

基于遥测数据频域特征的气象卫星故障诊断方法<sup>\*</sup>

田思维 朱爱军 贾树泽 马友 胡秀清

(国家卫星气象中心 北京 100081)

**摘要:** 卫星故障是极轨气象卫星业务系统面临的主要问题之一,星上故障具有发现难度大,排查时间长,影响严重等特点。目前对卫星的主要监视手段为通过对卫星下传的遥测数据进行分析,分析方法主要为阈值法,该方法目前具有一定局限性,对很多异常无法快速准确地捕获。提出一种基于遥测频域特征分析的气象卫星故障快速诊断方法,该方法能够对阈值法难以诊断的波动性遥测波道实现快速诊断。首先对关键遥测波道进行频域特征分析,提取关键信息,确立需要分析的特征,建立基本的诊断方法。其次根据气象卫星轨道特性及业务监视需求,提出了遥测序列长度 $N$ 的选取方法。在理论的基础上,先仿真了几种典型故障,并应用该方法对故障加以捕获。最后,将该方法用于分析历史一次某卫星星上故障分析,分析结果表明,所述方法能够对气象卫星星上故障实现快速捕获。

**关键词:** 极轨气象卫星;故障诊断;遥测数据频域特征分析

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.2020

## Telemetry spectrum characteristic based faults diagnosis algorithm of meteorological satellite

Tian Siwei Zhu Aijun Jia Shuze Ma You Hu Xiuqing

(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Satellite faults is one of the main problems in meteorological polar orbiting satellite data processing system. Satellite faults, which is difficult to be monitored and solved, always have serious impact. Current solution adopts threshold algorithm to analyze the telemetry downloaded by satellites. Threshold algorithm works poorly in analyzing volatile telemetry channels. Propose a telemetry spectrum analysis based faults diagnosis algorithm, which performs better on volatile telemetry channels. Firstly, some key telemetry channels are FFT transformed, the spectrums are analyzed and some certain frequencies are determined. The basic logic of the algorithm is proposed. Secondly, this paper discuss how to determine the telemetry channel length  $N$  based on the orbit characters and monitor requirements. Some typical satellite faults are simulated and diagnosed by this proposed algorithm. Lastly, this proposed algorithm is tested by an authentic satellite fault in history. Tests result shows, this proposed algorithm can diagnose meteorological satellite faults quickly.

**Keywords:** meteorological polar satellite; faults diagnosis; telemetry spectrum characteristic analysis

## 0 引言

极轨气象卫星也称为太阳同步轨道气象卫星,其轨道在地球上空 830 km 左右,围绕地球南北两极运行,运行周期约为 102 min 左右<sup>[1-2]</sup>。气象卫星搭载着多个先进的遥感仪器,以中国第 2 代极轨气象卫星风云 3 号 D 星(FY3D)为例,其搭载了中分辨率光谱成像仪 II、微波温度计 II 等 10 台仪器载荷<sup>[3-4]</sup>。

星上故障,包括平台故障和载荷故障,是极轨气象卫星

业务系统面对的主要问题之一。随着星上载荷越来越多,平台越来越复杂,星上故障具有发现难度大,排查时间长,对业务造成影响严重等特点。在卫星运行过程中,地面接收到下传的遥测数据,并基于此数据进行卫星运行管理和状态监测。遥测数据是反映卫星状态的重要依据,在卫星故障早期检测到遥测数据的潜在异常对卫星的安全维护具有重大意义<sup>[5]</sup>。目前对极轨气象星上故障的发现主要通过星上上传遥测的实时监视来完成<sup>[6]</sup>,诊断方法基本为简单的阈值判断监视,该方法存在如下缺点:1)许多遥测波道

