破解物理学巅峰的未解之谜

——马赫原理的矩阵化实验测量方案（重写稿）

提案人：罗星壹　　•　　整合重写版

摘要

马赫原理的原始版本，来自马赫对牛顿水桶实验的批判：**旋转不是物体的固有属性，而是相对于宇宙物质背景定义的关系属性。** 本方案测量的核心不是“质量 m 是否变化”，而是“旋转是否绝对”：在相同局部运动学条件下，无量纲旋转响应系数是否随物质背景或旋转轴方向改变。

本方案有一个自觉的方法论选择：**不预设单一“标准马赫模型”，而检验一个模型类。** 原因是马赫原理自 1883 年以来从未形成公认的场方程或作用量；Sciama 惯性模型、Brans–Dicke 型标量—张量、Lense–Thirring/引力磁解释、Christillin 的宇宙物质 Coriolis 解释、各种惯性张量—矢量现象学模型，都可称为“马赫型”，但预言不同。给出单一模型，会把实验绑死在一个缺乏第一性依据的假设上；完全不参数化，又会让零结果无法被理论使用。折中方案是：**用无量纲量 χ、k 做模型无关的主判决，同时用模型类参数化 $\chi = 1 + \alpha \cdot g(\text{背景})$、$k = 2 + \beta \cdot g(\text{背景})$ 给出可用的上限或测量值。** 这样既不押注单一理论，又保留判决力。

测量矩阵由三个递进层次构成：

1. **主提案（空间站天地对比）**：比较地面与空间站微重力环境下同一装置的离心力系数、科里奥利力系数与角动量指数，检验局域物质背景是否改变旋转响应。
2. **补充篇一（地面海拔梯度先导）**：以海平面—高山站“低—高—低”多次往返，检验旋转响应是否随局域引力势呈现可逆变化；定位为低成本探路、基线建立与系统误差谱测量，不承诺终局判决。
3. **补充篇二（L2 深空方向扫描）**：在日地 L2 点改变旋转轴指向，做全天球扫描，检验离心力是否存在由宇宙物质运动与有限传播速度共同导致的方向调制。

核心观测量为

$$\chi_c = F_{cent} / (m_{ref} \cdot \omega_{ref}^2 \cdot r_{geom})$$

$$\chi_K = F_{cor} / (2 \cdot m_{ref} \cdot \omega_{ref} \cdot v_r)$$

$$k = \ln(\omega_2/\omega_1) / \ln(r_1/r_2)$$

标准局部旋转图像预言 $\chi_c = \chi_K = 1$、$k = 2$，且不随环境与方向变化。马赫型关系图像则允许

$$\chi = \chi(\quad, \omega)$$

$$k = k(\quad, \omega)$$

质量 m_{ref} 只是归一化比例因子；角动量方案中 m 完全不出现。

判决逻辑采用三重限定：**达到设计精度、独立复现、系统误差排除**。零结果表示为“在实验精度以上，排除在该精度内可产生可测空间梯度或方向调制的模型类”，并给出参数上限；非零结果先作为“待解释异常”，经复核与模型类比较后再讨论其理论含义。

阅读说明：理解本方案的唯一钥匙，以及为何不提供单一模型

一、唯一钥匙：测的是“旋转是否相对”，不是“质量 m 是否变化”

马赫水桶实验问的是：水相对于什么在转？牛顿答“绝对空间”，马赫答“宇宙物质整体”。若宇宙空无一物，只有一个水桶，则“旋转”无从定义，水面不会凹陷，离心力不会出现。马赫原理的核心不是“质量从哪里来”，而是“旋转相对于谁”。

因此，本方案反复使用无量纲量 x 与 k，而不是把“离心力变小”直接解释为“质量变小”。常见误解有两个：

- **误解一：把马赫原理自动等同于爱因斯坦拓展版。** 本矩阵检验的是马赫原始版本，即旋转的相对性；不检验等效原理，不测量惯性质量与引力质量之比，不涉及质量起源。MICROSCOPE 等等效原理实验与本案互补。
- **误解二：把“惯性效应减弱”等同于“质量变小”。** 马赫型模型可以只改变旋转的“绝对有效性”，即 x 或 k 偏离标准值，而不要求静质量或引力质量改变。

二、为何不提供单一马赫模型

这是一个必须正面回答的方法论问题，而不是回避。

原因一：马赫原理没有标准模型。 马赫 1883 年只给了定性命题，没有场方程、没有作用量、没有耦合常数。此后一百多年，“马赫型”理论至少包括：Sciama 惯性模型、Brans–Dicke 型标量—张量理论中的马赫项、Lense–Thirring/引力磁框架拖曳解释、Christillin 对 GP-B 的宇宙物质 Coriolis 解释、各种惯性张量—矢量现象学模型。它们对 x、k 的预言不同，甚至符号相反。给出一个具体模型，评审会问“为什么不是另一个”；更糟的是，该模型可能已被 Hughes–Drever、MICROSCOPE、Brans–Dicke 的 $\omega > 40000$ 约束排除，实验还没做就被绑死。

原因二：从“旋转相对性”到“定量预言”缺乏第一性推导。 耦合常数、传播速度、距离依赖形式全是未知。原文中“6.7%”来自“惯性效应与地球引力势成反比”的简化假设，作者自己标注为“示例估算值”。这不是谦虚，而是承认：硬给一个 $x = 1 + \alpha\,\Phi/c^2$，评审会追问 α 从哪来、为什么是 Φ 不是 Φ^2、和现有约束是否矛盾。给出模型，就把自己暴露在这些技术性质疑下；不给模型，可以停留在“一般性经验检验”的安全区。

原因三：方法论上类比迈克尔逊—莫雷。 迈克尔逊—莫雷实验没有预设以太的具体动力学模型，它检验的是一般性预言“是否存在可观测的以太漂移”；零结果排除的是一大类以太模型。本方案同样：不预设“马赫场”怎么传播，只问“旋转响应是否只由局部 (ω, r) 决定”。零结果排除“任何在实验精度内产生可测背景依赖的模型

类”，非零结果登记为“待解释异常”，再回头找模型。这是数据驱动而非理论驱动的策略，在理论光谱太宽、无法先验排序时是合法的。

原因四：先看数据，再建模。 三层矩阵本质上是探索性的：先测 χ(h)、χ(ω)、k 长什么样，再回头找能拟合的函数形式。补充篇一写明“实际函数形式未知，这正是本实验要测量的核心内容”——模型不是前提，而是产出。

三、但“模型无关”不等于“无判决力”：补上模型类参数化

完全不提供模型，代价是零结果排除范围不清、非零结果无法归因、评审会问“备择假设是什么”。因此本重写稿补上**模型类参数化**，但仍不押注单一模型：

```
χ = 1 + α · g(背景)

k = 2 + β · g(背景)
```

其中 g 取候选背景变量：

```
g  { Φ/c², δρ/ρ, ω^· v^_CMB, … }
```

α、β 是待测系数，不预设数值。这样：

- 不押注单一模型；
- 零结果给出 α、β 的上限，理论家可以使用；
- 非零结果给出 α、β 的测量值，可做模型类比较；
- 仍然保持“测旋转是否相对”的一般性。

一句话：不提供单一模型，是因为马赫原理没有标准模型、且硬给模型会被现有约束绑死；但补上模型类参数化，既保留一般性，又让零结果和非零结果都可被理论使用。

四、参考系定义：ω_ref 相对于谁

实验上不能只说“相同角速度”，必须明确 ω_ref 的参考定义。本方案主参考系采用**局部惯性姿态基准**：由陀螺仪/星敏感器定义局部惯性姿态，编码器测量仪器相对该姿态的角速度。同时记录地球参考系与 CMB 偶极方向作为辅助参考。天地比较时，必须使用同一物理参考定义下的 χ 或 k；不能一边用地面编码器相对地球定义 ω，一边用在轨编码器相对空间站定义 ω，否则参考系选择会污染判决。

五、阅读后续篇目时，请始终带着这把钥匙

- 读主方案天地对比时，问：它测的是 χ_ground 与 χ_orbit 的差异，还是质量差异？
- 读补充篇一海拔梯度时，问：它测的是 χ(h) 是否可逆变化，还是质量随高度变化？
- 读补充篇二 L2 方向扫描时，问：它测的是 χ(ω) 的方向结构，还是质量随方向变化？

如果答案始终是前者，你就没有跑偏。

主提案：关于通过高精度天地对比实验探索惯性起源的研究提案

检验马赫原理的实证路径及其对物理学基本框架的意义

一、摘要

惯性是物理学最基本的基石之一，然而其物理起源至今仍是悬而未决的核心难题。本提案旨在阐述一项创新的空间实验计划，通过在地面实验室与中国空间站微重力环境下，对同一物体进行高精度的旋转动力学对比测量，以实证方式检验由恩斯特·马赫提出、并深刻影响了爱因斯坦广义相对论的“马赫原理”。

马赫对牛顿的“绝对空间”提出了深刻批判。他最极端的表达是一个思想实验：如果宇宙空无一物，只有一个物体，那么它的旋转就不存在——此时离心力和科里奥利力不会出现，旋转力臂突然变大也不会影响角速度，因为没有惯性抵抗，角速度始终为零。这一极端情形揭示了马赫原理的本质：惯性不是物体的固有属性，而是物质与宇宙整体相互作用的涌现属性。

虽然绝对的“空宇宙”无法实现，但可以比较不同“空度”的环境：太空（如中国空间站）比地面更接近“空宇宙”。因此，若马赫原理成立，太空中的旋转响应应偏离地面标准值。实验将通过比对离心力效应在天地两个环境下的差异，并辅以科里奥利力效应及转动惯量变化对角速度影响的对比，来寻找旋转响应随“宇宙物质背景”变化的证据。

值得注意的是，地面旋转实验的参考系依赖、航天器姿态控制的工程经验以及引力探测器 B 的空间实测结果，均提示局域物质可能对惯性有可感知的影响——这使得本实验具有获得显著结果的现实可能性。需要强调，这些线索在本重写稿中只作为**动机性线索**，不构成判决证据。实验共设计三个独立的测量方向（离心力、科里奥利力、角动量守恒效应），每个方案都能单独检验马赫型关系图像，形成交叉检验。无论实验结果如何，都将对现代物理学的基础产生深远影响。

二、研究背景与立项依据

2.1 惯性起源的历史之谜

从牛顿的“绝对空间”到马赫的批判性思考，惯性来源的争论已持续数百年。牛顿理论将惯性视为物体的固有属性，但无法解释其起源，且其“绝对空间”的概念缺乏可操作性。爱因斯坦在创立广义相对论时，深受马赫思想的启发，并期望他的新理论能够体现“物体的惯性源于它与宇宙中其他物质的相互作用”这一思想，尽管广义相对论并未完全实现这一期望。

2.2 马赫原理的核心思想与极端推论

马赫认为，我们所说的惯性运动，实际上是相对于宇宙中所有物质的运动；我们感受到的惯性力，是物体相对于宇宙整体加速运动的结果。这一思想最极端的表达是：如果宇宙空无一物，只有一个物体，那么它的旋转就不存在！

在这个思想实验中：

- 不存在其他物质作为参考，旋转概念失去意义；
- 即使物体在“自转”，离心力和科里奥利力也不会出现；

- 如果物体的旋转力臂突然变大，角速度也不会改变——因为没有惯性抵抗，角速度始终为零；
- 角动量守恒定律失效，因为角动量概念本身依赖于物质背景。

这一极端情形揭示了马赫原理的本质：惯性不是物体的固有属性，而是物质与宇宙整体相互作用的涌现属性。用本方案的钥匙说：**旋转不是固有属性，而是关系属性**。

2.3 从“空宇宙”到“局部空宇宙”——实验的基本逻辑

虽然绝对的“空宇宙”无法实现，但我们可以比较不同“空度”的环境：

- **地面环境**：被地球大气、地球本身和大量邻近物质包围，宇宙物质密度高，引力势深；
- **太空环境（中国空间站）**：远离地球大质量体，宇宙物质密度显著降低，引力势更浅，更接近“空宇宙”的理想条件。

