

飞行试验综合安全监控技术

叶冰, 徐茜, 郝朝

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘要: 在新型飞机飞行试验任务中, 遥测监控技术是保证试飞安全, 提高试飞效率的重要手段; 针对目前地面实时监控技术面临的问题和挑战, 提出采用基于故障树的多类型告警技术、试飞任务的嵌入式准实时数据处理技术及应急处置辅助决策技术等先进监控技术, 引入试飞安全决策库理念, 建立应急处置辅助决策机制, 构建飞行试验综合安全监控系统, 实现飞机各系统试飞状态监控和综合故障告警、复杂试飞科目的准实时计算评估和应急处置决策支持; 实际飞行试验结果表明, 应用此技术开发的综合安全监控系统, 可以使试飞指挥员和工程师在第一时间及时准确地获取试验机故障告警、试飞科目评估结果和应急处置决策方案, 极大地提高了试飞效率和安全性。

关键词: 飞行试验; 综合监控; 故障树; 准实时; 应急处置; 决策支持

Integrated Safety Monitoring Technology for Flight Test

Ye Bing, Xu Qian, Hao Zhao

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: In the new aircraft flight test mission, telemetry monitoring technology is an important means to ensure flight test safety and improve flight test efficiency. Aiming at the challenges and problems of terrestrial real-time monitoring technology, some advanced monitoring technology such as multi-type alarm technology based on fault tree, embedded quasi-real-time data processing technology and emergency treatment auxiliary decision technology are proposed. The flight safety decision library concept is introduced and the emergency treatment auxiliary decision mechanism is established to achieve the aircraft system test flight status monitoring and integrated fault alarm, complex flight test subjects quasi real-time calculation and evaluation and emergency response decision support. The results of the actual flight test show that the integrated monitoring system developed by this technology can make the test flight commander and engineers get the test aircraft fault alarm, the evaluation results of test flight subjects and the emergency decision-making plan in the first time, which greatly improves the test flight efficiency and safety.

Keywords: flight test; integrated monitoring; fault tree; quasi real-time; emergency disposal; decision-making support

0 引言

飞行试验, 简称试飞, 是飞行器及其动力装置和机载设备在真实的飞行环境条件下进行的试验。飞行试验是新机和航空装备研制中至关重要的环节, 风险因素较多, 因此, 为了保证飞行试验的安全进行, 必须对飞行试验的整个过程进行安全监控。

遥测监控是试飞过程中实时获取数据的唯一手段, 对于降低新机或航空装备的试飞风险, 提高试飞效率, 缩短试飞周期等都起着关键作用。遥测监控是在飞行试验过程中, 将对影响飞机安全的关键参数通过遥测链路实时下传到地面进行监控和进一步的处理分析, 实时监控软件通过对照其临界值进行飞机平台、航电系统等系统的安全状态判断, 并以告警灯、声音等多种形式表现出来。以确定飞机在空中是否处于安全可控状态, 试飞动作是否有效完成, 后续任务的能否安全进行。开展飞行试验安全监控是确保试飞安全和型号各科目试飞任务顺利开展的最基本的前

提^[1], 长期的飞行试验经验和事实表明, 飞行试验综合安全监控与应急处置辅助决策的技术水平和能力, 都会对飞行试验的进度及技术发展产生很大的影响。

1 安全监控现状与需求分析

传统的安全监控技术是通过设计安全监控软件将试飞数据以数字、曲线、信号灯等形式显示在监控显示器上, 指挥员和试飞工程师通过显示的试飞数据与飞行手册中的数据对比才能判断数据是否在正常区间, 通过告警灯的状态来判断某个重要信息是否正常, 根据告警内容到纸质的应急处置手册中去查找对应的处置方法和步骤, 然后通过电台告知试飞员, 这样的方式对保障试飞安全也起到了一定的作用, 但是整个过程所需时间过长, 同时全程的分析、判断到最终的决策是在指挥员和试飞工程师在高度紧张和巨大心里压力下完成的, 人为因素影响过大, 也造成过一些安全事故征候。尤其是飞机的某些部件发生重大故障时, 时间就是试飞员和新型号飞机的生命。

