

气象卫星遥感数据接收异常诊断系统设计

杨 昆, 付 浩, 王雪迪, 吴 琼, 吴 瑾

(临沂市气象局, 山东 临沂 276700)

摘要: 在传输气象卫星遥感数据的过程中, 为了解决由于干扰或衰减引起的信号质量下降对气象卫星遥感数据接收故障诊断精确定性的影响, 研究设计一种基于规则匹配的气象卫星遥感数据接收故障诊断系统; 该系统硬件单元分别为卫星数据接收故障诊断框架搭建单元、卫星数据接收状态监控单元、卫星数据接收故障推理机设计单元与卫星数据接收故障诊断报告生成器设计单元; 系统软件部分首先对卫星数据接收状态信号预处理, 提取接收状态信号与接收故障信号的特征, 设计卫星数据接收故障诊断规则库, 基于规则匹配实现卫星数据接收故障诊断; 系统的主要参数包括信号预处理算法、特征提取方法、故障诊断规则库的构建以及推理机的逻辑设计; 实验数据显示, 应用设计系统获得的卫星数据接收状态信号特征提取结果与实际接收状态信号特征相同, 卫星数据接收故障诊断结果与实际接收故障诊断结果相同, 证实了设计系统的有效性。

关键词: 气象卫星; 故障诊断; 地面接收站; 规则匹配; 遥感数据; 接收设备

Design of Abnormal Diagnosis System for Meteorological Satellite Remote Sensing Data Reception

YANG Kun, FU Hao, WANG Xuedi, WU Qiong, WU Jin

(Linyi Meteorological Bureau, Linyi 276700, China)

Abstract: In the process of transmitting meteorological satellite remote sensing data, in order to solve the impact of signal quality degradation caused by interference or attenuation on the accuracy of meteorological satellite remote sensing data reception fault diagnosis, a rule matching based meteorological satellite remote sensing data reception fault diagnosis system is studied and designed. The hardware units of the system are respectively composed of the fault diagnosis framework, status monitoring unit, fault inference machine design unit, and fault diagnosis report generator design unit for the satellite data receiving. The system software first preprocesses the satellite data reception status signal, extracts the characteristics of the received status signal and the received fault signal, designs the satellite data reception fault diagnosis rule library, and achieves the satellite data reception fault diagnosis based on rule matching. The system software mainly includes the signal preprocessing algorithm, feature extraction method, construction of fault diagnosis rule library, and logical design of inference machine. Experimental results show that, the extraction feature of satellite reception state signals obtained by the application design system is the same as that of the actual reception state signals, and the fault diagnosis results of the satellite reception are the same as those of the actual reception, confirming the effectiveness of the design system.

Keywords: meteorological satellites; fault diagnosis; ground receiving station; rule matching; remote sensing data; receiving equipment

0 引言

由于气象卫星系统的复杂性以及运行环境的不确定性, 遥感数据接收过程中难免会出现各种故障, 因此, 对气象卫星遥感数据接收故障进行精准地诊断显得尤为重要。根据调查研究内容可知, 引起气象卫星遥感数据接收故障的原因众多, 主要分为 3 个方向, 一是接收硬件设备故障。卫星接收系统涉及大量精密设备, 例如天线、接收器、信号处理器等, 这些设备在长期运行过程中, 可能会因为老化、磨损等因素导致性能下降或者出现故障, 从而影响数

据接收的稳定性与准确性; 二是接收软件系统问题。接收系统的软件负责控制硬件运行、处理接收数据等任务, 如果存在设计缺陷或运行错误, 可能会导致数据接收中断或数据异常; 三是外部环境干扰因素。气象卫星接收系统需要接收来自卫星的信号, 而天空中的云层、电离层等自然因素可能会干扰信号传输, 导致数据接收质量下降或出现误码。为了解决这些问题, 设计一种有效的气象卫星遥感数据接收故障诊断系统具有重要的现实意义。

文献 [1] 提出基于增强分层有向图模型的卫星地面站

收稿日期: 2024-04-17; 修回日期: 2024-06-07。

基金项目: 国家自然科学基金(51105213)。

作者简介: 杨 昆(1983-)男, 研究生, 高级工程师。

通讯作者: 吴 瑾(1990-), 女, 硕士研究生, 高级工程师。

引用格式: 杨 昆, 付 浩, 王雪迪, 等. 气象卫星遥感数据接收异常诊断系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(11): 9-17.

故障诊断方法。该方法考虑故障征兆多样性和设备数量，通过合并同类故障传播、引入节点有效性，结合正向推理和反向回溯，缩小故障搜索范围，并计算故障概率，实现精准诊断。该方法依赖于历史数据的准确性和完整性，导致诊断结果不精准。文献 [2] 提出基于卫星数据接收任务时频谱数据的故障诊断系统研究。利用传感器实时采集多路频谱数据，通过频谱数据处理、分析与显示来完成接收故障的诊断，为卫星地面站的有效监控提供一定的帮助。该方法的适应性不强，可能导致误报或漏报，影响诊断结果的可靠性。文献 [3] 研究了卫星地面接收非线性故障，通过构建滤波器、功率放大器和振荡器的行为模型，整合形成全面的接收故障模型，实现了准确的故障诊断。该方法未考虑气象卫星遥感数据受到干扰及衰减的情况，致使故障诊断性能不如人意。文献 [4] 采用 RBF 神经网络和 EEMD 模态分析，通过挖掘历史温度数据建立异常诊断数据库和温度预测模型，实现电器和机械设备温度异常诊断。该方法计算复杂度高，导致整个诊断系统的计算负担较重，影响诊断准确度。

因此，设计一种基于规则匹配的气象卫星遥感数据接收故障诊断系统，该系统整合了硬件单元（包括框架搭建、状态监控、故障推理机和报告生成器）和软件部分（负责信号预处理、特征提取和规则库设计），通过规则匹配实现故障诊断。实验结果验证了系统在特征提取和故障诊断上与实际情况的一致性，证明了系统的有效性。

1 气象卫星遥感数据接收故障诊断系统硬件设计

1.1 卫星数据接收故障诊断框架搭建单元

为了改善现有气象卫星遥感数据接收故障诊断系统存在的多种问题，结合气象卫星遥感数据接收的实际情况，搭建气象卫星遥感数据接收故障诊断框架，为后续研究进行奠定坚实的基础。