因此，如果马赫原理成立，那么在太空测得的旋转响应应当偏离地面标准值。这是本实验最基本的判决逻辑。本重写稿进一步把“旋转响应”操作化为 χ_c、χ_K、k 是否随环境变化，并用模型类参数化给出可用的上限或测量值。

2.4 效应大小的两种可能——从“全宇宙主导”到“局部主导”

如果我们接受马赫原理的基本思想，那么一个自然的推论是：物体的旋转响应应当与周围宇宙物质的分布有关。但这里存在一个关键问题：宇宙物质对旋转响应的贡献是均匀的（即遥远的星系与近处的天体贡献相当），还是随距离衰减的（即近处物质起主导作用）？

- **全宇宙均匀主导模型**：如果宇宙中所有物质对旋转响应的贡献是均匀的，那么仅仅将物体从地面移动到近地轨道，对整个宇宙的物质分布改变微乎其微，旋转响应应无明显变化。在此框架下，天地差异极小，远低于现有技术的探测能力。
- **局部天体主导模型**：如果物质对旋转响应的贡献随距离衰减（例如与距离成反比或类似引力势的形式），那么距离最近的大质量天体——地球——将对附近物体的旋转响应起主导作用。在这种情况下，从地面到太空，旋转响应将发生显著变化。其具体变化幅度取决于理论模型的具体形式——例如，若旋转响应与地球引力势成反比，则差异约为 6.7%（此为基于简化模型的示例估算值）；若与距离的更高次幂相关，则可能呈现其他数值。但无论具体数值是多少，只要差异超过实验探测阈值（如 0.2%），即属于“局部主导模型”的范畴。

本重写稿说明：6.7% 不是从第一性原理推导出的理论预言，而是“若效应达到百分之几，矩阵有足够灵敏度”的参照值。真正可检验的写法是模型类参数化：

$$\chi(h) = 1 + \alpha \cdot \Delta\Phi(h)/c^2$$

$$k(h) = 2 + \beta \cdot \Delta\Phi(h)/c^2$$

α、β 正是实验要测的参数。若 α ~ 1，2000—6000 m 的效应约 10^{-13}—10^{-12}，远低于先导实验 0.1% 阈值；因此先导实验检验的是 α 的上限，或检验其他更强耦合模型，而不是“线性模型预言的 0.03%—0.1%”。

2.5 支持“局部主导”猜想的观测与工程证据——实验可能获得显著结果

尽管马赫原理的具体形式尚无定论，但以下三条独立的观测线索、工程经验与空间实验成果，共同指向一个可能性：地球作为最近的大质量天体，可能对附近物体的旋转

响应起主导作用，且效应量级可能达到工程可感知的百分之几水平。这意味着本实验有可能获得显著结果。需要强调的是，这些线索均非直接证明，它们的存在恰恰说明惯性起源问题尚存开放空间，需要判决性实验来给出最终答案。

2.5.1 地面旋转实验的参考系依赖

日常力学现象中，旋转物体的角动量守恒（如力臂增加时角速度降低）是以地球参考系作为“静止”背景来描述的。这一事实本身虽不构成直接证明，但它提示我们：对于地球附近的力学过程，地球自身构成了一个有效的惯性背景。马赫原理的核心正是批判绝对空间，主张惯性由物质分布决定，而地球作为最近的大质量天体，自然成为局域惯性系的“定义者”。地面实验的参考系依赖虽非直接证据，却暗示地球在局域动力学中扮演着特殊角色——这一角色是否源于它对旋转响应的主导贡献，是一个值得用实验探究的根本问题。

2.5.2 航天器姿态控制的工程经验——可量化的差异线索

在航天工程实践中，一个普遍存在的现象是：基于地面测量得到的转动惯量参数设计的姿态控制系统，在太空中往往不能直接使用，而需要经过在轨系统辨识和参数调整后才能达到预期性能。工程师们发现，按照地面参数设计的控制器在轨运行时，系统响应往往“过于灵敏”，表现为超调增大或振荡倾向，因此通常需要减小控制增益来补偿。这一现象背后的逻辑与马赫原理的预期高度吻合，但本重写稿必须强调：它同样可由热变形、燃料消耗、太阳翼展开、挠性模态、控制延迟、传感器漂移等常规因素解释，因此只能作为动机性线索。

马赫原理的核心预言：如果地球对附近的旋转响应起主导作用，那么当物体进入太空（更接近“空宇宙”）时，其旋转响应应当减弱。在旋转动力学中，这意味着：对于同一个物体，在同样的旋转状态（同样的角速度 ω、同样的质量分布）下，维持该旋转所需的惯性力（如离心力、控制力矩）应当比地面时更小。需要强调的是，马赫原理并不要求惯性质量本身在引力自由落体中的表现发生变化，而是预言旋转运动的“绝对性”会随物质背景稀疏而减弱——这正是本实验所要检验的核心。

姿态控制系统的设计逻辑：工程师在地面根据测得的惯性参数（转动惯量 I）计算出为达到期望角加速度所需的控制力矩 $\tau = I\alpha$。这个设计隐含了一个假设：旋转响应在天地间是恒定的，即同样的力矩会产生同样的角加速度。

在轨的实际表现：当航天器进入太空后，如果马赫原理成立且旋转响应确实减弱，那么情况将发生变化：

- 航天器的旋转响应减弱，意味着维持同样角加速度 α 所需的实际控制力矩 τ' 应当小于地面设计值 τ。
- 但控制器仍然按照地面设计输出力矩 τ（因为它不知道旋转响应变了）。
- 结果：实际作用于航天器的力矩 τ 相对于其变小的旋转响应需求而言过大，导致实际产生的角加速度 α' 大于设计预期。
- 系统因此表现出“过于灵敏”的响应——超调增大、振荡倾向增强。

工程师的应对措施：观测到这一现象后，工程师采取的典型措施是减小控制增益。减小增益的本质，就是降低实际输出的控制力矩，使其与航天器在轨的真实旋转响应需求相匹配。这正是航天工程实践中普遍发生的情况。

反过来说，如果旋转响应在天地间完全不变，那么基于地面数据设计的控制器在太空应当同样有效，无需调整参数。而实际存在的调整需求，以及调整的方向（减小增

益），恰好与马赫原理预期的方向（旋转响应减弱导致需降低力矩）一致。这是一个动机性线索，但不是判决证据。

量化支撑：相关学术研究为这一线索提供了重要的量化支撑。Bergmann 等的综述指出，基于角速度和控制力矩数据的递推估计算法，对航天器转动惯量的在线辨识精度通常可达 1%—5% 的量级，具体取决于激励条件和噪声水平。Titterton 和 Weston 在惯性导航技术经典教材中也指出，实际工程中地面标定与在轨实际值之间的差异往往需要通过在轨重新校准来补偿，这一差异在百分之几的量级是常见的。这些研究确立了两个关键事实：第一，人类已有能力在轨探测到百分之几量级的惯性参数变化；第二，这种量级的差异确实存在于工程实践中。巧合的是，这个量级恰好落入了本实验的设计探测区间。

需要坦诚说明的是，这一线索本身并非直接证明——在轨惯性响应的差异也可能源于常规因素，如热变形导致的质心漂移、燃料消耗、太阳翼展开后的构型变化等。然而，这些常规因素的存在并不削弱该线索的动机价值：它们恰恰说明，工程实践中已经观测到百分之几量级的“有效惯性”变化，而本实验的任务正是通过专门设计，排除这些常规因素的干扰，直接检验这些变化中是否包含马赫效应的贡献。换言之，工程经验将可疑信号的范围缩小到了百分之几量级，并指明了需要检验的方向，但归因仍需判决性实验来完成。

2.5.3 引力探测器 B 的实证启示——动机性线索，而非直接证据

针对上述猜想，可能存在一个关键性质疑：引力探测器 B（Gravity Probe B）等高精度空间实验测得的地球参考系拖曳效应仅为每年 0.0392 角秒，是极其微小的相对论效应（约 10^{-10} 量级），这是否意味着任何与地球相关的惯性效应都应同样微小，从而对本实验的探测能力构成挑战？这一质疑触及了本实验的科学基础，需要从物理本质、实验内涵与理论联系三个层面予以系统澄清。

物理本质不同：引力探测器 B 测量的是广义相对论预言的时空弯曲效应——地球自转对周围时空的拖曳（框架拖曳效应）以及地球静止质量引起的测地效应。这些效应源于引力场对时空度规的微扰，其微小性由地球引力场的弱场近似（$GM/(c^2R) \sim 10^{-9}$）决定。而本实验探寻的是旋转响应是否依赖于局域物质分布——这是一个比时空弯曲更基础的问题。如果马赫原理成立且地球对旋转响应起主导作用，那么当物体远离地球时，旋转响应可能发生显著变化（如百分之几），这一量级远大于框架拖曳效应。两者在物理本质上截然不同：一个是时空几何的次级修正，一个是旋转“绝对性”的构成来源。因此，不能由后者的微小性推断前者也必然微小。

引力探测器 B 与马赫原理的内在联系：值得注意的是，引力探测器 B 的实验结果本身恰恰为“局部主导”思想提供了间接但有力的动机性支持。Everitt 等在《Physical Review Letters》上发表的最终结果论文中明确指出，框架拖曳效应与引力磁性和马赫原理有着微妙的联系。这一表述并非修辞，而是揭示了实验的深层意义：它证明了局域大质量天体（地球）的运动确实会影响局域惯性系的指向——这正是马赫原理所预期的“物质决定惯性”的具体体现。如果惯性是完全绝对的、与物质无关的，那么地球的自转不应产生任何可观测的惯性系拖曳。GP-B 以定性方式确认了该效应（尽管框架拖曳效应的测量精度约为 20%），从而在定性层面确认了局域物质对惯性系的影响。本重写稿强调：这是 GR 框架内的效应，不是“旋转响应随局域物质变化”的直接证据，只能作为动机。

进一步的理论分析深化了这一联系。根据 Christillin 的论文，GP-B 观测到的效应可以解释为：在卫星的局域非惯性系中，由于宇宙整体质量分布相对于卫星的旋转而产生的 Coriolis 力所致。这一解释将 GP-B 的测量结果直接与马赫的原始思想联系起来——惯性力（此处表现为陀螺仪的进动）源于物体相对于宇宙物质整体的运动。

从这一理论视角出发，GP-B 实验不仅验证了广义相对论，也可以被解读为对马赫原理的定量确认。但同样，这是理论解读，不是本实验所要测的 α、k 的直接证据。

量级差异的合理性：GP-B 测得的框架拖曳效应微小（10^{-10}），而本实验预期的效应可能高达 10^{-2} 至 10^{-3}，这一巨大差异需要深入理解。GP-B 的效应属于广义相对论框架下的次级效应，源于地球引力场对周围时空的微扰，其大小由 $GM/(c^2R)$ 这类小参数决定。而本实验探索的是旋转响应的起源——如果马赫原理成立，地球作为最近的大质量天体，其对旋转响应的贡献可能直接正比于地球的引力势 $GM/(c^2R)$ 本身，而非其梯度或高阶修正。这一假设意味着，地球对旋转响应的贡献并非正比于引力势的微小量级，而是可能通过某种未知的耦合机制被放大到宏观可测的水平。这正是需要检验的核心。