随着近年来新型飞机的不断涌现, 由于新型飞机采用大量的新技术和系统复杂度急剧增加, 试飞过程中需要监控的关键技术点也随之增加, 传统的安全监控技术和方法很难满足型号试飞任务对安全监控日益增长的需求。

收稿日期: 2018-07-25; 修回日期: 2018-08-24。

基金项目: 装备预研中航工业联合基金项目(6141B05110401)。

作者简介: 叶冰(1988-), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要从事实时处理与监控与系统开发工作方向的研究。

因此必须通过采用新的安全监控技术设计开发综合安全监控软件^[2], 减少人为因素, 减轻指挥员和试飞工程师的监控压力, 为指挥员和试飞工程师提供直观的判据、直接高效的应急处置信息, 缩短应急处置决策时间, 更加有效的保证试飞安全, 提高试飞效率。

2 综合安全监控技术

综合安全监控技术涉及通信技术、计算机技术等, 将综合安全监控技术运用到飞行试验实时监控中, 可以扩充实时监控的手段, 使监控的形式多样化, 使得指挥员和试飞工程师能够在监控中更快地获得更多的信息, 提升了实时监控的质量, 确保了飞行试验的安全有效进行。

2.1 基于故障树的多类型告警技术

在飞行试验实时监控过程中, 故障告警的准确度与直观度直接决定了应对故障决策的及时性和有效性, 通过对故障类型及其所影响的决策方向, 采用不同的表现形式进行状态显示, 通过不同的显示方式, 需要能够明确地指出故障的种类、故障间的关联程度、故障产生时所在系统的状态。

传统的使用单一的形式仅对发生故障进行指示的方法, 不能有效地指出故障所影响的具体范围, 严重程度, 以及明确故障所产生的问题根源。通过分析各个故障的说明信息, 结合飞机各系统的状态特征, 梳理出各个故障之间的逻辑关系以及其所处的系统部位, 将这种关系抽象为树型结构^[3], 从而形成了具有故障之间关联关系与系统各层级故障信息的数据集合。图 1 是故障树结构示意图。

```
<? xml version="1.0" encoding="UTF-8"? >
<SYS>
  <飞机子系统 1>
    <故障 1>
      <故障>
        <信息>故障名称</信息>
        <等级>1</等级>
        <判据>故障发生条件</判据>
        <描述>描述信息</描述>
      </故障>
    <父节点>
      <信息>飞机子系统 1</信息>
      <等级>1</等级>
      <判据>故障发生条件</判据>
      <描述>描述信息</描述>
    </父节点>
    <子节点>
      <信息>子故障名称</信息>
      <等级>2</等级>
      <判据>故障发生条件</判据>
      <描述>描述信息</描述>
    </子节点>
  </故障 1>
  .....
</飞机子系统 1>
  .....
</SYS>
```

图 1 故障树结构示意图

将该数据集合应用于飞行试验实时监控软件设计过程中, 并结合以往的软件设计技术, 总结出了 4 种不同故障的表现形式及其应用方向。

1) 告警灯: 直接指出系统所产生的故障, 结合故障所在系统的其他数据指标进行共同设计, 有利于明确故障发生的根本原因, 及其系统内的影响范围。主要针对重要的系统故障。

2) 语音告警: 采用 TTS 技术^[4]将文本故障信息转化为语音信息进行警示, 主要针对飞机的关键故障, 其处于树形结构中的顶层, 对飞机的安全具有至关重要的作用。

3) 故障清单: 当前任务过程中试验飞行科目所发生的所有故障依据故障危害程度划分的等级分级显示与颜色区别的方式进行呈现, 并直观的表述出故障之间的相互关系, 可以第一时间明确发生故障产生的影响范围, 并初步判断出最底层的故障信息, 产生初步的决策内容。

4) 图形化: 通过针对单一子系统进行分析, 确定系统的整体逻辑图以及硬件设计仿真图, 结合具体部位的数据的显示与故障所处的位置, 形成图形化的故障显示, 主要针对可以图形化的子系统, 具有形象准确的特性。

