

无人机系统自平衡容错控制与故障诊断

冯国强¹, 赵晓林¹, 高关根², 寇磊²

(1. 空军工程大学 装备管理与无人机工程学院, 西安 710043;
2. 航空工业自控所惯性技术航空科技重点实验室, 西安 710065)

摘要: 随着无人机的广泛普及和自主控制技术的深入研究, 现代战争已经离不开无人机的身影; 而无人机在其拥有特殊优势的同时也需要更多的维护来确保无人机执行任务过程中的安全; 文中引入生物学思想中的自平衡理论, 进行无人机容错控制与故障诊断系统设计, 通过设计“平衡点”确定无人机的安全状态, 并建立基于原始内驱力和次要内驱力的自平衡理论模型, 将容错控制与故障诊断不仅应用于故障预测和健康管理, 更创新提出将容错控制与故障诊断作为判断无人机是否可作为攻击时自杀武器的判据; 仿真试验表明, 无人机在穿越敌占区时, 可根据自身的故障情况判断是否可以返航或作为自杀式武器, 证明了算法的有效性。

关键词: 无人机; 自平衡理论; 容错控制; 平衡点

Self Balancing Fault-tolerant Control and Fault Diagnosis for UAV System

Feng Guoqiang¹, Zhao Xiaolin¹, Chen Xiaolong², Kou Lei²

(1. Equipment management and unmanned aerial vehicle engineering college, Air Force Engineering University, Xi'an 710043, China; 2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Inertial Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: With the widespread popularity of UAVs and the further research of autonomous control technology, the modern war is inseparable from the figure of UAV. While UAVs have their special advantages, more maintenance is needed to ensure the safety of UAVs in executing tasks. In this paper, the self balance theory of biological thought is introduced to design the fault tolerant control and fault diagnosis system of unmanned aerial vehicle. By designing "balance point", the safety state of unmanned aerial vehicle is determined, and a self balance theory model based on the original internal drive and secondary internal drive is set up, and fault tolerance control and fault diagnosis is applied not only to the fault precondition. In terms of measurement and health management, it is more innovative to propose fault tolerance control and fault diagnosis as a criterion to decide whether a UAV can be used as a suicide weapon when attacking. The simulation test shows that the UAV can judge whether it can be returned to sail or as a suicidal weapon when crossing the enemy occupied area, and the effectiveness of the algorithm is proved.

Keywords: unmanned aerial vehicle; self balancing theory; fault-tolerant control; equilibrium point

0 引言

随着自主控制高新技术的迅猛发展, 现代装备日趋向更为集成化、智能化、复杂化的方向深入研究。而无人机作为新兴作战装备, 由于其“机上无人”的特点, 可在超越人生理极限的环境中执行任务, 因此已经越来越广泛的应用于军事活动, 执行侦察监视、反恐打击等任务。但正是由于无人驾驶的特性, 这对无人机的预测与健康管理(Prognostics and Health Management, 容错控制与故障诊断)提出了更高的要求。容错控制与故障诊断技术诞生于美国陆军直升机系统^[1], 并在 F-35 项目中首次被具体提出, 在后续的管理系统中得到了广泛的应用与拓展^[2-8], 实

现了对全系统全面的系统故障检测、预测以及健康状态管理, 从根本上改变了“事后维修”、“定期维修”的维修方式, 而发展成“视情维修”的即时维修方式, 甚至“事前维修”的预测维修方式。

目前, 容错控制与故障诊断系统的应用在国内外都进行了广泛的研究并已经逐步得到应用, 如文献 [9-10] 关注于武器装备系统的故障预测与健康管理, 提出针对武器装备进行视情维修的检测方式, 极大减少了装备维护成本, 文献 [11] 提出一种给予只能决策理论的故障预测方法, 在装备出故障前即可诊断出可能发现故障的时间与部位, 防患故障于未然, 提高了装备的安全性, 其余研究还有集成控制航天器的管理 [12], 飞行器故障监测系统 [13], 集成化的故障预测系统 [14] 以及相关的容错控制与故障诊断研究工作 [15-17]。容错控制与故障诊断发展研究过程如图 1 所示, 可以看出, 容错控制与故障诊断研究是从事后维修、视情维修, 到预测维修的一种不断推进的研究过程。

