

太空救援： 载人航天必解的一道难题

文 / 迟惑

2023年2月24日，俄罗斯联盟MS-23飞船发射升空，前往国际空间站。这不是一次普通的飞行，它是人类航天史上一次罕见的救援行动。它的前序飞船联盟MS-22此前作为返回工具和紧急情况下的

救生飞船一直停靠在国际空间站上。但在2022年12月，这艘飞船发生了严重的冷却液泄漏事故，打乱了国际空间的活动计划。联盟MS-23飞船此次是作为救援飞船发射升空的。



▲ 俄罗斯联盟MS-23飞船发射



▲ 阿波罗 13 号飞船的返回舱被打捞到船上



▲ 未来太空旅游发达之后，救援将成为一种刚需

几十年来，载人飞行器的太空救援一直是众人都很感兴趣的话题。航天员、航空航天工程师、外交官、医疗和救援专业人员、发明家和科幻作家都有过自己的畅想。马丁·凯丁 1964 年的小说《被放逐者》讲述了一个故事：如何营救被困在近地轨道上的航天员。太空救援也一直是科幻电视和电影中的主要内容，如《星际迷航》《星际之门》和《太空 1999》，以及《火星任务》和《红色星球》等。虚构故事中的救援充满了戏剧性和困难，而在现实世界中，它有着更大的戏剧性和更大的困难。

到目前为止，载人航天所发生的故事还不算太多，其中只有阿波罗 13 号飞船给人们提供了救援的可能性，而且成功了。但是随着载人航天的发展，特别是随着商业载人航天的开展，太空救援恐怕将成为一个必须建立的行业。

法律基础

太空救援作为一门学科仍处于初级阶段。为了明确界定范围，美国宇航局的一些研究中，把太空救援定义为：在太空飞行操作中，允许人员在

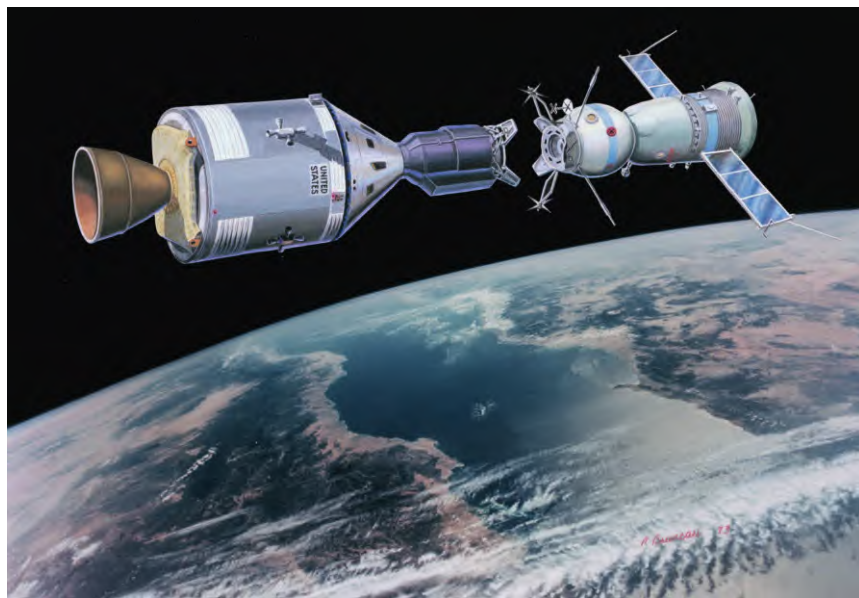
危及人类生命的情况下进行救援或逃生的任何系统。这将跨越从起飞前到着陆后航天员离开飞行器的时间段。

《联合国和平利用外层空间条约》第五条规定：“《条约》缔约国应将航天员视为人类在外层空间的特使，并应在发生事故、遇险或紧急降落在另一缔约国领土或公海时向他们提供一切可能的援助。航天员着陆时，应安全迅速地将他们送回其航天器的登记国。”

“一个缔约国的航天员在外层空间和天体上进行活动时，应向其他缔约国的航天员提供一切可能的协助。

“条约缔约国应立即将其在包括月球或其他天体在内的外层空间发现的任何可能对航天员的生命或健康构成危险的现象，通知条约其他缔约国或联合国秘书长。”

