

应急常态化的测控网资源调度管理模式研究

张 虹, 任 勃, 杜晓军, 王子溪, 陈志远
(西安卫星测控中心 西安 710043)

摘要: 随着在轨卫星数量的迅速增加, 卫星应急测控需求的立即响应已趋于常态化。为更好地满足应急常态化条件下航天测控网资源调度系统的高时效性要求, 提高应急任务满足率, 文章分析了传统应急条件下资源分配方法所存在的问题, 对应急常态化的资源申请框架进行了完整重构, 并针对该框架中的任务非全弧段分配、合作博弈及优先级模型等关键技术进行了深入研究, 使得资源的使用更加合理, 可有效提高应急申请的响应时效。

关键词: 优先级; 报答系数; 应急常态化; 冗余度

中图分类号: TP302; V556

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2023)05-0028-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230614001

引用格式: 张虹, 任勃, 杜晓军, 等. 应急常态化的测控网资源调度管理模式研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(5): 28–34.

Research on resource scheduling management model of normalized emergency response in TT&C network

ZHANG Hong, REN Bo, DU Xiaojun, WANG Zixi, CHEN Zhiyuan
(Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

Abstract: With the rapid increase of the number of in-orbit satellites, satellite emergency requests have gradually become normalization. In order to meet the high real-time effectiveness demands of normalized emergency response in space TT&C network resource scheduling system, and improve the satisfaction rate of emergency tasks, this paper analyzes the existing issues of traditional resource scheduling method under emergency conditions, and proposes a complete framework of emergency resource scheduling. After that, the key technologies of the framework such as task non-full-arc assignment, cooperative game and priority models are discussed. Based on the new framework, the resource utilizations are more reasonable and the response efficiency of emergency application is improved effectively.

Keywords: Priority; Reward coefficient; Normalized emergency response; Redundancy

Citation: ZHANG Hong, REN Bo, DU Xiaojun, et al. Research on resource scheduling management model of normalized emergency response in TT&C network[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(5): 28–34.

引 言

随着卫星技术的不断发展, 卫星自主能力大幅提升, 卫星在地震、火山爆发和森林火灾等应急事件中扮演着越来越重要的角色。当应急事件发生时, 可快速利用卫星资源实现监测, 为灾害预警、决策、评估提供重要的数据支撑。应急事件突发性强, 时效性要求高^[1-6], 任务必须在规定期限内完成。随着应急任务趋于常态化, 各种应急极限情况增加, 申请存在秒级响应需求, 对响应时效提出了更高要求^[7-12]。传统应急申请优先使

用空闲资源申请即可满足需求, 时效性高。但随着在轨卫星数量大幅增长, 测控资源紧张情况日益凸显, 设备跟踪接近于无缝衔接, 很难在两圈间隙插入一个应急任务^[13-18]。无空闲资源的应急调整主要通过资源的转让挪用、搜索迭代方法实现, 该方法在搜索一次时等待时间较短, 资源挪动复杂度随层数增加而大幅增长, 穷举搜索方式因复杂度过高不能满足快速转让要求^[19,20]。文章对应急申请可行性进行分析, 构想完整的应急资源申请框架, 该框架的运用使资源使用更合理、有效提高应急申请时效, 最后对需要突破的关键技术进

行分析。

1 一般应急申请响应流程

1.1 卫星应急情况分析

随着卫星数量大幅增加,卫星自主能力提升,卫星的各类应急申请已趋于常态化。资源应急申请主要包括:

① 卫星故障、应急发令、碰撞预警等卫星自身应急申请增加测控资源。

② 地震、森林火灾、洪涝灾害、火山爆发等突发的自然灾害等增加卫星观测的应急资源申请。

③ 其他高动态、高时效的任务应急申请增加测控资源。

各类应急资源申请一般都是无预兆、突发的情况,具有高时效要求,有的应急申请必须秒级响应,若错过卫星观测时机、应急发令、卫星抢救最佳时间等将造成严重后果。因此,提高应急申请时效,是满足各类应急申请首要任务^[11-14]。

