

实践十号返回式卫星自主安全控制策略设计

王文平, 袁 磊, 元 勇, 郑桂波, 赵会光

(中国空间技术研究院 总体部, 北京 100094)

摘要: 自主运行和健康管理是航天技术发展的一个重要趋势; 为确保实践十号返回式卫星在飞行中的设备安全、整星能源安全和自主运行需求, 从卫星系统层面进行了自主安全控制设计; 首先, 可以使卫星在测控弧段之外出现地面无法反应的故障时能够启动自主安全保护模式; 其次, 可以使卫星自主执行程序化的功能, 减轻地面人员的遥控数据上注压力; 实践十号卫星在轨飞行中所采取的系统级自主安全控制策略以及工程设计经验, 是对航天自主运行和健康管理技术的有益探索和尝试, 对后续航天器的设计有很大的借鉴意义。

关键词: 返回式卫星; 自主安全; 控制策略; 健康管理

Design of Autonomous Safety Control Strategy for SJ-10 Reentry Satellite

Wang Wenping, Yuan Jun, Yuan Yong, Zheng Guibo, Zhao Huiguang

(Institute of Spacecraft System Engineering, CAST, Beijing 100094, China)

Abstract: With the space technology advancing, the spacecraft autonomous flight and self-management is important. To satisfy the demand for equipment safety, energy safety and autonomy, systemic strategies are designed for the SJ-10 reentry satellite. Firstly, survival capability can be improved to against major fault beyond instant ground responses. Secondly, data transfer overhead between aerospace and ground station can be lowered with the self-management. This paper discusses the systemic design of autonomous safety control and self-management of SJ-10 satellite. The engineering practices are useful for the development of space autonomy and maintenance.

Keywords: SJ-10 reentry satellite; autonomous safety control; self-management

0 引言

目前, 航天器在轨运行的健康管理主要依靠地面测控站的支持, 依靠设计人员对遥测数据进行分析判断, 在发生故障情况下, 也主要依靠专家的决策。然而, 由于我国的地域限制, 地面站不可能实现对航天器的全程跟踪, 在不可控弧段发生故障, 将无法采取纠正措施; 即使在可控时段, 单靠地面采取补救措施, 其有效性和实时性都相当有限, 可能错过了最佳的处理时机而导致航天器失败。这就对航天器提出了更高的星上自主性要求, 即要求航天器具有不依赖地面支持的自主进行管理的能力, 这是提高航天器生存能力的需要, 也是维护国家安全的需要。我国航天器的设计也在朝着不断增强星上自主能力、减少地面人工遥控干预的方向发展。

相比当前国内航天器发展现状, 实践十号 (SJ-10) 卫星在星上自主性方面进行了多个功能的设计, 为我国航天器的发展做出有益尝试和实践。SJ-10 卫星是我国空间科学先导专项“十二五”立项研制、专门用于微重力和空间生命科学实验。SJ-10 卫星是一个短期在轨飞行的低轨航天器。与其他卫星拥有少数载荷相比, SJ-10 卫星一共携带有 19 项载荷, 在轨飞行过程中载荷实验项目的时序安排非常紧张, 卫星过境监视时间较短, 遥控上注数据量较大, 能源消耗量较大; 返回过程中需要对着陆点进行精确控制。如何确保卫星在轨飞行期

间平台的安全, 确保载荷实验有序进行, 确保卫星返回过程一次性圆满成功是 SJ-10 卫星飞行任务成败的关键。因此, SJ-10 卫星在各分系统自主安全控制的基础上, 针对返回式卫星的关键特性, 设计了整星系统级的自主安全控制策略, 具体包括: 蓄电池放电电量自主计算、载荷自主安全监控、过境测控区域自主管理、微重力数据自主循环记录、热控自主控温功能。

1 自主安全控制

航天器系统级自主安全控制策略设计的一般思路是根据航天器实际任务需求和系统特点, 建立系统级的自主安全控制模式, 通过在星载中心计算机的软件中实施控制策略进行监控, 以实际飞行过程中的遥测参数作为输入, 当飞行中出现符合安全控制预案中的触发条件时, 则星载软件自动启动安全控制程序, 并调度相应的智能终端进行执行。

1.1 蓄电池放电电量自主计算

目前, 遥感、通信、导航和深空等各个领域的航天器, 所使用的电源分系统主要是太阳能电池阵/蓄电池组联合供电系统。而对于返回式卫星来说, 由于飞行任务周期很短, 不采取太阳翼及太阳能电池阵的方案设计, 只将贮备电池作为一次性使用的蓄电池^[1]。因此, 卫星在轨飞行寿命完全取决于蓄电池的剩余电量。

