火箭助推器残骸海上落区监测技术探索与实践

魏　巍[1,3], 王伟平[1], 黎广媚[2], 张志强[2], 张丞杰[2], 贺惠忠[1], 谢武锋[2], 殷征欣[1], 李正元[1]

(1. 国家海洋局南海调查技术中心, 广东 广州 510300; 2. 国家海洋局南海分局, 广东 广州 510300; 3. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 针对火箭助推器残骸海上落区监测面临的挑战, 对助推器残骸海上监测内容、监测平台、关键技术进行了研究, 提出了助推器残骸海上监测技术路线。在此基础上, 成功实施了长征五号运载火箭的监测任务, 为研究火箭残骸再入及解体规律, 完善落区设计与选择提供技术支撑。最后给出了火箭残骸海上监测技术研究的发展方向和内容, 以期对后续工作提供有益参考。

关键词: 火箭助推器; 监测技术; 海上落区; 残骸

中图分类号: P714　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2018)06-0116-07

DOI: 10.11759/hykx20171101004

火箭助推器是火箭发射时的提供额外动力的单级运载火箭。为增大航天飞行器速度、改善总体性能、提高运载能力, 常采用助推器方案, 其中捆绑式在国内外应用较为广泛[1]。火箭助推器是变质量飞行体, 内有燃料和助燃剂, 通过高温高压的燃气从尾部高速喷出, 不断减小质量, 并将内能转化为机械能, 为火箭垂直起飞、达到预定飞行速度和高度、程序转弯(为火箭提供切地球分量速度)等其他活动提供额外的推力。助推器燃料燃尽、任务完成后, 将与芯级分离, 为火箭减重。

助推器与芯级分离后, 由于助推器残骸的飞行速度小于第一宇宙速度, 残骸体不能进入地球轨道, 将在稀薄大气环境下自由飞行, 并返回地面[2]。助推器残骸自芯级分离后, 飞行状态不可控。相关仿真分析研究的结果表明[3], 分离后的助推器残骸继续爬升, 但受气动力和重力的作用, 其速度随着上升高度的增大而减小, 分离后 70 s 助推器残骸到达最高点, 接着进入再入飞行阶段。再入飞行阶段前期的助推器残骸速度随着高度下降而增大, 下降到 30 km 附近, 助推器残骸所受气动力逐渐大于重力, 其合速度随着高度下降而减小, 最后所受外力达到平衡, 匀速下降。

长征五号运载火箭是我国运载火箭升级换代的航天科技工程, 创新难点多、技术跨度大、复杂程度高, 代表了我国运载火箭科技创新的最高水平。长征五号运载火箭四周捆绑 4 个直径 3.35 m 的液体火箭助推器, 其尺寸和质量远超先前的运载火箭助推器[4]。对长征五号火箭助推器残骸的分离、自由爬升、再入及坠落过程进行落区监测工作, 可为助推器再入轨迹及落区模型验证提供丰富的验证数据, 对于优化后续改进火箭设计、改善航落区安全性及航天技术安全保密都具有重要意义。

长征五号运载火箭遥一、遥二飞行试验分别于 2016 年 11 月 3 日及 2017 年 7 月 2 日开展。国家海洋局南海分局两次组织海上编队, 在南海东北部成功实施了火箭助推器残骸海上落区监测工作。本文在两次长征五号运载火箭助推器残骸海上落区监测工作的实践的基础上[5], 探讨监测技术、总结监测范式, 以期对后续监测工作提供技术参考与支持。

1　长征五号火箭助推器结构特征

长征五号液体助推器是目前国内最大的低温液体助推器, 由鼻锥、液氧贮箱、箱间段、煤油贮箱、后过渡段、尾端、YF-100 发动机等组成(见图 1), 贮箱与箱间段材料为可焊铝合金, 贮箱一般为圆筒形, 前后有两个箱底, 中间为圆柱形的壳段, 用焊接方法把两个箱底与壳段焊成一个圆筒形容器。

