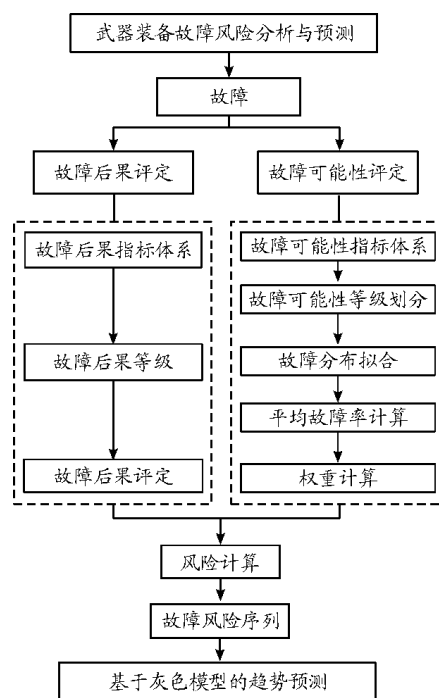


图1 方法原理框图

表1 飞行试验阶段故障后果等级划分

因素	故障后果等级				
	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级
受伤人数	无	19	20 ~ 49	50 ~ 99	100
死亡人数	无	1 ~ 2	3 ~ 9	10 ~ 29	30
财产损失(对装备的直接经济损失)/万元	<50	>50 ~ 100	>100 ~ 500	>500 ~ 1 000	>1 000
停飞损失	损失可忽略	损失较小	损失一般	损失较大	损失极大
对其他在飞航空装备的影响程度	无影响	轻度影响	中度影响	高度影响	极度影响
环境影响程度	无影响	轻度污染	中度污染	高度污染	极度污染
单位信誉影响程度	无影响	轻度影响	中度影响	高度影响	极度影响
其他潜在影响	无影响	轻度影响	中度影响	高度影响	极度影响

故障后果定量分析主要是正确建立评价指标以及定量化等级,然后选择合适的评价方法客观反映评价指标的关系。本论文具体计算方法参见文献[2]。

取对应关联函数最大时的失效后果严重度等级为评价结果,即根据式(1):

$$K_{j_0}(P) = \max_{j_0 \in \{1, 2, L, m\}} \sum_i^n \alpha_i \begin{cases} \frac{\rho(v_i, V_{ij})}{D(v_i, V_{ij}, V_{j_0})} = -\frac{\rho(v_i, V_{ij})}{|V_{ij}|} & V_i \subset V_{ij} \\ \frac{\rho(v_i, V_{ij})}{D(v_i, V_{ij}, V_{j_0})} = \frac{\rho(x_i, V_{ij})}{\rho(v_i, V_{j_0}) - \rho(v_i, V_{ij})} & V_i \not\subset V_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

可以判断该故障的严重度级别为 j_0 。

其中, j_0 为所求故障的严重度级别; P 为待评物元; $K_{j_0}(P)$ 是取值最大时的关联函数值; α_i 为第 i 个权重; V_{ij} 为各个评价指标关于不同风险级别所对应的范围,简称经典域; V_{i0} 为 V_0 关于特征 c_i 所取的量值的范围,即 p 的节域, p 表示失效后果严重度级别的全体; $\rho(v_i, V_{ij})$ 是点 v_i 到区间 V_{ij} 的距; $D(v_i, V_{i0})$ 为点到空间的距。

2.2 故障可能性评定

针对武器装备外场发生的故障,根据外场该故障发生的概率区间,并采用蒙特卡洛抽样计算得到平均故障率;根据外场故障可能性评价指标体系,应用层次分析法进行权重计算,得到修正系数;即在平均故障率的基础上乘以修正系数,最终得到故障概率,则按照故障概率可判断得到故障失效可能性等级。

由于飞行试验具体自身的特殊性,除了装备本身的技术因素以外,还存在人的因素(管理归为人的因素)、环境因素等。因此,本文引入“人-机-环”理论,建立外场故障可能性评价指标体系,见表2。

表2 外场故障可能性评价指标体系

序号	评价指标	指标权重	具体影响因素分析
1	技术因素	α_1	硬件设计不合理
			制造工艺不良
			软件缺陷
			使用不正确的技术资料
			使用存在缺陷的保障设备
2	人为因素	α_2	机务人员、场务人员、指挥员、飞行员、领航员、通信员、空中机械师等专业知识不够
			工作强度过大
			沟通协调不够
			风险识别措施不到位
			维修环境狭小,操作姿势难度较大,振动、辐射等
3	环境因素	α_3	高温、低温、风暴、沙尘等恶劣环境