论文参考国内外容错控制与故障诊断研究相关文献, 通

收稿日期: 2018-04-18; 修回日期: 2018-05-17。

作者简介: 冯国强(1978-), 男, 山西稷山人, 讲师, 主要从事无人机航路规划, 无人机故障分析方向的研究。

赵晓林(1982-), 男, 山东东明人, 副教授, 主要从事无人机航迹规划, 无人机视觉导航控制方向的研究。

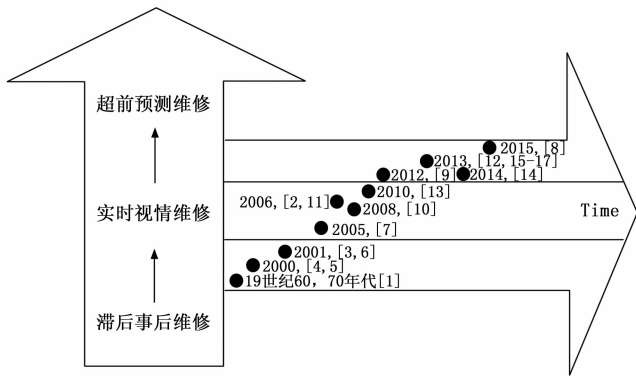


图 1 容错控制与故障诊断发展研究过程

过引入生物行为学中的“自平衡理论”^[18]，将无人机的完备状态设为平衡点，保证 UAV 的生存设为原始内驱力，保证 UAV 任务完成设为次要内驱力，依据故障预测与健康管理的容错控制与故障诊断技术，以机载设备的传感器信息为基础进行实时数据监测与故障预测，结合无人机的“机上无人”特性，构建“优先生存完好性，次要任务完成性”的机制，在根据所构建的自平衡函数判断无人机无法保证生存完好性时，此时转换无人机为自杀式飞行器，确保任务的顺利完成。仿真实验证明此方法不仅将容错控制与故障诊断与生物行为学进行有效结合提供了新颖的故障诊断与健康管理的思路，并且充分考虑无人机的特性，将容错控制与故障诊断不仅作为故障管理手段，更作为攻击判别武器，极大拓宽了容错控制与故障诊断的应用思路与前景。

1 自平衡理论建模

1.1 自平衡理论

自平衡理论是 Hull 等人在 1943 年通过研究生物的觅食、生存等行为，而提出的基于内驱力的知名理论，该理论指出所有的行为都可被理解为两种结果：

1) 原始内驱力：原始内驱力是内在的，它存在的目的是保护生物体的生存，比如饥饿或者口渴，都是生物体生存的必要因素。

2) 次要内驱力：次要内驱力是在满足原始内驱力的过程中形成的，即在满足原始内驱力的基础之上，生物的目的性、好奇性等，它存在的目的是促进生物体的进化。

Hull 等认为，原始内驱力和次要内驱力目的都是保证生物进化生存下去，更为重要的是，它们是自我平衡的。也就是说，对于一个生物系统，存在完美的“设定点”，并且原始内驱力与次要内驱力都是为生物体接近该设定点而服务的。例如，当生物体的某部分机能损坏时，它可能预先感到自身的状态从而提前采取措施（如感到寒冷，它可能会发抖或移向阳光来增加体温）。换言之，自我平衡使得生物具有一种“回归平衡”的能力，即在环境改变、机体受损等破坏生物体稳态时达到平衡的功能。