借鉴已有研究成果，搭建气象卫星遥感数据接收故障诊断框架，具体如图 1 所示。

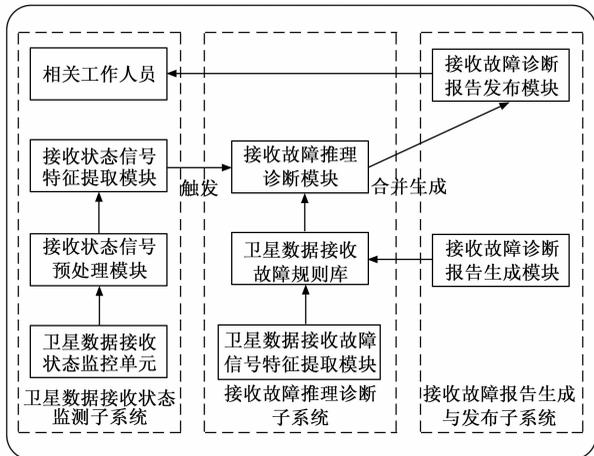


图 1 气象卫星遥感数据接收故障诊断框架示意图

如图 1 所示，搭建框架将设计系统划分为 3 个模块，分别为气象卫星遥感数据接收状态监测模块、气象卫星遥感数据接收故障推理诊断模块与气象卫星遥感数据接收故障报告生成与发布模块，此种结构更简洁，方便用户对于设计系统的理解与应用^[5]。除此之外，搭建框架有效融合了卫星数据接收状态监测技术与接收故障推理诊断技术，通过可视化形式将气象卫星遥感数据接收故障诊断报告展示给相关工作人员，以此来提升卫星数据接收故障的诊断精确性、可靠性与实时性，为气象卫星遥感数据的稳定、完整接受提供保障。

1.2 卫星数据接收状态监控模块

在构建气象卫星遥感数据接收体系时，设计了一个卫星数据接收状态监控模块，以实现对整个接收流程的全面把控和精准诊断^[6]。这一模块的设计，旨在确保卫星数据接收的及时性、准确性和稳定性，为气象服务的提供奠定坚实的技术基础。气象卫星遥感数据接收体系构成框图如图 2 所示。

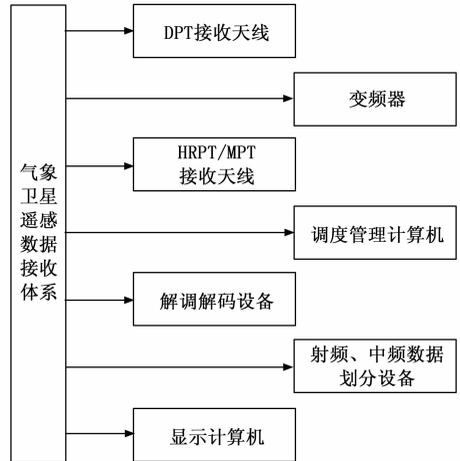


图 2 气象卫星遥感数据接收体系构成框图

气象卫星遥感数据接收体系包括 Q2DPT-02 DPT 接收天线、STX003S 变频器、SSMPT-02 HRPT/MPT 接收天线、IBM Power System S914 调度管理计算机、UHF/VHF 模块 Icom IC-R20 解调解码设备，以及 HP Z8 G4 Workstation 显示计算机等设备。这些设备相互配合，实现了对 NOAA 气象卫星传输的遥感数据的捕获、解码和存储。

根据卫星数据接收体系的硬件构成和功能需求，设计了相应的监控接口^[7]。通过这些接口，实时获取设备的运行状态信息，为后续的数据分析和故障诊断提供丰富的数据源。具体如表 1 所示。

在监控模块的核心部分，设计了一种基于 MAX1168 芯片的卫星数据接收状态信号采集设备。该设备采用了先进的信号处理技术，具有高灵敏度、高稳定性和高兼容性等特点。针对卫星数据接收状态信号的特性，对 MAX1168 芯片的技术参数进行了精心的设计和调整^[8-9]，

以确保其能够准确捕捉并处理接收状态信号的变化, 具体如下表 2 所示。

表 1 卫星数据接收状态监控接口配置表

监控对象	监控接口	接口数量/个
DPT 接收天线	RS422	1
变频器	RS422	2
HRPT/MPT 接收天线	网络接口	4
调度管理计算机	RS422	2
解调解码设备	RS422	1
射频/中频数据划分设备	网络接口	3
显示计算机	RS422	5
通用解调机箱	网络接口	6
网络协议转换器	网络接口	7
时码器	RS422	2
ACU 上位机	网络接口	1
数字记录器	RS422	3
UPS	RS422	2
模拟仿真器	网络接口	1

表 2 卫星数据接收状态信号采集设备-MAX1168 芯片
技术参数设置表

技术参数名称	技术参数数值	技术参数单位
采样频率	10	kHz
分辨率	16	位
滤波参数	10	Hz
触发方式	电平触发方式	—
通信接口	RS422/RS485	—
额定电压	220	V
采集间隔	1	ms
数据存储	≥5	d
采集链路预算	164	dBm
安装方式	壁挂式	—
工作温度	-60~+85	°C
工作湿度	5~90	%RH

依据表 2 所示内容与数值对卫星数据接收状态信号采集设备 (MAX1168 芯片) 进行配置与测试, 以此来提高 MAX1168 芯片的稳定性和可靠性。与此同时, 还需要定期对卫星数据接收状态信号采集设备进行维护和保养, 确保采集设备的长期稳定运行。

联合气象卫星遥感数据接收状态信号采集需求与采集设备 (MAX1168 芯片) 的特性, 制定科学的卫星数据接收状态信号采集程序, 该程序结合了气象卫星遥感数据接收的特点和需求, 通过合理的算法和逻辑, 实现了对接收状态信号的快速采集、高效处理和准确输出。这一程序的设计, 不仅提高了信号采集的效率和准确性, 还为后续的故障诊断提供了有力的数据支持。具体如图 3 所示。

