

# 实时数据处理系统自主闭环测试验证技术研究

刘永利, 刘云鹏

(酒泉卫星发射中心, 甘肃 酒泉 735000)  
✉python201501@sina.com; 13484466701@163.com



**摘要:** 本文针对实时数据处理系统人工测试验证模式中存在的效率低下、工作强度高、测试验证不充分等问题, 提出了基于偏差模型的测量数据模拟方法, 设计了基于经典误差分析方法的测试验证评估模型, 构建了实时数据处理系统自主闭环测试验证体系, 实现了实时数据处理系统测试验证的自动化。以航天测控实际应用场景开展实验, 发现本文所提出的自主闭环测试验证体系能够有效降低人员的工作量, 提高实时数据处理系统的测试验证效率。

**关键词:** 数据处理系统; 自主闭环测试验证; 偏差模型; 验证评估

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A

## Research on Autonomous Closed Loop Test and Validation Technology of Real-time Data Processing System

LIU Yongli, LIU Yunpeng

(Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 735000, China)  
✉python201501@sina.com; 13484466701@163.com

**Abstract:** Manual test and verification mode of real-time data processing system has problems of low efficiency, high work intensity, and insufficient verification. This paper proposes a measurement data simulation method based on deviation model and designs a test and verification evaluation model based on a classic error analysis method. The paper also proposes to construct an autonomous closed-loop test and verification framework for real-time data processing system, so to realize autonomous test and verification of real-time data processing system. Experiments carried out in the actual application scenarios of aerospace measurement and control show that the autonomous closed-loop test and verification system proposed here can effectively reduce workload of the working staff and improve efficiency of testing and verification for real-time data processing system.

**Keywords:** data processing system; autonomous closed-loop test and verification; deviation model; verification and evaluation

### 1 引言(Introduction)

实时数据处理系统是监测系统中的重要组成部分, 使用计算机对事件发生的现场数据进行实时收集和处理, 具有时间限制严格、处理速度快的特点。在航天测控领域, 实时数据处理系统承担着火箭、飞船、卫星等各类航天器的测控信息实时处理、测控设备跟踪引导、信息综合分析利用、辅助决策支持等职能, 是测控系统的数据中枢。其系统架构、逻辑结构复杂, 通常由十几个承担不同职能的子系统组成, 各子系统拥有独特的配置项目, 子系统之间也存在着不同的接

口关系。在对航天器执行测控任务之前, 需要对各子系统的代码正确性、配置项正确性以及接口匹配的情况进行验证。传统的验证模式是依靠岗位人员长时间、高强度的测试比对分析来完成系统的测试验证工作, 工作量大, 测试时间相对较长, 测试效果依赖于工作人员的工作经验, 难以适应当前高密度的航天测控任务需求。本文提出了一套自主闭环验证体系, 完成从原始数据模拟、数据传输、数据处理到处理结果比对分析的一整套闭环验证测试工作, 实现了实时数据处理系统测试验证的自动化, 降低了工作人员的劳动强度, 提

高了工作效率。

## 2 相关研究工作(Related works)

目前已有部分学者对软件系统自动化测试工作进行了研究。D. Xiaojun等人<sup>[1]</sup>提出了一个针对飞行器控制系统的快速测试验证平台,基于反射式内存构造出一个与飞行器一致的多机冗余环境,软件开发人员可以在没有真实的硬件环境支撑下提前开始软件的开发、调试工作。此外,这个测试平台还能够模拟多通道信息交互、错误信息注入等来辅助软件开发人员快速完成软件测试工作。但该测试平台面向飞行器内部控制系统,缺乏普适性,无法在实时数据处理系统中使用。T. Muller等人<sup>[2]</sup>基于虚拟化技术提出了一套跨平台的自动化软件测试部署方案,通过虚拟机加载不同的操作系统,使用自动生成测试代码对软件工具包进行测试,并生成在线的测试报告。这套测试方案面向机器人视觉领域,针对软件工具包进行测试,是一种局部的功能部件测试,与本文所关注的系统验证有一定差异。孙喜刚等人<sup>[3]</sup>对软件系统闭环测试验证工作进行了较为全面的总结概述,但其研究工作并未涉及系统自动化闭环测试验证的方法。吴立金等人<sup>[4,5]</sup>面向战舰软件系统设计了战舰软件自动测试系统,重点在于测试战舰各软件之间的信息交互情况,各个信息接口的转换、适配是否正常,但对于数据处理正确性方面验证不足。谢家森<sup>[6]</sup>、徐聪<sup>[7]</sup>对航天器内嵌入式软件的自动化测试工作展开研究,设计了一套通用的测试仿真平台,拥有动态建模、闭环测试、故障注入、在线监控等功能。他们的研究工作面向嵌入式软件,无法套用到实时数据处理系统中,但其部分设计思路仍具有一定的参考价值。

