

## 面向综合诊断的电子装备测试资源优化分配

杜敏杰, 蔡金燕, 刘利民  
(军械工程学院光学与电子工程系, 石家庄 050003)

**摘要:** 针对综合诊断思想对电子装备测试资源分配的新要求, 在测试点优化的基础上, 建立了装备 BITE 与 ATE 优化分配的模型。该模型以测试代价最小为优化目标, 以故障检测率、故障隔离率及虚警率为约束条件并通过 LINGO 求解。结果表明, 该方法在满足测试性指标的同时降低了测试代价, 对装备分层次设计和诊断、提高保障效率、减少寿命周期费用, 具有重要意义。

**关键词:** 电子装备; 综合诊断; 测试性; 测试资源分配; 机内测试设备; 自动测试设备

**中图分类号:** V271.4; TP26 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)01-0074-03

## Integrated Diagnostics Oriented Optimized Allocation of Electronic Equipment's Test Resource

DU Minjie, CAI Jinyan, LIU Limin  
(Optical and Electronic Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** Considering the requirements of integrated diagnostics to electronic equipment for test resource allocation, we established the optimized allocation models of Built-In Test Equipment (BITE) and Automatic Test Equipment (ATE) based on test points' optimization. Taking the minimum test cost as the optimization object, and with the constraint conditions of fault detection rate, fault isolation rate and false alarm rate, this model was solved by LINGO. The results indicated that this method can meet the testability indicators while reducing the test cost, which is of great significance to hierarchy design and diagnostics of equipment for increasing logistic support efficiency as well as decreasing life-cycle cost.

**Key words:** electronic equipment; integrated diagnostics; testability; test resource allocation; BITE; ATE

### 0 引言

为适应未来作战环境对电子装备维修性、测试性和保障性的要求, 综合诊断思想应运而生。它是考虑和综合全部有关诊断要求, 使装备诊断能力达到最大有效性的设计和管理过程。它要求在装备设计阶段就要合理设计机内测试设备 (BITE) 和外部测试设备 (ETE), 以使系统测试资源的分配达到最优。作为两类主要的测试资源, BITE 和自动测试设备 (ATE) 各有优缺点。在满足一定测试性指标的前提下, 如何在二者之间权衡选择, 使得装备整体的测试代价最小是测试资源分配的任务。

文献[1]基于可观测准则, 利用有向图解决状态

监测用的传感资源配置问题; 文献[2]在动态符号有向图框架下解决传感器布置问题, 但未考虑传感器故障; 文献[3]建立了传感器资源分配的混合整数线性规划 (MILP) 模型, 仍未考虑传感器失效情况; 文献[4-5]研究了 BIT 资源优化设计方法, 但未考虑 BIT 故障条件下如何增加其他非 BIT 资源的问题; 文献[6]用层次分析法与模糊综合评判法选择测试设备, 存在主观性强、计算过程复杂的问题。本文以整体测试代价最小为优化目标, 以故障检测率 (FDR)、故障隔离率 (FIR) 及虚警率 (FAR) 为约束条件, 建立面向综合诊断的资源优化的非线性 0-1 规划模型并用 LINGO 求解。同时, 由于测试资源分配的物理对象是装备测试点, 其数量、位置直接决定上述模型的形式和结果, 若数量太少达不到指定的测试性指标, 太多则会增加测试代价, 故在建模之前需要初步优选测试点。

### 1 测试点初步优选

测试点优选的目标在于: 在满足故障检测和单故障

收稿日期: 2011-12-25

基金项目: 河北省重点基础研究项目 (10963529D)

作者简介: 杜敏杰 (1984—), 男, 河南新蔡人, 博士生, 研究方向为武器系统性能检测与故障诊断。

分辨的前提下,使所需的测试点数量最少,解决该问题首先需要建立测试和故障的依赖关系。多信号流图不仅能反映故障部件和测试的因果关系,而且接近系统物理结构,建模容易,故用它表达此关联关系。一旦建立系统多信号流图模型,测试和故障的相关性矩阵很容易得到。设  $T = \{T_i | i \text{ 为所有测试点序列}\}$  代表测试点集,  $F = \{F_j | j \text{ 为所有故障序列}\}$  代表故障集,对于矩阵  $D = (d_{ij})$ ,若测试点  $T_i$  能观测到故障  $F_j$  则  $d_{ij} = 1$ ,否则  $d_{ij} = 0$ ,那么  $T$  与  $F$  形成的 0-1 矩阵  $D$  就是相关性矩阵。