1.2 基于空闲资源的应急申请响应流程

一般应急申请主要用于对响应时效性要求在分钟级以上的普通应急任务,资源调度中心通过空闲资源快速整合实现资源分配。任务响应流程如图1所示,当应急申请任务到达时,如果搜索到现成空闲资源可快速满足任务需要,直接分配该空闲资源,这种申请时效性满足各类任务需求;如果未发现可直接使用的空闲资源,调度算法基于图搜索的方式,搜索是否能通过多次迭代、资源转让,腾挪出位置合适的空闲资源供当前任务使用。

资源挪动转让本质上是一个图搜索问题,基本做法如图2所示,通过挪动各任务资源预分配计

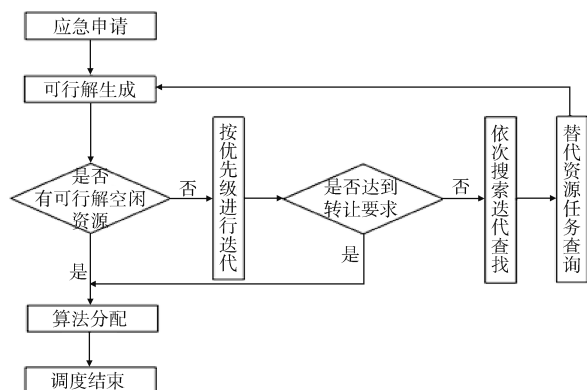


图1 空闲资源应急申请流程

Fig. 1 Spare resource emergency application process

划,为资源不合用的任务转让出可用空闲资源。但是由于资源挪动复杂度随层数增加而大幅增加,穷举搜索方式因复杂度过高不能满足快速转让要求,时效性低。基于空闲资源的应急申请主要针对空闲资源充足的情况,若资源紧张时,算法需要进行不断地询问、搜索、迭代,其时效性随着迭代次数增加而呈指数级上升,很难满足应急任务的高时效性要求。现在的卫星数量大幅提升,需要的测控资源越来越多,测控系统面临的星多站少、资源争用问题日益突出,设备几乎无空闲时段来直接响应应急申请任务,并且设备在例行的两个任务跟踪间隙是很难插入一个应急任务,因此基于空闲资源应急申请响应的流程主要存在的问题包括:

① 测控资源面临资源争用较多,资源冲突严重,设备很少有可直接使用的空闲资源响应应急资源申请。

② 应急申请需要进行迭代搜索、资源转让挪用等需求时,随着迭代次数增加,响应时间大幅增加,响应时效不高。

③ 资源的转让挪用是基于一定的优先级进行转让,该算法在搜索时比较盲目,对所有可转让资源依次进行询问、迭代、搜索效率不高。

④ 应急资源的调整应遵循“影响域最小”的原则,即对其他任务的影响尽可能小,该算法在资源转让挪用过程中,不考虑对其他任务的影响,因此不利于计划的稳定。

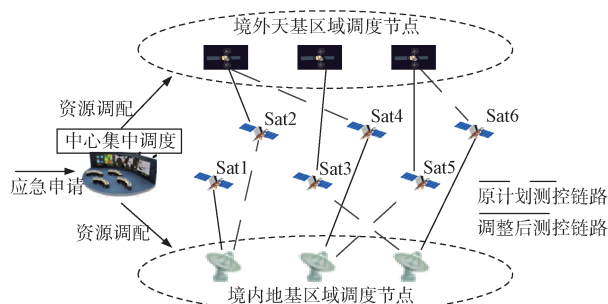


图2 资源转让搜索示意图

Fig. 2 Resource transfer search schematic

2 应急常态化调度模式框架

文章研究的应急常态化条件下测控网调度本质上是一个多卫星用户协同、星地协同式的调度框架,各用户依据应急任务需求、紧急程度等发

送应急申请, 卫星用户中心在向资源调度中心直接申请资源的基础上, 还需要具备一定的空闲资源博弈优选和中心间资源协调转让能力, 以应对秒级时效要求, 完整的应急调度框架见图 3。该框