## 3 实时数据处理系统自主闭环测试验证技术 (Autonomous closed-loop test and verification technology of real-time data processing system)

### 3.1 系统验证工作组成及分析

在现有的工作模式下,实时数据处理系统的测试验证工作主要包括数据模拟、数据回放、人工比对、错误分析这几部分。在对实时数据处理系统进行代码维护和配置修改之后,各子系统运维人员利用模拟仿真子系统或本子系统回放数据的方式验证各子系统内部数据处理的正确性以及子系统之间接口的匹配性。各子系统测试验证工作完成后,再进行全系统测试验证工作,通常采用模拟仿真子系统模拟外部数据,各子系统运维人员和系统测试验证人员以分工协作的方式完成各类信息处理结果的比对和错误原因分析。这种基于人工比对的系统测试验证模式存在以下几个方面的突出问题。

(1)测试验证工作量大,人工辅助正确性验证效率低下。传统的实时数据处理系统测试验证模式,需要人工逐一信息的正确性进行比对分析,相关子系统也要对信息处理正确性进行确认,相关的参数数目、信息类型等相当庞杂。岗位人员需对参数名称、数值、单位、量纲、关联关系、信息收

发频率等逐一确认核实,工作量大,验证效果依赖于岗位人员能力素质。新上岗人员专业功底不够深厚,容易出现比不到位的情况,业务熟练人员易犯经验主义错误,这种验证模式效率低下且容易出现失误,经常出现测试验证不充分的问题。

(2)准备周期长。实时数据处理系统架构复杂、组成多样,测试验证工作需要将各子系统内部情况以及子系统间接口情况验证到位,往往需要花费较长的时间。以航天测控任务为例,在传统的实时数据处理系统测试验证模式下,常规任务全系统测试验证通常需要两个小时以上的时间,对新型号航天器的全系统测试验证至少需要三个小时以上的时间,遇有任务状态变更,还需要重新进行系统测试验证,再加上各子系统内部和子系统间的测试验证工作,一次试验任务花费在系统测试验证上的时间至少在0.5个工作日以上。

(3)人员需求量大。实时数据处理系统中,各子系统的软件代码、配置均由专人进行维护,进行一次全系统测试验证需要所有子系统的运维人员同时在位,一旦有一个子系统出现配置状态变更或代码漏洞,测试验证工作就会停滞,其余运维人员需等待该子系统问题解决之后才能够继续测试,木桶效应明显,人力资源浪费显著。当大量的人力全部消耗在任务准备中时,就很难有时间进行创新,这种对人员需求量极大的系统测试验证方式,在一定程度上也制约了企业、科研院所的创新发展。

### 3.2 基于软总线的系统自主闭环测试验证体系架构

针对上述问题,构建基于软总线的实时数据处理系统,设计实时数据处理系统自主闭环测试验证体系,对传统的实时数据处理系统测试验证模式进行改进,将人工比对分析工作由仿真测试验证子系统完成,实现测试数据仿真、数据传输、数据处理、数据比对、验证评估的自主闭环,达到系统自主闭环测试验证的目的,降低人员的参与力度。

在基于软总线的实时数据处理系统中,对传统模拟仿真子系统进行功能扩展,增加信息接收、比对、分析、评估功能,构建集数据模拟仿真、信息比对分析等功能于一体的仿真测试验证子系统,实现信息的模拟、传输,结果的回收、比对,正确性自主验证评估的闭环处理。系统自主闭环测试验证实现框架如图1所示,各系统功能及协作关系如下:

仿真测试验证子系统:负责原始信息的模拟,并向数据交换子系统发送。为了测试数据交换子系统的指定源组播数据接收功能,中间必须进行网络隔离,即跨网段、跨交换机;同时负责从软总线上收集各实时数据处理子系统数据处理结果,并与仿真数据真值进行比对分析,评估数据传输、处理的正确性和接口的匹配性;接收和汇集分发对外发送信息,进行本地缓存,并具备辅助分析功能。