令  $n \times m$  维矩阵  $M = D^T$ ,则故障检测和单故障分辨约束可归结如下:

1) 当且仅当  $M$  中没有全为零的行时,  $T$  能检测给定故障集  $F$  中的所有故障;

2) 当且仅当  $M$  中的所有行互不相同,  $F$  中的故障满足单故障可分辨<sup>[7]</sup>。

进而测试点优选问题可表述为:选择  $M$  的最小列子集,使得由这些列子集所构成的矩阵  $M_c$  没有全为零的行,且  $M_c$  各行互不相同。考虑二进制向量  $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ ,如果  $x_j = 1$  代表当且仅当第  $j$  列选中,那么  $x$  可理解为是对  $M$  列子集的选择。设  $E = (1, 1, \dots, 1)^T$  是合适维数的全 1 向量,则条件  $Mx \geq E$  表示  $x$  所选择的列子集所构成的矩阵没有全为零的行。对另一个约束,定义一个  $n(n-2)/2$  行、 $m$  列的矩阵  $M_2$ ,  $M_2$  的每一行  $R_{i,j}$  对应着  $M$  的两行  $R_i$  和  $R_j$ ,定义  $R_{i,j} = R_i \oplus R_j$ ,  $\oplus$  表示异或运算,那么条件  $M_2x \geq E$  表示  $x$  所选择的列子集所构成的矩阵没有相同的行。考虑矩阵  $\bar{M} = \begin{pmatrix} M \\ M_2 \end{pmatrix}$ ,则测试点优化问题可表达为

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^m x_i \\ \text{s. t.} \quad & \bar{M}x \geq E, x_i = 0 \text{ or } 1 \end{aligned} \quad (1)$$

上述 0-1 规划模型求解方法较多,文中将用分支定界法求解得最优测试点集。

## 2 测试资源优化分配建模与求解

一旦优选出测试点,就要给它们分配合适的测试资源。BITE 是嵌入到装备内部的自诊断设备,用于在线状态监测,具有诊断快速、灵活、硬件成本低等优点,但受重量、体积等因素制约,检测隔离能力有限并一直为 FAR 过高等缺陷所困扰;ATE 是独立于装备外部的测试设备,用于离线诊断,具有比 BITE 更强大的诊断能力,但存在设备复杂昂贵、不够便捷等缺点。寻求解决在满足多种测试性指标(FDR、FIR 及 FAR 等)前提下,装备整体测试代价最小这一问题,对于提高电子装备综合诊断能力、实现装备分层次设计和诊断(在线和离线诊断)、维修和后勤保障的综合化、提高保障效率

等,具有重要意义。

### 2.1 确定优化目标

设优选出的测试点有序集  $T = (T_1, T_2, \dots, T_m)$ ,对于其中的任一测试点  $T_i (1 \leq i \leq m)$ ,设用 BITE 对其进行测试的代价为  $C_i$ ,用 ATE 测试代价为  $C_{i+m}$ ,定义二进制向量  $x = (x_1, x_2, \dots, x_m, x_{1+m}, x_{2+m}, \dots, x_{2m})^T$ ,其中  $x_i (1 \leq i \leq m)$  表示第  $i$  个测试点对 BITE 的选择,  $x_{i+m}$  表示第  $i$  个测试点对 ATE 的选择,则优化目标为

$$\min \sum_{i=1}^m (C_i x_i + C_{i+m} x_{i+m}) \quad (2)$$

### 2.2 故障检测率约束

按照文献[8],FDR 定义为:用规定的方法正确检测到的故障数与故障总数之比,用百分数表示。可表达为

$$\gamma_{\text{FD}} = \lambda_D / \lambda = \left( \sum \lambda_{D_i} / \sum \lambda_i \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\lambda_D$  表示被检测出的故障模式的总故障率; $\lambda$  表示所有故障模式的总故障率; $\lambda_{D_i}$  表示第  $i$  个被检测出的故障模式的故障率; $\lambda_i$  表示第  $i$  个故障模式的故障率。

