

基于扩展多信号模型的故障样本可拓评价方法

邓 露, 许爱强, 文天柱, 汤文超

(海军航空工程学院 飞行器检测与应用研究所, 山东 烟台 264001)

摘要: 合理确定评价指标及分配指标权重对故障样本评价至关重要, 文章在综合考虑测试性验证试验目的和考核内容的基础上, 提出一种基于扩展多信号模型的故障样本可拓评价方法; 方法基于扩展多信号流图构建故障样本评价的指标, 结合可拓学理论, 建立基于平均故障关联度的故障样本集可拓评价模型, 并对某型机载数传测试性验证试验故障样本进行评价; 研究结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 评价指标; 指标权重; 故障样本; 多信号模型; 可拓评价

Extenics in Fault Sample Evaluation Based on Extension Multi-signal Model

Deng Lu, Xu Aiqiang, Wen Tianzhu, Tang Wenchao

(Research Institute of Aircraft Detection and Application, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Determining the index and allocating the index weight reasonably are important for evaluation of fault sample. Based on synthetically considering the aim and assessment content of testability demonstration test, a method of Extenics in fault sample evaluation based on extension multi-signal model is put forward. In the method index of fault sample evaluation is established based on extension multi-signal model, and a evaluation model of fault sample based on average failure correlation and extensional theory is built. The model is applied to evaluate the fault sample of for testability demonstration test. Research results show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: evaluation indicator; indicator weight; fault sample; multi-signal model; extenics evaluation

0 引言

测试性验证试验是通过注入一定数量的故障模式来检验被测单元的机内测试或者外部测试的故障诊断能力^[1]。由于样本集的优劣直接影响着试验结果的可信度, 因此在进行测试性验证试验前, 需要建立合理的样本集评价方法, 保证测试性验证试验获得较为理想的故障样本集^[2-3]。

受测试性验证试验周期、费用、人员以及场所等条件的限制, 试验样本通常按某一或一组规定随机抽样产生, 且故障样本量有限^[4-8]。因此要求选择注入的样本集具有良好的覆盖性, 达到对测试性设计性能的准确验证。由于系统的测试性设计不仅包括结构和功能设计, 而且包括对故障模式的可观测性、可控性和可达性设计^[5,9], 因此, 测试性验证试验不仅要求故障样本集对被验证对象结构和功能充分覆盖, 而且要求能够充分验证系统的测试点、测试项以及测试信号。

在上述研究的基础上, 提出了基于扩展多信号模型的故障样本可拓评价方法。方法定义了系统的信息要素、设计要素关联模型和故障模式与设计要素关联模型, 建立了故障样本覆盖性定量分析流程, 并通过案例应用分析验证方法的可行性和有效性。

1 扩展多信号模型的评价指标分析

1.1 扩展多信号流图模型

扩展多信号流图模型在 Deb 和 Pattipati 等人提出的多信号流图模型的基础上, 增加功能与信号属性的影响关系, 建立结构、功能、测试与信号之间的逻辑关系。从形式上多信号流图模型包括:

- 1) 有限的系统结构元件集 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_L\}$;
- 2) 有限的系统功能集 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$;
- 3) 系统相关的独立信号集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$;
- 4) n 维可行的测试集 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$;
- 5) λ 维可用测试点集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_\lambda\}$;
- 6) 有向图 $DG = \{C, G, V, T, P, E\}$, 其中, 有向图的边 E 表示系统的物理连接。

1.2 评价指标分析

在测试性验证试验故障样本注入前, 对备选故障样本集进行评价的目的是保证选取注入的故障样本集具有良好的代表性, 从而使得验证试验结果更加真实地反应系统的测试性水平^[10-11]。根据系统的扩展多信号流图模型, 故障样本集优劣可以通过故障样本集对系统结构、功能、测试点、测试项及信号的覆盖度进行评价, 建立评价指标体系如图 1 所示。



