

浅析“嫦娥五号”回家之路



王柏懿¹⁾

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 从科普角度, 浅析“嫦娥五号”的跳跃式再入轨道, 说明再入地球大气层期间遭遇的“热障”和“黑障”问题及解决途径。

关键词 嫦娥五号, 再入大气层, 跳跃式轨道, 热障, 黑障

中图分类号: V4 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-21-062

THE CHANG'E 5'S WAY HOME EARTH

WANG Boyi¹⁾

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract This paper briefly analyzes the skipping reentry trajectory of the Chang'e 5, including the problems of “thermal barrier” and “radio blackout” during the atmospheric reentry, as well as related countermeasures.

Key words Chang'e 5, reentry atmosphere, skipping reentry trajectory, thermal barrier, radio blackout

“嫦娥奔月”是在中国流传了上千年的美丽神话, 代表了人类飞往太空的一种梦想。“嫦娥五号”作为中国“探月工程”绕、落、回三期部署的收官之战, 为最终实现载人探月任务铺垫了牢固的基石。大家知道“嫦娥五号”包括轨道器、返回器、着陆器和上升器四个部分, 它们像“糖葫芦”一样串在一起, 合体奔向距地球 38 万千米以远的月亮, 然后带着在月面上采集到的月壤返回娘家——地球。这一壮举也激励了华夏各族人民为实现复兴中华梦而砥砺前行的信心。图 1 展示了一个名叫戴欣颜的 10 岁小学生手绘的嫦娥乘着“嫦娥五号”返回器“回娘家”的画作。它从一个侧面表明, 我们的航天事业将会一代又一代地传递下去, 而且必将取得一个又一个的辉煌。

“嫦娥五号”登月是迄今为止中国航天史上复杂度最高、难度最大的一项任务(图 2)。它实现了五个“首次”: (1) 首次在月球表面自动采样与封装; (2) 首次从月面起飞; (3) 首次在月球轨道上进行无人交会

对接; (4) 首次带着月壤以接近第二宇宙速度返回地球; (5) 首次进行月壤样品存储、分析和研究。



图 1 嫦娥乘着“嫦娥五号”返回器“回娘家”(承蒙作者赠画)

2021-02-07 收到第 1 稿, 2021-03-23 收到修改稿。

1) E-mail: wby@imech.ac.cn

引用格式: 王柏懿. 浅析“嫦娥五号”回家之路. 力学与实践, 2021, 43(3): 471-477

Wang Boyi. The Chang'e 5's way home Earth. *Mechanics in Engineering*, 2021, 43(3): 471-477

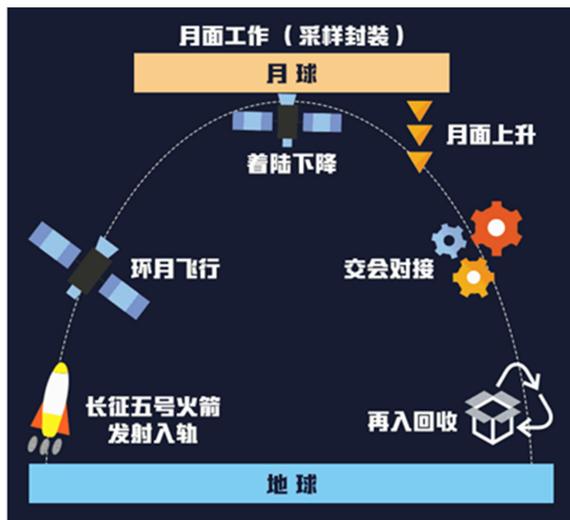


图2 “嫦娥五号”的主要使命 (图片取自网络)

自2020年11月24日4时30分,“嫦娥五号”探测器从海南文昌航天发射场发射升空,到2020年12月17日1时59分,“嫦娥五号”返回器在内蒙古四子王旗预定区域着陆。经历了大约23天的太空飞行,它谱写了人类航天史的又一个新篇章。“嫦娥五号”安全返回,其意义是不言而喻的。如果落不到地球上,又飞回太空,或者在大气层内烧毁了,或者砸在地面上摔毁,前面20多天的精妙运作,便是前功尽弃,“探月”的成果将荡然无存。那么嫦娥到底是怎样回到娘家的?嫦娥回家的路,真的很难吗?

