利用自主浮力控制气球编队近距离探测金星火山活动

Federico Rossi[a], *, Ma´ıra Saboia[a], Siddharth Krishnamoorthy[a], Joshua Vander Hook[a]

[a]喷气推进实验室、加州理工学院，美国加利福尼亚州帕萨迪纳

arXiv:2303.02104v1 [cs.RO] 3 Mar 2023

摘要

近期多项地球实验表明，高度控制气球大有希望用于开展高优先级的金星大气层和地质现象科学考察，包括构造活动和火山活动。

本文探讨了一种作战概念：多颗自主高度控制气球利用次声微气压计监测金星上的爆发性火山活动，并自主穿行于不确定风场中，对探测到的关注事件开展后续观测。我们提出一种适用于金星不确定风场的高度控制气球新型自主制导技术，并表明，与被动漂流器相比，该方法可使火山事件的近距离观测数量最多增加 63%；与地面闭环制导相比，最多增加 16%。即使风场存在不确定性，且爆发性火山事件的频率、微气压计探测器的灵敏度以及空中平台的数量发生较大变化，所得结果依然稳健。

©2023，加州理工学院。政府资助已予以致谢。

1. 引言

过去十年间，金星探测重新引起了行星科学界的兴趣，尤其是自从金星大气层中发现膦气这一潜在生物标志物以来 [1, 2], ，尽管这一发现迄今仍存在争议。

*通讯作者

金星在物理特性上与地球相似（质量为地球的0.81倍，体积为地球的0.86倍），但其大气成分、气候和地形却截然不同，这些差异至今仍是谜团。美国国家航空航天局最近选定 VERITAS（金星发射率、无线电科学、干涉合成孔径雷达、地形与光谱学）[3] 和 DAVINCI（金星深层大气惰性气体、化学成分与成像探测）+ 作为前往金星的 Discovery级任务[4, 5] ；与此同时，欧洲航天局选定EnVision任务 [6] ，将其作为“宇宙愿景”计划的第五项中型任务（M5）。其他一些国家和私营机构也宣布，计划在未来十年内开展金星探测任务 [7, 8, 9, 10]。然而，尽管人类对金星的探测已持续五十多年，其内部结构仍是个谜，阻碍了我们理解金星作为一颗行星的演化历程，以及它为何走上了与地球截然不同的演化道路。因此，金星探测界 [11]认为，对当前火山活动和构造活动进行表征是一项至关重要的科学研究。

20世纪60年代和20世纪70年代，多个着陆、气球和轨道任务对金星进行了探测，揭示了我们如今对这颗行星的大部分认知。金星号着陆器传回的金星表面图像表明，这颗行星主要由火山作用塑造（例如， [12]）。金星号、先驱者号和麦哲伦号航天器获取的雷达数据揭示，金星表面遍布各种火山构造，如火山锥、穹丘和冕状构造 [13]。此外，尽管人们认为金星上不存在大型构造板块，但麦哲伦号数据中可见若干迹象，表明当地尺度上存在地质年代较近的地震应变 [14]。利用金星任务数据 [15, 16, 17]、模拟研究 [18], 以及从地球外推的喷发数据 [19] 开展的多项研究，推测金星上存在正在发生的当代火山活动。根据热流估算的地表地震活动表明，金星的地震活动率介于地球和火星之间 [20]。VERITAS和EnVision任务将以更高得多的分辨率探测地表地形，并检查多个光谱波段的地表发射率[21], ，从而更详细地揭示当前地质活动的状态。然而，目前尚无正在发生的火山喷发或金星震的直接测量结果，这主要是因为金星表面难以从轨道观测：47至70千米高度处浓密的硫酸云层遮蔽了地表 [22] ，而地表环境极其恶劣，温度高于 460° 摄氏度、压力超过90个大气压 [23]，限制了着陆器仪器的工作寿命。

大气温度从地表到90–100千米的高度范围内稳步下降，而在50–65千米的高度带内，压力和温度条件则温和得多，几乎与地球相似 [24]。该区域位于金星硫酸云层内。尽管耐酸性仍是一个值得关注的问题，但与着陆于地表的任务相比，在金星大气层这一区域执行任务的热环境要友好得多——

在该区域长期驻留。苏联的维加气球在电池耗尽前运行了近48小时，寿命超过存活时间最长的着陆器金星13号的20倍；后者在地表运行了127分钟 [25]。金星还是一颗自转缓慢、方向逆行的行星（其太阳日约相当于117个地球日），并呈现大气超旋转现象，即大气绕行星运行的速度快于行星绕自身轴线自转的速度[26]。维加气球在近48小时内飞越了约半个行星。因此，金星云层中的飞行器提供了一种独特的可能性：利用高空的原位观测平台实现全球覆盖。

目前正在研发的下一代金星飞行器，或称气球机器人，将能够控制自身高度，并在金星大气层的不同层间导航 [27]。尤为重要的是，改变高度的能力可使气球沿着方向各异的分层风，航行至地表特定的兴趣地点 [28]。利用浮力控制和风场模式知识，精准制导空中平台的能力已在地球上得到有效验证 [29] ，应用于电信领域；类似技术也已用于控制洋流中的垂直剖面浮标[30, 31]。然而，关键问题在于，现有方法依赖于对大气环流的准确了解，而这些信息需要通过密集、频繁的原位测量和遥感测量获得——金星上并不具备这类数据。文献 [32] 提出了一种利用流场随机模型为金星气球机器人导航的方法，但该方法采用了极其简化的概率模型来描述风的变化。本文提出的方法在 [32]的基础上进行了扩展：（i）提出一种严谨、系统的方法，从随时间变化的模型数据中提取风流的概率分布；（ii）将作战概念扩展至多气球系统。

能够驾驭风并前往地表特定地点，从而开展具有重大影响的原位科学研究，调查正在发生的火山喷发。例如，气球可以多次飞临火山喷发地点，在多个光谱波段拍摄近距离图像，追踪该地点的外观及其演变。气球还可能将仪器化投落送探空仪 [33] 投放到喷发羽流中，在羽流与背景大气相互作用的不同阶段采集羽流成分样本。

气球平台的自主系统有望在提升未来金星任务的科学产出方面发挥重要作用。许多值得关注的事件可能持续时间很短，需要在平台本身做出决策，而不是等待有人在回路中的制导指令。

在本文中，我们重点研究金星火山活动——也就是说，我们通过气球网络能否在探测到火山喷发后，导航至其50千米水平距离范围内开展高价值科学研究，来衡量这一方法的成功与否。迄今为止，尚未有人直接观测到金星上的火山喷发。即使仅对一次正在进行或刚刚结束的火山喷发开展近距离观测，也将为了解金星火山活动的性质及其地下物质组成提供前所未有的信息。对正在进行的火山喷发的羽流进行原位采样，或在喷发发生时及其结束后不久对喷发地点成像，对于理解金星内部都将极具价值。此外，没有两座火山是完全相同的，同一座火山的两次喷发也不会完全相同。对更多喷发开展观测，将有助于采样多种多样的火山环境与喷发类型——例如不同程度的爆炸性，这可能反映岩浆挥发分含量的变化。比较这些喷发，将为了解不同喷发爆炸性程度的分布、地下挥发分含量的地理差异，以及每座火山所处更广泛的地质与构造环境提供关键证据。

1.1. 贡献

本研究的贡献有三点。首先，我们提出了算法，用于在不确定风场中对单个高度控制气球进行远程制导，使其驶向感兴趣区域。其次，我们提出了一种多智能体自主架构，将对感兴趣的爆炸性火山事件进行自主探测、多颗气球与轨道器之间的信息共享，以及所提出的制导算法整合起来，旨在实现对火山事件的近距离观测。最后，我们通过多种场景下的高保真仿真，评估了所提出架构的性能，以及其对舰队规模、探测器性能和事件频率的敏感性。结果表明，与被动漂流器相比，该方法可使后续观测次数最多增加 63%；与地面参与闭环制导相比，最多增加 16%。该方法能够适应风场的不确定性、火山事件频率和微气压计探测器灵敏度的大幅变化，以及空中平台数量的不同。我们强调，本研究的目标并非评估星载自主性在成本、复杂性或风险方面对系统层面的影响。相反，我们着重于确定自主制导的科学潜力；我们认为，这些信息对于指导后续系统工程研究至关重要，后续研究将探索未来金星探测器复杂的设计空间。

1.2. 组织结构

本文其余部分安排如下。第 2 节正式定义了用于监测火山喷发的多智能体气球导航问题。第 3 节介绍了所提出的方法，用于在部分未知的风场中对浮力控制气球编队进行制导。我们通过详细的数值模拟对该方法进行评估：第 4 节介绍仿真设置，第 5 节报告结果。最后，第 6 节给出结论，并指出未来研究中值得关注的方向。

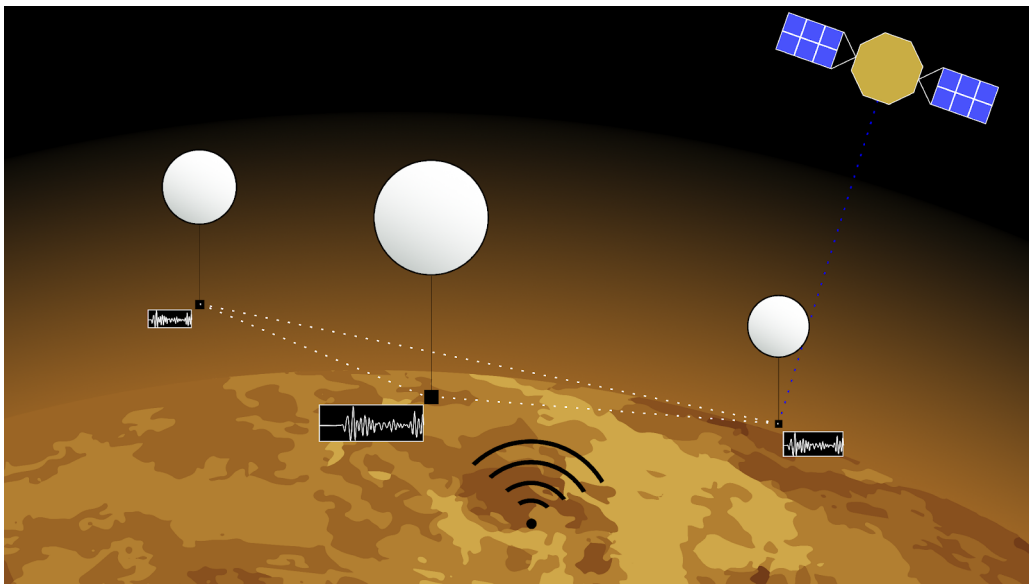


图 1：作战概念：由三只气球组成的概念任务，在一台轨道器的协助下开展。轨道器在气球之间充当通信中继，支持检测爆炸性火山事件，并将来自地球的指令中继出去。

2. 问题陈述、作战概念与假设

本节详细介绍一项假想的金星多气球任务的作战概念，该任务旨在识别和研究火山活动（如图 1 所示）。

我们考虑一项假想任务，由三只可变高度、浮力受控的气球组成，并由一台轨道器提供协助。

推动这一作战概念的高层设计源自喷气推进实验室的金星气球机器人概念 [34, 35], ——一种直径为 12–15 米、由浮力控制、能够在金星大气层高度为 52–62 千米处搭载 100–200 千克有效载荷的气球。

我们假设，气球通过测量直接向大气层注入声能所产生的大气压力波动，或通过火山喷发激发的地面运动所产生的地震声耦合，来探测并进行地理定位。利用安装在单个气球上的线性阵列气球搭载气压计，已经探测并表征了地球上的火山喷发以及地震活动引起的地面运动[36, 37, 38, 39]。目前也正在开发通过监测气球对入射压力扰动的动态响应来确定其方向的新技术 [40, 41]。在本项工作中，我们假设测向技术已经成熟到足以使单个气球上的仪器在探测到火山事件时，能够识别该事件并独立估计其位置。探测到事件的可能性取决于气球与事件之间的距离以及事件的持续时间。我们假设，火山事件按照某种空间和时间分布发生，而该分布并不预先已知；其持续时间也不是预先已知的。只有在事件处于活动状态时，才能探测到它们。

轨道器充当通信中继平台。此外，我们假设轨道器搭载光学仪器，可通过观测 1.27 μm 气辉层和白昼侧 4.32 μm CO_2 非局域热平衡（non-LTE）辐射的波动，探测并定位爆炸式火山事件；这一设想源自 VAMOS（金星气辉测量与地震轨道器）任务概念 [42]。值得注意的是，也有一些技术可能能够通过辐射率成像或重复通过合成孔径雷达（SAR）干涉测量，从轨道上探测非爆炸性火山活动 [3]。只要彼此处于视线范围内，气球还可以通过射频（RF）链路直接相互通信。

一旦识别并定位火山事件，就会指派气球近距离抵达该事件现场，以开展高价值的原位科学研究（例如，将下投式探空仪投放到火山羽流中、采集羽流样本，或获取多光谱图像）。为此，气球通过改变浮力来控制高度：当气球的浮力与周围大气层达到平衡时，就会随风漂浮。由于风向随高度变化，改变气球的浮力、进而改变其高度，便可控制气球的运动方向。在这项工作中，我们假设气球能够在金星表面上方 47 km 至 63 km 的高度范围内安全地控制高度，这与喷气推进实验室的气球飞行器任务概念设计大致一致 [34, 35], ，其受控上升和下降速率为 1 km/h。

我们重点研究将气球远程制导至感兴趣的火山事件，并将气球进入距该事件50千米水平距离以内视为访问该事件。我们设想，在这一距离范围内，现有

的精细制导和定点保持技术（例如， [29]）可以调整用于对该事件的末端制导。对这一末端接近阶段进行明确建模将作为未来的研究工作。

为了评估所提出的方法的性能，我们同时测量气球执行的事件访问总次数（即气球进入某个关注事件 50 千米范围内的次数）以及已访问的不同事件数量。我们考虑 60 天的时间跨度，这与 Aerobot 任务概念 [34, 35] 提出的任务寿命相对应。