所以说，太空救援是属于全人类的事业，并不仅仅是少数具备航天能力的国家。



▲ 阿波罗与联盟飞船的对接，可以看作是空间救援的一种技术前奏

危险的太空飞行

太空救援需要关注，因为太空飞行目前比其他类型的飞行危险得多。所以，要不要考虑开发太空救援系统，引发了人们关于风险与成本的大讨论。由于太空飞行的技术难度高，太空救援系统通常复杂、昂贵，也很难进行测试。载人航天飞行本身就很难了，研制一种救援系统就更加具有挑战性。

所以很多人认为，应该把资金、技术和其他资源更多地用在提高载人航天系统的可靠性上，只要火箭、飞船或者空间站本身足够可靠，就不需要救援系统了。他们的依据是，早年间民航客机也是给乘客配降落伞的，但是如今，随着民航客机可靠性的提高，已经不需要降落伞了。

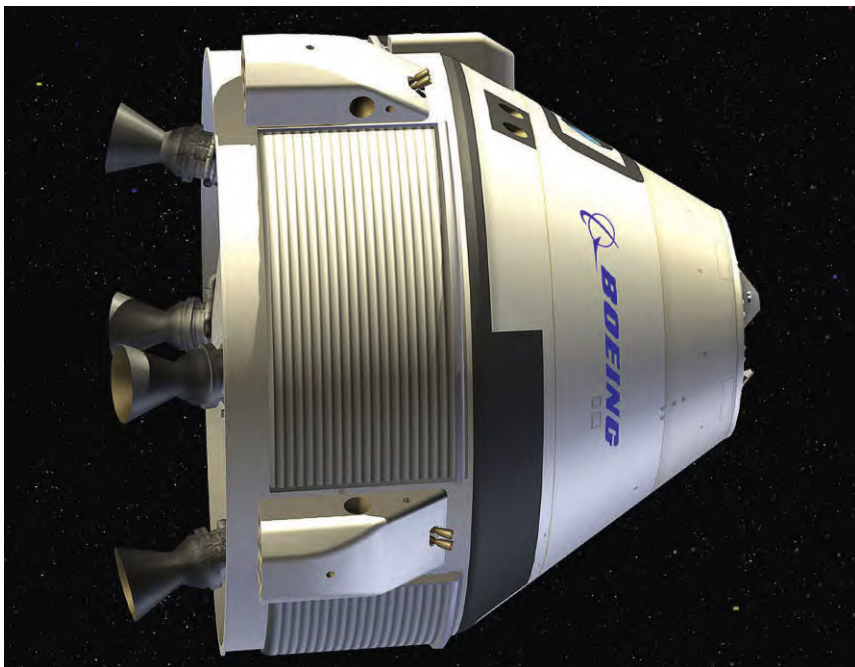
为了给出确切的依据，美国宇航局约翰逊航天中心的安全与任务保障部（SMA）比较了不同类型飞行的相对危险性，提出了这样的指标：

乘坐商业客机的死亡率是每 100 万次飞行一人；

军用飞机的死亡率是每 10 万次飞行一人；

军用作战飞机的死亡率是每 1 万次飞行一人；

载人航天飞行的死亡率是每 100 次飞行一人。



▲ 波音星际航线飞船的逃逸火箭设置与载人龙飞船近似

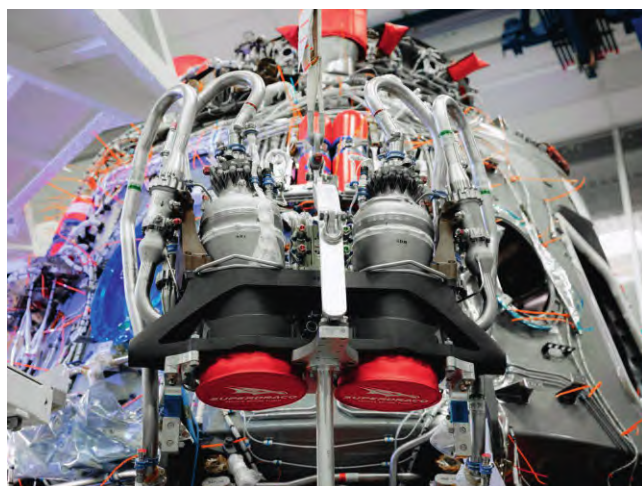
显然，载人航天的风险明显高于任何其他类型的飞行，专家对“不需要救援系统”的论点给出了有力的反驳。