图 1 评价指标体系图

收稿日期: 2013-12-09; 修回日期: 2014-03-13。

基金项目: 装备预研基金项目(9140A25070208JB1402)。

作者简介: 邓 露(1986-), 男, 安徽人, 博士, 主要从事装备测试性验证试验与评估技术的研究。

定义 1: 评价指标模型。定义评价指标模型 A 为如下五

元组:

$$A = (C, G, T, P, V) \quad (1)$$

2 评价指标关联性及其与故障关联度分析

2.1 评价指标关联性分析

评价指标关联性是指评价指标体系中各元素之间的影响关系, 包括: 结构—信号、功能—信号、测试点—信号、测试—信号, 通过建立评价指标相互之间的逻辑关系分析指标之间的关联性^[12-14]。

定义 2: 评价指标关联模型。定义如下四元组:

$$R_A = (R_{c-v}, R_{g-v}, R_{p-v}, R_{t-v}) \quad (2)$$

式中,

R_A 为评价指标关联模型;

$R_{c-v} = \{ \langle c_i, v_j \rangle \mid c_i \in C, v_j \in V, i \leq L, j \leq k \}$ 为结构与信号之间的关联关系;

$R_{g-v} = \{ \langle g_i, v_j \rangle \mid g_i \in G, v_j \in V, i \leq m, j \leq k \}$ 为功能与信号之间关联关系;

$R_{p-v} = \{ \langle p_i, v_j \rangle \mid p_i \in P, v_j \in V, i \leq n, j \leq k \}$ 为测试点与信号之间的关联关系;

$R_{t-v} = \{ \langle t_i, v_j \rangle \mid t_i \in T, v_j \in V, i \leq \lambda, j \leq k \}$ 为测试项与信号之间的关联关系。

根据系统各评价指标之间的关联关系构建系统的扩展多信号流有向图, 即评价指标 C, G, V, T, P 中的元素组成有向图的顶点, C, G, T, P 与 V 中元素之间的关联关系确定有向图的边, 具体的方法为:

$$E(\langle a_i, v_j \rangle) = \begin{cases} 1 & \text{关联} \\ 0 & \text{不关联} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $E(\langle a_i, v_j \rangle) = 1$ 表示节点 a_i 和 v_j 间存在连接, $E(\langle a_i, v_j \rangle) = 0$ 表示节点 a_i 和 v_j 间不存在连接。

2.2 评价指标与故障模式关联度分析

定义 3: 故障模式与信号关联模型。定义如下二元组:

$$R_{F-V} = (F, V) \quad (4)$$

式中, $F = \{f_1, f_2, \dots, f_\gamma\}$ 为系统的故障模式集, γ 为系统故障模式的数量; V 为系统独立信号集; R_{F-V} 为故障模式与信号之间的关联模型, 其物理意义为当某一故障发生时, 必然会引起某一或一组信号量值偏离正常范围, 同样当某一信号量值偏离正常范围时, 可能是一个或多个故障发生造成。因此, 根据定义 2 和定义 3 可以推导出全体评价指标与故障模式的关联关系^[15-16]。

定义 4: 评价指标与故障模式关联模型。定义如下五元组:

$$R_{A-F} = (R_{c-f}, R_{g-f}, R_{p-f}, R_{t-f}, R_{v-f}) \quad (5)$$

式中,

R_{A-F} 为评价指标与故障模式关联模型;

$R_{c-f} = \{ \langle c_i, f_j \rangle \mid c_i \in C, f_j \in F, i \leq L, j \leq \gamma \}$ 为结构与故障模式之间的关联关系;

$R_{g-f} = \{ \langle g_i, f_j \rangle \mid g_i \in G, f_j \in F, i \leq m, j \leq \gamma \}$ 为功能与故障模式之间关联关系;

$R_{p-f} = \{ \langle p_i, f_j \rangle \mid p_i \in P, f_j \in F, i \leq n, j \leq \gamma \}$ 为测试点与故障模式之间的关联关系;

$R_{t-f} = \{ \langle t_i, f_j \rangle \mid t_i \in T, f_j \in F, i \leq \lambda, j \leq \gamma \}$ 为测试项

与故障模式间的关联关系。

$R_{v-f} = \{ \langle v_i, f_j \rangle \mid v_i \in V, f_j \in F, i \leq k, j \leq \gamma \}$ 为信号与故障模式之间的关联关系。

根据定义 4 可以得出第 i 个评价指标的第 j 个元素 $a_{ij} \in A$, 存在一组故障模式与其关联, 记为 $f(a_{ij})$, 其基数为 $|f(a_{ij})|$ 。

