

俄罗斯联盟 FG 火箭发射失利分析

摘要：2018 年 10 月，联盟 FG 火箭因一子级未能与助推级正常分离而未能将联盟 MS-10 载人飞船送入国际空间站，2 名航天员依靠应急逃逸系统安全着陆。本文对此次发射失利和载人火箭复飞情况、故障原因进行了分析，对联盟 FG 火箭及其应急逃逸系统进行了介绍，并对俄罗斯近五年的航天故障情况进行了统计与分析，最后对此次发射失利造成的影响进行了总结分析。

北京时间 2018 年 10 月 11 日，俄罗斯的联盟 FG 运载火箭搭载联盟 MS-10 载人飞船，从哈萨克斯坦拜科努尔航天发射场发射升空，火箭起飞后约 117s 发生故障，紧急启动应急逃逸系统，整流罩携带飞船轨道舱和返回舱脱离火箭，随后返回舱开启降落伞，航天员安全着陆，但此次发射任务失败。本次任务是联盟 FG 火箭自使用以来的首次发射事故，也是世界载人航天史上逃逸塔分离之后首次使用整流罩分离发动机挽救航天员的生命。

一、发射失利情况及载人火箭复飞

(一) 发射失利情况

北京时间 2018 年 10 月 11 日，俄罗斯联盟 FG 火箭搭载联盟 MS-10 载人飞船从拜科努尔航天发射场点火起飞。飞船机组乘员分别为俄罗斯航天员阿列克谢·奥夫齐宁和美国航天员尼克·黑格，奥夫齐宁是第二次上天执行任务，而黑格则是首次升空。按

计划，飞船拟采用快速对接模式，于发射后 6h 与国际空间站对接，2 名航天员进入空间站后将使空间站人数增加至 5 人。

在联盟 FG 火箭起飞约 117s 左右，飞船机组人员报告火箭“失效”，称感觉到失重，随后启动了应急逃逸系统，以弹道式再入方式返回地球。发射后约 40min，NASA 称，搜救人员已赶往哈萨克斯坦中部城市杰兹卡兹甘以东约 20km 的预计落区。此外，俄军方投入 4 架米 8 直升机从哈萨克斯坦境内的机场起飞进行搜救。火箭起飞 90min 后，在搜救人员的帮助下，2 名航天员成功出舱。据报道，2 名航天员在着陆过程中经受了 6~7g 的过载。

据报道，故障发生在 1A 飞行阶段，即逃逸塔分离后至整流罩分离前期间。安装在一子级上的角速度传感器探测到火箭一子级姿态误差超过 7°，之后发出故障指令。乘员驾驶舱控制台收到故障指令之后，安装在整流罩上的 2 个(共 4 个)固体推进器启动，另外 2 个推进器在 0.32s 后启动。在火箭飞行至 122s、飞行高度为 50km 处，飞船与箭体脱离。在火箭飞行至 160s 时，返回舱与轨道舱分离，进入自由落体状态。在任务控制人员的指示下，机组乘员启动弹道降落模式，大约 30min 之后，返回舱成功着陆。俄国家航天集团公司发推特称：“应急逃逸系统发挥了作用，飞船得以在哈萨克斯坦境内降落，机组人员还活着。”俄罗斯总统发言人佩斯科夫也对记者说：“谢天谢地，航天员还活着。”NASA 局长布莱登斯汀也在当天就此事发表了一份声明，强调机组人员安全的重要性，称 2 名航天员状况良好，并称事故原因会得到彻底调查。

(二) 联盟 FG 载人火箭复飞

本次发射是俄 35 年来发射载人飞船时首次出现发射故障，尽管对俄罗斯载人航天任务安排造成了一定的影响，但在俄政府、俄国家航天集团公司的积极组织以及相关研制单位的配合下，本次发射故障原因在短期内得以查明，并积极采取了妥当的解决措