目前有多种数值模型可用于模拟金星大气环流（例如， [26, 43]）。然而，由于对金星大气层中复杂过程的特征描述不足，这些模型存在相当大的不确定性，主要原因是缺乏原位数据。因此，我们不 假定已知风速剖面。相反，我们假定有一个概率模型 可用于描述气球在金星大气层中特定位置可能遇到的风速分布 。（值得注意的是，这种表述具有高度通用性：一个极端例子是，对大气某一区域内的大气环流一无所知，此时可用风向的均匀分布和风速的杰弗里斯先验 [44] 来表示。）

在本文中，为确保通用性，我们并未明确建模执行高价值近距离科学探测的过程；相反，我们将接近事件与正奖励相关联。无论事件处于活动状态，还是事件随后已经结束，都可以开展高价值科学探测；即使火山已不再活动，观测近期喷发后形成且尚未风化的地质年轻特征，仍具有科学意义。

3. 不确定风场中气球编队的自主制导

我们提出了一种多智能体软件架构，旨在实现这一作战概念。该架构如图2所示，由三个部分组成：基于次声遥感的喷发探测模块、用于跟踪已检测到的喷发的共享事件数据库，以及浮力运动规划器。架构中的每个组件都在每个气球和轨道器上运行；只要通信链路可用，各智能体之间就会同步事件数据库。

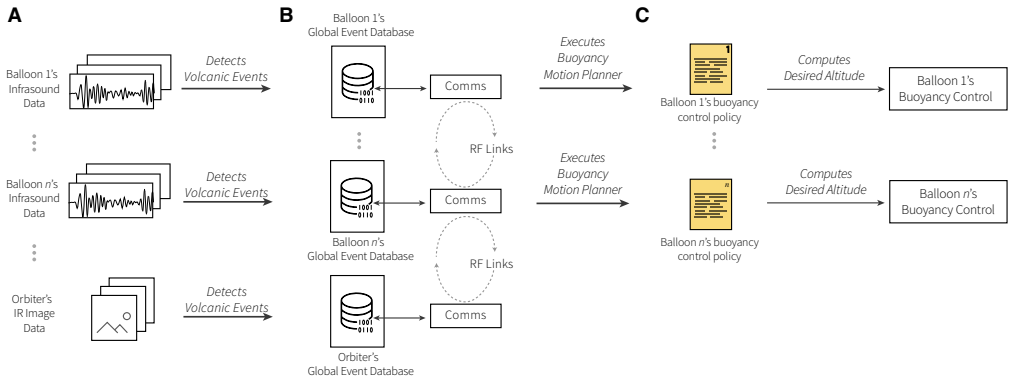


图2：拟议的自主架构。气球通过机载气压计测量大气压力波动来探测火山事件；轨道器则通过观测气辉层和 CO_2 排放的波动来探测爆炸性火山事件。事件存储在全球事件数据库中，并通过通信链路在各智能体之间同步。随后，气球根据大气环流的随机模型，计算最优浮力控制策略，以最大限度地提高访问感兴趣事件的可能性。

3.1. 喷发探测模型

我们假设，只要气球位于火山喷发的一定范围内，就能够探测并定位该喷发。我们将这一范围称为“探测半径”。我们将探测半径建模为喷发的火山爆发指数（VEI, [45]）的函数。火山爆发指数是衡量火山喷发特征的定性指标，根据火山喷发释放能量和物质的强度进行估算。所提出的估算方法基于 Dabrowa 等人 [46], 的研究；该研究考察了对地球上的火山进行远距离次声波探测的潜力，并得出了地球上火山喷发的火山羽流高度与探测距离之间的经验关系。确定任何火山喷发的 VEI 时，都会将火山羽流高度作为一个因素。我们结合火山羽流高度与 VEI 之间的关系，以及探测半径与火山羽流高度之间的关系，得出了表1中的探测半径数值。由于给定 VEI 对应的火山羽流高度范围可能相当大（例如，VEI 4 级喷发的火山羽流高度通常在 10 至 25 千米之间），我们选取每个 VEI 对应的火山羽流高度上限，用于确定探测半径。

我们的方法本身存在较大的不确定性——由于大气变异性，来自 [46] 的数据存在显著离散。尽管在地球上已经证明，利用气球对人工产生和自然产生的地震信号进行声学探测是可行的 [38, 47], ，但金星上火山现象的强度，以及这类现象与大气层之间的声耦合，

仍不太明确。 [46] 中的研究还重点探测了来自地面站的喷发，而这些喷发往往可能源自沿着极其复杂的传播路径传播的声信号，其中包括多次反射。此外，与任何喷发相关的火山羽流高度变化极大，因此，由 [45] 规定的喷流高度范围具有很大的不确定性。此外，由于高压大气，预计金星上的喷流动力学也将与地球上的大不相同。

人们认为金星上存在的火山作用类型也值得讨论。近地表的90巴大气层可能会成为阻碍爆炸式火山活动的强大屏障，使火山活动仅以溢流式形式发生，从而减弱大气层中的特征信号。不过，金星地幔中的挥发性物质含量尚不清楚，仍可能引发爆炸式火山活动（例如，有人曾假设发生过喀拉喀托式喷发 [15], ），但发生频率低于地球。事实上，根据火山构造体及周围熔岩流的形态学和雷达后向散射特征，Ganesh等人 [48]推测，溢流式火山活动是金星上的主要活动模式。不过还需指出，火山过程会触发伴生喷发地震信号；与地球相比，这些信号在金星上耦合进入大气层的强度高出60倍 [49], ，因此，同等强度的地表活动会产生强得多的声信号。此外，与地面站相比，气球在捕捉困于大气波导中的声信号方面具有明显优势，因为它们能够在同一波导中移动。

鉴于这些不确定性，我们没有将地球上的探测半径估算值按比例换算为金星上的值。不过，考虑到表1中的估算具有启发性，我们分别在第5.3节和第5.4节评估了所提出的方法对探测半径和火山事件频率大幅变化的敏感性。

在本文余下部分中，术语“火山事件”指“爆炸式”火山事件，因为有关发生率和探测半径的统计数据主要源自地球上的事件。不过，我们需要说明的是，通过上述机制，也可以使用声学方法检测溢流式火山活动。我们认识到，火山爆发指数（VEI）是一个涵盖面广、用于定性衡量火山喷发强度的指标。此外，在本研究中，我们不考虑从基于空中平台、通过热量或挥发物排放来检测金星上火山喷发的若干其他且极具潜力的方法。这些选择源于本文对设计自主策略的关注，即执行之后 检测的后续观测。对于感兴趣的检测或事件，考虑更高保真度的模型，或采用非声学方法从空中检测感兴趣的事件，都是未来研究中值得探索的方向。

最后，我们还假设，利用声信号自主确定喷发地点的技术已经成熟，因此每个气球都能够通过在机载设备上分析检测到的次声信号，独立确定喷发发生的位置。

VEI	羽流高度 [千米]	喷出物 [米^3]	总声能 [兆焦]	检测半径 [千米]
0	$\leqslant 0.1$	$\leqslant 10^4$	200	110
1	0.1-1	$10^4 - 10^6$	$1.8 \cdot 10^4$	370
2	1-5	$10^6 - 10^7$	$4.3 \cdot 10^5$	1400
3	3-15	$10^7 - 10^8$	$3.7 \cdot 10^6$	4100
4	10-25	$10^8 - 10^9$	10^7	6800
5	$20 - 35$	$10^9 - 10^{10}$	$2 \cdot 10^7$	9500
6	$\geqslant 30$	$10^{10} - 10^{11}$	$2.5 \cdot 10^7$	11000

表1：喷发的火山爆发指数与探测半径的关系。火山爆发指数、喷出物体积和火山羽流高度之间的关系依据 [45]得出；火山羽流高度与探测半径之间的关系则基于 [46]中给出的估算。两项估算均针对地球火山。第5.3节将探讨所提出的方法对探测半径变化的敏感性。

我们还假设轨道器配备了广角光学仪器，只要轨道器能够观测到火山爆发指数为 $\geqslant 2$ 的喷发，就能将其检测出来；检测通过观测1.27 μ米气辉层和4.32 μ米日侧CO_2 非局域热平衡辐射来进行，正如VAMOS任务概念所提出的那样。

3.2. 单气球浮力运动规划器

运动规划器通过控制气球的浮力，引导空中平台前往感兴趣的事件，从而使其驶向最有可能出现有利风向的高度。

我们将气球的运动规划问题表述为一个连续状态马尔可夫决策过程（MDP）[50]。

直观地说，马尔可夫决策过程可以计算出最优的策略，为智能体可能处于的每个状态提供智能体应采取的最佳动作。在本文中，智能体是气球；智能体的状态是气球可能占据的经度、纬度和高度的集合；而动作则表示上升、下降或保持恒定高度的决策。计算最优策略的目标，是最大化奖励函数沿气球轨迹的积分（按照离散时间步 δ进行离散化）。在本研究中，气球访问已探测到的火山事件时会获得正奖励，而改变高度时会获得小得多的负奖励

，该负奖励用于模拟改变气球浮力所需的能量代价。策略基于系统转移的随机模型进行计算，该模型刻画了在自主系统决定上升、下降或保持高度的情况下，气球从给定起始位置漂移至指定纬度、经度和高度的可能性。所提出的方法与 [51]中所述的用于控制冰下漂流器的方法密切相关。

为形式化马尔可夫决策过程，我们描述其状态、动作、转移、奖励和终止状态。

3.2.1. 状态

气球的状态由其在金星大气层中的位置表示，即其经度 φ、纬度 λ 和高度 h。气球的高度 h 必须处于指定的最低和最高高度 h 与 h 之间，对应于气球能够安全运行的金星大气区域。形式上，马尔可夫决策过程的状态为 $\mathcal{S} = \{(\varphi,\ \lambda,\ h) : \varphi \in [-\pi,\ \pi],\ \lambda \in [-\pi/2, \pi/2], h \in [h, h]\}$。

3.2.2. 动作

决策过程的目标是选择气球在给定位置应移动到的高度。在每个时间步，我们允许气球执行三种可能的动作之一：上升 1000 米、下降 1000 米，或保持当前高度。新的高度必须处于允许的最低和最高高度之间。严格来说，给定状态 $(\varphi,\ \lambda,\ h)$ 时，其动作集为 $\mathcal{A}(\varphi,\ \lambda,\ h) = \{h,\ \min(h + 1000m,\ h),\ \max(h - 1000m,\ h)\}$。需要指出的是，执行策略时，气球会在一个时间步 δ 的持续时间内逐渐改变高度；在仿真中，该时间步设为一小时。

3.2.3. 转移

将气球建模为半拉格朗日示踪物：气球随水平面上的风移动，并假设垂直动力学可通过浮力控制完全控制。我们假设存在一个随机模型，用于描述感兴趣区域内每个点的风速可能分布。严格来说，给定位置处的风速 $v(\varphi, \lambda, h)$ 是一个由概率分布 $P(v(\varphi, \lambda, h))$ 刻画的随机变量：$\mathbb{R}^3 \mapsto [0, 1]$。

我们通过拟合金星大气环流数值模型来估计风速的概率分布。由于依赖未知的逐点初始条件，数值模拟通常无法准确再现大气环流，即无法在特定时间和地点准确再现，

以及未建模的强迫项。我们的关键假设是：数值模型在其积分时域内生成的、某一大气区域内速度的经验时间分布，能够代表运载器穿越该区域时可能遭遇的风速概率分布；也就是说，数值模拟在统计上能够代表底层过程。直观而言，如果数值模型预测某一区域内的风向和风速高度一致，那么该区域内流速的实际概率分布很可能与数值预测相符；如果数值模型预测某一区域内的流速变化很大，那么气球遭遇的实际流速也应具有更高的不确定性。

严格来说，我们假设已有一个随时间变化的大气环流数值模型，该模型为大气层中所有感兴趣的点 v_N 指定每个时刻 t 的风速 v_N，并覆盖给定的代表性时间范围 $[t_0,\ t_F]$；具体而言，该数值模型提供一个函数 $\hat{v}_N(t,\ \varphi,\ \lambda,\ h)$：$\{[t_0,\ t_F],\ [-\pi,\ \pi],\ [-\pi/2,\pi/2],[h,h]\} \mapsto \mathbb{R}^3$。通常，数值模型会在离散点网格上提供流速；随后可通过对网格上的流速进行插值，得到函数 $\hat{v}_N$。

为获得风场的随机模型，我们建议直接采用数值模型提供的经验分布：

$$P(v(\varphi,\lambda,h)=v)=\frac{\int_{t_0}^{t_F}1_{\hat{v}_N(t,\varphi,\lambda,h)=v}dt}{\int_{\varphi=-\pi}^{\pi}\int_{\lambda=-\pi/2}^{\pi/2}\int_{t_0}^{t_F}1_{\hat{v}_N(t,\varphi,\lambda,h)=v}dt} \tag{1}$$

其中，1_x 是一个函数：当 x 为真时取值为 1，否则取值为 0。

执行动作（即指令高度）h 后，从状态 (φ,λ,h) 转移到状态 (φ',λ',h') 的概率可计算为

$$P((\varphi',\lambda',h')|(\varphi,\lambda,h),\hat{h}) = 1_{\hat{h}=h'}\cdot\int_{\zeta=\underline{h}}^{\bar{h}}P\left(v(\varphi,\lambda,h)=\left[\frac{(\varphi'-\varphi)(R_\varphi+h)\cos(\lambda)}{\delta},\frac{(\lambda'-\lambda)(R_\varphi+h)}{\delta},\zeta\right]\right)d\zeta, \tag{2}$$

其中，R_φ 是金星的半径；也就是说，在指令高度为 h 时，从状态 (φ,λ,h) 到达状态 (φ',λ',h') 的概率，等于遇到气流速度将气球从 φ 拖至φ'、并从 λ 拖至 λ' 的概率（前提是指令高度等于 h'）；若指令高度不是 h'，则该概率为零。