收稿日期: 2017-11-01; 修回日期: 2018-01-13

基金项目: 国家重点研发计划重大科学仪器设备开发重点专项机载高精度磁力仪项目(2017YFF0107400)

[Foundation: National Key R&D Program of China Key Scientific Instruments and Equipment Development Special Project, No. 2017YFF0107400]

作者简介: 魏巍(1982-), 男, 山东淄博人, 硕士, 高级工程师, 海洋地质与地球物理、海洋测绘, E-mail: weiwei@smst.gz.cn

图 1 长征五号运载火箭助推器布局结构示意图[5]

Fig. 1 Diagrammatic sketch of Long March 5 series launch vehicle booster layout[5]

长征五号火箭助推器采用了双组元推进剂、斜头锥和前捆绑主传力结构, 每个液体助推器装了 2 台大推力的 120 t 液氧煤油发动机(YF-100), 以液氧(氧化剂)和煤油(燃烧剂)为燃料。助推器起飞质量 155.7 t, 其中推进剂质量 144 t, 可为全箭提供竖立状态支撑和助推飞行阶段 90%的推力及姿态控制, 是长征五号起飞的主要动力之源。

长征五号火箭助推器工作时间为 180 s。加注燃料完成后, 助推器的液氧箱大流量氦气加温增压输送系统, 能够创造满足液氧煤油发动机点火的条件; 飞行过程中, 助推发动机产生的推力, 通过头锥上的前捆绑点传递给芯级, 在头锥不足 0.1 m^2 前捆绑点处, 需要承受 300 多 t 的偏置集中力载荷。助推器推进剂耗尽后, 芯级与助推器之间的前后捆绑连接结构解锁, 实现助推器与芯级的安全分离。

2 落区监测的主要问题

运载火箭捆绑助推器后, 外形变得复杂, 助推器分离过程, 助推器与芯级飞行器相互干扰, 产生非定常流动, 气动干扰随时间变化剧烈[1]。按长征五号火箭设计飞行过程, 火箭起飞后约 17 s 进入程序转弯, 约 174 s 后四个助推器与火箭主体脱离。分离后的助推器残骸处于无控状态飞行, 受到各种随机干扰的影响, 存在影响在轨火箭运行与雷达观测、高速翻转、发生解体熔融、落点散布较大等问题[4, 6-7]。

火箭飞行轨迹基本位于海域: 长征五号运载火箭自海南文昌发射, 途经南海、西太平洋等海域, 该过程中, 陆基监测方式受地理位置和时间限制, 满足监测任务需求; 海基监测较陆基监测具有机动性强、无地表遮挡物等优势, 但海上监测在基础平台、动力环境、后勤补给等方面面临的困难, 也远非陆上监测所能比拟。

分离后助推器残骸运动状态复杂: 在继续爬高段内, 受初始角速度和气动力的综合作用, 其翻转角速度迅速增大, 头部冲前飞行状态为静不稳定状态, 姿态迅速发散。助推器在飞过顶点后, 在气动力的作用下, 飞行速度经历了加速和减速过程, 到最后实现重力与气动力平衡状态; 助推器翻转角速度出现先增大再减小的运动特点, 但攻角会逐步收敛, 最终以尾部冲前的方式返回地面[2]。

再入助推器残骸形态变化大: 再入稠密大气环境后, 受到气动力、气动热的复杂作用。气动加热会导致助推器残骸金属材料的软化熔融和复合材料的热解烧蚀, 也会使材料物性或部件功能变化。气流剪切或飞行速度剧变引起的大过载均可能撕裂陨落体使之解体[8]。

落点情况复杂: 助推器残骸再入属于无控状态飞行, 落点散布评估是一个典型的问题。强大而复杂的的气动力/热作用, 会导致助推器残骸解体分成若干碎片。同时, 残骸中某些部件或材料涉及技术核心或商业秘密, 应确认其在失控坠落海面前被烧尽或沉入海底, 而不应在海面漂浮。