上述过程完成了卫星数据接收状态信号采集设备的选择与配置, 实现了卫星数据接收状态信号的采集与监控,

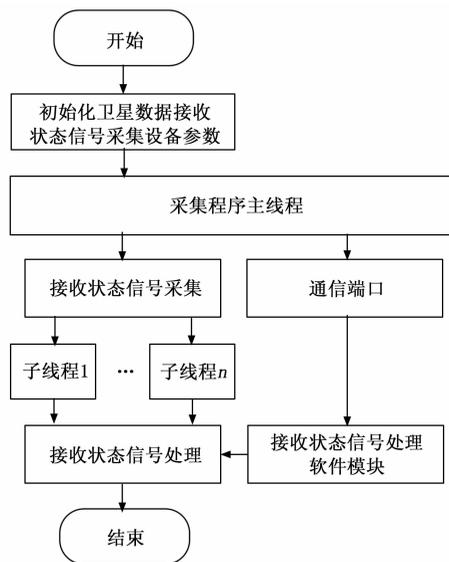


图 3 卫星数据接收状态信号采集程序图

为卫星数据接收故障诊断目标的实现提供依据。

1.3 卫星数据接收故障推理机设计模块

作为设计系统的核心组成部分, 卫星数据接收故障推理机是确保卫星数据接收故障诊断精准性与可靠性的关键设备。本模块的设计基于故障诊断专家系统原理, 通过深度整合知识库中的丰富信息和自动推理、规则匹配策略, 实现对接收故障的精确诊断。

在设计过程中, 充分考虑了卫星数据接收体系的复杂性和多样性, 以及工作人员对体系掌握程度的差异。因此, 采用了融合自动推理策略和规则匹配策略的故障判别方法。自动推理策略通过构建故障树, 从父节点出发, 遍历整个故障树, 利用节点间的故障特征关系进行检索, 从而精确定位故障源^[10]。而规则匹配策略则基于数理统计和关键规则进行综合判识, 通过筛选可信度因子最高的诊断结果, 提高故障诊断的效率和精度^[11]。

为确保推理机的稳定运行和最佳性能, 对推理机的内部电路进行了精心设计。深入研究了电路布局、元件选择和信号传输等方面的技术细节, 以确保电路的稳定性和可靠性。同时, 还对电路进行了优化调整, 以提高推理机的处理速度和响应能力。推理机内部电路设计具体如图 4 所示。

按照图 4 所示电路设计结果对推理机内部电路进行调整与配置, 保障设计卫星数据接收故障推理机的稳定运行, 发挥其最大的功效。

1.4 卫星数据接收故障诊断报告生成器设计模块

卫星数据接收故障诊断报告生成器是连接推理机与人机交互设备的关键硬件之一, 也是接收故障诊断结果生成与输出的主要装置, 故对其进行详细的设计^[12]。

在硬件架构设计方面, 选用了高性能的 CPU——i7-10900K 作为中央处理器, 其强大的多核心、多线程处理能力确保了在处理复杂故障数据时的速度与稳定性, 基本结

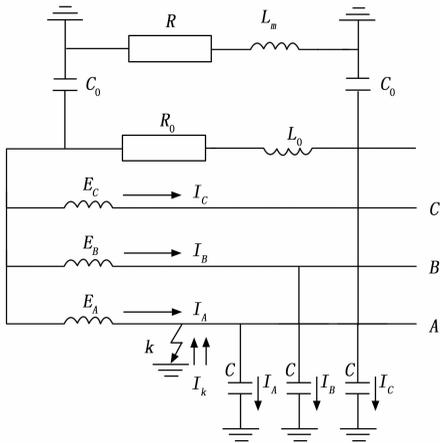


图 4 推理机内部电路设计图

构如图 5 所示。

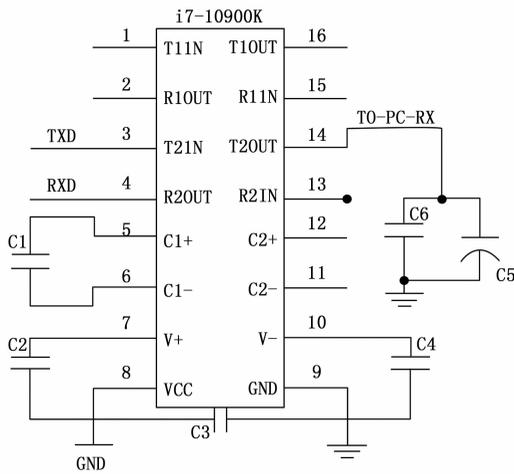


图 5 故障诊断报告生成器中央处理器结构示意图

为了存储大量故障诊断报告数据和应用程序，采用了高速、大容量的固态硬盘（SSD）与机械硬盘（HDD）的组合方案，既保证了数据读取的速度，又满足了长期存储的需求。而输入输出接口用于连接外部设备，承担着数据交换的任务。故障诊断报告生成器设计了多种接口，包括 USB、HDMI、VGA 等，方便与其他设计系统硬件设备的连接。

综上所述，卫星数据接收故障诊断报告生成器作为连接推理机与人机交互设备的关键硬件，采用了高性能的中央处理器、大容量的存储设备和灵活的输入输出接口，以实现快速、准确地将故障诊断结果转换为报告并进行生成和输出的功能。

2 气象卫星遥感数据接收故障诊断系统软件设计

气象卫星遥感数据接收故障诊断系统总体的软件设计方案如下所示。

1) 总体设计目标：

本软件设计旨在通过规则匹配的方法，实现对气象卫

星遥感数据接收过程中可能出现的故障进行高效、准确的诊断。系统通过硬件单元收集的数据，结合软件中的预处理、特征提取、规则匹配等模块，实现对卫星数据接收状态的实时监控和故障诊断。

2) 软件总体设计架构：

气象卫星遥感数据接收故障诊断系统的软件设计包括数据预处理、特征提取、规则库构建、故障诊断以及报告生成等关键模块。软件采用先进的信号处理技术和高效的规则匹配算法，通过实时收集和处理卫星数据接收状态信号，提取关键特征，并与预先构建的故障诊断规则库进行匹配，从而实现对卫星数据接收过程中可能出现的故障进行准确诊断和报告，为气象卫星遥感数据的稳定接收提供有力支持。

2.1 卫星数据接收状态信号预处理

在气象卫星遥感数据接收系统中，硬件与软件的协同工作是实现故障诊断的关键。卫星数据接收状态信号的预处理作为软件设计的首个环节，不仅与硬件采集设备紧密相连，还直接关系到后续故障诊断的准确性。

