

# 某型导弹自检故障建模与仿真

张放<sup>1</sup>, 郭瑞<sup>2</sup>

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471001; 2. 郑州轻工业学院, 郑州 450002)

**摘要:** 某型导弹组件较多、构成复杂、故障模式极多, 属于科技密集型复杂系统; 为了达到缩短维修时间、提高维修效率的目的, 需要通过计算机仿真的方式训练部队基层维修人员及工程测试人员; 这一目的的实现需要首先建立一套全面、真实的故障仿真系统; 通过对故障模式的分析及建模, 完成了故障模型在系统仿真模型中的引入工作, 从而得到了一套仿真训练系统, 并在该训练系统中进行了故障的仿真复现; 从复现结果来看, 该套仿真训练系统能够真实的反映产品在故障模式下的实际响应; 文中描述的故障仿真系统属首次在导弹类复杂武器系统的维修训练中投入使用, 在国内处于领先地位, 具有较高的应用推广价值。

**关键词:** 导弹; 自检; 故障; 建模; 仿真

## BIT Fault Modeling and Simulation for A Certain Missile

Zhang Fang<sup>1</sup>, Guo Rui<sup>2</sup>

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471001, China;

2. Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** A certain missile has complex components and constituting. It belongs to technology intensive and complex system. In order to shorten the repair time, improve the repair efficiency purpose, we need to train repair personnel and engineering testing personnel through the way of computer simulation. To realize this purpose we need to establish a comprehensive, real fault simulation system. Through the analysis and modeling of fault modes, fault model introducing the work completed in system simulation model, thus we get a set of simulation training system, and the simulation of reappearing fault is performed in the training system. From the repetition of results, the set of simulation training system can reflect the actual response of the product in the failure mode.

**Keywords:** missile; build-in test; fault; modeling; simulation

## 0 引言

某型导弹系统复杂, 组件较多, 在自检过程中存在多种不同的故障模式, 故障发生后部队基层维修人员及生产线上的工程测试人员基本无法对故障进行有效的隔离及定位, 往往需要设计人员到现场对产品测试情况进行分析, 或需要将全弹运回导弹生产厂家进行进一步测试及故障定位。而在与某型导弹类似的大型武器装备实际的操作训练过程中均存在故障原因难以查找与分析的问题, 严重影响部队持续战斗能力<sup>[1]</sup>。针对该问题, 国内外许多研究机构和学者从故障发生机理入手, 进行实物试验或者虚拟样机模拟, 并对此类问题进行了研究, 取得一些研究成果<sup>[2]</sup>。

航天领域在有关航天器故障诊断与容错设计的方面进行了大量的研究工作并取得了丰硕的理论成果<sup>[3-5]</sup>, 但典型故障的分析及其数学建模研究却鲜有报道。仅在故障建模方面进行了初步的研究<sup>[6-7]</sup>。

在航空领域, 目前相关工作开展尚处于初期阶段, 仅在某些地面雷达的研究过程中对相关的故障模式进行了研究, 并设计了供部队训练使用的维修模拟训练器并用于部队基层维修人员的训练工作中<sup>[8]</sup>。

笔者通过研究某型导弹自检过程中出现的常见故障, 将常见故障与产品的实际性能及工作表现联系在一起, 最终建立产

品的故障模型, 通过数字仿真的方式将仿真模型与产品的实际性能联系起来。在训练部队基层维修人员及工程测试人员时可以通过计算机仿真的方式进行, 使基层维修人员及工程测试人员的训练速度最快、资源消耗最少、经验积累最多。本文中所描述的故障仿真系统属首次将类似系统引入导弹类复杂武器系统的人员故障维修训练过程中, 在国内属领先地位, 具有较高的应用推广价值。目前该课题的研究成果已在某型导弹工程测试人员培训中初步投入使用, 根据受培人员反馈, 该仿真系统能够有效解决产品测试及使用过程中人员经验积累慢、培养困难的问题。

## 1 某型导弹自检故障分类

导弹自检的根本目的是通过运行弹载软件中的相关程序, 对弹载硬件的性能进行定量检测, 从而在导弹使用过程中及早发现故障, 防止由于弹载硬件故障未能及时发现而贻误战机的情况出现。

通常来说, 故障的分类可以按照故障在实际系统中的发生位置, 或对系统性能的实际影响模式等不同分类方式进行划分, 这里将采用上述两者结合的方式进行说明。

从故障实际出现的位置划分, 故障分类如下。

**硬件连接型故障:** 硬件连接型故障是指由于元器件或分组件之间的连接线或接插件在应力作用下失效导致的故障。这类故障主要是由于接线断裂、搭接及接插件失效造成的。由于导弹由多个分组件组成, 各个分组件之间由复杂的电气连接网络综合成为一个整体, 电气连接网络既承担了向各个分组件供电的任务, 同时还要传递各个分组件之间的模拟及数字信号。可

