

航空电子设备故障预测框架与方法

李斌^{1,2}, 胡雷刚¹, 肖明清¹

(1,空军工程大学工程学院,陕西 西安 710038;2,空军驻江苏地区军事代表室,江苏 南京 210016)

摘要 针对环境应力对电子产品造成的累积损伤,提出了覆盖电子设备全寿命周期的故障预测框架与方法。首先提出了可预测性的概念,在设备设计阶段采用辅助软件 eXpress 进行可预测性设计,跟踪实际环境中设备的工作数据,采用3种改进神经网络进行特征参数的趋势预测。基于信息熵理论,采用多指标评价准则融合单项预测方法,实现了对某型电子设备的故障组合预测。预测框架在某型电子设备上的实践验证了框架的可行性,预测结果表明了组合预测方法较单项预测方法具有更强的鲁棒性和稳定性。

关键词 故障预测;可预测性;信息熵;组合预测

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.02.002

中图分类号 V27;TP206+.3 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)02-0006-06

现代武器装备大量采用复杂的现代电子设备,由于电子产品本身的特点,其故障相对于机械设备更难检测。目前针对电子产品的预测与健康研究主要有基于故障物理模型、基于特征参数和基于内建“故障标尺”3类方法^[1]。基于电子产品故障物理模型的方法需要大量故障机理与模型的积累,而国内在这方面的研究甚少;基于内建“故障标尺”的方法需要与预测对象以相同制造工艺和过程特制出相同的产品,实施成本高、可操作性差;基于特征参数的故障预测方法通过监测环境应力造成的电性能退化来预测健康状态,易于实现,逐渐成为研究热点^[1-2]。本文提出通过监测产品的电性能退化进行故障预测的框架与方法,采用 eXpress 软件进行了电子设备的可预测性设计,用实例验证了在预测框架内开展故障预测研究的可行性。

1 基于特征进化的故障预测框架

1.1 故障预测可行性

从常见故障的特性出发,按其发生、发展的进程可将故障分为突发性故障和渐进性故障2类^[3-6]。

突发性故障是指设备整体或某一部件突然发生的功能丧失,如电容爆浆、部件断裂、误操作引起的设备损坏等。突发性故障一般发生较为突兀、具有破坏性,出现故障前无明显征兆,因而难以依靠早期的测试分析进行预测。若故障的概率密度服从参数为 $1/\lambda$ 的指数分布^[5],则突发性故障的发生概率为:

$$F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda x} dx \quad (1)$$

渐进性故障是指设备在使用过程中由于某些部件在各种应力作用下性能逐渐下降,最终超出允许值而发生的故障。这类故障占有相当大的比重,具有一定的规律性,能够通过早期的状态监测数据进行预测和防止。若系统参数 Y 随时间 t 变化^[5],且过程进行速度 V 服从正态分布,则设备在时刻 t 发生故障的概率为:

$$F(t) = \int_0^t \frac{TV}{\sqrt{2\pi}Dx^2} e^{-\frac{(x-T)^2 V^2}{2D^2 x^2}} dx \quad (2)$$

* 收稿日期:2010-09-08

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2009AAXX06);国家部委基金资助项目(51317030103);空军工程大学研究生科技创新计划资助项目(Dx2010107)

作者简介:李斌(1980-),男,江苏徐州人,博士生,主要从事故障诊断、预测与健康研究。

E-mail:hl_2@163.com

式中: V 和 \bar{V} 分别为 Y 的变化率和平均变化率; D 为过程速度 V 的均方差; T 为设备的平均使用寿命。

系统的各种变量的关系或水平上的微小变化是故障的先兆^[7]。电子设备的故障不是随机的,而是损耗性的,其故障机理主要是疲劳和腐蚀,电子设备的故障率与其应力的时间历程有关^[8],而作用在设备上的时间应力表现为特征参数的劣化,因此故障的发生可通过分析设备的特征参数劣化趋势得到。

1.2 基于特征进化的预测框架

目前关于故障预测缺乏通用的方法^[6,8-9],本文初步构建了具有一定普适性的基于特征进化的故障预测研究框架,见图 1。

该工作流程为:在武器装备设计阶段分析其系统结构,获得故障参数的变化规律,采用辅助设计和评价软件进行装备可预测性设计;设计、实施加速寿命试验,对试验数据进行预处理,获得正常应力下新型装备特征参数的退化趋势;采用计算智能方法建立非参数模型对武器装备特征参数进行趋势预测;基于信息熵建立组合预测模型,对各单项预测方法进行信息融合,最终得到鲁棒性更强的故障组合预测模型;利用预测结果为武器装备提供状态报告,对其使用、维修提供决策报告。

