

基于多信号模型的计量策略设计与验证*

张 玘, 蒋 薇, 汪 静

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要:装备可计量性的理论方法研究对提高装备的计量保障水平具有重要意义。针对国内缺乏装备可计量性模型现状,提出了可计量性分析设计的多信号模型方法。系统总结了可计量性多信号模型的基本理论,详细介绍了在单超差假设及不考虑组元可靠性、计量时间和费用影响下的超差检查用检定和超差定位用检定操作优选算法以及计量策略制定方法。建立了信号产生系统多信号模型,给出了超差-检定相关性矩阵,分析了信号产生系统的计量检定树,结论与信号产生系统实际检定方法相符,实例证明,此方法合理有效。

关键词:多信号模型;相关性矩阵;计量策略设计;信号产生系统

中图分类号:TB9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)02-0148-06

Design and validation of the measurement strategy based on multi-signal model

ZHANG Qi, JIANG Wei, WANG Jing

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Theory and method research of equipment measurability is very important for improving the metrology support ability of equipment. Aiming at the lack of equipment measurability model inland, the multi-signal model method is presented for the measurability analysis and design. The basic theory of the measurability multi-signal model was summarized systematically, the optimum seeking method of the out-of-tolerance detection and position, and the design method of measure strategy were introduced in detail on the single out-of-tolerance assumption, without considering component reliability, measurement time and cost implications. The multi-signal model of self-developed signal produce system was established, the correlation matrix was given and the verification tree was analyzed. The conclusions agree with the actual verification method of signal produce system, which proves that the measure strategy is reasonable and effective.

Key words: multi-signal model; correlation matrix; measure strategy design; signal produce system

目前国内对装备可计量性的理论方法研究相对缺乏,装备可计量性是值得深入研究的课题。装备可计量性是衡量装备测量(测试)设备是否便于计量和量值是否准确的设计特性^[1],计量策略设计是研究确定计量性能参数和顺序以提高装备计量性能的过程。多信号模型是由 Somnath 在 1994 年提出^[2],利用分层有向图表示被测对象的组成单元、测试以及被测对象性能特征之间的相关性,是仅对故障传播建模的一种模型方法,可用于复杂系统的测试性分析、故障诊断等^[3-4]。

本文基于可测试性与可计量性的密切关联性,探索将多信号模型方法应用于装备可计量性研究中,通过建立信号产生系统多信号模型,并对系统的可计量性进行分析,最后设计出超差检定策略,结果与信号产生系统国家检定规程相一致,验证了模型及计量策略的合理有效性。

1 可计量性多信号模型理论基础

1.1 基本说明

为便于理解和叙述,这里先给出有关的假设条件和说明,再详细介绍具体理论方法。

(1)单超差假设,即在任何时刻当被计量对象处于超差状态时,认为只有一个组元发生了超差,且为便于研究,结合信号产生系统和其国家检定规程选取了典型的计量性能参数。

(2)被计量对象各组元性能指标超差率相等,各个计量点计量所需时间和费用均相同,即不考虑被计量对象组元可靠性、计量时间和计量费用的影响。

(3)文中定义的系统超差实际与系统故障含义一致,但为了和功能性超差对应以及区别于测

* 收稿日期:2012-06-18

基金项目:国家“863”计划资助项目

作者简介:张玘(1957—),男,湖南长沙人,教授,博士,E-mail:zhang_qi_7233@163.com

试中的系统故障,定义系统超差一词。

(4)文中有些宏观描述没有对计量和检定两个概念进行严格的区分。

1.2 可计量性多信号模型组成

可计量性多信号模型包含的要素如下^[5]:

(1)组元 C (Component):构成系统的具有独立和相对完整功能的功能模块,允许作为子系统使用子组元详细建模。

(2)信号 S (Signal):组成系统性能规范的相互区分的属性(“特征”),彼此之间通常具有相对独立性。

(3)检定 V (Verify):通过检定操作,可以判定性能指标是否超差,从而给出系统是否合格的结论。

(4)计量检定点 VP (Verify Point):系统检定操作的注入点和可观测点。

(5)连线 E (Edge):由某个组元指向另一个组元的有向线段,代表着信号的流动和功能的传播方向。

因此,一个系统可用有向图 $G = (C, TP, E)$ 表示。其中,每个组元 C_i 影响(关联和阻断)一组信号;每个计量点 VP_i 可执行一组计量检定操作;每个检定操作 V_j 可以检定一组性能指标。