收稿日期: 2015-03-30; 修回日期: 2015-05-20。

**作者简介:** 张放(1983-), 男, 辽宁锦州人, 工程师, 主要从事空空导弹总体性能设计及仿真方向的研究。

见,全弹各个组件之间的硬件连接对于全弹的正常工作起着及其重要的作用。

**元器件故障:**元器件故障是指由于元器件失效导致的故障。该类故障主要是由于元器件在各种应力作用下失效造成的。由于导弹全弹所涉及的元器件数量众多,在导弹挂飞条件下的严酷环境中可能出现失效的现象,同时由于导弹内部空间狭小,元器件无法采用冗余设计的方法提高可靠性,因此元器件故障在实际使用过程中也是重点关注的对象。

**通讯故障:**通讯故障是指由于导弹与上级武器系统之间信息通讯过程中由于误码或信息错误导致的故障。由于在导弹自检过程中需要上级武器系统提供必要的信息,同时导弹还需要向上级武器系统提供自检结果等必要的信息。为了防止出现由于通讯故障导致的自检结果误判,通讯故障在实际使用过程中也必须加以关注。

从故障对系统的影响模式划分,故障分类如下。

**突变型故障:**突变型故障是指由于部件突然失效、连接突然断裂或信号出现突然跳变导致的一类故障。对于导弹可能出现的故障,该类故障对应的实际情况为导弹电气网络中电缆断裂、加速度计无信号输出及轴承断裂导致的舵轴卡死等故障。

**渐变型故障:**渐变型故障是指由于元器件随时间的缓慢老化、测量单元受随机干扰而产生校准偏差及机械摩擦增大等现象导致的故障。对于导弹可能出现的故障,该类故障对应的实际情况为导弹弹上惯导系统常值偏移过大及轴承长时间使用后间隙增大导致摩擦力矩超标的故障等。

**间歇性故障:**间歇性故障是指由于接触不良、线路老化引起阻抗变化、瞬间短路或绝缘出现问题造成的非持续性故障。对于导弹可能出现的故障,该类故障对应的实际情况为导弹弹上电气网络中接插件接触不良、惯导传感器输出间歇性为零及电位器输出阻值不稳定等故障。

## 2 某型导弹自检故障仿真模型

在第一章中,笔者给出了几种在实际中最为常见的故障模式,下面将给出某型导弹自检过程中分组件的故障仿真模型,由于某型导弹的分组件较多,因此这里只能分别给出舵机执行机构故障、惯导组件故障及导引头位标器故障的故障仿真模型。

### 2.1 舵机执行机构故障仿真模型

当舵机执行机构出现故障时,故障表征为舵机对应通道的执行机构无法执行对应通道的舵机控制信号,在正常情况下舵机执行机构对应的增益矩阵为单位矩阵,在故障模式出现时,其增益矩阵发生了改变。根据上述故障现象的实际表述,舵机执行机构出现故障时的仿真模型为:

$$\dot{u}' = u - F_c u \tag{1}$$

其中: $u'$ 为舵机执行机构出现故障时的输出信号, $u$ 为舵机执行机构正常工作时的输出信号, $F_c$ 为故障描述矩阵,其具体表达为:

$$F_c = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & f_m \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中: $f_i (1 < i < m)$ 代表舵机执行机构发生故障时的描述参数, $m$ 为舵机执行结构控制通道个数, $f_i = 0$ 代表舵机执行机构未出现故障情况下的描述, $f_i = 1$ 代表舵机执行机构完全故障时的描述,当 $0 < f_i < 1$ 时代表舵机执行机构部分发生故

障,即舵机执行机构无法完全执行舵控指令时的描述,当 $f_i = \delta(t)$ 时代表舵机执行机构因某种故障导致间歇性通断,即间歇性执行舵控指令时的描述。可见故障描述矩阵 $F_c$ 中的对角线元素通过不同的取值,能够代表不同的故障模式。

### 2.2 惯导组件故障仿真模型

某型导弹由于自身体积、重量限制,其惯导组件采用了捷联惯导导航方式,实际采用的传感器为加速度计和陀螺。在实际使用过程中,由于上述两类传感器自身特性的限制,其输出量中均会包含漂移误差。因此在对惯导组件进行故障仿真建模的过程中必须将漂移引起的输出偏差与由于传感器故障造成的非正常输出分开考虑。