基于 1.2 节设计的 MAX1168 硬件采集设备，成功获取了卫星数据接收状态信号。然而，由于传输介质、设备噪声等多种因素的影响，使得采集信号往往会存在一定的误差和干扰。因此，在对其进行解析之前，需要对接收状态信号进行一定的预处理，以保证后续研究的准确性和可靠性。在实际应用中，卫星数据接收状态信号预处理对于提高信号质量具有显著效果。通过预处理，可以大大降低信号中的噪声和干扰，提高信号的清晰度和准确度，为后续的信号解析和分析提供有力保障^[13]。同时，预处理也有助于提高卫星数据接收故障诊断结果的稳定性和可靠性，减少因信号质量问题而导致的误判和漏判。

均值滤波算法是信号预处理中常用的一种方法，其基本原理是对信号中的每个值进行平滑处理，消除剧烈的跳变或噪声。具体来说，均值滤波器会对信号中的每个值进行加权平均，其中权重的分布根据滤波器的设计而定。在卫星数据接收状态信号的预处理中，均值滤波器可以有效地去除随机噪声和脉冲干扰，提高信号的信噪比。设置原始卫星数据接收状态信号为 $X = \{x_i, i \in [1, n]\}$ ，其中， n 表示的是接收状态信号的总数量，其可以划分为两部分，分别为接收状态信号部分与干扰信息部分，表示为：

$$x_i = h_i + \eta_i \quad (1)$$

式中， h_i 表示的是接收状态信号部分； η_i 表示的是干扰信息部分。

基于均值滤波算法的卫星数据接收状态信号处理过程如下式所示：

$$h_i = \frac{\zeta[x_i]}{K * \alpha_0} \pm \epsilon_i \quad (2)$$

式中， $\zeta[\cdot]$ 表示的是均值滤波函数； K 表示的是干扰信息处理辅助参数，取值范围为 $[0, 1]$ ； α_0 表示的是接收状态信号

标准化因子; ϵ_i 表示的是误差调整项, 决定着均值滤波算法应用效果的优劣。

上述过程完成了卫星数据接收状态信号的预处理, 即干扰信息去除, 获得高质量的卫星数据接收状态信号, 为后续接收状态信号特征提取提供依据。

2.2 接收状态信号与接收故障信号特征提取

在卫星数据接收故障诊断过程中, 经过预处理后的卫星数据接收状态信号, 其质量和清晰度得到了显著提升。然而, 仅仅拥有高质量的信号并不足以支撑后续的故障诊断工作, 还需要从这些信号中提取出有效的特征, 以作为故障诊断的依据。传统的信号特征提取方法在面对非平稳和突变信号时往往表现不佳, 难以准确捕捉信号中的关键信息^[14]。为此, 引入了小波包变换算法, 针对信号特征提取的关键技术难点展开研究, 以实现接收状态信号与接收故障信号的精细分析。

关键技术突破点:

1) 小波包变换算法的应用: 传统的信号特征提取方法存在非平稳信号识别困难的问题, 而小波包变换算法具备出色的时频分辨率, 能够同时捕捉信号在低频和低频部分的特征, 因此被引入用于解决该难点问题。

2) 针对非平稳和突变信号的特征提取方法研究: 通过对小波包变换算法在信号特征提取中的应用进行深入研究, 本研究提出了针对非平稳和突变信号的特征提取方法, 从而克服传统方法在此类信号上表现不佳的问题。

以上关键技术突破点的应用, 解决了传统信号特征提取方法在处理非平稳和突变信号时的不足, 为接收状态信号与接收故障信号的特征提取提供了重要的技术支持。

以预处理好的卫星数据接收状态信号 y_i 与已知接收故障信号 z_i 为基础, 利用小波包变换算法来提取接收状态信号与接收故障信号的特征, 为后续故障诊断规则库的设计提供依据, 也为最终接收故障诊断的实现提供支撑。基于小波包变换算法的接收状态信号与接收故障信号特征提取原理如下: 首先, 对接收状态信号与接收故障信号进行小波包分解; 然后, 对分解后的信号进行重构, 并提取重构信号中各个频带内的能量; 最后, 对提取的能量信号进行归一化处理, 处理后的信号即可作为特征向量^[15]。通过上述方式, 可以更准确地识别和提取接收状态信号与接收故障信号的特征, 为故障诊断和修复提供有力的支持。

经过上述技术突破和研究, 基于小波包变换算法的接收状态信号与接收故障信号特征提取步骤如下。

步骤一: 接收状态信号与接收故障信号小波包分解, 通过设定不同的小波包分解级数, 将信号分解到不同的频带, 进而观察信号在不同频带内的能量分布情况。具体表达式为:

$$\begin{cases} y_i = a_1\psi_1 + a_2\psi_2 + \dots + a_j\psi_j + \dots + a_N\psi_N \\ z_i = b_1\varphi_1 + b_2\varphi_2 + \dots + b_j\varphi_j + \dots + b_N\varphi_N \end{cases} \quad (3)$$

式中, ψ_j 与 φ_j 表示的是接收状态信号 y_i 与接收故障信号 z_i

经过小波包分解后的各个频带信号; a_j 与 b_j 表示的是 ψ_j 与 φ_j 对应的小波系数; N 表示的是小波包分解的总级数。

步骤二: 利用小波包基函数对信号分解结果进行重构处理, 提取出各个频带内的能量信号, 表达式为:

$$\begin{cases} \hat{y}_i = \sum_{j=1}^N \gamma_j \times \Gamma[a_j\psi_j] \\ \hat{z}_i = \sum_{j=1}^N \lambda_j \times \Gamma[b_j\varphi_j] \end{cases} \quad (4)$$

式中, \hat{y}_i 与 \hat{z}_i 表示的是重构后的接收状态信号与接收故障信号; γ_j 与 λ_j 表示的是重构信号 \hat{y}_i 与 \hat{z}_i 中各个频带内的能量信号; $\Gamma[\cdot]$ 表示的是小波包基函数。

步骤三: 对步骤二重构信号中的能量信号 γ_j 与 λ_j 进行提取与归一化处理, 以消除不同信号之间的量纲差异。处理后的信号即可获得接收状态信号与接收故障信号的特征向量, 表达式为:

$$\begin{cases} \bar{y}_i = \sum_{j=1}^N \frac{\gamma_j}{\delta^o} \\ \bar{z}_i = \sum_{j=1}^N \frac{\lambda_j}{\chi^o} \end{cases} \quad (5)$$