1.2 无人机自平衡理论模型

根据 Hull 等人提出的自平衡理论，可以构建基于无人

机自平衡理论模型如图 2 所示。首先确定无人机的平衡点，即无人机所有机载设备处于出厂完好状态并能正常工作的点，此时无人机能够充分发挥自身性能。在确定无人机平衡点之后需要构建自平衡函数来判断无人机是否处于平衡点附近，若处于平衡点附近则代表无人机完好无故障，此时根据自平衡函数记录设备的剩余寿命，即无人机处于“已平衡”状态，在飞行时仅正常考虑原始、次要内驱力并在执行完任务后不需要进行过多的健康管理；若自平衡函数判断无人机处于“未平衡”状态，则需要根据无人机机载传感器信息判断未平衡的装备并进行故障预测，并在飞机完成任务后进行健康管理；若无人机处于无平衡状态，此时无人机不能继续进行使用，如发动机故障等致命故障，此时优先考虑次要内驱力，即保证任务完成而忽略原始内驱力（如无人机在执行任务中遇到致命故障，此时基于自平衡函数的容错控制与故障诊断对故障预测判断无人机无法安全返航，则将无人机作为自杀式武器进行使用，这是根据无人机的“机上无人”特性对容错控制与故障诊断的合理应用，即无法保证无人机安全进行健康管理的情况下，优先执行任务）。

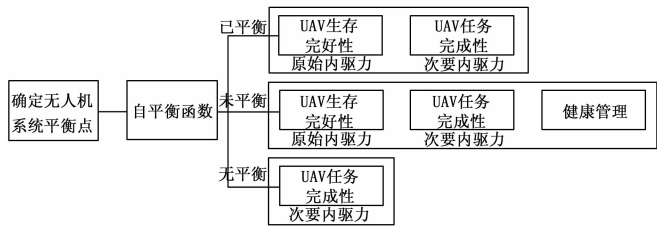


图 2 无人机自平衡理论模型

2 基于自平衡理论的无人机容错控制与故障诊断模型原理

2.1 无人机容错控制与故障诊断系统体系结构

如图 3 所示，无人机容错控制与故障诊断系统主要是由机载容错控制与故障诊断系统和地面容错控制与故障诊断系统两部分组成。机载容错控制与故障诊断系统主要由动力系统（飞机发动机以及保证飞机发动机正常工作所必需的系统附件）、航电系统（如通信系统、导航系统、雷达系统等）、机载武器系统（如导弹系统、航炮控制系统等）、无人机系统状态在线评估系统以及机载状态提示与预警系统等；地面容错控制与故障诊断系统部署在地面控制站，主要由四部分组成：维修决策与规划系统、故障检测与隔离系统、维修管理系统以及状态评估与预测子系统。地面与机载信息交互通过数据存储与流转系统进行数据信息的实时交互，机载信息通过该系统传输到地面进行记录、计算，机载控制指令通过上行线路传出到无人机控制无人机飞行。

2.2 无人机自平衡函数

文献 [19] 提出装备的剩余寿命是一种装备故障（或可能出现故障）随时间发展变化的过程。将无人机系统的装备退化过程用一个状态空间模型进行描述，可以得到状

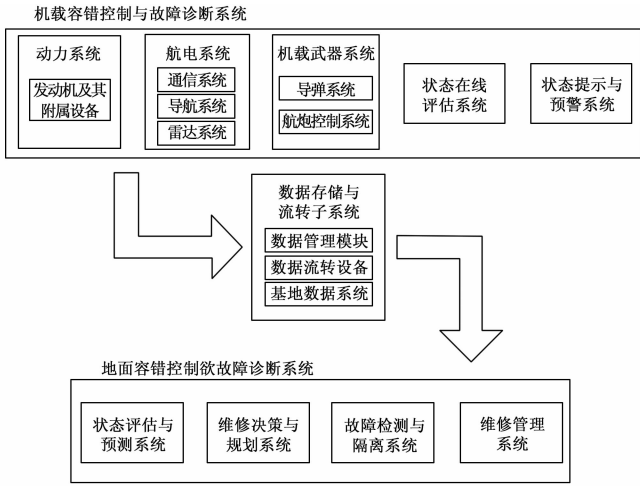


图 3 无人机容错控制与故障诊断系统体系结构

态空间与装备剩余寿命之间的关系, 继而可以进行故障预测并在该基础上对装备故障进行隔离、修复等健康管理操作。假设机载传感器可以实时监测无人机的系统状态, 在监测时刻 k 检测到当前装备故障状态空间为 X , 则根据装备的剩余寿命推算公式可推算出 $k + p$ 时刻的故障概率为:

$$p(X_{k+p}) = \int_{X_{k+p} \in \varphi} p(X_{k+p} | z_{1,k}) dX_{k+p} = \sum_{i=1}^s \omega_i^k, S = \text{number}\{X_{k+p}^i \in \varphi\} \quad (1)$$