架下, 卫星用户之间、卫星用户与资源调度之间均存在数据交换关系, 与传统的应急申请模式相比, 该模式主要在时效性上更高, 算法不需要盲目地进行反复询问、查询、搜索导致时效无限期延长。

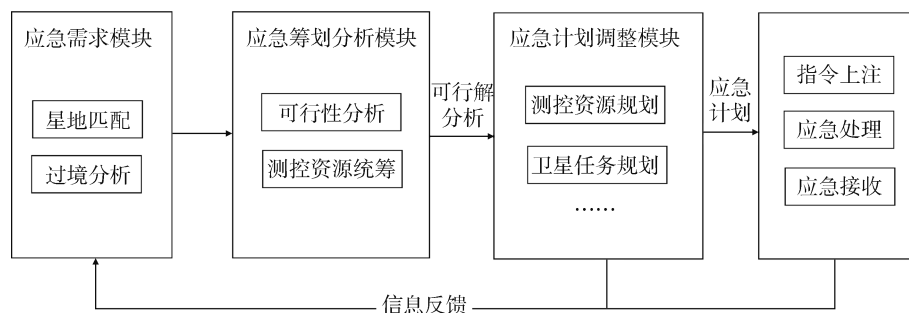


图 3 完整的应急调度框架

Fig. 3 Complete emergency scheduling framework

完整的应急常态化测控网资源申请主要包括以下步骤:

① 用户根据应急任务需求进行筹划, 发送应急资源申请。

② 测控网资源调度系统响应用户申请, 进行可行解分析, 生成优先级合理的可行解。

(1) 可行解进行排序, 若有满足可行解的空闲资源, 直接满足要求, 向用户发送应急响应。

(2) 若无空闲资源, 按报答系数排序, 向报答系数最高的可转让资源发起申请。

(3) 若报答系数最高的资源有可转让资源, 算法进行资源挪动转让, 并为被转让资源分配满足要求的资源。

(4) 若报答系数最高的资源无法满足资源转让, 系统转入下一模式进行搜索。

③ 算法按优先级依次进行可行解搜索。

(1) 系统对可行解进行分析, 按优先级进行排序, 同等条件下, 优先查找“影响域最小”的可行解。

(2) 算法搜索、查找其他可转让资源。

(3) 若无可使用资源, 向用户发送无资源响应。

④ 特殊情况下, 人工直接进行干预, 满足用户应急需求。

空闲资源的应急申请响应时效最高, 申请即满足, 在资源调度过程中, 尽可能通过资源的合理利用增加设备空闲时段, 任务非全弧段分配可有效增加设备空闲时段, 因此, 对任务非全弧段

分配进行深入研究也是非常有必要的。

3 关键技术分析

3.1 合作博弈资源申请流程

一般的应急申请使用简单的空闲资源抢占甚至“优先级”控制下的已分配资源转让抢占, 该做法是典型的非合作博弈过程。非合作博弈往往导致恶性竞争, 影响资源使用效率。在非合作模式下, 用户盲目地根据自己掌握的不准确信息决策, 往往导致资源抢占冲突概率加大, 增加资源申请时延。

为实现应急申请秒级的资源响应速度, 可考虑从合作博弈角度出发, 设计如图 4 所示的卫星任务中心快速申请资源流程。

卫星任务中心根据自身任务需要, 当应急申请空闲资源失败 1 次或者未搜索到合适的空闲资源时, 不再寻求对其他空闲资源的博弈, 转为搜索潜在的可转让给自己使用的资源, 选择曾经请求自己配合转让资源次数最多的卫星任务中心 (即报答系数最高的卫星任务中心), 发起资源转让配合申请, 如果成功, 算法完成计划快速更新, 如果未协调到合适的资源, 卫星任务中心可以协调人工干预或降低响应时效要求, 转为一般应急申请的迭代进行资源搜索、查询。

合作博弈应急申请响应仅进行 1 次空闲资源搜索, 反复地进行低成功概率迭代、搜索将导致无谓的长时等待。报答系数的引入主要是为了引导各卫星任务中心相互配合, 鼓励各任务中心在使