施，使联盟 FG 火箭载人任务得以在失利发生两个月内成功复飞，将国际空间站运行和其他联盟任务所受到的影响控制在最小范围内。

发射失败最大的影响在于会危及国际空间站的继续运行，因此，在故障发生当天，俄航、NASA，以及国际空间站控制团队就该站接下来的活动与安排进行商议，并做出了多项应急决策。与此同时，俄国家航天集团公司总经理罗戈津在第一时间下令成立了国家委员会，领导调查组搜集相关数据，开展事故原因分析，在最短时间内得出了故障原因分析结论，给出了相应的整改措施，并将结论及整改落实情况等数据提交给 NASA 等国家机构以及阿里安航天公司等火箭运营商，使其得以研究本次事故对联盟系列火箭发射安排的潜在影响以及未来相关任务的可能性。此外，为重拾 NASA 等各相关方及航天员对联盟 FG 火箭在短时期内重新发射的信心，俄罗斯对其接下来的载人航天项目进行了重新安排，并在 10 月底至 11 月中旬的 22 天时间里成功进行了 2 次联盟 2 火箭的卫星发射和 1 次联盟 FG 火箭的进步 MS-10 货运飞船发射。在此基础上，12 月 3 日，俄联盟 FG 火箭在拜科努尔航天发射场发射联盟 MS-11 载人飞船，火箭起飞 9min 后箭船成功分离，并在升空后 6h 后，飞船与国际空间站成功对接，将 3 名航天员成功送入国际空间站。

二、故障原因及俄近 5 年发射故障情况

11 月 1 日，联盟 FG 火箭发射故障调查委员会主席斯科罗波加托夫在莫斯科郊外的俄任务控制中心举办的一场新闻发布会上称，此次发射失败是由于火箭助推级和一子级分离的一台传感器组件在拜科努尔航天发射场组装过程中受损所致。分离传感器变形致使一个助推器的喷嘴盖未能在火箭起飞后 117s 打开，导致该助推器未能与一子级正常分离，其头部与一子级推进剂箱部位相

撞，火箭姿态失控，从而引发飞船应急着陆。

本次发射是联盟 FG 火箭自首飞以来的首次发射故障，也是俄罗斯 2018 年出现的唯一的一次发射失利。尽管俄罗斯近年来面对火箭事故频发的局面，从责任人处理、领导人更换、机构及管理体制改革、先进技术应用等多个方面开展产品质量管控，提升产品质量，保障任务成功，但俄始终摆脱不了火箭发射故障的梦魇，每年都会出现一次或者多次发射失败的情况。表 1 从故障部位、故障情况和故障原因几个方面列出了俄罗斯近 5 年来的火箭发射故障情况。

表 1 俄罗斯近 5 年发射故障情况

型号	时间	故障部位	故障情况	故障原因
天顶号 3SL	2013. 2. 1	推进系统	火箭起飞 11.4s，箭上飞行控制系统检测到滚动值超过预先程序设定范围，箭上推力中止系统启动，一子级主发动机在起飞 20s 后关机，遥测信号丢失，火箭坠毁	箭上转向机构的液压泵出现故障
质子号 M/DM-03	2013. 7. 2	控制系统	俄质子号 M/DM-03 发射 3 颗格洛纳斯 M 导航卫星。在飞行 17s 后一子级的一台发动机突然进入故障模式并关闭，致使火箭姿态失去控制，坠毁在距发射台约 2.5km 的发射场内	3 个(共有 6 个)偏航角速度传感器安装错误(方向颠倒)，导致偏航轴失去稳定性所致