注:对于每一条故障,确定其影响因素时,可以为多个影响因素。

参考相关资料中故障可能性等级基础上^[6-13],给出外场故障可能性等级划分,具体见表3。

用Gamma分布来拟合产品的故障率。通过蒙特卡洛方法可以获得大量服从Gamma分布的故障率随机值,假设得到了 m 个故障率样本值 $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$,通过求随机抽样故

障率的平均值作为产品平均故障率,则为

$$\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m}{m}$$

(2)

表3 外场故障可能性等级划分

等级	说明	故障概率
A	极少	0.000 000 ~ 0.000 010
B	很少	0.000 011 ~ 0.000 100
C	偶然	0.000 101 ~ 0.001 000
D	很可能	0.001 001 ~ 0.010 000
E	经常	0.010 001 ~ 10.000 00

注:故障概率=设备故障率×修正系数。

2.3 航空装备故障风险综合预警

风险是危险可能性和危险严重性的综合度量,对航空装备及其系统的风险等级进行合理的划分,可以为后续采取相适应的安全监控措施提供依据。在本文基于故障可能性和故障后果的基础上,利用风险指数矩阵法^[15],对航空装备试飞期间风险进行评价。

建立的风险指数矩阵元素如表4,建立风险接受原则,具体见表5。

表4 风险指数矩阵元素

危险可能性等级	危险严重性等级				
	V (非常严重)	IV (比较严重)	III (一般)	II (不太严重)	I (不严重)
E(经常)	1	3	5	8	10
D(很可能)	2	6	12	14	17
C(偶然)	4	11	15	19	21
B(很少)	7	13	18	22	24
A(极少)	9	16	20	23	25

表5 风险接受原则

风险指数	风险接受原则	对应加权后的综合预警指数	状态区域
1~6	不可接受,应立即采取解决措施	(4,5]	红灯
7~15	不希望、需订购方决策	(3,4]	黄灯
16~20	订购方评审后接受	(2,3]	绿灯
21~25	不需评审即可接受	[1,2]	蓝灯

根据表4和表5,可以给出航空装备试飞阶段风险等级以及接受的程度。

2.4 故障风险趋势预测

利用灰色波形进行故障风险综合预警信号预测,具体步骤^[14]如下:

1) 由原始数据序列,给出序列折线。设原始序列 $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$, 则 $\{x_k = x(k) + (t-k)(x(k+1) - x(k)) \mid k=1, 2, \dots, n-1\}$ 称为序列 X 的折线,仍记为 X , 则

$$X = \{x_k = x(k) + (t-k)(x(k+1) - x(k)) \mid k=1, 2, \dots, n-1\} \quad (3)$$

其中, $x(k)$ 为原始数据序列的第 k 个点; t 为对应折线上的横坐标变量; x_k 为对应 t 折线上纵坐标变量。

2) 取定等高线。设序列 X 折线的最大值 $\sigma_{\max} = \max_{1 \leq k \leq n} \{x(k)\}$, 最小值 $\sigma_{\min} = \min_{1 \leq k \leq n} \{x(k)\}$, 对于 $\forall \xi \in [\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]$, 称序列折线 $X = \xi$ 为 ξ -等高线。

3) 计算等高点。方程组

$$\begin{cases} X = \{x(k) - (t-k)(x(k+1) - x(k)) \mid k=1, 2, \dots, n-1\} \\ X = \xi \end{cases} \quad (4)$$

的解为 ξ -等高点。

4) 给出等高时刻序列。设 $X_\xi = (P_1, P_2, \dots, P_m)$ 为 ξ -等高点序列, 其中 ξ -等高点序列点 P_i 位于第 t_i 折线上, 其坐标为 $(t_i + \frac{\xi - x(t_i)}{x(t_i+1) - x(t_i)}, \xi)$ 。

$$\text{令横坐标 } q(i) = t_i + \frac{\xi - x(t_i)}{x(t_i+1) - x(t_i)} \quad (i=1, 2, \dots, m),$$

则称序列 $Q^{(0)} = (q(1), q(2), \dots, q(m))$ 为 ξ -等高时刻序列。

5) 建立 GM(1,1) 预测模型群, 计算等高时刻序列。对于 $\forall \xi \in [\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]$, 建立 ξ -等高时刻序列 GM(1,1), 计算 ξ -等高时刻的预测值。