载人航天飞行的这种高风险是由许多因素驱动的。技术的成熟度是一个主要因素。与商业或军用航空相比，载人航天的历史还不长，只经历了几代人的时间来提高可靠性。另外，为了达到第一宇宙速度，需要携带大量燃料和氧化剂，迫使空间系统设计满足非常苛刻的条件，结构设计和推进效率竭力提高。例如，航天飞机外储

箱的外壳如果缩小到手持设备的尺寸，会比易拉罐还薄。航天飞机主发动机是人类有史以来生产的最高效的动力装置之一。马歇尔太空飞行中心前结构主管瑞安给出了几个有趣的指标，帮助人们理解与太空发射相关的设计挑战。他比较了几种不同类型发动机的马力/重量比，发现，如果汽车发动机用航天飞机相同的推进功率/结构重量比设计，那么它的重量只有 1135 克，大概比两瓶矿泉水重一点。所以，太空飞行系统已经达到人类设计能力



▲ 哥伦比亚号航天飞机返回大气层烧毁的瞬间



▲ 载人龙飞船的逃逸救生发动机

的极限了。

太空飞行环境中的很多危险，在大气层内是不存在的。比如，许多材料在真空下的性能与在海平面压力下的性能不同。而外空中会出现的极端温度，在大气层内也不会有。特别是在从全阳光照射过渡到全阴影时，在十几厘米内有超过 200 摄氏度的温度梯度并不罕见。上升过程中，飞行器上的空气动力学载荷可能很大，比如航天飞机升空过程中的空气动力载荷在 34000~38000 帕斯卡之间。再入过程中，空气动力学载荷接近 24000 帕斯卡，温度变化达到 1500 多摄氏度。这些环境特征是航天环境所特有的。另外，由于缺乏大气防护，太阳辐射和微流星、轨道碎片等会造成独特的环境危害，各种航天器的外窗和散热器都曾经受到微流星体的冲击损坏。

实践太少

认识和处理这些极端性能要求和危险环境，已经非常困难了，而对于航天工程师来说，从实践中吸取经验教训、迭代设计的次数也不够多。无



▲ 载人龙飞船的应急逃生地面实验

论美国还是俄罗斯，载人航天器的研发进度都是比较慢的。在美国，设计和测试一种新型载人航天飞行器要花十几年的时间，从理论到实践再到理论的机会太少了。

航天工程师还面临这样一个事实，即使在开发新系统的罕见情况下，由于“组合环境”问题，也很难在实验室对此类系统进行地面测试。几乎不可能在一个设计上同时测试所有载荷

因子的设计，因为它们在空中应用。航天工程师通常被迫一次在一个载荷环境中观察其设计的性能，无论是温度、惯性载荷、空气动力学载荷还是振动，然后通过计算机建模将载荷组合起来，以确定其设计的充分性。

与航空不同的是，航天飞行很难实施大规模集成测试。在航空器的研制中，飞机首先在较低的动压和马赫数下飞行，设计师们在这个过程中对飞机的性能进行监测。如果这个阶段能顺利完成，就会按照设计指标，逐步扩大飞行包线。这个循序渐进的过程可能要经过 100 次试飞。但对航天系统来说，这基本上是不可能的。大多数航天系统都是在“要么全有要么全无”的环境中运行的。一枚新的火箭首次发射，就必须穿过整个飞行包线。第一架航天飞机在首次飞行 60 秒时就达到了超音速，两分钟后进入了高超音速飞行。人们根本没有机会从容查看数据，如果发生异常，也不可能把它召回基地检查。虽然人们可以在地面上对某些空间环境进行模拟，但迄今为止，还没有任何一种手段能完全、充分模拟空间飞行的全过程。这样的困难，解释了为什么这么多新的火箭系统在首次飞行尝试中失败。



▲ 美国第一架正式服役的航天飞机哥伦比亚号

而在航空器研制中，几乎从来不会发生这种事。

正因为航天飞行的复杂性与困难性，与航空器认证计划不同的是，宇航系统通常在一两次飞行后，就可以认为通过认证，可以投入使用了。而载人飞机一般要飞行上百次才能通过认证。宇航系统必须通过对性能的模式预测来进行大部分认证活动，然后通过有限飞行次数的飞行性能来验证模型。

载人航天 7 个主要阶段的风险

载人航天飞行可以分为 7 个主要阶段，分别是发射前、上升、在轨、到达 / 停靠 / 离开另一个航天器、从非地球陆地表面下降和上升、舱外活动、再入地球大气层。其中有几个阶段需

