

文章编号:1001-2486(2004)03-0103-04

一种用于机电产品测试性设计的传感器优选 MINLP 模型*

杨国锋,邱 静,钱彦岭,刘冠军
(国防科技大学机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

摘 要:在单故障假设条件下,考虑了传感器的失效概率和设备的故障率,提出一种以故障检测率和故障隔离率为约束条件的降低传感器费用和失效概率的混合整数非线性规划(MINLP)模型,从而为机电产品测试性设计中传感器选择问题提供了一种可行和有效的解决方法,并进行了案例验证,说明了该方法的有效性。

关键词:传感器的优选;MINLP 模型;测试性设计

中图分类号:TP274.2 文献标识码:A

Research on Optimal Sensor Selection Model in Test Design for Mechatronics Equipments

YANG Guo-feng, QIU Jing, QIAN Yan-ling, LIU Guan-jun

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

Abstract: A MINLP model based on the single fault resolution is proposed. The model takes into account the sensor failure probabilities and fault occurrence probabilities of the equipments, and it is constrained by FDR and FIR to attain optimal sensor selection in test design for mechatronics equipments. The model is applied to a servo platform to highlight the utility of the model.

Key words: optimal sensor selection; MINLP model; design for testability

在机电产品测试性设计中,须选择合适的传感器对被测单元进行有效测试以满足测试性指标(故障检测率等)要求^[1]。对检测和隔离故障来说,选用的传感器精度越高、故障率越低、数目越多就越有利。然而,精度高、故障率低的传感器必然价格昂贵,同时过多的传感器可能会对系统的性能造成负面影响。因此,有必要找到一种合适的方法来指导传感器的选择。目前,针对这个问题,还缺乏统一的、有效的途径,一般借鉴故障诊断的原理,根据所采用诊断方法来选择传感器。但由于缺乏总体上的规划,选择结果很难达到测试性所要求的故障检测率和隔离率,虚警问题也难以有效衡量。本文通过对测试性设计过程的仔细分析,在考虑设备故障率和传感器失效概率的情况下,建立了以降低传感器价格为目标、以满足故障检测率及故障隔离率要求为约束条件的一个混合整数非线性规划(MINLP)模型,作为传感器选择的依据。利用 LINGO 软件进行的选择案例表明,本文提出的方法可有效用于解决机电产品测试性设计中传感器的选择问题。

1 传感器选择问题的数学描述

已知可供选择的传感器集合 $SS = [SN_1, SN_2, \dots, SN_m]$, 待检测的故障集 $FS = [FT_1, FT_2, \dots, FT_n]$ 。传感器 SN_i 有两个属性:价格 c_i , 失效概率 s_i 。故障 FT_j 有一个属性:故障率 f_j 。传感器的选择情况用向量 $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ 表示, x_i 为布尔变量, x_i 为“1”表示 SN_i 被选择, 为“0”表示不被选择。

测试性指标有两个:故障检测率指标 R_{FD} 和故障隔离率指标 R_{FI} 。 FDR^* 、 FIR^* 为进行传感器选择后的故障检测率和故障隔离率。

显然,在测试性设计过程中,应使所选的传感器在满足测试性指标的前提下,价格和失效概率最低,

* 收稿日期:2003-11-30

基金项目:国家部委基金资助项目

作者简介:杨国锋(1978—),男,硕士生。

同时要保证所指定必须检测的故障被检测,所指定必须隔离的故障被隔离。这样,传感器选择问题可描述为一个优化问题:

$$\text{Objective: } \min Z = \left\{ \min \sum_{i \in MS} c_i x_i, \min \sum_{j \in MF} s_j x_j \right\} \quad \text{s.t.} \begin{cases} \text{指定故障被检测} \\ \text{指定故障被隔离} \\ FDR^* \geq R_{FD} \\ FIR^* \geq R_{FI} \end{cases} \quad (1)$$