GP-B 对本实验的多重启示：

1. **局域物质确实影响惯性系**：GP-B 首次直接证实，地球的自转能够改变附近惯性系的指向。这一发现本身就在经验层面支持了马赫原理的核心主张——惯性不是绝对的，而是与局域物质分布相关联的。尽管效应的表现形式与本实验不同（指向变化 vs. 旋转响应大小变化），但其物理根源是相通的：两者都涉及局域物质对惯性现象的影响。但本重写稿强调：这是 GR 框架内效应，不能直接外推为“旋转响应随局域物质变化”。
2. **空间精密测量能力已经成熟**：GP-B 历经四十余年研制，最终实现了对测地效应的高精度测量（精度约 0.3%）以及对框架拖曳效应的定性确认。这充分证明，人类已经具备在空间中进行超高精度测量的技术能力。本实验的目标效应量级（如果存在）比 GP-B 的测地效应大 8 个数量级，在技术实现上的难度远低于 GP-B。换言之，GP-B 的经验告诉我们：如果效应存在，我们一定能测到；如果效应不存在，我们也能以极高精度给出上限。
3. **存在未被探索的物理可能性**：GP-B 测量的是广义相对论框架内的效应。但马赫原理所设想的“惯性由物质分布决定”是一个更为根本的命题。如果地球对旋转响应的贡献真的达到百分之几量级，这将是超越广义相对论的新物理。GP-B 实验恰恰为我们打开了探索这一可能性的窗口——它告诉我们，局域物质确实“有影响”，而影响的完整范围仍有待探索。从已确认的微小效应到可能存在的显著效应，中间不存在逻辑障碍，只有实证检验的空白。
4. **区分“两种局域影响”**：GP-B 证实的是地球引力场对时空度规的微扰（广义相对论效应），而本实验要检验的是地球物质分布对旋转响应的影响（马赫效应）。两者在理论框架上截然不同，但 GP-B 的成功至少表明：局域物质在惯性现象中扮演着真实、可测的角色，这为更激进的马赫效应猜想提供了经验基础。如果惯性是完全与物质无关的绝对属性，那么 GP-B 的框架拖曳效应根本就不应该存在——而它确实存在。因此，GP-B 不是反驳局部主导的证据，而是支持“物质影响惯性”这一大方向的动机性里程碑。

   关于 Everitt 的评论：引力探测器 B 首席研究员 Francis Everitt 曾在一篇采访中回顾该项目时表示：“Did I have the slightest idea that it was going to take 50 years? No. If I had known it would be 50 years, would I have done it? Probably not.”（引自 Physics Today 相关报道）这段评论生动体现了大型基础物理实验的长期性，也从侧面反映出空间精密测量实验的艰巨性和科学价值。

2.5.4 小结：三条独立线索的汇聚与判决性实验的必要性

综合以上分析，我们有三条独立的线索指向同一个方向：

1. **地面参考系依赖**：地球在局域动力学中扮演着惯性背景的角色，这一观察事实虽非证据，但提出了值得检验的问题：地球的这一特殊角色是否源于它对旋转响应的主导贡献？
2. **工程经验与辨识研究**：航天器在轨表现出的“有效惯性”与地面预估值存在百分之几量级的差异，且这种差异恰好与马赫原理预期的方向一致——太空中的旋转响应似乎弱于地面，以至于需要降低控制增益来匹配。学术研究进一步确认，人类已有能力探测到这一量级的差异，且该量级确实存在于工程实践中。
3. **GP-B 空间实验**：已证实局域物质（地球）对惯性系有可测量的影响——地球的自转改变了附近惯性系的指向。尽管框架拖曳效应的测量精度有限（约 20%），但这一发现在定性层面意义重大，为“物质影响惯性”提供了首个直接实证支持，并展示了空间精密测量的可行性。

这三条线索共同提示：旋转响应可能确实受局域物质分布影响，且效应量级可能达到工程可感知的百分之几水平。然而，必须清醒认识到，这些线索均非直接检验：

- 地面参考系依赖可能只是观察习惯，不蕴含物理实质；
- 工程差异可被热变形、燃料消耗、构型变化等常规因素完全解释；
- GP-B 效应是广义相对论框架内已被理解的次级效应，不必然预示更大的马赫效应。

常规解释与马赫解释并存，这正是需要判决性实验的根本原因。现有的线索将可疑信号的范围缩小到了百分之几量级，并指明了需要检验的方向，但归因问题——这些差异究竟是常规因素所致，还是马赫效应的体现——只有通过专门设计的、能够直接测量 χ、k 随环境变化的实验才能回答。

在明确了局域物质可能影响旋转响应之后，下一个关键问题是：这种影响是否已经被现有的等效原理实验所排除？下一节将专门讨论这一问题。

本实验的独特价值正在于此：它是第一个专门设计用于直接测量无量纲旋转系数随环境变化的实验。通过在地面与太空对同一物体、同一旋转状态下产生的惯性力进行高精度对比，本实验将能够明确回答：

- 工程经验中观测到的百分之几差异，是否在受控条件下依然存在？
- 如果存在，它是否与引力势变化呈现系统性的对应关系？
- 这种差异的幅度和函数形式，符合哪种模型类参数化？

无论结果如何，本实验都将为惯性起源问题提供第一个决定性的实证数据点。如果观测到显著差异，将支持强马赫型关系图像，开启新物理学；如果得到零结果，将以空前精度排除局部主导模型，为基础物理学划定边界。这正是判决性实验的本质特征——无论结果如何，都能推进认知。

2.6 与等效原理实验的关系

马赫原理最激进的核心在于：旋转不是物体的固有属性，而是一种关系属性，依赖于宇宙中所有物质的分布。在完全空无一物的宇宙中，即使物体在“自转”，旋转本身也无从定义，离心力也将彻底消失。这意味着，惯性力的强弱本质上是物质背景赋予旋转运动的“绝对性”的度量。

基于这一认识，本实验检验的是：在相同相对角速度（相对于局部惯性基准）下，旋转的“绝对有效性”是否会因物质背景稀疏而减弱。如果太空中的离心力小于地面，

结论应是“同样的 ω 产生的旋转响应减弱”，而非“质量变小了”——马赫原理模型并不必然涉及质量本身的变化。

本实验与等效原理实验是互补的，填补了对旋转惯性直接检验的空白。现有高精度等效原理实验（如 MICROSCOPE，精度 10^{-15}）检验的是惯性质量与引力质量的比值是否恒定，而本实验检验的是旋转响应系数 χ、k 是否随环境变化。马赫原理可能只影响旋转动力学（离心力、科里奥利力），而不影响自由落体；或者惯性质量与引力质量以相同比例变化，导致等效原理实验无法发现。

因此，即使本实验观测到百分之几的旋转响应差异，也与现有等效原理实验的零结果完全兼容。两者从不同角度探索惯性的本质，可以相互印证、共同推动对惯性起源的深入理解。

2.7 本提案的逻辑链条总结

1. **第一层逻辑（马赫原理本身）**：如果宇宙空无一物，旋转响应完全消失（极端情形）。
2. **第二层逻辑（近似检验）**：太空比地面更接近“空宇宙”，因此若马赫原理成立，太空中的旋转响应 χ、k 应偏离地面值。
3. **第三层逻辑（效应大小的区分意义）**：
   - 若观测到极小差异（低于实验探测阈值，如 < 0.2%）→ 支持“全宇宙均匀主导”模型，或给局域模型设上限；
   - 若观测到显著差异（大于实验探测阈值，如 > 0.2%）→ 支持“局部天体主导”模型，具体数值将揭示物质贡献的空间分布规律。
4. **第四层逻辑（工程线索）**：航天器姿态控制经验提示，效应可能已达到可探测量级，使得本实验具有现实可行性。但这是动机，不是证据。

无论最终测得的效应是大是小，实验都将为马赫原理提供首个直接实证检验，并帮助区分不同的物质贡献模型。判决语言仍加三重限定：达到设计精度、独立复现、系统误差排除。

三、实验方案总览

本实验共设计三个相互独立的测量方向，每个方向都能单独检验马赫型关系图像：

1. **离心力测量方案（核心方案）**：概念最直接，工程上最容易实现。测量维持圆周运动所需的径向力，直接反映旋转响应系数 χ_c。
2. **科里奥利力测量方案（次选方案）**：在离心力装置基础上增加径向运动机构，测量切向惯性力，实现交叉检验 χ_K。
3. **角动量守恒效应测量方案（辅助方案，建议升为主判决量之一）**：通过改变转动惯量观察角速度变化，检验角动量指数 k。

三个方案均遵循同一逻辑：在太空（更接近“空宇宙”）测得的旋转响应应偏离地面标准值。角动量方案不依赖质量标定，建议作为主判决量之一；离心力与科里奥利力作为交叉检验。

四、离心力测量方案（核心方案）

4.1 物理原理

离心力公式为

```
F_cent = m · ω² · r
```

其中 m 为测试物体质量，ω 为系统的旋转角速度（相对于局部惯性姿态基准），r 为物体距离旋转轴的半径。实验测量无量纲系数

```
χ_c = F_cent / (m_ref · ω_ref² · r_geom)
```

标准理论给出 $\chi_c = 1$。马赫型模型类允许

```
χ_c = 1 + α · g(背景)
```

其中 g 可取 Φ/c^2、$\delta\rho/\rho$、方向投影等候选背景变量，α 为待测耦合系数。

4.2 判决逻辑

- **零假设（标准理论，如广义相对论）：**离心力完全由运动状态（ω，r）决定，与局域物质环境无关。因此 $\chi_{c,\mathrm{ground}} = \chi_{c,\mathrm{orbit}} = 1$。
- **备择假设（马赫型模型类）：**离心力依赖于宇宙物质分布。由于太空比地面更接近“空宇宙”，应有 $\chi_{c,\mathrm{orbit}} \neq \chi_{c,\mathrm{ground}}$。差异的具体幅度将揭示物质贡献的空间分布形式：
  - 若差异极小（低于探测阈值）→ 给出 α 的上限；
  - 若差异显著（如百分之几）→ 支持“局部天体主导”模型，并测量 α 的值。

4.3 实验装置设计

为确保天地实验的绝对可比性，使用同一套设备，并置于真空容器中以消除空气阻力干扰。

装置核心组成：

a. **高精度旋转平台：**无刷直流电机驱动，配空气轴承以减小摩擦。高精度光学编码器（分辨率 > 5000 线/转）加闭环控制系统，保证角速度稳定性优于 0.01%。

b. **测试质量块：**高度对称、性质稳定的物体，如 100.00 ± 0.01 g 的钨合金球体。

c. **力传感器：**采用静电/电磁悬浮零位平衡传感器。传感器实时探测质量块的微小位移，反馈控制系统施加静电力将其拉回中心，维持位置不变所需的反馈力数值上等于离心力。该方法消除了弹性元件的非线性和迟滞误差，可实现高精度测量。

d. **数据采集系统：**实时、同步记录力传感器读数、编码器角度、温度、真空度等。

e. **局部惯性姿态基准：**陀螺仪/星敏感器，用于定义 ω_{ref} 的参考系。

关键设计要点：

- **真空环境：**真空腔体，实验时内部压力 < 0.1 Pa。

- **恒温控制**：主动温控，稳定性优于 ±0.1° C，以减小热膨胀和传感器温漂。
- **刚性连接**：确保旋转半径 r 恒定（例如 10.000 ± 0.005 cm）。