要详细解释一下。在轨阶段包括从进入轨道到返回大气层的阶段。在这个阶段，载人飞行器可能从地球轨道转移到另一个物体的轨道，比如月球、小行星或另一颗行星。所谓到达 / 停靠 / 离开另一个航天器，是通过轨道机动，与另外一个航天器对接、连接在一起，乃至离开。从非地球陆地表面下降和上升，指的是在外星球上的起降，包括月球、小行星或其他行星。

主要危险：

@ 发射前

由于系统故障、结构完整性损失、自然环境或推进相关故障而引起的火灾或爆炸。

@ 上升

系统故障、失控、结构完整性丧失、自然环境引起的故障，推进相关故障。

@ 在轨

系统故障（爆炸、失去姿态控制、失去关键功能、有毒物质释放）、自然环境危害（太阳辐射、微小流星轨道碎片）、航天员健康问题。

@ 到达 / 停靠 / 离开另一个航天器

与另一艘航天器碰撞、系统故障（爆炸、失去姿态控制、失去关键功能、有毒物质释放）、自然环境危害（太阳辐射、微流星体碰撞）、航天员健康问题、偏离航线。

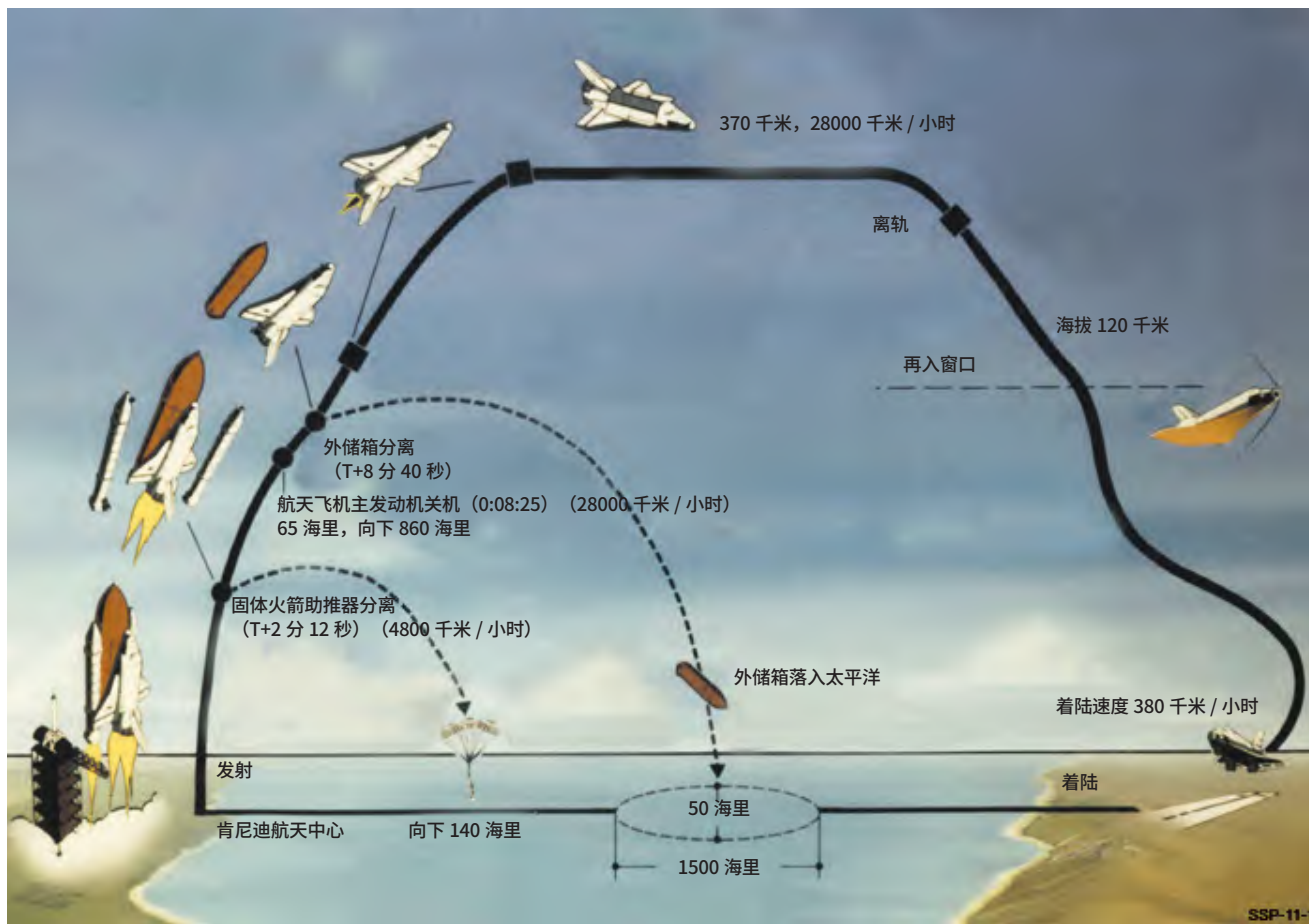
@ 从非地球陆地表面下降和上升

由于系统故障、推进故障或自然环境、偏离航线或表面撞击而导致的起飞或着陆相关事故。

@ 舱外活动

航天服系统故障、航天服破洞、航天员健康问题、航天员与航天器的连接丢失（航天员漂流或系绳丢失）。

@ 再入



▲ 航天飞机的标准飞行流程，覆盖了 7 个救援阶段



▲ 发射场救援可能要动用直升机转移伤员



▲ 约翰逊航天中心消防队的臂章

系统或结构故障，自然环境引起的故障、失控。

上面说的许多条目，对于所有飞行阶段都是相同的。例如，生命关键型或任务关键型系统的故障可能发生在任何阶段，并且可能是灾难性的。航天系统工程师已经开发了诸如系统冗余之类的技术来避免这种困境。结构失效也会发生在所有阶段。航天结构工程师需定义设计极限载荷并确保该载荷的安全系数，以防止在预期设