定义 5: 评价指标元素故障关联度。评价指标元素故障关联度定义为: 与该评价指标元素相关联的故障模式的数量。

3 基于可拓理论的评价方法

3.1 确定待评物元

对于给定的测试性验证试验故障样本集, 评价指标 c 的量值为 v , 其优劣用故障样本集对系统结构、功能、测试点、测试项、信号的覆盖度来表示, 分别记为 c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 , 对应的量值分别为 v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 , 则待评物元 R_0 可表示为:

$$R_0 = (N_0, C, V) = \begin{bmatrix} N_0 & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_5 & v_5 \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.2 确定经典域和节域

经典域物元是指可拓模型中指标量值在不同评价等级中的所有可能取值范围, 根据故障样本评价指标确定经典域 R_j 为

$$R_j = (N_j, C, V_j) = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & v_{1j} \\ & c_2 & v_{2j} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_5 & v_{5j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & \langle a_{1j}, b_{1j} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{2j}, b_{2j} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_5 & \langle a_{5j}, b_{5j} \rangle \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, N_j 是故障样本评价的第 j 等级, $c_i (i = 1, \dots, 5)$ 表示故障样本集评价等级 N_j 的特征, 即根据其值大小判断粮食安全所处的等级; v_{ij} 表示 N_j 关于 c_i 的量值范围, 故障样本集评价等级关于其对应特征的取值范围称为故障样本集评价等级的经典域, 即式中的 $\langle a_{ij}, b_{ij} \rangle$ 。

节域物元是指全部等级特征值的取值范围, 故障样本的等级评价节域物元为:

$$R_N = (N, C, V_N) = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_{1N} \\ & c_2 & v_{2N} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_5 & v_{5N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & c_1 & \langle a_{1N}, b_{1N} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{2N}, b_{2N} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_5 & \langle a_{5N}, b_{5N} \rangle \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, N 表示故障样本集评价等级的全体, v_{iN} 表示 N 关于 c_i 所取的量值范围, 即节域 $\langle a_{iN}, b_{iN} \rangle$ 。显然, $\langle a_{ij}, b_{ij} \rangle \subseteq \langle a_{iN}, b_{iN} \rangle$ 。

3.3 确定关联函数

令 $V_{ij} = \langle a_{ij}, b_{ij} \rangle$, $V_{iN} = \langle a_{iN}, b_{iN} \rangle$, 则待评价的故障样本集特征量值 v_i 与某一等级量值范围的关联函数为:

$$k_j(v_i) = \frac{\rho(v_i, V_{ij})}{\rho(v_i, V_{iN}) - \rho(v_i, V_{ij})} \quad (9)$$

式中, $\rho(v_i, V_{ij})$ 表示点 v_i 到区间 V_{ij} 的距离; $\rho(v_i, V_{iN})$ 表示点 v_i 到区间 V_{iN} 的距离, $\rho(v_i, V_{ij})$ 和 $\rho(v_i, V_{iN})$ 定义为:

$$\begin{cases} \rho(v_i, V_{ij}) = \left| v_i - \frac{a_{ij} + b_{ij}}{2} \right| - \frac{1}{2}(b_{ij} - a_{ij}) \\ \rho(v_i, V_{iN}) = \left| v_i - \frac{a_{iN} + b_{iN}}{2} \right| - \frac{1}{2}(b_{iN} - a_{iN}) \end{cases} \quad (10)$$

在关联函数中, $k_j(v_i) > 0$ 表示 v_i 隶属于 V_{ij} 的程度; $k_j(v_i) < 0$ 表示 v_i 不隶属于 V_{iN} 的程度; $k_j(v_i) = 0$ 表示 v_i 隶属于 V_{ij} 而不隶属于 V_{iN} 。

3.4 基于平均故障关联度的指标权重确定

在测试性验证试验故障样本集评价时, 确定各评价指标的权重至关重要, 其反应了各个指标对评价结果影响的程度。平均故障关联度反应评价指标平均关联故障模式的数量, 在给定评价对象后, 根据各评价指标元素的故障关联度计算得到, 它反映了各个指标在故障相关性意义上的相对程度, 指标的平均故障关联度越大, 对应权值越大, 则该指标越重要; 反之则反。