则可得无人机装备到 $k + p$ 时刻剩余寿命的期望为:

$$\bar{X}_{k+p} = E(X_{k+p}) = \int_{X_{k+p} \in \varphi} (X_{k+p} | z_{1,k}) dX_{k+p} = \sum_{i=1}^N \omega_k^i X_{k+p}^i \quad (2)$$

最终可构建单个设备的剩余寿命 PDF 如图 4 所示, 其中监测时间为当前进行故障预测的时间, 剩余寿命为当前监测时间进行故障预测后所预测的设备剩余可工作时间。

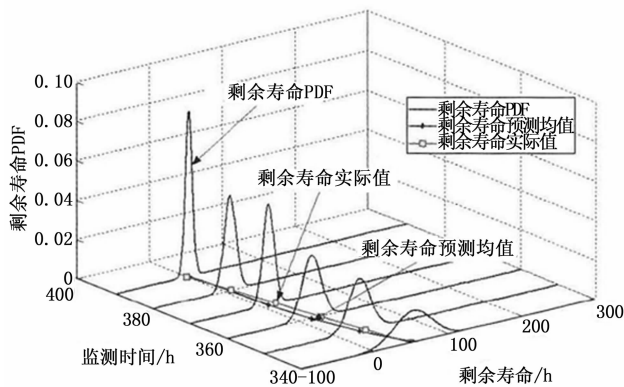


图 4 无人机自平衡函数

无人机设备的自平衡函数 s_k 函数为加权之后的平衡函数:

$$s_k = \omega_1 \cdot \frac{PDF}{CF} + \omega_2 \cdot \alpha \quad (3)$$

其中: PDF 为剩余寿命, CF 为无人机全寿命周期, α 为区间置信度, ω_1 和 ω_2 分别为对应的权值系数。

则可构建无人机的总体自平衡函数 S_k 为在当前监测时间下, 所有设备信息的综合函数:

$$S_k = \sum_i \lambda_i \left(\omega_1 \cdot \frac{PDF}{CF} + \omega_2 \cdot \alpha \right) \quad (4)$$

其中: λ_i 为单个设备对无人机的影响因子。当 S_k 值大于设定阈值, 认为无人机可靠, 否则认为无人机需要进行健康管理, 甚至在执行任务中被当作自杀式武器进行投放。

3 基于自平衡理论的无人机容错控制与故障诊断模型工作流程

如图 5 所示的无人机的容错控制与故障诊断系统之间相互协调, 将所监测到的数据传输到数据存储与流转子系统, 共同监测无人机的工作状态。在无人机日常飞行时, 通过加载在飞机上的机载传感器感知无人机的实时状态, 将状态数据通过总线传递给数据处理模块, 进行大数据的特征提取与分类, 以便后续的数据处理。在分类后可以得到设备的装备信息, 是完好、部分损坏或全部损毁。所有处理过后的数据经过数据存储于流转, 传递到状态评估与预测模块, 通过对数据的融合, 判断无人机当前状态信息, 得出设备故障原因及状态, 并通过自平衡函数规划判断无人机能否安全返航或进行自杀式袭击。最后以指令的形式发送给无人机命令, 并根据机载记录设备进行效果评估。

而在无人机在执行任务时, 机载监控设备实时监控无人机的各个设备状态, 无人机通过机载信息中心将状态数据进行融合处理, 并通过数据分析, 判断无人机当前是否处于正常工作状态 (或者异常状态), 在装备正常工作时, 无人机执行任务; 装备轻微故障, 无人机通过数据链向地面站发送故障信息, 并接受地面指令, 待返航后进行无人机的健康管理; 当无人机受到致命故障 (如发动机、油箱), 无法完成返航, 需要第一时间向地面站发送异常信息, 并以自身为代价继续执行任务。