自从蓄电池发明以来, 人们就一直在研究有效实用的蓄电池剩余电量监测方法。但由于蓄电池本身原理的复杂性, 对蓄电池剩余电量的监测一直是一个难题, 到现在都没有被很好的解决。蓄电池剩余电量的监测一般通过蓄电池的外部电特性 (电池电压 U 、电流 I 、内阻 R 和电池温度 T 等参数) 的测量来间接实现, 但剩余电量的大小与上面这些参数的关系会随着电池老化而变化。对于航天器蓄电池在轨运行过程中, 还会有

收稿日期: 2017-04-25; 修回日期: 2017-05-10。

基金项目: 中国科学院空间科学战略性先导科技项目 (XDA04020200)。

作者简介: 王文平 (1984-), 男, 山西朔州人, 硕士, 工程师, 主要从事航天器空间数据系统总体设计方向的研究。

赵会光 (1972-), 男, 博士, 研究员, 主要从事航天器总体设计方向的研究。

很多因素影响蓄电池的电特性, 进而会影响到剩余电量大小的估计, 所以剩余电量或电池荷电状态 (state of charge, SOC) 的准确预测是一个很复杂的问题^[2]。

返回式卫星蓄电池放电电量自主计算主要是为了解决:

1) 卫星剩余寿命预测不准的问题, 而实际上返回式卫星的在轨剩余寿命完全取决于蓄电池剩余电量 (蓄电池出厂额定容量 - 蓄电池放电电量);

2) 根据星上蓄电池放电电量的实时自主计算结果, 地面飞行控制人员随时优化调整各有效载荷的在轨实验时序, 优先安排重要关键的载荷开展相关实验, 确保本次卫星的核心实验任务能够圆满完成, 并在蓄电池剩余电量仍然有足够余量的情况下, 尽可能开展更多的拓展实验。

SJ-10 卫星蓄电池在轨运行期间, 可以测量的遥测参数只有电压和电流, 最简单有效的剩余电量计算方法是安时积分法。安时积分法通过累积电池在充电或放电时的电量来估计电池的 SOC。安时积分法预测 SOC 比较简单, 已商品化的电动汽车上大多采用这种方法。安时积分法基于的原理比较简单, 它把蓄电池看成一个黑箱系统, 不关注蓄电池内部发生的复杂物理化学变化, 而只关心进出蓄电池的电量, 通过实时记录这个物理量, 进入的电量为正, 放出的电量为负, 以累加的方法求出某一个时刻蓄电池的放电量。

由于蓄电池的放电量一般表示为放电电流与放电时间的乘积, 且放电电流一般是变化的, 所以安时积分法在具体实施时是以放电电流对时间的积分来计算某一个时刻蓄电池的电量^[3-4], 即:

$$Soc(t) = Soc(t_0) - \eta * \int_{t_0}^t i(t) dt / Q$$

式中, $Soc(t)$ 为 t 时刻的蓄电池容量, 即剩余电量; $Soc(t_0)$ 为蓄电池放电前的剩余电量, 电池完全充满的状态为 100%; η 为电池放电效率; $i(t)$ 为电池工作时放电电流的瞬时值; Q 为蓄电池的额定容量。

SJ-10 卫星电源分系统为星上各分系统提供一次电源, 由 12 块锂电池提供, 一次电源通过两组母线进行供电: 第一组母线电源, 由 4 块锂电池并联而成, 为控制、数管、测控提供一次电源, 放电前的剩余电量为 Soc_1 , 电池放电效率为 η_1 , 额定容量为 Q_1 ; 第二组母线电源, 由 8 块锂电池并联而成, 为热控、载荷分系统提供一次电源, 放电前的剩余电量为 Soc_2 , 电池放电效率为 η_2 , 额定容量为 Q_2 。SJ-10 卫星在轨运行期间, 可以测得的遥测参数为: 第一组母线控制分系统电流 I_K , 数管分系统电流 I_S , 测控分系统电流 I_C ; 第二组母线热控分系统电流 I_R , 载荷分系统电流 I_Z 。

因此, 第一组母线电源电池剩余电量为:

$$Soc_1(t) = Soc_1 - \eta_1 * \int_{t_0}^t (I_K + I_S + I_C) dt / Q_1$$

第二组母线电源电池剩余电量为:

$$Soc_2(t) = Soc_2 - \eta_2 * \int_{t_0}^t (I_R + I_Z) dt / Q_2$$

星载数管软件在计算电池放电电量时, 同时需要判断对应分系统是否处于加电状态, 如处于断电状态, 此分系统本次电量计算值为 0。

1) 当第一组电池每次计算放电电量时, 由于数管、测控分系统处于长期加电状态, 卫星加电后一直处于工作状态, 这两个分系统工作状态不需要判断; 因此只需要判断控制分系统