工程中确定 FDR 应考虑的因素包括:被测单元的部件或故障模式的故障率、检测方法及其可靠性方面的约束<sup>[9]</sup>。考虑相关性矩阵  $D$ ,设故障集中的  $F_j$  发生概率为  $f_j$ ,对于  $T$  中的任一测试点  $T_i$ ,设在其上有两种测试资源 BITE 和 ATE 供分配,其中 BITE 自身故障率为  $\lambda_i$ ,ATE 自身故障率为  $\lambda_{i+m}$ 。现在考虑  $D$  的第  $j$  列上不为 0 的元素所对应的测试点集,在故障  $F_j$  发生的前提下,当且仅当这些测试点分配的 BITE 和 ATE 同时发生故障时,  $F_j$  不可检测;否则  $F_j$  可检测。对于  $T_i$ , BITE 发生故障和 ATE 发生故障独立,同时各测试点上的测试资源发生故障也相互独立,因此并非所有  $T_i$  对应的资源都发生故障的概率为  $1 - \prod_{i=1}^m \lambda_i \lambda_{i+m}$ ,由式(3)得 FDR 约束关系为

$$\frac{\sum_{j \in F} [f_j (1 - \prod_{i=1}^m \lambda_i^{x_i d_{ij}} \lambda_{i+m}^{x_{i+m} d_{ij}})]}{\sum_{j \in F} f_j} > \gamma_{\text{FD}} \quad (4)$$

### 2.3 故障隔离率约束

FIR 定义为:用规定的方法将检测到的故障正确隔离到不大于规定模糊度的故障数与检测到的故障数之比,用百分数表示。可表达为

$$\gamma_{\text{FI}} = \lambda_L / \lambda_D = \left( \sum \lambda_{L_i} / \lambda_D \right) \times 100\% \quad (5)$$

式中: $\lambda_L$  表示可隔离到小于等于  $L$  个可更换单元的故障模式的故障率之和; $\lambda_D$  表示被检测出的所有故障模式的故障率之和; $\lambda_{L_i}$  表示可隔离到小于等于  $L$  个可更换单元的故障中第  $i$  个故障模式的故障率; $L$  表示故障隔离模糊度。

确定 FIR 应考虑 FDR、检测技术及可接受的隔离

方法。考虑  $D$  的第  $j$  列上不为 0 的元素所对应的测试点集,欲隔离一个故障  $F_j$ ,则要求这些测试点中的任何一个不能出现 BITE 和 ATE 同时发生故障的情况。基于 FDR 约束中的两个独立性假设,由概率论知: $F_j$  故障的前提下,其可隔离概率为  $\prod_{i=1}^m (1 - \lambda_i \lambda_{i+m})$ ,由式(5)得 FIR 约束关系为

$$\frac{\sum_{j \in F_c} [f_j \prod_{i=1}^m (1 - \lambda_i^{x_i d_{ij}} \lambda_{i+m}^{x_{i+m} d_{ij}})]}{\sum_{j \in F} [f_j (1 - \prod_{i=1}^m \lambda_i^{x_i d_{ij}} \lambda_{i+m}^{x_{i+m} d_{ij}})]} > \gamma_{FI} \quad (6)$$

式中,  $F_L$  为可分辨故障集。

### 2.4 虚警率约束

FAR 定义为:在规定的时间内发生的虚警数和同一时间内的故障指示总数之比。表达式为

$$\gamma_{FA} = n_A / N_F = \lambda_{FA} / (\lambda_{FA} + \lambda_D) \times 100\% \quad (7)$$

式中: $n_A$  表示虚警数; $N_F$  为故障指示总数; $\lambda_{FA}$  为虚警发生频率; $\lambda_D$  为被检测到的故障模式的故障率总和。按照美军标 MIL-STD-2165 的定义,虚警是指 BITE 或其他检测模块指示被测单元有故障而实际该单元不存在故障的情况。反言之,在被测单元无故障的情况下,检测模块错报、假报故障,即虚警。造成这种虚警的因素较复杂,这里将其归结为检测模块故障所致。基于上述论述并由式(7)得 FAR 约束关系为

$$\frac{\sum_{j \in F_L} [(1 - f_j) \prod_{i=1}^m \lambda_i^{x_i d_{ij}} \lambda_{i+m}^{x_{i+m} d_{ij}}]}{\sum_{j \in F_L} [(1 - f_j) \prod_{i=1}^m \lambda_i^{x_i d_{ij}} \lambda_{i+m}^{x_{i+m} d_{ij}}] + \sum_{j \in F} [f_j (1 - \prod_{i=1}^m \lambda_i^{x_i d_{ij}} \lambda_{i+m}^{x_{i+m} d_{ij}})]} < \gamma_{FA} \quad (8)$$