3.2.4. 奖励

运动规划器的目标是引导气球飞向已探测到的火山喷发点。为此，纬度和经度位于已探测喷发点50公里半径范围内的状态会获得很高的正奖励。已探测喷发点的位置 e 通常无法被精确获知，而是表示为概率分布 $p_e(\varphi, \lambda)$: $\{[-\pi, \pi], [-\pi/2, \pi/2]\} \mapsto [0, 1]$ ，用于表示喷发点 e 位于经度 φ、纬度 λ的可能性；因此，奖励反映了给定状态落在喷发点50千米范围内的概率 。此外，改变高度会带来负奖励r_{energy} ，以体现改变气球浮力所需的能量代价。

形式化表示为,

$$r((\varphi, \lambda, h), u) = -|h - u| r_{\text{energy}} + \sum_{e \in \text{eruptions}} \int_{\varphi'=-\pi}^{\pi} \int_{\lambda'=-\pi/2}^{\pi/2} \left(p_e(\varphi', \lambda') 1_{\{d((\varphi,\lambda),(\varphi',\lambda')) \leqslant 50\text{km}\}} \right) r_{eruption} \cdot (R_{\varnothing} \cos(\lambda') d\varphi' R_{\varnothing} d\lambda') , \tag{3}$$

其中， d表示测地距离， r_{eruption} 是与访问一次喷发相关的奖励， r_{energy} 是高度变化一米所对应的能量代价。

3.2.5. 终止状态

最后，所有高度低于气球最低高度h 或高于气球最大高度 h 的状态，都被 обознач为与较大的负奖励 r_{altitude}相关联的终止状态，以促使气球保持在可生存高度限制内。

3.2.6. 求解马尔可夫决策过程

每个气球通过近似动态规划 [52]在机载端求解所提出的马尔可夫决策过程。气球将状态空间 (φ, λ, h) 离散化为一组构成均匀格点 $\mathcal{L}$的离散状态。需要指出的是，该格点不必与用于模拟大气动力学的网格相对应。格点中每个状态的最优状态价值 $V^{\star}$所满足的贝尔曼方程可写为

$$V^{\star}(\varphi, \lambda, h) = \max_{\hat{h} \in \mathcal{A}(\varphi,\lambda,h)} \Big(r((\varphi, \lambda, h), \hat{h}) + \gamma \mathbb{E}_{(\varphi',\lambda',h'))' \sim P((\varphi',\lambda',h')|(\varphi,\lambda,h),\hat{h})} [V^{\star}((\varphi', \lambda', h'))] \Big) , \tag{4}$$

ˆ 状态 $(\varphi,\ \lambda,\ h)$ 对应的最优指令高度 $h^\star$ 可计算为

$$\hat{h}^\star((\varphi,\lambda,h)) = \arg\max_{\hat{h}\in\mathcal{A}(\varphi,\lambda,h)} \Big(r((\varphi,\lambda,h),\hat{h}) + \gamma \mathbb{E}_{(\varphi',\lambda',h'))'\sim P((\varphi',\lambda',h')|(\varphi,\lambda,h),\hat{h})}[V^\star((\varphi',\lambda',h'))] \Big), \tag{5}$$

格点之外的状态 (φ',λ',h') 的价值通过对格点内的状态进行插值计算，这与近似动态˜规划中的标准做法一致。严格来说，设 $\mathcal{N}(\varphi',\lambda',h') \subseteq \mathcal{L}$ 为构成包含 (φ',λ',h')的格点单元顶点的状态集合。那么， (φ',λ',h') 的最优价值近似为

$$V^\star(\varphi',\lambda',h') = \sum_{\tilde{s}\in\tilde{\mathcal{N}}(\varphi',\lambda',h')} \lambda_{\tilde{s}} V^\star(\tilde{s}), \quad \text{where} \tag{6a}$$

$$\lambda_{\tilde{s}} \propto \frac{1}{\|(\varphi',\lambda',h') - \tilde{s}\|} \quad \forall \tilde{s} \in \tilde{\mathcal{N}}(\varphi',\lambda',h') \quad \text{and} \quad \sum_{\tilde{s}\in\tilde{\mathcal{N}}} \lambda_{\tilde{s}} = 1 \tag{6b}$$

方程 (4)-(6) 通过值迭代求解，从而得到一个最优策略，为格点中的每个经度-纬度-高度元组提供最优高度。对于格点之外的状态，我们采用最近邻方法，即选择格点中与其最近的状态所对应的高度。

图 3 和图 4 显示了一组随机选取的三个事件位置对应的最优状态价值 $V^\star$ （即从给定状态出发遵循最优策略所能获得的预期最优奖励）以及最优策略 $h^\star$ 。

3.3. 事件数据库

第 3.2 节概述的策略可引导单个 气球前往已知位置的喷发点。为了在多智能体环境中应用该策略，我们假设只要有可用的通信链路，气球就会彼此共享事件探测信息，无论是通过视距气球间通信，还是利用轨道器进行中继。

具体而言，每个气球和轨道器都配有一个事件数据库，用于记录探测到的喷发的位置。每当两个气球之间，或气球与轨道器之间能够相互通信时，它们就会比对各自的事件数据库，并由每个智能体将另一智能体探测到的喷发更新到自己的数据库中。由于既要前往过去发生过喷发的地点，也要前往正在活动的喷发地点，因此数据库中的事件不会被删除。

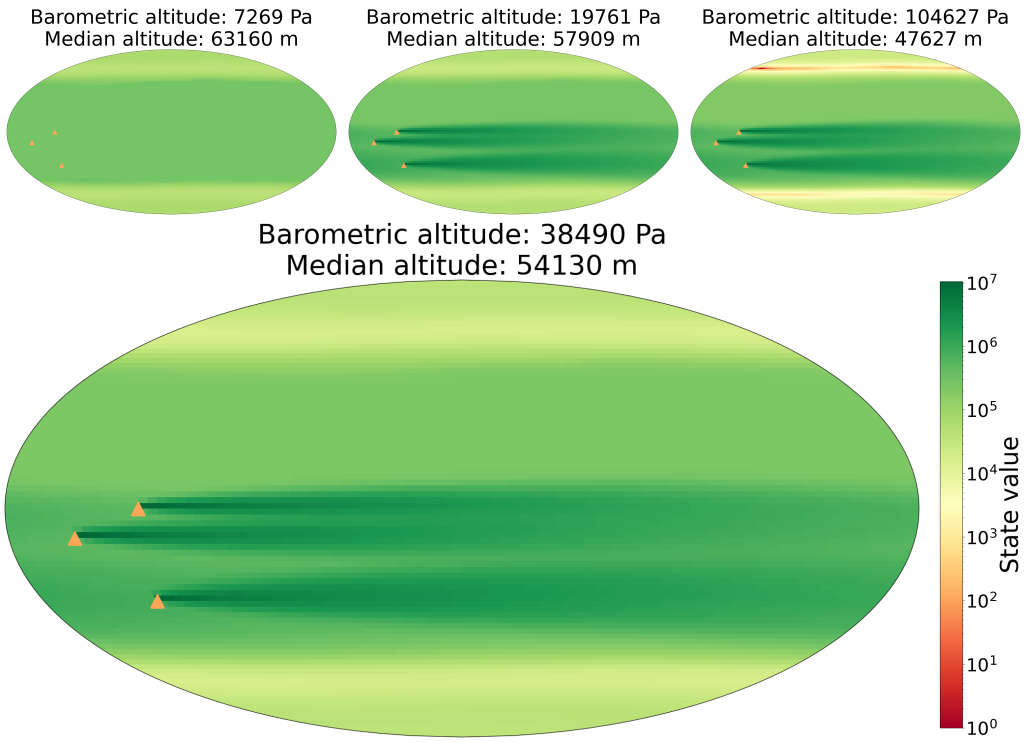


图 3：三个随机选取的事件位置（以橙色三角形表示）以及选定高度的状态值 $V^\star$

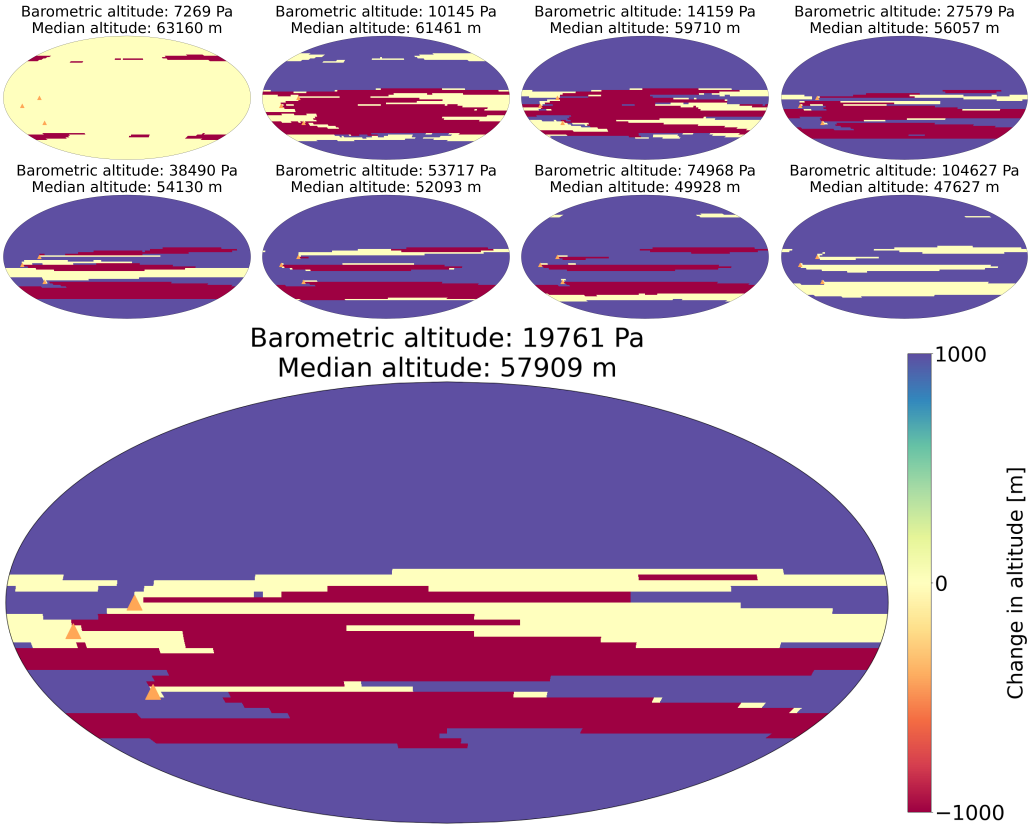
3.4. 自主运行

总体架构和作战概念如图2所示。气球在金星大气中漂移时，会通过次声遥感探测并定位火山喷发，具体内容见第3.1节。每当气球定位到一次喷发，就会将其添加到事件数据库中；当两个气球之间，或气球与轨道器之间建立联系时，它们也会比对并更新各自的事件数据库。每次气球的事件数据库更新后，气球都会通过求解方程（4）—（6），重新计算最优浮力控制策略。最后，气球通过改变自身浮力来执行最优策略，从而达到与其（估算的）纬度和经度相对应的最优高度。

3.5. 备注与局限

有几点需要说明。

首先，该方法高度依赖于对随机风模型的了解。支撑该方法的两个关键假设是：(i) 存在一个金星大气的数值模型；(ii) 该数值模型在统计上具有代表性，能够代表金星上的实际风场，



ˆ 图4： $h^\star$ 针对三个随机选取的事件位置（以橙色三角形表示）的最优策略。

因此可以用来构建随机风模型。从理论角度来看，该假设不会造成一般性损失；如果对风模型了解甚少，则可以采用不确定性较大的随机模型。然而，制导方法的性能高度取决于模型的质量；直观而言，如果风具有高度不确定性，最优策略将无法有效地引导气球前往所关注的事件。就实际情况而言，已有高质量的金星大气中尺度模型可用 [26, 43] ——第4.2节将更详细地讨论此类模型。

其次，为了执行最优策略，必须以比第3.2.6节中用于求解马尔可夫决策过程的格点步长更低的不确定性，确定气球的位置。这一假设是合理的，因为通过轨道器和地球进行射频测距[53, 54] 可以实现较高的定位精度。未来的工作将考虑使用部分可观测马尔可夫决策过程（POMDP）的规划工具

例如 QMDP [55]，以描述气球对自身位置认知中的不确定性。

最后，每个气球都会利用事件数据库中的所有 事件来计算公式 (3) 中的奖励。采用这种方法时，多个气球可能会尝试再次探访同一次喷发，而非最大化被探访的不同喷发次数。考虑到气球可能探测到的事件数量较少，而且再次探访同一次喷发具有重要的科学价值，我们不认为这是所提出的方法的局限；对于不希望多次重访的场景，未来的工作将研究分布式任务分配策略，为特定气球分配特定喷发。

4. 数值实验：设置

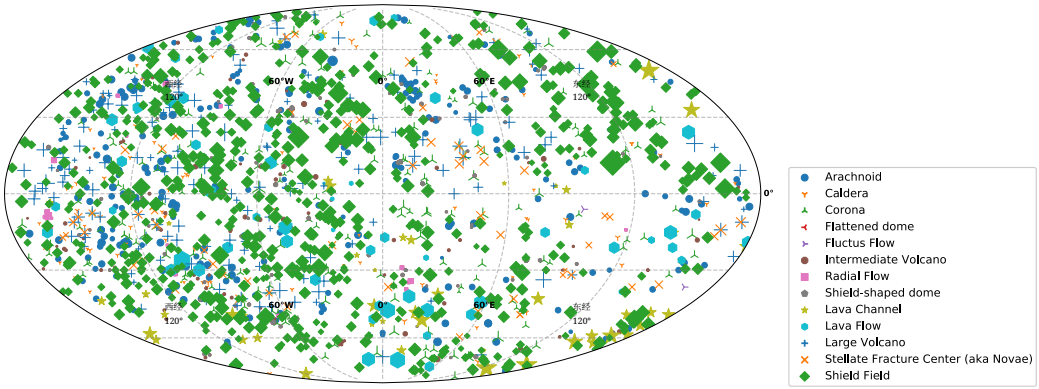
我们通过数值实验评估所提出的方法的性能。在实验中，我们针对三种对应于不同气球制导律的场景，评估对感兴趣的火山事件的探访次数。这三种场景分别称为自主、地面参与闭环和被动：