续表

型号	时间	故障部位	故障情况	故障原因
质子号 M/ 微风 M	2014. 5. 16	推进系统	俄质子号 M 搭载 Express-AM4R 通信卫星从拜科努尔发射场发射，在火箭起飞 525s 三子级开始工作时，其一台游动发动机 RD-0124 燃烧室压力急剧下降，火箭偏离预定轨迹。在飞行 545s 时由于参数的非正常变化，火箭自动发出发动机关机指令。三子级未能成功分离，发射失败	组装过程中的工艺缺陷导致的三子级 RD-0124 游动发动机涡轮泵轴承损坏
联盟 STB/ 弗雷盖特 MT	2014. 8. 22	推进系统	联盟 STB 火箭搭载 2 颗伽利略导航卫星从法属圭亚那航天发射场起飞，火箭一、二子级工作正常，约 10min 后，弗雷盖特 MT 上面级发动机点火，按预定程序应点火 2 次，但卫星被送入了错误轨道	上面级姿控推力器的肼燃料管与低温液氮管距离过近，且采用铝合金金属夹具，致使肼燃料管被冻结。事后，采用绝热夹具，提高肼燃料管附近区域的温度
质子号 M/ 微风 M	2014. 10. 21		俄质子号 M/微风 M 搭载“快车 AM6”从拜科努尔发射场起飞，因微风 M 上面级工作出现异常，未能将卫星送入预定轨道	—

俄罗斯联盟 FG 火箭发射失利分析

续表

型号	时间	故障部位	故障情况	故障原因
联盟 2-1a	2015. 4. 28	分离系统	联盟 2-1a 火箭从拜科努尔发射场发射进步 M-27M 货运飞船，在飞行第 526.716s 时，火箭末级与飞船分离异常，飞船被送入错误轨道	火箭末级与飞船的异常分离导致，造成飞船受损。而根本原因则与飞船与运载火箭的连接结构频率响应异常相关
质子号 M/ 微风 M	2015. 5. 16	推进系统	俄质子号 M 搭载墨西哥通信卫星从拜科努尔航天发射场发射升空。在火箭飞行至第 497s、上升至 161km 高度时，三子级发动机出现故障，火箭偏离预定轨迹，遥测信息传输中断，火箭自动发出关机指令，上升段未能与三子级实现分离	三子级发动机涡轮泵转子在高温状态下发生损耗，加之平衡系统在设计上存在缺陷，造成转子失衡，最终造成火箭三子级发动机停止工作
联盟 2-1v	2015. 12. 5	分离系统	俄联盟 2-1v 从普列谢茨克发射场发射 2 颗军事卫星。因卫星与上面级的连接装置在分离过程中部分失效，其中一颗未与上面级成功分离	4 个起爆锁中的 1 个发生故障，如果有备份起爆锁或将避免此类事故发生
联盟 U	2016. 12. 1	推进系统	俄联盟 U 从拜科努尔发射场发射进步号 MS-04 货运飞船。在火箭飞行至 384s 时，飞船与火箭提前约 140s 分离，最终坠毁	氧泵起火破裂，导致二子级 RD-0110 发动机被毁，引发二子级氧箱破损。而氧泵起火破裂的原因很可能是多余物进入泵腔内或组装过程的违规操作

续表

型号	时间	故障部位	故障情况	故障原因
联盟 2-1b/ 弗雷盖特	2017. 11. 28	控制系统	俄联盟 2-1b 从东方航天发射中心发射俄流星 M2-1 和 18 颗微小卫星，因上面级出现故障，19 颗卫星连同上面级在大西洋上空再入时被烧毁，发射失败	上面级制导参数未按照本次发射地点来设置，导致上面级的制导计算机程序有误，使上面级进行了一次不必要的翻转，进而导致上升段入轨所需的点火姿态建立有误

三、联盟 FG 火箭及应急救生系统

(一) 联盟 FG 火箭

两级型联盟 FG 火箭是联盟 U 火箭的改进型，改进了助推器和一子级发动机的喷注器，提高了性能。该火箭由俄罗斯进步国家航天火箭科研生产中心研制与制造，是俄罗斯的载人型运载火箭，2001 年成功首飞，截至目前进行了 55 次载人飞船发射，除了本次发射失败，均获得成功。此外，为了满足商业卫星发射需求，联盟 FG 火箭还可以加装弗雷盖特上面级。该构型于 2003 年成功首飞，截至目前共进行了 10 次卫星发射。联盟 FG 载人火箭结构图如图 1 所示。