1.3 不合格结论类型

在可计量性多信号模型建模过程中,广义定义两种不合格结论类型:功能性超差和系统超差。功能性超差是指组元的某个功能指标无法满足预期性能要求的不合格类型(超差模式),它只影响与该性能指标有关的检定结论。系统超差指的是通过阻碍信息流的通过,影响它正常功能之上的超差,组元的系统超差具有只要可达,是能被计量检定操作检测到的特性。举例来说,对于一个正弦波发生器,如果其发出的正弦信号只有幅值达不到要求,则对该发生器来说应该是功能性超差;如果在某情况下无输出或输出波形畸变,则应该是系统超差^[6-7]。

1.4 超差-检定相关性矩阵

超差-检定相关性矩阵是可计量性分析的依据和基础,相关性矩阵生成的实质是不断进行可达性分析和相关性分析的过程。首先根据功能原理图分析确定每个信号的传播路径,当传输到某一计量点时即为信号至计量点可达,然后进行相关性分析,即计量点的计量检定操作是否可检定该信号,以此确定相关性矩阵相应的行列值。值得注意的是,上述过程中,检定操作可以检测任意

传播到该检定所在计量点的系统超差,但对于功能性超差结论具有选择性。因此对多信号流图进行相关性分析时,需要将系统超差和功能性超差区别对待,还要考虑模块与信号、信号与检定之间的逻辑关系,因篇幅有限,在此不作详细分析。

2 可计量性分析与计量检定策略设计

2.1 静态分析

静态分析的内容有识别不可通过检定确定的超差、冗余计量和超差隐藏集等。

(1)不可通过计量检定确定的超差:相关性矩阵中所列全部计量检定都不能确定该组元是否超差,实际上是没有溯源的组元,缺少可计量性,在改进可计量性设计时要添加检定该超差的操作。此超差集记为

$$CU = \{C_i | C_i = 0, \forall i\} \quad (1)$$

式中, C_i 为相关性矩阵的第 i 行矢量。

(2)冗余计量:比较相关性矩阵的各列,如果有 $V_i = V_j (i \neq j)$, 则 V_i 和 V_j 互为冗余计量。

(3)隐藏超差集:多个组元发生超差时和单个组元超差时表现特征相同,隐藏超差集的存在使得对组元是否超差造成漏检。在相关性矩阵中识别隐藏超差集,对于超差 c_k ,在相关性矩阵中排除在 c_k 中“0”所在列为“1”的行后所余下的超差,即

$$CH = \{c_i | d_{ij} = 0, \text{ if } d_{kj} = 0\} \quad (2)$$

其中任意组元超差和 c_k 同时存在时就会发生超差隐藏。

2.2 计量检定策略设计

基于多信号模型的计量策略设计是在被检对象多信号模型的基础上,根据相关性矩阵确定计量检定操作和顺序。主要包括相关性矩阵的简化、超差检查用检定操作的选择和超差定位用检定的选择三个方面的内容,具体实施方法如下:

2.2.1 相关性矩阵的简化

在建立被检对象的相关性矩阵之后,应首先根据静态分析结果对其进行简化。

(1)找出相关性矩阵中全为0的行,即不可通过检定确定的超差,去掉该行;

(2)找出相关性矩阵中的冗余计量,只选用其中容易实现和计量费用少的一个即可,去掉未选用检定操作对应的列;

(3)比较相关性矩阵中各行,如果有 $C_x = C_y (x \neq y)$, 则对应的超差类是不可区分的,可作为一个超差检定模糊组处理,合并这些相等的行为

一行。

2.2.2 超差检查用检定操作的选择

超差检查(Error Detection(ED))判断系统是否存在超差,因此应选择关联组元(超差类)多的信号优先进行检查,从而以最少的检定操作判定系统是否存在超差。

设简化后的系统多信号模型相关性矩阵为 $\mathbf{D} = [d_{ij}]_{m \times n}$, 则第 j 个计量检定操作的超差检定权值(提供超差检定用信息的相对度量) W_{ED_j} 可用下式计算,即

$$W_{ED_j} = \sum_{i=1}^m d_{ij} \quad (3)$$

计算出各个检定操作的 W_{ED} 之后,选用其中 W_{ED} 值最大者为优先超差检查用检定。用其对应的列矩阵 \mathbf{V}_j 把矩阵 \mathbf{D} 一分为二,得到两个子矩阵

$$\mathbf{D}_p^0 = [d]_{z \times (n-1)}$$

$$\mathbf{D}_p^1 = [d]_{(m-z) \times (n-1)}$$

式中, \mathbf{D}_p^0 — \mathbf{V}_j 中等于“0”的元素所对应的行构成的子矩阵;