收稿日期:2021-05-17

<sup>\*</sup> 基金项目:发改委财政支持项目资助

呈波动变化趋势,当出现故障时波形发生改变但未超过阈值。2)许多遥测波道呈一定变化趋势,其阈值需要不停的变化以适应波道值变化。

以上问题导致了许多星上故障无法第一时间被发现或者是首先发现了遥感数据异常,通过排查才进一步发现遥测数据异常,这就为故障排查增加了额外的时间<sup>[7]</sup>。目前国外工程中采用了多算法结合人工智能的星上故障诊断手段,目前美国 NASA 约翰逊航天中心 CLIP 专家系统已经得到了广泛的应用和发展。在航天飞机项目中,美国采用人工智能开发工具 KEE 和 G2 开发了航天飞机主发动机涡轮泵故障诊断系统(SEES),在国际空间站,“深空一号”探测项目中,NASA 采用了基于模型的故障诊断系统 Livingstone,并且已经发展到第 2 代<sup>[8]</sup>。在这些研究中,频域特征分析等多算法被应用到卫星故障诊断上,可以说,多诊断方法结合人工智能手段在卫星业务运行中发挥了越来越重要的作用<sup>[9]</sup>。

本研究将提出采用频域傅里叶分析替代传统简单阈值判断算法对故障进行诊断。频域傅里叶分析为日前较成熟的算法,在信号处理领域广泛应用,对于波动性信号有着较好的处理效果。遥测的很多信号呈波动性变化,在肉眼可见的时域,通过阈值判断较难发现问题。如果切换到频域,通过分析某个频点幅值的变化,可以获取更多的关键信息,轻松判断出某个遥测波道波动上的变化趋势,进一步分析出卫星可能存在的故障。目前采用频域分析手段对卫星遥测数据进行故障诊断,国内有一定研究,但在工程实际应用上不多,针对风云气象卫星故障诊断更是首次。

## 1 关键遥测波道频域特征分析

对于连续时域信号,其傅里叶变换为:

$$F(\omega) = F[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

气象卫星下传的遥测信号为离散的数字信号,另外傅里叶变换结果为连续函数,无法用计算机进行处理,因此针对气象卫星遥测信号,应用离散傅里叶变换 DFT 进行频域特征分析。针对  $N$  点长度离散域遥测信号序列  $x(n)$ ,式(1)修改为如下离散域变换:

$$x(k) = DFT[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn}, k = 0, 1, \dots, N \quad (2)$$

其中,  $W_N^{kn} = e^{j\frac{2\pi}{N}kn}$ 。

应用式(2)对某型号气象卫星推进舱底温度遥测波道进行 DFT 变换,信号长度  $N$  取 4 800 点,得到该遥测波道离散域的频谱。其时域波形、离散频谱图如图 1、2 所示。

由图 1 时域波形图可以看出,该波道温度呈周期性变化。在图 2 中,可以明显看到频谱图出现了明显最大值,该最大值的频点对应时域的周期。通过分析,确定该极值点横坐标为  $1.660\ 562 \times 10^4$  Hz,其对应的周期为 6 023 s,约