计条件下发生故障。在许多方面，救援系统设计师的工作是考虑这些设计技术失灵场景下的设计解决方案。在许多情况下，为了设计出重量和性能方面具有可行性的方案，主系统的设计师必须考虑周全。例如，通常不可能设计出能够承受最坏情况下流星体撞击的结构，也不可能在最坏情况的太阳耀斑中保护航天员和生命关键系统。在大多数情况下，即使进行了彻底的飞行前医学检查，也不可能开发

出一种能够应对所有疾病的航天员医疗设施。对于这些很难评估和控制的危险，太空救援系统可以发挥作用。

故障的历史分布

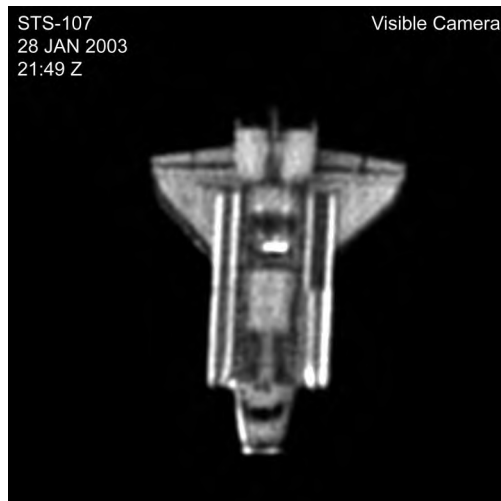
《载人太空飞行中的灾难与事故》一书对航天器事故和潜在事故做了统计，按上述7个阶段做了分类。

这导致了这样一个结论，即尽管在飞行过程中发生事故的风险几乎是

| 阶段 | 故障案例 |
|--------------------|--|
| 发射前 | “阿波罗 1 号”起火；“联盟 T-10”中止；“双子座 6 号”预发射中止；多次航天飞机发动机启动后预发射中止。 |
| 上升 | “阿波罗 12 号”遭雷击；“联盟 18-1 号”上升过程中失控；“挑战者号”爆炸；“哥伦比亚号”防热瓦损坏；STS-51F 发动机关闭并中止进入轨道；STS-93 电气短路。 |
| 在轨 | “双子座 8 号”推进器故障并失去控制；“阿波罗 13 号”氧气罐在登月途中爆炸；STS-2 和“和平号”上的燃料电池故障；“和平号”多次飞行中的医疗状况。 |
| 到达 / 停靠 / 离开另一个航天器 | “和平号”与“进步号”相撞。 |
| 从非地球陆地表面下降和上升 | “阿波罗 10 号”在练习着陆任务中上升失控。 |
| 舱外活动 | 航天员头盔起雾（“双子座”、“和平号”）；航天员精疲力竭（“阿波罗”月球表面）。 |
| 再入地球大气层 | “联盟 1 号”降落伞故障；“联盟 11 号”失压；“哥伦比亚号”解体；“联盟 23 号”降落在结冰的湖中。 |