\mathbf{D}_p^1 — \mathbf{V}_j 中等于“1”的元素所对应的行构成的子矩阵;

z — \mathbf{V}_j 中等于“0”的元素的个数;

p —下标,为选用计量检定操作的序号。

选出第一个检定操作后, $p = 1$ 。如果 \mathbf{D}_1^0 的行数不等于零($z \neq 0$), 则对 \mathbf{D}_1^0 再计算 W_{ED} 值, 选其中 W_{ED} 值最大者为第二个超差检查用检定, 并再次用其对应的列矩阵分割 \mathbf{D}_1^0 。重复上述过程, 直到选用超差检定操作对应的列矩阵中不再有“0”的元素为止。

如果在选择检查用检定操作的过程中, 出现的 W_{ED} 最大值对应多个检定操作, 那么可从中选择一个容易实现的检定操作。

2.2.3 超差定位用检定操作的选择

超差定位(Error Position(EP))是找出系统的哪个组元存在超差的过程, 是定位有超差组元的过程。根据第一次检定结果把系统分割为正常的和含有超差的两部分, 下一次只对含有超差的部分进行计量检定, 直到有超差部分为单个组元或模糊组为止。为高效完成系统计量检定工作, 所选检定步骤越少越好。

这里借鉴折半查找算法的思想, 将检定视为一个按关联超差类的数量排列的序列, 每次优先选用关联超差类数为最接近待定位超差类数的中位数的检定操作, 这样无论每次检定是否通过, 均可以排除二分之一左右的超差类。可以证明, 已知正数 A 与 B 之和为 C , 只有当 $A = B = C/2$ 时, A 与

B 之积最大。因此, 设系统简化后的多信号相关性矩阵为 $\mathbf{D} = [d_{ij}]_{m \times n}$, 则第 j 个检定的超差定位权值(提供超差定位用信息的相对度量) W_{EP_j} 可用下式计算, 即

$$W_{EP_j} = N_j^1 N_j^0 = \sum_{i=1}^m d_{ij} \sum_{i=1}^m (1 - d_{ij}) \quad (4)$$

式中, N_j^1 —列矩阵 \mathbf{V}_j 中元素为“1”的个数;

N_j^0 —列矩阵 \mathbf{V}_j 中元素为“0”的个数。

计算出各检定操作的 W_{EP} 之后, 选用其中 W_{EP} 值最大者对应的检定操作为优先超差定位用检定。用其对应的列矩阵 \mathbf{V}_j 把矩阵 \mathbf{D} 一分为二, 得到两个子矩阵

$$\mathbf{D}_p^0 = [d]_{z \times (n-1)}$$

$$\mathbf{D}_p^1 = [d]_{(m-z) \times (n-1)}$$

式中, z — \mathbf{V}_j 中等于“0”的元素的个数;

p —下标, 为选用的计量检定操作的序号。

选出第一个定位用检定后, $p = 1$, 分割矩阵。如果检定通过, 则对矩阵 \mathbf{D}_1^0 计算 W_{EP} 值, 选用其中值最大者为第二个定位用检定, 否则对矩阵 \mathbf{D}_1^1 计算 W_{EP} 值, 选出第二个检定操作后, 分割子矩阵, $p = 2$ 。重复上述过程, 直至检定未通过的子矩阵变为一行为止。

如果在选择定位用检定操作的过程中, 出现的 W_{EP} 最大值对应多个检定操作, 那么可从中选择一个容易实现的操作^[8-13]。

3 实例及分析

信号产生系统为测试提供各种激励, 发展到今天已经非常成熟, 对其的计量检定也有相应的国家检定规程。本文选取自主设计的信号产生系统进行建模, 主要基于两个方面: 一是系统为自主设计开发, 因此对信号产生系统的功能原理有足够的掌握, 为准确快速建模奠定了必要的基础; 二是信号产生系统已有非常权威的计量检定理论与规程, 为我们进行可计量性分析与模型验证提供了有力的理论依据。