2 传感器选择问题 MINLP 模型的建立

2.1 故障检测和单故障分辨

为描述故障的测试信息,定义故障信息矩阵^[2] $D = [d_{ij}]$,其中,每一个 d_{ij} 对应着一个 $SS \times FS$ 关系对,取值为布尔变量,“1”表示传感器 SN_i 可观测故障 FT_j ,“0”表示不可观测。设 MS 为 SS 的索引集, MF 为 FS 的索引集。为了保证所有的故障被观测,那么必须满足:

$$\sum_{i \in MS} x_i d_{ij} \geq 1, \quad \forall j \in MF \quad (2)$$

一般情况下,并不需要保证系统中所有的故障被检测,只要确保严酷度为 I 类的故障和严酷度为 II 类的故障被检测即可^[1]。为此,可为故障 FT_j 添加属性 FO_j ; FO_j 为布尔变量, FO_j 为“1”表示该故障必须被检测。则式(2)可放松为:

$$\sum_{i \in MS} x_i d_{ij} \geq 1, \quad \forall j \in MF, FO_j = 1 \quad (3)$$

在测试性设计时,不仅要检测故障,而且要对检测到的故障进行隔离和诊断。由于存在一个传感器可以检测多个故障,一个故障也可被多个传感器检测的情况,所以故障隔离问题要远比故障检测问题复杂。一般情况下,只考虑两个故障的故障隔离问题^[3],即单故障分辨问题。此时,可为故障 FT_j 添加属性 FI_j ; FI_j 为布尔变量, FI_j 为“1”时表示该故障必须被隔离。则单故障分辨条件可描述为^[3]:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i \in MS} [d_{ij} d_{ip} x_i] &\leq C_p - 1 \\ C_p - \Omega \cdot K_p &\leq \sum_{i \in MS} [d_{ij} x_i] \\ C_p &\geq \sum_{i \in MS} [d_{ip} x_i] \\ C_p - \Omega \cdot (1 - K_p) &\leq \sum_{i \in MS} [d_{ip} x_i] \\ C_p &\geq \sum_{i \in MS} [d_{ip} x_i] \end{aligned} \right\} \forall j, p \in MF, FI_j = 1, FI_p = 1 \quad (4)$$

式中, Ω 是传感器总数的上限, K_p 是一个布尔变量, C_p 为临时变量。

2.2 故障检测率约束条件

故障检测率(FDR)一般定义为:在规定的时间内,由机内测试(Built-in Test, BIT)和(或)外部测试设备(External Test Equipment, ETE)正确检测到的故障数与故障总数之比,其数学模型^[1]为:

$$FDR = \frac{N_D}{N_T} = \frac{T \times \lambda_D}{T \times \lambda} = \frac{\lambda_D}{\lambda} = \frac{\sum \lambda_i}{\lambda} \times 100\% \quad (5)$$

式中, λ_D 为被测出的故障模式的总故障率, λ 为所有故障模式的总故障率, λ_i 为第 i 个被检测出故障模式的故障率。用 s_i 表示 SN_i 的故障发生概率,用 f_j 表示 FT_j 的故障率,要满足故障检测率指标,须满足:

$$\sum_{j \in MF} [f_j \prod_{i \in MS} (1 - s_i^{d_{ij}})] / \sum_{j \in MF} f_j \geq R_{FD} \quad (6)$$

2.3 故障隔离率约束条件

故障隔离率(FIR)一般定义为:在规定的时间内,由 BIT 和(或) ETE 正确隔离到不大于规定的可更换单元数的故障数与同一时间内检测到的故障数之比,其数学模型^[1]为:

$$FIR = \frac{\lambda_L}{\lambda_D} = \frac{\sum \lambda_{L_i}}{\lambda_D} \times 100\% \tag{7}$$