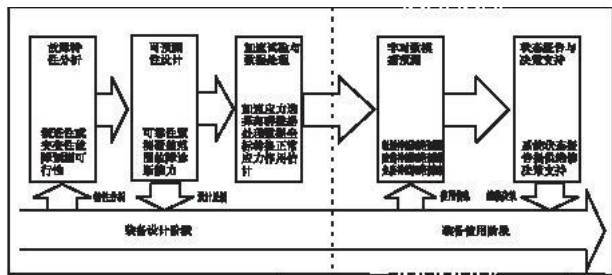


图 1 基于特征进化的故障预测框架

Fig. 1 Prognostics framework based on character evolution

2 基于 eXpress 的可预测性设计

随着武器系统测试和诊断要求的提高及计算机工程的发展,目前的测试性辅助设计和评价软件已从系统的测试和诊断设计逐步扩展到预测性,国外研究机构已经开展这方面的研究^[3,10-11]。

2.1 可预测性设计

国外尚无可预测性与可预测性设计的公开定义,本文拟对两者做如下描述:①可预测性 (Prognostic Capability or Prognosticability):系统或设备能及时准确地确定其状态,并预测其状态发展趋势的一种设计特性;②可预测性设计 (Design for Prognostics, DFP):在系统或设备设计时,提高系统或设备支持故障预测能力的一种技术。两者均为系统设计时增加系统的可控性和可观性,前者通过参数检测与监控方便地确定系统当前状态,其结果通常是二进制(正常/异常)输出;而后者重点在于便于可预测参数的检测与监控,以反映系统性能变化趋势,估计系统未来时刻的状态,相比较而言,可预测性设计要求测试深度更高,是一种更高层次的改进系统可观性、可控性的设计理念。

美国 Ridgetop 公司针对 FPGA 芯片与 PCB 板焊接失效,在系统设计时在芯片的焊点之间增加电容,通过 Verilog HDL 软内核即可对由振动应力等造成的焊点断裂进行预测。显然该技术已经超越了可测试性设计的范畴,是一种可预测性设计。

2.2 基于 eXpress 的可预测性设计

所有的故障预测都要从可预测性设计开始,在设计阶段使用 eXpress 可指导测试点、传感器的优化配置,提供信息以对设计选择、冗余度、重构、维护策略做出更好的决策^[10]。

在 eXpress 软件中采用由顶及底的设计方法,某航空电子设备主要由电源模块、控制模块、接口模块和底板 4 部分组成。利用 eXpress 软件对电源模块、控制模块、接口模块和底板分别进行故障诊断分析,最终得到如图 2 所示的故障隔离率报告,其故障隔离率为 100%,隔离效率为 39.82%,平均测试步骤为 1.32。

Size	Isolation Percentages Using Testing Only			Isolation Probabilities Using Testing Only		Isolation Probabilities Using Lambda Search	
	Qty	%	Curn%	%	Curn%	%	Curn%
1	42	58.33	58.33	63.66	63.66	89.52	89.52
2	7	9.72	68.05	5.52	69.19	6.39	95.92
3	6	8.33	76.38	8.89	78.07	1.61	97.53
4	2	2.78	79.16	5.22	83.30	0.62	98.15
5	1	1.39	80.55	1.40	84.70	0.58	98.73
6	2	2.78	83.33	0.32	85.02	0.54	99.28
7	5	6.94	90.28	3.83	88.85	0.43	99.71
8	5	6.94	97.22	7.24	96.09	0.23	99.94
9	2	2.78	100.00	3.91	100.00	0.06	100.00

Isolation Effectiveness: 39.82 Total Fault Groups: 72
 Expected Fault Group Size: 1.26 Average Fault Group Size: 1.32

图 2 某航空设备故障隔离率报告图

Fig. 2 Fault isolation report of some electronic equipment

3 基于信息熵的故障组合预测方法

3.1 故障预测性能评价指标

各种预测常选用均方误差作为评价预测结果的指标^[12],但仅用单一指标来衡量故障预测模型的效果是不全面的,因此本文选用平均绝对误差、均方误差、平均绝对误差百分比、均方误差百分比^[13-15]和 Pearson 相关系数等多准则进行评价:

Pearson 相关系数:

$$e_{PR} = \frac{\sum_{i=1}^k (t_i - \bar{t})(t'_i - \bar{t}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^k (t_i - \bar{t})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^k (t'_i - \bar{t}')^2}} \quad (3)$$

式中: \bar{t} 为实际序列均值; \bar{t}' 为预测序列均值。 e_{PR} 系数表示了实际序列与预测序列曲线相似程度。根据其集合含义知 $0 < e_{PR} < 1$,即 e_{PR} 越大表明曲线的形状越相似、预测的精度越高,属于效益性指标。而前4项指标属于损失性指标,即数值越小,预测结果越好,为了便于进行综合评价,将相似性指标用 e'_{PR} 代替。即:

$$e'_{PR} = 1 - e_{PR} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (t_i - \bar{t})(t'_i - \bar{t}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^k (t_i - \bar{t})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^k (t'_i - \bar{t}')^2}} \quad (4)$$

3.2 基于信息熵的组合预测方法

组合定理指出:一个很差的预测方法如果包含系统的独立信息,当其与较好的预测方法组合后,同样可以增加系统的预测性能^[13]。组合预测技术的关键是合理地确定单项预测方法的权重。

若用 n 种单一预测模型进行预测,对每种模型采用 m 种指标进行评价,可得到评价矩阵 \mathbf{E} ;对评价矩阵的每项指标进行归一化操作,可得归一化评价矩阵 \mathbf{P} :

$$\mathbf{E} = (e_{i,j})_{n \times m} = \begin{bmatrix} e_{1,1} & \cdots & e_{1,m} \\ \cdots & & \cdots \\ e_{n,1} & \cdots & e_{n,m} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{P} = (p_{i,j})_{n \times m} = \begin{bmatrix} p_{1,1} & \cdots & p_{1,m} \\ \cdots & & \cdots \\ p_{n,1} & \cdots & p_{n,m} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $e_{i,j}$ 为第 i 种预测方法的第 j 种指标的误差评价价值。则由信息熵定义知,第 i 种预测方法的信息熵 S_i 为:

$$S_i = - \sum_{j=1}^m p_{i,j} \lg p_{i,j} \quad (6)$$

式中 $p_{i,j} = e_{i,j} / \sum_{j=1}^{n/i=1} e_{i,j}$ 为第 i 种预测方法第 j 种指标的评价价值在 n 种方法中所占比重。

信息熵是系统紊乱程度的度量,某种预测模型的信息熵反映了该种模型在组合预测中的扰动程度:信息熵越大,对系统的扰动也越大,则其在组合预测模型中所占的权重就应该越小。因此,通过计算单一预测模型的信息熵 S_i ,即可利用式(7)计算该模型在组合预测模型中的权重 w_i :

$$w_i = (1 - S_i) / (n - \sum_{i=1}^n S_i) \quad (7)$$

基于信息熵的故障组合预测步骤如下:①对设备进行可预测性设计;②选取监测参数、设计加速寿命试验获取全寿命故障规律;③剔除离群点、离群序列,进行加权融合、坐标转换等数据处理;④选择用于评价故障预测结果的各种指标;⑤设计粗糙神经网络、遗传神经网络和免疫神经网络进行单项预测;⑥根据评价指标计算3项方法的信息熵;⑦基于信息熵计算3项预测方法的权重;⑧利用⑦的权重进行组合预测;⑨分析评价组合预测结果的精度及误差。组合预测方法中①、②的加速试验与数据预处理内容另文介绍,本文主要对④-⑨部分进行研究分析。

4 基于信息熵的电子设备故障预测实例

遵循1.2节基于特征进化的预测框架,开展对某型航空电子设备的故障预测研究:运用eXpress软件进

行可预测性设计,选取特征参数,通过加速寿命试验获得设备全寿命故障规律(限于篇幅,另文介绍);数据预处理,剔除离群点和离群序列,并进行坐标转换;开展基于计算智能的单项预测、基于信息熵的组合预测。

4.1 基于计算智能的单项故障预测

计算智能从生物进化的观点认识和模拟智能,以数据为基础,通过训练建立联系而进行问题的求解。本文分别采用粗糙集、遗传算法、免疫算法改进神经元结构、权值学习方法、隐含层激励函数得到粗糙神经网络(Rough Neural Network, RNN)、遗传神经网络(Genetic Neural Network, GNN)和免疫神经网络(Immune Neural Network, INN)。粗糙神经网络与免疫神经网络的网络结构、遗传神经网络的流程图见图3。