3.1 信号产生系统建模

根据信号产生系统设计方案, 其主要分为四大功能模块(组元), 即微控制模块 C_0 、DDS 信号发生器模块 C_1 、低通滤波器模块 C_2 和放大器模块 C_3 。结合信号发生器的国家检定规程, 定义计量性能参数(即信号集)如下^[14]:

频率参数 S_1 , 包括频率范围、频率准确度、频率稳定度等;

电平参数 S_2 , 包括电平范围、电平准确度、电

平的频率响应(输出电平的平坦度);

频谱纯度参数 S_3 , 包括非线性失真系数、谐波、SSB 相位噪声;

低通滤波器截止频率 S_4 ; 放大器增益 S_5 。

根据信号产生系统的组成结构, 本文制定检定方案为: 在 C_1 、 C_2 和 C_3 的输出端分别设置计量点 VP_1 、 VP_2 和 VP_3 , 每个计量点可以被一个或多个计量检定操作利用。如将计量点 VP_1 的输出接入一个频率计测量频率值 f_s 来检定性能参数 S_1 ; 接入测量接收机测量电平值 L_s 来检定性能参数 S_2 等。上述的计量检定操作同样可以应用于计量点 VP_2 和 VP_3 。另外, 在计量点 TP_2 还有检定性能参数 S_4 , 即测量滤波器模块在不同频率下的输出与输入端口的电压比。在 TP_3 还有检定性能参数 S_5 , 即测量放大器模块输出和输入端口的交流电压比值。据此定义计量检定操作如表 1 所列。

表 1 计量检定操作列表

Tab. 1 A list of detection operation

计量点	VP_1			VP_2				VP_3			
计量信号	S_1	S_2	S_3	S_1	S_2	S_3	S_4	S_1	S_2	S_3	S_5
计量检定操作	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}

结合多信号模型中不合格结论的类型及信号产生系统功能, 确定需要分析的组元超差结论(超差)有各组元的系统超差, 如 C_1 的系统超差, 用 $C_1(G)$ 表示; 还有各组元的功能性超差, 如 C_1 输出的信号频率参数不合格, 用 $C_1(S_1)$ 表示, 其余模块类推。

通过上述分析, 建立信号产生系统的可计量性多信号模型如下。

模型的形式化定义:

组元集 $C = \{C_0, C_1, C_2, C_3\}$;

信号集 $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$;

计量点集 $VP = \{VP_1, VP_2, VP_3\}$;

计量检定操作集 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7, V_8, V_9, V_{10}, V_{11}\}$;

组成单元不合格结论集 $F =$

$\{C_1(G), C_1(S_1), C_1(S_2), C_1(S_3), C_2(G), C_2(S_1), C_2(S_2), C_2(S_3), C_2(S_4), C_3(G), C_3(S_1), C_3(S_2), C_3(S_3), C_3(S_5)\}$ 。

多信号模型如图 1 所示。其中, 各矩形表示各个功能模块, 各个模块都有相应的输入输出端口, 并且关联多个信号; 图中带箭头的直线则表示

各个模块间的相互依赖关系和信号的传输路径; 圆圈代表计量检定操作点, 计量检定操作点指的是系统中执行计量检定操作的抽象位置(不只是实际的计量检定点, 每个计量检定点对应一个或多个物理端口), 每个计量检定点可能包括一个或多个计量检定操作, 每个计量检定操作判定一个参量。

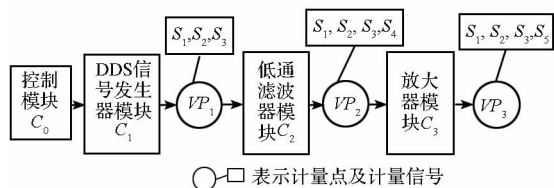


图 1 信号产生系统的可计量性多信号模型

Fig. 1 Multi-signal model of signal produce system

3.2 多信号模型相关性矩阵

根据上述系统多信号模型可得相关性矩阵如表 2 所示。其中, 行向量 C 代表该行的组元超差存在时, “1” 所对应的检定操作均异常。列向量 V 代表计量检定操作可以确定的超差结论, 其中 “1” 所对应的超差结论有一个存在时, 检定操作异常。

表 2 信号产生系统的相关性矩阵

Tab. 2 Correlation matrix of signal produce system

	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}
$C_1(G)$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$C_1(S_1)$	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
$C_1(S_2)$	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
$C_1(S_3)$	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
$C_2(G)$	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$C_2(S_1)$	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
$C_2(S_2)$	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
$C_2(S_3)$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
$C_2(S_4)$	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0
$C_3(G)$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
$C_3(S_1)$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$C_3(S_2)$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
$C_3(S_3)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
$C_3(S_5)$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

