

基于故障检测和可靠性约束的传感器布局优化

杨 光¹, 刘冠军², 李金国¹, 杨国峰²

(1. 空军装备研究院雷达所环境与可靠性试验中心, 北京 100085; 2. 国防科技大学机电工程研究所, 湖南长沙 410073)

摘 要: 传感器布局优化是实现机电设备机内测试 (BIT) 系统设计优化的重要方法之一, 保证系统对检测目标具有较好的检测效能是传感器布局优化的重要约束. 通过测试信息模型分析, 可知传感器自身可靠性问题将会影响系统效能的实现. 本文在分析传感器故障概率对测试系统故障检测效能的影响的基础上, 以传感器的故障概率和最小及传感器总价格最小为优化目标, 以故障检测率、故障隔离率及虚警率为约束, 基于系统故障——传感器的测试信息模型, 设计并构建了一个传感器布局多目标优化的非线性整数规划模型 (MINLP), 对其求解可得到 BIT 系统的传感器布局优化设计方案, 并以某伺服 BIT 系统为例进行优化设计分析.

关键词: 测试系统; 传感器布局; 故障检测; 可靠性

中图分类号: TN432 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 02-0348-04

Optimal Sensor Placement Based on Various Fault Detectability and Reliability Criteria

YANG Guang¹, LIU Guan-jun², LI Jin-guo¹, YANG Guo-feng²

(1. Environmental and Reliability Test Center for Equipments, Academy of Air Force, Beijing 100085 China;

2. Department of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Optimal sensor placement is one of the important methods for optimal design of mechatronic BIT system. Effective detection is the important constrain for optimal sensor placement. In fact the reliability of sensors must be considered while optimal designing the system because it would influence the effectiveness of system. Analyzed the detectable model, a mixed integer nonlinear programming (MINLP) model is proposed for optimal placement of sensors in this article. MINLP is based on detectable model of fault mode of equipment and sensors of BIT system. The objects of optimization are minimization of failure probability and cost of selected sensors. The constraints of this model involves the influence of failure probability of sensors on the FIR, FDR and FAR of mechatronic BIT systems. The solution can provide a optimal scheme for sensor placement. MINLP is applied to a detection system for a Servo system and its practicability is analyzed.

Key words measurement system; sensor placement; fault detection; reliability

1 引言

现代机电设备的使用过程中, 由于控制、状态检测等需求, 系统中采用了大量的传感器对关键的参量进行实时监测. 这些传感器往往安装在设备的敏感部位, 而由于设备结构特点的限制, 传感器的安装和布局方式可能会对设备的工作状态产生影响, 同时传感器的安装和布局效果要求能提供准确可靠的信息. 因此, 工程中传感器系统设计过程中的布局优化问题逐渐得到重视, 要求确定传感器的数目并对其进行优化^[1-9].

传感器布局优化需要解决以下两个问题: (1) 在保证

故障覆盖和辨识的前提下, 确定需要采用的传感器的数目和类型; (2) 对选定的传感器的布局进行优化, 其优化准则是在保证系统具有较高可靠性的前提下具有较好的检测性能.

Bagajewicz^[5]提出了一个 MILP 模型以解决传感器的选择问题, 但是其并没有考虑传感器故障的影响. 而传感器故障是产生检测系统虚警和漏检的重要原因之一, 虚警和漏检是影响系统执行性能的重要因素. 对于一个检测系统来说, 保证诊断系统的有效执行才是其真正目的, 因此, 为使优化设计结果具有较好的执行性能, 优化设计过程中必须考虑传感器故障概率对优化结果的影响.

因此, 本研究在考虑传感器故障概率的情况下, 以传感器的故障概率总和与传感器价格最小为优化目标, 以检测系统的故障检测率、故障隔离率及虚警率为约束, 建立了一个机电设备 BII 系统中传感器系统布局优化的非线性整数规划模型 (M NLP).

2 系统测试信息的数学描述

机电设备状态监测和故障诊断的质量在很大程度上依赖于传感器的布局, 如布局不当, 则可能导致某些故障无法检测或对其不敏感, 易造成严重后果, 因此传感器的布局方案必须保证对设备故障状态的覆盖与辨识. 在这种情况下, 要求对设备的故障模式具有一定的先验知识, 从而可基于机电设备故障模式分析进行传感器布局的优化设计. 因此, 为实现对设备故障模式的检测和辨识, 首先建立传感器集合与设备故障模式集合之间的因果关系矩阵, 该过程即为设备系统的测试信息分析过程, 该因果关系矩阵 D 可通过设备系统故障模式影响分析 (EM EA) 得到.