式中, \bar{y}_i 与 \bar{z}_i 表示的是接收状态信号与接收故障信号的特征向量; δ^o 与 χ^o 表示的是能量信号 γ_j 与 λ_j 的归一化因子, 需要根据实际情况进行具体的取值。

综上所述, 接收状态信号与接收故障信号特征提取是卫星数据接收故障诊断过程中的重要环节。通过引入小波包变换算法, 实现了对信号的精准特征提取, 为后续故障诊断规则库的设计提供了有力支持。

2.3 基于规则匹配的卫星数据接收故障诊断规则库设计

在卫星数据接收故障诊断的过程中, 通过接收状态信号与提取接收故障信号的特征并不足以直接定位故障, 为此, 设计了基于规则匹配的卫星数据接收故障诊断规则库。这一设计以接收状态信号与接收故障信号的特征提取为基础, 将提取出的特征作为规则匹配的依据, 通过比对特征与预设规则, 实现故障的快速定位。

关键技术突破点如下。

1) 特征提取规则设计: 基于接收状态信号与接收故障信号的特征提取结果, 设计了一套规则库, 用于匹配特征与预设规则, 从而定位可能存在的故障源、故障原因、故障现象及其频次。

2) 故障诊断知识规则表结构设计: 设计了规则编号、故障源、故障原因和故障频次等结构, 以清晰、规范的形式展现了故障诊断规则库的内容和结构。

以上关键技术突破点的应用, 解决了仅凭特征提取无法直接定位故障的问题, 为建立完整的卫星数据接收故障诊断规则库提供了有力支持。

在规则库的设计过程中, 以上述提取的接收故障信号特征 \bar{z}_i 为基础, 区分气象卫星遥感数据接收故障源、故障原因、故障现象及其故障频次, 针对每一种故障类型, 设

计相应的故障诊断规则。为了更直观地展示规则库的结构和内容，制定了故障诊断知识规则表，具体如表 3 所示。

表 3 故障诊断知识规则表结构

规则编号	故障源	故障原因	故障频次 (次/月)
1	DPT 接收天线	天线破损	35
2	变频器	电力不足	41
3	HRPT/MPT 接收天线	天线短路	89
4	调度管理计算机	软件卡顿	55
5	解调解码设备	程序异常	12
6	射频/中频数据划分设备	标准模糊	10
7	显示计算机	硬件缺陷	23
...

依据表 3 所示结构，通过规范化、模型化的统筹管理方式，整理出结构清晰的知识单元（规则序列）。以每一个接收故障信号特征 \bar{z}_i 为节点，构建相应的气象卫星遥感数据接收故障树，匹配故障树节点与规则序列，不断调整故障树节点的位置，使得故障频次最高的节点作为父节点，同一故障源且故障频次低于最高值的节点作为 2 级子节点，依此类推，最终形成完整且结构清晰的故障树^[16]，具体如图 6 所示。

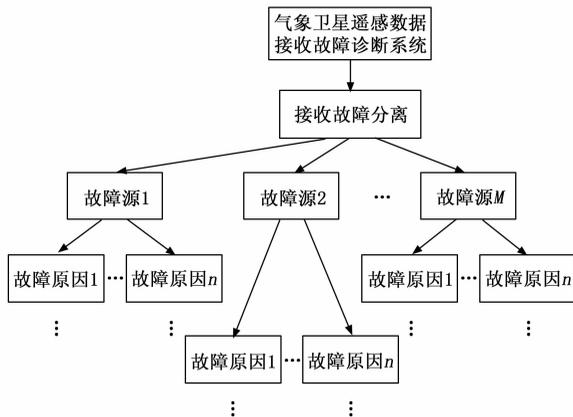


图 6 卫星数据接收故障树示意图

需要注意的是，每一个故障树节点 H_{ij} 均对应一个故障诊断规则（内含接收故障信号特征 \bar{z}_i ）。上述过程完成了卫星数据接收故障诊断规则库的设计与说明，为最终研究目标的实现提供帮助^[17]。

在整个过程中，关键技术突破点体现在规则设计、故障诊断知识规则表结构设计以及故障树构建 3 个方面，通过专门设计的规则库与故障树，成功实现了对接收状态信号与接收故障信号的快速、准确定位与诊断。

2.4 基于规则匹配的卫星数据接收故障诊断

在卫星数据接收过程中，故障诊断是一个至关重要的环节。为了确保数据的准确性和完整性，必须对接收系统中的故障进行快速、准确的诊断。为此，设计了一套基于规则匹配的卫星数据接收故障诊断系统。这一系统以先前

设计的卫星数据接收故障诊断规则库为基础，制定卫星数据接收故障诊断程序^[18]，通过实时信号与规则库的比对，实现故障的精准诊断。

关键技术突破点如下。

1) 相关系数计算：设计了计算接收状态信号特征与接收故障信号特征之间相关系数的方法，用于判断当前信号与哪种故障类型的特征最为接近，从而初步判断可能存在的故障。这一关键技术提高了对故障特征之间的匹配精度。

2) 针对阈值设定的规则匹配策略：结合规则匹配策略，制定了卫星数据接收故障诊断原则，通过设定合适的诊断阈值，更加准确地判断故障是否发生及故障类型。优化了匹配过程中的决策流程。

以上关键技术突破点的应用，解决了故障诊断过程中识别和匹配准确性的问题，提高了故障诊断的精准度，降低了误判和漏判的概率，增强了卫星数据接收的稳定性和可靠性。

基于规则匹配的卫星数据接收故障诊断程序图如图 7 所示。

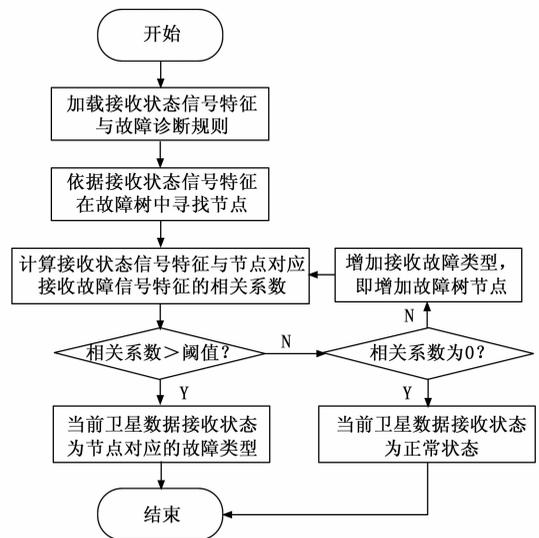


图 7 基于规则匹配的卫星数据接收故障诊断程序图

如图 7 所示，计算接收状态信号特征 \bar{y}_t 与接收故障信号特征 \bar{z}_i （故障树节点对应的诊断规则信息）的相关系数是实现规则匹配的关键环节，其确保了实时信号与规则库之间的精确匹配。其表达式为：

$$\kappa(\bar{y}_t, \bar{z}_i) = \frac{\text{cov}(\bar{y}_t, \bar{z}_i)}{\sqrt{D(\bar{y}_t)} \sqrt{D(\bar{z}_i)}} \quad (6)$$