- 自主：气球在机载端探测事件，并根据第 2 节所述的操作概念，在机载端重新规划高度剖面以探访这些事件；气球会在条件允许时彼此并与轨道器共享事件探测结果；

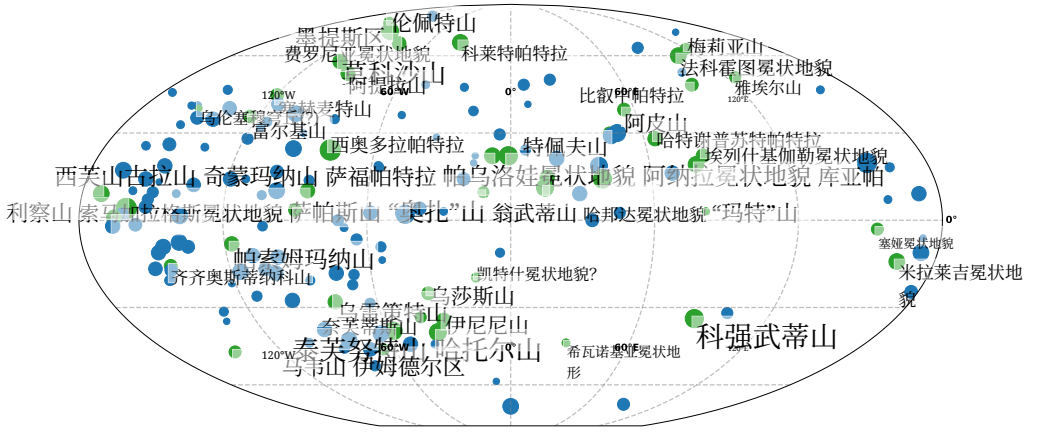
- 地面参与闭环：气球探测事件并将其报告给轨道器；轨道器每天在预先指定的时间与地球通信两次；地球通过求解公式（4）至（6）计算访问已探测事件的最优策略；这些策略被上行传输至轨道器，轨道器再在首次可用的通信机会将其分发给气球。与自主策略相比，地面参与闭环策略实际上会在气球上实施该策略时引入时间延迟。

- 被动：气球随风场漂移，不进行主动浮力控制，也没有特定目的地。

本节剩余部分将详细讨论用于感兴趣事件及其检测的模型、风模型、气球和轨道器的运动模型，以及通信模型。



(a) 麦哲伦号航天器识别出的所有火山地貌的位置



(b) 麦哲伦号航天器识别出的大型火山的位置

图5：麦哲伦号航天器识别出的火山位置 [56]。标记大小表示火山的大致尺寸

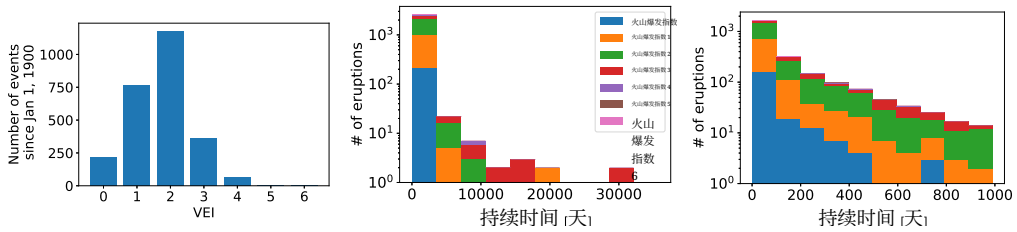
4.1. 火山事件模型

4.1.1. 喷发位置

我们采用了麦哲伦号航天器识别出的火山位置和尺寸 [13, 56] （图5a），其中许多位于 ±30纬度范围内。已识别出一千多个火山位置，大小各异。由于我们关注的是检测后发生的访问，因此不采用检测范围与访问范围非常接近的事件：相应地，我们仅使用麦哲伦号金星火山特征目录 [56],中所示的168座“大型火山”的位置（见图5b）。

4.1.2. 喷发类型和持续时间

火山的爆炸性以火山爆发指数（VEI）来表征。由于金星上的喷发类型和持续时间尚不清楚，本研究将



(a) 喷发频率，按VEI自1900年以来。 (b) 火山喷发的持续时间按火山爆发指数分类。 (c) 火山喷发的持续时间按火山爆发指数分类（详细信息）。

图6：基于类地火山活动的喷发类型和持续时间

根据类地火山活动对其进行建模。我们选取史密森尼全球火山活动计划的数据库 [57]作为地球火山的数据来源，并将分析重点放在自1900年1月1日起记录的喷发上，因为较早的数据存在偏向较大规模喷发的问题。地球上的VEI范围为0（夏威夷）至8。皮纳图博山在1991年的喷发VEI为6。过去122年的地球火山活动数据表明，喷发VEI的中位数为2（图6a）。大多数喷发持续不到一天，但其分布有较长的尾部，有些喷发可持续长达10,000天，如图6b和图6c所示。

我们选择金星上的大型火山作为模拟喷发的地点，并根据地球火山活动数据集中的频率和强度，在这些地点随机生成喷发。在第5.4节中，我们通过大量数值模拟，探究该方法的性能对火山事件频率的敏感性，从而放宽这一假设。

4.2. 风与气球运动模型

大气环流模型采用先进的皮埃尔-西蒙·拉普拉斯研究所（IPSL）金星全球环流模型（GCM）生成 [26], ，该模型近期已在 [43][1]中得到验证。该模型基于拉布拉托瓦尔·德·梅泰奥罗吉·迪纳米克-祖姆（LMDZ）经纬度网格有限差分动力核心 [58]。IPSL金星GCM的水平分辨率为96个经度×96个纬度（3.75×1.875度，即赤道处 $\approx 400 \times 200$千米、纬度60度处 $\approx 200 \times 200$ 千米），垂直方向从地表至约95千米高度共分为50层。GCM生成的中尺度结构与维加气球、金星快车和拂晓号轨道器观测到的金星环流模式吻合良好。一项参考

[1]金星 IPSL 全球环流模型可通过请求在 http://www-venus.lmd. jussieu.fr/ 免费获取。

GCM仿真覆盖1个金星日（117个地球日）；仿真开始时大气处于静止状态（均匀的纬向风场 $u = 0$），垂直温度廓线与《金星国际参考大气》（VIRA）模型非常接近。所有地表位置的表面气压（92巴）和温度廓线均设为相同，未考虑地形。 [59]

模型的输出包括模型网格中每个时间步、纬度、经度和压力层对应的纬向风和经向风。

图 7 展示了选定时间步和高度下的风场。补充材料中提供了一段展示风场随时间演变的影片。

气球被限制在 $h = 47km$ 至 $h = 63km$ 的最小和最大高度范围内。假设气球的定位精度优于 IPSL金星GCM 在纬度低于 60° 时的 ≈ 200千米分辨率——这是一个非常宽松的要求，因为通过轨道器测距即可实现数十米的定位精度 [53]。我们指出，尽管由于底层风模型的分辨率较低，提高定位精度不会立即改善所提出的远程制导策略的执行效果，但这对精细末端制导（例如， [29]）将大有裨益。此外，我们强调，所提出策略的分辨率受 IPSL 风模型分辨率的限制；如果有更高分辨率的大气环流模型，就可以直接采用本文的方法推导出更高分辨率的制导策略，而这反过来也会受益于更高的定位精度。然而，我们的结果表明，即使采用本文研究中分辨率相对较低的风模型，所提出的技术仍能够引导气球前往感兴趣的事件，并且优于被动方法。

在仿真中，三个气球的初始位置均在金星表面随机均匀选取，并满足以下条件：在初始时间步，至少有一个气球处于某个活跃火山事件的检测范围内。通过拒绝采样强制满足这一条件，确保本研究聚焦于所提出的制导策略重新访问已检测事件（而非检测新事件）的能力，这与本研究的预期贡献相符。

马尔可夫决策过程代价 r_{altitude}、r_{eruption} 和 r_{energy} 分别设置为 -10^6、10^3 和 0（实际上假设改变高度的能量代价主要由支持有效载荷和通信所需的“日常维护”能量代价构成）。这一代价选择通过经验确保气球在追踪喷发时不会超出安全高度范围，同时也能根据需要机动飞行以抵达喷发地点。

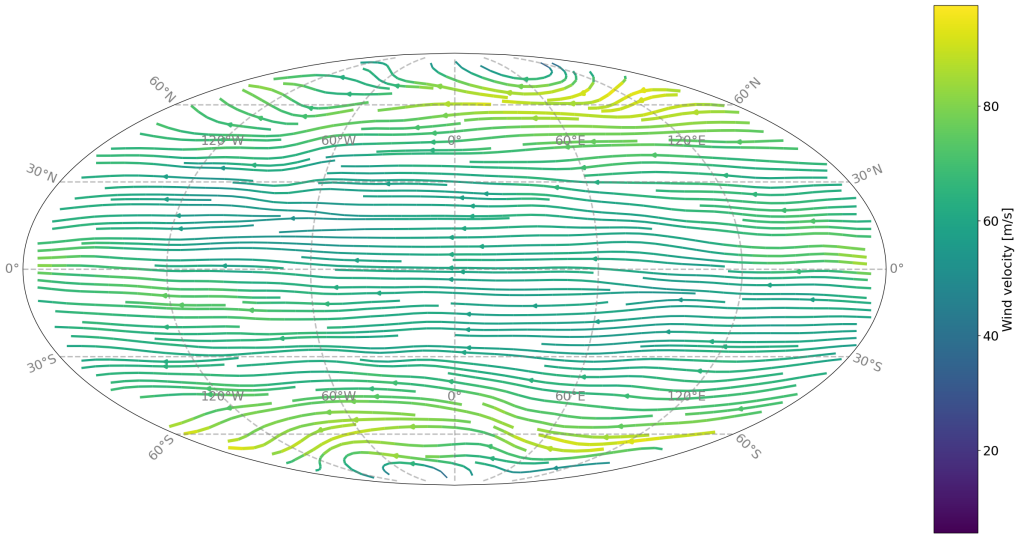


图7：仿真进行至第58.43天时，在金星表面上方气压高度为27579.54 Pa处（对应约56千米的高度，具体取决于当地温度）的风场。

4.3. 轨道器运动模型

我们为轨道器考虑了两种不同的轨道，并比较它们的相对性能。首先考虑 VAMOS 轨道器概念 [60, 42], 的轨道，即高度为 30,000 千米的圆形赤道轨道。该轨道在任意时刻都能完整观测行星的一半，并且轨道周期较长，为 20.91 小时。第二种考虑的轨道属于规划中的 VERITAS 任务 [3], ，是一条高度为 220 千米、近极地的圆轨道，对行星的观测范围相当有限，但轨道周期快得多，仅为 1.53 小时。

VAMOS任务构想和计划中的VERITAS任务的轨道如图8所示。

4.4. 通信模型

我们采用一种通信模型：当气球彼此之间的距离在 200 千米范围内时，它们可以相互交换信息；只要轨道器高于地平线至少 30° ，气球就可以与轨道器通信（不受距离限制）。我们假设气球配备增益为 2 dB、功率预算为 1 W 的偶极天线；轨道器配备定向天线，其 -3 dB 波束宽度覆盖整个金星圆盘；金星上天线的黑体温度为 730 K [61]；系统损耗计入 3 dB 的衰减。在这些参数下，VAMOS 轨道器能够以 8 千比特每秒的速率与气球通信，而 VERITAS 轨道器能够以