数据交换子系统:通常由电文传输和汇集分发两个子系统组成。汇集分发子系统是该系统的核心软件,也是实时数

据处理系统内外数据的交换中枢，接收仿真测试验证子系统模拟的原始信息并向数据处理子系统转发，同时将外送信息以组播的形式同步复制发送一份，供仿真测试验证子系统分析使用。

数据存储管理子系统：接收外线原始信息、各子系统数据处理结果信息，存入本地磁盘或数据库，供事后分析使用。

实时数据处理子系统：由多个数据处理、数据判决子系统组成，是实时数据处理系统的核心业务模块，从软总线上获取数据交换子系统发布的原始信息或其他数据处理子系统发布的数据处理结果，完成相应数据处理后将数据处理结果发布到软总线上，供其他子系统使用。

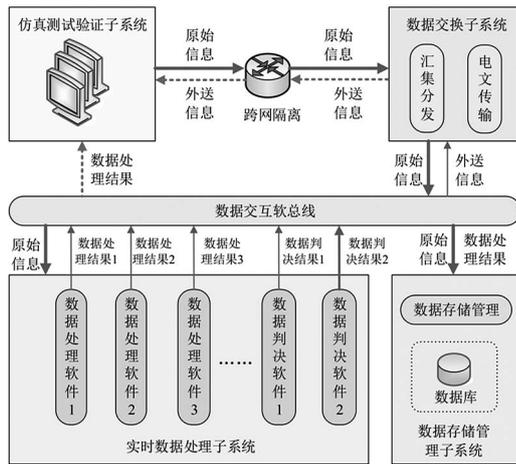


图1 系统自主闭环测试验证体系结构

Fig.1 The architecture of autonomous closed-loop test and verification system

实时数据处理系统自主闭环测试验证流程如图2所示。仿真测试验证子系统模拟产生各测控设备原始信息，通过数据交互子系统在软总线上发布；实时数据处理子系统从软总线上订阅原始信息，完成数据处理后将结果向软总线发布；仿真测试验证子系统从软总线订阅各实时数据处理子系统数据的处理结果，并与原始模拟测量信息真值进行对比、分析、评估，以验证实时数据处理系统信息处理的正确性和子系统间接口的匹配性。

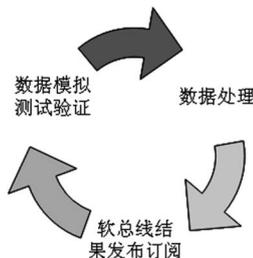


图2 系统自主闭环测试验证流程示意图

Fig.2 The process of autonomous closed-loop test and verification system

### 3.3 基于偏差模型的测量数据模拟技术

仿真测试验证子系统工作的基点是测量数据的模拟，实

际上是数值模拟的问题。在测量数据模拟时，需对两类数据进行模拟：

(1)正常数据。模拟这类数据的目的是验证各实时数据处理子系统数据处理的正确性和子系统间接口的匹配性，在数据模拟时不加偏差量，直接将真值作为模拟值送出。

(2)偏差数据。模拟这类数据的目的是检验实时数据处理子系统数据融合、数据滤波、数据插值等算法的有效性和实时数据处理系统的健壮性。

在测控系统中，无论是参数类信息还是测量信息，都可以归为三类参数。

第一类：静态变量。此类变量在整个测试验证过程中模拟的数值都不变，是一个恒定值。

第二类：离散变量。只在有限的时间点或可数的时间点上数值的变化，并且数值变化是在瞬时完成的，即离散事件是瞬时出现的，例如各类设备状态参数、时间指令等信息。

第三类：连续变量。变量的数值随时间连续变化，但在真实数据中，时间不可能是绝对连续的，总会有一个时间间隔，需要将连续变量在时间上进行离散化处理，并由此模拟变量的数值，其参数值随时间的推进而发生变化，例如测控数据中的设备测量信息、弹道信息、遥测模拟量等，此类参数占据绝大多数实际场景。

下面介绍静态变量、离散变量和连续变量的数学仿真实现模型。

#### (1)静态变量模拟

静态变量的模拟很简单，只需实现规定模拟真值基础上的变量模拟，在测试验证时间段内装订模拟真值进行模拟即可。

#### (2)离散变量模拟

离散变量包含离散随机变量和离散定值变量两类。离散定值变量是指在整个测试验证时间段内参数值仅在有限的几个时间点进行变换，并且变换后保持参数值不变，直到下一个参数值变化的离散时间点，此类参数只需按时间离散点装订对应的参数值即可。