3.3 基于相关性矩阵的计量策略设计

3.3.1 计量策略设计

由表 2 的相关性矩阵可知, 信号产生系统中不存在不可通过检定确定的超差和冗余计量。分

别通过式(3)和(4)计算得出的相关性矩阵各列所对应的 W_{ED} 值和 W_{EP} 值如表 3 所示。从表 3 可知,当系统状态未知时,应选用检定操作 V_9 作为第一个超差检查用检定;当已知信号产生系统处于超差状态时,可从 V_8, V_9, V_{10} 中任选一个作为第一个超差定位用检定。

表 3 相关性矩阵各列所对应的 W_{ED} 值和 W_{EP} 值
Tab. 3 W_{ED} and W_{EP} of correlation matrix

	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}
W_{ED}	2	2	2	4	5	5	3	6	8	8	4
W_{EP}	24	24	24	40	45	45	33	48	48	48	40

按照前文计量策略的制定方法,用选出的检定操作进行检定,按检定结果的合格与否确定下一步检定操作,只要有任何一步检定结果不合格,则转至超差定位程序。信号产生系统在未知状态下的计量检定策略用决策树如图 2 所示(“0”表示检定合格;“1”表示检定不合格)。决策树的内部结点为计量检定操作,树叶为超差结论,检定操作的选择是构成决策树的核心问题。通过对该计量检定树的查询和遍历,计量人员可以很方便地判断并定位信号产生系统超差结论,从而高效地完成计量检定任务。

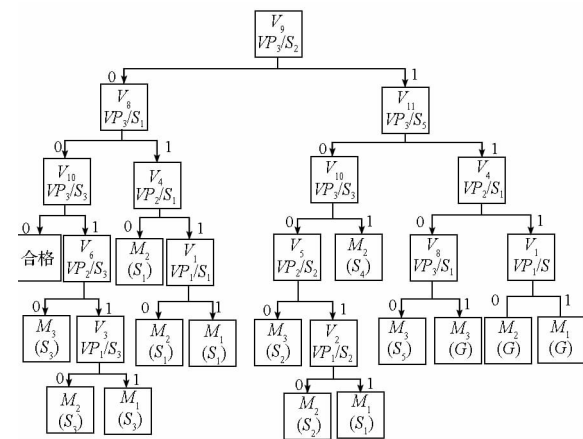


图 2 信号产生系统计量检定树

Fig. 2 Detection tree of signal produce system

3.3.2 结果分析

(1) 在多信号模型的第三个计量点 VP_3 (对应信号产生系统输出端) 的一组计量检定操作 $\{V_8, V_9, V_{10}\}$ 的超差检查权值 W_{ED} 和超差定位权值 W_{EP} 都是最大的,因此优先选取 VP_3 的这组操作,而在实际的信号产生系统检定时,也是直接检定输出端的信号,算法所得计量顺序与系统实际计量顺序相符,验证了所定义权值的有效性。

(2) 从计量检定树可看出检定操作组 $\{V_8,$

$V_9, V_{10}\}$ 可直接检定出系统是否合格,一般情况下系统合格状态出现的概率最大^[15],故实际检定工作先执行该检定操作组;从树根到树叶逐步实施检定的过程中,所选检定操作基本按照计量点 VP_3, VP_2, VP_1 的顺序,实际上,对信号产生系统的检定一般也是按照从顶层到底层的顺序,先检定最终输出端的信号,如果合格,则停止检定,如果出现超差,则需要逐级检定直至定位超差组元。因此,由计量检定树分析的检定策略与信号产生系统实际检定工作相一致,验证了计量策略设计方法的可行性及合理性。

4 结论

本文探索性地提出基于多信号模型的装备可计量性分析和计量策略制定方法,可以预计有关可计量性参数指标,以便评价可计量性设计,并可作为进一步可计量性分析与设计的基础。实例表明,基于多信号模型的信号产生系统可计量性分析及计量策略设计结论与已知信号产生系统计量理论一致,符合系统国家计量检定规程,验证了模型的有效性与合理性。按此方法设计的计量策略具有自适应特性,它是根据前一步检定结果来确定下一步的检定操作的,每次检定顺序不是固定不变的。本文所述计量策略设计方法与被检对象的类型无关,适用于各类不同的测量系统和测试装备。另外上述计量策略的设计方法是基于简化假设下的,实际情况下存在的系统组元的可靠性、计量时间和费用对制定计量策略的影响,以及多超差存在条件下的计量检定策略,均有待进一步深入探讨。