### 2.5 建立模型

综合上述论述,测试资源优化分配的数学模型为:以式(2)为优化目标,式(4)、式(6)、式(8)分别为约束条件的优化问题。这是个非线性 0-1 规划模型,这类模型没有普遍适用的求解算法,文中将采用数学建模中的 LINGO 软件求解。

## 3 实例应用

图 1 所示<sup>[5]</sup>为某被测系统多信号流图。

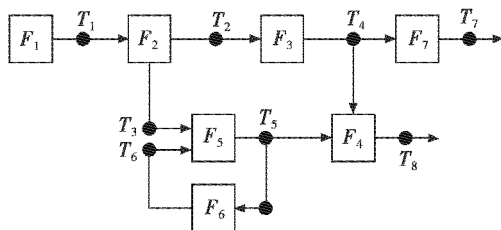


图 1 被测系统多信号流图

Fig. 1 The system's multi-signal flow graph

图中: $F_1 \sim F_8$  为故障集; $T_1 \sim T_8$  为测试点集。由图 1 分析可得测试和故障关联的相关性矩阵,如表 1 所示。

表 1 相关性矩阵

Table 1 The dependency matrix

测试	故障					
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_{5,6}$	$F_7$
$T_1$	1	0	0	0	0	0
$T_2$	1	1	0	0	0	0
$T_3$	1	1	0	0	0	0
$T_4$	1	1	1	0	0	0
$T_5$	1	1	0	0	1	0
$T_6$	1	1	0	0	1	0
$T_7$	1	1	1	0	0	1
$T_8$	1	1	1	1	1	0

理论上,检测隔离表 1 中故障集中的故障需要的最少测试点数为  $\text{lb}^n$  ( $n$  为可分辨故障集),取整为 3。用式(1)所示的测试点优化模型,初步优选得到的测试点为  $T_1, T_6, T_7, T_8$ ,假定在这些最优测试点上分配 BITE 的代价为(1,1,1,1),对应的 BITE 电路故障率为(0.003, 0.004, 0.003, 0.002);分配 ATE 的代价为(2,2,2,2),对应故障率为(0.0003, 0.0004, 0.0003, 0.0002)。故障集对应的故障率为(0.018, 0.009, 0.027, 0.046, 0.046, 0.036)。要求指标  $\gamma_{FD} > 0.90, \gamma_{FI} > 0.70, \gamma_{FA} < 0.02$ ,将相关变量代入由式(2)、式(4)、式(6)、式(8)构成的优化模型,在 LINGO9.0 下经过 2039 次迭代得:给  $T_6, T_8$  分配相应的 BITE、给  $T_7$  分配相应的 ATE 就能满足给定的测试性指标,系统最小测试代价为 4。表 2 给出了与文献[5]优化结果的比较。

表 2 优化结果比较

Table 2 The comparison of optimization results

优化结果	本文方法	文献[5]方法
FDR	0.999	0.999
FIR	0.899	0.746
FAR	0.012	0.012
最优测试点	$T_1 T_6 T_7 T_8$	$T_1 T_4 T_5 T_7 T_8$

从表中可以看出:与文献[5]结果相比,虽然文中优化结果中 FDR、FAR 未有明显改善,FIR 却得到提高,测试点也得到优化,更重要的是测试资源的分配更为合理。

## 4 结语

针对综合诊断思想对电子装备测试资源分配的新要求,在测试点优化的基础上,建立了以测试代价最小为优化目标,以 FDR、FIR 及 FAR 为约束条件的资源分配非线性规划模型并通过 LINGO 求解。结果表明该方法的有效性,对装备分层次设计和诊断、提高保障效率、减少寿命周期费用,具有重要意义。