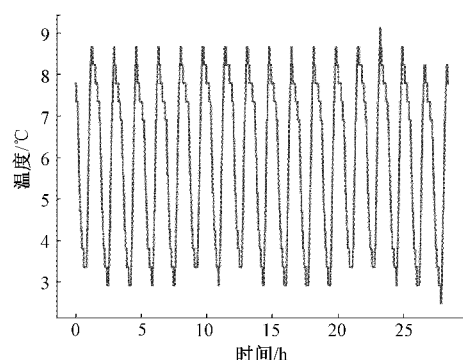


图1 某型号气象卫星推进舱底温度遥测波形变化

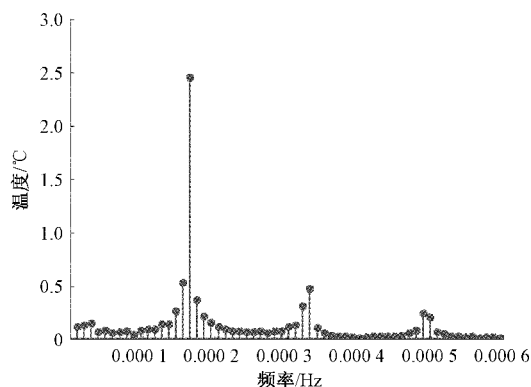


图2 某型号气象卫星推进舱底温度遥测频谱

为 1 h 40 min,恰为该型号极轨气象卫星的轨道周期时间。该型号极轨气象卫星为极地太阳同步轨道卫星,其经过赤道时星下点地方时恒定,当卫星经过向光面有太阳直射时,卫星舱体温度升高,而经过背光面无太阳直射时,卫星舱体温度降低。在光照和热控系统控制的同时作用下,卫星舱体温度在一定范围,按照一定周期变化波动。当热控系统出现问题时,卫星舱体温度可能出现波动周期改变,幅值加大,幅值减少甚至不波动、波形改变等情况,频谱图可以直观地反映以上问题。

## 2 诊断方法的确立及参数的选择

波动性遥测波道可能出现的异常有周期改变、波动振幅改变、波形改变等,这些异常通常对应某一个卫星故障。

时域时间序列的周期对应频谱图极值点的横坐标,当周期发生改变或波形发生改变时,通过极值点横坐标位置可以快速判断某遥测波道周期是否出现异常。时域时间序列的波动振幅对应频谱图极值点纵坐标,当振幅发生改变时,通过频谱图极值点纵坐标大小可以快速判断某遥测波道振幅是否存在异常。基于以上原理,选定频谱图极值点的横坐标,纵坐标作为分析对象。

同时,卫星故障需要尽快被发现,卫星的遥测数据是以轨为单位的等时间间隔下传的。卫星故障诊断程序在实际工程中是按轨实时运行的,为了提高故障诊断的实时性,需

要待分析的遥测波道序列所对应的时间尽可能短,对应离散域,即时间序列的点数  $N$  尽可能少。另一方面根据频域采样原理,对于  $N$  点的离散时间序列  $x(n)$ ,其离散傅里叶变换  $X_N(k)$  长度同样为  $N$ ,序列  $X_N(k)$  为连续频率区间  $[0, 2\pi]$  上的  $N$  点等间隔采样,其频域分辨率为  $2\pi/N$ 。过少的点数  $N$  会造成较差的频域分辨率,而过多的点数  $N$  则会造成故障发现的时效变差<sup>[1]</sup>。

因此综合两制约因素,提出如下遥测波道序列点数  $N$  选取方法:

设遥测波道时间序列周期为  $T$ ,信号采样频率为  $f_s$ ,对应的采样间隔为  $T_s$ ,则时间序列周期  $T$  对应的数字频率  $X_T$  为:

$$X_T = \frac{2\pi T_s}{T} \quad (3)$$

对于  $N$  点离散傅里叶变换序列  $X_N(k)$ ,根据频域采样原理,其最小分辨数字频率为:

$$X_s = \frac{2\pi}{N} \quad (4)$$

若希望  $N$  点离散傅里叶变换序列能够较好的分辨时间序列周期  $T$ ,则需满足  $X_T$  能够整除  $X_s$ 。

令  $X_T/X_s$  得到:

$$\frac{X_T}{X_s} = \frac{\frac{2\pi T_s}{T}}{\frac{2\pi}{N}} = \frac{T_s}{T} N \quad (5)$$

式(5)若能整除,则  $N$  需要满足为  $T/T_s$  的整数倍,此时 DFT 变换得到的离散序列刚好能分辨遥测波道周期  $T$ 。

对于  $N = m \frac{T}{T_s}$  ( $m$  为整数),代入式(5),得到式(6):

$$\frac{X_T}{X_s} = \frac{T_s}{T} \times m \frac{T}{T_s} = m \quad (6)$$

即对于 DFT 变换得到的  $X_N(k)$  序列中  $X_N(m)$  为周期  $T$  所对应的数字频点,对该点进行分析,可以判断遥测波道波动振幅是否出现异常。