6) 生成预测波形。设 $\hat{q}_i(m_i+1), \hat{q}_i(m_i+2), \dots, \hat{q}_i(m_i+k_i)$ 为 ξ_i -等高时刻的 GM(1,1) 预测值, 将预测值从小到大重新排列, 设为 $\hat{q}(1) < \hat{q}(2) < \dots < \hat{q}(n_s)$, 若 $X = \xi_{\hat{q}(k)}$ 为 $\hat{q}(k)$ 所对应的等高线, 则 $X^{(0)}$ 的预测波形为

$$X = \hat{X}^{(0)} = \{(\xi_{\hat{q}(k)} + (t - \hat{q}(k))(\xi_{\hat{q}(k+1)} - \xi_{\hat{q}(k)})) \mid k=1, 2, \dots, n_s\}$$

其中, $\xi_{\hat{q}(k)}$ 为 $\hat{q}(k)$ 所对应的等高线。

3 实例验证

3.1 故障后果案例

现以某型装备发动机涡轮叶片裂纹为例, 对故障后果进行评价。根据该故障的具体情况和损失大小, 设定造成的后果为: u_{11} 受伤人数 I 级; u_{12} 死亡人数 I 级; u_{21} 财产损失 II 级; u_{22} 停飞损失 II 级(该架机停飞 3 个飞行日); u_{31} 环境影响程度 I 级; u_{41} 对其他在飞装备的影响程度 II(其他三架装备停

飞 3 个飞行日); u_{42} 单位信誉影响程度 I 级; u_{43} 其他潜在影响 II 级。

构建评价对象的经典域矩阵 R_{I-V} 、节域矩阵 R_p 和待评物元 R 如下:

$$R_{I-V} = \begin{bmatrix} \langle 0, 0.2 \rangle & \langle 0.2, 0.4 \rangle & \langle 0.4, 0.6 \rangle & \langle 0.6, 0.8 \rangle & \langle 0.8, 1 \rangle \\ \langle 0, 0.2 \rangle & \langle 0.2, 0.4 \rangle & \langle 0.4, 0.6 \rangle & \langle 0.6, 0.8 \rangle & \langle 0.8, 1 \rangle \\ \langle 0, 0.2 \rangle & \langle 0.2, 0.4 \rangle & \langle 0.4, 0.6 \rangle & \langle 0.6, 0.8 \rangle & \langle 0.8, 1 \rangle \\ \langle 0, 0.2 \rangle & \langle 0.2, 0.4 \rangle & \langle 0.4, 0.6 \rangle & \langle 0.6, 0.8 \rangle & \langle 0.8, 1 \rangle \\ \langle 0, 0.2 \rangle & \langle 0.2, 0.4 \rangle & \langle 0.4, 0.6 \rangle & \langle 0.6, 0.8 \rangle & \langle 0.8, 1 \rangle \\ \langle 0, 0.2 \rangle & \langle 0.2, 0.4 \rangle & \langle 0.4, 0.6 \rangle & \langle 0.6, 0.8 \rangle & \langle 0.8, 1 \rangle \\ \langle 0, 0.2 \rangle & \langle 0.2, 0.4 \rangle & \langle 0.4, 0.6 \rangle & \langle 0.6, 0.8 \rangle & \langle 0.8, 1 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_p = \begin{bmatrix} \langle 0, 1 \rangle \\ \langle 0, 1 \rangle \\ \langle 0, 1 \rangle \\ \langle 0, 1 \rangle \\ \langle 0, 1 \rangle \\ \langle 0, 1 \rangle \\ \langle 0, 1 \rangle \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} \langle 0, 0.2 \rangle \\ \langle 0, 0.2 \rangle \\ \langle 0.2, 0.4 \rangle \\ \langle 0.2, 0.4 \rangle \\ \langle 0, 0.2 \rangle \\ \langle 0.2, 0.4 \rangle \\ \langle 0, 0.2 \rangle \end{bmatrix}$$

由式(1)计算出待评物元相对各评价等级的隶属度, 即后果严重程度等级。计算为

$$K_j(P) = (-0.2672, -0.2458, -1.0126, -2.2181, -2.9175)$$

其中, $j = \text{I}, \text{II}, \text{III}, \text{IV}, \text{V}$ 。

$$\text{进而可知, } K_{j_0}(P) = \max_{j_0 \in \{1, 2, \dots, m\}} K_j(P) = -0.2415, j = \text{II}。$$

按照最大隶属度原则, 实例故障的后果严重程度等级为 II 级, 即为不太严重。

3.2 故障可能性案例

仍以该型发动机涡轮叶片裂纹为例, 进行其故障可能性等级评定, 首先从技术因素、人为因素和环境因素等进行故障影响因素分析。

1) 平均故障率计算。利用 Gamma 分布, 根据试飞数据获得故障率所处等级范围为 $[10^{-6}, 10^{-5}]$, 即 $LL = 10^{-6}$, $UL = 10^{-5}$ 。根据生产方和订购方风险, 选定 $P1 = 0.10, P2 = 0.90$ 。