4.4 天地对比实验步骤

1. **地面基准实验**：在实验室（海平面）完成设备调平（水平度 < 0.01° ），抽真空。将平台加速至预定角速度 ω（例如 60 rad/s），稳定后记录力传感器输出 F_ground。
2. **空间站在轨实验**：将同一设备运送至空间站并安装。在微重力环境下无需调平。以完全相同的角速度 ω_ref 旋转，记录力传感器输出 F_orbit。
3. **在轨校准**：设备在轨利用内置静电执行器，在旋转开始前和结束后，施加一系列已知大小的静电力，对力传感器进行原位校准，确保灵敏度未因发射和空间环境而改变。
4. **数据处理**：对多次测量的数据进行平均和误差分析，精确计算相对差异 δ_χ = (χ_c,orbit − χ_c,ground) / χ_c,ground，并拟合模型类参数 α 。

4.5 独立验证性说明

本方案直接测量离心力，是旋转响应最直接的表现。若天地 χ_c 存在显著差异，即可独立支持马赫型关系图像，无需依赖其他测量。但需经系统误差排除与独立复现。

五、科里奥利力测量方案（次选方案）

5.1 物理原理

科里奥利力公式为

```
F_cor = 2 · m · ω · v_r
```

其中 v_r 为物体在旋转参考系中的径向运动速度。在旋转平台上，使质量块沿径向以可控速度运动，测量维持该径向运动所需的切向力，该力即为科里奥利力。无量纲系数

```
χ_K = F_cor / (2 · m_ref · ω_ref · v_r)
```

标准理论 χ_K = 1；马赫型模型类允许 χ_K = 1 + α_K • g(背景)。

5.2 判决逻辑

零假设：χ_K,ground = χ_K,orbit = 1 。备择假设（马赫型模型类）：太空比地面更接近“空宇宙”，应有 χ_K,orbit ≠ χ_K,ground。差异幅度同样用于拟合模型类参数。

5.3 实验装置设计

在离心力测量装置的基础上增加：

- **径向运动机构**：如精密丝杠或直线电机，可驱动质量块沿半径方向以精确速度 v_r 运动。
- **切向力传感器**：用于测量科里奥利力，可采用与径向力传感器相同的悬浮零位技术。

5.4 天地对比实验步骤

1. **地面实验**：设定 ω_ref 恒定，使质量块以速度 v_r 径向运动，记录切向力。
2. **太空实验**：重复相同操作。
3. 比较 x_K 差异，并拟合 α_K。

5.5 独立验证性说明

科里奥利力是旋转动力学中另一种重要的惯性力，其测量独立于离心力。若天地离心力无差异但科里奥利力有差异，或反之，均可提供重要信息。本方案可作为离心力方案的交叉检验。

六、角动量守恒效应测量方案（辅助方案，建议升为主判决量之一）

6.1 物理原理

角动量守恒定律表述为

$$L = I \cdot \omega = 常数$$

其中转动惯量 $I = m \cdot r^2$。当旋转半径 r 变化时，角速度 ω 相应变化：

$$\omega_2 / \omega_1 = r_1^2 / r_2^2$$

定义角动量指数

$$k = \ln(\omega_2/\omega_1) / \ln(r_1/r_2)$$

标准理论 $k = 2$。极端空宇宙：无惯性抵抗，力臂变化不会引起角速度变化，$k = 0$。马赫型模型类允许

$$k = 2 + \beta \cdot g(\ , \omega)$$

这个方案里质量 m 完全不出现，建议作为主判决量之一。

根据马赫原理的极端推论：在完全空无一物的宇宙中，不存在惯性抵抗，力臂变化不会引起角速度变化（因为角速度始终为零）。由此可以推知，在更接近“空宇宙”的太空中，惯性抵抗变化的能力应当弱于地面。这意味着：在太空中，当旋转力臂发生变化时，角速度的改变程度应当小于地面上的改变程度。

6.2 判决逻辑

- **零假设（标准理论）**：天地间半径变化引起的角速度变化完全相同，即 $k_ground = k_orbit = 2$。
- **备择假设（马赫型模型类）**：太空中惯性抵抗变化的能力更弱，同样的半径变化应导致更小的角速度变化，即 $k_orbit \neq k_ground$。等价地，用比值表达：若初始角速度相同，半径从 r_1 变为 r_2，则应有 $(\omega_2/\omega_1)_太空 > (\omega_2/\omega_1)_地面$，因为太空中的角速度更“不愿意”改变，最终角速度更接近初始值，比值更接近 1。差异幅度同样用于拟合模型类参数 β。

6.3 实验装置设计

- **可变转动惯量系统**：两个质量块对称安装在可沿径向移动的精密导轨上，由伺服电机精确控制位置。
- **角速度测量**：高精度光学编码器直接安装在旋转轴上，实时记录角速度变化，分辨率优于 0.01%。
- **控制与数据采集**：确保天地实验中半径变化的时间历程完全一致（相同的起始半径、终止半径、运动速度）。
- **初始条件控制**：天地实验采用完全相同的初始角速度 ω_0 。

6.4 天地对比实验步骤

1. **地面实验**：系统以初始角速度 ω_0 稳定旋转；在预定时间 T 内，将质量块半径从 r_1 精确移动至 r_2；实时记录角速度变化曲线，计算 k_ground；重复多次，统计平均值和标准差。
2. **太空实验**：同一装置在空间站微重力环境下，以完全相同 ω_0 、r_1、r_2、T 重复实验；记录角速度变化，计算 k_orbit。
3. **比较分析**：计算差异 $\Delta k = k_orbit - k_ground$。若 $\Delta k \neq 0$ 且统计显著，经系统误差排除与独立复现后，支持马赫型关系图像，并拟合 β 。

6.5 物理直观解释

惯性是物体维持原有运动状态的“惰性”。在地面，由于宇宙物质（特别是邻近的地球）的贡献，物体具有较强的惯性，这意味着当外界条件改变（如旋转半径变化）时，物体会强烈抵抗这种改变——结果是角速度必须大幅调整以保持角动量守恒（角速度变化大）。

在太空，惯性减弱，物体抵抗变化的能力下降。此时，同样的半径变化引起的角速度变化反而更小——因为它缺乏维持原有状态的“意志”，更容易接受外界扰动，而不需要剧烈调整自己的运动。这正对应了马赫原理的极端情形：在空宇宙中，根本没有“原有旋转状态”可言，力臂变化完全不影响角速度（角速度始终为零，即变化为零）。太空作为部分空宇宙，应表现出这种效应的减弱版本：角速度变化趋近于零。

因此，马赫原理预言：$(\Delta\omega)_太空 < (\Delta\omega)_地面$，或等价地 $(\omega_2/\omega_1)_太空 > (\omega_2/\omega_1)_地面$。

6.6 独立验证性说明

本方案完全不依赖力测量，而是通过纯粹的运动学效应检验旋转响应。如果马赫原理成立，这种效应将直接体现在角动量守恒定律的表现形式上。因此，本方案是对前两个力测量方案的独立补充，可以形成完整的交叉验证体系。本重写稿建议把 k 作为主判决量之一，因为它不受质量标定漂移影响。

七、误差分析与控制

为实现对可能高达百分之几的预期效应的可靠检测，需要将总测量不确定度控制在 0.5% 以内，这完全可以由当前精密测量技术实现。本重写稿强调：这是设计目标，不是必然保证；最终以实际误差预算为准。

误差源	影响估计	控制措施	残余影响

误差源	影响估计	控制措施	残余影响
角速度不一致	$\Delta\omega/\omega = 0.1\% \rightarrow 0.2\%$	高精度编码器 + 闭环反馈控制	< 0.05%
半径变化热膨胀	—	殷钢（低膨胀合金）制造旋转臂 + 恒温控制	< 0.01%
力传感器误差	非线性、迟滞、漂移	采用零位平衡法 + 在轨原位校准	< 0.1%
重力干扰（地面）	水平误差引入重力分量	精密自动调平系统（< 0.01°）	< 0.005%
环境振动	随机噪声	主动隔振平台（地面）+ 微振动时段选择（太空）	< 0.1%（经长时间平均后）
电磁干扰	信号噪声	多层电磁屏蔽 + 差分信号传输	< 0.01%

角动量方案特有误差：

误差源	影响估计	控制措施	残余影响
半径定位误差	$\Delta r/r = 0.01\%$	激光干涉测距 + 闭环控制	< 0.01%
初始角速度差异	0.1%	严格锁定初始条件	< 0.05%

总不确定度估算：通过均方根合成，预计总的相对测量不确定度可控制在 0.2% 以内。这一精度足以对两类模型进行明确区分：

- 若实验测得的天地旋转响应差异小于 0.2%（在误差范围内与零一致），则表明在该精度水平上未检测到局域物质分布对旋转响应的影响，给出模型类参数 α、β 的上限，支持“全宇宙均匀主导”模型（或惯性为固有属性的零假设）；
- 若实验测得的天地旋转响应差异大于 0.2%（统计显著），则表明旋转响应确实依赖于局域物质分布，支持“局部天体主导”模型，并测量 α、β 的值。

需要说明的是，“局部天体主导”模型可以预言多种不同的数值（例如 6.7%、3%、1% 等），具体取决于物质贡献的空间分布函数（如与距离的一次方、平方或更高次幂成反比等）。实验的目的正是测量这一差异的具体数值，从而为区分不同理论模型提供关键实证依据。

无论测得的具体数值是多少，只要大于探测阈值，即可确认强马赫型关系图像成立；若小于探测阈值，则在该精度以上排除局域主导模型，并给出参数上限。这一设计保证了实验的判决性，但判决仍需独立复现与系统误差排除。

八、预期成果与科学意义

本实验具有“双赢”的科学价值：无论观测到零结果还是非零结果，都将为惯性起源这一根本问题提供决定性的实证依据，并推动基础物理学与空间精密测量技术的发展。

情况一：零结果（天地旋转响应差异低于实验探测阈值）

若在预期精度内未检测到可置信的差异，则意味着在现有测量水平上，旋转响应不随局域物质环境的变化而改变。这将构成对强马赫原理的严格排除——即“惯性依赖于局域宇宙物质分布”这一核心命题在本实验的精度范围内被证伪，并给出模型类参数 α、β 的上限。

需要特别强调的是：本实验所采用的技术方案具备将测量不确定度压缩至远低于 0.2% 的潜力。依托国家在空间精密测量领域的先进技术能力，通过进一步优化传感器设计、延长积分时间、改进温控与隔振系统，完全有可能将探测阈值提升至 0.05% 甚至更高精度水平。若在此更高精度下仍获得零结果，则意味着：

- 广义相对论所隐含的局域洛伦兹不变性在更高精度（例如 5×10^{-4}）下得到验证；
- 地球主导的马赫原理版本被彻底排除；
- 可为“全宇宙均匀主导”的马赫原理模型设置迄今为止最严格的上限，表明旋转响应与环境物质分布的相关性即使存在，也极其微弱——其效应上限被压缩至 0.05% 以下。

零结果的科学意义在于：它为基础物理学提供了关键的实验约束，排除了一个长期存在的理论可能性，将惯性的起源问题进一步聚焦于其他理论框架（如量子场论、弦论等）的解释范围。换言之，在本实验所能达到的测量精度之上，强马赫原理——即惯性依赖于局域宇宙物质分布这一核心命题——可被明确证伪。这一结果将堪比 21 世纪的“迈克尔逊—莫雷实验”，不仅确立一套新的空间精密测量基准，也彰显国家在基础前沿研究领域的技术引领能力。

【补充内容一：对“全宇宙均匀模型”检验逻辑的精确说明】

需要进一步说明的是：上述“零结果”的论述，是基于“全宇宙均匀主导模型”效应极小、在现有实验精度下难以与零区分这一前提。然而，从严格的科学逻辑出发，该模型并不等同于“效应严格为零”。如果模型给出了一个虽小但非零的定量预言（例如与宇宙整体物质分布耦合产生的微小可测效应），那么只要本实验的测量精度最终超越该预言值，同样可以对“全宇宙均匀主导模型”本身进行直接检验。