参考文献 (References)

- [1] 汪静. 军用 ATS 可计量性关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
WANG Jing. Research on key technologies of military ATS's measurability [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [2] Somnath D, Pattipati K R, et al. Multi-signal flow graphs: a novel approach for system testability analysis and fault diagnosis [C]//Proceedings of the IEEE Autotestcon, 1994:361 - 373.
- [3] Simpson W R, Sheppard J W. System test and diagnosis[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [4] ISO 10012 Part-1992. Quality assurance requirements for measuring equipment metrological confirmation system for measuring equipment[S]. 1992.
- [5] 韩宇杰, 吕政良, 林志文, 等. 基于多功能故障模型的多信号流图建模及分析方法[C]//合肥: 第六届中国测试学术会议论文集, 2010: 168 - 172.

- HAN yujie, LV Zhengliang, LIN Zhiwen, et al. Modeling and analysis method based on multi-signal flow graph using multi functional fault model [C]//Hefei: Proceedings of the Sixth China Test Academic Conference, 2010: 168 - 172. (in Chinese)
- [6] 孔令宽. 基于多信号模型的卫星故障诊断技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2009:10-11.
KONG Lingkuan. Research of satellite fault diagnosis based on multi-signal model [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009:10-11. (in Chinese)
- [7] 杨志勇, 许爱强, 牛双诚. 基于多信号模型的系统测试性建模与分析[J]. 工程设计学报, 2007, 14(5): 364-369.
YANG Zhiyong, XU Aiqiang, NIU Shuangcheng. Model and analysis of system testability based on multi-signal model[J]. Journal of Engineering Design, 2007, 14(5):364-369. (in Chinese)
- [8] 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,2003:185-195.
TIAN Zhong, SHI Junyou. System testability design, analysis and verification[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,2003:185-195. (in Chinese)
- [9] 杨智勇, 许化龙, 许爱强. 基于多信号模型的故障诊断策略设计[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(12): 1616-1620.
YANG Zhiyong, XU Hualong, XU Aiqiang. Design of diagnosis strategy based on multisignal model[J]. Journal of Computer Measurement & Control, 2006, 14(12): 1616-1620. (in Chinese)
- [10] 杨鹏, 邱静, 刘冠军. 基于多值测试的诊断策略优化生成[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(8): 1675-1678.
YANG Peng, QIU Jing, LIU Guanjun. Optimized diagnostic strategy generation with multivalued tests[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(8): 1675-1678. (in Chinese)
- [11] 杨鹏. 基于相关性模型的诊断策略优化设计技术[D]. 长沙:国防科技大学,2008.
YANG Peng. Optimization technology of design for diagnostic strategy based on dependency model[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [12] 蒋俊荣, 黄考利, 吕晓明, 等. 基于混合诊断模型的诊断设计优化方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2011, 9(6): 1287-1290.
JIANG Junrong, HUANG Kaoli, LV Xiaoming, et al. Research of diagnostic and design optimization methods based on hybrid diagnostic model [J]. Journal of Computer Measurement & Control, 2011, 9(6): 1287-1290. (in Chinese)
- [13] 薛凯旋, 黄考利, 张玮昕, 等. 基于多信号模型的测试性分析与故障诊断策略设计[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(4): 225-229.
XUE Kaixuan, HUANG Kaoli, ZHANG Weixi, et al. Testability analysis and fault diagnosis strategy design based on multi-signal model[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008, 28(4): 225-229. (in Chinese)
- [14] 全国无线电计量技术委员. JJG173-2003 信号发生器检定规程[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
The committee of national radio measuring technology. JJG 173-2003 Verification Regulation of Signal Generator[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003. (in Chinese)
- [15] 陈圣俭, 王栋, 丁岩松. 一种基于信息流模型的故障隔离方法[J]. 中国测试技术, 2008, 34(4): 52-54.
CHEN Shengjian, WANG Dong, DING Yansong. Fault isolation method based on information flow model[J]. China Measurement & Testing Technology, 2008, 34(4): 52-54. (in Chinese)