在实际工程应用中,可遵循如下参数确定及异常诊断方法:

1) 采用较大的点数  $N$  分析某长时间波动遥测波道时间序列,确定其波动周期  $T$ ,波动所对应的振幅  $A$ 。

2) 对振幅  $A$  扩大一定范围作为阈值的到  $A_{\min}$  和  $A_{\max}$ 。

3) 根据上文所述原理,确定工程实际分析所用的点数  $N'$ 。

4) 采用  $N'$  对某遥测波道进行实时分析,判断频谱中周期  $T$  所对应点  $X_N(m)$  的值是否在  $[A_{\min}, A_{\max}]$  区间范围内,如果在则正常,反之异常。

采用以上方法确定该型号极轨气象卫星推进舱温度的分析参数。在本例中,已分析得到波动周期  $T$  为 6 023 s,波道采样周期  $T_s$  为 25 s,则令  $T/T_s = 6\,023/25$  得到 240.92。在此,令  $N = 2T/T_s = 480$ ,取一段遥测波道时

间序列进行 DFT 变换,得到时域和频域图如图 3、4 所示。

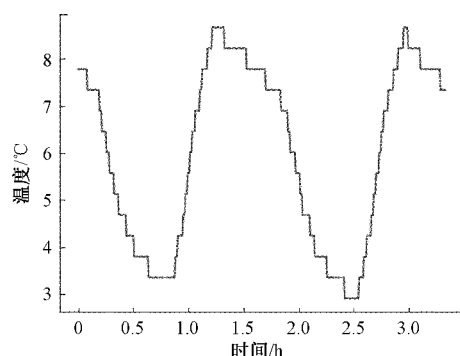


图3 某型号气象卫星推进舱底温度遥测变化( $N=480$ )

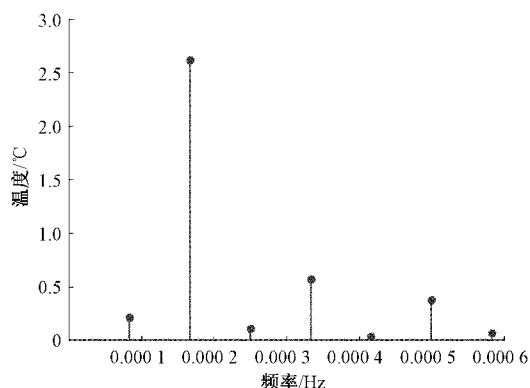


图4 某型号气象卫星推进舱底温度遥测频谱( $N=480$ )

从图 3、4 可以看到,当  $N=480$  时,时域波形刚好截取了两个周期,对应星上两轨的运行时间。在频域波形图中,DFT 得到的离散序列  $X_N(k)$  中  $X_N(2)$  刚好对应周期 6 023 s 所对应的频率极值点,通过判断该点的值大小,可以判断出该遥测波道波动性是否正常。在本例中,极值点大小阈值范围可取  $[2.2, 3]$ 。