换言之：

- 若实验精度达到 10^{-4} 甚至更高，且仍未检测到差异，则不仅能排除“局部主导”模型，还能对“全宇宙均匀主导”模型给出迄今为止最严格的实验上限，甚至可能直接触及或排除其具体预言；
- 若模型预言效应恰好落在本实验可测范围内，则实验将首次实现对该类模型的实证检验。

因此，本实验的科学目标不应被简单框定为“检验局部主导 vs. 全宇宙均匀主导”的二选一，而应表述为：在尽可能高的精度下，测量天地旋转响应差异，并根据测量结果对所有类型的马赫原理模型类（无论其效应大小）给出实证约束。这种表述更符合基础物理实验“以精度推进认知边界”的本质特征。

情况二：非零结果（观测到显著的天地旋转响应差异）

若实验检测到明确的、统计显著的差异，则无论其具体数值是多少（只要大于实验探测阈值，如 0.2%、1%、5%、6.7% 或任何其他可置信的值），都意味着强马赫型关系图像成立——这一结论本身即构成物理学基础研究的颠覆性突破。只要在实验精度内确认旋转响应随环境变化，就足以推翻现行物理学框架中对惯性本质的基本假设，其影响之深远可媲美 20 世纪初相对论与量子力学的诞生。

非零结果的核心科学内涵包括：

- 惯性不是物体的固有属性，而是物体与周围物质分布相互作用所产生的涌现现象——这一结论本身即是对牛顿—爱因斯坦范式的基础性修正；

- 广义相对论在描述惯性与物质分布的关系上需要根本性修正，或存在超越广义相对论的新物理；
- 存在一种与宇宙物质分布相关联的新相互作用（可暂称为“马赫场”），其效应在空间尺度上可被实验分辨；
- 长期以来航天工程中观测到的“在轨惯性表现异常”获得初步的理论解释。

在确认强马赫型关系图像成立的基础上，差异的具体数值将进一步揭示物质贡献的空间分布规律，可区分为以下两种子情况：

子情况 2a：差异与特定模型类的预期相符

若测量值与某一模型类的预言相符（例如，若旋转响应与地球引力势成反比，则预期值约为 6.7%；若与距离平方成反比，则预期值可能不同），则可确认该模型类的有效性。无论具体数值是多少，只要差异显著且与某一定量模型吻合，都将为马赫原理提供第一个定量的实证支持。

子情况 2b：差异显著但偏离现有模型类预期

若差异存在，但其数值与现有模型类的预言不符，则表明旋转响应确实受环境物质分布影响，但其函数形式更为复杂（例如与距离的更高次幂相关，或受到宇宙学尺度的物质分布调制）。此种结果仍属重大突破，它将为理论家提供关键的定量数据，推动发展更精确的马赫原理模型，并帮助揭示物质贡献的真实空间分布函数。

再次强调：无论子情况如何，非零结果本身即已构成物理学范式的根本性转变。差异的具体数值只影响后续理论发展的方向，而不改变“强马赫型关系图像成立”这一核心结论的革命性意义。

注：差异幅度“6.7%”仅为基于“旋转响应与地球引力势成反比”这一简化模型的示例估算值。局部主导模型可以预言多种不同的数值（只要大于实验探测阈值），具体取决于物质贡献的空间分布函数（如与距离的一次方、平方或更高次幂成反比等）。实验本身旨在以尽可能高的精度（目标优于 0.2%，力争达到 0.05% 或更高）测量天地旋转响应差异，无论测得的具体数值是多少，都将为区分不同理论模型提供关键实证依据。

无论结果如何，本项目的共同贡献

无论实验最终得到零结果还是非零结果，本项目都将在以下两个层面产生深远影响：

技术层面：发展并验证一套空间微重力基础物理实验的尖端技术体系（高精度电磁悬浮、零位平衡传感、精密伺服控制、在轨原位校准等），为未来更高精度的空间实验（如等效原理检验、引力波探测、暗物质搜寻）奠定坚实的技术基础。若实现远低于 0.2% 的测量精度，将标志着我国在空间基础物理实验领域跻身世界领先行列。

科学层面：为理解惯性起源这一根本性问题，提供一个独一无二且具有判决性的实证数据点。无论是严格排除强马赫原理，还是确认其成立，都将推动基础物理学向更深层次演进，其意义不亚于一个世纪前那些奠定现代物理学基石的关键实验。

【补充内容二：本实验方案的根本性检验能力】

需要特别指出的是，本实验方案的大方向具备一种更深层次的科学价值：它是一条能够从根本上证明马赫原理是对是错的确定性探索路径。

这一判断基于以下逻辑：

如果马赫原理是错的——即惯性确实是物体的固有属性，不依赖于宇宙物质分布——那么无论在何种物质环境中（地面还是太空），同一物体的同一运动状态产生的旋转响应都应严格相同。这意味着：

- 在本实验的精度水平上，将测得零差异；
- 即使未来将实验精度提升至 10^{-6}、10^{-8} 或更高，只要马赫原理是错的，零结果将一直保持；
- 每一次更高精度的重复测量，都是对“惯性是固有属性”这一命题的更强验证。

如果马赫原理是对的——即惯性依赖于物质分布——那么：

- 在某个精度水平上（取决于具体模型类的效应大小），必然会出现非零的天地差异；
- 随着精度提高，还可能观测到更精细的效应结构（如与引力势的函数关系、与距离的依赖形式等），从而揭示物质贡献的具体规律。

由此可见，本实验方案的大方向具备双向判决能力：

- **持续零结果** → 逐步排除马赫原理的可能性，逼近“惯性是固有属性”的结论；
- **出现非零结果** → 确认马赫原理成立，并定量刻画其效应。

这意味着，本实验不是一次性的“博彩式”探索，而是一条可以持续推进、最终必然抵达答案的确定性路径。无论最终结果是零还是非零，只要沿着“不断提高精度”的技术路线走下去，就一定能从根本上回答“惯性是否依赖于宇宙物质分布”这一根本性问题。

这正是本实验方案作为一项基础物理研究，最值得支持的根本理由。本重写稿补充限定：这里的“必然”是条件句中的必然——前提是各实验达到设计精度并独立复现；若出现正信号，先作为“待解释异常”，经系统误差排除后再讨论理论含义。

九、可行性分析

9.1 技术可行性

本方案所涉及的核心技术均已在地面实验室和部分空间任务中得到成熟应用：

- **高精度电磁悬浮与零位平衡传感技术**：类似技术已在 LIGO 引力波探测器、精密陀螺仪、惯性导航系统中实现亚纳米级位移测量和亚微牛级力测量，其原理和工程实现途径清晰。
- **精密伺服控制技术**：高精度光学编码器配合闭环反馈控制，已能在旋转平台上实现优于 0.01% 的角速度稳定性和优于 0.01% 的位置控制精度。
- **真空与恒温控制技术**：现有空间实验机柜已具备 0.1 Pa 级真空维持能力和 ±0.1° C 级主动温控能力，可满足实验需求。
- **在轨原位校准技术**：静电/电磁执行器可在轨施加已知标定力，已在天平式加速度计等空间仪器中得到验证。

中国空间站提供了长期稳定的微重力环境、标准化的实验机柜接口、充足的电力和数据传输资源，为实验的实施提供了理想的在轨平台。

9.2 工程可行性

- **设备集成度**：实验装置设计紧凑，全部组件可集成于一个标准空间实验机柜内（体积约 1 ㎥，质量约 200 kg，功耗约 300 W），符合空间站有效载荷的通用规范。
- **环境适应性**：设备需通过力学环境试验（振动、冲击、加速度）和热真空环境试验，以验证其能承受发射阶段的恶劣条件并在空间环境中可靠运行。现有航天工程经验表明，此类精密仪器可通过适当的结构加固和封装设计满足发射要求。
- **在轨操作**：航天员仅需进行简单的安装、电缆连接和启动操作，其余实验过程（包括参数设置、数据采集、在轨校准）均可通过地面遥控或全自动程序完成，最大程度减少对航天员时间的占用。
- **天地一致性**：采用同一套设备进行天地对比，消除了设备差异带来的系统误差；在轨原位校准确保传感器灵敏度在发射前后保持一致。

9.3 团队基础

本项目需联合国内在基础物理、空间科学、精密测量仪器、航天工程等领域的顶尖团队，形成跨学科攻关力量。目前已有初步合作意向的单位包括：

- **基础物理理论**：相关高校和研究所的理论物理团队，可为马赫原理的模型构建和实验预期提供理论支持；
- **精密测量技术**：在电磁悬浮传感、激光干涉测距等领域具有丰富积累的研究团队，可承担核心传感器的研制；
- **空间工程实施**：具有空间有效载荷研制经验的航天单位，可负责工程化设计和环境适应性验证。

上述团队已具备相应的理论、实验和工程合作基础，具备承担本项目的综合能力。

十、结论与展望

本提案提出了一项旨在检验惯性起源的创新空间实验。实验的基本逻辑源于马赫原理的极端推论：在空无一物的宇宙中，旋转和惯性力都不存在。虽然这一理想条件无法实现，但可以比较不同“空度”的环境——太空比地面更接近“空宇宙”，因此若马赫原理成立，太空中的旋转响应应偏离地面标准值。

实验的核心科学问题进一步细化为：物质对旋转响应的贡献是“全宇宙均匀主导”还是“局部天体主导”？通过测量天地旋转响应差异的大小，我们可以明确回答这一问题。值得注意的是，地面参考系依赖、航天器姿态控制经验以及引力探测器 B 的实测结果，均提示局部主导的可能性，使得本实验有望获得显著结果。但这些线索只作动机，不作判决证据。

本研究设计了三个独立的测量方案（离心力、科里奥利力、角动量守恒效应），每个方案都能单独检验马赫型关系图像，形成交叉检验：

- **离心力方案**直接测量径向惯性力，概念最直接、工程上最容易实现，是本提案的首选核心方案；
- **科里奥利力方案**测量切向惯性力，可作为核心方案的交叉检验；
- **角动量守恒方案**通过运动学效应检验惯性抵抗变化的能力——预言太空中的角速度变化应小于地面，且不依赖质量标定，建议作为主判决量之一。

实验的预期成果具有明确的判决性：

- 若获得零结果，则在本实验精度以上严格排除强马赫原理，并给出模型类参数 α、β 的上限，为惯性起源问题划定理论探索的边界；
- 若获得非零结果，则无论具体数值如何，都意味着强马赫型关系图像成立，构成物理学基础研究的颠覆性突破，其科学意义独立于差异的具体大小。

无论结果如何，本项目都将发展并验证一套空间微重力基础物理实验的尖端技术体系，为未来更高精度的空间实验奠定基础，同时为理解惯性起源这一根本性问题提供独一无二的实证数据点。

本实验兼具重大的科学探索价值和明确的技术可行性，是一项适合在中国空间站平台上实施的前沿基础物理研究。诚挚建议对这一具有重大科学潜力的项目予以支持，共同推动人类对惯性本质这一千古之谜的认识迈出关键一步。

参考文献

1. Mach, E. (1883). *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development.*
2. Einstein, A. (1916). “The Foundation of the General Theory of Relativity.” *Annalen der Physik.*
3. Bondi, H., & Samuel, J. (1997). “The Lense-Thirring Effect and Mach’s Principle.” *Physics Letters A.*
4. Touboul, P., et al. (2017). “MICROSCOPE Mission: First Results of a Space Test of the Equivalence Principle.” *Physical Review Letters.*
5. Ciufolini, I., & Pavlis, E. C. (2004). “A Confirmation of the General Relativistic Prediction of the Lense-Thirring Effect.” *Nature.*
6. Everitt, C. W. F., et al. (2011). “Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity.” *Physical Review Letters*, 106(22): 221101.
7. Bergmann, E., et al. (2018). “On-orbit identification of spacecraft inertia parameters: A review.” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 41(5): 1023–1038.
8. Titterton, D. H., & Weston, J. L. (2004). *Strapdown Inertial Navigation Technology.* 2nd ed. IET.
9. Christillin, P. (2014). “Gravity Probe B and Mach’s principle.” *The European Physical Journal Plus*, 129: 175.

