

导弹装备测试性数据相关性分析研究

肖支才,王 康,赵学远,余龙海

(海军航空大学,山东 烟台 264001)

摘 要:针对目前装备使用阶段测试性数据来源于专家信息这类存在不确定性因素的信息,会直接影响测试性验证结论的准确性和完整性。为了增加测试性数据的可信度,基于导弹装备使用阶段测试性数据,提出了灰色关联分析的方法流程,对数据进行相关性分析。结果表明,基于灰色关联算法的数据相关性分析方法能得到测试性数据可信度程度,并挖掘出测试性指标间潜在的关联规律,能丰富专家信息,有助于提高验证准确度。

关键词:测试性;不确定性;测试性验证;灰色关联分析
中图分类号:TP315

文献标志码:A

测试性作为装备的一种重要性能指标,是指装备能及时准确地确定其状态并准确有效地隔离出其内部故障的一种设计特性^[1-2]。随着测试性技术的发展,对测试性水平的评估是亟须解决的问题。如何评估测试性水平则要开展测试性验证,即检验装备是否满足合同规定的测试性定性和定量要求开展的工作^[3-4]。

事实上,装备在使用阶段积累的故障检测/隔离等测试性数据由于不确定性因素,会影响装备测试性评价结果置信度^[5]。灰色系统理论在分析解决小样本和不确定性信息等装备实际问题时具备较好效果^[6-9]。为能准确地对所研究装备系统的测试性水平进行较好评估,须对装备已存在的信息分析,找出其内在联系。灰色关联分析作为灰色系统理论中重要的方法,能描述装备系统不同数据序列间的关联程度^[10-11]。

导弹装备在使用阶段的测试性数据之间存在尚未认知的复杂关系,可以将装备系统视为一个灰色系统,该系统的一部分信息已知并含有不确定性信息,为采用灰色关联分析法提供了前提条件。所以,为了提高装备测试性数据的可信度,降低专家信息等引起的不确定性,本文提出了针对测试性数据集的灰色关联分析算法,给出了基于某型导弹装备的测试性数据相关性分析的方法流程,通过对测试性数据集进行整体和局部相关性分析,验证了基于专家信息的数据相关性,并挖掘出测试性指标间潜在的关联规律,以更好地指导装备测试性能的改进。

1 测试性指标分析

装备的测试性指标充分体现了武器装备从研制

到使用每个阶段的测试性所达到的水平^[12-13],其作为装备开展测试性设计的重要依据,是开展武器装备测试性验证评估工作的必要前提。本文选取装备部分测试性定量指标作为灰色关联分析的研究对象,即装备的测试性作为一个待研究的灰色系统,该灰色系统包括3个分系统,分别为状态监控能力、BIT性能和ATE性能,具体指标的定义分析如下^[14-17]。

1) 状态监控能力

参数监测率 λ : 依照预先设定的步骤及方法监测到的指标参数数量和应该监测的指标参数数量之比,表征导弹装备内部具备的监测装备重要指标参数的能力。

平均人工参数检测时间 t_{Ap} : 通过人工的测试手段检测出所有指标参数所需时间的平均值。

状态正常监控率 η : 以规定方式正常监控到的技术状态项目数与使用维修中实际需要监控项目总数的百分比,表征导弹装备具有的对装备本身状态进行有效监视以及实施控制的能力。

2) BIT性能

BIT平均开机检测时间 t_{d1} : 指导弹在收到战备等级转变的命令后,对导弹装备开展测试、修理以及保障使其较好地达到战备要求的过程中,装备开机测试所需时间的平均值。

BIT故障检测率 γ_{fd}^B : 导弹BIT在预先确定的时间范围内,采用给定的方法或步骤准确检测到装备实际发生的故障数量和被测单元(UUT)真实出现的总故障数量的比值。

BIT故障隔离率 γ_{fi}^B : 导弹BIT在预先确定的时间

范围内,采用给定的方法或步骤准确隔离到小于或等于给定可更换单元(LRU或SRU)数量的故障数量,和在相同的时间范围内检测出的装备故障数量的比值。

BIT虚警率 γ_{FA}^B :定义为导弹BIT在预先给定的工作时间范围内,出现虚警的数量和在相同时间范围内指示的装备故障总数的比值。

3) ATE性能

ATE故障检测率 γ_{FD} :导弹自动测试设备(ATE)在预先确定的时间范围之内,采用给定的方法或步骤准确检测到的装备故障数量和被测单元实际存在的总故障数量的比值。