加断电状态。

2) 当第二组电池每次计算放电电量时, 分别需要根据热控、载荷分系统加断电状态来进行本次电量计算。

星载数管软件在计算电池放电电量时, 需要对遥测参数进行自主判断, 当遥测采集失败, 即参与电量计算的遥测数据均为无效数据时, 则本次电量计算结果值为 0。

1.2 载荷自主安全监控策略

由于 SJ-10 卫星有效载荷单机设备功率较大, 耗电较多, 如果出现持续大电流导致超过正常工作时间范围的故障, 会对整星电源带来极大的安全隐患。针对这个问题, SJ-10 卫星在整星系统级和载荷分系统级两级分别设置了自主电流监控策略, 确保载荷分系统的部分单机出现耗电异常时, 使整星处于能源安全可控状态。

1.2.1 分系统级自主电流监控策略

有效载荷根据分系统内部单机不同情况, 分别由回收舱载荷管理器软件和密封舱载荷管理器软件对耗电量较大的载荷单机实施自主电流监控。具体策略如下:

1) 回收舱载荷电流监控: 回收舱载荷管理器软件每 5 秒记录一次“回收舱综合电控箱电流遥测”(包括回收舱综合电控箱、多功能炉、基因辐射盒、骨髓培养箱), 如果 1 分钟内累计超过 9 安培的次数大于 10 次, 则认为回收舱综合电控箱设备是以大电流在工作。在回收舱载荷电流软件监控功能允许时, 当监控到以大电流连续工作 4 小时后, 则软件自动连续发送 3 次“多功能炉关机指令”, 并设置回收舱载荷电流软件监控功能为禁止状态。

2) 密封舱载荷电流监控: 密封舱载荷管理器软件每 5 秒记录一次“密封舱综合电控箱电流遥测”(包括密封舱综合电控箱、煤燃烧箱、导线特性箱、胶体材料箱、蒸发对流箱), 如果 1 分钟内累计超过 8 安培的次数大于 10 次, 则认为密封舱综合电控箱设备是以大电流工作。在密封舱综合电控箱电流软件监控功能允许时, 当监控到以大电流连续工作 3 小时后, 则软件自动连续发送 3 次“煤燃烧箱和导线特性箱关机指令”, 并设置密封舱综合电控箱电流软件监控功能为禁止状态。

密封舱载荷管理器软件每 5 秒记录一次“非金属燃烧箱和颗粒物箱电流遥测”, 如果 1 分钟内累计超过 8 安培的次数大于 10 次, 则认为非金属燃烧箱设备和颗粒物箱设备是以大电流工作。在非金属燃烧箱和颗粒物箱电流软件监控功能允许时, 当监控到以大电流连续工作 3 小时后, 则软件自动连续发送 3 次“非金属燃烧箱关机指令”, 并设置非金属燃烧箱和颗粒物箱电流软件监控功能为禁止状态。

1.2.2 整星级自主电流监控策略

整星根据载荷分系统耗电情况, 在星载数管软件中实施了载荷自主关机控制策略, 具体如下:

SJ-10 卫星在轨飞行过程中, 数管软件中的载荷自主关机控制功能处于使能状态, 数管软件以 500 毫秒为周期判断“载荷分系统电流”遥测参数, 如果载荷分系统连续 4 小时耗电量超过阈值 100 安时, 则认为载荷分系统用电异常, 需要载荷设备关机; 数管分系统通过给密封舱载荷管理器和回收舱载荷管理器分别发送“密封舱载荷应急模式指令”和“回收舱载荷应急模式指令”, 通知载荷管理器对相关载荷设备进行断电。当数管发送指令后, 软件自动进入载荷安全关机功能禁止状态, 相关参数恢复默认状态。有效载荷自主电量监控策略流程

见图 1 所示。

数管软件每次自主计算载荷耗电量时，如果判断出遥测参数采集失败时，即参与载荷电量计算的遥测数据均为无效数据时，则本次载荷安全关机电量计算结果值为 0。

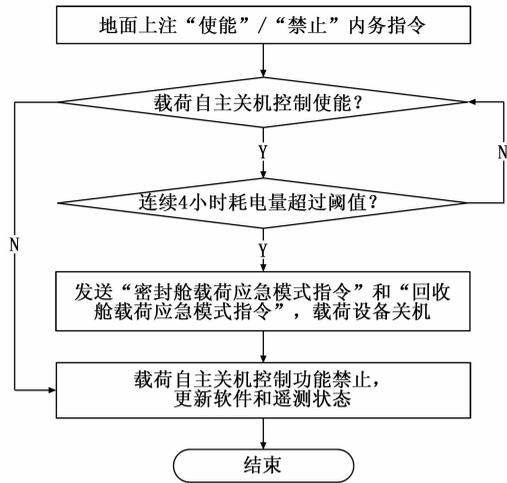


图 1 有效载荷自主电量监控

1.3 过境测控区域自主管理

对于 SJ-10 返回式科学卫星，由于飞行任务周期很短，无太阳翼及太阳电池阵，在轨飞行寿命完全取决于蓄电池剩余电量，为了节约整星能源，设计了过境测控区域自主管理策略：