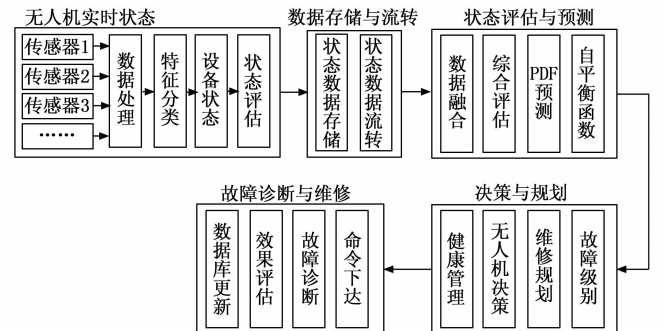


图 5 基于自平衡理论的无人机容错控制与故障诊断模型工作流程

4 仿真结果与分析

假设无人机的任务为从起点开始到任务点进行低空穿越打击, 途中需要经过地方防空火力区环境如图 6 所示, 其中三角代表火力地面放空火力所在点, 圆圈代表地面火力打击范围, 无人机经过防空火力区时, 故障概率分别如

图中标注所示,分别为 0.3, 0.6, 0.2 和 0.2。

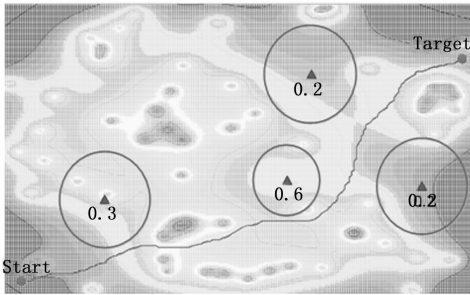


图 6 无人机的打击路线及环境图

则可以得到无人机安全完成任务并返航的航迹以及受到致命打击无法返航的航迹如图 7、图 8 所示。

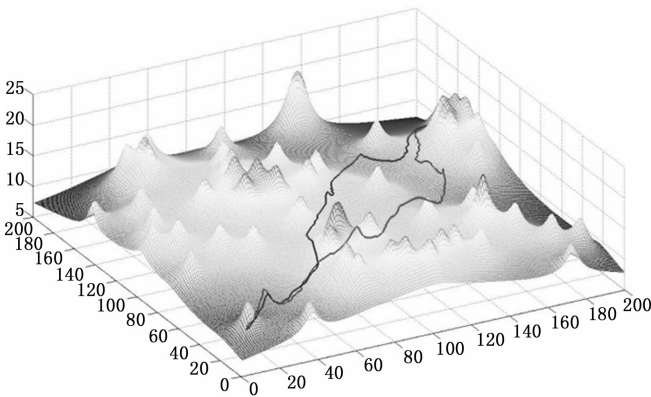


图 7 无人机安全完成任务返航路线图

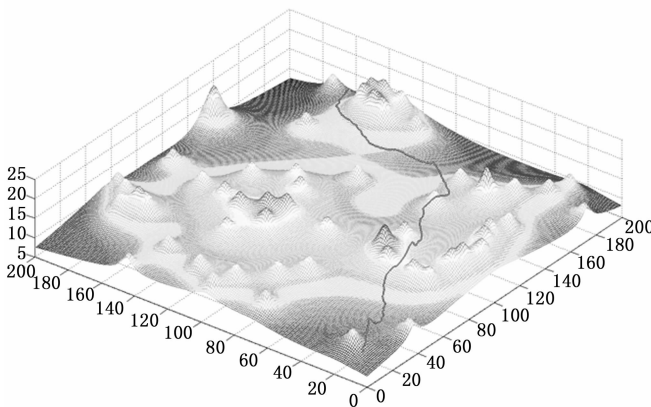


图 8 无人机受到致命打击无法返航路线图

由图 7 可以看出,浅色为无人机前去进行目标打击的航线,而深色为无人机打击任务完成后,安全返航的航线。可以看出,无人机能够从低空进行威胁规避,到达目标点,安全完成任务,最终返航。

