

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802290

风云三号气象卫星热控系统地面健康管理研究

朱杰^{1,2} 贾树泽¹ 程朝晖¹ 陆江峰³ 赵现纲¹ 马友¹

(1.国家卫星气象中心 北京 100081; 2.南京信息工程大学 南京 210044; 3.上海技术物理研究所 上海 200083)

摘要:热控系统是风云三号气象卫星重要的组成部分,直接影响到卫星工作状态和使用寿命。卫星入轨后,在地面对该系统进行长期状态监视、异常检测与分析对于整星及各个有效载荷的安全运行具有重大指示意义。在对风云三号气象卫星热控系统热平衡原理、功能、组成等详细分析的基础上,对其地面健康管理机制及技术进行了系统研究,设计了相应的健康管理综合应用平台。以遥测数据为输入,构建了异常场景定性模型,实现了对风云三号气象卫星热控系统在轨状态的监视和健康管理,对卫星平台及各个载荷不同场景下的状态变化引起的温度波动事件进行关联分析及可视化表达,能够为卫星在轨安全运行提供有效预警和辅助保障,并具有推广价值。

关键词:风云三号气象卫星;热控制系统;异常场景;定性模型;健康管理

中图分类号: TN913 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.52040

Study on health management of thermal control system of FENGYUN 3 meteorological satellites

Zhu Jie^{1,2} Jia Shuzhe¹ Cheng Zhaohui¹ Lu Jiangfeng³ Zhao Xiangang¹ Ma You¹

(1.National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China; 2. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China)

Abstract: Thermal control system is an important subsystem of FENGYUN meteorological satellites, which directly affects the work of the other subsystems and the satellite life. Therefore, long-term in-orbit monitoring, fault detection and fault diagnosis for the system have a major practical indicating significance. Based on detailed analysis of the principle, function and composition of FENGYUN meteorological satellites thermal control system, the paper makes a systematic study of its ground health management mechanism and technology, and designs corresponding comprehensive application platform. With telemetry data as input, the scenario of the failure is established, realized the monitoring and health management of the FY3D thermal control system, having the function of correlation analysis and visual expression of temperature fluctuation events caused by state changes of satellite platform and payloads. It can provide effective early warning and assistant guarantee for the satellite security, and has the value of popularization.

Keywords: FENGYUN 3 meteorological satellites; thermal control system; abnormal scenario; qualitative model; health management

0 引言

风云三号气象卫星,作为我国第二代极轨气象卫星,在防灾减灾、应对气候变化等方面发挥着重要作用。其中,风云三号D星(FY3D)于2017年底发射,是目前国内光谱测量通道数量最多的卫星,测量通道数超过7 000个^[1],极大地提升了我国对地球低层大气动力参数、热力参数、温室气体和高层大气电场、磁场、高能粒子的探测能力,其数据可以在数值天气预报、海洋和陆地气候变化研究、生态环境监测和空间天气预报等方面发挥重要作用。

热控系统,作为风云三号气象卫星的关键组成部分,在卫星全生命周期内,担负着为整星内部所有机电控制设备、热管电路、有效载荷等空间任务单元提供安全、可靠的环境温度的重要任务^[2]。热控系统通过控制卫星内部及外部环境热交换过程,保证星体各个部位及搭载的各种载荷设备处于正常的工作温度范围,达到动态的热平衡。卫星入轨后,空间环境复杂多变,不确定因素增多,热控系统往往要及时响应卫星平台和载荷的状态变化,做出一定的自主调整,因而对卫星安全有重要的指示作用。

1970年日本“大隅号”试验卫星,在发射入轨绕地球飞

行 6 圈后,地面遥测信息检测到星上电子仪器温度为 60 ℃,随后该仪器停止工作,与地面彻底失去联系^[3];1973 年美国发射的“天空实验室”,由于太阳能电池帆板和残体表面热控涂层损坏,导致舱室温度过高,宇航员无法进入工作^[4];1973 年加拿大的通信技术卫星热管受卫星本体遮挡,温度急剧下降直至冻结,失去传热能力^[5];1978 年日本广播卫星关键部件温度偏高,出现故障,影响了卫星寿命^[6];1982 年美国的“陆地卫星 4”,太阳帆板导线因热胀冷缩断裂,导致太阳电池供电能力下降到一半,损失约合 6 000 万美元;1984 年中国试验卫星在轨测试时,发现行波管温度超出预定值,致使卫星转速变慢,远低于设计值,造成很大损失^[7]。