SJ-10 卫星在近地轨道围绕地球飞行，星载数管软件实时获取当前星下点经纬度坐标值，以 1 次/秒为周期自主判断卫星是否已进入预先设定好的地面测控范围内：当卫星飞入与地面测控范围内时，数管软件自主打开相应的应答机发射机，进行卫星遥测数据的下传；当卫星飞出地面测控范围时，数管软件自主关闭相应的应答机发射机，停止进行卫星遥测数据的下传。测控区域自主管理及指令发送见图 2 和表 1 所示。

由于 SJ-10 卫星通过境内测控区域的时间很短，可监视的范围较小，绝大多数时间都在境外自主飞行。因此，通过对 SJ-10 卫星的测控区域进行星上自主管理，可以使应答机发射机平均能耗降低 85% 左右，有效节约了整星能源。

1.4 微重力数据自主循环记录

SJ-10 卫星是专门为“微重力科学和空间生命科学”实验研究量身定做。SJ-10 卫星正是利用其在太空飞行时所营造的微重力环境，揭示被地球表面重力所掩盖的“秘密”^[5]。SJ-10 卫星发射升空，相当于我国科学家将实验室搬到太空，在太空微重力环境下建立“太空实验室”。SJ-10 卫星在轨飞行过程中，能否对微重力数据高效得获取就显得尤为重要。

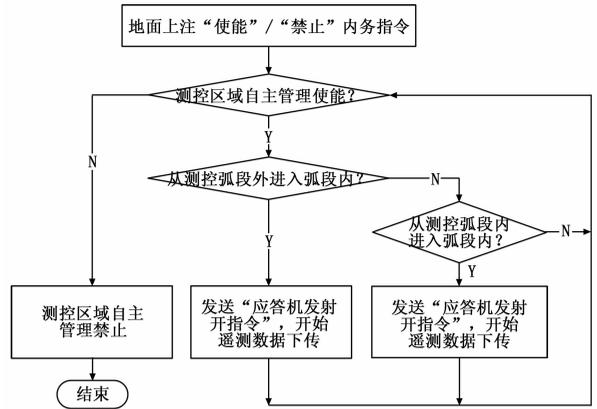


图 2 测控区域自主管理

SJ-10 卫星由工程测量分系统的微重力传感器完成微重力数据的原始数据获取，而微重力数据的采集周期和存储控制则是由数管分系统来完成。因此，为了确保卫星在轨飞行过程中，在有限的数管存储容量下，实现对微重力数据的最大化采集，SJ-10 卫星在星载数管软件中设计了微重力数据自主循环记录功能，具体策略如下：

数管软件中的微重力数据自主循环记录模式以“轮/90 分钟”为一个记录周期，当前 1 轮记录结束 2 分钟后开始下 1 轮记录；每轮包含 14 个记录时段，其中第 1 个记录时段时长为 10 分钟，其余 13 个记录时段时长均为 1 分钟，前 1 个记录时段结束 5 分钟后开始下 1 个记录时段。图 3 所示为微重力数据自主循环记录周期。

地面可以通过上注数管内务指令来启动或者停止微重力数据自主循环记录功能。数管软件内部将“微重力数据自主循环记录状态”作为重要数据保存，该参数初始状态为“停止”。当从“停止”状态转为“启动”状态时，数管软件重新开始新一轮的自主循环记录过程。

当数管软件收到地面上注的“回收舱直采模式开启”指令时，将微重力数据自主循环记录功能中的自主指令发送功能进行禁止。当数管软件收到地面上注的“回收舱直采模式关闭”指令时，将微重力数据自主循环记录功能中的自主指令发送功能进行使能。数管软件将“自主指令发送使能禁止状态”作为重要数据保存，该参数初始值设置为“禁止”。图 4 为微重力自主循环记录控制流程图。

1) 当地面通过上注内务指令启动了微重力数据自主循环记录功能后，数管软件从第一个记录时段开始进行判断：

(1) 当软件处于微重力数据自主循环记录功能使能状态时，自主发送指令“回收舱直采模式开启”和“回收舱直采模式关闭”。

表 1 过境测控区域自主指令控制

测控区域 自主指令发送状态	测控弧段状态	从测控弧段外进入测控弧段内	从测控弧段内进入测控弧段内	从测控弧段内进入测控弧段外	从测控弧段外进入测控弧段外
	使能		发 1 次应答机发射开指令	不发指令	发 1 次应答机发射关指令
禁止		不发指令	不发指令	不发指令	不发指令