由此可见, 告警灯与语音告警可以最大限度的通过视觉和听觉将重要的故障直观的显示, 图形化的显示方式能够形象逼真的实时显示系统各个部位的真实状态, 在发生故障后, 可以直观的显示当前系统发生故障的具体部位, 在结合了故障树的设计思想之后, 一方面在实时监控中可以更加准确有效地设计监控软件, 与此同时在故障发生后也能够更加有效地发现问题根源做出合理的处置决策。

而基于故障树的故障清单的形成建立, 一方面要结合已经建立的故障树结构, 另一方面要对当前系统各类型的故障进行汇总分析, 明确其故障的级别(严重;重要;警告;提示)、产生方式(故障产生的判断逻辑)以及故障呈现的相关信息(产生时刻, 颜色提示等)。

虽然前期需要开展大量的准备工作, 但在故障触发时便于决策人员更好地识别并做出正确的处置。以上故障告警都是基于简单的逻辑判断, 但是有些科目需要经过特定复杂运算之后才能获得做出状态评价的数据依据, 再决定是否继续开展下一个试飞动作, 因此需要构建一个通用的准实时数据处理平台, 快速完成某些风险科目试飞过程中试飞动作的状态评估, 为试飞安全提供决策依据。

2.2 试飞任务嵌入式准实时数据处理技术

随着计算机技术的发展, 遥测数据实时处理系统的计算能力越来越强, 一些以前只能在飞行后进行的计算分析, 现在可以在实时监控过程中进行准实时的数据分析, 通过在飞行试验过程中, 把与试飞动作段相关参数的遥测数据进行实时记录, 当该动作段完成时, 用实时记录的動作段数据按照相应的算法进行分析处理, 给出试飞评定结果, 作为地面指挥员和试飞工程师评价试飞科目完成情况的依据, 最终达到对试飞任务进行准实时评估的目的。遥测数据准实时数据处理流程如图 2 所示。

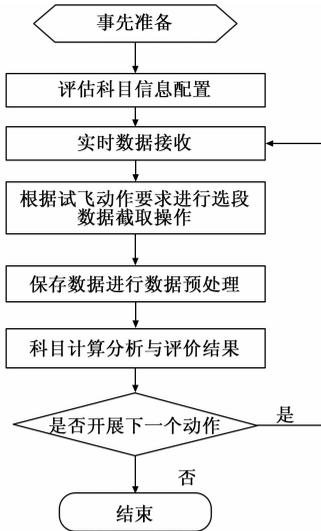


图 2 遥测数据准实时数据处理流程图

试飞任务嵌入式准实时数据处理软件是在 Labview 软件平台下，利用 MATLAB Script 脚本节点将 MATLAB 程序嵌入到 Labview 程序中，其中 Labview 负责实现遥测数据的实时接收、数据的截取操作和数据的保存等功能，利用 MATLAB 在数学运算分析方面强大的能力实现试飞科目复杂算法的分析和计算。下面以飞控稳定裕度试飞科目为例^[5]，具体说明嵌入式准实时数据处理软件实现步骤：

1) 在试飞任务实时监控过程中，通过 TCP/IP 协议和前端实时数据处理服务器建立连接后，实时获取需要监控参数的工程量数据，使用 Chart 图表控件以曲线图表的形式显示部分关键参数的时间历程曲线，以供试飞工程师实时监控；

2) 在试飞科目动作完成后，试飞工程师在时间历程曲线上通过快速拖动游标确定历史数据的起止点；

3) 根据选取的起止点，从参数 History 属性节点中提取出两个游标之间的历史数据，并按照一定格式保存在本地磁盘上，用于后面的科目分析和计算；

4) 后台调用飞控稳定裕度科目分析计算 Matlab 程序算法，对保存数据做 FFT 变换，得到飞控系统的开环频率响应，即 BODE 图，使用的算法由试飞工程师给出，软件提供了一个开放的接口，可以方便的将试飞工程师事后处理所用的 Matlab 程序算法嵌入到准实时数据处理软件中，为实现其他科目的准实时处理提供了通用平台；