补充篇一：阶梯式测量策略与低成本先导实验

从海拔 0 到拉格朗日点：构建旋转响应空间分布曲线的实证路径

一、补充提案摘要

主提案提出了通过天地对比检验马赫原理的核心思路，并设计了三个独立测量方案。本补充提案在此基础上，进一步完善实验逻辑，提出阶梯式测量策略：从地面不同海拔（0 m、2000 m、4000 m、6000 m）到近地轨道（400 km），直至地月拉格朗日点，

逐级测量旋转响应的变化。这种梯度式测量可揭示旋转响应随局域物质背景（地球距离）的衰减规律，比单一的地面—太空两点对比更具说服力，并能有效区分不同的理论模型。

同时，建议先期开展低成本地面海拔梯度先导实验，作为阶梯式测量的第一步。该先导实验以“低—高—低多次往返测量”为核心设计，通过在不同海拔之间多次往返，观测旋转响应是否随海拔变化呈现可逆的同步变化——这是证明因果关系的黄金标准。实验采用“快速探路—公开异常—精细验证”三阶段策略：第一阶段以简化装置快速探查效应是否存在，若观测到阳性信号，则公开为“待解释异常”，锁定发现优先权，随后进入第三阶段进行全面的环境测试与标定，获取高精度无可辩驳的证据。这种策略可在最短时间内锁定重大异常，确保成果归属，同时避免在不存在的效应上过度投入。

主提案 2.5 节已对支持局部主导猜想的观测与工程证据进行了系统论证，本补充提案在此基础上进一步提出阶梯式测量策略与低成本先导实验，形成完整的实证路径。实验仅需约 20 万元人民币预算和 6 个月左右周期，利用商用高精度力传感器和现有实验室条件，即可对“局部天体主导”模型进行初步检验。若探测到预期量级的效应（如大于 0.1%），则可作为马赫原理的迹象，并为后续空间实验提供关键依据；若得到零结果，则可给出模型类参数 α、β 的上限，为空间站实验排除近地强效应的可能性，降低终极实验的不确定性。

阶梯式策略、多次往返设计与三阶段执行策略，体现了科学探索的严谨性与战略智慧——从易到难、从地面到空间、从低成本到高投入、从探路到精测、从公开异常到终极验证——将极大提高本项目的成功率、科学产出与学术影响力。

二、引言：为什么阶梯式测量更具说服力

主提案的核心逻辑是比较地面与太空的旋转响应差异，以检验马赫原理。然而，单一的两点对比存在固有局限：

1. **无法区分效应的空间衰减规律**：若观测到差异，无法判断它是随距离平滑衰减、与引力势成正比、还是存在某种临界距离；若未观测到差异，也无法排除效应在更远处（如拉格朗日点）出现的可能性。
2. **易受系统误差干扰**：两点对比中，任何仪器漂移或环境差异都可能被误认为物理效应。若只有两个数据点，缺乏自洽性检验，结论的可靠性会打折扣。
3. **无法区分理论模型**：不同的马赫原理实现方式（如全宇宙均匀主导、局部引力势主导、距离平方反比衰减等）会预言不同的空间变化曲线。两点对比无法区分这些可能性。

因此，引入从海平面到拉格朗日点的阶梯式测量，可以：

- 构建旋转响应随距离（或引力势）的变化曲线，直接检验其与物质分布的函数关系；
- 提供多个独立判决点，增强结果的统计可信度和说服力；
- 区分不同的理论模型类，为理论发展提供关键约束；
- 即便在某个区间未发现效应，也能为该区间设置严格上限，指导后续探索方向。

而在阶梯式测量的第一步——地面海拔梯度实验中，进一步引入“低—高—低多次往返测量”设计，将因果关系的证明推向极致：若旋转响应真的依赖于局域物质背景，

那么当实验装置在海平面与高山站之间多次往返时，测量值应呈现与海拔同步的、可逆的变化。这种可逆性正是科学方法中“操纵变量并观察响应”的黄金标准，能够排除几乎所有系统误差和偶然干扰。

三、离心力测量的两种传感器方案

主提案中，离心力测量作为核心方案被重点阐述。但在技术实现层面，存在两种不同精度和复杂度的传感器方案，分别适用于不同的实验阶段。为便于后续阶梯式测量的展开，此处对两种方案进行详细介绍。

3.1 方案 A：物理弹簧/悬臂梁传感器

原理与结构：

```
[旋转轴]----[精密直线导轨]----[力传感器]----[测试质量块]
                                        径向向外 ← 离心力方向
```

测试质量块安装在精密直线导轨上，仅允许径向运动。质量块与力传感器（如悬臂梁式应变传感器）相连。当系统旋转时，离心力将质量块向外拉，使传感器产生微小形变，通过应变片测量形变量即可换算得到离心力大小。

优点：

- 结构简单，技术成熟，成本较低；
- 可直接采用商用高精度传感器（非线性可达 0.02% FS）；
- 易于标定和维护。

缺点：

- 存在机械迟滞和弹性元件的非线性；
- 受温度影响较大，需精密温控；
- 长期稳定性受材料疲劳影响。

适用场景：地面实验室、高山站等可人工干预的环境，以及精度要求适中的先导实验。

3.2 方案 B：静电/电磁悬浮零位平衡传感器

原理与结构：

```
[旋转轴]----[固定位置]----[静电悬浮腔]----[测试质量块]
                                反馈控制系统
```

测试质量块在静电悬浮腔中处于无接触悬浮状态。位置传感器实时探测质量块的微小位移，反馈控制系统根据位移信号施加静电力（或电磁力），将质量块精确拉回中心零位。维持质量块位置不变所需的反馈力，在数值上就等于作用在质量块上的离心力。

优点：

- 无机械接触，消除摩擦和迟滞；

- 精度极高，分辨率可达纳牛级；
- 可实现原位自校准，长期稳定性好；
- 线性度优异，动态范围宽。

缺点：

- 系统复杂，需高精度位移探测和反馈控制；
- 成本高，研制周期长；
- 对电子学和真空环境要求苛刻。

适用场景：空间站、深空探测器等无法人工干预的环境，以及追求极限精度的终极实验。

3.3 两种方案的分工与衔接

两种方案并非竞争关系，而是服务于阶梯式测量的不同阶段：

方案	适用阶段	核心优势	精度量级	成本量级
方案 A	地面先导实验	低成本、快速实现、易于转移	0.02%—0.1%	十万级
方案 B	空间站及深空终极实验	超高精度、原位校准、天地可比	优于 0.01%	千万级

阶梯式测量策略正是利用方案 A 的低成本优势完成前期探索，再利用方案 B 的高精度优势完成终极验证，两者相辅相成。

四、阶梯式测量总体方案

4.1 测量点选择

根据地球引力势及物质分布的变化梯度，结合现有或可实现的实验平台，选取以下特征位置作为阶梯测量点。本重写稿重算引力势：

$$\Delta\Phi/c^2 \approx (GM/c^2) \cdot (1/R - 1/(R+h))$$

海平面为参考 0；2000 m 约 2.2×10^{-13}；4000 m 约 4.4×10^{-13}；6000 m 约 6.5×10^{-13}；20 km 约 2.2×10^{-12}；400 km 约 4.1×10^{-11}；地月 L1 相对地表约 6.8×10^{-10}。原表中部分数值量级有误，以本表为准。

测量点	距离地心 (km)	海拔/轨道高度	引力势相对海平面变化 $\Delta\Phi/c^2$	平台可行性	适用方案	预期相对效应示例*
海平面基准	6371	0 m	0	地面实验室	方案 A/B	0（参考点）
高山站 A	6373	~2000 m	2.2×10^{-13}	云南/四川高山实验室	方案 A	若将 6.7% 作为 400 km 参照，线性比例约 0.03%
高山站 B	6377	~6000 m	6.5×10^{-13}	西藏阿里/青藏高原	方案 A	线性比例约 0.1%
高空平台	~6390	~20 km	2.2×10^{-12}	高空气球/科研飞机	方案 A 改进型	线性比例约 0.3%

测量点	距离地心（km）	海拔/轨道高度	引力势相对海平面变化 $\Delta\Phi/c^2$	平台可行性	适用方案	预期相对效应示例*
低轨卫星	6771	400 km	4.1×10^{-11}	中国空间站	方案 B	若效应与引力势线性且以 6.7% 为参照，约 6.7%
中高轨卫星	~26000	~20000 km	$\sim5.3\times10^{-10}$	北斗卫星搭载	方案 B	待测
地月拉格朗日 L1 点	~385000	~378000 km	$\sim6.8\times10^{-10}$	地月平动点探测器	方案 B	待测

*注：预期效应比例仅为示意，基于“若将主提案中天地差异 6.7% 作为 400 km 参照，并假设效应与局域引力势变化成线性比例”的简单比例换算；它不是从第一性原理推导出的理论预言。实际函数形式未知，这正是本实验要测量的核心内容。更可检验的写法是引入待测系数：$x(h) = 1 + \alpha \cdot \Delta\Phi(h)/c^2$，$k(h) = 2 + \beta \cdot \Delta\Phi(h)/c^2$，$\alpha$、$\beta$ 未知。若 $\alpha \sim 1$，2000—6000 m 的效应约 10^{-13}—10^{-12}，远低于先导实验 0.1% 阈值；因此先导实验检验的是 α 的上限，或检验其他更强耦合模型，而不是“线性模型预言的 0.03%—0.1%”。局部天体主导模型可以预言多种不同的数值，只要大于实验探测阈值（如 0.2%），无论具体数值是多少，都属于该模型范畴。

4.2 测量内容与方法

所有测量点均采用相同的核心测量方式——离心力测量，以保证数据的直接可比性。测量量均为：在固定角速度 ω_{ref}（如 60 rad/s）和固定旋转半径 r（如 10 cm）下，维持测试质量圆周运动所需的径向力 F。各点测量数据均归一化到海平面基准值，绘制 $x(h) = F(h) / (m_{ref} \cdot \omega_{ref}^2 \cdot r)$ 随海拔高度（或引力势）的变化曲线。

4.3 数据解读与模型区分

阶梯式测量可获得一条完整的空间变化曲线，能够有效区分不同理论模型类：

- **全宇宙均匀主导模型**：曲线应为水平直线（无变化），所有点 $x(h) \approx 1$。
- **局部引力势线性模型**：曲线应与 $\Delta\Phi/c^2$ 成正比，呈线性下降，可拟合 α。
- **距离平方反比衰减模型**：曲线应与 $1/r$ 或 $1/r^2$ 相关，下降速度先快后慢。
- **存在屏蔽效应的模型**：曲线可能在某个距离后出现平台或转折。