式中， $\kappa(\bar{y}_t, \bar{z}_i)$ 表示的是当前接收状态信号特征 \bar{y}_t 与第 i 个故障树节点对应诊断规则信息 \bar{z}_i 的相关系数； $\text{cov}(\cdot)$ 与 $D(\cdot)$ 表示的是协方差数值与方差数值。

通过计算相关系数，能够确定当前信号与哪种故障类型的特征最为接近，从而初步判断可能存在的故障。其次，结合规则匹配策略制定了卫星数据接收故障诊断原则。通

过设定合适的诊断阈值, 能够更加准确地判断故障是否发生, 以及故障的具体类型。依据公式 (6) 计算结果 $\kappa(\bar{y}_i, \bar{z}_i)$, 结合规则匹配策略制定卫星数据接收故障诊断原则^[19], 具体如下式所示:

$$\begin{cases} \kappa(\bar{y}_i, \bar{z}_i) = 0 & \text{卫星数据接收正常} \\ \kappa(\bar{y}_i, \bar{z}_i) > \kappa^* & \text{卫星数据接收故障为节点 } i \text{ 故障类型} \\ \kappa(\bar{y}_i, \bar{z}_i) \leq \kappa^* & \text{添加新的接收故障类型(节点)} \end{cases} \quad (7)$$

式中, κ^* 表示的是卫星数据接收故障诊断阈值, 由规则匹配策略与接收故障实际情况决定。

综上所述, 该方法充分利用了规则库中的丰富信息, 通过相关系数计算和阈值设定, 实现了对故障的精准诊断和定位。这一方法不仅提高了故障诊断的准确性, 还降低了误判和漏判的可能性, 为卫星数据接收的稳定性和可靠性提供了有力保障。

3 实验与结果分析

设置大型卫星地面站故障诊断的增强分层有向图系统、卫星地面数据接收站频谱集中监视平台与卫星接收机非线性故障建模与诊断系统为对比系统 1、对比系统 2 与对比系统 3, 联合设计系统共同进行气象卫星遥感数据接收故障诊断对比实验, 以此来验证设计系统的应用效果。

3.1 实验准备阶段

此研究以风云四号气象卫星作为实验对象, 其基本情况如图 8 所示。

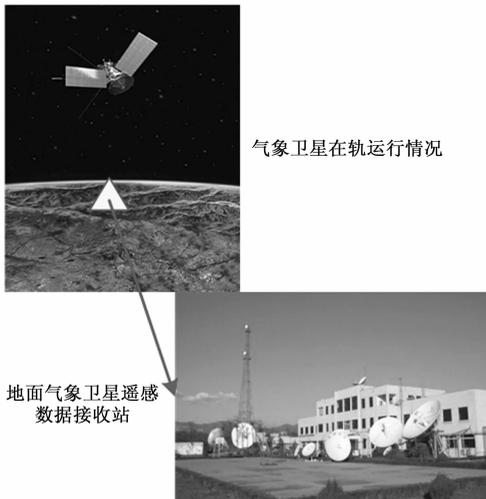


图 8 实验对象基本情况示意图

为了保障实验的顺利进行, 对气象卫星与遥感数据地面接收站工作参数进行科学地设置, 具体如下所示。

气象卫星工作参数设置如下:

- 1) 轨道高度: 755 km;
- 2) 径向距离: 2 686 km;
- 3) 工作频率: X 频段;
- 4) 调制方式: OQPSK;

5) 码速率: 2×450 Mbps;

6) 最大传输通道数量: 单频极化复用。

遥感数据地面接收站工作参数设置如下:

1) 工作频段: 7.9~9.0 GHz;

2) 解调方式: BPSK、QPSK 等;

3) 解调损失: < 2.0 dB;

4) G/T 值: ≥ 31 dB/K;

5) 接收通道数量: 支持双通道接收, 通道数量可扩展;

6) 接收码速率: 5~600 Mbps;

7) 极化复用: 支持。

上述过程介绍了实验对象的基础情况, 并对其工作参数进行了合理地设置, 为后续实验结果获取提供一定的便利。

3.2 实验结果分析

以上述实验准备阶段内容为基础, 进行气象卫星遥感数据接收故障诊断对比实验, 通过卫星数据接收状态信号特征提取结果与卫星数据接收故障诊断结果来显示设计系统的应用效果, 具体实验结果分析过程如下所示。

3.2.1 卫星数据接收状态信号特征提取结果分析

通过实验获得卫星数据接收状态信号特征提取结果如图 9 所示。

如图 9 所示, 应用设计系统获得的卫星数据接收状态信号特征提取结果与实际接收状态信号特征高度一致。这一发现表明, 设计系统在提取接收状态信号特征方面表现出了极高的准确性。与此同时, 对比系统 1、对比系统 2 和对比系统 3 在应用后获得的提取结果与实际接收状态信号特征均存在明显的差异。这一对比进一步凸显了设计系统在特征提取方面的优越性。这些实验结果不仅证明了设计系统的有效性, 而且在实际应用中具有重大意义。在卫星数据接收过程中, 精准地提取接收状态信号特征是进行故障诊断和性能评估的关键。设计系统能够准确地提取这些特征, 为后续的故障诊断和性能优化提供了可靠的数据支持。

3.2.2 卫星数据接收故障诊断结果分析

通过实验获得卫星数据接收故障诊断结果如表 4 所示, 对比了设计系统、实际接收故障诊断结果以及其他对比系统的诊断结果。

表 4 卫星数据接收故障诊断结果

方法	故障源	故障原因	故障树节点编号	故障规则序列编号
实际接收故障诊断结果	HRPT/MPT 接收天线	天线短路	H31	3
设计系统	HRPT/MPT 接收天线	天线短路	H31	3
对比系统 1	DPT 接收天线	天线破损	H11	1
对比系统 2	HRPT/MPT 接收天线	天线破损	H21	1
对比系统 3	DPT 接收天线	未知	H33	4