根据定义 5, 定义评价指标的平均故障关联度计算方法为

$$\tau(A_i) = \frac{1}{|A_i|} \sum_{j=1}^{|A_i|} f(a_{ij}) \quad (11)$$

式中, $\tau(A_i)$ 表示评价指标 A_i 的平均故障关联度, $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示第 i 个评价指标; $|A_i|$ 表示第 i 个评价指标包含的元素个数; $f(a_{ij})$ 表示评价对象第 i 个评价指标第 j 个元素的故障关联度。

评价指标的权重通过对全体评价指标平均故障关联度归一化处理得到, 具体计算公式为

$$w_i = \frac{\tau(A_i)}{\sum_{i=1}^n \tau(A_i)} \quad (12)$$

式中, w_i 表示评价指标 A_i 对应的权重, n 表示评价指标的总数。

3.5 确定故障样本评价等级

关联函数 $k(v)$ 的数值表示评价对象对个等级的隶属程度。待评价对象 N_0 关于故障样本评价等级 j 的隶属度为

$$k_j(N_0) = \sum_{i=1}^n w_i k_j(v_i) \quad (13)$$

式中, w_i 为第 i 个评价指标的权重, 根据最大隶属度原则, 如果

$$k_{j_0}(N_0) = \max_{j \in \{1, 2, \dots, q\}} K_j(N_0) \quad (14)$$

则评定 N_0 属于故障样本集等级 j_0 。

4 算例应用

以某型机载数传设备测试性验证试验时故障样本评价为例, 采用本文方法对备选故障样本进行评价。该数传设备共包括 9 个独立的结构单元、6 个独立的功能单元、11 个可供测试的点、35 个测试项和 18 个测试性信号, 通过故障数分析和模式影响分析 (FMEA) 确定设备共包括 254 个故障模式 (限于篇幅要求, 这里省略具体的评价指标元素名称和故障模式名称)。经生产方和使用方协商, 试验注入故障样本量为 36。根据扩展多信号流图模型和评价指标与故障模式关联模型, 分析得到故障样本对结构、功能、测试点、测试项、信号 5 个评价

指标的覆盖依次为: 7、5、6、26、11。故障样本评价等级共有 5 级, 对各评价指标的等级划分如表 1 所示。

表 1 故障样本评价等级划分

评价指标	评定等级				
	优	良	中	差	劣
A ₁	<0.9,1>	<0.75,0.9>	<0.6,0.75>	<0.5,0.6>	<0,0.5>
A ₂	<0.9,1>	<0.75,0.9>	<0.6,0.75>	<0.5,0.6>	<0,0.5>
A ₃	<0.9,1>	<0.75,0.9>	<0.6,0.75>	<0.5,0.6>	<0,0.5>
A ₄	<0.9,1>	<0.75,0.9>	<0.6,0.75>	<0.5,0.6>	<0,0.5>
A ₅	<0.9,1>	<0.75,0.9>	<0.6,0.75>	<0.5,0.6>	<0,0.5>

将表 1 的数据代入式 (7) 可得到故障样本评定等级的经典域物元分别为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} N_1 & c_1 & \langle 0.9, 1 \rangle \\ & c_2 & \langle 0.9, 1 \rangle \\ & c_3 & \langle 0.9, 1 \rangle \\ & c_4 & \langle 0.9, 1 \rangle \\ & c_5 & \langle 0.9, 1 \rangle \end{bmatrix}, R_2 = \begin{bmatrix} N_2 & c_1 & \langle 0.75, 0.9 \rangle \\ & c_2 & \langle 0.75, 0.9 \rangle \\ & c_3 & \langle 0.75, 0.9 \rangle \\ & c_4 & \langle 0.75, 0.9 \rangle \\ & c_5 & \langle 0.75, 0.9 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} N_3 & c_1 & \langle 0.6, 0.75 \rangle \\ & c_2 & \langle 0.6, 0.75 \rangle \\ & c_3 & \langle 0.6, 0.75 \rangle \\ & c_4 & \langle 0.6, 0.75 \rangle \\ & c_5 & \langle 0.6, 0.75 \rangle \end{bmatrix}, R_4 = \begin{bmatrix} N_4 & c_1 & \langle 0.5, 0.6 \rangle \\ & c_2 & \langle 0.5, 0.6 \rangle \\ & c_3 & \langle 0.5, 0.6 \rangle \\ & c_4 & \langle 0.5, 0.6 \rangle \\ & c_5 & \langle 0.5, 0.6 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} N_5 & c_1 & \langle 0, 0.5 \rangle \\ & c_2 & \langle 0, 0.5 \rangle \\ & c_3 & \langle 0, 0.5 \rangle \\ & c_4 & \langle 0, 0.5 \rangle \\ & c_5 & \langle 0, 0.5 \rangle \end{bmatrix} \quad (15)$$