ATE平均测试时间 t_{MD} ,在导弹装备的战斗准备阶段,导弹从接收到战斗命令开始,单发导弹测试所需时间的平均值,单位为小时。

ATE虚警率 γ_{FA} ,导弹自动测试设备(ATE)在预先给定的工作时间范围内,出现虚警的数量和在相同时间范围内指示的装备故障总数的比值。

2 测试性数据灰色关联分析流程

装备在使用阶段完成测试性数据的收集、分类和统计之后,采用灰色关联算法对数据进行关联分析,可以得到测试性指标之间隐含的关系,丰富专家信息并为进一步开展关联规则挖掘奠定良好基础。为了有针对性地完成装备测试性参数间相关性的挖掘,灰色关联分析算法^[8]分别作用于装备整体的测试性参数序列和局部的可分析序列,生成整体和局部的关联度及排序,并完成结果的相关分析工作。测试性数据灰色关联分析的总体步骤为:①整理数据;②确定系统/分系统的参考序列;③数据均值化处理;④采用灰色关联分析法对均值化数据进行处理;⑤系统/分系统关联度分析及排序。

2.1 确定参考序列和数据预处理

1)确定参考序列。根据测试性指标在系统/分系统中重要性的不同,系统整体的参考序列选为BIT故障检测率 γ_{FD}^B ,其余各指标的数据序列作为比较序列;状态监控能力的参考序列选为状态正常监控率 η 的数据序列,其余2个指标的数据序列作为比较序列;BIT性能的参考序列选为BIT故障检测率 γ_{FD}^B 的数据序列,其余3个指标的数据序列作为比较序列;ATE性能的参考序列选为ATE故障检测率 γ_{FD} 的数据序列,其余2个指标的数据序列为比较序列。系统的参考序列可用 $X_0 = \{X_0(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$ 表示,比较序列可表示为 $X_i = \{X_i(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$, $i = 1, 2, \dots, m$, 其中 X_i 为第 i 个序列, m 为对应比较序列的个数。

2)数据预处理。由于待分析系统中每个指标或者要素不可能具有完全一致的物理含义,相关数据的单位或者量纲也不可能完全一样,还存在数据的大小差别很大。基于上述原因,为了保证数据分析的有效性,并使系统每个指标有相同顺序以及一致效果,应当完成待分析数据的一系列处理,包括使数据去除单位或者量纲的影响及达到归一化的目标。这些处理的最终目的是数据能在一个差不多的数量级以提高分析的准确性,使系统指标或因数的相关性处于一致的变化趋势,一般是把负相关指标通过数学化处理变成正相关指标。

数据预处理方法主要有初值化方法、均值化方法以及区间值化方法等3种,可将系统数据序列转化为无量纲且数量级相同的序列,本文数据处理方法选用均值化方法,具体描述如下。

设要素 X_i 行为序列是 $X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\}$, 并定义 D 为数据序列的均值化算子,则有

$$X_i D = \{x_i(1)d, x_i(2)d, \dots, x_i(n)d\}。 \quad (1)$$

$$x_i(k)d = x_i(k) / \bar{X}_i, \quad (2)$$

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i(k), \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

则称 $X_i D$ 为 X_i 在算子 D 下的均值像。

2.2 灰色关联分析算法

灰色关联分析算法通过对系统要素或指标数据序列的变化趋势进行定量描述和比较,并根据指标数据序列对应的几何曲线相互接近情况来判断系统指标或要素之间的相关程度。

1)对原始数据使用均值化的数据预处理方法,求解参考序列和比较序列的均值像。利用式(3)求解序列均值,则均值像则可由下式表示:

$$X'_i = X_i / \bar{X}_i = \{x'_i(1), x'_i(2), \dots, x'_i(n)\}。 \quad (4)$$

2)求解参考序列 X_0 与比较序列 X_i 均值像对应分量之差的绝对值序列,计算公式为:

$$\Delta_i(k) = |x'_0(k) - x'_i(k)|; \quad (5)$$

$$\Delta_i = \{\Delta_i(1), \Delta_i(2), \dots, \Delta_i(n)\}, \quad i = 1, 2, \dots, m。 \quad (6)$$