在同时考虑传感器故障及加速度计和陀螺的随机漂移的条件下进行数学建模时,惯导组件故障的数学模型为:

$$y_f = y - F_s y + F_E \tag{3}$$

其中: $y$ 是惯导组件在无漂移误差及故障的条件下的输出,而 $y_f$ 表示传感器的非正常输出。 $F_s \in R_{n \times n}$ 为故障描述矩阵,其描述与上文中故障矩阵 $F_c$ 的描述相同, $n$ 为测量单元输出个数。在数学模型中通过引入随机向量 $F_E$ ,完成了对加速度计及陀螺漂移影响表征。可以看到,通过在正常输出中叠加传感器故障矩阵及表征不同噪声影响的随机向量,使用上述数学模型即可完成不同的故障模式对传感器输出的影响描述。

### 2.3 导引头位标器故障仿真模型

导引头位标器中不仅包括了传感器,如角度反馈电位器及三自由度稳定陀螺等,也包括了执行机构,如导引头位标器驱动机构等,因此其故障现象往往是多种故障模式的叠加,无法通过精确的数学描述加以表达。在实际建模过程中对于类似故障的建模通常采取对标准情况下系统故障影响进行研究的方式进行,由于系统发生故障时会对系统的输出造成影响,因此可以通过在系统状态方程中引入额外的描述项的方式将故障模型引入系统状态方程中。

而在导引头位标器中出现单一零部件故障时,其故障描述可以应用前文中提到的执行结构故障或传感器故障的描述方式进行描述,因此其数学模型为:

$$\dot{v}_f = A_c(v - F_f v + F_G) + B_c \tag{4}$$

其中: $v$ 为导引头位标器的正常输出, $F_f \in R_{j \times j}$ 为故障描述矩阵,其描述与上文中故障矩阵 $F_c$ 的描述相同, $j$ 为测量单元输出个数。向量 $F_G$ 是一个随机向量,表征了漂移等误差为位标器中的传感器造成的影响。 $A_c$ 用于表征由于系统故障而使系统的频率特性发生变化时可能的变化范围。 $B_c$ 用于表征在系统故障时引起的系统相位特性发生变化时可能的变化范围。上述数学模型中针对分组件故障在正常输出中叠加分组件故障模型,同时针对系统故障在数学模型中增加了额外的描述项,将在标准情况下发生系统故障时的系统响应引入数学仿真模型中。

## 3 某型导弹自检故障仿真示例

在第二章中,笔者给出了某型导弹典型分组件故障模型的建立方法,在将上述分组件故障模型引入某型导弹数字仿真系统后,即可在仿真环境下复现分组件发生故障时全弹的实际反应。以下分别对上文所述的惯导组件故障、舵机执行机构故障及导引头位标器故障在实际仿真系统中的表现进行说明。

### 3.1 舵机执行机构故障仿真示例

舵机执行机构是舵机的组成部分之一,负责按照控制组件

发出的舵控制指令控制舵面偏转,在舵机执行结构正常的条件下,舵机执行机构能够正常跟随舵控制指令,控制舵面偏转。而在舵机执行机构中的电机、电源、传动机构其中任一部分出现故障时,均会导致舵机执行机构的性能响应不正常,并进而导致导弹自检过程报故。其中电机、电源故障导致的舵机执行机构性能变化一般表现为舵机执行机构的频率响应或相位特性发生变化,仅在完全失效时表现为执行结构停止跟随舵控信号。而传动机构故障导致的舵机执行机构性能变化一般表现为执行机构停止跟随舵控信号,因此两者的故障模式需要在故障描述矩阵中赋予不同的描述参数的方式进行描述。在向仿真模型中添加相应的故障模型后,舵机控制信号及舵反馈信号在正常情况及不同故障模式下的仿真曲线见图1。

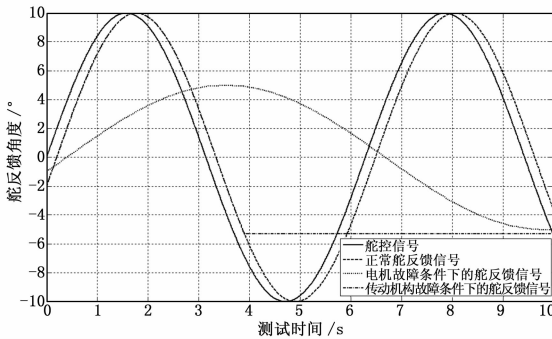


图1 舵机控制信号及舵反馈信号在正常情况及不同故障模式下的仿真曲线

从图1中可以发现,在将故障模型引入仿真模型后,仿真模型能够针对不同故障模式,使仿真输出中的舵反馈表现出不同的性能特征,从而体现不同的故障模式对舵机执行机构的影响。