嫦娥回家的路的确很难。且不说采样完成、从月面起飞以后要经历繁复的月地轨道转移,也不讲探测器要经历多次的组体对接与分离,这里只谈谈返回器在距离地球5000千米处和轨道器分离后,返回着陆的最后冲刺之举。

“嫦娥五号”从月球返回时,进入地球大气层的初速度是10.9千米/秒,和飞离地球的第二宇宙速度只相差300米/秒。但是,它到达地面时的速度应当大体为零,才能安全回收。所以航天工程师的首要任务就是:千方百计把返回器在再入期间的飞行速度减下来。如果是在弹道式轨道上完成这个减速过程,那么最大过载会超过10倍以上的重力加速度。如果载有航天员,人的身体便会受到很大的损伤、甚至死亡。如果带有精密仪表或珍贵样品,可能也会遭到破坏或影响它们的性能。此外,再入大气层过程中,还有一个更大的“难关”,就是所谓的“热障”问题。或者说,返回器遇到如何解决极端受热的问题。这个问

题是和减速要求关联在一起的:返回器飞行的速度要减下来,返回器壳体的温度就会升上去^[1-4]。

由于高效减速和防热的考虑,目前航天返回器的外形基本是球冠倒锥形(图3),例如俄罗斯的“联盟号”、美国的“阿波罗号”和“双子星号”。不难发现,“嫦娥五号”的返回器在外形上和“联盟号”大体相似。由于它们的后身部形状为截断的圆弧形,像一个倒置的大钟,所以也常常被称为“倒钟形”。这些返回器都是以钝头球冠朝着前方而冲向地面的。

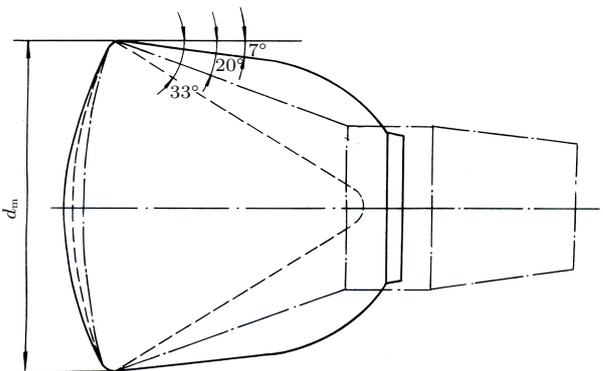


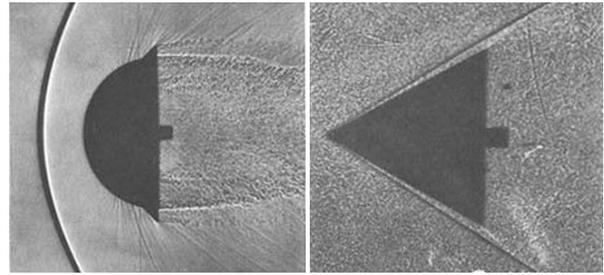
图3 球冠倒锥形返回舱实例 (图片取自文献[3])
——“联盟号”; ——“阿波罗号”; - · - “双子星号”

人们在观看航天返回器再入的实况转播时,都会看到在稠密大气层中,它像一团火球急促地下落(图4)。这就是“热障”问题的展现——围绕着返回器的气流十分炽热。为何这样呢?力学知识告诉我们,钝头飞行器在大气中以高超声速运动时,它的前方会产生一道脱体的弓形激波,这就是那团火球的外轮廓。风洞实验的纹影照片也展示了这类钝头体的流场图像(参见图5)。当然,在风洞实验中,飞行器模型是固定不动的,高速的试验气流流过模型,这是按照力学的相对性原理来设计的。在研究分析高速飞行器周围的流场特性时,科学家也常常是这样做的:把飞行器看作固定不动而大气以高超声速流过飞行器,然后用实验或理论方法研究这个绕流场的特性(速度,温度,压力,等等)。