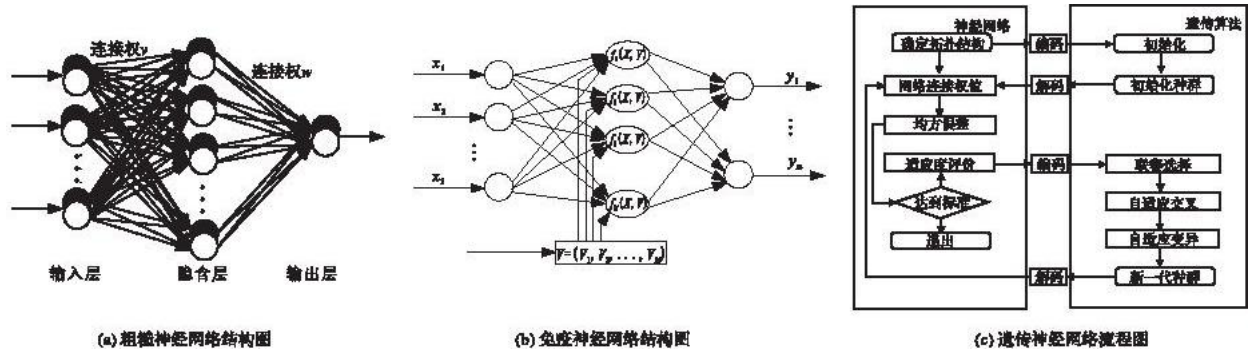


图3 神经网络结构图与流程图

Fig.3 Structure and flow chart of neural networks

某型电子设备工作电压范围为 1.0 - 1.2 V(数据经过数量级处理)。正常使用过程中,其性能是逐渐衰减;随着累计工作时间增加,磁控管上的电压逐渐增加,直至超出规定范围^[16]。跟踪该电子装备在实际工作环境中的使用,监测到一套装备的实际特征参数随累积工作时间变化数据见表1。

表1 正常应力下累积工作时间数据

Tab.1 Working data under normal stress

参数/V	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.08	1.10	1.12	1.14	1.16	1.18	1.20
时间/h	0	576	852	1 144	1 228	1 275	1 514	1 595	1 691	1 788	1 891	1 994	2 048	2 092

设计网络选用单隐层、4 参数输入进行 2 步预测,用试验的方法设计粗糙神经网络隐含层单元数为 9 个;遗传神经网络中相关参数设计为 $\alpha = 1.3, \beta = 0.7, k_c = 0.5, k_m = 0.06$,隐含层单元数设计为 11 个;设计免疫神经网络隐含层神经元激励函数为:

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, v_i) = \frac{1}{mn} \mathbf{X}^T (v_i)_{n \times m} \mathbf{Y} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 为输入向量; $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$ 为输出向量,隐含层第 i 个神经元的评价函数为:

$$E_i(v_1, v_2, \dots, v_M) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (y_j - f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, v_i))^2 \quad (9)$$

疫苗接种即在评价函数基础上对可调参数疫苗向量 $\mathbf{V} = (v_1, v_2, \dots, v_M)^T$ 进行优化,采用迭代函数如下:

$$v_i(k+1) = v_i(k) - k \frac{\partial E_i(v_1, v_2, \dots, v_M)}{\partial v_i}, i = 1, 2, \dots, M \quad (10)$$

式中 k 为迭代步长。对上式进行循环迭代,直至评价函数值 $E_i(v_1, x_2, \dots, v_M)$ 满足设定的网络训练目标;采用试验方法确定隐含层单元数为 8 个。

利用加速寿命试验获得数据对全寿命故障规律数据进行训练,分别采用粗糙神经网络、遗传神经网络和免疫神经网络对表1中装备进行预测,平均绝对误差、均方误差、平均绝对误差百分比、均方误差百分比和 e'_{PR} 系数 5 项预测评价指标见表2。

表2 各单项预测方法指标
Tab.2 Targets of single prognostic method

预测方法	一步预测					两步预测				
	e_{MAE}	e_{MSE}	e_{MAPE}	e_{MSPE}	e'_{PR}	e_{MAE}	e_{MSE}	e_{MAPE}	e_{MSPE}	e'_{PR}
RNN	47.96	18.89	0.027 6	0.011 0	0.000 3	63.90	23.51	0.037 7	0.014 4	0.000 4
GNN	46.89	17.86	0.028 5	0.011 3	0.000 4	58.72	22.06	0.034 6	0.013 5	0.000 3
INN	42.71	18.54	0.025 7	0.011 5	0.000 4	53.24	20.19	0.031 9	0.012 6	0.000 3
BP网络	57.18	21.27	0.031 9	0.013 2	0.000 6	64.32	24.25	0.038 9	0.015 4	0.000 5