5) 在完成科目分析与计算之后，使用 MATLAB 软件中的绘图命令，将计算后的评估结果以闭环时域响应图以及 BODE 图的形式输出。

2.3 应急处置辅助决策技术

以往的实时监控软件，在故障或告警出现后，需要指挥员在纸质试飞员手册查找应急处置措施，这种方式需要的时间周期长，而且指挥员和试飞员都要承受巨大的压力和风险。因此采用计算机软件和知识工程等多项先进技术，以飞行员应急手册、飞行手册为依据，在分析了上百个架

次试飞数据的基础上，结合试飞员和试飞工程师长年积累的经验，对所有故障对应的应急处置进行分析和总结、归纳，形成试飞安全决策库，一旦出现告警，安全监控软件自动从安全决策库中搜索信息立即形成应急处置方案，并将应急处置程序和内容以准确、简洁的方式显示，提高空中特情应急处置成功率。

首先分析出处置内容特征标识，即任何一条处置决策应当具有项目名称、项目显示（飞机仪表或系统指示模拟图或实景图）、告警级别、语音（头显或耳机）、含义、影响、处置措施（包含不同情况下）。确定了具体内容版图，相比于传统故障处置内容仅使用单一的纯文字文本的显示方式，通过采用 HTML，建立故障条目与静态网页关联表，在 Labview 软件中内建浏览器，将处置内容汇总为具体的处置网页，采用文字、表格、图片以及视频等方式进行页内呈现，具有更好的阅读性。故障处置内容范本如图 3 所示。

“故障”现象描述

项目	现象
名称	故障
项目显示	仪表：闪烁 故障
告警级别	警告，二级告警
语音	“故障”发生请注意

含义：XX系统发生较为严重的、导致XX可能无法启动或某些功能无法运行。

影响：

- (1) 影响条目1；
- (2) 影响条目2。

处置：

- (1) 情况1下处置措施1；
- (2) 情况1下处置措施2；
- (3) 情况2下处置措施1；
- (4) 情况2下 处置措施。

图 3 处置内容范本

在汇总处置形成具体的处置网页时，通过对项目名称以及含义与影响进行分析，形成可识别的关键字标签，从而形成了具体的应急处置数据库，在实时处理过程中针对所需处置的故障，采用关键字检索形成直接的处置方案，并结合处置内容与故障内容获取其在数据库中的匹配度，选择匹配度最高的方案进行最优呈现。应急处置决策处理流程如图 4 所示。

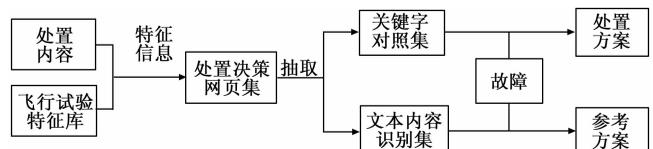


图 4 应急处置决策处理流程

3 综合安全监控系统构建

为保证目前飞行试验的安全性, 在飞行试验实时监控架构^[6]基础上, 整合原有资源, 采用综合安全监控技术, 建立了一个综合安全监控系统。通过对遥测前端传来的遥测实时数据进行实时处理、分析与显示, 该系统具备遥测数据实时处理、试飞安全实时监控、试飞任务准实时评估、应急辅助决策等功能。

该综合安全监控系统可应用于飞行试验遥测监控任务中, 图 5 为某型机的故障清单示意图, 将该机的故障分为 4 类, 分别用不同的文字颜色进行区分, 当发生严重故障和重要故障时, 监控软件会进行语音告警, 系统根据获取到的故障信息, 加以分析后, 会弹出相应的处置决策提供给指挥员和试飞工程师, 以便辅助飞行员快速相应, 完成故障处理。图 6 为飞控稳定裕度准实时数据处理软件界面示意图。在动作完成以后, 飞控稳定裕度科目分析模块迅速进行数据分析, 将闭环时域响应图以及 BODE 图, 提供给试飞工程师, 得到本次动作的完成情况, 这对试飞工程师进