### 3 波道异常情况分析

图 5~8 分别模拟了推进舱舱底温度遥测波道出现的 2 种异常情况。

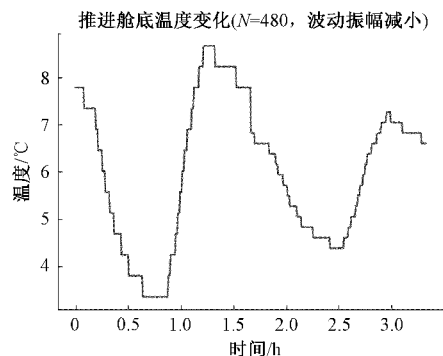


图5 某型号气象卫星推进舱底温度波动振幅减小时的时域波形

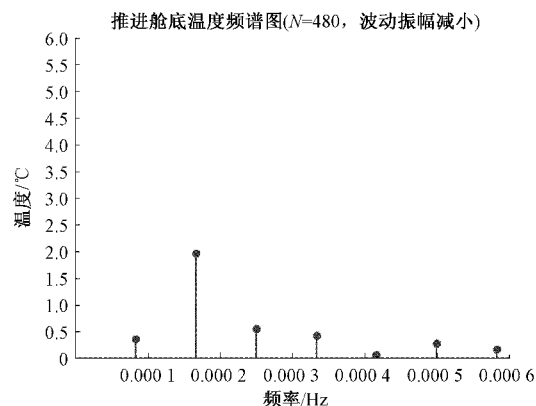


图6 某型号气象卫星推进舱底温度波动振幅减小时的频谱

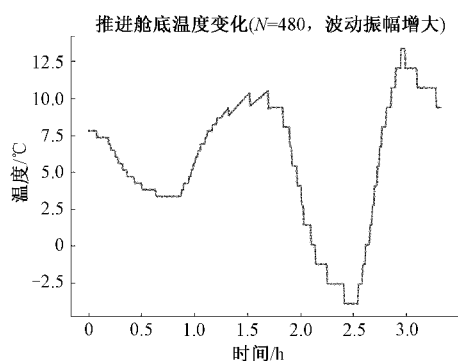


图7 某型号气象卫星推进舱底温度波动振幅增大时的时域波形

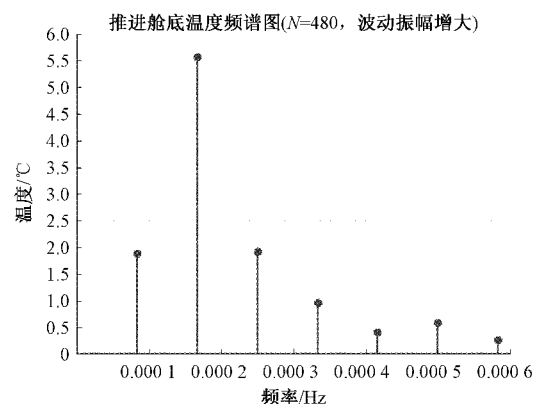


图8 某型号气象卫星推进舱底温度波动振幅增大时的频谱

图5所示时域波形为第1周期正常,而第2周期出现波动幅度减小的异常情况,从图6频谱图来看,DFT变换得到的离散序列 $X_N(k)$ 中 $X_N(2)$ 值明显减小,从正常值2.6左右减小为1.95,超出阈值[2.2, 3]范围,上文所述诊断方法可捕获此类异常。

图7所示时域波形为第1周期正常,而第2周期出现波动振幅增大的异常情况,从图8频谱图来看,DFT变换得到的离散序列 $X_N(k)$ 中 $X_N(2)$ 值明显增大,从正常值2.6左右跃升到5.6,超出阈值[2.2, 3]范围,上文所述诊断方法可捕获此类异常。

从图5~8的仿真结果来看,基于频谱分析的故障诊断方法对遥测波道波动异常增大减小较为敏感,此外,其时效性较好,能够在本周期出现异常,本周期发现。对于卫星来讲,意味着能够在当轨发现问题。

#### 4 实际故障校验

在某年11月28日~29日,某型号气象卫星制冷机出现故障,其遥测波道制冷机测温出现了明显的异常现象,该遥测波道为典型的波动性波形,其波动周期为卫星轨道周期,该遥测波道与上文所述推进舱底测温原理类似,其波动是由制冷机与卫星在向光背光面交替运行共同造成。在此次异常中,制冷机测温遥测波道在11月28日22时起,其波动出现明显的增大,如图9所示,经过定位,为星上制冷机出现故障。