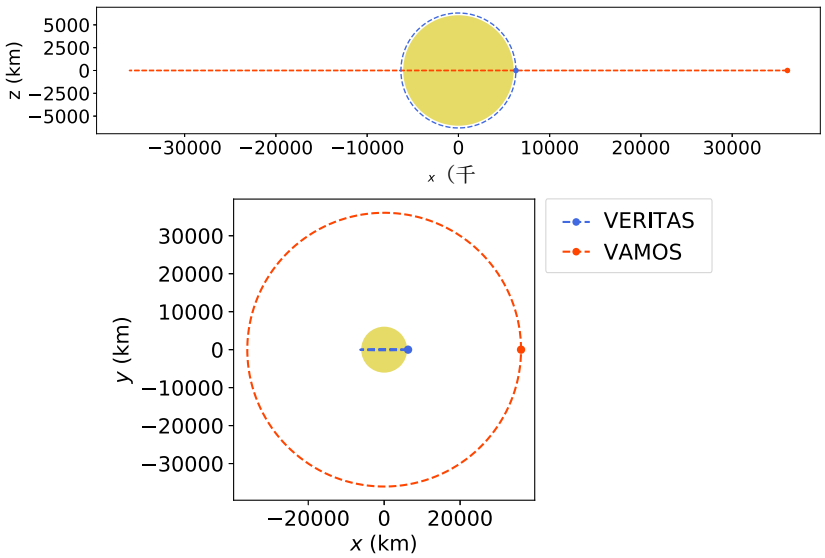


图8：拟议的 VAMOS（红色）和 VERITAS（蓝色）轨道器的轨道

超过 500 千比特每秒的速率进行通信（尽管通信频率低得多），如图9所示；气球之间的数据速率最高可达 250 千比特每秒。

5. 数值实验：结果

现在，我们可以评估所提出制导方法的性能。我们将探讨五个关键问题：

- **星载自主性的影响**：与地面闭环制导和不受控漂流器（被动制导）相比，星载自主检测和制导是否会增加已访问的事件数量，并缩短从检测到访问之间的时间？

- **对轨道器轨道的敏感性**：该方法的性能如何取决于轨道器轨道？轨道器轨道会同时影响气球间通信机会的可用性以及检测火山事件的概率。

- **对探测半径的敏感性**：该方法的性能如何取决于能够检测到火山事件的距离？

- **对事件频率的敏感性**：如果火山事件的发生频率低于或高于预期，该方法的表现如何？

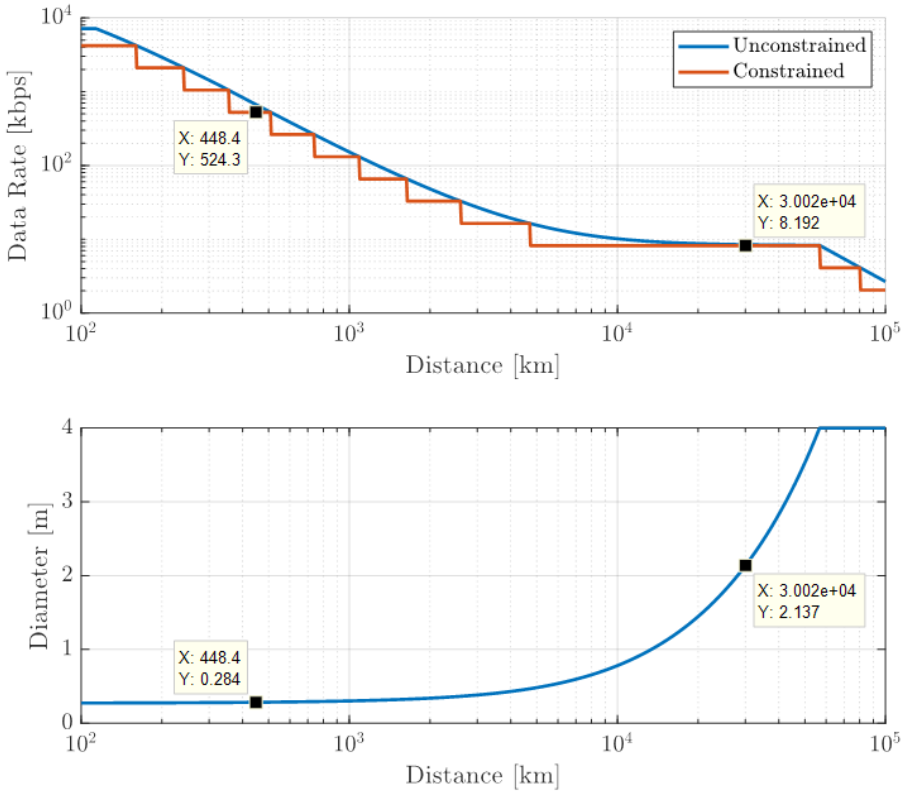


图9：气球与轨道器之间的数据速率随距离变化的关系。轨道器天线的直径经过设计，使其在-3dB波束宽度范围内覆盖金星整个表面，如下图所示。“受限”曲线反映了这样一个事实：在实际应用中，无线电设备通常只能以 2 的幂次方的数据速率运行。

- **对机群规模的敏感性**：该方法的表现如何随机群中气球数量的变化而变化？

为回答这些问题，我们针对下文所述的每种关注情景分别进行了 1000 次仿真。每次仿真持续 60 个地球日。对于每次仿真，火山事件的位置、火山爆发指数和持续时间均按第4.1节所述随机采样。气球的初始位置是随机选取的（为了将研究重点放在该方法重新探访已检测事件的能力上，采样过程确保在初始时间步时，至少有一次喷发位于某个气球的检测范围内）。气球的位置按第4.2节所述进行推算。风场的起始时间从数值大气环流模型所涵盖的所有时间步中随机选取，并且

风场随后推算 60 个地球日。如果仿真时间超出数值环流模型的时间边界，模型就会回到第一个时间步。

图10展示了一个具有代表性的仿真结果。补充材料中提供了自主、地面参与闭环和被动情况的代表性仿真视频。

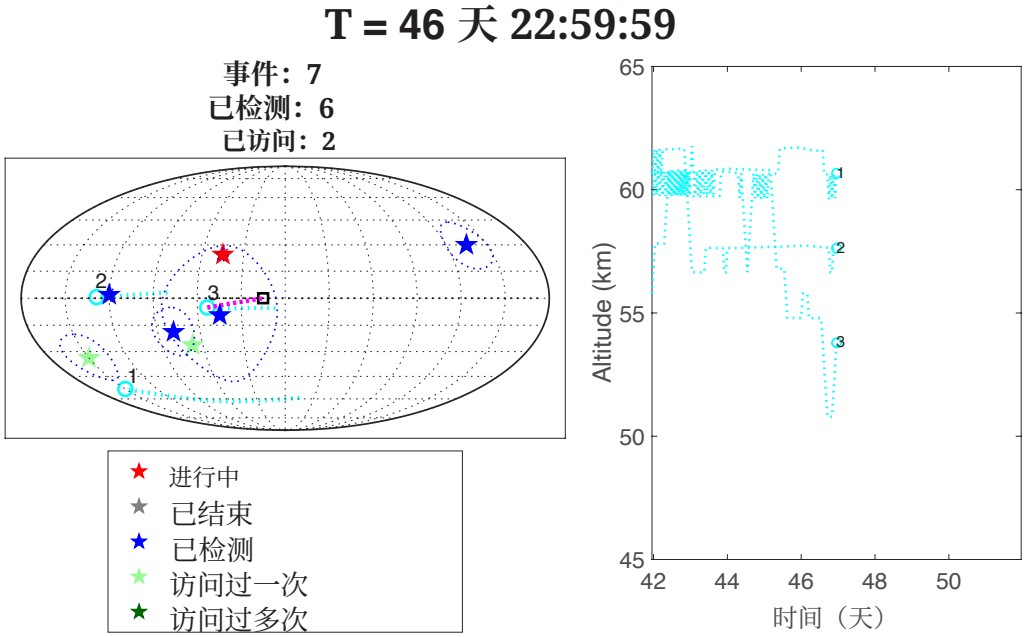


图10：采用星载自主性的代表性仿真结果。气球以青色圆圈表示。青色虚线表示气球过去24小时内的地面轨迹。轨道器的星下点以黑色方块表示，轨道器的赤道地面轨迹以黑色虚线表示。洋红色线条表示智能体之间处于活动状态的通信链路。火山事件以星形表示；星形的颜色表示事件是否处于活动状态，以及是否已被检测或访问。事件周围的蓝色虚线圆圈表示探测半径。

5.1. 星载自主性的影响

表2和图 11 和图 12a 报告了所提出的方法的性能，并将其与地面闭环自主性和被动方法进行了比较；比较所针对的轨道对应于 VAMOS 轨道器概念。

采用自主浮力控制对已访问的不同事件数和总事件数有显著影响。与被动情况相比，星载自主性使已访问的不同事件数均值增加42.7%（相当于预期不同访问次数增加0.56次

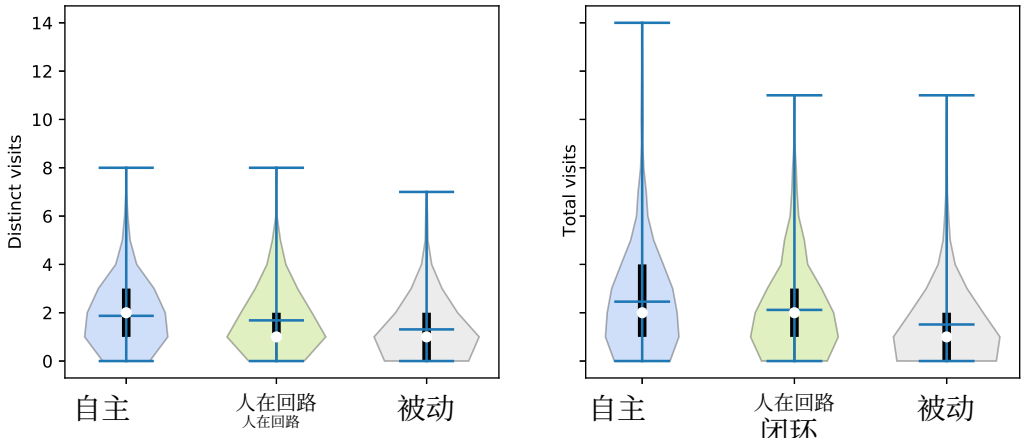


图11：VAMOS轨道下星载自主性的影响。小提琴图 [62] 显示了1000次试验中不同访问次数和总访问次数的经验分布。垂直对齐的直方图显示了访问次数的分布；对于自主制导控制器，直方图以蓝色阴影表示；对于地面在环控制器，以绿色表示；对于被动方法，以灰色表示。白点表示中位数；黑色条表示第25%和第75%分位数；蓝色短线表示该分布的均值、最大值和最小值。两幅图使用相同的垂直刻度。对于每次仿真，火山事件的位置、类型和持续时间均按照第4.1节所述随机选取。

），总事件访问次数增加62.9%（即预期总访问次数增加0.95次）。与被动情况相比，地面闭环制导带来的增幅较小，但仍然显著：已访问的不同事件数增加28.2%（相当于预期访问次数增加0.37次），总访问次数增加40.4%（即预期总访问次数增加0.61次）。

图12a显示了访问气球与事件之间在最近接近时刻的距离分布。访问时刻的平均距离为29千米；所有访问次数中，有1.16%以亚千米距离飞越事件，13.1%的访问距离事件不超过10千米。虽然三种模式下的距离分布在定性上相似，但星载自主性使任意给定距离下的访问次数更多。

这些结果表明，无论采用星载制导还是地面制导，自主制导都有望显著提升联网气球探测金星地质时的科学产出，使预计访问的火山事件数量增加 40% 至 60%；此外，虽然要充分实现所提出方法的优势需要星载自主性，但与被动方法相比，地面制导仍能带来显著益处。

表2：星载自主性的影响，VAMOS轨道

	自主		人在回路		被动	
	mean	标准差	mean	标准差	mean	标准差
不同检测次数	8.35	3.39	8.33	3.38	**8.45**	3.44
不同访问次数	**1.87**	1.37	1.68	1.35	1.31	1.21
总访问次数	**2.46**	1.98	2.12	1.82	1.51	1.51
已访问的检测事件 [%]	**23.54**	17.91	21.42	17.70	15.91	15.02
已访问的事件 [%]	**14.24**	11.18	12.85	10.78	9.87	9.94

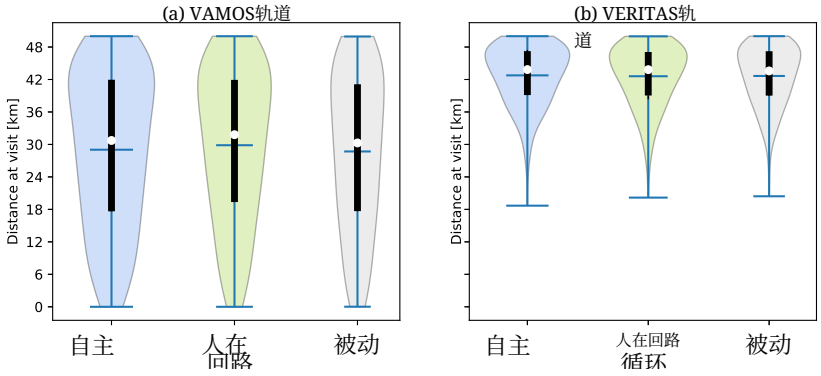


图12：最近接近时气球与访问事件之间的水平距离。

虽然访问事件数量的绝对增幅相对较小，但其对我们理解金星地质现象的影响可能十分显著。与被动情况相比，星载制导有望将完全观测不到喷发的概率从 26.7% 降至 13.8%，几乎使未能收集金星火山活动近距离测量数据的概率减半。此外，星载制导还能将观测到两次或更多次不同喷发的可能性从 36.7% 提高至 58.2%。如上所述，考虑到火山及火山喷发可能存在多样性，例如在喷发类型和物质产出方面，观测不同火山具有极高价值：即使只观测到两次不同的喷发，也将为火山爆发力的分布、喷出物体积以及火山活动的区域差异提供关键信息，从而帮助我们更深入地了解金星的地质环境。

表 3：星载自主性对 VERITAS轨道的影响

	自主		人在回路		被动	
	mean	标准差	mean	标准差	mean	标准差
不同检测次数	6.78	3.06	6.80	2.99	**7.00**	3.05
不同访问次数	**1.62**	1.32	1.51	1.28	1.31	1.19
总访问次数	**2.06**	1.80	1.90	1.79	1.52	1.46
已访问的检测事件 [%]	**24.15**	18.85	23.04	19.60	18.86	16.79
已访问的事件 [%]	**12.08**	9.74	11.51	10.32	9.57	8.42

5.2. 轨道器轨道的影响

表 3 和图 12b 和图 13 展示了所提出的方法在与 VERITAS 任务概念相对应的轨道上的性能。与 VAMOS 的轨道相比，该轨道的高度显著更低，轨道周期也更短。