而图 8 仅有无人机规避障碍前去进行打击的红色航线,这是由于在打击目标处,无人机收到了致命打击,故障检测处理系统提取到无人机的系统信息,并通过自平衡函数诊断出无人机没有安全返航的能力,即把无人机作为自杀式武器,从而对敌方造成更为有效的打击。

在图 7 和图 8 所示的两条路线中,随机抽取数据点标注无人机的装备状态信息如表 1 所示,可以看出,基于自平衡理论的无人机容错控制与故障诊断模型可以实时监控无人机的故障信息并给出故障预测概率,并以此为基础,判断无人机是否可以完整返航、故障返航或者不进行返航。拓展了容错控制与故障诊断理论的应用意义。

表 1 无人机状态信息

路线	设备名称	故障率	自平衡函数	可归平衡
安全返航 路线	动力系统	0.14	0.4	是
	航电系统	0.15	0.3	是
	机载武器系统	0.22	0.3	是
	预警系统	0.08	0.1	是
	数据系统	0.02	0.3	是
	决策系统	0.04	0.2	是
无法返航 路线	动力系统	0.64	0.7	否
	航电系统	0.43	0.5	是
	机载武器系统	0.34	0.4	是
	预警系统	0.04	0.1	是
	数据系统	0.1	0.3	是
	决策系统	0.08	0.2	是

5 结束语

设计了基于自平衡理论的无人机容错控制与故障诊断系统模型,充分应用 Hullian 的自平衡理论,根据原始内区力与次要内区力分别构建无人机函数,以无人机平衡点为中心,构建各个设备的自平衡函数并在此基础上综合,设计无人机总体自平衡函数,判断无人机是否应该进行健康管理,亦或在执行任务途中作为自杀式武器。

研究深入拓展了容错控制与故障诊断的理论研究与应用背景,提出了容错控制与故障诊断系统应用的新思路。后续研究将关注于无人机各个设备的信息融合及特征提取,并将该理论与仿真在实物上进行逐步实践。

参考文献:

- [1] 孙 博. 飞航导弹健康管理系统控制层算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [2] 艾剑良, 王 鹏, 高 明. 飞行控制系统的重构技术研究 [J]. 火力指挥与控制, 2006, 31 (1): 1-3.
- [3] Shweihard K A, Richards W L, Theisen J, et al. Flight demonstration of X-33 vehicle health management system components on the F/A-18 system research aircraft [R]. NASA/TM Technique Report. 2001: 1211.
- [4] Richard B, McSharry M. K-1 integrated vehicle health management system design for operational efficiency [A]. IEEE Aerospace Conference [C]. Manhattan, 2000: 323-327.
- [5] Roemer M J, Kacprzynski G J. Advanced diagnostics and prognostics for gas turbine engine risk assessment [A]. IEEE Aerospace Conference [C]. Manhattan, 2000: 345-353.
- [6] Nickerson B, Lally R. Development of a smart wireless net-

workable sensor for aircraft engine health management [A]. IEEE Aerospace Conference [C]. Piscataway, 2001: 3255 - 3262.

[7] 曾声奎, Pecht M G, 吴 际. 故障预测与健康管 理 (容错控制与故障诊断) 技术的现状与发展 [J]. 航空学报, 2005, 5: 626 - 632.

[8] 朱 斌, 陈 龙, 强 弢, 等. 美军 F-35 战斗机容错控制与故障诊断体系结构分析 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (1): 1 - 3.

[9] Buderath D M, Adhikari P P. Simulation Framework and Certification Guidance for Condition Monitoring and Prognostic Health Management [A]. European Conference of Prognostics and Health Management Society [C]. 2012.

[10] Leao B P, Yoneyama T, Rocha G C, et al. Prognostics performance metrics and their relation to requirements, design, verification and cost - benefit [A]. 2008 International Conference on 容错控制与故障诊断 [C].