综上所述,热控系统在卫星各分系统中占有重要地位,对其有效的在轨状态监视、准确的故障定位、完善的关联分析、稳定的健康跟踪管理,对于保障卫星的安全运行、提高载荷的使用寿命都具有重大实际意义。然而,随着技术的不断进步,卫星热控系统层次越来越多、造价越来越昂贵、组成越来越复杂、经验知识越来越密集、故障场景越来越多元,仅仅靠人工判识与分析,往往不能满足实际业务高可靠性、高时效性、高标准性的要求。本文在此背景下,对 FY3D 热控系统地面健康管理机制及技术进行了系统研究,设计了相应的健康管理综合应用平台。以遥测数据为输入,实现了对 FY3D 热控系统在轨状态的监视和健康管理,对卫星平台及各个载荷不同场景下的状态变化引起的温度波动事件进行关联分析及可视化表达,构建了异常场景定性模型。经过实践检验,能够为卫星在轨安全运行提供有效预警和辅助保障,并具有推广价值。

1 FY3D 热控系统工作原理及组成

典型的航天器热控环境示例如图 1 所示。热控分系统作为风云三号气象卫星的一个重要服务保障系统,其主要功能是根据卫星飞行任务需求,以及卫星在轨期间所要经历的内、外热负荷状况,采用热控制措施来组织卫星内、外热交换,保证卫星在整个运行期间所有仪器设备和结构部件的环境温度水平保持在规定的范围之内。

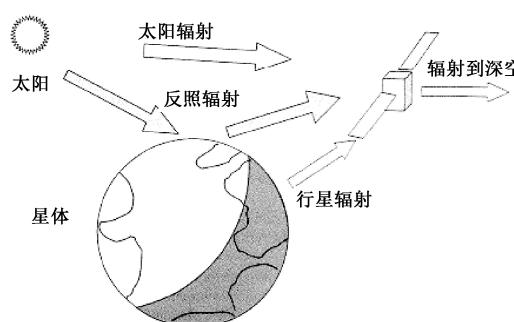


图 1 典型的航天器热控环境示例

航天器的热平衡是热设计的基础,航天器各部分的温度均从热平衡得到。在轨飞行的航天器只能通过辐射与其周围的环境发生互动,可以用下列 4 种能量交换方式描述这种互动^[8]:

- 1) 直接太阳辐射;
- 2) 附近行星反射的太阳辐射(反照辐射);
- 3) 附近行星辐射发出的热能(行星辐射);
- 4) 从航天器发出到深空的辐射。

当从上述前 3 种源头接收到的辐射能与航天器内部发出的一切热耗散能量元和与从航天器辐射到深空的能量相等时,航天器将进入热平衡状态^[9]。正是这种平衡决定了航天器的物理温度。

假设卫星具有很高的热惯性且是一个等温体,则将上述热平衡状态转化成数学公式为^[10]:

$$(A_{\text{solar}}J_s + A_{\text{albedo}}J_a)\alpha + A_{\text{planetary}}J_p\varepsilon + Q = A_{\text{surface}}\sigma T^4 \varepsilon \quad (1)$$

式中: A_{solar} 、 A_{albedo} 和 $A_{\text{planetary}}$ 指相应投影面积上分别接收到的太阳辐射、反照辐射和行星辐射; A_{surface} 指卫星的总表面积;直接从太阳接收到的热 = $J_s A_{\text{solar}}$;反照辐射产生的热 = $J_a \alpha A_{\text{albedo}}$;行星辐射产生的热 = $J_p \varepsilon A_{\text{planetary}}$;辐射到空间的热量 = $\sigma T^4 \varepsilon A_{\text{surface}}$;内部耗散的能量 = Q 。

假设 J_s 、 J_a 、 J_p 和 Q 都保持恒定,则根据上式将获得卫星的一个平衡温度 T ^[10]:

$$T^4 = \frac{A_{\text{planetary}}J_p}{A_{\text{surface}}\sigma} + \frac{Q}{A_{\text{surface}}\sigma\varepsilon} + \frac{(A_{\text{solar}}J_s + A_{\text{albedo}}J_a)}{A_{\text{surface}}\sigma} \left(\frac{\alpha}{\varepsilon} \right) \quad (2)$$