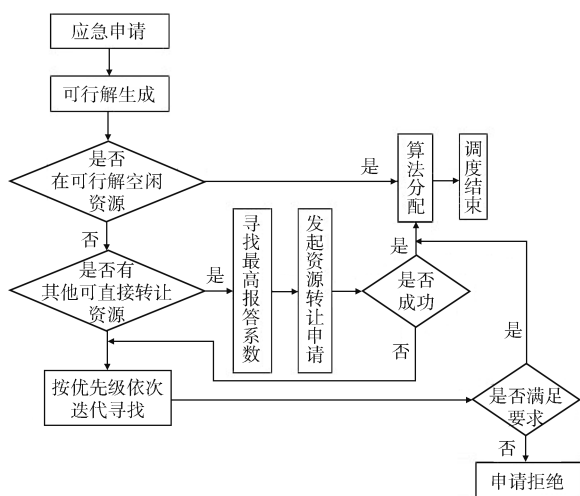


图 4 合作博弈响应流程

Fig. 4 Cooperative game response process

用资源时更精细、更合理，其他用户有应急申请时，积极配合进行资源转让、释放，以便提高自己在其它任务中心的报答系数，便于自己下次有

应急申请时，其他用户也能快速进行资源转让，提高资源总体利用效率。

合作博弈应急申请的优势主要包括：

① 应急申请仅 1 次空闲资源搜索，时效性更高。

② 合作博弈减少算法反复询问、盲目迭代、搜索、查询导致的时效性不高的问题；同时加强各卫星用户之间互相配合、应急申请成功率更高。

③ 报答系数的引入可以使卫星用户使用资源过程中更加精细、合理，提高资源利用效率；同时用户为未来的应急申请提前筹划，时效性更高，且可以增加后续应急申请成功率。

3.2 任务非全弧段算法分配

任务非全弧段算法分配能够节省测控资源，增加设备空闲时段，提高设备使用效率。空闲时段的增加是提高应急申请响应时效的最直接方法，具体分配见图 5。

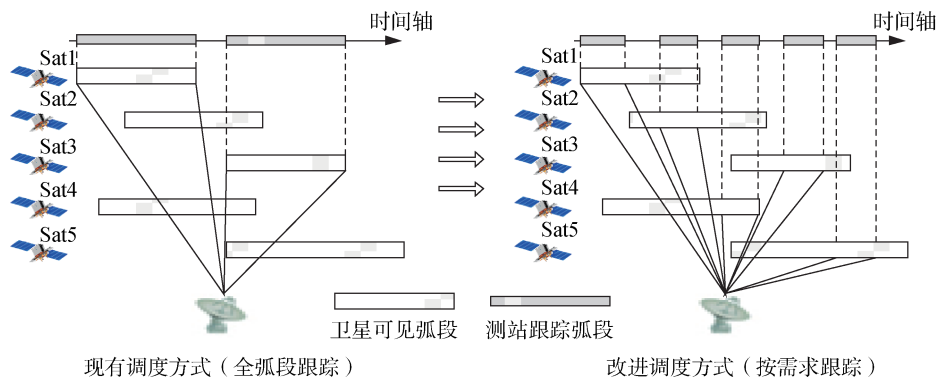


图 5 非全弧段算法分配示意图

Fig. 5 Schematic diagram of partial arc algorithm allocation

一般的资源分配是全弧段分配，卫星进入地面站可观测范围后，地面站设备开始跟踪卫星，卫星飞离地面站设备可观测范围后停止跟踪，地面站设备空闲或进入下一个任务准备。其实在很多情况下，卫星的每次测控工作仅需要很少的时间就能完成，每一次的地面站设备不需要全弧段跟踪，卫星完成当次工作后，地面站设备可直接断开与卫星的测控联系，其空闲时段实时更新，可用于应急任务的响应，这在一定程度上增加了设备的空闲时段，提高了单套设备使用效率，同时若有应急任务时，空闲时段的应急响应是时效最高的应急申请模式。