		每天轮次																时段长度 (hh:mm:ss)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
每轮次 记录时段	记录开始1	0:00:00	1:30:00	3:00:00	4:30:00	6:00:00	7:30:00	9:00:00	10:30:00	12:00:00	13:30:00	15:00:00	16:30:00	18:00:00	19:30:00	21:00:00	22:30:00	
	记录结束1	0:10:00	1:40:00	3:10:00	4:40:00	6:10:00	7:40:00	9:10:00	10:40:00	12:10:00	13:40:00	15:10:00	16:40:00	18:10:00	19:40:00	21:10:00	22:40:00	0:10:00
	记录开始2	0:15:00	1:45:00	3:15:00	4:45:00	6:15:00	7:45:00	9:15:00	10:45:00	12:15:00	13:45:00	15:15:00	16:45:00	18:15:00	19:45:00	21:15:00	22:45:00	
	记录结束2	0:16:00	1:46:00	3:16:00	4:46:00	6:16:00	7:46:00	9:16:00	10:46:00	12:16:00	13:46:00	15:16:00	16:46:00	18:16:00	19:46:00	21:16:00	22:46:00	0:01:00
	记录开始3	0:21:00	1:51:00	3:21:00	4:51:00	6:21:00	7:51:00	9:21:00	10:51:00	12:21:00	13:51:00	15:21:00	16:51:00	18:21:00	19:51:00	21:21:00	22:51:00	
	记录结束3	0:22:00	1:52:00	3:22:00	4:52:00	6:22:00	7:52:00	9:22:00	10:52:00	12:22:00	13:52:00	15:22:00	16:52:00	18:22:00	19:52:00	21:22:00	22:52:00	0:01:00
	记录开始4	0:27:00	1:57:00	3:27:00	4:57:00	6:27:00	7:57:00	9:27:00	10:57:00	12:27:00	13:57:00	15:27:00	16:57:00	18:27:00	19:57:00	21:27:00	22:57:00	
	记录结束4	0:28:00	1:58:00	3:28:00	4:58:00	6:28:00	7:58:00	9:28:00	10:58:00	12:28:00	13:58:00	15:28:00	16:58:00	18:28:00	19:58:00	21:28:00	22:58:00	0:01:00
	记录开始5	0:33:00	2:03:00	3:33:00	5:03:00	6:33:00	8:03:00	9:33:00	11:03:00	12:33:00	14:03:00	15:33:00	17:03:00	18:33:00	20:03:00	21:33:00	23:03:00	
	记录结束5	0:34:00	2:04:00	3:34:00	5:04:00	6:34:00	8:04:00	9:34:00	11:04:00	12:34:00	14:04:00	15:34:00	17:04:00	18:34:00	20:04:00	21:34:00	23:04:00	0:01:00
	记录开始6	0:39:00	2:09:00	3:39:00	5:09:00	6:39:00	8:09:00	9:39:00	11:09:00	12:39:00	14:09:00	15:39:00	17:09:00	18:39:00	20:09:00	21:39:00	23:09:00	
	记录结束6	0:40:00	2:10:00	3:40:00	5:10:00	6:40:00	8:10:00	9:40:00	11:10:00	12:40:00	14:10:00	15:40:00	17:10:00	18:40:00	20:10:00	21:40:00	23:10:00	0:01:00
	记录开始7	0:45:00	2:15:00	3:45:00	5:15:00	6:45:00	8:15:00	9:45:00	11:15:00	12:45:00	14:15:00	15:45:00	17:15:00	18:45:00	20:15:00	21:45:00	23:15:00	
	记录结束7	0:46:00	2:16:00	3:46:00	5:16:00	6:46:00	8:16:00	9:46:00	11:16:00	12:46:00	14:16:00	15:46:00	17:16:00	18:46:00	20:16:00	21:46:00	23:16:00	0:01:00
	记录开始8	0:51:00	2:21:00	3:51:00	5:21:00	6:51:00	8:21:00	9:51:00	11:21:00	12:51:00	14:21:00	15:51:00	17:21:00	18:51:00	20:21:00	21:51:00	23:21:00	
	记录结束8	0:52:00	2:22:00	3:52:00	5:22:00	6:52:00	8:22:00	9:52:00	11:22:00	12:52:00	14:22:00	15:52:00	17:22:00	18:52:00	20:22:00	21:52:00	23:22:00	0:01:00
	记录开始9	0:57:00	2:27:00	3:57:00	5:27:00	6:57:00	8:27:00	9:57:00	11:27:00	12:57:00	14:27:00	15:57:00	17:27:00	18:57:00	20:27:00	21:57:00	23:27:00	
	记录结束9	0:58:00	2:28:00	3:58:00	5:28:00	6:58:00	8:28:00	9:58:00	11:28:00	12:58:00	14:28:00	15:58:00	17:28:00	18:58:00	20:28:00	21:58:00	23:28:00	0:01:00
	记录开始10	1:03:00	2:33:00	4:03:00	5:33:00	7:03:00	8:33:00	10:03:00	11:33:00	13:03:00	14:33:00	16:03:00	17:33:00	19:03:00	20:33:00	22:03:00	23:33:00	
	记录结束10	1:04:00	2:34:00	4:04:00	5:34:00	7:04:00	8:34:00	10:04:00	11:34:00	13:04:00	14:34:00	16:04:00	17:34:00	19:04:00	20:34:00	22:04:00	23:34:00	0:01:00
	记录开始11	1:09:00	2:39:00	4:09:00	5:39:00	7:09:00	8:39:00	10:09:00	11:39:00	13:09:00	14:39:00	16:09:00	17:39:00	19:09:00	20:39:00	22:09:00	23:39:00	
	记录结束11	1:10:00	2:40:00	4:10:00	5:40:00	7:10:00	8:40:00	10:10:00	11:40:00	13:10:00	14:40:00	16:10:00	17:40:00	19:10:00	20:40:00	22:10:00	23:40:00	0:01:00
	记录开始12	1:15:00	2:45:00	4:15:00	5:45:00	7:15:00	8:45:00	10:15:00	11:45:00	13:15:00	14:45:00	16:15:00	17:45:00	19:15:00	20:45:00	22:15:00	23:45:00	
	记录结束12	1:16:00	2:46:00	4:16:00	5:46:00	7:16:00	8:46:00	10:16:00	11:46:00	13:16:00	14:46:00	16:16:00	17:46:00	19:16:00	20:46:00	22:16:00	23:46:00	0:01:00
	记录开始13	1:21:00	2:51:00	4:21:00	5:51:00	7:21:00	8:51:00	10:21:00	11:51:00	13:21:00	14:51:00	16:21:00	17:51:00	19:21:00	20:51:00	22:21:00	23:51:00	
	记录结束13	1:22:00	2:52:00	4:22:00	5:52:00	7:22:00	8:52:00	10:22:00	11:52:00	13:22:00	14:52:00	16:22:00	17:52:00	19:22:00	20:52:00	22:22:00	23:52:00	0:01:00
	记录开始14	1:27:00	2:57:00	4:27:00	5:57:00	7:27:00	8:57:00	10:27:00	11:57:00	13:27:00	14:57:00	16:27:00	17:57:00	19:27:00	20:57:00	22:27:00	23:57:00	
	记录结束14	1:28:00	2:58:00	4:28:00	5:58:00	7:28:00	8:58:00	10:28:00	11:58:00	13:28:00	14:58:00	16:28:00	17:58:00	19:28:00	20:58:00	22:28:00	23:58:00	0:01:00