依据上述卫星热平衡原理,卫星热控分系统主要功能为:在卫星飞行任务内,根据卫星所经受的内、外热负荷的状况,采用被动和主动热控措施,通过隔热保温、散热、局部加热相结合,合理控制星内外的热交换,维持星体内部结构件、仪器的温度在设计指标范围内(不包括仪器内部温控及独立热控载荷的温控),同时也为安装在星体外部的载荷提供一定的边界温度^[9],其功能如图 2 所示。

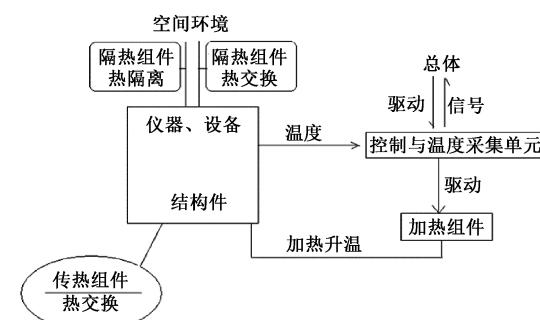


图 2 卫星热控分系统功能

卫星主要由电子仪器、光学器件、机械设备和材料组成。各种组件的功率消耗、热控制技术和需求都不相同,一

般来说,依据温控需求,热控设计可分为:常温需求、恒温需求、高低温需求和等温需求 4 种类型^[11];依据技术类型,可分为被动热控和主动热控;依据卫星所处热环境的阶段,可分为发射前准备阶段、卫星起飞到太阳翼展开阶段、太阳翼展开到定点阶段和在轨运行阶段^[12]。

卫星热控系统组成如图 3 所示。为保证整星和各个有效载荷的平稳运行,构建了主、被动两种方式相结合的智能热控体系^[9],具备极高的热环境变化适应能力。被动热控措施方面,通过热管、扩热板、导热填料等组件,实现部件等温化的需求;通过白漆涂料等方法,为过热的系统降温。在主动热控措施方面,通过控制箱、电加热器等,自主为部件升温或降温,以满足需求。

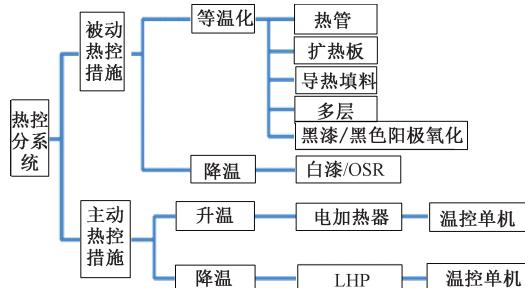


图 3 卫星热控分系统组成

2 热控系统异常场景及定性模型的建立

卫星内部大功率电子器件及设备的广泛使用,对热控制技术提出了更高要求,加之卫星入轨后,长期处于真空、低温、微重力、太阳辐射以及地球和其他行星热辐射等复杂多变的空间环境中,如果温控指标不能达到要求,会导致其局部或整体处于不适当的工作温度,产生热应力和热形变,造成电子器件损坏或失效,影响卫星及载荷的性能和使用寿命。

卫星热控系统通过调节热量收集、产生、转移、存储和排放过程,控制整星和各载荷的温度变化,在此过程中,故障来源主要有如下 4 个方面^[13]:

- 1) 设计不合理:经验不足、测试不充分等导致的热控系统参数取值不准、理论值与实际情况不符而造成的故障;
- 2) 卫星姿态失控:卫星入轨后,对于空间冷、热源的相对位置有严格的要求。若卫星姿态发生偏差或者失控,可能引起星载吸热、散热部件被意外遮挡或者暴露,造成温度背离设计值,系统不能正常工作。常见的有热管内工作物质的冻结,遥测探头温度异常升高等;
- 3) 空间环境的长期作用:FY3D 是长寿命卫星,其上热控涂层的太阳吸收率,因长期空间紫外及粒子辐射作用而变大,可能引起涂层变质甚至脱落,因而温度升高;
- 4) 突发事故的影响:卫星在寿命的初期、中期、末期,发生的一些偶然事件,如碰撞、撕裂、失控、单粒子撞击、载荷