任务非全弧段分配算法要求资源管理方更精

细地掌握卫星的实际需求，需要与卫星用户做好沟通，对卫星的需求进行分类标注。

3.3 合理的优先级规划

任务的优先级是多用户同时申请资源必须遵循的判据，优先级的合理规划能有效提高应急任务的响应时效。

一般应急申请时，若无空闲资源，算法会按既定优先级进行可转让资源查找，资源的转让是由低优先级任务为高优先级任务进行转让，但低优先级的任务也有重要资源需求的时候，不是任何时候资源都可以转让；同样，高优先级的任务在某些时刻也可以为低优先级的任务进行资源转让，因此优先级设置是非常复杂且需动态调整，

如何进行优先级规划需从以下4个方面进行考虑:

① 从影响度进行规划, 影响度包括应急申请来源及属性, 这是优先级规划首先要进行考虑的。

② 从应用价值进行规划, 应用价值也就是应急申请主要用于卫星的工作内容。

③ 从卫星平台价值进行规划, 主要包括卫星的属性、卫星的健康状况等。

④ 从卫星服务特性进行规划, 也就是从应急申请的紧急程度、关键等级等。

优先级的规划需要考虑的内容较多, 如何对每项内容进行加权, 以及如何设置加权系数, 最终确定各卫星的优先级等级还需要进行深入研究, 且优先级的设置随着卫星使用寿命、卫星健康状况、卫星需求变化而变化。

3.4 影响域最小局部最优

在应急申请过程中, 不可避免地要进行资源转让, 低优先级的任务为高优先级的任务进行资源转让, 或向报答系数高的卫星进行资源转让等, 资源的转让将引起计划的调整。一般情况下, 各卫星用户希望发布的卫星跟踪计划稳定, 卫星的常规测控工作, 比如卫星的指令上注、实时监测等是按卫星跟踪计划进行安排, 应急计划的到来

导致常规计划的调整从而影响其他卫星任务, 不但影响其他卫星计划的取消与调整, 而且要涉及到卫星指令的取消、更改、延迟, 应急调整影响范围较广, 风险大。因此应急申请时, 资源的调整尽量满足快速高效, 同时遵循“影响域最小, 局部最优”原则, 需从以下3个方面进行考虑;

① 采用合作博弈的资源申请流程, 尽量减少盲目的迭代导致资源调整过多, 影响其他任务跟踪计划。

② 算法搜索查找时, 在同等条件下, 选取计划调整小的可行方案进行资源转让。

③ 其他情况, 选取转让次数少的可行解。

4 实例分析

4.1 合作博弈模式下资源应急申请结果

选取60颗卫星和分布在不同点位的5套设备, 按设备负荷接近60%、70%、80%的测控需求进行设置。由于卫星轨道不同, 同时过境时间存在差别, 因此验证结果和选取的卫星型号有关。为充分验证该模式申请的有效性, 本次验证选取轨道高度在1 000 km左右的卫星, 卫星资源争用情况比较突出, 验证结果见表1。

表1 应急申请结果分析

Table 1 Result analysis of emergency application

设备负荷	应急申请/圈	传统申请满足/圈 平均响应时间/min	合作博弈满足/圈 平均响应时间/min	满足率提升
60%	50	47(6 min 含人工干预)	50(0.5 min)	6.0%
70%	50	43(10 min 含人工干预)	50(0.6 min)	14%
80%	50	37(12 min 含人工干预)	47(0.6 min)	20%

从表1分析, 采用合作博弈模式可极大提高系统平均响应时间, 提高任务满足率; 尤其在设备负荷逐渐增加的情况下, 传统的应急申请模式通过人工干预资源查找很难完成应急申请。人工不断进行资源挪动查找, 耗时耗力且满足率低, 而在合作博弈模式下, 系统通过寻求报答系数可极大缩短响应时间, 提高任务满足率。