式中, λ_D 为被检测出的所有故障模式故障率之和, λ_L 为可隔离到小于等于 L 个可更换单元的故障模式的故障率之和, λ_{L_i} 为可隔离到小于等于 L 个可更换单元的故障中, 第 i 个故障模式的故障率, L 为隔离组内的可更换单元数。

文献[3]认为只要两个故障对应的传感器向量是相同, 那么这两个故障就是不可分辨的, 然而有两种情况例外: 一是隔离故障就要考虑故障隔离的层次, 发生在一个故障隔离单元的两个故障, 即使对应的传感器向量相同, 也是可隔离的; 二是对于某些故障, 即使两个故障对应的传感器向量相同, 但通过特征提取还是可以隔离的。因此, 计算 FIR 时, 要把这两种情况考虑在内。为此, 为故障 FT_j 添加属性 FIL_j , FIL_j 为布尔变量, 满足上述两种情况时, 设置为“1”。要满足故障隔离率指标, 须满足:

$$\sum_{j \in MF, FI_j=1, FIL_j=1} [f_j \prod_{i \in MS} (1 - x_i d_{ij} s_i)] / \sum_{p \in MF} [f_p (1 - \prod_{i \in MS} s_i^{d_{ip}})] \geq R_{FI} \tag{8}$$

2.4 模型的建立

由式(1)、(4)、(6)和式(8)所描述的传感器选择问题可表示成一个混合整数非线性规划模型, 描述如下:

$$\begin{aligned} \text{Lexmin } Z = & \left\{ \sum_{i \in MS} [c_i x_i], \sum_{i \in MS} [s_i x_i] \right\} \\ & \sum_{i \in MS} x_i d_{ij} \geq 1, \quad \forall j \in MF, FO_j = 1 \\ & \sum_{i \in MS} [d_{ij} d_{ip} x_i] \leq C_p - 1 \\ & C_p - \Omega \cdot K_p \leq \sum_{i \in MS} [d_{ip} x_i] \\ & C_p \geq \sum_{i \in MS} [d_{ip} x_i] \\ & C_p - \Omega \cdot (1 - K_p) \leq \sum_{i \in MS} [d_{ip} x_i] \\ & C_p \geq \sum_{i \in MS} [d_{ip} x_i] \\ & \sum_{j \in MF} [f_j (1 - \sum_{i \in MS} s_i^{d_{ij}})] / \sum_{j \in MF} f_j \geq R_{FD} \\ & \sum_{j \in MF, FI_j=1, FIL_j=1} [f_j \prod_{i \in MS} (1 - x_i d_{ij} s_i)] / \sum_{p \in MF} [f_p (1 - \prod_{i \in MS} s_i^{d_{ip}})] \geq R_{FI} \end{aligned} \tag{9}$$

式中, Z 为字典序极小化目标向量^[4]。

3 案例分析

为验证上述方法的有效性, 对某机电平台 BIT 系统进行了分析。考虑到式(9)的复杂性, 为提高效率, 采用 LINGO 软件进行分析求解。LINGO 是一种专门用于求解数学规划问题的软件包, 执行速度快,