3)求解绝对值序列 $\Delta_i(k)$ 的最大值和最小值,即:

$$M = \max_k \Delta_i(k); \quad m = \min_k \Delta_i(k)。 \quad (7)$$

式(7)中: $k = 1, 2, \dots, n$; $i = 1, 2, \dots, m$ 。

4)求解关联系数,即:

$$\gamma_{0i}(k) = \gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{m + \xi M}{\Delta_i(k) + \xi M}。 \quad (8)$$

整体参考序列与对应比较序列的关联度为:

$$\begin{aligned} \gamma_{01} &= 0.6466, \gamma_{02} = 0.6892, \gamma_{03} = 0.6871, \\ \gamma_{04} &= 0.7285, \gamma_{05} = 0.6908, \gamma_{06} = 0.6059, \\ \gamma_{07} &= 0.6986, \gamma_{08} = 0.7168, \gamma_{09} = 0.6970. \end{aligned}$$

所以,整体关联度排序为:

$$\gamma_{04} > \gamma_{08} > \gamma_{07} > \gamma_{09} > \gamma_{05} > \gamma_{02} > \gamma_{03} > \gamma_{01} > \gamma_{06} \circ$$

结果分析:比较序列 X_4 和参考序列的 X_0 的关联度最大,其次是比较序列 X_8 和 X_7 ,关联度分别为 0.7285、0.7168 和 0.6986。即从整体而言,状态正常监控率 η 、ATE 平均测试时间 t_{MD} 、ATE 故障检测率 γ_{FD} 与 BIT 故障检测率 γ_{FD}^B 的相关性较大。

2)局部关联度分析。由整体关联度分析的方法可以此类推,分别对状态监控能力、BIT 性能、ATE 性能进行局部关联度分析。

$$\gamma_{78} = 0.6681, \gamma_{79} = 0.8956,$$

关联度大小排序为: $\gamma_{79} > \gamma_{78} \circ$

结果分析:在 ATE 分系统中,ATE 故障指示成功率 $(1 - \gamma_{FA})$ 与 ATE 故障检测率 (γ_{FD}) 的关联度比 ATE 平均测试时间 (t_{MD}) 要高。

综上所述,通过整体/局部的关联度分析,当选定参考序列后,即可比较分析出整体/局部其余序列与参考序列的关联度大小。关联度越大,则相关性越大,从而反映出比较序列相对于参考序列的数据合理性越高,进而弥补测试性指标评估时专家信息的不确定性,丰富专家信息,能为基于小子样理论以及先验信息的导弹装备测试性研究提供合理可靠的信息来源,对下一步增加测试性指标评估的置信度具有十分重要的意义。

4 结束语

本文将灰色关联分析方法引入到装备使用阶段测试性数据的相关性分析中,提出了灰色关联分析的方法流程,从整体和局部2个方面进行关联度分析,研究并确定了整体和局部关联度分析参考序列的设定方法及数据预处理方法。

针对装备测试性数据的特点,提出了灰色关联分析方法,并对某型装备的使用阶段测试性数据进行了相关性分析,进一步说明了其有效性和准确性。

该方法可以得到较为科学准确的结论,丰富专家信息,进而能提供合理可靠的先验信息,对于基于小子样理论和先验信息的测试性研究而言,具有十分重要的意义,有助于提升测试性验证试验评估的准确度。

参考文献:

- [1] DEPARTMENT OF DEFENSE WASHINGTON D C. Military standard testability program for electronic systems and equipments: MIL-STD-2165A[S]. Washington D C: Department of Defense, 1993.
- [2] 中国人民解放军总装备部. 装备测试性工作通用要求: GJB 2547A-2012[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2012.
THE PLA GENERAL ARMAMENTS DEPARTMENT. General requirement for materiel testability program: GJB2547A-2012[S]. Beijing: Standards Publication and Distribution Department, the PLA General Armaments Department, 2012. (in Chinese)
- [3] DEPARTMENT OF DEFENSE. Maintainability verification/demonstration/evaluation: MIL-STD-471A-1973[S]. Washington D C: Department of Defense, 1973.
- [4] 石君友. 测试性设计分析与验证[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 1-20.
SHI JUNYOU. Testability design analysis and verification [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 1-20. (in Chinese)
- [5] 石君友, 田仲. 测试性研制阶段数据评估验证方法[J]. 航空学报, 2009, 30(5): 901-905.
SHI JUNYOU, TIAN ZHONG. Testability verification method based on data evaluation in development phase [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(5): 901-905. (in Chinese)
- [6] 刘思峰, 杨英杰, 吴利丰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 37-52.
LIU SIFENG, YANG YINGJIE, WU LIFENG. Grey system theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2014: 37-52. (in Chinese)
- [7] MIAO W, LIU Y H. Information system security risk assessment based on grey relational analysis and Dempster-Shafer theory[C]//International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer. Piscataway: IEEE, 2011: 853-856.
- [8] 陈举华, 于奎刚, 史岩彬. 基于灰色理论的机电系统全寿命小子样系统研究[J]. 机械设计, 2005, 22(9): 7-9.
CHEN JUHUA, YU KUIGANG, SHI YANBIN. Study on full life's few subsample system of electromechanical system based on gray theory[J]. Journal of Machine Design, 2005, 22(9): 7-9. (in Chinese)

- [9] GUOPING Z, LONGLONG Q, NINGBO W. Technology of QoS evaluation based grey system theory[C]//International Conference on Computer Science & Network Technology. IEEE, 2012: 1934-1937.
- [10] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2041-2046.
LIU SIFENG, CAI HUA, YANG YINGJIE, et al. Advancing grey incidence analysis modelling[J]. System Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(8): 2041-2046. (in Chinese)
- [11] 张晔, 马彦恒, 宋丽蔚, 等. 模糊灰色关联分析在BIT测试性能评价中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(12): 3273-3276.
ZHANG YE, MA YANHENG, SONG LIWEI, et al. Application in evaluation of radar bit testability based on cloud theory[J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(12): 3273-3276. (in Chinese)
- [12] LIU T, YING D L, LIN W Z. Prediction of Jingdezhen ceramic industry output and grey relational analysis based on GM(1, 1) grey model[C]//2011 International Conference on Computational and Information Sciences. Piscataway: IEEE, 2011: 925-928.
- [13] GUO K, ZHANG Q S. Adaptive spectral clustering based on grey relational analysis[C]//2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems, 2010: 91-94.
- [14] 李天梅. 装备测试性验证试验优化设计与综合评估方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
LI TIANMEI. Research on optimization design and integrated evaluation of testability verification test for equipments[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [15] 王超. 虚实结合的测试性试验与综合评估技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
WANG CHAO. Testability test and integrated evaluation technology with virtual-physical test[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [16] 邱静, 刘冠军, 杨鹏, 等. 装备测试性建模与设计技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 42-88.
QIU JING, LIU GUANJUN, YANG PENG, et al. Equipment testability modeling and design technology[M]. Beijing: Science Press, 2012: 42-88. (in Chinese)
- [17] 苏永定, 邱静, 杨鹏. 面向任务的导弹测试性需求分析与指标确定[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(2): 125-129.
SU YONGDING, QIU JING, YANG PENG. Missile testability requirement analysis and index determination oriented to mission[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(2): 125-129. (in Chinese)
- [18] GOSAIN A, BHUGRA M. A comprehensive survey of association rules on quantitative data in data mining[C]//Proceedings of 2013 IEEE Conference on Information and Communication Technologies. Piscataway: IEEE, 2013: 1003-1008.

Research on Correlation Analysis of Missile Equipment Testability Data

XIAO Zhicai, WANG Kang, ZHAO Xueyuan, YU Longhai

(Naval Aeronautical University, Yantai Shandong 264001, China)

Abstract: The testability data for the use phase of the equipment is derived from information with uncertainties, such as expert experience, which will directly affect the accuracy and completeness of the testability validation conclusion. In order to increase the credibility of testability data, the method of gray correlation analysis was put forward based on the testability data of missiles in order to correlation analysis. The results show that data relational analysis based on gray correlation algorithm can improve the reliability of test data and dig out the potential correlation between testability indicators. Meanwhile this method can enrich the expert experience information and help to improve the verification accuracy.

Key words: testability; uncertainty; testability verification; gray correlation analysis