4.2 任务非全弧段算法分配应急申请结果

通常情况下, 随着应急圈数的增多, 可直接应急的空闲资源逐渐减少。为满足应急申请, 需要经过人工干预资源挪动来满足用户需求, 人工干预应急效率低且满足率低, 采用非全弧段分配

模式可有效增加申请满足率。本次验证选取设备负荷较大的3个区域共5套设备, 选取轨道高度接近1 000 km的卫星(轨道高, 卫星与地面设备可见时间较长, 更能体现非全弧段的优势)进行模算, 3个区域设备负荷均接近或超过70%, 通过对某一周卫星应急资源申请按全弧段分配和非全弧段两种情况进行算法分配并分析, 结果如表2所示。

从表2分析可知: 随着应急申请数量的增加, 两个跟踪圈次之间空闲时间逐渐缩短, 很难完成全弧段模式的应急申请工作, 采用非全弧段分配, 可有效利用碎片化时间, 提升任务满足率。

表 2 两种模式算法分配结果

Table 2 Two pattern algorithms assign results

应急 申请(圈)	全弧段分配满 足(圈)	非全弧段分配 满足(圈)	满足率 提升
50	45	50	10%
60	51	60	15%
100	72	96	24%

5 结束语

测控资源应急申请已趋于常态化, 各类应急申请一般都无预兆、突发性强, 且要求时效性高。为更好地提高应急申请响应时效, 文章按优先级原则生成满足用户需求的可行解, 从合作博弈引入报答系数, 增加用户申请成功率。根据用户实际需求采用任务非全弧段分配, 增加设备冗余度, 可有效提高申请响应时效, 通过影响域最小、局部最优原则可极大提高资源分配的合理性。文章的研究对后续工程的应用具有积极的借鉴意义。

参考文献

- [1] 杨同智, 刘廷玉, 王杰, 等. 面向一体化测试与运管的航天器指令技术研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 1-9.
YANG Tongzhi, LIU Tingyu, WANG Jie, et al. Research on spacecraft instruction technology for integrated testing and operation management[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 1-9.
- [2] 王静巧, 杨磊, 庄超然, 等. 面向应急事件的卫星任务规划技术[J]. 航天返回与遥感, 2022, 43(3): 105-112.
WANG Jingqiao, YANG Lei, ZHUANG Chaoran, et al. Emergency-oriented satellite mission planning[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2022, 43(3): 105-112.
- [3] 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(7): 326114.
SUN Gang, PENG Shuang, CHEN Hao, et al. Multi-objective optimization method oriented to integrated scenario of TT&C resources and data transmission resources[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(7): 326114.
- [4] 付伟, 刘晓丽, 宋世杰, 等. 面向应急常态化的卫星任务管控模式研究[J]. 无线电工程, 2021, 51(5): 407-410.
FU Wei, LIU Xiaoli, SONG Shijie, et al. Research on operation mode of satellite mission control systems for emergencies[J]. Radio Engineering, 2021, 51(5): 407-410.