[11] 周晓军. 生产系统智能维护决策及优化技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2006.

[12] Esperonmiguez M, Johnb P, Jennionsa I. A review of integrated vehicle health management tools for legacy platforms: challenges and opportunities [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2013, 56: 19 - 34.

[13] Melita L, Gumrah F. Studies on transport of vanadium and nickel from wastewater using activated composite

membranes [J]. Waste and Biomass Valorization, 2010, 1 (4): 461 - 465.

[14] LEE Kalmar C L, Xue B. Contribution of proline to the prestructuring tendency of transient hlical secondary structure elements in intrinsically disordered proteins [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) /General Subjects, 2014, 1804 (1): 993 - 1003.

[15] Liu Guangjun, Yang Shuming, Qiu Jing, et al. A novel testability model for health management of heading attitude system [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26 (1): 201 - 208.

[16] Fan Z, Liu G, Si X, et al. Degradation data - derived approach for remaining useful life estimation [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 24 (1): 173 - 182.

[17] Qiu J, Tan X, Liu G, et al. Test selection and optimization for 容错控制与故障诊断 based on failure evolution mechanism model [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 24 (5): 780 - 792.

[18] Hull C L. The problem of intervening variables in molar behavior theory [J]. Psychological Review, 1943, 50 (3): 273 - 291.

[19] 吕文元, 杨远涛, 方淑芬. 利用滤波理论建立装备预测维修的优化模型 [J]. 东北电力学报, 2000, 20 (1): 20 - 22.

(上接第 11 页)
是传统系统监测耗时的一半, 说明改进系统的监测耗时更少, 监测效率更高。

表 1 两种不同系统监测耗时的对比结果

实验次数	参数 <i>d</i>	
	传统系统监测耗时/s	改进系统监测耗时/s
1	1	1
2	2	1
3	2	2
4	3	1
5	3	1

综合以上实验结果可得, 改进设计的航天飞行安全体系通讯导航频率干扰监测系统监测效率高, 监测精度高, 且监测耗时少。

5 结论

对航天飞行安全体系通讯导航中的频率干扰进行监测, 是保障航天飞行安全的重要措施, 传统方法存在监测精准度低和监测效率低的问题, 因此提出航天飞行安全体系通讯导航频率干扰监测系统设计。通过改进数字接收机和监测信道, 依据不同类型干扰优化监测功能, 完成频率干扰监测系统设计。实验证明, 改进系统具有监测精度高, 效率高, 耗时少的特点。但在运行稳定性方面尚未进行测试,

未来将针对稳定性进行深入研究, 是系统设计充分满足频率干扰监测技术需求, 为航天飞行的安全保驾护航。

参考文献:

[1] 成克伟, 王五兔, CHENGKe - wei, 等. 星地一体化通信系统 ATN 终端卫星上行同频干扰 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (10): 142 - 143.

[2] 吕 波, 梁四洋, 高 强. 旁瓣对消抗炮瞄雷达同频干扰研究 [J]. 计算机仿真, 2015, 32 (6): 9 - 12.

[3] 苗凤娟, 高玉峰, 陶佰睿, 等. 基于物联网与太阳能光伏的智能温室监控系统设计 [J]. 科技通报, 2016, 32 (9): 89 - 92.

[4] 周 华, 李保华, 黄继海. 无线网络拓扑瞬态时变干扰下的信号分解模型仿真 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (18): 204 - 208.

[5] 王素青, 吴 超. 基于 CC2530 的环境监测系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (8): 2650 - 2653.

[6] 张加易. 监控分站频率信号采集电路抗干扰设计 [J]. 工矿自动化, 2015, 41 (4): 99 - 101.

[7] 李金山, 邵玉斌, 龙 华. 基于网格化频谱监测结果的无线干扰源定位研究 [J]. 计算机科学, 2017, 44 (s1): 274 - 275.

[8] 刘星桥, 陈海磊, 朱成云. 基于 GPS 的自学习导航游弋式水质监测系统设计 [J]. 农业工程学报, 2016, 32 (1): 84 - 90.