离散随机变量是指在整个测试验证时间段内参数值会随机变化，变化时间节点不固定。离散随机变量模拟原理如下：

设离散随机变量  $X$  的可能值为  $\{x_i\}$ ，相应的概率为  $P(X = x_i) = p_i, i = 1, 2, \dots$ ；设  $p^{(0)} = 0, p^{(n)} = \sum_{i=1}^n p_i, n = 1, 2, \dots$ ；将  $p^{(n)}$  作为分点，把区间  $(0,1)$  分为一系列小区间  $(p^{(n-1)}, p^{(n)})$ 。设  $Y$  是  $(0,1)$  上均匀随机变量，则有：

$$P(p^{(n-1)} < Y \leq p^{(n)}) = p^{(n)} - p^{(n-1)} = p_n = P(x = x_n), n = 1, 2, \dots$$

因此可以用随机变量  $Y$  落在区间内的情况来模拟离散的随机变量  $X$  的取值情况。

#### (3)连续变量模拟

连续变量的模拟问题可以进行一定的转化，即以参数真

值序列(理论值)为基准,在生成模拟数据时加入偏差量。由于偏差量多以随机偏差为主,因此连续变量的模拟问题可转换为连续型随机变量的模拟问题。

处理连续型随机变量的模拟问题有多种方法,其中反函数法是最常用的,其方法核心是通过求概率分布的反函数产生随机数。随机变量  $X$  的概率分布函数  $F(x)$  为定义在  $(0,1)$  区间的单调递增函数,设  $Y$  为区间  $(0,1)$  的均匀随机变量,令  $F(x)=Y$ ,只要求出反函数  $x=F^{-1}(Y)$ , $x$  即为具有概率分布函数的随机数。由概率论的理论可以证明  $X$  和  $F^{-1}(Y)$  有相同的概率分布<sup>[8]</sup>。

若  $X$  的概率密度为  $\phi(x)$ ,由  $Y=F(X)$ , $Y=F(X)=\int_0^x \phi(x)dx$  是区间  $(0,1)$  上均匀分布的随机变量。如果给定区间  $(0,1)$  上均匀分布随机数  $r_i$ ,则具有给定分布的随机数  $x_i$  可由方程中解出: $r_i=F(x_i)=\int_0^{x_i} \phi(x)dx$ 。

在实际参数模拟过程中也可以简单处理,仅需要加入一定范围的随机误差,只要满足实时数据处理系统测试验证评估需求即可。

### 3.4 实时数据处理系统测试验证评估模型

要完成实时数据处理正确性测试验证工作,必须研究数据处理结果正确性评价机制。如果我们把仿真测试验证子系统模拟的测量数据或加偏差前的模拟测量数据作为变量的真值,仅关注数据处理结果与真值的偏差,问题就转变为变量测量的问题,信息比对分析问题转变为误差分析问题。测试验证评估模型用到的误差分析参数如下:

(1)准确度:数据处理结果与真值符合的程度。

(2)绝对误差:数据处理结果与真值之差,用  $\delta$  表示,通常用于常量比对分析。

(3)相对误差:绝对误差与真值的比值,常用百分数表示。

绝对误差可正可负,可以表明数据处理的准确度,但不能反映误差在数据处理结果值中所占比例;相对误差反映数据处理误差在数据处理结果中所占的比例,在变量值本身很小时衡量相对误差更有意义。

(4)均方根误差:用来衡量数据处理结果同真值之间的偏差,对数据处理结果中特大或特小误差反应敏感,既可衡量误差大小,也可衡量误差离散程度,还能够反映测量的精密度。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2}, \text{ 其中, } \hat{x}_i \text{ 为测量值, } x_i \text{ 为真值}^{[8]}。$$

精密度是指几次数据处理结果相互接近的程度,对常量数据处理的评定很有意义。各次数据处理结果越接近,精密度越高,通常用偏差衡量精密度。

准确度与精密度的关系如下:

(1)精密度是保证准确度的先决条件,精密度不符合要求,表示处理结果不可靠,失去衡量准确度的前提。

(2)精密度高不能保证准确度高。准确的数据处理一定是精密的,精密的数据处理不一定是准确的。

对于一次数据处理过程而言,单次数据处理结果的比对只是数据处理正确性的一个方面,一段时间内的数据处理结果与真实值的统计误差在某种意义上更有意义,更能反映数据处理的正确性。因此,下面几个统计学误差概念对数据处理测试验证更有意义。

(1)偏差:单次数据处理结果与时间段内数据处理结果样本平均值之差:  $d_i = x_i - \bar{x}$ 。

(2)平均偏差:各次数据处理偏差绝对值的平均值。

(3)相对平均偏差:平均偏差与平均值的比值。

(4)标准偏差:各次数据处理偏差的平方和平均后再开方,是比平均偏差更灵敏的反应较大偏差的存在,在统计学上更有意义。标准偏差是一种量度数据分布的分散程度的标准,用以衡量数据值偏离算术平均值的程度。标准偏差越小,这些值偏离平均值就越多,反之亦然。标准偏差的大小可通过标准偏差与平均值的倍率关系来衡量。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}}$$

其中, $S$ 为标准偏差; $n$ 为数据处理次数,一般 $n$ 不应小于30; $x_i$ 为历次数据处理结果值<sup>[9]</sup>。

上式中涉及平均值的计算,用到的两种典型平均值的计算方法如下:

(1)算术平均值

这种平均值最常用。设  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为各次的测量值, $n$ 代表测量次数,则算术平均值为:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

(2)均方根平均值

$$\bar{x}_{\text{均方}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}}$$

仿真测试验证子系统模拟数值的真值是已知的,同时实时数据处理系统给出数据处理结果在时间维度上与原始模拟值相比只有改变时间序列和不改变时间序列两种情况。改变时间序列一般发生在对原始数据进行复杂处理的情况,如数据融合、滤波、插值等操作,这些处理方式会使序列时标发生改变;不改变时间序列的情况一般是仅对原始数据进行量纲还原操作,这种简单处理方式不会改变序列时标。因此,只需构建时间同步数据处理结果序列评估模型和时间异步数据处理结果序列评估模型,评估模型的核心是误差、偏差评价模型,如图3所示。

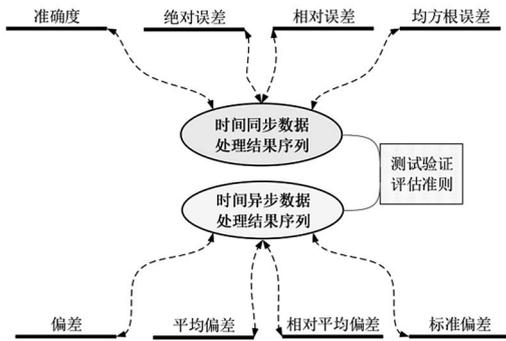


图3 测试验证评估模型

Fig.3 Test and verification evaluation model

对恒定量参数、处理前后可严格按时间对齐的测量信息的数据处理测试验证采用误差类参数进行评定，对数据融合、滤波等算法的有效性进行测试验证采用偏差类参数进行评定，即时间同步数据处理结果序列评定采用误差类参数，时间异步数据处理结果序列评定采用偏差类参数。在利用偏差量参数进行评定时，可以将对测量值的处理结果评定问题转换为对偏差量的测量问题，便于利用偏差量参数进行评定。

测试验证评估准则是指对时间同步数据处理结果误差、时间异步数据处理结果偏差进行评定的标准，即允许的误差、偏差范围。评定标准的选择需根据实时数据处理系统的处理精度进行选取，对时间同步数据处理正确性的评估可以直接进行误差范围设置，且误差范围可以设置得较小，依据准则直接进行比对分析评估即可；对各类算法数据处理正确性的评估需要考虑算法本身的精度，假定算法本身误差为 $\delta$ ，误差允许范围一般设置为 $3\delta$ 。

### 3.5 系统自主闭环测试验证体系工作流程

系统自主闭环测试验证从仿真测试验证子系统启动原始数据模拟开始，到数据处理结果比对分析完毕为止，形成数据模拟、传输、处理、比对分析的闭环，实现数据处理结果的自主测试验证分析，具体流程如图4所示。