3 落区监测技术

船基监测是目前最常见的海洋监测调查方法。经过不断进步与发展, 现具有测量方法多样化、观测内容丰富、海上测量和资料传递处理一体化等特点, 而火箭助推器残骸落区监测是重要的新内容。

3.1 监测模式

火箭残骸落区监测工作是一项十分复杂的系统工程, 残骸坠落过程时间很短(5 min 左右), 各监测环节之间都有着密切联系, 监测框架内的变化都可能对任务带来巨大的影响。

现场监测前, 利用火箭残骸落点算法模型, 预估落点位置及坠落时间。根据落点区域位置、水深地形及水文气象概况等条件, 选择适宜海上监测船只, 设定监测位置及搜寻区域形状。

抵达现场后，利用船载自动气象站和漂流浮标技术对海面气象条件及海流等水文条件进行监测，利用探空火箭、探空气球等技术对海洋高空气象条件监测。监测获取的水文气象等海洋环境基础资料，既可以实时修订火箭残骸落点模型计算结果，也用于研究气象条件对火箭残骸飞行坠落过程及光学跟踪测量系统运行的影响机理。

监测目标出现后，组合利用光学监测、电磁学监测等技术方法，定点实现多模式监测数据的综合采集与融合分析，借助电磁学与光学传感器数据的互补性，在监测资源有限的前提下，增加目标搜寻成功概率，从而实现对火箭残骸的探测与跟踪。

获取火箭残骸的飞行和坠落过程数据后，在人工识别火箭残骸的出现时间、数量、空间态势基础上，对雷达数据、可见光/红外图像进行融合计算，更加准确全面的描述目标、综合发掘更多目标信息。

3.2 海上监测平台

海洋调查船是用于海洋科学研究、应用技术实践以及测量勘探等船舶的统称，是认识海洋、进行海洋调查与研究的重要平台和必要工具[9-10]。承担火箭助推器残骸海上落区监测平台任务的海洋调查船应具备较好的抗风浪与航区的普适性，降噪减震静音能力，现场观测设备的维护维修能力、观测大数据的处理能力等现场支持能力[11-12]，尤其应具备动力定位能力。

动力定位系统是使调查船实现动力定位所必需的一整套硬件及软件系统，使船舶不借助锚泊的作用，利用自身搭载的各类传感器测出船舶的运动状态与位置变化，以及外界风力、波浪、海流等扰动力的大小与方向，利用计算机进行复杂的实时计算后，使船舶主副推力装置产生适当的推力与力矩，以抵消扰动力，从而使船舶尽可能保持船位和艏向[13-14]。近年来，动力定位系统已成为国内外新建深远海综合调查船的标准配置[15-16]。承担火箭助推器残骸海上落区监测平台任务的海洋调查船需具备 DP1 及以上的动力定位系统，需在 5 级海况、6 级风、1.5kn 流情况下，保持定位精度优于位置±5m、角度±10°)，从而实现特定的环境条件下，自动保持船舶的位置和艏向(同时还应设有独立的集中手动船位控制和自动艏向控制)稳定，保障监测任务顺利实施。

3.3 监测关键技术

3.3.1 光学监测

与电磁学监测方法相比，光学监视方法具有直观性强、精度高、不受地面杂波干扰影响等优点。有研究人员，在分析火箭残骸的空间环境、其本身可见光特性和红外特性后，认为利用 CCD 类固体成像技术、光电成像技术可 50 km 处观测到火箭残骸目标[17]。

火箭残骸坠落过程中受大气摩擦主动发光，利用电荷耦合元件 CCD 图像传技术可非常便捷寻找记录目标，但使用上受自然气候条件影响较大，苛刻的光学可见条件限制了它的作用。随着光电子技术的发展，观测频谱逐渐从可见光向更宽的谱段延伸，突破视见阈的限制，完成成像[18]。海上光电成像技术可利用船载光电跟踪监测系统，对海上、空中目标开展搜索、监测及取证记录的技术手段，具有全天候、智能化程度高、覆盖面广、不受无线电波干扰、事件记录稳定清晰的特点[19-20]。