若曲线呈现单调下降且趋势与某种理论预测吻合，可作为马赫型关系图像的强证据；若曲线平坦，则对相关模型类设置严格上限，给出 α、β 的上限。

4.4 与主提案的关系说明

主提案 2.5 节已对支持“局部主导”猜想的观测与工程证据进行了系统论述，包括：

1. 地面旋转实验的参考系依赖；
2. 航天器姿态控制的工程经验；
3. 引力探测器 B 的空间实测结果。

本补充提案不再重复这些论证，而是在此基础上提出阶梯式测量策略与先导实验方案，形成完整的实证路径。

五、低成本先导实验：地面海拔梯度多次往返测量

作为阶梯式测量的第一步，建议立即开展地面海拔梯度先导实验，并以“低—高—低多次往返测量”作为核心设计。这是整个阶梯策略中最具性价比、风险最低、周期最短的环节，同时其证据强度也最高。

5.1 为什么多次往返测量是核心？

马赫原理的核心预言是：旋转响应依赖于局域物质背景（地球距离）。如果这一预言成立，那么当实验装置在海平面与高山站之间多次往返时，离心力测量值应呈现与海拔同步的、可逆的变化：

- 向高海拔移动（远离地球）→ 离心力减小（旋转响应减弱）；
- 向低海拔移动（靠近地球）→ 离心力增大（旋转响应增强）；
- 多次往返 → 测量值与海拔变化严格同步，形成“开关效应”。

这种可逆性正是因果关系的铁证。它内置了最严格的对照——每次返回低海拔的复测都是对仪器状态的检验，可排除仪器漂移、运输损伤、环境巧合等几乎所有系统误差。相比单次对比，多次往返测量将证据强度提升了一个数量级。

5.2 三阶段执行策略：先探路，快公开，后精测

为在最短时间内锁定重大异常、确保成果归属，同时避免在不存在的效应上过度投入，先导实验采用“快速探路—公开待解释异常—精细验证”三阶段执行策略：

阶段	目标	周期	装置状态	产出与行动
第一阶段：快速探路	探查效应是否存在	2—3 个月	简化装置，快速组装	若看到信号，公开为“待解释异常”；若无信号，分析原因或终止
第二阶段：优先权锁定	公开数据与时间戳	即时	基于第一阶段数据	撰写快报、预印本、召开内部评审，锁定公开时间戳
第三阶段：精细验证	获取无可辩驳的证据	4—5 个月	全面标定、环境测试、多次往返	完美数据+所有支持性验证，正式发表

这种策略的核心智慧在于：

- **抢先公开异常**：科学发现的优先权属于第一个公开可复现数据的人，而不是第一个做完所有验证的人。一旦第一阶段观测到清晰的“低—高—低”可逆模式，即可公开为“待解释异常”，锁定数据时间戳；但不称“验证成功”。
- **后续精测**：公开之后，再从容地进行全面的环境测试、多次往返测量，用更严谨的数据回答所有可能的质疑，为正式发表做准备。

5.3 第一阶段：快速探路与初步公开（2—3 个月）

目标：以最快速度检验是否存在“低—高—低”可逆模式。若观测到预期信号，公开为“待解释异常”。

装置：采用方案 A 的简化版，只保证基本精度（0.1% 量级），不做全面的环境测试。

测量序列（简化版）：

- A1：海平面（3 天）
- B1：2000 米高山（3 天）

- A2：返回海平面（3 天）

判决与行动：

- 若 A1 ≈ A2 且 B1 明显偏离（如差异 > 3 倍标准差，且与海拔高度相关）：
  - 公开为“待解释异常”：召开内部评审会，撰写快报，上传预印本（如 arXiv、ChinaXiv），向学术界公开数据与时间戳。
  - 启动第三阶段：进入精细验证，为正式发表做准备。
- 若无明显信号：检查仪器，考虑是否效应不存在或仪器不够好；若确认仪器正常，则终止实验，发表零结果。

阳性信号判据说明：为避免假阳性，第一阶段阳性信号需满足以下条件：

- 差异的统计显著性 $p < 0.01$；
- 测量值变化与海拔变化严格同步（B1 偏离 A1，A2 恢复至 A1 水平）；
- 效应方向与马赫原理预言一致（高海拔离心力减小）。

5.4 第二阶段：优先权锁定（即时）

一旦第一阶段观测到阳性信号，立即启动优先权锁定流程：

1. **内部评审**：邀请校内或合作单位专家进行内部评审，确认数据可靠。
2. **预印本发布**：将初步结果上传至公开预印本平台（arXiv、ChinaXiv 等），生成时间戳，锁定公开日期。
3. **快报投稿**：撰写简短快报，投递到《Nature》《Science》或《物理评论快报》等期刊，公开初步异常。
4. **媒体沟通（可选）**：若成果具有重大科学意义，可经学校或机构批准，进行适度媒体发布，扩大影响力。

这一步的核心：科学发现的优先权属于第一个公开可复现数据的人。即使后续精细验证需要数月时间，只要预印本和时间戳在手，成果归属即已锁定。但公开语言必须是“待解释异常”，不是“验证成功”。

5.5 第三阶段：精细验证（4—5 个月）

若第一阶段看到阳性信号并完成公开，立即启动第三阶段，进行全面验证，为正式发表提供无可辩驳的证据。

5.5.1 完整多次往返测量序列

步骤	地点	海拔	测量周期	代号
1	海平面实验室	0 m	7 天	A1
2	2000 米高山站	~2000 m	7 天	B1
3	返回海平面	0 m	7 天	A2
4	4000 米高山站	~4000 m	7 天	B2
5	返回海平面	0 m	7 天	A3

步骤	地点	海拔	测量周期	代号
6	6000 米高山站	~6000 m	7 天	B3
7	返回海平面	0 m	7 天	A4

总测量时间：7 个测点 × 7 天 = 49 天，加上运输、安装、稳定时间，总计约 3 个月。

5.5.2 必要的支持性验证

验证项目	目的	方法	接受标准
拆装测试	证明重新安装不引入误差	在实验室反复拆装仪器 10 次，每次拆装后测量标准状态下的离心力	10 次测量标准差 < 0.02%
运输振动测试	模拟运输对仪器的影响	将仪器置于振动台，模拟车辆运输条件，测试前后对比	变化 < 0.02%
温漂测试	确定温度影响系数	将仪器置于温控箱，在 10—30℃ 范围内以 1℃ 步进改变温度，测量输出变化	获得温度修正系数，用于数据后处理
低气压测试	模拟高海拔低气压影响	用真空舱将腔体外气压降至 0.5 atm，测量输出变化	影响 < 0.01% 或建立修正
电磁干扰测试	确定地磁场/电源影响	用亥姆霍兹线圈施加已知磁场，监测读数变化	影响 < 0.01%
长期稳定性测试	确认仪器无缓慢漂移	连续运行 1 个月，分析零点漂移趋势	总漂移 < 0.02%

5.5.3 环境参数全程监测

在每个测点，全程记录以下环境参数，用于事后相关性分析：

- 温度（多个点）
- 气压
- 湿度
- 地磁场
- 供电电压
- 振动噪声

若发现 B 与 A 的差异与某一环境参数高度相关，可进一步分析该参数的影响；若所有环境参数的影响均已通过支持性验证排除，则 B 与 A 的差异即可归因于海拔变化。本重写稿补充：分析时应采用盲分析，隐藏海拔标签，避免主观偏向。

5.6 判决标准

观测结果	科学含义
A1 = A2 = A3 = A4（误差范围内）且 B1 < A，B2 < A，B3 < A，且 B 值随海拔单调递减	强马赫型关系图像成立。仪器稳定，效应可逆，与海拔相关。这是最有力的证据。但需独立复现与系统误差排除。
A1 = A2 = A3 = A4，但 B 与 A 无显著差异（< 测量不确定度）	零结果。排除近地强效应，给出 α、β 的上限，支持全宇宙均匀主导或极小效应模型。

观测结果	科学含义
A 值随时间单调变化（如 A1 > A2 > A3 > A4）	仪器存在永久漂移。实验无效，需重新设计或改进仪器稳定性。
B 值无单调规律（如 B1 < A，B2 > A，B3 < A）	可能存在未控制的干扰。需检查环境因素或仪器状态。

5.7 技术方案与预算估算（方案 A 实现）

5.7.1 装置核心组成

部件	规格要求	预算估算	备注
高精度力传感器	非线性 < 0.02% FS，量程适配	¥5,000—10,000	商用精密级悬臂梁，如锐力德、斯巴拓等
空气主轴/轴承	径向跳动 < 0.1 μm	¥30,000—50,000	核心精密部件，决定旋转稳定性
无刷直流电机	低速平稳性优，带编码器接口	¥3,000—5,000	可选用伺服电机
高精度编码器	分辨率 > 5000 线/转	¥2,000—4,000	用于闭环控制
真空腔体	可维持 < 0.1 Pa，带观察窗	¥20,000—30,000	可利用实验室加工能力自制
温控系统	稳定性 ±0.01℃	¥15,000—25,000	半导体制冷片 + PID 控制
数据采集卡	24 位 ADC，低噪声	¥5,000—10,000	NI 或国产替代
机械结构件	殷钢/低膨胀合金	¥20,000—30,000	旋转臂、支撑架等
隔振平台	主动/被动隔振	¥20,000—30,000	地面实验必备
其他（线缆、接头、真空泵等）	—	¥10,000—20,000	辅材及耗材
合计		¥130,000—214,000	可根据实际情况优化

注：预算估算基于 2025 年国内市场行情，部分部件可利用现有实验室资源进一步压缩成本。

5.8 时间周期估算（三阶段总计）

阶段	工作内容	时间
第一阶段：快速探路		2—3 个月
第 1 月	方案细化、部件采购、快速组装	4 周
第 2 月	简化往返测量（海平面→2000 米）	4 周
第 3 月	初步数据分析，若阳性则公开异常	2 周
第二阶段：优先权锁定		即时
—	预印本发布、快报投稿	1 周内
第三阶段：精细验证		4—5 个月

阶段	工作内容	时间
第 4 月	拆装测试、温漂测试、环境模拟测试	4 周
第 5 月	长期稳定性测试（1 个月连续运行）	4 周
第 6—7 月	完整往返测量（2000/4000/6000 米）	8 周
第 8 月	数据分析、正式论文撰写	4 周
总计		6—8 个月

若第一阶段未发现信号，可在 3 个月内终止，避免后续投入。

5.9 预期结果与后续行动

实验结果	科学含义	后续行动
第一阶段发现可逆模式，公开异常	马赫型关系图像的首次实验迹象，本团队锁定公开时间戳	立即进入第三阶段精细验证；同步推进空间站实验申报；准备正式发表
第三阶段确认完整效应	获得无可辩驳的证据，巩固发现	正式投稿顶级期刊，申请专利，扩大国际影响
发现 < 0.05% 但非零	梯度效应存在但小于线性比例参照	空间站实验仍需进行，但需采用方案 B 并追求更高精度；地面实验可扩展至更高海拔或增加测点密度
零结果（上限 < 0.02%）	排除地球附近短程强效应，给出 α、β 上限，支持全宇宙均匀主导或极小效应模型	空间站实验仍需推进，但预期差异可能远小于 6.7%；需强化方案 B 的原位校准能力，追求优于 0.01% 的精度

无论何种结果，先导实验都将产出重要科学成果：

- 若正结果：直接锁定马赫型关系图像的迹象，成果可发表于《Nature》《Science》，且发现权归属本团队；
- 若零结果：发表高精度局域洛伦兹不变性检验成果，并给出模型类参数上限，为后续实验提供基准。

六、阶梯式测量的科学意义与策略优势

6.1 科学意义的深化

阶梯式测量将主方案的“是否存在差异”升级为“差异如何随空间变化”，使实验从定性检验迈向定量刻画。这种刻画能力对于理解惯性起源至关重要：

- **确定作用距离**：若效应在近地轨道已达可观量级（如 6.7%），但在拉格朗日点仅略高，说明地球贡献占主导；若效应随距离持续增长，则说明更远天体（太阳、银河系）也有贡献。
- **揭示作用形式**：是引力势线性关系，还是距离平方反比？这将直接指向背后的物理机制，并拟合模型类参数 α、β。
- **发现新物理**：若曲线呈现非单调或突变，可能揭示未知的相互作用或屏蔽效应。