分析表2可得:3种改进网络都较BP神经网络性能有较大改善,粗糙神经网络平均绝对误差百分比较小,遗传神经网络的均方误差百分比较小,免疫神经网络的整体性能较优。

4.2 航空电子设备故障组合预测实例

采用基于信息熵的方法,按式(5) - (7)计算3种单项预测方法的组合权重。一步预测权重计算如下:

①由表2可得一步预测评价矩阵 E_1 ;②进行除列和操作进行归一化操作,得归一化 P_1 ;

$$E_1 = \begin{bmatrix} 47.96 & 18.89 & 0.027 6 & 0.011 0 & 0.000 3 \\ 46.89 & 17.86 & 0.028 5 & 0.011 3 & 0.000 4 \\ 42.71 & 18.54 & 0.025 7 & 0.011 5 & 0.000 4 \end{bmatrix}; P_1 = \begin{bmatrix} 0.348 6 & 0.341 7 & 0.337 4 & 0.325 4 & 0.272 7 \\ 0.340 9 & 0.323 0 & 0.348 4 & 0.334 3 & 0.363 6 \\ 0.310 5 & 0.335 3 & 0.314 2 & 0.340 2 & 0.363 6 \end{bmatrix}$$

③由式(6)计算各单项方法信息熵 S_{11}, S_{12}, S_{13} ;④由式(7)计算单项方法组合权重 w_{11}, w_{12}, w_{13} ;

$$S_{11} = -\sum_{j=1}^5 p_{11j} \ln p_{11j} = 0.790 7, S_{12} = 0.796 2, S_{13} = 0.793 9$$

$$w_{11} = \frac{(1 - S_1)}{(3 - \sum S_{1i})} = 0.338 1, w_{12} = 0.329 1, w_{13} = 0.332 9$$

同理,可得两步预测权重: $w_{21} = 0.324 5, w_{22} = 0.332 5, w_{23} = 0.343 0$ 。

利用上述计算权重分别进行一步和两步组合预测,预测结果见表3,组合预测指标见表4,基于信息熵的组合预测结果见图4。

表3 组合预测方法预测值

Tab.3 Prognostic results of combine method

参数值/V	1.04	1.05	1.06	1.08	1.10	1.12	1.14	1.16	1.18	1.20
一步预测时间/h	1 268	1 285	1 385	1 643	1 664	1 741	1 882	1 946	2 007	-
两步预测时间/h	-	1 334	1 433	1 589	1 704	1 760	1 861	1 964	2 013	2 069
实际监测时间/h	1 228	1 275	1 514	1 595	1 691	1 788	1 891	1 994	2 048	2 092

表4 组合预测结果评价指标

Tab.4 Targets of combine prognostic result

	一步预测					两步预测				
	e_{MAE}	e_{MSE}	e_{MAPE}	e_{MSPE}	e'_{PR}	e_{MAE}	e_{MSE}	e_{MAPE}	e_{MSPE}	e'_{PR}
数值	44.18	18.40	0.027 4	0.011 7	0.000 4	33.70	13.35	0.020 6	0.008 7	0.000 2

比较表2与表4,分析图4可知,组合预测方法融合了各单项预测方法的优势,能够提高预测算法的稳定性和鲁棒性,对两步预测性能提升较为明显。因此基于信息熵的故障组合预测方法相较于各单项预测方法具有更强的应用价值。

5 结束语

针对环境应力对电子产品造成的累积损伤,本文提出了通过监测产品的电性能退化进行故障预测的框架与方法。创新性地提出了可预测性的概念,并采用eXpress软件进行了电子设备的可预测性设计。基于

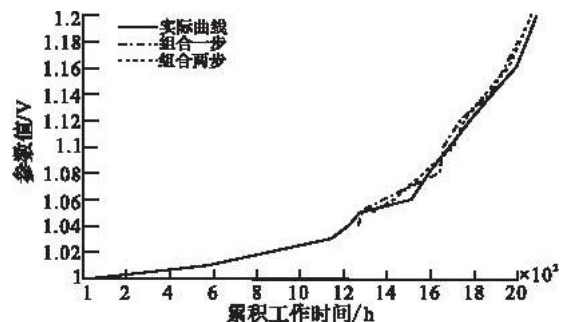


图4 基于信息熵的组合预测结果

Fig.4 Combine prognostic results based on information entropy

基于

信息熵理论,采用多指标评价进行某型电子设备的故障组合预测,结果表明组合预测方法增强了预测结果的可靠性与稳定性,同时预测实例也验证了在预测框架内开展故障预测研究的可行性,且基于信息熵的组合预测方法具有较强的鲁棒性。