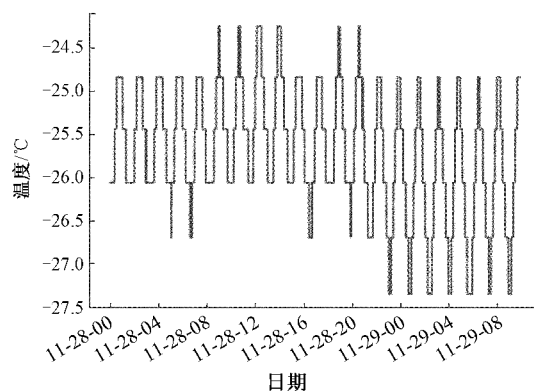


图9 某型号气象卫星制冷机测温异常时遥测波形

在本例中,如图10所示,该遥测波道的波动周期 $T$ 为6 000.0 s,其采样间隔 $T_s$ 为2 s。根据上文推导结果, $N$ 需要取 $T/T_s$ 的整数倍。本例中 $T/T_s=3 000$ ,在此 $N$ 取6 000进行DFT变换。DFT变换得到的序列中 $X_N(2)$ 的值对应时域波形振动的赋值,如图11频谱图所示, $X_N(2)$ 大小为0.687,在此设定阈值为[0.5, 0.9]。