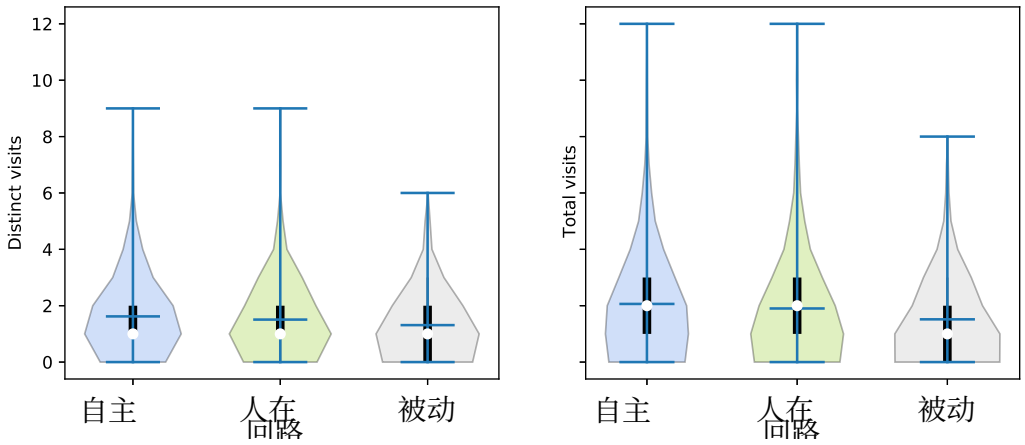


图 13：轨道器轨道的影响：所提出的方法在与拟议 VERITAS 任务轨道相似的轨道上的性能。

与 VAMOS轨道相比，VERITAS轨道的性能略差：低轨道不仅减少了从轨道上检测事件的机会，更关键的是，也减少了气球与轨道器通信的机会。最近接近时与事件的距离也显著增加：一次访问的平均距离增至 42.8 千米，且没有气球接近事件的距离小于 18 千米。尽管如此，与被动情况相比，星载自主性使已访问的不同事件数量增加了 23.6%，而地面闭环制导则使其增加了 15.3%。

因此，尽管高空轨道在事件检测方面表现更佳，所提出的概念也能适配低轨道飞行器，而后者可能更适合开展互补性科学研究。

5.3. 对探测半径的敏感性

为考虑这种不确定性，我们评估了所提出的方法对气球探测器探测半径的敏感性。为此，我们考察了探测半径分别为表1所报告的标称探测半径的 20%、60% 和 140% 的情况，以及一台 VAMOS 型轨道器。结果见图14、图15和表4。

值得注意的是，不同访问次数和总访问次数似乎对探测半径相对不敏感：当探测半径从标称值的 140% 降至仅 20% 时，不同访问次数仅减少 8.6%，总访问次数减少 9.14%，降幅都相对较小。这些结果表明，所提出的方法对探测模型的不确定性具有很强的鲁棒性，而且机载自主能力在各种可能的探测灵敏度范围内都能带来显著的竞争优势。

表4显示，星载自主性在不同探测半径下均具有优势：与被动漂流器相比，星载自主性实现的总访问次数始终多出56%至63%，不同访问次数多出38%至46%。与地面参与闭环制导相比，星载自主性的优势较小但仍显著，不同访问次数多出16%至19%，总访问次数多出12%至17%。

图16进一步详细探讨了这一现象，展示了在所有考虑的探测半径和制导律下，已访问事件数量随火山爆发指数（VEI）的变化情况。令人意外的是，随着探测半径增大，自主系统检测到的事件数量仅略有增加，已访问的事件数量则几乎没有增加。相比之下，地面参与闭环和被动模式下的检测数量大幅增加——由于这些模式访问事件的效率较低，气球会花更多时间在大气层中漫游而没有特定目标，从而产生更多偶然探测。然而，检测数量的增加仅使访问次数略有上升。这表明，只要能够检测到一些事件，限制访问次数的瓶颈就不是已检测事件的数量，而是在金星大气层中操控气球的能力——这正是本文所提出方法要解决的问题。

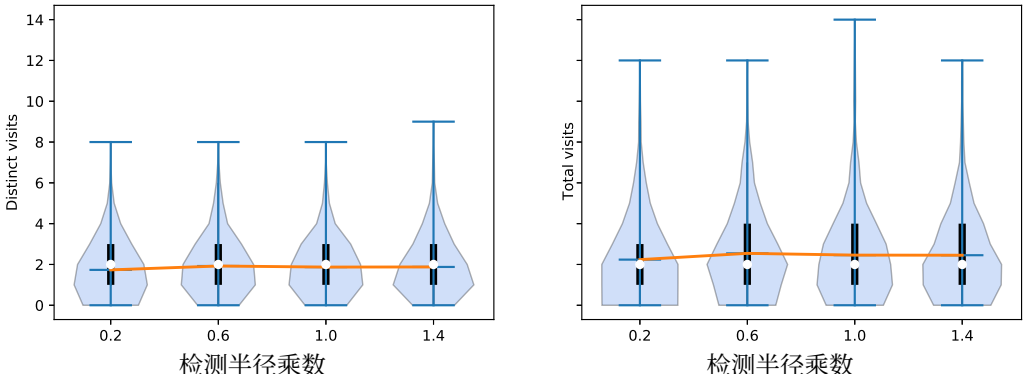


图 14：该方法性能对喷发检测半径的敏感性

检测半径：0.2X

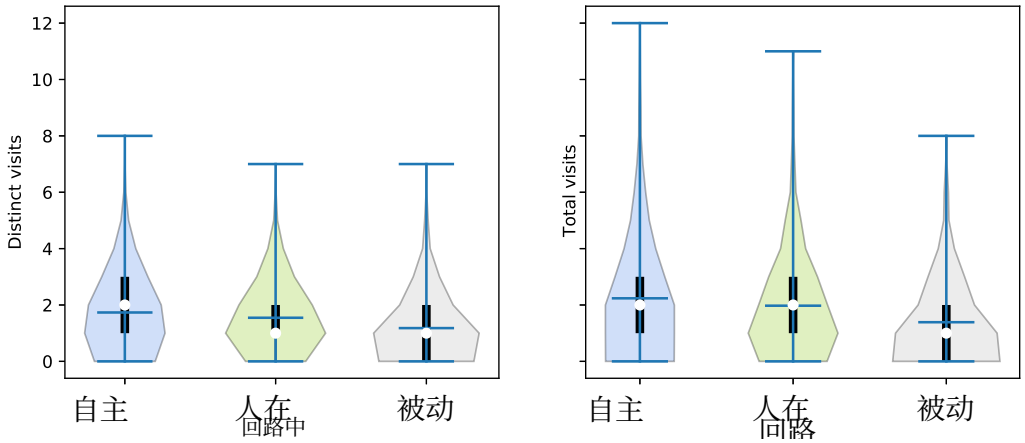


图 15：所提出的方法在喷发检测半径缩减 80% 时的性能

表4：所提出的方法在探测半径分别为标称值的0.2X、0.6X和1.4X时的性能。标称情况见表2。

检测半径		自主		人在回路		被动	
		mean	标准差	mean	标准差	mean	标准差
0.2X	不同检测次数	7.50	3.05	**7.52**	3.02	**7.52**	3.04
	不同访问次数	**1.73**	1.38	1.55	1.24	1.18	1.16
	总访问次数	**2.24**	1.97	1.98	1.79	1.39	1.45
	已访问的检测事件 [%]	**23.38**	18.13	21.02	16.74	15.62	15.12
	已访问的事件 [%]	**12.77**	10.21	11.47	9.21	8.61	8.46
0.6X	不同检测次数	8.08	3.14	8.07	3.14	**8.13**	3.14
	不同访问次数	**1.92**	1.44	1.65	1.32	1.32	1.20
	总访问次数	**2.54**	2.02	2.17	1.90	1.56	1.54
	已访问的检测事件 [%]	**23.90**	16.95	20.92	16.85	16.39	14.76
	已访问的事件 [%]	**14.19**	10.55	12.38	10.11	9.83	9.08
1.4X	不同检测次数	8.46	3.44	8.41	3.42	**8.52**	3.45
	不同访问次数	**1.88**	1.44	1.68	1.34	1.36	1.26
	总访问次数	**2.45**	2.02	2.18	1.94	1.57	1.53
	已访问的检测事件 [%]	**22.68**	16.53	20.28	15.83	16.15	14.23
	已访问的事件 [%]	**14.11**	10.74	12.47	9.93	10.01	9.07

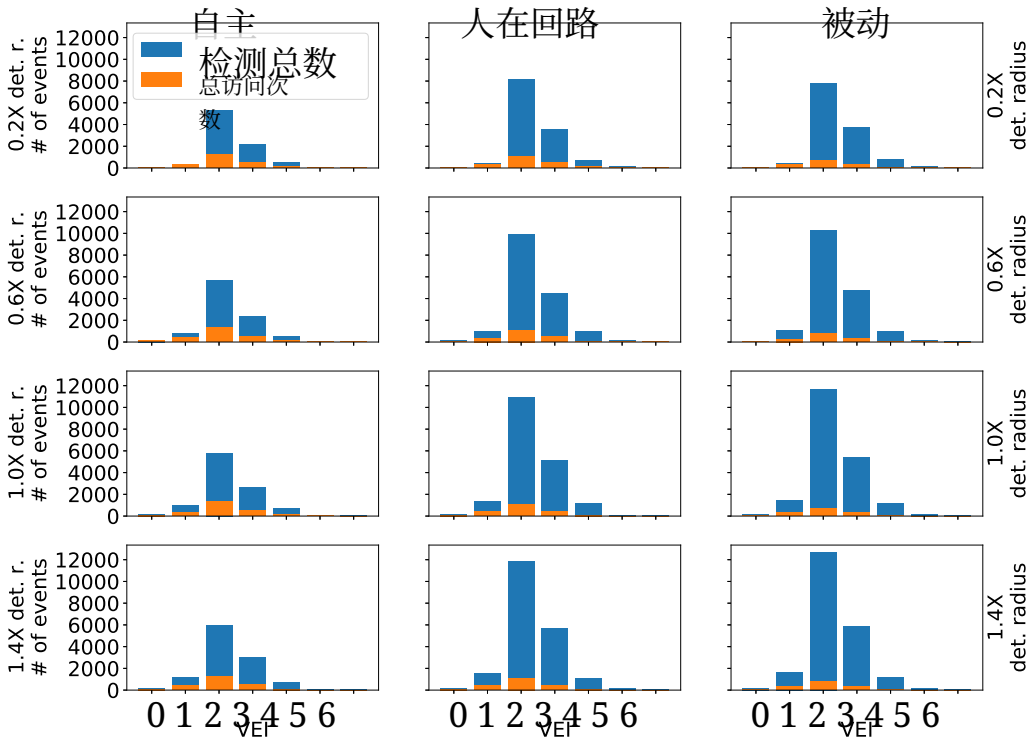


图16：在自主、人在回路和被动制导模式下，检测并访问的事件总数随探测半径和火山爆发指数的变化。

5.4. 对事件频率的敏感性

接下来，我们使用一台 VAMOS 轨道器，评估所提出的方法对事件频率的敏感性，考察火山事件发生可能性为标称值的 10% 和 200% 的情景。作为背景，近期一项研究 [19]根据金星和地球的表面积及质量，估算出金星上的喷发频率为地球的 73.9%。结果见图17和图18以及表5。

重要的是，在各种事件频率下，星载自主性相较于被动方法始终保持优势（图18）。当事件频率降低十倍时，不同访问次数的均值增加55%，总访问次数增加91%；当事件频率是标称值的两倍时，不同访问次数增加38%，总访问次数增加51%。在事件频率较高时，星载自主性相较于人在环路的地面制导也保持着较小但显著的优势：已访问的不同事件增加27%，总访问次数增加12%。总的来说，这些结果证实，所提出的方法能够应对事件频率的巨大不确定性；当可观测事件总数较少时，该方法尤其有望发挥作用。

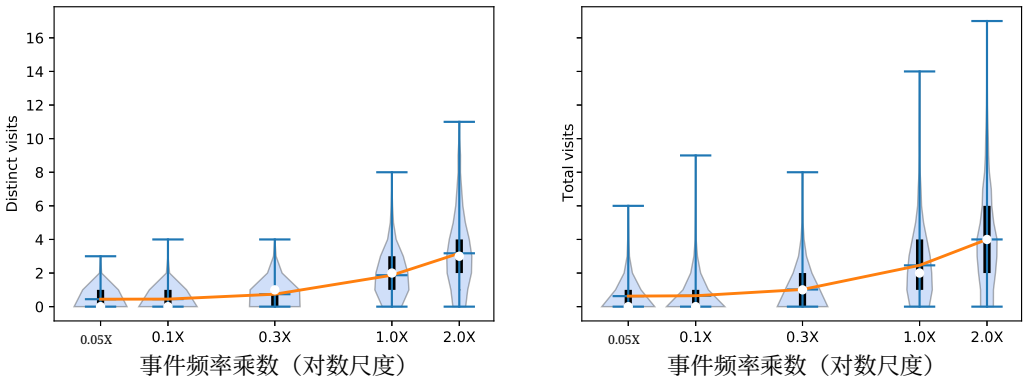


图17：该方法的性能对事件频率的敏感性

表5：当事件频率分别为标称值的5%、10%、30%和200%时，所提出的方法的性能。标称情况见表2。

事件频率		自主 mean	自主 标准差	人在回路 mean	人在回路 标准差	被动 mean	被动 标准差
0.05X	不同检测次数	**1.18**	0.52	**1.18**	0.51	**1.18**	0.50
	不同访问次数	**0.44**	0.55	0.38	0.52	0.29	0.47
	总访问次数	**0.63**	0.93	0.51	0.80	0.34	0.59
	已访问的检测事件 [%]	**37.54**	46.25	33.02	45.21	24.22	40.48
	已访问的事件 [%]	**33.62**	43.30	29.18	41.71	21.46	37.31
0.1X	不同检测次数	1.45	0.77	1.46	0.78	**1.47**	0.77
	不同访问次数	**0.45**	0.58	**0.45**	0.58	0.29	0.50
	总访问次数	**0.65**	1.00	0.61	0.88	0.34	0.61
	已访问的检测事件 [%]	**32.24**	42.18	31.34	41.17	20.30	36.23
	已访问的事件 [%]	**26.51**	37.15	25.51	35.76	17.02	32.04
0.3X	不同检测次数	**2.76**	1.51	2.74	1.51	**2.76**	1.51
	不同访问次数	**0.74**	0.77	0.68	0.77	0.53	0.69
	总访问次数	**1.02**	1.21	0.87	1.09	0.63	0.89
	已访问的检测事件 [%]	**28.71**	31.92	26.65	32.26	21.07	29.78
	已访问的事件 [%]	**18.81**	22.19	17.55	22.75	13.95	21.00
2X	不同检测次数	15.33	6.21	15.36	6.25	**15.54**	6.28
	不同访问次数	**3.18**	2.19	2.82	2.04	2.31	1.80
	总访问次数	**4.00**	2.91	3.56	2.77	2.64	2.17
	已访问的检测事件 [%]	**19.28**	11.51	17.14	11.20	13.81	9.83
	已访问的事件 [%]	**11.66**	7.24	10.36	7.06	8.46	6.21