船载光电跟踪监测系统安装于海上大型调查、执法及军事船只上，船载光电取证系统主要由舱外光电平台、舱内显控平台和接口连接装置组成。舱外光电平台由可见光摄像机、红外热像仪、连续旋转的球形旋转伺服平台等组成，安装于船只的顶甲板顶部。伺服平台利用稳定控制器组构成的内稳定回路，隔离掉船体受风浪引起的横摇、纵摇、艏摇，为光学系统及传感器组合提供一个近乎稳定的基准面，从而保证所摄取的目标图象清晰稳定；同时在方位角、俯仰角上，利用外部引导信号或操纵杆，对目标进行搜索，经伺服控制、驱动回路构成空间位置环，具有目标跟踪功能[21]。

光学监测技术可获取火箭残骸的运动轨迹、姿态、运动中发生的事件、目标的红外辐射和视觉(可见光)特征，为后续辐射、光度分析提供数据。

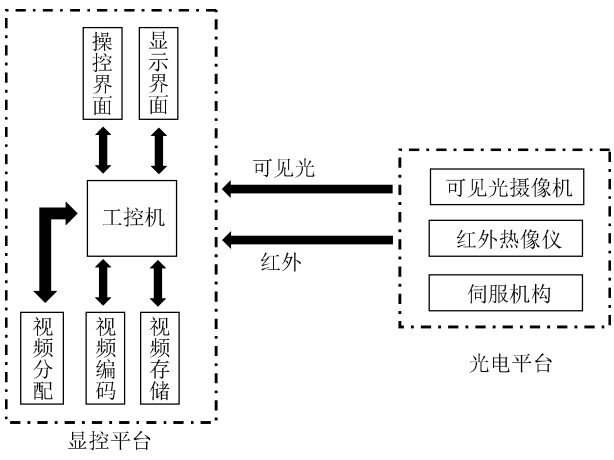

图 2 船载光电跟踪监测系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of obtaining evidence surveillance optics-electric shipboard system

3.3.2 电磁学监测

雷达是空间目标探测的重要手段，包括单脉冲雷达技术、相控阵雷达技术、天基雷达技术等。船舶 X 波段雷达技术，可设计用来探测与定位周边 50 km 范围内的火箭残骸入海时所溅起水柱。相控阵雷达即相位控制电子扫描阵列雷达，其工作基础是相位可控的阵列天线(“相控阵”由此得名)[22]，具有波束转换快、多目标的测量跟踪的优势。与光学监测设备、遥测设备相比，雷达跟踪测量技术可精确测量目标距离、方位及速度等目标参数，是航天测控系统的常用测量设备，但无法获取目标动态变化影像资料。

相控阵多目标跟踪测量技术出现于 20 世纪 70 年代，其工作方式区别于常规多功能相控阵阵雷达技术，其采用两维相扫和方位、俯仰两维机械扫描相结合体制成的综合应用方法，在目标数、大角速度、角距离捕获与搜索速率的工作方式、解距离模糊具备独特优势，实现自主搜索捕获及同时跟踪测量多个目标的能力，为后续的处理提供详实的数据支撑[23]。中国电子科技集团公司第十四研究所研制的车载式多目标跟踪测量雷达是我国第一部相控阵测量雷达，完成了“神舟 5 号”载人飞船箭船联合体、逃逸塔、助推器、一子级和整流罩 5 个目标的跟踪测量任务[24]，该技术具备简化改造后在调查平台上应用的前景。