因果矩阵示例如表 1 所示^[5]. 矩阵记为 $D = \{d_{ij}\}$. 每个 d_{ij} 对应着一个 $S \times V$ 有序对, V

表 1 故障模式——传感器因果矩阵示例

	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
S_1	1	1	0	0	0
S_2	1	1	1	1	0
S_3	0	0	0	1	1

为设备故障模式, S 为属性信号或相应传感器. d_{ij} 取值为布尔变量, “1”表示传感器 S_i 可以对设备故障模式 F_j 进行检测, “0”表示不可检测.

对于该检测系统, 由于传感器自身可靠性问题, 其工作异常导致无法正确对 F_j 进行检测, 因此, 对于故障率为 s_i 的传感器, 其能对 F_j 进行有效检测的概率 P_{ij} 为:

$$P_{ij} = (1 - s_i^{d_{ij}}) \quad (1)$$

传感器自身的可靠性对测试系统检测率存在一定的影响, 为了达到对系统故障模式进行有效检测的目的, 在考虑传感器可靠性的条件下对传感器进行布局优化则显得尤为重要.

3 传感器布局优化的目标模型

一般来说, 在布局优化过程中往往要面对多个优化布局目标 (或准则). 基于某个优化布局目标进行优化后, 往往可能得到多个优化布局的方案, 此时则需要采用其他目标进一步进行优化选择. 因此, 在选择优化目标的过程中需要保证最终的结果是基于设计目的的最优, 该过程是在较大的不确定性程度下进行的. 实际工程设计过程中, 应选择所有合理的优化目标: (1) 考虑所有对该优化问题的合理的优化目标; (2) 得到对应每个标准的所有的优化布局方案; (3) 在确切的情况下, 在这些所有可能最优的布局

方案中选择最好的布局方案.

对优化目标来说, 每一个目标必须对应至少一个确定的优化选择方案, 如果对某个优化目标来说有多个等效的方案, 则需要从它们中进行进一步的选择, 即当前的目标不是最终的目标, 我们感兴趣的是最重要的目标, 此时仅有一个最佳方案.

在传感器系统的优化设计过程中, 考虑较多的是使其代价最小, 而实际工程应用中, 一个设计良好的系统其性能才是最重要的. 考虑到传感器系统可靠性所带来的影响, 因此, 将传感器系统的故障概率最小为目标显然更为重要. 同时以代价作为另一个设计目标, 从而使该优化问题成为多目标优化问题.

用向量 X 中的元素 x_i 表示相应传感器的个数, x_i 允许大于 1, 表示在同一个测试点, 可以放 1 个以上的同类型的传感器, 这样可以获得高的可靠性^[5]. 向量 q_i 表示 x_i 的上限. X 的定义如式 (2):

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad \forall x_i \leq q_i, x_i \in Z^+ \quad (2)$$

设测点 x_i 对应的单个传感器的故障概率为 r_i , 价格为 c_i , 则以传感器系统中各个传感器的故障概率总和与代价总和为优化目标函数时, 其数学描述分别为:

$$\begin{cases} m \ln \sum_{k \in S} [r_k x_k] \\ m \ln \sum_{k \in S} [c_k x_k] \end{cases} \quad (3)$$

在设计过程中, 由于考虑提高传感器系统的可靠性以预防虚警的发生, 因此, 将故障概率总和最小作为第一目标. 可以证明, 只有将其作为首要目标进行优化才能保证最终得到的优化结果为期望最优的.

4 传感器布局优化的约束模型

优化设计目标的实现需要在多个约束条件下进行, 对于检测系统, 其对故障模式的检测、隔离及虚警问题是能反映其有效性的重要方面, 因此, 建立系统的故障检测率约束模型、故障隔离率约束模型和虚警率约束模型是得到优化结果的有效途径, 分析和描述如下.

4.1 故障检测及检测率约束

有了故障信息矩阵, 就可以来判定故障是否可观测或隔离. 为了保证所有的故障被观测, 那么必须满足式 (4)^[5]:

$$\sum_{k \in S} x_k d_{kj} \geq 1, \quad \forall j \in F \quad (4)$$

若 $\sum_{k \in S} x_k d_{kj} = 0$ 则故障模式 F_j 是不可观测的.

故障检测率 (FDR) 定义为在规定的时间内, 由 BII 或外部测试系统 (ETE) 正确检测到的故障数与故障总数之比^[8], 考虑到传感器故障将对其检测效果产生影响, 因此, 用 s_i 表示传感器 S_i 的故障概率, 用 f_j 表示设备故障模式 F_j 的发生概率, 构建检测率约束如式 (5).

$$\sum_{k \in S} [f_j \prod_{k \in S} (1 - s_k^{x_k d_{kj}})] \setminus \sum_{k \in S} f_j \geq \text{FDR} \quad (5)$$

4.2 单故障分辨及隔离率约束

测试性程序设计中,不仅要观测到故障,而且要对观测的故障进行隔离、诊断.往往存在一个传感器可以观测多个故障,一个故障也被多个传感器观测的情况.当两个或两个以上的故障选用的传感器是相同的,那么传感器只能检测到故障,分辨出是哪个故障还需进一步的分析处理或采用不同传感器检测不同故障.