联盟 FG 火箭采用的模拟控制系统大大限制了其运载能力，计划 2019 年由联盟 2 火箭代替。

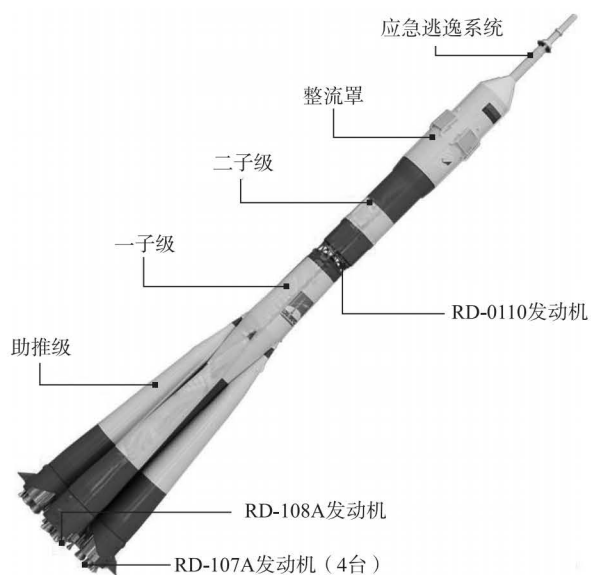


图 1 联盟 FG 载人火箭结构图

表 2 联盟 FG 火箭性能参数

总体	
级数	2
起飞质量/t	305
长/m	49.5
直径/m	2.95
整流罩直径/m	2.7, 3.0, 3.3, 3.715
可靠性	0.985
LEO 运载能力/t	6.9
发射场	拜科努尔航天发射场
助推级	
长/m	19.6

续表

直径/m	2.68
结构质量/t	3.8
总质量/t	43.4
发动机	4×RD-107A
海平面推力/kN	838.5
真空推力/kN	1021.3
海平面比冲/s	263.3
真空比冲/s	320.2
燃烧时间/s	118
推进剂	液氧/煤油
一子级	
长/m	27.1
直径/m	2.95
结构质量/t	6.55
总质量/t	99.5
发动机	1×RD-108A
推进剂	液氧/煤油
海平面推力/kN	792.48
真空推力/kN	990.18
海平面比冲/s	257.7
真空比冲/s	320.6
燃烧时间/s	280
二子级	
长/m	6.7

续表

直径/m	2.66
结构质量/t	2.41
总质量/t	25.3
发动机	1×RD-0110
推进剂	液氧/煤油
推力/kN	297.93
比冲/s	326
燃烧时间/s	230

(二) 应急救援系统

为了保障航天员的安全，联盟 FG 运载火箭采用了应急逃逸系统，其主体是安装在载人火箭最顶端的逃逸塔，直接与包裹在整流罩内的载人飞船相连接，用于火箭准备发射至逃逸塔分离前联盟飞船的紧急逃生。

逃逸塔包括 3 种固体火箭发动机：主发动机、控制发动机和分离发动机。主发动机安装在整流罩的上方，推力为 785kN，工作时间约为 5s，可将整流罩及其内部的轨道舱和返回舱迅速拉离运载火箭至约 1km 处。主发动机共有 12 个喷管，沿圆周均匀配置，喷管轴线与纵轴的夹角为 30°。在这 12 个喷管上方装有 4 台小型控制发动机。它们在主发动机点火后才启动，用来使被营救的系统转弯飞向一侧，落点距发射台约 3km，以脱离险区。在 4 台控制发动机上方有一个半球形小型整流罩，位于最上端的是分离发动机。分离发动机最后点火，使头部整流罩脱离返回舱。然后，返回舱用降落伞和软着陆发动机实现软着陆。为保证被营救的系统能在规定的方向上稳定地降落，不仅在分离发动机喷管上装有配重，而且在整流罩上部结构上装有 4 个栅格稳定翼。它们