依据高速空气动力学原理,以超声速运动的飞行器前方所形成的激波,有的是脱体的,有的是附体的(参见图6)。激波后面气流的速度陡降而压力和温度突增。激波强度越大,波后的速度越低而压力和温度越高。相比于附体激波,脱体激波的强度大得多,因而减速的效果比较好。研究表明,脱体激波只是出现在钝头的超声速飞行器前方,这就是航天返回



图 4 再入大气层期间返回器像一团火球 (图片取自网络)



(a) 脱体激波 (b) 附体激波

图 6 激波 (图片取自网络)

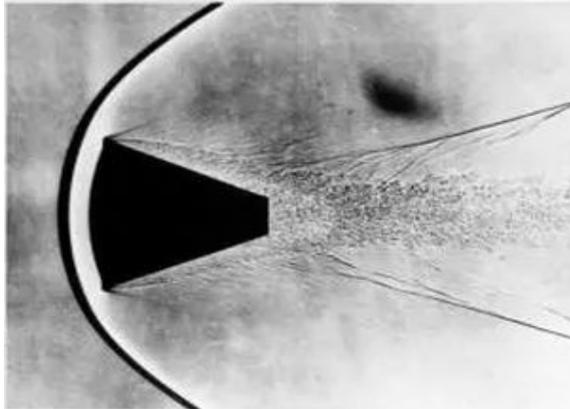


图 5 采用纹影技术展示钝头体超声速飞行器前方的弓形激波 (图片取自网络)

器多采用球冠倒锥形的缘由。当然，球冠倒锥形返回器的前端是钝头，也有利于减少向返回器表面的传热速率。这是再入航天器多采用球冠倒锥形的另一个原因。

如图 7 所示，在弓形激波后方，气流的速度已经降为亚声速。甚至在返回器的物面上还存在一个“驻点”，那里的气流完全迟滞下来了——速度变为零。因此可以说，脱体激波的“制动”能力很强。或者说，脱体激波的“波阻”很大。再入返回器除了承受波阻以外，还承受边界层的“摩阻”。“边界层”也是流体力学的一个术语，它是指紧贴飞行器表面的薄薄一层流动区域。边界层的内侧就是物面，由于摩擦作用，气体速度变为零。再入大气层期间，在波阻和摩阻的共同作用下，返回器的飞行速度显著降低。

如前所述，返回器采用钝头体外形的“副作用”也很显著：脱体弓形激波后方气流的温度大大增加。这是因为气体的动能变成了内能（热），导致返回器周围流场里的气体温度剧增。球冠迎风面处的温度高达数千度。没有一种金属结构材料能够承受这个温度。因此，20 世纪 60 年代以来，攻克“热障”便

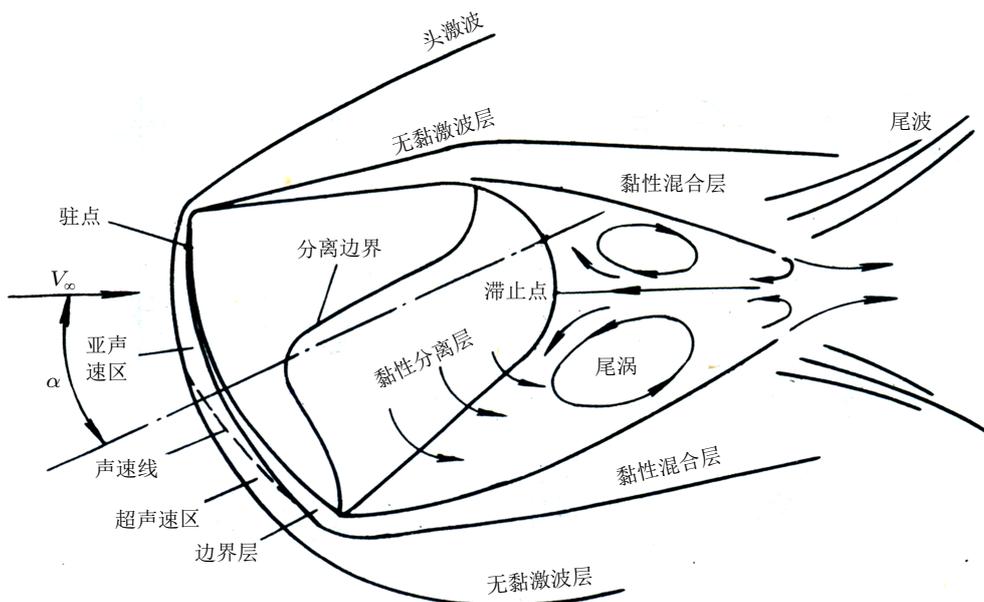


图 7 倒钟形返回器的再入流谱 (图片取自文献 [3])