但本文提出的可预测性与可预测性设计概念仍然很单薄,进一步丰富可预测性概念、在更广泛的装备中开展可预测性设计是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 孙博,康锐,谢劲松. 故障预测与健康管理系统研究和应用现状综述[J]. 系统工程与电子技术,2007, 29(10): 1762 - 1767.
SUN Bo, KANG Rui, XIE Jinsong. Research and application of the prognostic and health management system[J]. Systems engineering and electronics, 2007, 29(10): 1762 - 1767. (in Chinese)
- [2] 曾声奎,Michael G Pecht,吴际. 故障预测与健康管理系统技术的现状与发展[J]. 航空学报, 2005, 26(5): 626 - 632.
ZENG Shengkui, Pecht Michael G, WU Ji. Status and perspectives of prognostics and health management technology[J]. Acta aeronautics et astronautica sinica, 2005, 26(5): 626 - 632. (in Chinese)
- [3] Tuchband Brian A. Implementation of prognostics and health management for electronic systems[D]. Park: University of Maryland, 2007.
- [4] 许丽佳. 电子系统的故障预测与健康管理系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
XU Lijia. Study on fault prognostic and health management for electronic system[D]. Chengdu: University of electronic science and technology of China, 2009. (in Chinese)
- [5] Pecht Michael G. Prognostics and health management of electronics[M]. Hoboken: John wiley & sons inc, 2008.
- [6] George Vachtsevanos, Frank Lewis, Michael Roemer, et al. Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems [M]. Hoboken: John wiley & sons inc, 2006.
- [7] Vichare Nikhil M. Prognostics and health management of electronics by utilizing environmental and usage loads[D]. Park: University of Maryland, 2006.
- [8] Alan Yu. Prognostics demonstration of electronic components subjected to vibration environment of a light military tactical vehicle[D]. Park: University of Maryland, 2007.
- [9] Yili Hong. Reliability prediction based on complicated data and dynamic data[D]. Ames: Iowa state university, 2009.
- [10] Dsi Staff. From diagnostics to prognostics with express[EB/OL]. (2010 - 1 - 5). http://articles.dsiintl.com/Articles/19/2/From_Diagnostics_to_Prognostics_with_express.aspx.
- [11] Jie Gu. Prognostics of solder joint reliability under vibration loading using physics of failure approach[D]. Park: University of Maryland, 2009.
- [12] 高尚,张绍彪,梅亮. 基于相对误差的线性组合预测研究[J]. 系统工程与电子技术,2008, 30(3): 481 - 484.
GAO Shang, ZHANG Shaobiao, MEI Liang. Study on linear combined forecast based on relative error[J]. Systems engineering and electronics, 2007, 30(3): 481 - 484. (in Chinese)
- [13] 苗艳姝. 城市燃气负荷预测的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
MIAO Yanshu. Study on the forecast of city gas load[D]. Harbin: Harbin industry university, 2006. (in Chinese)
- [14] 方甲永,肖明清,黄宏伟,等. 电子装备故障预测参数选取与设置[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2010, 11(4): 11 - 15.
FANG Jiayong, XIAO Mingqing, HUANG Hongwei, et al. Fault prognosis parameters selection and setting in electronic equipment[J]. Journal of air force engineering university:natural science edition,2010,11(4):11 - 15. (in Chinese)
- [15] 程进军,夏智勋,胡雷刚,等. 基于遗传神经网络的航空设备故障预测研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2011,12(1): 11 - 15.
CHENG Jinjun, XIA Zhixun, HU Leigang, et al. Prognostics for aeronautic equipments based on genetic neural network [J]. Journal of air force engineering university:natural science edition,2011,12(1):11 - 15. (in Chinese)
- [16] 胡雷刚,肖明清. 基于 BP 神经网络的航空设备故障预测[J]. 仪器仪表学报. 2008, 29(增4): 521 - 523.
HU Leigang, XIAO Mingqing. Prognostics for aeronautic equipments based on BP neural network [J]. Chinese journal of scientific instrument, 2008, 29(S4): 521 - 523. (in Chinese)

(编辑:徐敏)

(下转第 56 页)