平时紧贴在整流罩外壳上，紧急情况下则展开并保持与飞行方向垂直。逃逸塔工作程序如图 2 所示。

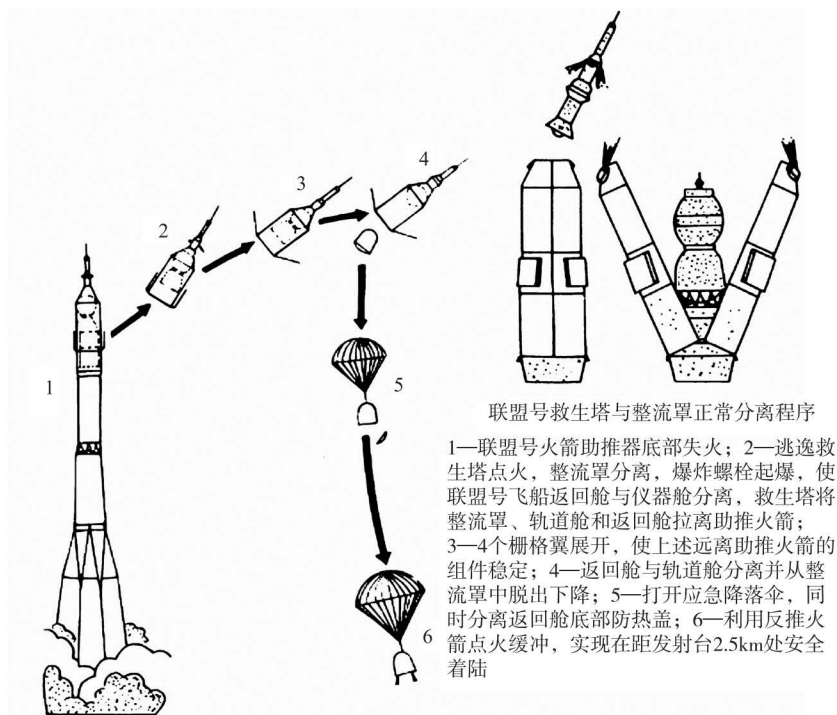


图 2 逃逸塔工作程序

联盟火箭逃逸塔的具体工作步骤如下：

- 1) 运载火箭发动机关机；
- 2) 联盟飞船轨道舱、返回舱和整流罩上部结构一起同飞船仪器舱解锁分离；
- 3) 点燃主发动机，被营救系统迅速上升，脱离运载火箭；
- 4) 点燃控制发动机，被营救系统转弯脱离飞行轨道并转动至呈垂直状态；
- 5) 主发动机燃尽，被营救系统的垂直速度接近零值；
- 6) 返回舱同轨道舱脱开；
- 7) 分离发动机点火，逃逸塔、整流罩上部结构和轨道舱同返

回舱分离；

- 8) 自动定位系统对返回舱进行定位；
- 9) 投弃返回舱上的隔热底盖和降落伞口盖；
- 10) 打开降落伞，返回舱下落并测定其距地面的高度；
- 11) 点燃软着陆发动机，实施软着陆。

联盟 FG 火箭飞行至约 114s 时，逃逸塔分离。从逃逸塔分离至整流罩分离(约 158s)期间，一旦发生紧急情况，4 个安装在整流罩上的固体发动机启动，将飞船拉离箭体。

在人类载人航天史上，除了本次发射，应急逃逸系统还应用过 2 次。1960 年 11 月 21 日，一枚红石弹改箭火箭搭载一个无人水星飞船准备做一次亚轨道发射试验。火箭正常点火，但在火箭离地 100mm 后，主发动机突然主动关闭，火箭又坐回发射台。在准备第二次点火时，火箭逃逸系统突然开始自动工作，将水星飞船拉起，5s 之后，飞船距离地面 1200m，之后飞船平稳降落在距离火箭 370m 处。此外，1983 年 9 月 27 日，苏联发射联盟 T-10A 载人飞船，火箭即将升空时，意外起火。紧急情况下，逃逸塔突然启动，带着载有航天员的飞船远离发射台，在 2.4km 外的地方安全着陆。而就在逃逸塔点火升空后几秒内，联盟火箭突然爆炸，发射台附近变为一片火海。