工作状态变化等,都会引起热控系统的响应,甚至是损坏或失效。

热控系统往往结构复杂、层次众多、涉及的异构部件密集,基于经验,其可能出现的故障如表 1 所示^[14]。

表 1 热控系统可能出现的故障

热控技术类型	多发故障
被动热控	环境引起涂层的热辐射 性质改变、涂层污染
	放气、漏热、污染
	泄露
	泄露、腐蚀
主动热控	百叶窗 磨损、变形、驱动故障
	旋转盘
	接触式热开关 机械故障、驱动故障
	可控热管 泄露、驱动故障
对流主动热控制	泄露、腐蚀、电路故障

针对热控系统的各种故障,有多种诊断方法,如基于规则的专家系统故障诊断、基于神经网络的诊断方法、基于故障树的诊断方法,基于模糊集的诊断方法等。本文从风云三号气象卫星热控系统故障诊断的实际需求和业务特点出发,采用基于定性模型的故障诊断方法,该方法具备速度快、实时性好、结构简单,可靠性高的优势。

定性模型故障诊断,是一种面向约束的方法,从一个定性约束集和一个初始状态出发,产生一个有向图^[14],该有向图由系统未来所有可能的状态及状态之间的关联关系组成,系统的某次行为被看作是有向图中从初始状态出发的一条路径,进而产生定性的推理诊断,并对结果进行描述。定性模型故障诊断原理如图 4 所示。

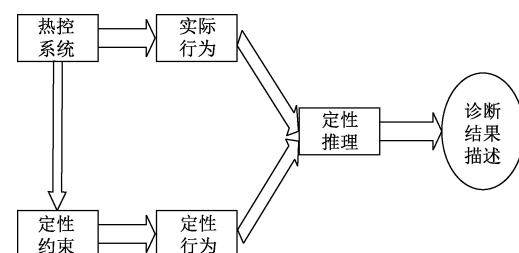


图 4 定性模型故障诊断原理

根据设计、仿真及试验结果,风云三号气象卫星热控分系统选取可反映整星温度水平的关键测点开展长期在轨状态监视。

由于空间环境复杂多变,卫星平台及各有效载荷在轨工作模式、性能状态往往会发生不同程度的改变,甚至发生故障。热控系统往往会第一时间对此响应并做出一定的自主调整,同时通过遥测参数的变化及时反馈给地面系统,因此,是表征卫星健康状态的重要指示因子^[15]。基于以上考

虑,对热控系统遥测参数的有效监视,不仅需要判别其是否满足设计指标,更重要的是要敏感地捕捉到其产生的“突变”,并与其他相关分系统开展综合关联分析,不断跟踪细微的变化直至定位出原因,深入探究产生“异常波动”的机理,为卫星及载荷的安全提供保障。

为了将经验充分融合到定性模型中,需要将具备物理意义的实际信息转化为合理的定性表述。本文为风云三号气象卫星热控系统常见的异常场景构建如下的定性模型:

1) 状态字描述:用于描述 35 路电加热器、制冷器的加断电状态。0 表示开关处于关闭(断电)状态,1 表示开关处于开启(加电)状态;

2) 特征字描述:用于判断部件是否处于正常状态。“LOW”表征实际遥测值低于设计指标区间的下限,温度过低;“HIGH”表征实际遥测值高于设计指标区间的上限,温度过高;此两种场景均提示部件异常,用 ANOMALY 描述。此外,如前文所述,为了更精确的捕捉到温度细小的“异常波动”的场景,基于部件特点和实际经验,结合每个测点与相应载荷的耦合关系,以在轨测试期间每个波道实际测试的遥测值为依据,特别提出了“温度稳态区间”的概念。若实际遥测值满足此区间,则认为部件工作正常,用“NORMAL”描述;若不满足此稳态区间,即使依然满足设计指标区间,也提示有“温度突变”,需要采取多系统综合关联分析判定是否存在状态异常,用“WARNING”描述。