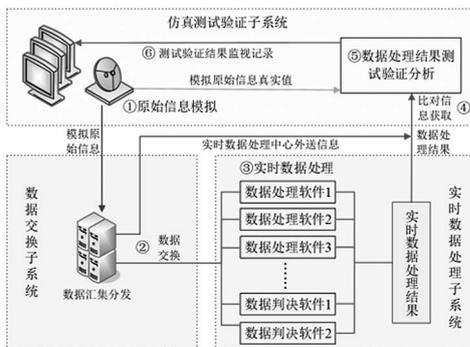


图4 系统自主闭环测试验证流程

Fig.4 The process of autonomous closed-loop test and verification system

(1)原始信息模拟。仿真测试验证子系统依据需要处理的数据的历史真值序列(理论值)，以及测试验证目的产生原

始信息，并向数据交换子系统发送，同时将模拟的原始信息的真实值提交测试验证分析模块进行缓存，供数据比对分析使用。

(2)数据交换。仿真测试验证子系统和实时数据处理子系统的数据交换功能由汇集分发子系统完成，通过数据交互软总线将模拟测量数据分发给实时数据处理的各个子系统，同时将实时数据处理子系统外送信息以组播的形式发送给仿真测试验证子系统，供数据分析使用。

(3)实时数据处理。实时数据处理子系统完成对各类信息的处理、判决等工作，处理结果发布到软总线上，供相关子系统使用。

(4)比对信息获取。仿真测试验证子系统从汇集分发子系统获取实时数据处理系统外送信息，从软总线订阅实时数据处理结果信息，供比对分析使用。

(5)数据处理结果测试验证分析。测试验证分析模块利用缓存在本地的模拟原始数据真值信息和数据处理结果，依据数据测试验证评估模型对数据进行比对分析，形成评估结果。

(6)测试验证结果监视记录。测试验证结果在本地实时显示，同时可以在本地或数据存储管理系统进行存储，供事后比对分析使用。

### 4 实验及效果分析(Experiments and analysis)

本节中的实验以某次民用商业火箭发射任务实时数据处理系统的测试验证工作为例。时间同步数据处理验证效果如图5所示，图中为雷达俯仰角参数数据处理结果比对效果，由于处理时仅作量纲还原，仅会代入量纲转换误差，评估准则中误差门限取 $10^{-5}$ ，从比对结果看数据处理偏差符合要求。

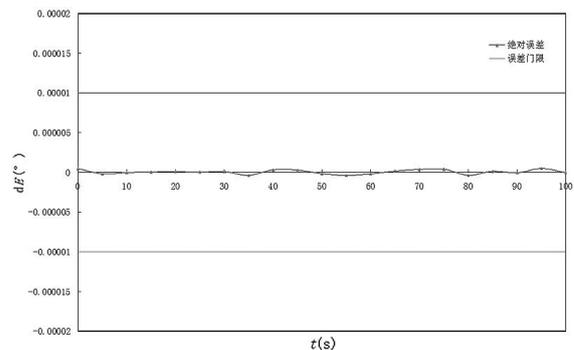


图5 时间同步数据处理验证效果

Fig.5 Verification result of time synchronization data processing

图6为时间异步数据处理验证效果，以雷达数据测元级融合处理为例，选取位置偏差作为评价参数，测量数据模拟时加入逐渐变大的随机误差，检验数据融合效果。综合考虑测元级数据融合算法精度，偏差量门限取为3 m。从测试验证效果看，测元级数据融合算法对随机误差的处理精度很高，满足处理要求。

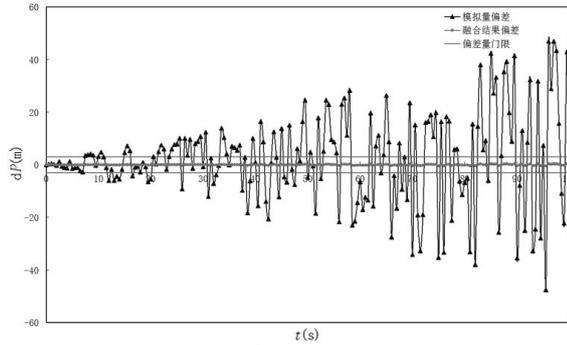


图6 时间异步数据处理验证效果

Fig.6 Verification result of time asynchronous data processing

时间异步数据处理验证时，系统会自动计算验证时间段内的标准偏差，进一步对数据处理正确性进行评价。

为验证自主闭环测试验证体系的有效性，可利用现有的实时数据处理系统开展实验验证工作，检验自主闭环测试验证体系的排查、纠错能力。具体方法为：

(1)根据任务实际要求，对综合、外测、遥测等测控数据处理结果的误差、偏差门限值进行设定。

(2)将实时数据处理子系统中的各项参数进行正确配置，确保各类算法正确运行，运行自主闭环测试验证系统，查看验证效果是否正确。

(3)通过修改实时数据处理子系统中的配置文件、数据处理算法源代码等方法，人为制造一些出错场景，运行自主闭环测试验证系统，查看系统是否可以自动筛选出异常处理结果并生成在测试验证结果报告中。