4 海上监测实践

2017 年 7 月 2 日 19 点 23 分 23 秒，长征五号遥二运载火箭点火升空。遥二运载火箭助推器按照预定程序完成各项动作后，在文昌发射场东侧 100 km 余处与火箭芯级正常分离。分离后，在距离发射场 800 km 余处的南海东北部陆坡坡脚处入海，入海点水深 3 472 m。国家海洋局南海分局组织 2 条 4 000 t 级以上的调查船组成海上编队，对遥二火箭助推器残骸坠落过程的运动轨迹与状态、物理过程与现象、落点散布情况以及记录落区的气象数据，并在坠落区开展了海面漂浮物搜索和现场状况记录(见图 3)。

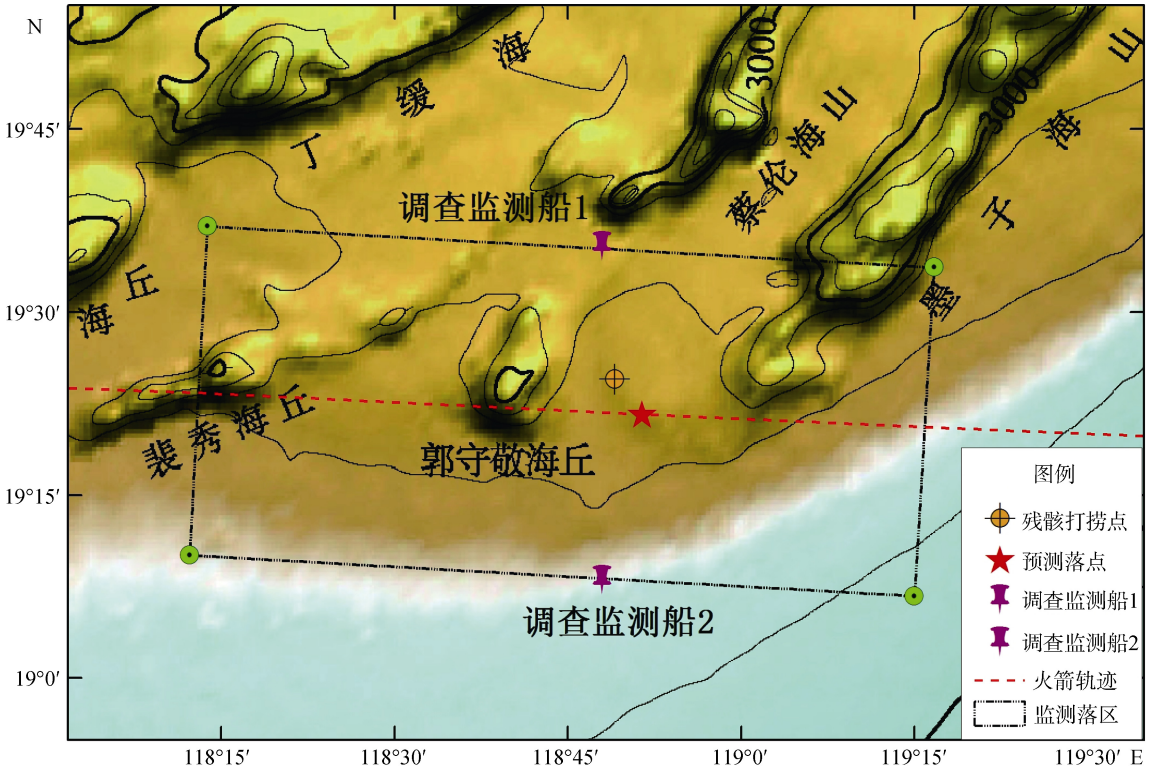

图 3 现场监测情况图

Fig. 3 Location of observing area

采用基于空气动力条件修正的抛物线轨迹(高度 30 km 以下)和椭圆轨迹(高度 30 km 以上)积分法模型算法预测的助推器残骸落点。并以预测落点为中心按火箭轨迹方向 100 km，垂直火箭轨迹方向 40km 的原则划定监测落区，2 艘监测船分别固定于预测助推器残骸落点南北两侧 20 km 处，并将船艏向垂直