图 5 故障清单示意图

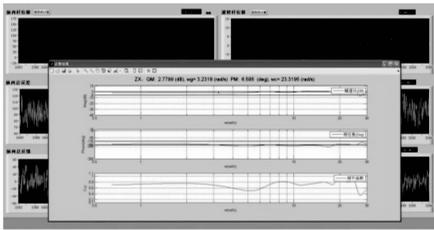


图 6 飞控稳定裕度准实时数据处理软件界面示意图

行后续飞行动的开展指挥具有指导作用。

4 结语

基于上述技术开发的综合安全监控软件已经成功地应用在了飞行试验实时安全监控系统中, 在多个型号飞机的试验试飞任务中, 通过以告警灯、语音告警、故障清单和图形化等丰富的告警形式从视觉、听觉全方位、立体地、快速准确地发现故障, 与安全相关的科目试飞, 可以在 1 分钟内获得评估结果, 并在故障发生时, 快速形成应急处置方案, 辅助指挥员和飞行员完成故障处置, 综合安全监控系统自应用以来已成功监控处置多次飞行险情, 避免了国家财产的损失。

综合安全监控技术满足了新型飞机试飞的安全监控需求, 突破了综合告警、准实时数据处理、应急处置辅助决策等关键技术, 有效保证试飞安全, 缩短研制及定型周期, 同时为构建试飞安全专家系统提供了必要的技术积累。

参考文献:

- [1] 李筱雅. 多目标综合遥测监控系统架构设计 [J]. 现代电子技术, 2012, 35 (20): 124-127.
- [2] Moises G M, et al. Advanced monitoring techniques [A]. Conference Proceedings of European Telemetry Conference [C]. 2014.
- [3] 罗航. 故障树分析的若干关键问题研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [4] 宗思瑶, 尚丽娜. TTS 技术在飞行试验遥测监控中的应用 [J]. 测控技术, 2014, 33 (3): 110-112.
- [5] 李导, 杨伟, 等. 飞机稳定裕度试飞评估及激励信号优化 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13 (17): 4838-4842.
- [6] 覃杨森, 聂睿, 覃燕. 飞行试验实时监控软件架构设计技术研究 [J]. 电子设计工程, 2017, 25 (13): 5-8.

.....
(上接第 99 页)

- [5] Bulgur E A, Demircioglu H, Basturk H I. Light source tracking with quadrotor by using extremum seeking control [A]. 2018 Annual American Control Conference (ACC) [C]. IEEE, 2018: 1746-1751.
- [6] Iovino P, Salvestrini S, Capasso S. Identification of stationary sources of air pollutants by concentration statistical analysis [J]. Chemosphere, 2008, 73 (4): 614-618.
- [7] Woodbury A, Sudicky E, Urych T J, et al. Three-dimensional plume source reconstruction using minimum relative entropy inversion [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1998, 32 (1/2): 131-158.
- [8] Newman M, Hatfield K, Hayworth J, et al. A hybrid method for inverse characterization of subsurface contaminant flux [J]. Journal of contaminant hydrology, 2005, 81 (1-4): 34-62.
- [9] Thomson L C, Hirst B, Gibson G, et al. An improved algorithm for locating a gas source using inverse methods [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41 (6): 1128-1134.
- [10] Zhong C, Worboys M. Continuous contour mapping in sensor networks [A]. Consumer Communications and Networking Conference. CCNC 2008. 5th IEEE [C]. 2008: 152-156.
- [11] Mellucci C, Menon P P, Edwards C, et al. Source seeking using a single autonomous vehicle [A]. American Control Conference (ACC). 2016 [C]. IEEE, 2016: 6441-6446.
- [12] Rascon C, Meza I. Localization of sound sources in robotics: A review [J]. Robotics & Autonomous Systems, 2017, 96 (C): 184-210.
- [13] 郝存明, 张英坤, 梁献霞. 基于滑模控制的室内移动机器人路径跟踪 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (8): 93-96.
- [14] 骆德汉, 邹宇华, 庄家俊. 基于修正蚁群算法的多机器人气味源定位策略研究 [J]. 机器人, 2008.
- [15] 郝为民, 吕晓玲. 一种基于机器人听觉的多声源跟踪策略 [J]. 河北工业大学学报, 2009, 38 (5): 28-31.
- [16] 沈豪, 庄建军, 郑茜颖, 等. 一种基于 MeanShift 算法的目标跟踪系统的设计与实现 [J]. 电子测量技术, 2018 (14).