成为航天专家的一项使命。他们终于研究出一种“以毒攻毒”的策略——烧蚀防热：利用某些耐烧的材料（例如，炭化烧蚀材料）做成蒙在返回器外面的防热层，它在高温下会烧蚀掉一部分材料，与此同时也吸收了大量的气体热量，这样内部结构不再承受巨大的加热，返回器从而可以“全身”回到娘家。大家看到，着陆在内蒙古四子王旗的“嫦娥五号”返回器的一侧，表面上有烧焦的痕迹，这就是防热层炭化的结果（图 8）。



图 8 “嫦娥五号”返回器在四子王旗着陆（图片取自网络）

由于上面提及的减速和防热的要求，返回器的再入轨道必须精心设计。下面来浅析一下返回器的再入轨道。首先，这条轨道的设计，必须限制在“再入走廊”的上下界所规定的范围内，这样才可能返回

到地面。但是，由于气动过载和气动防热等问题，还需要有更多的考虑。此外，落点精度也是必须考虑的问题。特别是，和“神舟”飞船以第一宇宙速度再入的情况不同，“嫦娥”是以第二宇宙速度进入大气层的，它遭遇的减速和防热问题更为严重。为了确保这类返回器的安全存活，“嫦娥五号”采用了“跳跃式再入”的模式（图 9）。“跳跃式”轨道的说法，是按照轨道的形态来划分的。如果从受力情况来说，这种“跳跃式”轨道就是一种“弹道-升力式”轨道，因为这里的跳跃是通过利用并控制再入航天器的升力来实现的。而弹道式再入轨道，则是指下述两种情况下的飞行轨道：一是再入航天器的升阻比为零，二是升阻比不为零但对升力不加控制。这里提到的“升阻比”是空气动力学的一个专有名词，定义为飞行器的升力与阻力之比。

具体对“嫦娥五号”而言，返回器在和轨道器分离以后，经过一段过渡轨道，就到达距地面约 120 千米的大气层边缘处。此时，返回器以小再入角第一次再入，凭借着再入初速度沿着弹道下落，期间受到地球引力和空气动力（包括升力和阻力）的共同作用。由于大气的阻力作用，返回器的飞行速度不断减小。实施初次气动减速后，返回器在距地面约 60 千米处向上跃起而跳出大气层。返回器跳跃到达最高