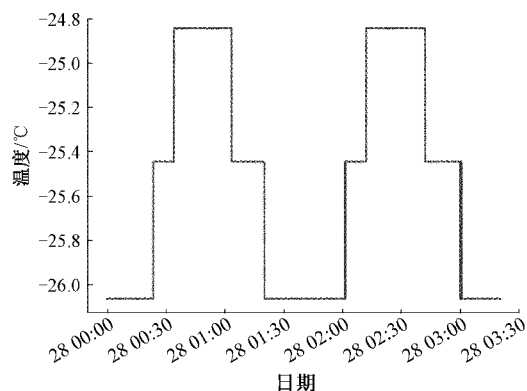


图10 某型号气象卫星制冷机测温正常时遥测时域波形

出现异常后的时域波形及其频谱如图12~13所示,由图13频谱图可知,其振动振幅为1.088,较正常时有较大幅度的跃升,且超出设定的阈值范围。

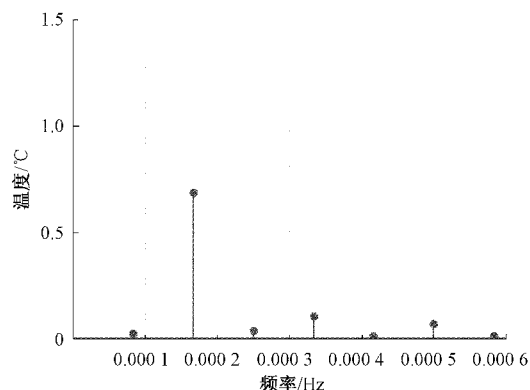


图11 某型号气象卫星制冷机测温正常时遥测频谱

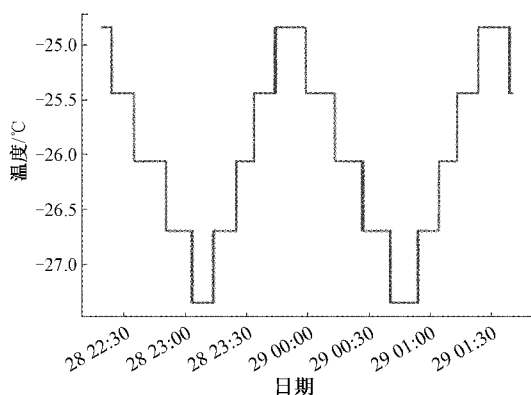


图12 某型号气象卫星制冷机测温异常时的遥测时域波形

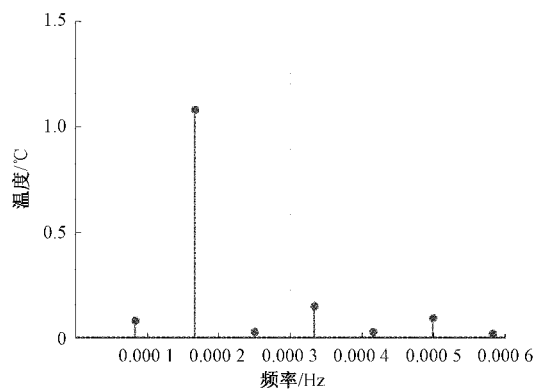


图13 某型号气象卫星制冷机测温异常时的遥测频谱

在本次星上故障引起的遥测异常中,本文所提方法能够对其进行快速检测。

## 5 结 论

星上故障检测对算法的准确性及时效性都有一定的要求<sup>[12-13]</sup>,本文所述方法针对星上下传得实时遥测进行分析,对其进行DFT变换,通过分析频谱相关指标,确定分析参数,对关键频点进行分析,可以较为准确地捕获到遥测的异常。在此过程中,DFT变换点数 $N$ 关系到检测的时效性及准确度,在分析过程中较为重要,属于重要的分析参数。

本文提出的基于频谱分析的故障诊断方法以及分析参数确定算法,经过仿真和实际故障验证,准确性和实时性均满足业务要求。

在本文提出的算法基础上,后续可结合机器学习等人工智能手段,自动分析上千波道,抓取关键分析参数,而后生成故障诊断算法,其产生异常信息可通过已有极轨气象卫星报警平台整理过滤合并,最终实现报警<sup>[14-15]</sup>。

## 参考文献

- [1] 杨忠东,卢乃锰,施进明,等. 风云三号卫星有效载荷与地面应用系统概述[J]. 气象科技进展, 2013(4): 6-12.
- [2] 何锡玉,蔡夕方,朱亚平,等. 我国风云极轨气象卫星及应用进展[J]. 气象科技进展, 2021,11(1): 34-39.
- [3] 朱爱军,胡秀清,林曼筠,等. 风云三号D气象卫星全球数据获取方法及数据分发[J]. 海洋气象学报, 2018, 8: 1-10.
- [4] 朱杰,林维夏,王英强,等. 风云三号气象卫星地面数据接收远程故障诊断系统设计及应用[J]. 气象科技, 2017(6): 1099-1105.
- [5] 孙宇豪. 基于多变量相关性分析的卫星异常检测技术研究[D]. 北京:中科院大学, 2020.
- [6] 朱杰,贾树泽,程朝晖,等. 风云三号气象卫星热控系统地面健康管理研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(10): 90-94.
- [7] 马友,贾树泽,赵现纲,等. 基于张量分解的卫星遥测缺失数据预测算法[J]. 电子与信息学报, 2020,42(2): 403-409.
- [8] 李光,石碧舟,戴永珊,等. 导航卫星载荷自主健康管理研究[J]. 计算机测量与控制, 2021,29(3): 104-107,113.
- [9] 王旭,都晓辉,陈昌麟,等. 机器学习在卫星遥测分析建模中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2019,29(1): 210-214.
- [10] 彭钰钦,涂亚庆,杨辉跃. DFT算法频率和相位差测量不确定度评估[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 17-22.
- [11] 张亦弛,黄见明,何昭社. 基于相位谱测量的脉冲调制信号频域测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2014,35(11): 2508-2514.
- [12] 朱海洋,胡文静,陈浩,等. 在轨卫星异常实时处置技术研究[J]. 国际太空, 2015,4: 35-37.
- [13] 赵文,董文峰. 卫星在轨故障地面诊断系统设计[J]. 航天器工程, 2014,23(3): 92-97.
- [14] 田思维,屈兴之,张媛媛,等. FY3地面业务系统关键信息短信报警平台的设计及实现[J]. 气象科技, 2016,44(6): 907-912.
- [15] 谢利子,赵现纲,郭强,等. 风云系列气象卫星关键业务监控报警系统的设计与实现[J]. 计算机应用, 2012(S2): 192-195,225.

## 作者简介

田思维,工学硕士,主要研究方向为极轨气象卫星业务系统故障诊断。

E-mail: tswqqmail@qq.com