对于两个不同的故障模式 F_n 和 $F_m, n \neq m$, 它们在因果矩阵中对应的列矩阵为 $(d_n)_k$ 和 $(d_m)_k, k$ 表示对应传感器的行.根据因果矩阵,可用式(6)保证故障 F_n 和 F_m 可分辨^[5]:

$$\sum_{i \in S} \{ (d_n)_k \odot (d_m)_k \} \leq m \max \{ \sum_{k \in S} (d_n)_k, \sum_{k \in S} (d_m)_k \} - 1 \quad (6)$$

式(6)中的右边为一个非线性式.设可分辨故障集合为 F_L, Ω 是传感器总数的上限, K 是一个布尔变量,将式(6)线性化得到 F_L 中所有故障可分辨的约束^[5]:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i \in S} [d_{ij} x_i] &\leq C_{jp} \\ C_{jp} - \Omega \cdot K_{jp} &\leq \sum_{i \in S} [d_{ij} x_i] \\ C_{jp} &\geq \sum_{i \in S} [d_{ij} x_i] \\ C_{jp} - \Omega \cdot (1 - K_{jp}) &\leq \sum_{i \in S} [d_{ip} x_i] \\ C_{jp} &\geq \sum_{i \in S} [d_{ip} x_i] \end{aligned} \right\} \forall j, p \in F_L \quad (7)$$

故障隔离率(FR)一般定义为在规定的时间内,由BIT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^[8],考虑传感器故障带来的影响,构建隔离率约束如式(8):

$$\sum_{j \in F_L} [f_j \prod_{i \in S} (1 - s_i^{x_{di}})] \setminus \sum_{j \in F} [f_j (1 - \prod_{i \in S} s_i^{x_{di}})] \geq FR \quad (8)$$

4.3 虚警率约束

虚警率(FAR)定义为在规定的时间内,BIT系统产生的虚警故障数目与故障报警总数之比^[1,8],传感器故障是导致产生虚警的主要原因之一,因此在传感器优化布局过程中,传感器故障导致虚警是重要的约束之一.根据虚警率的定义,在传感器故障带来虚警的条件下,构建虚警率约束如式(9):

$$\frac{\sum_{j \in F} [(1 - f_j) \prod_{i \in S} s_i^{x_{di}}]}{\sum_{j \in F} [f_j (1 - \prod_{i \in S} s_i^{x_{di}})] + \sum_{j \in F} [(1 - f_j) \prod_{i \in S} s_i^{x_{di}}]} \leq FAR \quad (9)$$

4.4 模型的构建及求解

根据以上分析,这个问题的MNLPM模型即为从备选传感器集合S,选择出一组传感器向量X,在保证测试系统满足给定故障检测率FDR、故障隔离率FR和虚警率FAR,保证指定的故障模式集 F_0 被检测和指定 F_L 被隔离的条件下,使得系统总的故障概率最小和传感器总的费用最小,其数学表达式即为以上目标和约束的数学描述合成

所构成的模型.

根据以上构建的目标和约束的数学描述形式可以看到该问题为一个规划问题.由于模型中的约束条件中含有非线性函数,并且存在多个目标,因此其属于多目标的非线性规划问题.一般来说,非线性规划问题求解比解线性规划问题要困难一些.但随着计算机技术的发展,非线性规划问题的研究取得了较大进展.由于不存在广泛适用的求解算法,解非线性规划问题一般都是得到局部最优解.在本研究中,采用广泛适用的LINGO软件进行MINLP模型的求解.

LINGO主要用于解线性规划、非线性规划、二次规划和整数规划等问题,是一种专门用于求解数学规划问题的软件包.其执行速度快,便于输入、求解和分析数学规划问题,在科研和工业界得到广泛应用.

5 传感器布局优化应用分析

利用以上传感器布局优化模型对某车载稳定与跟踪伺服系统的传感器系统进行布局优化,该伺服系统的总体结构图如图1所示.通过FMEA分析,得到其故障模式——传感器因果矩阵如表2所示,表中列出了故障模式的名称和对应传感器名称.根据优化目标和约束构建该布局优化问题的MINLP模型,并利用LINGO对其求解可得到局部优化方案为表3所示的结果.