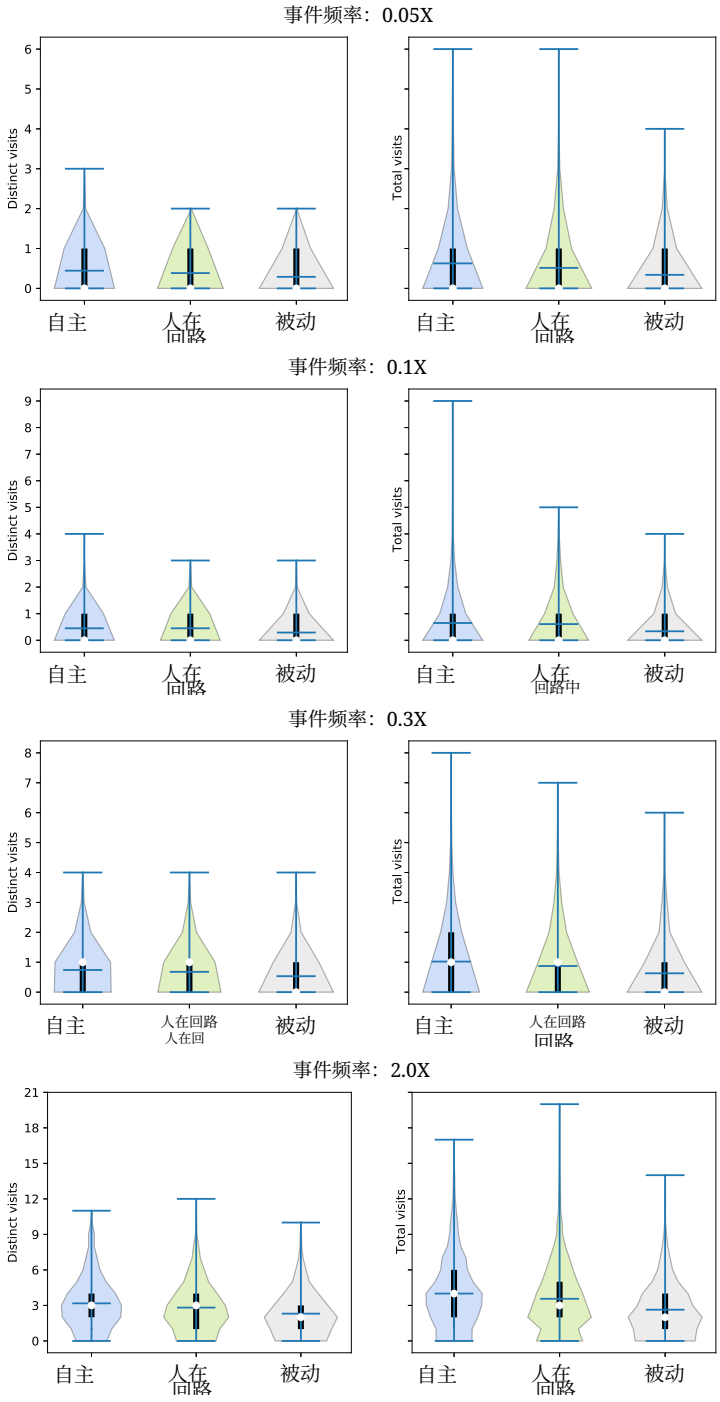


图18：事件频率分别为标称值的 5%、10%、30% 和 200% 时，所提出的方法与地面参与闭环方法及被动方法的性能比较。

5.5. 对机群规模的敏感性

最后，我们评估了所提出的方法在气球数量从一个增加到五个时的性能，同时配备一个 VAMOS 型轨道器。结果如图 19 和表 6 所示。不出所料，不同事件和总访问次数均随气球数量的增加而近似线性增长。更重要的是，与被动方法相比，星载自主性的优势似乎适用于所有舰队规模：总访问次数增加了 51% 至 55%，而与被动情况相比，已访问的不同事件数量增加了 34% 至 45%。对于小型舰队，地面参与闭环制导的性能仅略逊于星载自主性；然而，对于规模较大的舰队，星载自主性与地面制导之间的差距会扩大，总访问次数增加 8%，已访问的不同事件数量增加 7.5%。

总体而言，这些结果表明，与不采用制导相比，所提出的方法有望大幅增加已访问事件的总数和不同事件的数量；该方法对探测半径和事件频率的不确定性具有很强的鲁棒性；并且能够很好地适用于不同规模的机群。

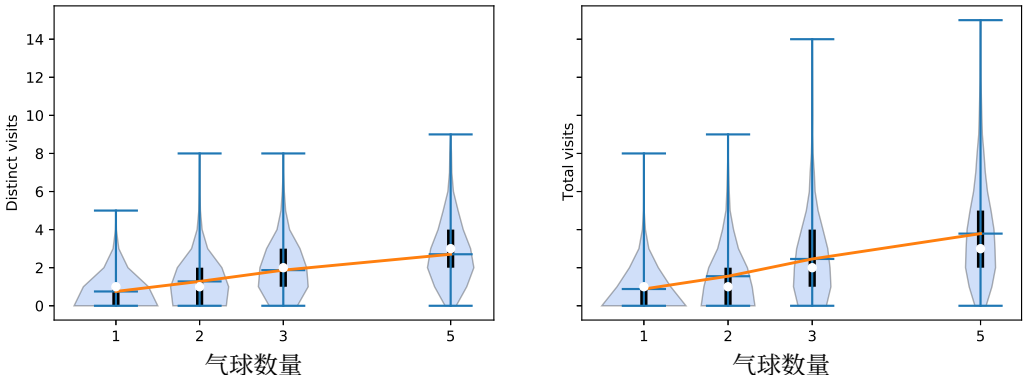


图 19：该方法的性能对气球数量的敏感性

表 6：一个、两个和五个气球的性能比较。标称的三 -
个气球案例见表2。

		自主		人在回路		被动	
	mean	标准差	mean	标准差	mean	标准差	
One balloon	不同检测次数	**7.84**	3.10	7.81	3.11	7.83	3.08
	不同访问次数	**0.75**	0.85	0.71	0.84	0.53	0.74
	总访问次数	**0.88**	1.05	0.82	1.03	0.58	0.83
	已访问的检测事件 [%]	**10.26**	13.17	9.74	12.93	7.21	11.56
	已访问的事件 [%]	**5.62**	7.13	5.40	7.16	4.07	6.67
Two balloons	不同检测次数	7.75	3.07	7.76	3.10	**7.84**	3.11
	不同访问次数	**1.28**	1.18	1.19	1.10	0.88	0.95
	总访问次数	**1.55**	1.53	1.46	1.45	1.00	1.15
	已访问的检测事件 [%]	**17.10**	16.29	15.67	15.17	11.52	13.03
	已访问的事件 [%]	**9.75**	9.38	9.26	9.44	6.81	8.19
Five balloons	不同检测次数	8.54	3.38	8.54	3.40	**8.64**	3.40
	不同访问次数	**2.71**	1.64	2.52	1.72	2.01	1.53
	总访问次数	**3.79**	2.57	3.51	2.62	2.50	2.09
	已访问的检测事件 [%]	**32.94**	18.61	29.75	18.01	23.02	16.04
	已访问的事件 [%]	**20.52**	12.22	18.75	11.81	14.73	10.77

6. 结论

本文探讨了浮力控制飞行平台的机载自主事件检测与制导如何提升金星火山活动探测任务的科学产出。我们提出了一种新颖的自主架构，包括：基于次声微气压计的机载火山活动探测器；一个自主制导模块，它利用金星风场环流的不确定性引导气球飞向感兴趣目标；以及一个共享事件数据库，使气球与轨道器能够通过共享对活跃火山事件的认知而协同工作。

我们的结果表明，与被动漂流器相比，所提出的方法最多可使后续观测次数增加 63%；如果在机载端进行事件探测，而气球的闭环制导方案在地球上计算，增幅虽较小但仍然显著，可达 40%。

我们评估了该方法对轨道器轨道选择的敏感性，并表明，与低轨道（例如，

VERITAS轨道器的轨道）相比，能够让轨道器观测行星整个圆面的高空轨道（例如，所提出的VAMOS任务的轨道）性能更优，因为气球与轨道器之间的通信机会更多。尽管如此，无论选择哪种轨道，所提出的方法都显著优于被动制导。

我们还展示了，所提出的方法在各种探测半径和事件频率下均能发挥优势，这表明该方法能够适应底层科学现象存在的重大不确定性；对于规模更大或更小的气球编队，该方法同样具有优势，即使在仅由一个气球组成的架构中也效果显著。

未来有若干值得关注的研究方向。首先，我们计划扩展所提出的自主方法，使其也能优化对感兴趣事件的检测： 当气球没有主动朝已检测到的事件转向时，引导它们尽可能提高探测此前未观测到的事件的概率。其次，我们将探索多智能体强化学习方法，使气球能够根据自身运动的观测结果实时更新随机风场模型，并使用更新后的模型进行规划。第三，我们将通过 QMDP 等部分可观测马尔可夫决策过程规划工具，明确考虑气球对自身位置和朝向认知的不确定性，方法类似于[51]。最后，也是至关重要的一点，我们计划提升所提出的软件架构的技术成熟度等级，最终目标是在相关的地球环境中，通过硬件演示完整架构，包括机载探测、机载规划、气球间通信和主动制导。

7. 致谢

本研究由喷气推进实验室（加州理工学院）在与美国国家航空航天局签订的合同（80NM0018D0004）下开展。本研究所用的高性能计算资源由喷气推进实验室信息与技术解决方案局提供经费支持。作者感谢Paul Byrne教授提出的深刻见解和反馈。

参考文献

[1] Jane S Greaves、Anita MS Richards、William Bains、Paul B Rimmer、Hideo Sagawa、David L Clements、Sara Seager、Janusz J Petkowski、Clara Sousa-Silva、Sukrit Ranjan等。金星云层中的膦气。《自然·天文学》，5(7):655–664，2021年。

[2] GL Villanueva、M Cordiner、PGJ Irwin、I De Pater、B Butler、M Gur- well、SN Milam、CA Nixon、SH Luszcz-Cook、CF Wilson 等。未发现

独立分析未发现金星大气层中存在磷化氢的证据。《自然·天文学》，5(7):631–635，2021年。

[3] Sue Smrekar、Scott Hensley、Rick Nybakken、Mark S. Wallace、Dragana Perkovic-Martin、Tung-Han You、Daniel Nunes、John Brophy、Todd Ely、Eric Burt、M. Darby Dyar、J oern Helbert、Barry Miller、Jonathan Hartley、Piet Kallemeyn、Jennifer Whitten、Luciano Iess、Marco Mas- trogiuseppe、Marwan Younis、Pau Prats、Marc Rodriguez 和 Erwan Mazarico。Veritas（金星发射率、无线电科学、InSAR、地形和光谱学）：一项发现任务。载于*2022*年 *IEEE* 航空航天会议（*AERO*），第 1–20 页，2022年。[4] Stephanie Getty、James Garvin、Giada Arney、Natasha Johnson、Erika Kohler、Charles Malespin、Chris Webster、Ralph Lorenz、Michael Ravine、Noam R. Izenberg、Shahid Aslam、Valeria Cottini 和 DAVINCI团队。DAVINCI金星任务。美国天文学会公报，53(7)，2021年10月。https://baas.aas.org/pub/2021n7i315p03。[5] James B Garvin、Stephanie A Getty、Giada N Arney、Natasha M Johnson、Erika Kohler、Kenneth O Schwer、Michael Sekerak、Arlin Bartels、Richard S Saylor、Vincent E Elliott 等。揭开金星之谜：DAVINCI任务。《行星科学杂志》，3(5):117，2022年。[6]Richard C Ghail、Colin Wilson、Marina Galand、David Hall、Chris Cochrane、Philippa Mason、Joern Helbert、Franck MontMessin、Sanjay Limaye、Manish Patel 等。EnVision：探测姊妹行星的脉搏。《实验天文学》，33(2):337–363，2012年。[7] Jonathan O'Callaghan。金星上有生命吗？科学家追寻真相。《自然》，586(7828):182–183，2020年。[8] Syed A. Haider、Anil Bhardwaj、M. Shanmugam、S. K. Goyal、Varun Sheel、Jayesh Pabari 和 Durga Prasad Karanam。印度火星与金星任务：科学与探测。载于第*42*届*COSPAR*科学大会，美国加利福尼亚州帕萨迪纳，2018年7月。[9] L. V. Zasova、D. A. Gorinov、N. A. Eismont、I. D. Kovalenko、A. S. Abbakumov 和 S. A. Bober。金星-D：用于金星探测的自动空间站设计。《太阳系研究》，53(7):506–510，2019年12月。[10]Richard French、Ehson Mosleh、Christophe Mandy、Richard Hunter、Johnathan Currie、Doug Sinclair 和 Peter Beck。让小型航天器也能执行深空