利用 Monte Carlo 抽样模拟产生 2 000 个随机数, 并按照 Gamma 概率密度函数计算 2 000 个随机数的 $g(\lambda; a, b)$ 。求得 Gamma 概率密度函数的最大值 $C = 14.8842$, 则采用均匀随机数函数产生区间 $[0, C]$ 上的 2 000 个随机数, 当 $y \leq g(\lambda; a, b)$ 时, 接受 λ 为 $g(\lambda; a, b)$ 分布随机数, 则 λ 可作为故障率的 1 个抽样值, 直到产生足够多的随机抽样样本数。程序运行结果为共有 1 209 个随机数满足评估要求, 如图 2 中的紫红色圆圈; 共有 791 个不满足要求, 如图 2 中的绿色圆圈, 针对 1 209 个故障率的样本值, 通过求随机抽样故障率

的平均值作为产品平均故障率,则为

$$\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{1209}}{1209} = 0.42886 \times 10^{-5} / h^{-1}$$

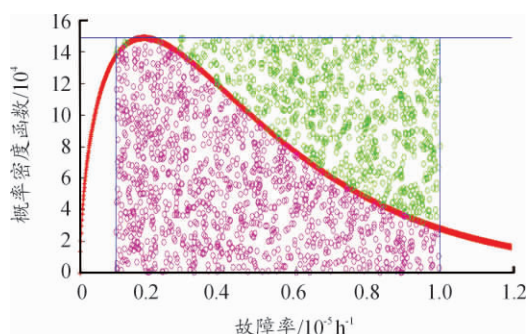


图2 用于舍取抽样的 Gamma 分布图

2) AHP 计算权重。利用 AHP 计算权重,经过一致性检验和归一化处理,最终得到权重为

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)^T = (0.7306, 0.0810, 0.1884)^T$$

故障概率为

$$F = \lambda \times \frac{1}{\alpha_1} = 0.42886 \times 10^{-5} \times \frac{1}{0.7306} = 0.5870 \times 10^{-5} / h^{-1}$$

故障可能性等级: 根据计算得到的故障概率,查表得到故障可能性等级为 A 级,即为极少发生。

3.3 航空装备故障风险趋势

该型发动机涡轮叶片断裂故障可能性等级为 A 级,故障后果的严重度等级为 II 级,根据风险指数矩阵,确定风险指数为 23,根据表 5,针对不同风险指数的风险接受原则为不需评审即可接受。在实际使用中,可根据具体航空装备发生故障情况,按照上述方法可得到航空装备的故障风险趋势,如图 3 所示。

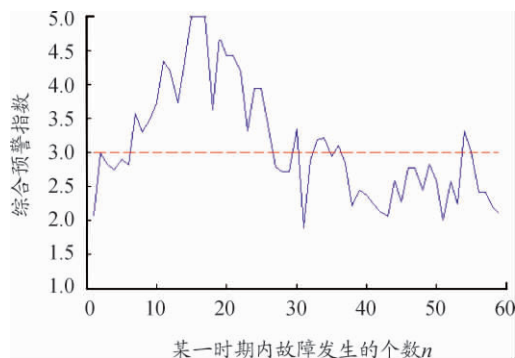


图3 某航空装备一定时间段内故障风险趋势曲线

3.4 故障风险综合预警信号预测

针对某型航空装备的综合预警信号序列,分别进行短期和中期的预测,预测结果如图 4 和图 5 所示。从图 4 可以看出: 灰色波形预测方法预测预警信号,短期预测较好,利用前

54 个点预测后 5 个点的预测准确率达到了 85%。从图 5 可以看出,中期预测效果不太理想,利用前 41 个点预测后 18 个点,其中前 11 个点预测准确率达到了 71%,后 5 个点都没有预测到实际结果。从灰色波形预测模型本身来说,是运用曲线拟合和灰色系统理论进行预测的方法,对历史数据有很强的依赖性,没有考虑各个因素之间的联系,所以更适合于短期预测,不太适用于中长期预测。