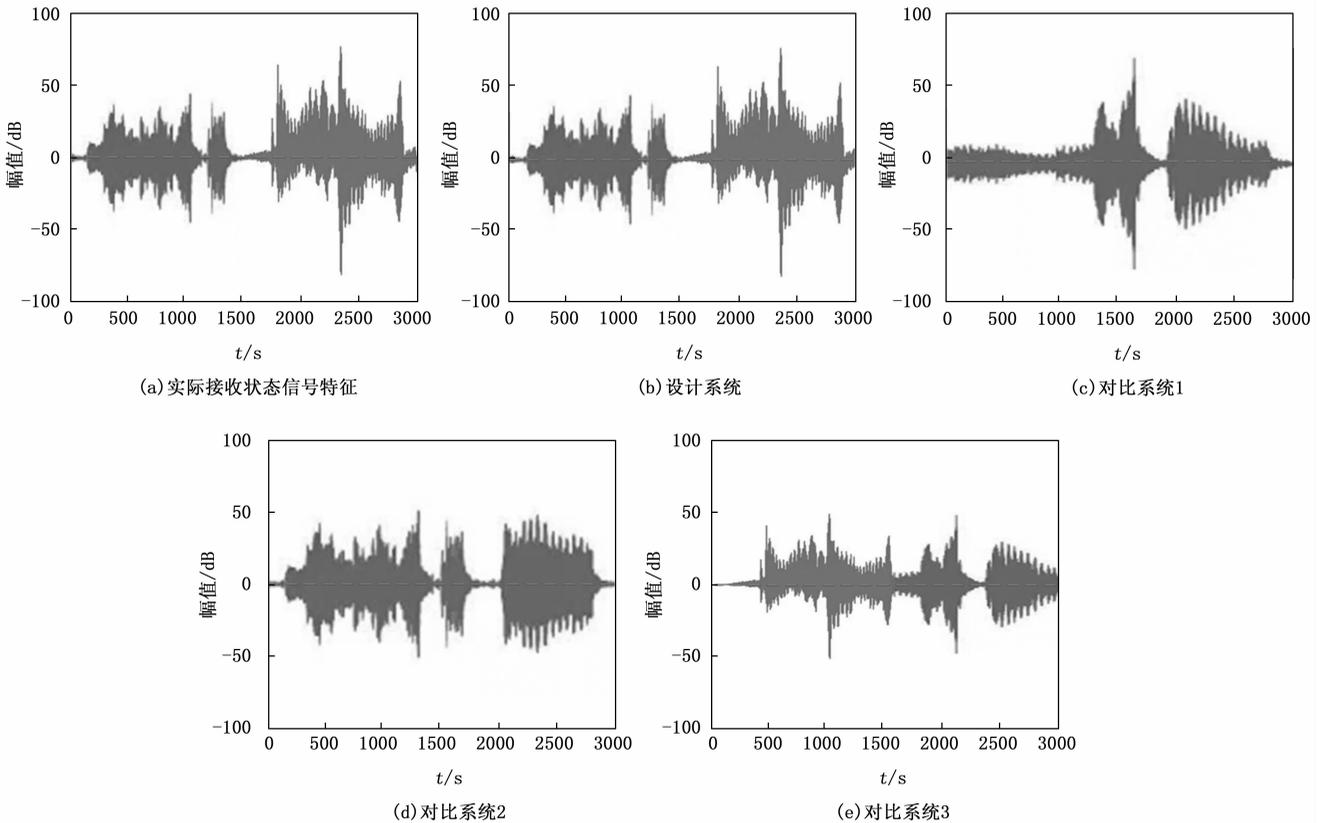


图 9 卫星数据接收状态信号特征提取结果示意图

如表 4 所示, 当面对相同的卫星数据接收状态信号特征向量时, 设计系统应用后获得的卫星数据接收故障诊断结果与实际接收故障诊断结果完全一致。这一发现不仅证明了设计系统在故障诊断方面的准确性, 也显示出了其强大的诊断能力。与此同时, 对比系统 1、对比系统 2 和对比系统 3 在应用后获得的卫星数据接收故障诊断结果却与实际结果存在一定的偏差。这些偏差具体表现在故障源的误判、故障原因的混淆、节点编号的错误以及规则序列编号的混淆等方面。这些偏差的存在进一步凸显了设计系统在卫星数据接收故障诊断方面的优势。在实际应用中, 设计系统的高精度故障诊断能力得到了充分的体现。它能够准确地识别出卫星数据接收过程中的各种故障, 为后续的故障修复提供了明确的指导。这不仅提高了卫星数据接收的稳定性和可靠性, 也为卫星数据的应用提供了有力的保障。

4 结束语

气象卫星遥感数据接收体系是一个集成了多种设备与先进技术的复杂系统。随着遥感数据体量的不断增加, 对地面接收站提出了更高的要求。根据数据调查研究可知, 气象卫星遥感数据接收故障发生概率呈现逐年递增的趋势, 威胁着气象卫星的稳定运行, 制约着气象卫星的后续发展, 故提出基于规则匹配的气象卫星遥感数据接收故障诊断系统设计研究。实验数据显示: 设计系统大幅度提升了卫星

数据接收状态信号特征提取结果与卫星数据接收故障诊断结果的精确度, 为卫星数据的可靠、完整、精准接收提供有效的系统支撑。

参考文献:

- [1] 李井源, 周蓉, 刘增军, 等. 大型卫星地面站故障诊断的增强分层有向图方法 [J]. 国防科技大学学报, 2023, 45 (1): 15-24.
- [2] 缪霖陶, 孙杰, 何玉. 卫星地面数据接收站频谱集中监视平台方案设计 [J]. 电讯技术, 2022, 62 (11): 1560-1564.
- [3] 周晓鹏, 吴迪, 胡涛. 卫星接收机非线性故障建模与仿真 [J]. 信号处理, 2022, 38 (4): 739-746.
- [4] CHEN H. Data anomaly diagnosis method of temperature sensor based on deep neural network [J]. Mobile Information Systems, 2022(Pt. 26):2022.
- [5] 王刚, 徐喆, 谢礼江, 等. 广东省气象卫星遥感数据资源池设计与应用 [J]. 气象科技, 2022, 50 (4): 600-605.
- [6] 许萌, 方舟. 移动平台气象卫星遥感数据处理系统设计与验证 [J]. 航天返回与遥感, 2022, 43 (2): 104-114.
- [7] 程礼临, 臧海洋, 卫志农, 等. 考虑多光谱卫星遥感的区域级超短期光伏功率预测 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (20): 7451-7464.
- [8] 王珏瑶, 符养, 白伟华, 等. GNSS 遥感探测卫星星座设计 [J]. 空间科学学报, 2021, 41 (3): 475-482.