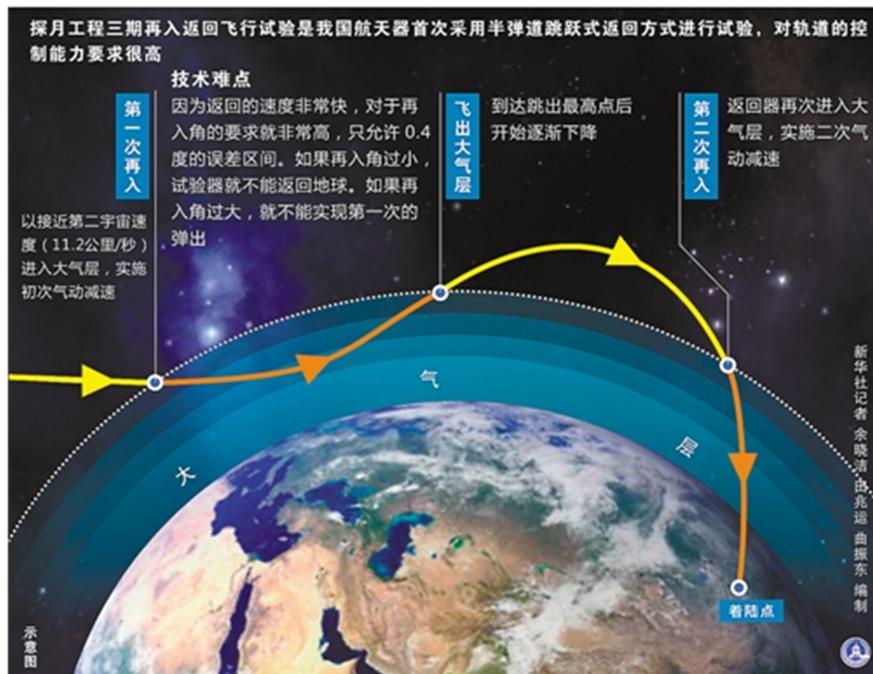


图 9 “跳跃式进入”模式示意图（图片取自网络）

点后，又由于地球引力开始逐渐下降并再次进入大气层。在大气层外的自由飞行轨道是抛物线的，因为此时没有空气动力的作用。在第二次再入时，返回器的再入速度已降为第一宇宙速度以下，随后它在大气层中实施二次气动减速。这一段“进入、跳出、再进入”大气层的航程，人们称为“再入段”。返回器降至距地面大约 10 千米高度时，降落伞打开，“嫦娥五号”终于在预定的区域——四子王旗顺利着陆，这就是“着陆段”。

这里的问题来了：返回器没有发动机的推动却为何能够“自动”跃起呢？秘密在于返回器在大气中飞行时会产生一定的升力。尽管“嫦娥”的形状不具备像飞机那样好的流线型，升阻比 L/D 只是在 $0.1 \sim 0.5$ 之间。人们称之为“小升阻比航天器”。但是就是靠了这点点的升力，返回器就可以“跃”出大气层。根据气动力学计算，图 10 给出了升阻比和攻角 α 的关系。所以只要选择好返回器再入飞行期间的攻角，就能够获得“跳跃”所需的升力。

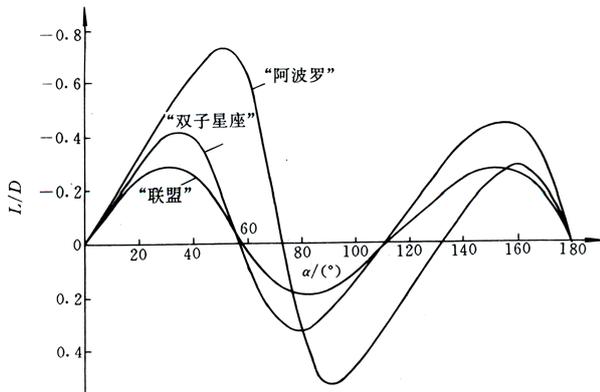


图 10 小升阻比返回舱的升阻比曲线 (图片取自文献 [3])

国内外许多航天专家已经对倒钟形返回器跳跃式再入的飞行轨道进行过计算和优化研究，包括有气动过载、热流密度和落点精度等约束的情况^[5-6]。这里只做概略的原理介绍。这类返回器的质心(图 11 中的点 O) 是偏置的，不在返回器的对称轴线上。当然，气动中心 O' (也称作“压心”) 是在对称轴线上的。空气动力 R 可以分解为升力 L 和阻力 D ，后者是指向飞行速度 v 的反方向。返回器承受的空气动力 R 也可以在沿着和垂直对称线的两个方向分解为 A 和 N ，以此来计算作用在返回器的空气动力对质心的力矩。如果这个力矩的主矢量为零，那么就是所谓的“配平攻角飞行”，这是航天返回器的一种

理想的飞行状态。前面提到的再入走廊的宽度是随着配平升阻比和允许的最大过载而变化的。

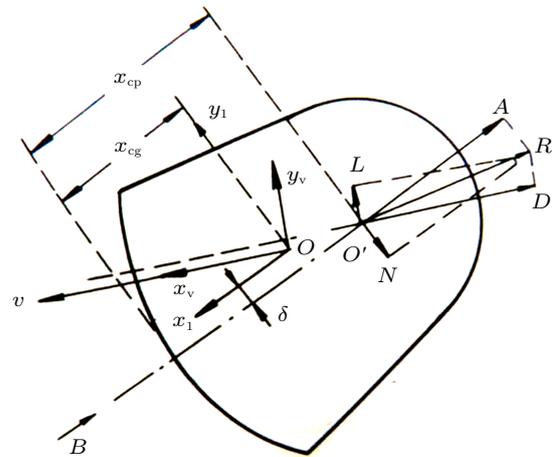


图 11 倒钟形返回器再入大气层期间受力分析 (图片取自文献 [2])