表1展示了对一些常见类型数据处理进行测试验证的结果。选取落点参数处理、遥测参数处理、外测参数预处理这三项时间同步数据，以及3R数据融合、测元数据融合、雷达定位数据滤波这三项时间异步数据对自主闭环测试验证方法的有效性进行测试。设置配置正常、量纲放大、量纲缩小、站址错误、模型参数错误等实时数据处理中经常遇到的场景进行检验，其中站址错误和模型参数错误对时间同步数据处理评价无效。从表中的验证结果看，系统有效检测出了实时数据处理系统中存在的问题，给出了正确的验证结果。

表1 常见实时数据处理测试验证结果

Tab.1 Real-time data processing test and verification results for common scenarios

项目	落点参数处理	遥测参数处理	外测参数预处理	3R数据融合	测元数据融合	雷达定位数据滤波
配置正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常
量纲放大	超限	超限	超限	超限	超限	超限
量纲缩小	超限	超限	超限	超限	超限	超限
站址错误	—	—	—	超限	超限	超限
模型参数错误	—	—	—	超限	超限	超限

经验证，仿真测试验证子系统会根据测试验证评估准则自动给出评价结果，避免了人工进行大量的比对分析工作，有效降低了人员工作量。

## 5 结论(Conclusion)

本文针对传统的实时数据处理系统采取人工比对的方式进行测试验证的弊端，充分发挥计算机在数据处理方面的优势，研究了实时数据处理系统自主闭环测试验证技术，提出了基于偏差模型的测量数据模拟方法、基于经典误差分析方法的测试验证评估模型，构建了实时数据处理系统自主闭环测试验证体系，提高了实时数据处理系统的测试验证效率。与系统当前状态相比，数据处理中心数据模拟仿真子系统不再单纯承担数据模拟仿真的职能，同时要负责实时数据处理系统信息处理正确性测试验证的工作，在完成数据仿真功能的同时，同步完成各子系统数据处理结果及数据处理系统外送数据的收集整理、比对分析、正确性评估等工作，实现实时数据处理系统自主闭环测试验证。测试验证过程自动完成，测试人员只需实时监视比对分析结果、审查正确性评估结果，极大简化了系统测试验证中人工信息比对流程，降低了人员工作量，有效提升了实时数据处理系统测试验证的效率。

## 参考文献(References)

- [1] D. Xiaojun, W. Chengfu, C. Huaimin, et al. A rapid test platform of redundant flight control computer software based on RFM[C]. 2012 7th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE), Melbourne, VIC, 2012:403-406.
- [2] T. Muller, A. Knoll. Virtualization Techniques for Cross Platform Automated Software Builds, Tests and Deployment[C]. 2009 Fourth International Conference on Software Engineering Advances, Porto, 2009:73-77.
- [3] 孙喜刚,付剑平,吕林峰,等.综合电子信息系统软件仿真测试方法[J].指挥信息系统与技术,2014(4):75-79.
- [4] 吴立金,唐龙利,柴海燕,等.面向船舶软件的仿真测试平台研究[J].计算机测量与控制,2015(5):1451-1453.
- [5] X. Han, N. Zhang, W. He, et al. Automated Warship Software Testing System Based on LoadRunner Automation API[C]. 2018 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C), Lisbon, 2018:51-55.
- [6] 谢家森.调试验证平台中闭环测试和故障注入的设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,2014.
- [7] 徐聪.调试验证平台中闭环测试的设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,2014.
- [8] 费业泰.误差理论与数据处理[M].北京:机械工业出版社,2017.
- [9] 宋来中,王志明.数学建模与实验[M].北京:科学出版社,2005.

## 作者简介:

刘永利(1980-),男,硕士,高级工程师.研究领域:实时数据处理,软件工程.

刘云鹏(1991-),男,硕士,工程师.研究领域:实时数据处理,软件工程.