火箭飞行轨迹，实施现场监测。

本次监测采用多光谱船载光电跟踪监测设备(视方位角: –170°~+170°、俯仰角: –20°~+60°)及 22 倍光学变焦 CCD 类固体成像器完成了现场光学监测任务；利用 CF-06-A 探空仪记录高空气象数据，采用 DJQ-1 型船舶自动气象站进行全程海面气象观测，投放 MDO3 系列之 odi 表面漂流浮标获取落区附近海域的海流流场信息；收集整落区附近海域的 ARGO 浮标数据, OSCAR、AVISO 的准实时地转流资料，结合投放漂流浮标轨迹信息利用 ROMS 海流预报系统计算落区海域的漂浮物漂流路径；结合预测的漂移路径，两条监测船相向对开，完成了海面漂浮残骸的搜索打捞工作。

2017 年 7 月 2 日 19 点 26 分 3 秒, 2 艘监测船舶同时发现长征五号遥二运载火箭从地平线升起，并随之组合使用载光电跟踪监测设备、CCD 固体成像器全程记录了助推器与芯级分离、4 个助推器残骸的光学轨迹、助推器残骸再入尾焰，助推器解体现象等物理现象与过程，至 19 时 32 分 26 秒, 4 个助推器相继入海，坠落点贴近火箭前进路线。

在模型仿真结果的基础上，结合获取的落区水文气象观测资料，对获取的光学数据进行判读、识别及分析后，对残骸落点进行了进一步预判。随后，2 条监测船舶，前往目标海域实施了历时 20 h 的漂浮残骸搜索工作。在模型预测落点 NW 侧 6.9 km 处(见图 3)，发现并成功打捞 2 个氦气瓶(见图 4)。残骸打捞点与海面漂浮物路径预测结果较为吻合。经现场搜索，未发现助推器残骸发动机等关键部件的漂浮物。

图 4　海面搜寻到的助推器残骸

Fig. 4　The debris of a booster on the surface of the sea

5　结论与建议

通过经验借鉴和集成创新，探索了在海洋调查船平台上综合利用光学、电磁学等监测技术方法，开展助推器残骸空中观测，同步采集积累水文气象数据的火箭助推器残骸海上落区监测技术体系。在南海东北部海域，成功组织实施了 2 次海上监测，响应了航天事业对海洋调查监测技术提出新需求，为长征火箭的顺利研制和故障分析做出了贡献，以实际行动践行了创新驱动发展战略和军民融合发展战略。

(1) 通过 2 次海上监测，发现火箭助推器残骸空中运动状态与现有理论分析基本一致；助推器的薄壁结构部分在下落过程会发生至少一次解体；在海面成功打捞到 2 个助推器氦气瓶，推测发动机等关键部件应沉入海底。

(2) 通过 2 次海上监测，发现残骸落点贴近火箭前进路线，与仿真结果较为接近；积累的助推器空中飞行过程的物理现象资料，落区高空及海面气象水文资料，对于验证和修订落点计算模型起到良好作用。

(3) 结合现场监测经验，建议开展低噪声 CCD 焦平面阵列技术、信号及图像处理等先进技术，进一步研究高精度目标跟踪技术以及目标特征参数提取与处理技术，提高助推器残骸探测与识别能力。

(4) 结合现场监测经验，建议在专业海洋调查船一体化集成跟踪测量雷达、光电跟踪监测设备、水面无人艇、水下无人自治设备(AUV)，构建空间-海面-水下立体监测技术体系，实时获取监测目标的相对位置及坐标等关键信息，并未后续打捞工作奠定基础。

参考文献:

[1] 王巍，刘君，刘冰，等. 火箭助推器从芯级飞行器动态分离过程的数值模拟[J]. 宇航学报，2006，27(4): 766-770.
Wang Wei, Liu Jun, Liu Bing, et al. Numerical simulation the process of the rocket booster separating form spaceship[J]. Journal of astronautics, 2006, 27(4): 766-770.