3 热控系统健康管理综合应用平台的构建

为长期、科学地监视、评估卫星热控系统在轨安全性、可靠性,同时对各载荷在轨工作状态开展有效的预警,本文基于模块化思想,设计了风云三号气象卫星热控系统地面健康管理综合应用平台,平台架构如图 5 所示,界面示例如图 6~8 所示。

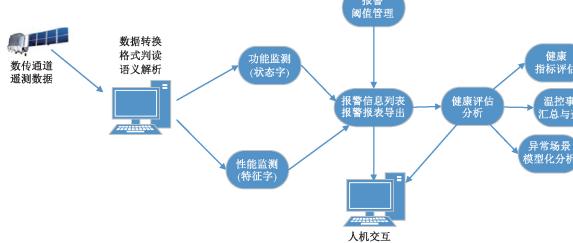


图 5 热控系统地面健康管理综合应用平台架构

平台以卫星数据传输通道(数传通道)每天按轨道下传的实时、延时全球遥测数据为输入,经过数据转换、格式判读和语义解析,选取热控系统关键测点对应的近 500 个相关波道,获取其实际测试值。

基于上述遥测数据,用状态字描述 35 路加热器、制冷器的功能监测结果,用特征字描述近 500 个关键测点的性能监测结果,绘制定制区间内的温度变化趋势曲线图。如图 6 所示,给出了卫星推进舱和蓄电池组中的关键测点自



图 6 遥测数据解析界面示例

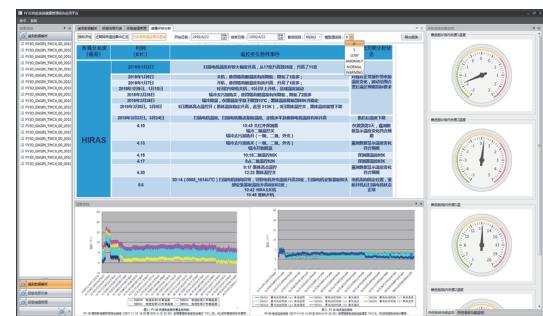


图 7 载荷温控异常场景界面示例

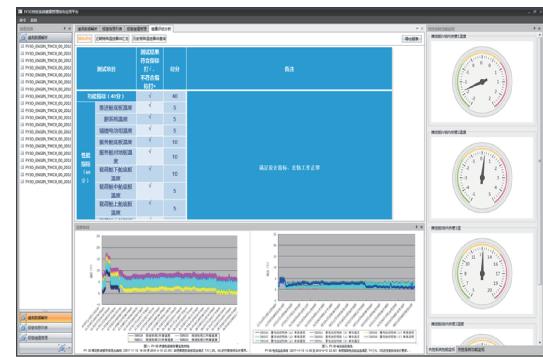


图 8 健康评估分析界面示例

发射到在轨测试结束,长时间序列温度变化曲线。特别基于“温度稳态区间”的概念,敏感地捕捉温度值在设计指标区间内的细微“异常波动”,将遥测参数定量值转化为定性值,如前文所示,分别以“0,1,LOW,HIGH,ANOMALY,NORMAL,WARNING”为各种异常场景赋予相应的模型化表达(如图 7 所示),并以列表展示和报表导出的形式,以友好的界面实现人机交互。同时,如图 8 所示,由于风云三号气象卫星热控系统各测点的温度,会随着在轨阶段、季节、节气的改变而发生不同程度的正常浮动,为减少虚警率,精细化监视温度变化,平台提供报警阈值的动态管理能力,通过可配置的阈值设置,提高报警的有效性和灵活性。

此外,平台还通过对多项功能指标、性能指标量化加权评分,对卫星热控系统在轨健康状况进行科学地、系统地综合评估,并以圆形指示计的形式直观、形象、量化地展示出来,便于运维人员查看和参考。在上述功能的基础上,为充分发挥热控系统对载荷在轨状态重要的指示因子作用,本平台对载荷近期和历史特殊温控事件提供了汇总和查询的功能,通过时期、载荷、模型值三个维度的条件查询,运维人员可方便、系统、直观地监视温度对载荷状态变化的响应情况,从而为载荷异常提供有效的预警、也为验证排查措施的效果提供必要的辅助手段。例如,如图 7 所示,针对首次星载的 FY3D 星红外高光谱探测仪,对其在 2018 年 1~5 月期间的 15 次温度异常波动,给予了密切关注和有效监视,对人工干预动作的结果进行了辅助检测和分析,为新载荷的健康评估与性能优化提供了基础数据支撑。