将上述数据代入式 (8) 得到故障样本的等级评定节域物元为:

$$R_N = \begin{bmatrix} N & c_1 & \langle 0, 1 \rangle \\ & c_2 & \langle 0, 1 \rangle \\ & c_3 & \langle 0, 1 \rangle \\ & c_4 & \langle 0, 1 \rangle \\ & c_5 & \langle 0, 1 \rangle \end{bmatrix} \quad (16)$$

1) 确定待评物元:

利用式 (9) 将故障样本评价指标数据用物元表示为:

$$R_N = \begin{bmatrix} N & c_1 & 7/9 \\ & c_2 & 5/6 \\ & c_3 & 6/11 \\ & c_4 & 26/35 \\ & c_5 & 11/18 \end{bmatrix} \quad (17)$$

2) 确定特征的关联函数:

将式 (17) 中的数据代入式 (9) 和式 (10), 则故障样本特征与评定等级的关联函数为:

$$K_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.090 9 & -0.024 4 & -0.241 9 & -0.124 0 & -0.211 8 \\ 0.165 9 & 0.269 8 & -0.119 5 & 0.098 4 & -0.067 1 \\ 0.070 0 & -0.012 3 & 0.021 9 & 0.121 7 & 0.107 3 \\ -0.150 3 & -0.215 7 & 0.111 1 & -0.109 2 & 0.045 8 \\ -0.037 0 & -0.111 1 & 0.272 7 & 0.009 5 & 0.185 2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

3) 确定各指标的权重:

根据设备的扩展多信号流程图分析得到 5 个评价指标的平均故障关联度依次为: 35.7、47.3、32.5、11.4、19.6 (考虑到同一故障模式可能与多个评价元素关联), 则根据式 (12) 确定 5 个评价指标的权重为:

$$w = (0.2437, 0.3229, 0.2218, 0.0778, 0.1338) \quad (19)$$

4) 确定评定等级:

将式 (18) 以及指标权重向量代入式 (13), 可以计算出待评故障样本对每个等级的隶属度为:

$$K(N_0) = \begin{bmatrix} K_1(N_0) \\ K_2(N_0) \\ K_3(N_0) \\ K_4(N_0) \\ K_5(N_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0303 \\ 0.0468 \\ -0.0475 \\ 0.0213 \\ -0.0211 \end{bmatrix} \quad (20)$$

根据最大隶属度原则, 故障样本评价结构应取 $d = \max\{K(N_0)\} = K_2(N_0) = 0.0468$, 该故障样本隶属于 2 级对应的评定结果, 即该故障样本的评定结果为“良”。

5) 评价结果分析:

由式 (18) 和最大隶属度原则可以看出, 该故障样本对结构单元的覆盖度评定等级为“良”; 对功能单元的覆盖度评定等级为“良”; 对测试点的覆盖度评定等级为“差”; 对测试相的覆盖度评定等级为“中”; 对信号的覆盖度评定等级为“中”。根据 GJB 的平均相加“中”,

5 结论

合理确定评价指标及分配指标权重对故障样本评价至关重要。本文在综合考虑测试性验证试验目的和考核内容的基础上, 提出一种基于扩展多信号模型的故障样本可拓评价方法。方法基于扩展多信号流程图构建故障样本评价的指标, 结合可拓学理论, 建立基于平均故障关联度的故障样本集可拓评价模型, 并对某型机载数传测试性验证试验故障样本进行评价。研究结果验证了所提方法的有效性。