图 3 微重力数据循环记录周期

(2) 当软件处于微重力数据自主循环记录功能禁止状态时, 禁止自主发送指令“回收舱直采模式开启”和“回收舱直采模式关闭”。

(3) 在自主控制时, 每次记录开始时, 软件发送“回收舱直采模式开启”; 每次记录结束时, 发送“回收舱直采模式关闭”。

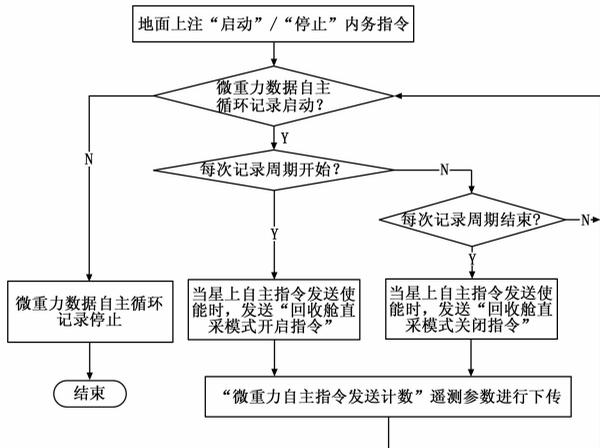


图 4 微重力数据自主循环记录控制

(4) 在自主控制时, 数管软件发送“回收舱直采模式开启”指令和“回收舱直采模式关闭”指令, 不影响自主指令发送使能禁止状态。

(5) 当数管软件自主发送指令“回收舱直采模式开启”和“回收舱直采模式关闭”时, 通过遥测下传“微重力自主指令发送计数”计数。

2) 当地面通过上注内务指令停止了微重力数据自主循环记录功能后, 数管软件停止进行记录时段的判断, 禁止自主发送指令“回收舱直采模式开启”和“回收舱直采模式关闭”。