该平台具备直观地对风云三号气象卫星热控系统在轨健康监视的能力,对报警阈值进行多个维度的动态管理;同时能够及时响应多个星载仪器的状态变化,对温度细微突变提示的异常提供交互响应查询服务,并对人工干预手段进行辅助验证。相较于传统只是单一地判断遥测值是否在设计指标区间的监视方法,在便利性、时效性、系统性、动态性上有所改进。特别是弥补了传统做法因指标范围过于宽泛,而掩盖了温度细微波动提示的系统状态异常的不足,提高了预警的主动性和精细化程度。

4 结 论

热控系统一直是卫星重要的组成部分,直接影响卫星寿命,且能够及时响应平台和载荷在轨状态的变化,因而具有重要的指示意义。本文以风云三号气象卫星热控系统为对象,在对其工作原理和结构组成详细分析的基础上,对其地面长期在轨健康管理机制和技术进行了研究,构建了异常温控场景定性模型,设计了健康管理综合应用平台。平台架构清晰、易于实现,能够适应复杂多变的热控系统健康管理需求,具有较高的动态响应能力,对于保证卫星在轨安全、预警载荷状态变化具有重要的现实意义,并具有一定的推广价值。未来,还将在建模的精确性和操作的友好性等方面开展进一步的研究。

参考文献

- [1] 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,2018,38(3):1-10.
- [2] 张弓,刘崇华,潘宇倩,等.导航卫星自主健康管理系统的架构实现方案[C].第二届中国卫星导航学术年会论文集,2011:695-700.
- [3] 孟繁孔,赵亮,卿恒新,等.一种航天器热平衡试验温度稳定判据确定方法[J].宇航报,2016,37(10):1263-1270.
- [4] 于功敬,熊毅,房红征.健康管理技术综述及卫星应用设想[J].电子测量与仪器学报,2014,28(3):227-232.
- [5] 王瑾,刘小旭,李德富,等.航天器智能热控技术研究现状及展望[J].微型机与应用,2017,36(9):8-10,14.
- [6] 童叶龙,李国强,耿利寅.航天器精密控温技术研究现状[J].航天返回与遥感,2016,37(2):1-8.
- [7] 宋飞,秦世引.卫星姿态控制系统在轨实时健康评估[J].北京航空航天大学学报,2014,40(11):1581-1588.
- [8] MAUL W A, KOPASAKIS G, SANTI L M, et al. Sensor selection and optimization for health assessment of aerospace system [J]. Journal of Aerospace Computing, Information and Communication, 2008, 5(1):16-24.
- [9] 侯增祺,胡金刚.航天器热控制技术:原理及其应用[M].北京:中国科学技术出版社,2008.
- [10] SAVAGE C J. Thermal control of spacecraft [M]// FORTESCUE P, SWINERD G, STARK J. Spacecraft Systems Engineering. Wiley, 2011: 357-394.
- [11] 邢琰,吴宏鑫,王晓磊,等.航天器故障诊断与容错控制技术综述[J].宇航学报,2003,24(3):221-226.
- [12] 刘国良,王元道,周宝林,等.集成系统健康管理中健康评估算法研究[J].哈尔滨工业大学学报,2009,41(3):15-17.
- [13] 范显峰,姜兴渭,黄文虎.基于模型的卫星热控系统故障诊断技术研究[J].哈尔滨工业大学学报,2001,33(3):318-320,325.
- [14] 南熠.基于有向图的航天器健康管理算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [15] 何克磊.飞行器健康评估和故障预测技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.
- [16] 董伟升,杨罗兰,赵聆,等.航天地面站测控设备健康管理概念研究[J].遥测遥控,2017,38(6):44-47.
- [17] 胡绍林,陈如山,黄刘生.航天器故障检测诊断与容错处理技术研究[J].系统工程与电子技术,2006,28(9):1360-1364, 1374.

作者简介

朱杰,高级工程师,主要研究方向为卫星数据接收及处理。

E-mail:juliet0411@126.com

程朝晖(通信作者),高级工程师,主要研究方向为气象卫星地面运行控制。