参考文献:

[1] 田 仲, 石君友. 系统测试性设计分析与验证 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
 [2] 李天梅, 丘 静, 刘冠军. 基于多信号流图的测试性验证试验样本选取方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30 (11): 2284

(上接第 2487 页)

3 总结

基于虚拟仪器的测控系统的开发对于微机控制系统有非常重要的意义, 虚拟仪器技术是当前测控领域应用和研究的重要方向之一, 将其应用于实际检测中, 节省了项目投入, 增强了系统的开放性。模糊 PID 控制技术将模糊控制和 PID 控制结合起来, 扬长避短, 既具有模糊控制灵活而适应性强的优点, 又具有 PID 控制精度高的特点。

参考文献:

[1] National Instruments LabVIEW FPGA in Hardware - in - the -

- 2286.

[3] Laurent O. Using formal methods and testability concepts in the avionics systems validation and verification (V&V) process [A]. Proc. of 2010 Third International Conference on Software Testing, Verification and Validation [C]. 2010: 1-10.
 [4] 石君友, 李 郑. 自动控制故障注入设备的设计与实现 [J]. 航空学报, 2007, 28 (3): 556-560.
 [5] 石君友, 纪 超, 李海伟. 测试性验证技术与应用技术现状分析 [J]. 测控技术, 2012, 31 (5): 29-32.
 [6] Dietraar K, Roman A, Robert W. Analysis of a built-in test architecture for direct-conversion SiGe millimeter-wave receiver frontends [A]. Proc. of the Instrumentation and Measurement Technology Conference [C]. 2010: 944-948.
 [7] Sundar S, Kim B C. Low cost automatic mixed-signal board test using IEEE 1149. 4 [A]. Proceedings of International Test Conference [C]. 2007: 1-9.
 [8] 张 勇, 丘 静, 刘冠军, 等. 面向测试性虚拟验证的功能-故障-行为-测试-环境-一体化模型 [J]. 航空学报, 2012, 33 (2): 273-286.
 [9] An J X, Wang G Q, Li S F, et al. Dynamic evaluation method based multi-dimensional test coverage for software testing [J]. Journal of Software, 2010, 21 (9): 2135-2147.
 [10] 安金霞, 王国庆, 李树芳, 等. 基于多维度覆盖率的软件测试动态评价方法 [J]. 软件学报, 2010, 21 (9): 2135-2147.
 [11] 何 洋, 叶晓慧, 赵建扬. 机电设备的测试性验证方法初探 [J]. 电光与控制, 2011, 18 (11): 92-95.
 [12] 石君友, 康 锐. 基于通用充分性准则的测试性试验方案研究 [J]. 航空学报, 2005, 26 (6): 691-695.
 [13] 石君友, 王 璐, 李海伟, 等. 基于设计特性覆盖的测试性定量分析方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34 (2): 418-423.
 [14] 李天梅, 胡昌华, 周 鑫. 基于故障传递特性的位置不可访问故障注入方法 [J]. 航空学报, 2011, 32 (12): 2277-2286.
 [15] Li T M, Gao X Y, Qiu J, et al. A failure sample selection method considering failure pervasion intensity in testability demonstration test [J]. Chinese Journal of Acta Armamentar II, 2009, 5 (3): 228-233.
 [16] 李天梅, 丘 静, 刘冠军, 等. 基于模糊灰色关联分析的故障样本集评估方法 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29 (10): 2196-2200.
 Loop Simulation Applications [Z]. 2006.
 [2] National Instruments Building Programmable Automation Controllers with LabVIEW FPGA [Z]. 2006.
 [3] National Instruments 使用 LabVIEW FPGA 模块和可重新配置 I/O 设备开发测量与控制应用 [M]. 2006.
 [4] 宋广东. 基于 DLL 技术和 COM 组件技术实现 LabVIEW 和 MATLAB 混合编程 [J]. 计算机应用与软件, 2013, (1): 30-33.
 [5] 张湘. 基于 LabVIEW 的风力发电综合实验平台监控系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (12): 3206-3208.
 [6] 郝少杰. 基于模糊 PID 参数自整定的温度控制系统的研究 [J]. 现代电子技术, 2011, (7): 196-198.