四、结论

(一) 联盟 FG 火箭发射失败，俄航天领域再度陷入危机

俄罗斯联盟 FG 火箭于 2001 年投入使用，截至目前共进行了 55 次载人飞船和 10 次商业卫星发射。本次发射是该型火箭出现的第一次发射故障，发射任务中，联盟 FG 火箭正常点火起飞，逃逸塔分离之后，进入火箭助推级分离时序，但因一个助推器未能与一子级成功分离而导致任务失败，之后航天员依靠应急救援

系统成功着陆。

就在 8 月 29 日，国际空间站的航天员在联盟 MS-09 飞船上发现了一个 2mm 的漏洞，随后俄航天员用树脂堵住了漏洞避免空间站内加压气体泄漏。虽然没造成进一步的灾难，但造成这个漏洞的原因还在调查之中。而在这个时候出现的联盟 MS-10 飞船发射失败对于正在进行联盟 MS-09 飞船漏洞原因调查的俄国家航天集团来说可谓是雪上加霜。

(二) 俄近年来航天发射事故频发，运载火箭质量保证仍是重中之重

自 1990 年以来，俄罗斯航天领域出现了 46 次发射故障，且 2005 年以来，俄罗斯每年都出现因航天产品设计缺陷、产品质量或人为失误等引起的发射失败，少则 1 次，多则 4 次。为提升俄罗斯航天产品质量，2017 年至今，俄主管航天的副总理罗戈津（现俄国家航天集团公司总经理）多次组织召开航天产品质量和可靠性会议，力图从质量管控方面开展多项工作，其中包括统一的生产与运输条件监控系统、发动机制造领域一体化结构等。此外，在 2018 年，俄国家航天集团公司还对现役及在研火箭型谱进行了调整，逐步使事故频发的质子号 M 火箭退役，取消质子号中型和小型的研制计划，集中精力、财力、人力和物力做好安加拉系列、联盟 5 等新型火箭的研制工作以及提升联盟 2 系列的服务能力。而俄近 2 年的发射失败表明，从火箭设计、生产制造、试验到发射的各个环节的全面的产品质量保证仍将是俄航天运输领域的重中之重。

(三) 载人航天风险性极高，传统逃逸塔技术仍将会存在

载人航天和卫星的发射有很大的区别，对于载人航天任务而言，保障航天员的安全是载人航天的先导和前提。世界载人航天的历史可以追溯到 20 世纪 50 年代，在载人航天发展的 60 多年

间，全球共出现过 5 次灾难性事故，其中，1 次发生在模拟飞行过程中，2 次发生在飞船返回过程中，而另外 2 次则出现在飞船发射过程中，共造成 21 名航天员遇难。对于高投入、高风险的载人航天系统工程而言，除了大推力的运载火箭技术，飞船安全返回技术和完备的生命保障系统技术也是不可或缺的。本次联盟飞船发射虽然遭遇失败，但火箭的应急救生系统在逃逸塔抛掉以后启动，保障了航天员的安全。此外，在载人航天历史上，还出现过 2 次逃逸塔启动并成功挽救载人飞船的事件。

自第一型逃逸系统出现以来，虽历经反复，但已成功应用到了美国的“水星”、阿波罗载人飞船和俄罗斯联盟载人航天项目上，曾出现的 3 次逃逸事件表明，传统的逃逸塔系统可靠性高且拥有自主判断和主动工作的能力，具备“有塔逃逸”和“无塔逃逸”的能力，可确保在整流罩分离前载人飞船和航天员的安全，未来或将与飞船自主起飞技术并存。

(北京航天长征科技信息研究所)