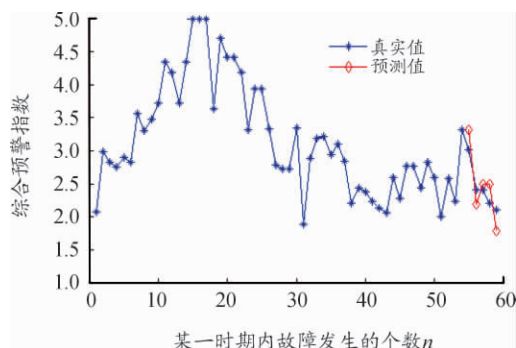


图4 短期(后 5 个故障风险)的预测值与实际值曲线

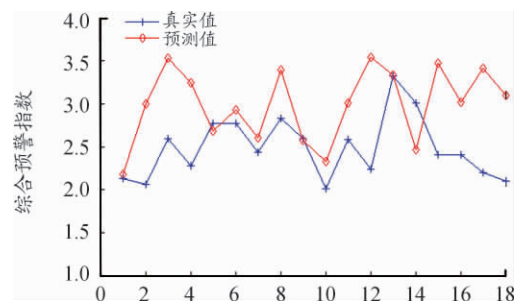


图5 中期(后 18 个故障风险)预测值与实际值曲线

4 结论

针对航空装备试飞阶段风险评定及趋势预测问题,采用本文方法得到每一故障的可能性等级和故障后果等级,进而得到每一故障的风险等级及综合预警指数。最后根据故障发生的时间先后顺序,建立设备、系统或整机的风险综合预警指数曲线,根据发展趋势,实现实时监控与短期内的趋势预测,为后续飞行试验故障风险监测与预警提供了一种技术方法。

参考文献:

- [1] 李飞敏,顾仁碗. 基于可拓学的航空装备外场故障后果定量分析方法,机械科学技术,2015(11):23-26.
- [2] 卫生部职业卫生标准专业委员会. GBZ230—2010 职业

- 性接触毒物危害程度分级[S]. 北京: 中华人民共和国卫生部, 2010.
- [3] 程凌, 潘彤, 徐辉波. 基于可拓学石化装置故障后果严重程度评估方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2009(03): 186-190.
- [4] GB/T26610.4—2012 承压设备系统基于风险的检验实施导则 第5部分 故障后果定量分析方法[S]. 北京: 国家质检总局.
- [5] 苏多, 李岩. GJB900A—2012 装备安全性工作通用要求[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2012: 2-4.
- [6] Amoco, Ashland. API 581—2000 基于风险的检验[S]. 美国石油协会, 2000: 73-98.
- [7] GB/T26610.4—2012 承压设备系统基于风险的检验实施导则 第4部分 故障可能性定量分析方法[S]. 北京: 国家质检总局.
- [8] FAN Chongqing, LU Zhenzhou, SHI Yan. Time-dependent failure possibility analysis under consideration of fuzzy uncertainty[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2019(10): 19-35.
- [9] 王立涛, 武权, 张建昌等. 定量风险评估中管道失效可能性的计算方法[J]. 油气田地面工程, 2019(S1): 116-118.
- [10] 胡延超, 杨亮. 燃气管道失效可能性评价[J]. 石化技术, 2019: 91-93.
- [11] LU H, KOLARIK W J, LU S S. Real-time performance reliability prediction[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2001, 50(4): 353-357.
- [12] 魏麟, 马玉猛, 王冲. 基于层次分析法(AHP)的航空装备维修影响因素分析[J]. 科技创新导报, 2015(19): 12-13.
- [13] 李建华, 张雪胭, 王秀华, 等. 基于灰色理论的维修经费投入预测模型[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(1): 145-148.
- [14] 李天梅, 邱静, 刘冠军. 基于故障率的测试性验证试验故障样本分配方案[J]. 航空学报, 2009, 30(9): 1661-1665.

科学编辑 吴军 博士(华中科技大学教授、博导)

责任编辑 杨梅梅

(上接第46页)

参考文献:

- [1] 李炜昕, 张合, 丁立波. 基于记转数测速的定距修正系统[J]. 测试技术学报, 2013, 27(2): 104-108.
- [2] 何振才. 引信空炸点精确控制技术研究[D]. 中国知网服务平台, 2006.
- [3] 孙全意, 丁立波, 张河. 小口径空炸引信地磁计转数原理研究[J]. 探测与控制学报, 2001, 23(4): 14-17.
- [4] 姚则武. 计转数定距弹炸点控制影响因素分析[J]. 四川兵工学报, 2018, 29(1): 22-25.
- [5] 裴东兴, 王文武, 崔春生. 利用转速测试弹丸炮口速度的方法研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(1): 125-128.
- [6] 齐晓红, 潘宗仁, 张晓炜. 基于地磁传感器的引信自测初速技术研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(6): 128-130.
- [7] 姚强, 陆通. 铝基复合材料抗拉强度测量不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2016, 43(12): 1-2.

科学编辑 张云峰 博士(陆军工程大学石家庄校区)

责任编辑 周江川