[2] 陈彬，邓舞燕，高家一，等. 运载火箭助推器再入姿态稳定性研究[J]. 导弹与航天运载技术，2015，3: 13-15.
Chen Bin, Deng Wuyan, Gao Jiayi, et al. Research on reentry attitude stability of boosters[J]. Missiles and Space Vehicles, 2015, 3: 13-15.

[3] 吕斐凯，贺卫亮. 运载火箭助推器分离后的姿态和轨

迹分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2015, 1: 13-16.
Lü Feikai, He Weiliang. Attitude and Trajectory Simulation for Separated Rocket Booster[J]. Missiles and Space Vehicles, 2015, 1: 13-16.

[4] 王求生, 王喆, 王竞男. 助推器分离飞行姿态地面模拟控制与仿真分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2015, 4: 62-65.
Wang Qiusheng, Wang Zhe, Wang Jingnan. Ground Flight Control and Simulation Analysis of Rocket Booster Separation Flight Attitude[J]. Missiles and Space Vehicles, 2015, 4: 62-65.

[5] 国家海洋局南海分局. 长征五号运载火箭飞行任务火箭助推器残骸落区监测报告[R]. 广州: 国家海洋局南海分局, 2017.
South China Sea Branch of the State Oceanic Administration. Report of observing launch vehicle booster of CZ-5 on the sea[R]. Guangzhou: South China Sea Branch, State Oceanic Administration, 2017.

[6] Carbon S L, Larson E W F. Modeling of risk to air-craft from space vehicle debris[C]//AIAA. Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit San. Francisco: AIAA, 2005: 415-425.

[7] 夏喜旺, 荆武兴, 李超勇. 火箭助推器在空间中对雷达观测的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(9): 6-11.
Xia Xiwang, Jing Wuxing, Li Chaoyong. Influence of rocket booster on radar observation in space[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(9): 6-11.

[8] 唐小伟, 张顺玉, 党雷宁, 等. 非常规再入/进入问题探讨[J]. 航天返回与遥感, 2015, 36(6): 11-21.
Tang Xiaowei, Zhang Shunyu, Dang Leining, et al. Discussion on unconventional reentry/entry[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2015, 36(6): 11-21.

[9] 张洪欣, 于灏, 马龙, 等. 海洋调查船业务化运行保障关键技术进展[J]. 2015, 34(3): 116-121.
Zhang Hongxin, Yu Hao, Ma Long, et al. Study on the progress of key supporting technologies for the regular operation of marine research vessels[J]. Journal of Oean Technology, 2015, 34(3): 116-121.

[10] 李尉尉, 王慧祺, 夏登文, 等. 中国海洋调查船现状及发展思考[J]. 海洋开发与管理, 2012, 5: 41-43.
Li Weiwei, Wang Huiqi, Xia Dengwen, et al. Current situation and prospect of china's ocean research vessels[J]. Ocean Development and Management, 2012, 5: 41-43.

[11] National Research Council. Science at Sea: Meeting Future Oceanographic Goals with a Robust Academic Research Fleet[M]. Washington D C: The National Academic Press, 2009: 107.

[12] Pittenger R F. Oeeanoraphic research ships: history and future needs[J]. The Journal of Ocean Technology, 2013, 8(2): 1-8.

[13] 何崇德. 船舶动力定位系统的应用与实践[J]. 中国造船, 2004, 45(Z): 279-290.
He Chongde. Application and practice of dynamic positiong of vessels[J]. Shipbuilding of China, 2004, 45(Z): 279-290.

[14] 周宁. 中国远洋调查船发展现状及未来设想[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(S1): 15-20.
Zhou Ning. Current situation and prospect of china's ocean research vessels[J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(S1): 15-20.

[15] 魏巍, 马媛, 苏东甫. 深水区海底勘察装备技术发展现状与趋势[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(8): 12-15.
Wei Wei, Ma Yuan, Su Dongfu. The state and development trends of technology for seabed exploration equipment in the deep-water area[J]. Ocean Development and Management, 2015, 32(8): 12-15.