- [9] 方红亮. 基于地球静止气象卫星的地表参数遥感研究进展 [J]. 遥感学报, 2021, 25 (1): 109-125.
- [10] 孙刚, 彭双, 陈浩, 等. 面向测控数传资源一体化场景的卫星地面站资源多目标优化方法 [J]. 航空学报, 2022, 43 (9): 653-669.
- [11] 熊仪, 刘思峰, 方志耕, 等. 海事卫星地面站 RMS 可用性评估模型 [J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45 (5): 1570-1579.
- [12] 吉宁, 王雪, 卢晓春, 等. GLONASS 软件接收机设计, 实现与性能验证 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (9): 21-27.
- [13] 汪成亮, 赵凯. 一种智能环境下基于边缘设备规则推理的数据预部署方法 [J]. 电子学报, 2022, 50 (10): 2347-2360.
- [14] 吉雪, 陈艳, 万千. 国际搜救卫星系统中轨道卫星地面接收站的设计研究 [J]. 现代雷达, 2021, 43 (11): 34-38.
- [15] 李安, 黄鹏, 石璐, 等. 中国遥感卫星地面站卫星地面系统的发展 [J]. 遥感学报, 2021, 25 (1): 251-266.
- [16] 李永龙, 袁雪林, 刘九龙, 等. 基于低轨卫星的分布式超宽带电磁脉冲对地面接收机干扰技术 [J]. 强激光与粒子束, 2023, 35 (3): 77-83.
- [17] 刘洋, 陈曦, 石杰楠, 等. 卫星测控应答机的接收机在轨性能评估方法 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (2): 151-156.
- [18] 王新新, 王祥, 范剑超, 等. 广播卫星电视接收机对 SMAP 卫星 L 波段微波辐射计的射频干扰特征分析 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43 (8): 2292-2299.
- [19] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [20] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [21] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [22] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [23] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [24] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [25] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [26] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [27] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [28] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [29] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [30] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [31] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [32] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [33] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [34] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [35] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [36] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [37] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [38] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [39] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [40] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [41] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [42] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [43] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [44] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [45] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [46] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [47] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [48] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [49] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [50] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [51] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [52] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [53] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [54] 汪精华, 王跃, 于龙江, 等. 高分多模卫星星地一体化快速响应系统设计与在轨验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 58-63.
- [55] HU D, ZHONG H, LI S, et al. Segmenting areas of potential contamination for adaptive robotic disinfection in built environments [J]. Building and Environment, 2020, 184: 107226.
- [56] SAOJI S, ROSELL J. Flexibly configuring task and motion planning problems for mobile manipulators [C] //2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA): Volume 1. 2020: 1285-1288.
- [57] CASTAMAN N, PAGELLO E, MENEGATTI E, et al. Receding horizon task and motion planning in changing environments [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2021, 145: 103863.
- [58] COLUCCI G, TAGLIAVINI L, BOTTA A, et al. Decoupled motion planning of a mobile manipulator for precision agriculture [J]. Robotica, 2023; 1-16.
- [59] SONG J, SHARF I. Stability-constrained mobile manipulation planning on rough terrain [J]. Robotica, 2022, 40 (11): 4090-4119.
- [60] MA Y, FARSHIDIAN F, MIKI T, et al. Combining learning-based locomotion policy with model-based manipulation for legged mobile manipulators [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7 (2): 2377-2384.
- [61] HAN F, JELVANI A, YI J, et al. Coordinated pose control of mobile manipulation with an unstable bikebot platform [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27 (6): 4550-4560.
- [62] XING H, TORABI A, DING L, et al. Enhancing kinematic accuracy of redundant wheeled mobile manipulators via adaptive motion planning [J]. Mechatronics, 2021, 79: 102639.
- [63] YAMAMOTO Y, YUN X P. Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39 (6): 1326-1332.
- [64] VAFADAR S, OLABI A, PANAH M S. Optimal motion planning of mobile manipulators with minimum number of platform movements [C] //2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 2018: 262-267.
- [65] THAKAR S, MALHAN R K, BHATT P M, et al. Area-coverage planning for spray-based surface disinfection with a mobile manipulator [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2022, 147: 103920.
- [66] 李新春, 赵冬斌, 易建强. 一种全方位移动机械手的可操作度分析 [J]. 中国机械工程, 2006 (14): 1442-1447.
- [67] PAJAK G, PAJAK I. Trajectory planning for mobile manipulators with control constraints [J]. Pomiary Automatyka Robotyka, 2023, 27: 21-30.
- [68] YU Q, WANG G, HUA X, et al. Base position optimization for mobile painting robot manipulators with multiple constraints [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 54: 56-64.
- [69] SILVA G, COSTA P, ROCHA L, et al. Path planning optimization for a mobile manipulator [J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2116 (1): 220004.
- [70] BAI Q, LI P, TIAN W, et al. Coordinated motion planning of the mobile redundant manipulator for processing large complex components [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121 (9-10): 6703-6721.
- [71] ZHANG H, SHENG Q, SUN Y, et al. A novel coordinated motion planner based on capability map for autonomous mobile manipulator [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 129: 103554.
- [72] XING H, GONG Z, DING L, et al. An adaptive multi-objective motion distribution framework for wheeled mobile manipulators via null-space exploration [J]. Mechatronics, 2023, 90: 102949.
- [73] JIA Y, XI N, NIEVES E. Coordination of a nonholonomic mobile platform and an on-board manipulator [C] //2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2014: 4356-4361.
- [74] LI M, QIAO L. A review and comparative study of differential evolution algorithms in solving inverse kinematics of mobile manipulator [J]. Symmetry, 2023, 15 (5): 1080.