### 3.2 惯导组件故障仿真示例

惯导组件中包含陀螺及加速度计两类传感器,该类传感器在正常工作条件下也会受到漂移噪声的影响,因此在对惯导组件进行仿真时其正常工作条件下的输出曲线中已经包含了漂移噪声。而在惯导组件故障情况下,其输出可能受到故障描述矩阵及漂移噪声的共同影响,导致惯导组件输出偏离正常输出或停止响应。在向仿真模型中添加相应的故障模型后,惯导组件仅受到重力影响时在正常情况及不同故障模式下的仿真曲线见图2。

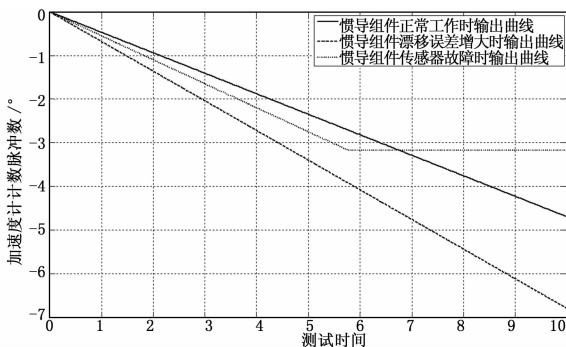


图2 惯导组件仅受到重力影响时在正常情况及不同故障模式下的仿真曲线

从图2中可以发现,在将故障模型引入仿真模型后,仿真模型能够针对不同故障模式,使仿真输出中的惯导组件输出表现出不同的性能特征,从而体现不同的故障模式对惯导组件的影响。

### 3.3 导引头位标器故障仿真示例

导引头位标器中由于同时含有传感器及执行机构两大部分,因此其故障模型需要包含多种故障模式的叠加,通过引入额外描述项的方式能够将其中较为复杂的故障模式引入仿真模型中,同时还可以通过在仿真模型中添加单一元器件故障描述矩阵的方式将单一元器件故障引入仿真模型中。在向仿真模型中加入相关故障模型后,导引头位标器在正常情况及位标器驱动机构及传感器共同故障发生时的框架角曲线见图3。

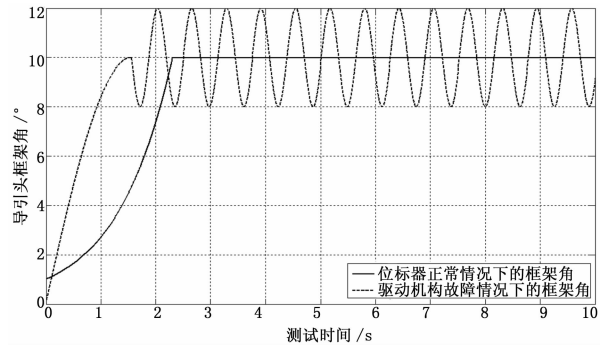


图3 导引头位标器在正常情况及故障发生时的框架角曲线

从图3中可见,在仿真模型中引入故障模型后,仿真模型能够反映导引头位标器多个元器件同时出现故障时导引头位标器控制输出的框架角曲线,从而反映在导引头位标器发生复杂故障时的实际响应情况。

## 4 结语

导弹武器系统是一个高度复杂的系统,其中故障模式复杂多样的特点使得维修人员无法迅速形成对故障的辨别及维修能力,而目前尚无有效的方式能够对维修人员进行高效、可靠的培训。在建立产品的故障模型后,可以通过数字仿真的方式将产品正常工作及各种故障发生时产品的真实反应体现出来。在使用该仿真系统对部队基层维修人员及生产线上的工程测试人员进行培训后,可以使相关人员快速熟悉产品的故障模式、迅速定位产品故障位置,进而达到缩短维修时间、提高维修效率的目的。该仿真系统目前已经应用于导弹类复杂武器系统维护人员的故障维修训练过程中,该仿真系统的应用在国内尚属首次,具有较高的应用推广价值。

### 参考文献:

- [1] 李向阳,张志利,黄先祥,等. 大型武器装备故障诊断训练系统仿真开发研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(21): 6770-6773.
- [2] 梁丰,张志利,高钦和,等. 大型武器装备故障建模与仿真技术研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(1): 42-46.
- [3] 王福利,张颖伟. 容错控制[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2003.
- [4] 周东华,孙优贤. 控制系统的故障检测与诊断技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [5] 邢琰,吴宏鑫. 卫星闭环控制系统执行机构故障诊断及优化配置[A]. 第二十二届中国控制会议论文集[C]. 2003, 185-188.
- [6] 欧阳高翔,倪茂林,孙承启,等. 航天器的故障建模与应用[J]. 航天控制, 2011, 29(5): 22-29.
- [7] 李运泽,魏传锋,袁领双,等. 卫星热控系统故障建模与仿真[J]. 中国工程科学, 2005, 7(1): 38-40.
- [8] 万云朝,张鹏,李蕊. 某型雷达维修训练模拟器的设计[J]. 现代计算机, 2011, 22: 64-65.