[16] 刘松, 左文锵, 隋智享. 国外海洋科考船现状及总体设计技术发展方向[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(S1): 8-14.
Liu Song, Zuo Wenqiang, Sui Zhixiang. The present situation and development trends about design of research ship overseas[J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(S1): 8-14.

[17] 陆浩然, 孙戎, 张义超, 等. 火箭残骸空间目标特性与观测可行性分析[J]. 航天控制, 2017, 35(1): 42-47.
Lu Haoran, Sun Rong, Zhang Yichao, et al. Rocket wreckage space objectives characteristics and observation feasibility analysis[J]. Aerospace Control, 2017, 35(1): 42-47.

[18] 白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010: 1-7.
Bai Tingzhu, Jing weiqi. Principle and Technology of Photoelectric Imaging[M]. Beiing: Beijing Institute of Technology Press, 2010: 1-7.

[19] 杨勇智. 船载光电取证系统图像自动跟踪若干问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
Yang Zhiyong. Research on ship mounted electroptical evidence obtaining system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.

[20] 崔麦会, 周建军, 陈超, 等. 船载光电成像三轴自主稳定平台控制回路设计[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(4): 810-812.
Cui Maihui, Zhou Jianjun, Chen Chao, et al. Control loop design of shipboard optoelectronic imaging three-axis independent stabilized platform[J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(4): 810-812.

[21] 潘平. 船用光电取证实时跟踪技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
Pan Ping. Research on real time tracking technology of ship mounted electroptical evidence obtaining system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and

Technology, 2006.
[22] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
Zhang Guangyi. Principle of Phased Array Radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
[23] 赵绍颖, 华丛. 相控阵跟踪测量雷达工作方式设计与特点[J]. 现代雷达, 2006, 28(7): 1-3.
Zhao Shaoying, Hua Cong. Design and Feature of operation modes in phased array instrument radar[J]. Modem Radar, 2006, 28(7): 1-3.
[24] 杨文军, 董树人. 多目标跟踪测量雷达在载人航天测控中的应用[C]//中国宇航学会飞行器测控专业委员会. 2004 年航天测控技术研讨会论论文集. 厦门: 中国宇航学会, 2004: 295-299.
Yang Wenjun, Dong Shuren. Application of multi-target tracking radar in TT&c technolog of manned space flight[C]// Chinese Astronautics Aircraft Control Specialized Committee Aircraft Measurement and Control Specialized Committee. 2004th Seminar about Astronautics Measurement and Control System and Technique. Xiamen: Chinese Astronautics Aircraft Control Specialized Committee, 2004: 295-299.

Exploration and practice of technology on observing launch vehicle booster on the sea

WEI Wei[1, 3], WANG Wei-ping[1], LI Guang -mei[2], ZHANG Zhi-qiang[2], ZHANG Cheng-jie[2], HE Hui-zhong[1], XIE Wu-feng[2], YIN Zheng-xin[1], LI Zheng-yuan[1]
(1. South China Sea Marine Survey and Technology Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China; 2. South China Sea Branch of the State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Received: Nov. 1, 2017
Key words: launch vehicle booster; tracking and telemetry technology; area of level point; rocket's debris

Abstract: Aiming at the challenges faced by observing Launch vehicle booster on the sea, the study on the the content of observation and platform and key technoloy is implemented. The technoloy system which integrated optics and electromagnetics and physics oceanography methods to observe Launch vehicle booster on the sea is provided On this basis, the observation task of Launching process of CZ-5 has been successfully carried out. It provides technical support for the research of the laws of reentry and disintegration of rocket debris and the design and selection of the drop zone. For the purpose of providing beneficinal reference for the technology innovation in the future, the suggestions for developing marine tracking and telemetry technology of rocket are proposed.

(本文编辑: 刘珊珊)