- [5] 刘保国, 张国亭, 郭永强. 北斗三号短报文低轨卫星测控应用研究[J]. 遥测遥控, 2021, 42(1): 1-6.
LIU Baoguo, ZHANG Guoting, GUO Yongqiang. Research on BDS-3 short message communication used in LEO satellites TT&C system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(1): 1-6.
- [6] 黄宇飞, 徐嘉, 白绍竣, 等. 卫星红外遥感技术及其在防灾减灾中的应用研究[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(5): 118-126.
HUANG Yufei, XU Jia, BAI Shaojun, et al. Satellite infrared remote sensing technology and its application in disaster prevention and relief[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2020, 41(5): 118-126.
- [7] 李塘, 王志生, 杨洋, 等. 一种航天测控系统可靠性量化计算方法[J]. 遥测遥控, 2022, 43(3): 24-30.
LI Tang, WANG Zhisheng, YANG Yang, et al. A reliability analysis method for space TT&C system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(3): 24-30.
- [8] 和海霞, 武斌, 李儒, 等. 面向自然灾害应急的卫星协同观测策略研究[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(6): 91-101.
HE Haixia, WU Bin, LI Ru, et al. Research on requirements and strategies of satellite cooperative observation for natural disaster emergency response[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(6): 91-101.
- [9] 陈曦, 李京. 卫星技术在我国灾害管理中的应用[J]. 卫星应用, 2014(10): 24-27.
- [10] 黄欣. 快速响应卫星载荷体系化建设思路[J]. 电讯技术, 2014, 54(10): 1321-1325.
HUANG Xin. Systematization construction idea for operationally responsive satellite payload[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(10): 1321-1325.
- [11] 孟宪福, 闫玲玲, 刘伟伟. 基于动态任务优先级的网格任务调度算法研究[J]. 大连理工大学学报, 2012, 52(2): 277-284.
MENG Xianfu, YAN Lingling, LIU Weiwei. Research on task scheduling algorithm in grid computing systems based on dynamic task priority[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2012, 52(2): 277-284.
- [12] 夏家莉, 陈辉, 杨兵. 一种动态优先级实时任务调度算法[J]. 计算机学报, 2012, 35(12): 2685-2695.
XIA Jiali, CHEN Hui, YANG Bing. A real time tasks scheduling algorithm based on dynamic priority[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(12): 2685-2695.
- [13] 董勇. 面向应急管理的天基系统需求与构建设想[J]. 航天器工程, 2019, 28(6): 1-7.
DONG Yong. Requirements and construction of space-

- based systems for emergency management[J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(6): 1-7.
- [14] 刘晓丽, 杨斌, 高朝晖, 等. 遥感卫星滚动式动态任务规划技术[J]. 无线电工程, 2017, 47(9): 68-72.
LIU Xiaoli, YANG Bin, GAO Zhaohui, et al. Research on rolling dynamic mission scheduling technique for remote sensing satellites[J]. Radio Engineering, 2017, 47(9): 68-72.
- [15] 陈金勇. 航天对地观测运行机制与快速响应系统研究[J]. 无线电工程, 2017, 47(2): 1-6.
CHEN Jinyong. Research on operating mechanism and fast response system of space earth observation system[J]. Radio Engineering, 2017, 47(2): 1-6.
- [16] 杨正磊, 张海威, 王瑞花, 等. 应急条件下星地资源综合运用模式研究[J]. 航天器工程, 2017, 26(1): 6-11.
YANG Zhenglei, ZHANG Haiwei, WANG Ruihua, et al. Research on integrated handling mode of satellite and station resources under emergency conditions[J]. Spacecraft Engineering, 2017, 26(1): 6-11.
- [17] 黄树松, 夏天, 赵英芬, 等. 国产民用陆地观测卫星应急服务[J]. 卫星应用, 2019, (10): 38-41.
- [18] 郭超, 熊伟, 刘呈祥. 基于优先级与时间裕度的卫星应急观测任务规划[J]. 电讯技术, 2016, 56(7): 744-749.
GUO Chao, XIONG Wei, LIU Chengxiang. Mission planning of satellite emergency observations based on priority and time margin degree[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(7): 744-749.
- [19] 王晓晨, 刘鹏, 朱玛, 等. 基于知识和大数据的多航天器管理云平台设计[J]. 遥测遥控, 2022, 43(1): 50-60.
WANG Xiaochen, LIU Peng, ZHU Ma, et al. Design of multi spacecraft management cloud platform based on knowledge and big data[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(1): 50-60.
- [20] 王鹏, 刘晓东, 郭建恩, 等. 面向突发事件的遥感卫星动态管控模式[J]. 无线电工程, 2015, 45(11): 60-63.
WANG Peng, LIU Xiaodong, GUO Jianen, et al. Dynamic control mode of remote sensing satellites for emergencies[J]. Radio Engineering, 2015, 45(11): 60-63.

[作者简介]

- 张 虹 1980年生, 硕士, 高级工程师。
任 勃 1984年生, 硕士, 工程师。
杜晓军 1987年生, 硕士, 工程师。
王子溪 1992年生, 硕士, 工程师。
陈志远 1994年生, 本科, 工程师。

(本文编辑: 傅 杰)