任务。载于小型卫星会议，2021年。[11] 金星探测与分析组（VEXAG）。金星探测的科学目标、具体目标和研究项目，2019年。[12] A.P. Vinogradov、Yu.A. Surkov 和 F.F. Kirnozov。金星8号测得的金星岩石中铀、钍和钾的含量。《*Icarus*》，20(3):253–259，1973年。[13] James W Head、LS Crumpler、Jayne C Aubele、John E Guest 和 R Stephen Saunders。金星火山活动：基于麦哲伦号数据对火山地貌与构造、关联特征及全球分布的分类。《地球物理研究杂志：行星》，97(E8):13153–13197，1992年。[14] Paul K. Byrne、Richard C. Ghail、A. M. Celˆal S¸eng¨or、Peter B. James、Christian Klimczak 和 Sean C. Solomon。金星上全球性破碎且可移动的岩石圈。《美国国家科学院院刊》，118(26)，2021年。[15] Larry W Esposito。二氧化硫：间歇性注入表明金星存在活跃火山活动。《科学》，223(4640):1072–1074，1984年。[16]Suzanne E. Smrekar、Ellen R. Stofan、Nils Mueller、Allan Treiman、Linda Elkins-Tanton、Joern Helbert、Giuseppe Piccioni 和 Pierre Drossart。根据 VIRTIS 发射率数据发现的金星近期热点火山活动。《科学》，328(5978):605–608，2010年。[17] E. V. Shalygin、W. J. Markiewicz、A. T. Basilevsky、D. V. Titov、N. I. Ignatiev 和 J. W. Head。金星 Ganiki Chasma裂谷带的活跃火山活动。《地球物理研究快报》，42(12):4762–4769，2015年。[18] Anna JP G¨ulcher、Taras V Gerya、Laurent GJ Mont´esi 和 Jessica Munch。由地幔柱—岩石圈相互作用驱动的冕状结构，以及金星存在持续地幔柱活动的证据。《自然地球科学》，13(8):547–554，2020年。[19] Paul K. Byrne 和 Siddharth Krishnamoorthy。金星火山喷发频率估算。《地球物理研究杂志：行星》，127(1):e2021JE007040，2022年。[20] P. Lognonn´e 和 C.L. Johnson。10.03——行星地震学。载于 Gerald Schubert 主编的《地球物理学论著》，第 65–120 页。Elsevier，牛津，第二版，2015年。

[21]Joern Helbert、Darby Dyar、Ingo Walter、Dennis Wendler、Thomas Widemann、Emmanuel Marcq、Gabriel Guignan、Sabrina Ferrari、Alessandro Maturilli、Nils Mueller 等。《金星发射率测绘仪（VEM）：从轨道获取金星的全球矿物学特征》。载于红外遥感与仪器 *XXVI*，第10765卷，第107650D页。国际光学与光子学学会，2018年。[22] James E Hansen 和 Albert Arking。《金星云层：关于其性质的证据》。《科学》，171(3972):669–672，1971年。[23] A. T. Wood、R. B. Wattson 和 J. B. Pollack。《金星：根据无线电和雷达测量估算表面温度和压力》。《科学》，162(3849):114–116，1968年。[24] V. M. Linkin、V. V. Kerzhanovich、A. N. Lipatov、A. A. Shurupov、A. Seiff、B. Ragent、R. E. Young、A. P. Ingersoll、D. Crisp、L. S. Elson、R. A. Preston 和 J. E. Blamont。《金星中层云层的大气热结构》。《科学》，231(4744):1420–1422，1986年。[25]R. Sagdeev、V. M. Linkin、V. Kerzhanovich、A. N. Lipatov、A. A. Shurupov、J. E. Blamont、D. Crisp、A. Ingersoll、L. S. Elson、R. Preston、C. E. Hildebrand、B. Ragent、A. Seiff、R. E. Young、G. Petit、L. Boloh、Y. N. Alexandrov、N. Armand、R. V. Bakitko 和 A. Selivanov。《VEGA金星气球原位气象测量概述》。《科学》，231:1411–1414，1986年。[26]S´ebastien Lebonnois、Fr´ed´eric Hourdin、Vincent Eymet、Audrey Crespin、Richard Fournier 和 Fran¸cois Forget。《利用完整的全球环流模式分析金星大气的超级旋转》。《地球物理研究杂志：行星》，115(E6)，2010年。[27]Jeffery L. Hall、Michael Pauken、Aaron Schutte、Siddharth Krishnamoorthy、Carolina Aiazzi、Jacob Izraelevitz、Tim Lachenmeier 和 Caleb Turner。《可变高度金星气球机器人的原型开发》。载于*2021*年*AIAA*航空论坛，第2696页，2021年。[28] J. A. Cutts、L. Matthies、T. W. Thompson 和航空平台研究团队。《用于科学探测的空中平台》。技术报告，美国国家航空航天局喷气推进实验室/加州理工学院，2018年。[29] Marc G Bellemare、Salvatore Candido、Pablo Samuel Castro、Jun Gong、Marlos C Machado、Subhodeep Moitra、Sameera S Ponda 和 Ziyu

Wang。《利用强化学习实现平流层气球自主导航》。《自然》，588(7836):77–82，2020年。[30] Martina Troesch、Steve Chien、Yi Chao、John Farrara、James Girton 和 John Dunlap。《动态且不确定的洋流环境中的海洋浮标自主控制》。《机器人与自主系统》，108:100–114，2018年。[31] K P Dahl、D R Thompson、D McLaren、Y Chao 和 S Chien。《针对欠驱动自由漂浮海洋传感器网络的流场敏感路径规划》。载于*2011*年*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议，第3140–3146页，2011年。[32]M. T. Wolf、L. Blackmore、Y. Kuwata、N. Fathpour、A. Elfes 和 C. Newman。《强风及不确定风场中气球的概率运动规划》。载于*2010*年*IEEE*机器人与自动化国际会议，第1123–1129页，2010年。[33]Jacob S. Izraelevitz 和 Jeffery L. Hall。《流线型金星大气探测器的最小质量极限》。《航天器与火箭杂志》，57(4):683–691，2020年。[34] James Cutts、Kevin Baines、Leonard Dorsky、William Frazier、Jacob Izraelevitz、Siddharth Krishnamoorthy、Michael Pauken、Mark S Wallace、Paul Byrne、Sara Seager 等。《探测金星云层：以科学为驱动的姊妹行星航空机器人任务》。载于*2022*年*IEEE*航空航天会议（*AERO*），第1–20页。IEEE，2022年。[35] Jacob Izraelevitz、James Cutts、Jeffery Hall、Siddharth Krishnamoorthy、Tim Lachenmeier、Michael Pauken、Leonard Dorsky、Ashish Goel、Carolina Aiazzi、Carlos Quintana 等。《缩比原型金星航空机器人的地面试验飞行概述》。《第44届COSPAR科学大会（2022年7月16日至24日举行）》，44:3364，2022年。[36] Robin S. Matoza、Arthur Jolly、David Fee、Richard Johnson、Bernard Chouet、Phillip Dawson、Geoff Kilgour、Bruce Christenson、Esline Garaebiti、Alex Iezzi、Allison Austin、Ben Kennedy、Rebecca Fitzgerald 和 Nick Key。《利用宽带地震声学网络、次声阵列及系留气球上的次声传感器，研究瓦努阿图亚苏尔火山斯特龙博利式爆炸的地震声学波场》。《美国声学学会杂志》，141(5):3566–3566，2017年。

[37] S. Krishnamoorthy、V. Lai、A. Komjathy、M. T. Pauken、J. A. Cutts、R. F. Garcia、D. Mimoun、J. M. Jackson、D. C. Bowman、E. Kassar- ian、L. Martire、A. Sournac 和 A. Cadu。使用气球搭载气压计进行空中地震学。《*IEEE*地球科学与遥感汇刊》，57(12):10191–10201，2019年12月。[38]Quentin Brissaud、Siddharth Krishnamoorthy、Jennifer M. Jackson、Daniel C. Bowman、Attila Komjathy、James A. Cutts、Zhongwen Zhan、Michael T. Pauken、Jacob S. Izraelevitz 和 Gerald J. Walsh。首次利用气球记录的声学特征探测到地震。《地球物理研究快报》，48(12):e2021GL093013，2021年。e2021GL093013 2021GL093013。[39]Raphael F. Garcia、Adrien Klotz、Albert Hertzog、Roland Martin、Sol`ene G´erier、Ervan Kassarian、J´erˆome Bordereau、St´ephanie Venel 和 David Mimoun。在平流层气球网络上记录到的大型地震次声。《地球物理研究快报》，49(15):e2022GL098844，2022年。[40] R F Garcia、L Martire、Y Chaigneau、A Cadu、D Mimoun、M Bas- sas Portus、A Sournac、M Sylvander、H Pauchet、S Benahmed 和 R Martin。使用系留气球开展主动震声实验，以验证大气地震学的仪器概念和建模工具。《国际地球物理学杂志》，225(1):186–199，2020年12月。[41] Daniel C. Bowman、Jerry W. Rouse、Siddharth Krishnamoorthy 和 Elizabeth A. Silber。使用气球搭载航空地震仪测定次声波的到达方向。《*JASA*快报》，2(5):054001，2022年。[42] A. Didion、A. Komjathy、B. Sutin、B. Nakazono、A. Karp、M. Wal- lace、G. Lantoine、S. Krishnamoorthy、M. Rud、J. Cutts、P. Lognonn´e、B. Kenda、M. Drilleau、J. Makela、M. Grawe 和 J. Helbert。利用小型航天器遥感金星地震活动：VAMOS任务概念。载于*2018*年*IEEE*航空航天会议，第1–14页，2018年3月。[43] Pietro Scarica、Itziar Garate-Lopez、Sebastien Lebonnois、Giuseppe Pic- cioni、Davide Grassi、Alessandra Migliorini 和 Silvia Tellmann。利用金星快车数据验证IPSL金星GCM热结构。《大气层》，10(10):584，2019年。

[44] Harold Jeffreys。估计问题中先验概率的不变形式。《伦敦皇家学会会刊：*A*辑，数学与物理科学》，186(1007):453–461，1946年。[45] Christopher G. Newhall 和 Stephen Self。火山爆发指数（VEI）：对历史火山活动爆炸规模的估计。《地球物理研究杂志：海洋》，87(C2):1231–1238，1982年。[46] A.L. Dabrowa、D.N. Green、A.C. Rust 和 J.C. Phillips。火山次声特征的全球研究及其远距离监测潜力。《地球与行星科学快报》，310(3):369–379，2011年。[47] Daniel C. Bowman 和 Siddharth Krishnamoorthy。在低层平流层中利用气球记录埋藏化学爆炸产生的次声。《地球物理研究快报》，48(21):e2021GL094861，2021年。e2021GL094861 2021GL094861。[48]Indujaa Ganesh、Luke A. McGuire 和 Lynn M. Carter。金星上密集火山碎屑流的动力学建模：对火山碎屑喷发的启示。《地球物理研究杂志：行星》，126(9):e2021JE006943，2021年。e2021JE006943 2021JE006943。[49] Rapha¨el Garcia、Philippe Lognonn´e 和 Xavier Bonnin。检测金星地震产生的大气扰动。《地球物理研究快报》，32(16)，2005年。[50] Dimitri Bertsekas。动态规划与最优控制：第一卷，第1卷。Athena Scientific，第4版，2017年。[51] Federico Rossi、Andrew Branch、Michael P. Schodlok、Timothy Stanton、Ian G. Fenty、Joshua Vander Hook 和 Evan B. Clark。利用洋流对冰架下浮力控制飞行器进行随机制导。载于*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议，捷克共和国布拉格，2021年10月。即将出版。[52] Dimitri Bertsekas。动态规划与最优控制：第二卷，第2卷。Athena Scientific，第4版，2012年。[53] Patrick Ellis、Donald Van Rheeden 和 Farid Dowla。使用单颗低地球轨道卫星的多普勒和多普勒变化率进行射频定位。《*IEEE Access*》，8:12907–12920，2020年。

[54] K. Cheung、C. Lee、W. Jun 和 G. Lightsey。利用余弦定理（LOC）进行单卫星多普勒定位。载于*2019*年 *IEEE* 航空航天会议，2019年3月。[55] Michael L Littman、Anthony R Cassandra 和 Leslie Pack Kaelbling。面向部分可观测环境的策略学习：扩大规模。载于国际机器学习会议，第362–370页。Elsevier，旧金山，加利福尼亚州，1995年。[56]LS Crumpler、Jayne C Aubele 和 James W. Head。麦哲伦号金星火山特征目录表。
http://www.planetary.brown.edu/planetary/databases/venus cat.html。[57] 全球火山活动计划。世界火山。技术报告，史密森学会，2013年。第4.10.5版（2022年1月27日）。[58]Fr´ed´eric Hourdin、Ionela Musat、Sandrine Bony、Pascale Braconnot、Francis Codron、Jean-Louis Dufresne、Laurent Fairhead、Marie-Ang`ele Filiberti、Pierre Friedlingstein、Jean-Yves Grandpeix、Gerhard Krinner、Phu LeVan、Zhao-Xin Li 和 Fran¸cois Lott。LMDZ4一般环流模型：气候性能及其对参数化物理过程的敏感性，重点关注热带对流。气候动力学，27(7):787–813，2006年12月。[59] Itziar Garate-Lopez 和 S´ebastien Lebonnois。导致金星冷领的云层结构的纬度变化。《*Icarus*》，314:1–11，2018年。[60]Brian M. Sutin、James Cutts、Alan M. Didion、M´elanie Drilleau、Matthew Grawe、J¨orn Helbert、Ashley Karp、Balthasar Kenda、At-tila Komjathy、Siddharth Krishnamoorthy、Gregory Lantoine、Philippe Lognonn´e、Jonathan J. Makela、Barry Nakazono、Mayer Rud 和 Mark Wallace。VAMOS：用于从轨道遥感金星地震活动的小卫星任务概念。载于*SPIE*会议论文集，第10698卷，2018年。[61] 深空网络。DSN通信链路设计手册。技术报告810-005，美国国家航空航天局喷气推进实验室/加州理工学院，2021年。[62] Jerry L Hintze 和 Ray D Nelson。小提琴图：箱线图-密度轨迹协同。美国统计学家，52(2):181–184，1998年。