(下转第 88 页)

## 5 结束语

区域范围内的水平风向、风速和大气压力等,是保证精确投放人员和物资的重要参数。本文从系统架构、水平风向风速测量方法、节点设计和通信协议研究等方面入手,设计了一种无人值守的空降空投气象测量系统,构建了测量节点和中继节点的原理样机,搭建了通信协议仿真研究环境,物理和仿真实验说明,本文提出的空投式气象测量系统可行,该研究在国内外鲜有可借鉴的例子,其成果将开创一种新的气象参数探测方法,提升空降、空投的准确性、机动性和适应性。后续工作将围绕着建立原型系统展开。

### 参 考 文 献

- [1] 冯力天,郭弘其,陈涌,等. 1.55  $\mu\text{m}$  全光纤多普勒测风雷达系统与试验[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 844-847.
- [2] VALLE M P D, CASTELAN J A U, MATSUMOTO Y, et al. Low cost ultrasonic anemometer[C]//The 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ICEEE 2007, Sept. 5-7, 2007:213-216.
- [3] VILLANUEVA J M M, CATUNDA S Y C, TANSCHETT R. Maximum-likelihood data fusion of phase-difference and threshold-detection techniques for wind-speed measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(7):2189-2195.
- [4] WANG L B, WU Y. Time-difference ultrasonic wind detection methods based on cross-correlation theory[C]//The 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI' 2007, Aug. 16, 2007:165-168.
- [5] 甘江英,龚兆岗,张小花,等. 基于 SOPC 技术的超声波风向风速检测系统[J]. 上海海事大学学报, 2009, 30(4):75-79.
- [6] 王葵军,谢扩军. 基于 FPGA 时差法超声波风速风向仪前端电路的设计[J]. 电测与仪表, 2010, 47(7):74-76.
- [7] 罗中兴,魏毅立,施静伟. 基于 DSP 的超声波测风仪[J]. 声学与电子工程, 2009(2):39-41.
- [8] 杨雪松. 降落伞空投过程的仿真研究[C]//2004 年中国航空学会青年科技论坛论文集, 2004:495-503.
- [9] 王丽颖,支炜,孙红霞,等. 基于 HMC1022 磁阻传感器的数字电子罗盘的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2009, 32(1):108-111.
- [10] 马建仓,胡士峰,邵婷婷. 三轴磁阻电子罗盘设计[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(3):142-144.
- [11] 王磊,张瑞华,邢厚子. 无线传感器网络 MAC 协议研究比较[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(21):4043-4045.
- [12] 蔡型,张思全. 短距离无线通信技术综述[J]. 现代电子技术, 2004, 3:65-67.

(上接第 76 页)

### 参 考 文 献

- [1] RAGHURAJ R, BHUSHAN M, RENGASWAMY R. Locating sensors in complex chemical plants based on fault diagnostic observability criteria[J]. American Institute of Chemistry Engineering Journal, 1999, 45(2):310-322.
- [2] 杨帆,萧德云. 大型复杂系统的动态 SDG 模型及传感器布置问题[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2):181-186.
- [3] BAGAJEWICZ M, FUXMAN A, URIBE A. Instrumentation network design and upgrade for process monitoring and fault detection[J]. American Institute of Chemistry Engineering Journal, 2004, 50(8):1870-1880.
- [4] 杨光,刘冠军,李金国,等. 基于故障检测和可靠性约束的传感器布局优化[J]. 电子学报, 2006, 34(2):348-351.
- [5] 马存宝,王彦文,史浩山,等. 机载电子设备 BIT 优化设计技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9):2276-2279.
- [6] 陈希祥,邱静,刘冠军. 基于层次分析法与模糊综合评判的测试设备选择方法研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(1):68-73.
- [7] FIJANY A, VATAN F. A new efficient algorithm for analyzing and optimizing the system of sensors[C]//IEEE Aerospace Conference, 2006:1-8.
- [8] 国防部科学技术工业委员会. GJB2547-95 装备测试性大纲[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部, 1995.
- [9] 中国人民解放军空军雷达学院. GJB3970-2000 军用地面雷达测试性要求[S]. 北京:总装备部军标出版发行部, 2000.

欢迎投稿 网址: <http://www.dgykz.com>