在配平攻角飞行状态下，利用配平攻角所产生的升力，加上对返回器的姿态控制，就可以对再入轨道进行调整。具体是如何实现的呢？这是通过滚动控制，改变升力矢量的方向，或者说改变升力在当地铅垂面和水平面的分量，从而实现调整再入轨道的目标。那么滚动控制又是如何完成的呢？原来返回器上安装有 3 个姿态控制发动机，分别控制返回器的滚动角、俯仰角和偏航角。在图 12 所示的返回器外观图上，可以发现左下侧有两个洞口，滚动发动机的喷焰就是从那里排出的。



图 12 “嫦娥五号”返回器外观示意 (图片取自网络)

不少人把“跳跃式”再入戏称为“打水漂”。但是严格地说,“嫦娥五号”是在“打气漂”,二者不全然相同。首先,它们涉及的环境介质不同:一个是水体,一个是大气。其次,“打水漂”和“打气漂”二者在尺度上完全不可同日而语:目前世界上打水漂游戏的最高纪录是122米,而“嫦娥”打一个“气漂”就跳了大约7500千米(如果从分离点算起,那航程将近20000千米之远)。它首次再入大气层的位置是在南大西洋上空,然后划过非洲大陆上空,再越过印度洋上空,再划过巴基斯坦上空,才进入中国上空,最终抵达位于内蒙古四子王旗的娘家地。再者,如果从力学机制来讲,二者也是风马牛不相及:打水漂的石片需要是扁平形状,它的“梦幻攻角” β 是 20° 左右(参见图13)。石片只能在水面上跳动(如果“没入”水中就会下沉而无法跳起),驱动力是石片和水的撞击力。而打气漂的“嫦娥”是钝头圆锥体,它的再入角在 10° 以内,它要在大气层内运动(或者说,“浸没”在其中),其驱动力是大气对返回器产生的气动升力。所以,从流体力学的机制而言,使用“嫦娥打水漂回娘家”的比喻是不太恰当的。

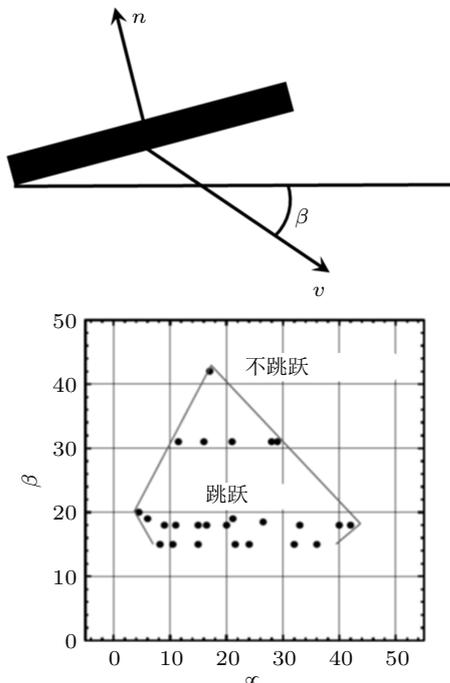


图13 碟形鹅卵石打水漂的力学模型及分析
(图片取自文献 [7])

不难理解,这个“跳跃”动作是生死攸关的一跳!如果跳不起来,“嫦娥”就会一头栽下来摔个粉身碎

骨。如果跳过了,“嫦娥”可能落不到预定的着陆点,给回收返回器带来困难。所以控制返回舱的再入位置、再入角度和运动姿态非常关键,这里靠的是再入导航制导与控制技术。所以为了保证这次探月活动成功,有一艘“远望3号”停泊在印度洋深处,为“嫦娥”保驾护航。具体而言,它要完成返回器初次再入大气层“黑障”区的遥测、外测、光学测量任务。