1.5 热控自主控温

SJ-10 卫星研制过程中, 要解决多个载荷实验项目在太空协同工作且互不影响的问题。特别是载荷生命科学项目对各实验项目全过程的温度要求精确控制。因此 SJ-10 卫星设计了热控自主控温功能: 数管分系统对返回舱内的主动控温回路进行自主闭环控制, 根据热敏电阻的温度数据和控制规律, 通

过控制加热器的通断, 完成自主控温功能, 见图 5 所示。自主控温详细控制策略如下:

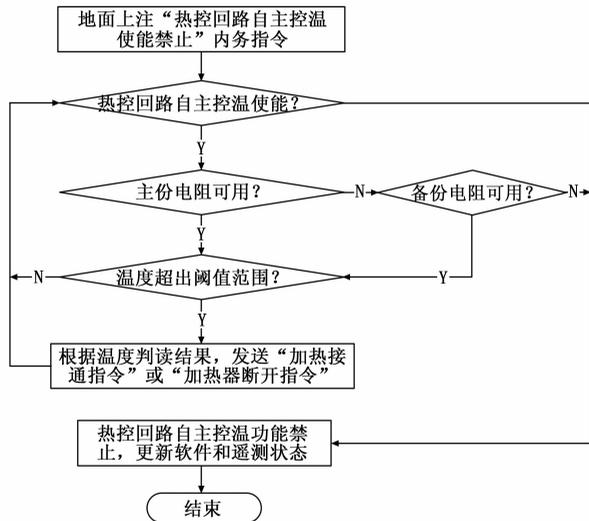


图 5 热控自主控温

1) 地面可以上注指令来设置自主加热回路的使能或禁止状态, 默认为自主加热使能状态;

2) 自主加热回路控温模式为 $[T_{low}, T_{high}]$, T_{low} 为控温阈值下限, T_{high} 为控温阈值上限; 每个回路的控温阈值 T_{low} 和 T_{high} 可通过上注指令进行设置, 并且需要作为重要数据进行保存;

3) 数管自主加热回路具有异常保护功能, 即当加热回路发生故障时, 可以采取相应保护措施关闭加热回路;

4) 当前加热回路的通断状态通过数管分系统的下行遥测参数反映;

5) 卫星地面及正常运行时, 加热回路控温阈值可通过地面上注指令的方式进行更改;

6) 控温热敏电阻默认为主份控温热敏电阻; 当卫星地面集成测试以及在轨飞行时, 可以通过地面上注指令来更改加热回路对应的热敏电阻, 使得控制加热回路的热敏电阻在对应的主份控温热敏电阻与备份控温热敏电阻之间进行切换; 地面可以通过遥测来确定自主加热回路当前参与控温的热敏电阻;

全；同时实现了云端数据处理后再返回现场执行的控制，可及时将道路积水排走。在后续工作中，可以将道路积水数据用于控制红绿灯等交通控制系统，主动地引导车辆及行人避开道路积水严重地段。

参考文献：

[1] 姜玲, 邱志德. 城市洪涝灾害的间接经济损失评估——以北京市为例 [J]. 现代城市研究, 2014, (7): 6-13.
 [2] 孙婧. 基于改进 LEACH 算法的路面积水深度测量系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (4): 1297-1299.
 [3] 黄志武, 王曙霞. 基于传感网络的公路积水深度测量系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (2): 352-354.
 [4] 姜世英. 基于 AVR 单片机的道路积水预警系统 [J]. 自动化技术与应用, 2015, 34 (9): 40-43, 51.
 [5] 邵鹏飞, 赵燕伟, 杨明霞, 等. 城市内涝监测预警信息系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (2): 49-52.
 [6] Liu Y, Du M, Jing C, et al. Design and implementation of monitoring and early warning system for urban roads waterlogging [A]. 8th International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture (CCTA) [C]. 2014: 610-615.
 [7] 周汝雁, 白凡, 随宏运, 等. 嵌入式远程城市积水监测系统 [J]. 水利科技与经济, 2013, 19 (4): 109-112.
 [8] 祁霞, 耿博望, 陈艳超, 等. 基于云服务器的城市道路积水监测 (上接第 63 页)

7) 自主加热回路可通过遥控上注指令设定为常开或常关的状态；同时具备将自主加热回路设定为全部使能或全部禁止的功能；

8) 数管切机或者复位后，所有自主加热回路的状态重置到默认状态。

2 经验和建议

通过 SJ-10 卫星的全生命周期在轨飞行，充分验证了卫星所采取的多个系统级自主控制策略是安全可靠的，也同样适用于长期在轨飞行的卫星。SJ-10 卫星自主安全控制策略设计是对航天器自主运行与健康技术^[6]的有益尝试和探索。