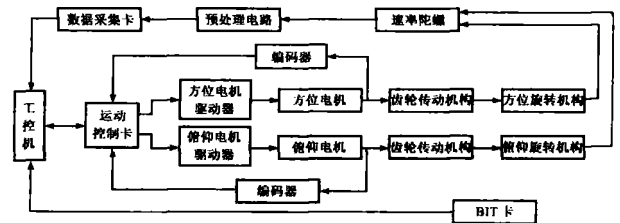


图1 某稳定平台伺服系统总体结构图

由布局优化的结果分析可见,测点数目和传感器数目都得到减少,传感器系统的故障率大大降低,使得其工作的可靠性得以提高.在考虑传感器故障对系统性能影响的情况下,所设计的优化布局方案能保证系统具有较高的检测率(98%)和隔离率(95%),同时检测系统的虚警率也能维持在较低的数值(1.75%).虽然是理论分析的结果,但是可以看到在节省资源的情况下,系统性能确实能够得以提高.以系统中单个传感器(如捷联惯导)的选择为例,优化方案的代价虽然偏高,但是由于捷联惯导系统已有,且其具有BIT设计,使得其可靠程度大大提高,和设计初衷是相符的,采用其有利于提高整个系统的性能.

因此,通过基于以上模型进行传感器布局优化之后,所得到的方案能满足设计需求,且节省了资源,达到了优化的目的,从而证明了以上方法和模型的有效性和实用性.但是,对于工程实际来说,以上方案还需要进行大量的现场实验,并在应用中进一步地改进和应用.

表 2 图 1 中伺服系统的故障模式——传感器因果矩阵

故障模式 \ 传感器	电平信号检测 S_1	振动传感器 S_2	电流检测 S_3	光电编码器 S_4	温度传感器 S_5	振动传感器 S_6	光电编码器 S_7	速率陀螺 S_8	捷联惯导 S_9
驱动器工作不正常 f_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
定子与转子的气隙不均匀 f_2	0	1	1	1	0	0	0	0	0
电机定子线圈断路 f_3	0	0	1	1	0	0	0	0	0
电机定子线圈短路 f_4	0	0	0	1	1	0	0	0	0
电机定子线圈接地 f_5	0	0	1	0	1	0	0	0	0
电机轴承磨损 f_6	0	1	0	1	0	0	0	0	0
减速器齿轮疲劳磨损 f_7	0	0	0	0	0	1	1	1	1
减速器轴承疲劳磨损 f_8	0	0	0	0	0	1	0	0	0
减速器无输出 f_9	0	0	0	0	0	0	1	1	1

表 3 传感器优化布局设计结果

设计要求		优化后								
优化目标:		故障概率和为: 0.0421		优化选择方案						
1. 传感器系统故障概率总和最小		总代价为: 100552		传感器:	S_1	S_3	S_4	S_5	S_6	S_9
FDR	0.98	FDR	0.9936010	个数:	2	1	1	1	1	1
FIR	0.95	FIR	0.9938112							
FAR	0.10	FAR	0.01756336							

参考文献:

[1] 黄文虎, 等. 设备故障诊断原理、技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1996

[2] 刘福强, 张令弥. 作动器 / 传感器优化配置的研究进展 [J]. 力学进展. 2000 30(4): 506- 516

[3] W R Simpson, J W Sheppard. System testability assessment for integrated diagnostics [J]. IEEE D & T of Computers 1992 9(1): 40- 54

[4] M ani B hushan, Raghunathan Rengaswamy. Design of sensor location based on various fault diagnostic observability and reliability criteria [J]. Computers and Chemical Engineering 2000 (24): 735- 741.

[5] Miguel Bagajewicz, Adrian Fuxman. Cost optimal instrumentation network design and upgrade for process monitoring and fault detection [J]. AIChE Journal 2004 50(8): 1870- 1880

[6] M J Korsten, P E van der Velt, P P L Regtien. A system for the automatic selection of sensors [A]. Proceedings of International Measurement Confederation XV [C]. Vienna Austria 2000 IX: 211- 216

[7] Payman Sadegh, James C Spail. Optimal sensor configuration for complex systems [A]. Proceedings of IEEE ISIC / CIRA / ISAS Joint Conference [C]. Philadelphia

PA, 1998 3375- 3579

[8] 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 12

[9] Emanuele Trucco, Manickam Umasathan, Andrew M Wallace. Sensor placements for inspection [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation 1997 13(2): 182- 194

[10] Michael A. Demetriou. A numerical algorithm for the optimal placement of actuators and sensors for flexible structures [A]. Proceedings of the American Control Conferences [C]. Chicago Illinois 2000 4 2290 - 2294

作者简介:



杨 光 男, 博士, 空军装备研究院雷达所环境与可靠性试验中心电学室主任, 研究方向为产品质量与可靠性工程、产品试验工程、机电设备健康状态监控等, 发表论文十余篇。
E-mail yang_guang2553@ yahoo .com.

刘冠军 男, 副教授, 硕导, 长沙国防科技大学机电工程研究所, 研究方向为机电设备健康状态监控、产品可靠性和维修工程。