什么是“黑障”?它和“热障”是一对难兄难弟,主要是发生在35~80千米高程处较为稠密的大气层。这时返回器周围的空气温度达到数千度,其中的分子发生了电离,成为了自由电子和正离子集合体。由于电子和正离子的数量相等,科学家称之为“等离子体”。这团包围着返回器的等离子体,也有个学术名称,叫“等离子体鞘套”。其中的自由电子会和测控无线电波发生相互作用,使得穿过等离子体鞘套的电波大大衰减,当无线电波完全被等离子体鞘套吸收屏蔽时,就是所谓的“通讯中断”或“黑障”。在“嫦娥五号”再入期间,先后遭遇了两次黑障。特别是在第一次减速期内,需要为跳跃准备条件,如何实施测控便成为一道难题。

这个“黑障”问题,早在美国实施“阿波罗”计划期间就遇到了。1970年4月17日,“阿波罗13号”载人飞船回地时,“黑障”时间超过了预计的3分钟。事后科学家判定是因为再入角比预定值 6.5° 小了一点,“黑障”时间就延长为4分27秒(图14)。为了解决“黑障”难题,科学家做了大量的努力,研究过“减轻技术”,也研发过“磁窗”,但是目前尚无法克服它。因此只好采取若干非无线电波测量技术,再加上“记忆重发”、“超前等待”等辅助手段。我们“嫦娥五号”的再入方案更为复杂,需要在“黑障”区内监控返回器的飞行状态。但是,此时的电波信号完

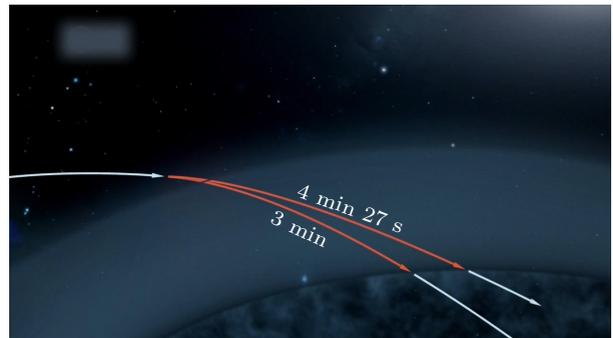


图14 “阿波罗13号”通讯中断时间预定值和实际值
(图片取自网络)

全被等离子体鞘套中断了, 看似只有短暂的 3 分钟, 但监控的任务如何完成呢?

为了完成保驾护航任务, “远望 3 号” 做好了充足准备。船上装备了 S 频段统一测控设备, 采用超前模式, 在返回器进入“黑障”前短暂的 100 秒窗口内, 提前发出了调姿指令。同时配备的光电经纬仪, 承担了返回器的光学跟踪任务。还有单脉冲雷达, 则是接受“等离子体鞘套”的反射信号。既然电波穿透不了鞘套, 就利用鞘套的反射波工作。这三套功能不一的设备共同负责返回器的目标搜索、捕获及跟踪任务。就是这样, “远望 3 号” 在黑暗中像放风筝一样紧紧牵着“嫦娥” 回到了娘家。

以“嫦娥五号”任务圆满成功为起点, 我国探月工程四期和行星探测工程将接续实施。在星际探测的征程上, 中国人将继续一步一个脚印, 将梦想变为

现实。为人类和平利用太空、推动构建人类命运共同体做出更大的贡献。

参 考 文 献

- 1 王希季. 航天器进入与返回技术. 北京: 宇航出版社, 1991
- 2 赵汉元. 飞行器再入动力学和制导. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 1997
- 3 赵梦熊. 载人飞船空气动力学. 北京: 国防工业出版社, 2000
- 4 戚发轫. 载人航天器技术. 北京: 国防工业出版社, 2003
- 5 高洁, 赵会光. 航天器跳跃式返回的再入动力学特性仿真. 航天器工程, 2010, 19(4): 29-34
- 6 杨晓雷, 马兴华, 刘旭宁等. 月球返回舱跳跃式再入弹道设计方法研究. 飞行力学, 2017, 35(2): 64-68
- 7 王一伟, 王宇飞. 从“打水漂”游戏谈起 —— 关于入水的一个力学问题. 力学园地, <http://lxyd.imech.ac.cn>

(责任编辑: 胡 漫)