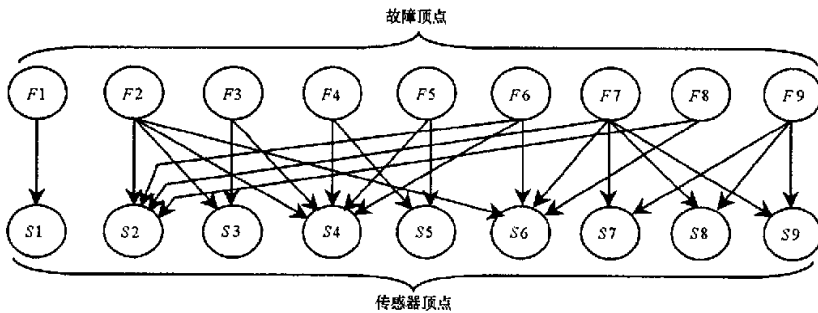


图1 测试关系二部图

Fig.1 The bipartite graph for testing relation

便于输入、求解和分析数学规划问题。案例分析所需要的数据如表1和表2所示。图1是故障和传感器之间的二部图模型,图中各节点含义如表1和表2所示。

表1 故障及其属性

Tab.1 Faults and their properties defined

故障	检测 隔离		故障率 (%/1000h)
	否	否	
驱动器工作不正常 F1	是	是	1
定、转子气隙匀 F2	否	否	1
电机定子线圈断路 F3	是	是	10
电机定子线圈短路 F4	是	否	1
电机定子线圈接地 F5	否	否	10
电机轴承磨损 F6	是	否	15
减速器齿轮疲劳磨损 F7	否	是	20
减速器轴承疲劳磨损 F8	是	否	15
减速器无输出 F9	是	是	1

表2 备选传感器及其属性

Tab.2 Sensors available and their properties defined

传感器(以检测对象命名)	失效概率 (/1000h)	价格 元
电平信号检测 S1	0.01	1
振动传感器 S2	0.001	200
电流传感器 S3	0.001	150
光电编码器 S4	0.01	1000
温度传感器 S5	0.01	100
振动传感器 S6	0.001	200
光电编码器 S7	0.01	1000
转速速率陀螺 S8	0.001	10 000
捷联惯导 S9	0.0001	100 000

由表2中数据,可选的传感器上限 $\Omega = 9$,将数据代入式(9),分别设定几组不同的测试性设计指标,利用 LINGO 求解,结果见表3。

表3 求解结果

Tab.3 Solution from LINGO

I	测试性要求	优化后(总代价为:1451)(失效率和为:0.3200000e-01)
	FDR 0.98	FDR 0.9945716 选用的 S1 S2 S3 S5 S7
	FIR 0.95	FIR 0.9955174 传感器
II	测试性要求	优化后(总代价为:1451)(失效率和为:0.3200000e-01)
	FDR 0.96	FDR 0.9945716 选用的 S1 S2 S3 S5 S7
	FIR 0.94	FIR 0.9955174 传感器
III	测试性要求	优化后(总代价为:10451)(失效率和为:0.2300000e-01)
	FDR 0.997	FDR 0.9971232 选用的 S1 S3 S5 S6 S8
	FIR 0.996	FIR 0.9979475 传感器

由表3可以看出:

(1) 优化后的测试性均满足设计要求,选用传感器的个数明显少于备选传感器的总数,减少了对系统造成的影响,控制了测试方案的费用。

(2) 传感器的选择方案与故障的属性和传感器的属性有关,当故障属性与传感器属性起了主导作用时,测试性指标降低不会影响选择方案,从而进一步说明了算法的正确性和有效性。

(3) 测试性要求的提高会造成总代价的上升。

4 结论与展望

针对机电产品测试性设计中的传感器选择问题,本文考虑了以故障检测率和故障隔离率作为约束条件的传感器选择 MINLP 模型,为传感器的选择提供了一种技术途径。验证案例表明,在单故障的条件下,可以有效解决传感器的选择问题。而多故障并发的情况下,传感器选择问题的研究则需要进一步开展。

参考文献:

- [1] 曾天翔. 电子设备测试性及诊断技术[M]. 北京:航空工业出版社,1996.
- [2] 武庄,何新贵. 用遗传规划法确定最佳故障隔离策略[J]. 兵工学报,2000,21(4).
- [3] Bagaiewicz M, Fuxman A. Cost Optimal Instrumentation Network Design and Upgrade for Process Monitoring and Fault Detection[A]. Proceedings of the 4th IFAC Workshop on On-line Fault Detection & Supervision in the Chemical Process Industries, June 8-9, Seoul, Korea(2001).
- [4] 伊格尼齐奥 J.P. 单目标和多目标系统线性规划[M]. 闵仲求,等译. 上海:同济大学出版社,1986.