随着我国航天事业的不断发展，国民经济、国防建设等方面都对航天器提出了新的更高的要求，航天器飞行任务越来越复杂、实时性要求越来越高、在轨寿命越来越长。建议国内航天器自主运行与健康技术管理技术研究应关注以下几个方面：

1) 航天器自主运行与健康技术理论管理研究：航天器自主运行与健康技术理论管理研究方面应该在充分借鉴国外现有研究的基础上，结合国内航天器研究的实际情况，在技术理论方面进行深入研究，从理论角度解决工程需要问题，指导后续的工程实现和应用。

2) 航天器平台内务自主管理技术研究：航天器平台内务自主管理包括能源的自主管理、热控的自主管理、自主导航与控制、信息自主调度和管理等方面，目前在这些方面已经有一定的基础，但面对未来航天器更高的自主管理要求还需要进一步加强研究，提高航天器平台的内务自主管理水平。

3) 自主任务规划：航天器自主运行的一个重要体现就是自主任务规划，自主任务规划技术研究主要研究在没有地面测控系统支援的情况下，根据空间环境、自身飞行状态以及各种约束条件自主规划航天器飞行任务，减小对地面的依赖，提高生存能力。对于在轨航天器，研究如何根据实时环境进行任务自动规划，形成控制策略来控制航天器，以便完成各种任务要求。

系统 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2015, 15 (11): 37-39.
 [9] 孙永尚, 刘扬, 赵军合, 等. 北京市内涝积水监测预警系统设计与实现 [J]. 地理空间信息, 2015 (4): 117-119.
 [10] 夏志川, 钟小建, 阮飞, 等. 城市道路积水多点监测及预警系统设计 [J]. 电子测试, 2013 (5): 56-57.
 [11] 周继裕, 王承亮, 黄楠, 等. 基于超声波的高精度水位控制系统设计 [J]. 现代电子技术, 2014 (10): 116-119.
 [12] 郝迎吉, 高红红, 王燕, 等. 远距离水位智能监控系统的研究与实现 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25 (6): 809-812.
 [13] Li Z, Wang N, Hong T, et al. Closed-loop drip irrigation control using a hybrid wireless sensor and actuator network [J]. Science China Information Sciences, 2011, 54 (3): 577-588.
 [14] Wark T, Crossman C, Hu W, et al. The Design and Evaluation of a Mobile Sensor/Actuator Network for Autonomous Animal Control [A]. 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks [C]. IEEE, 2007: 206-215.
 [15] Suh C, Ko Y B. Design and implementation of intelligent home control systems based on active sensor networks [J]. Transactions on Consumer Electronics IEEE, 2008, 54 (3): 1177-1184.
 [16] Mo L, Xu B, You X, et al. Distributed lighting system based on wireless sensor and actuator networks [J]. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2013, 20 (1): 21-46.

4) 故障诊断与系统重构技术研究：航天器自主故障诊断与系统重构，主要研究不依赖地面监测卫星的运行参数，对航天器进行实时的健康状态监控，及时发现航天器故障，包括在故障发生时或之前做出及时的反应，对航天器子系统进行重组，或使航天器进入安全模式运行，或平稳降级使用，阻止更大的连续性故障发生，从而提高航天器的安全可靠性和长寿命，保障设备的安全性，降低风险，减少不必要的经济损失。

3 结束语

本文主要针对 SJ-10 卫星系统级自主安全控制策略进行了介绍，卫星系统级自主安全控制的核心目的在于通过实施能源自主安全控制、温度自主控制等策略确保整星安全运行，减少地面人员的干预。

随着航天事业的发展，传统的测控方式越来越受束缚，作为航天器未来发展的一项关键技术，航天器自主运行与健康技术管理的实现对于全面提高我国的航天器运行管理水平，克服地面站的不足，降低成本预算，对我国的航天器技术跃上新的台阶具有十分重要的意义^[7]。

参考文献：

[1] 李春华, 倪润立. 中国返回式卫星与空间科学实验 [J]. 空间科学学报, 2009, 29 (1): 124-129.
 [2] 付华圆. 电动汽车蓄电池剩余电量估计算法的研究与实现 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2010.
 [3] 周奇. 铅酸蓄电池能量监测系统的设计 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
 [4] 严加朋. 蓄电池电量计量与管理系统的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
 [5] 胡文瑞. 空间的物理学 [J]. 物理, 2008, 37 (9): 637-642.
 [6] 代树武, 孙辉先. 航天器自主运行技术的进展 [J]. 宇航学报, 2003, 24 (1): 17-22.
 [7] 曹国荣. 航天器在轨自主健康管理技术的研究和应用 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.