▲ “阿波罗 13 号” 航天员返回地球，溅落在大海中



▲ “哥伦比亚号” 最后一次飞行期间地面望远镜拍摄到的图像

一致的，但在上升和再入的飞行动态阶段，致命事故的风险最大。这反映了航天行业的传统观点，“离发射场越远，就越安全”。一旦航天器进入设计的稳定状态，例如太空环境，出现严重故障的可能性就越小。值得注意的是，即使是太空环境中非常意外的故障里（“双子座 8 号”推进器故障、“阿波罗 13 号”爆炸、“和平号”火灾和碰撞），航天员和地面控制人员都能控制局势，并将航天员安全带回家。动态飞行阶段的事故通常不会留出时间给人们反应，因此必须设计救援 / 逃生机制，并随时准备响应。

救援的成功率

在具有救援能力的空间系统中，航天员的生存概率可以通过以下公式计算：

$$\text{人员生存概率} = 1 - \text{重大故障概率} \times \text{救援失败概率}$$

从方程可以看出，从航天员生存的角度来看，救援系统的主要价值在于，它能够实现更高的航天员生存概率，而不必把主要系统的可靠性提升到极端水平。可靠性通常是系统开发中的主要成本驱动因素。可靠性为 99% 的系统，通常比可靠性为 90% 的

系统昂贵得多。如果要把系统可靠性从 99% 增加到 99.9%，所增加的成本就更高。但是，如果把可靠性为 90% 的系统，和可靠性为 90% 的救援系统

相结合，航天员的生存概率可以增加到 99%。

当人们打算开发一种长任务寿命的航天器的时候，要不要考虑救援系



▲ 猎户座飞船的逃逸塔正在安装过程中

统,就更加重要了。在长期在轨运行的航天器中,因为无法完全杜绝故障概率,所以出现问题的可能性是随着任务周期延长而逐步积累的。而且,考虑单个部件或者组件的可靠性上限,系统可靠性也是有上限的。如果组件的故障率以故障/单位时间表示,则故障概率可以大概表达为右表。

从这个表格可以看出,在任务周期足够长的情况下,即使是高可靠性部件,也很难做到不出故障。为了解决这样的问题,航天界往往采用两种方法:一种是冗余设计,另一种是航天器在轨维护。不过,如果需要更换的部件在地球上,而航天器所在位置远离低轨道的时候,可能就会带来更严重的问题。而且,在轨维护,特别是出舱维护,本身就是另一个高风险的来源。系统可靠性的终极目的是保证航天员安全。所以在这些情况下,如果拥有救援系统,那么就可以降低对系统可靠性的过高要求。

其实,发射过程中的可靠性计算也可以用来证明救援系统的必要性。比如说,多数火箭的可靠性指标很难达到载人航天的标准。美国宇航局曾经多次研究,用改进型一次性运载火箭(EELV)来发射载人飞行器。根据约翰逊飞行中心安全与任务保证部门的计算,截至2004年初,EELV火箭如果不做改进,可靠性在77%至96%之间。那么,如果拥有一种成功率为90%的逃逸救生系统,EELV的航天员生存概率可以提高到91%至99.6%。

如果仅仅看到90%可靠性这个数字,似乎逃逸救生系统应该不会太难开发。然而,在飞行的许多阶段,由于速度、高度和动压的组合,逃逸救生系统是无法工作的。在“双子星”和早期的航天飞机上,曾经为航天员逃生提供了弹射座椅,但是很多阶段不能使用。在早期航天飞机飞行中,如果任务控制中心用无线电向航天员

| 运行小时数 | 平均故障间隔 500 小时系统的故障概率 | 平均故障间隔 1000 小时系统的故障概率 |
|-------|----------------------|-----------------------|
| 250 | 0.394 | 0.221 |
| 500 | 0.632 | 0.394 |
| 1000 | 0.865 | 0.632 |
| 5000 | 0.99996 | 0.993 |
| 10000 | 1.0 | 0.99996 |



▲ 美国一度给航天员研制过弹射座椅,但是后来放弃了

发出“负座位”信息,意味着速度和高度已经达到极限,不可能弹射。其实在军用喷气式飞机中,弹射座椅也只能在90%的情况下保证飞行员存活。

上面所有困难,都导致了载人航

天是人类最危险的飞行模式,在未来几十年的时间里都是如此,所以有科学家指出,在载人航天的各个阶段考虑救援,是很重要的。

责任编辑:夏丹