6.2 与主提案的互补关系

阶梯式测量与主提案的天地两点对比形成互补：

- 主提案提供判决性检验：通过单一对比回答“是否存在差异”这一根本问题；
- 本补充提案提供定量刻画：通过多点测量揭示“差异如何随空间变化”，为理论模型提供关键约束。

两者结合，构成从定性到定量、从单一对比到空间分布的完整实证路径。

6.3 与现有实验的互补性

阶梯式测量获得的空间变化曲线，可与多种现有实验形成互补：

- 等效原理实验（如 MICROSCOPE）：检验惯性质量与引力质量比值，本实验检验旋转响应系数；
- 引力拖曳效应测量（如 GP-B）：检验广义相对论的参考系拖曳，本实验检验更根本的马赫原理；
- 引力波探测：LIGO 等探测时空扰动，本实验探测惯性本身的起源。

6.4 策略优势总结

1. **优先权保障**：通过“快速探路 + 公开异常”策略，在最短时间内锁定数据时间戳，避免被其他团队抢先。
2. **风险递进**：从低成本地面实验开始，逐步增加投入，避免直接投入巨额空间实验却得到零结果。
3. **产出递进**：每个阶段都有独立科学产出，即使项目中途终止，也有阶段性成果。
4. **技术递进**：地面实验为空间实验积累经验，优化传感器和控制算法。
5. **逻辑递进**：从“是否存在”到“如何变化”，从“相关性”到“因果性”，构建完整的证据链条。
6. **效率最优**：三阶段策略确保在最短时间内锁定重大异常，同时避免在不存在的效应上过度投入。

七、结论与建议

本补充提案将主方案的单点天地对比扩展为从海平面到拉格朗日点的阶梯式测量，并引入以“低—高—低多次往返测量”为核心的地面海拔梯度先导实验作为第一步。这一设计将科学证据强度推向极致——可逆性本身就是因果关系的铁证。

先导实验采用“快速探路—公开待解释异常—精细验证”三阶段策略：

- 第一阶段以简化装置快速探查效应是否存在；
- 若观测到阳性信号，公开为“待解释异常”，锁定数据时间戳；
- 随后进入第三阶段进行全面验证，获取无可辩驳的证据。

这种策略可在最短时间内锁定重大异常，确保成果归属本团队，同时避免在不存在的效应上过度投入。

同时，明确了离心力测量的两种传感器方案——方案 A 适用于地面先导实验，方案 B 适用于空间终极实验——形成了清晰的技术路径。

强烈建议：

1. **立即启动地面海拔梯度先导实验的第一阶段**。以约 20 万元预算和 2—3 个月周期，采用方案 A 简化装置，快速探查“低—高—低”可逆模式是否存在。若观测到阳性信号，公开为“待解释异常”，锁定数据时间戳，并转入第三阶段进行全面验证。
2. **同步推进空间站实验的方案预研**。在先导实验进行期间，完善方案 B（静电悬浮零位平衡传感器）的工程样机设计，为后续在轨实验做好准备。
3. **将拉格朗日点纳入长远规划**。与深空探测任务结合，争取在未来地月平动点探测器中搭载改进型实验装置，完成阶梯式测量的最后一环。

阶梯式测量、多次往返设计与三阶段执行策略，体现了现代基础物理实验的递进逻辑与战略智慧——从地面到空间、从简单到复杂、从低成本到高投入、从探路到精测、从公开异常到终极验证——是通往惯性起源之谜的最稳健、最高效的探索路径，也是确保本团队在这一世纪性发现中占据优先地位的制胜策略。

参考文献

1. Mach, E. (1883). *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development.*
2. Einstein, A. (1916). “The Foundation of the General Theory of Relativity.” *Annalen der Physik.*
3. Bondi, H., & Samuel, J. (1997). “The Lense-Thirring Effect and Mach’s Principle.” *Physics Letters A.*
4. Touboul, P., et al. (2017). “MICROSCOPE Mission: First Results of a Space Test of the Equivalence Principle.” *Physical Review Letters.*
5. Ciufolini, I., & Pavlis, E. C. (2004). “A Confirmation of the General Relativistic Prediction of the Lense-Thirring Effect.” *Nature.*
6. Everitt, C. W. F., et al. (2011). “Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity.” *Physical Review Letters*, 106(22): 221101.
7. Bergmann, E., et al. (2018). “On-orbit identification of spacecraft inertia parameters: A review.” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 41(5): 1023–1038.
8. Titterton, D. H., & Weston, J. L. (2004). *Strapdown Inertial Navigation Technology.* 2nd ed. IET.
9. Christillin, P. (2014). “Gravity Probe B and Mach’s principle.” *The European Physical Journal Plus*, 129: 175.

补充提案撰写人：罗星壹 • 日期：2026 年 3 月 24 日

补充篇二：深空惯性各向异性探测实验

一项区分广义相对论与全域马赫原理的判决性方案

提案摘要

主方案（空间站离心力天地对比）与补充篇一（地面海拔梯度先导实验）共同构成了一套针对局域马赫模型（地球主导惯性）的检验体系。然而，若主方案测得天地离心力无显著差异，将面临一个无法通过提高精度来解决的双重困境：

困境一：解释简并。 广义相对论（惯性是时空的内禀几何属性）与全域马赫原理（惯性来自全宇宙物质的共同作用）对“天地零差异”给出完全相同的预言——前者认为物质在哪根本不重要，后者认为 400 公里的位移相对于宇宙尺度可忽略。两种截然不同的物理图像在实验上无法区分。

困境二：探测范围悖论。 更根本的是，主方案本身存在一个方法论层面的原理性盲区——其灵敏度依赖于天地位移（400 公里）与马赫效应作用范围之比。作用范围越大，空间梯度越平缓，差异越微小。当作用范围扩展至宇宙学尺度时，预期差异趋近于零，主方案原理性失效。这意味着：马赫原理越接近其“惯性由全宇宙物质决定”的哲学内核，主方案就越无法探测。

两种困境的性质不同——前者是“测到了零也无法判断”，后者是“即使效应存在也测不到”——但它们指向同一个结论：**必须设计一种全新的实验，其灵敏度不依赖于空间位移的大小。**

核心理论突破：

我们提出了一条独立于上述困境的理论论证：全域马赫原理必然预言惯性具有方向依赖性。论证建立在两个不可动摇的物理事实之上：（1）宇宙物质处于大尺度运动之中；（2）任何物理作用的传递速度有限（因果律约束）。运动的物质与有限传播速度的结合，使得每一个物质元对实验物体惯性效应的贡献天然携带方向信息。这些方向向量在实验物体处叠加，其合成效应必然呈现各向异性——无论该理论以张量还是标量的形式表述。

由此得出一个强有力的结论：任何声称“惯性源于宇宙物质”的理论，都必须预言惯性效应具有可测量的方向依赖性。不存在“标量马赫”的逃逸路径——那只是忽略了物质运动的过度简化。本重写稿补充：这是定性必然；定量上，动态项强度取决于耦合常数与传播速度，可能低于阈值，因此实验也可能只给上限。

实验方案：

在日地拉格朗日 L2 点的微重力环境中，部署高精度离心力测量装置，通过改变旋转轴指向对全天球进行系统扫描，测量离心力均值及其各向异性波动（幅度、频率、相位），用惯性张量—矢量混合模型类拟合数据。

判决逻辑：

深空扫描结果	唯一物理解释（加三重限定后）
全指向均有波动，结构符合模型类	全域马赫原理成立。人类首次直接测量到宇宙物质对局域惯性的方向性贡献。需独立复现与系统误差排除。
全指向均无波动（在实验精度内）	广义相对论的绝对时空观获得空前支持。在精度以上排除可测的方向调制型模型类，并给出 β_k、β_1 的上限；不能“终极排除所有马赫型理论”。

本方案与主方案和补充篇一构成递进式三层检验架构，覆盖从局域到全域、从静态到动态的马赫原理完整理论光谱。无论结果如何，人类对惯性本质的理解都将迈出决定性的一步。

一、双重困境：为什么天地对比不足以终结马赫问题

1.1 困境一：解释简并

主方案的判决逻辑简洁而有力：

- 天地离心力有显著差异 → 局域马赫模型成立（地球主导惯性）；
- 天地离心力无显著差异 → 局域马赫模型被排除。

然而，“无差异”这一结果分支上，两种物理图像给出不可区分的预言：

解释	核心主张	对“天地零差异”的说明
广义相对论	惯性是时空的内禀几何属性，与物质分布无涉	天地当然无差异——物质在哪根本不重要
全域马赫原理	惯性来自全宇宙物质的共同物理作用	天地无差异是因为 400 公里的位移相对于宇宙尺度（数百亿光年）可忽略

两种理论在“天地对比”实验操作下，预测完全相同的数值结果。提高测量精度无助于打破这一简并——精度再高，测到的仍然是同一个“零”。实验无法区分“惯性根本不依赖物质”和“惯性依赖全部物质但近处测不到”。

1.2 困境二：探测范围悖论

比解释简并更根本的，是主方案在方法论层面的原理性盲区。这一盲区不依赖于“GR与马赫预言相同”这一前提——即使只考虑马赫原理内部的不同版本，主方案的灵敏度也存在一个不可逾越的瓶颈。

2.1 灵敏度随作用范围衰减

主方案通过“空间位移”探测惯性差异，其灵敏度取决于一个关键比值：

$$\text{灵敏度} \propto \Delta r / R$$

其中 $\Delta r = 400$ km（天地位移），R 为马赫效应的特征作用范围。

马赫模型	特征作用范围 R (km)	Δr/R	预期差异量级	主方案探测能力
局域（地球主导）	~6×10^{3}	~7%	百分之几	**高度敏感**
中介（太阳系主导）	~10^{10}	~4×10^{-8}	10^{-7} 至 10^{-8}	逼近极限
中介（银河系主导）	~10^{18}	~4×10^{-16}	10^{-14} 至 10^{-16}	完全失效
全域（全宇宙主导）	~10^{23}	~4×10^{-21}	趋近于零	**原理性失明**

2.2 悖论陈述

这一事实导致了一个悖论：

> **马赫原理越接近其“惯性由全宇宙物质决定”的哲学内核——主方案就越无法探测。**

最容易探测的局域版本（地球主导），在哲学上是马赫原始思想的最弱实现——马赫从未主张惯性仅仅由最近的天体决定。而马赫原理最激进、最具革命性的版本（全域宇宙物质主导），恰恰是主方案在方法论层面完全无法企及的。

这不是仪器精度不足的问题。即使将测量精度提升六个数量级（这本身在工程上已不可行），主方案仍然无法触及全域马赫——因为信号本身随作用范围增大而趋近于零。这是一种**方法论层面的原理性盲区**：“通过空间位移测量惯性差异”这一思路，本质上只适用于短程效应。

1.3 双重困境的结论

两种困境的性质不同，但指向同一个结论：

- **解释简并**：测到了零也无法判断其物理含义；
- **探测范围悖论**：即使效应存在，原理上也测不到。

提高精度不能解决任何一个困境。必须设计一种全新的实验，其灵敏度**不依赖于空间位移的大小**。

1.4 补充篇二的战略定位：从“测梯度”到“测方向”

面对双重困境，补充篇二开辟了一条全新的解决路径。

放弃“测梯度”，转向“测方向”。

核心洞察在于：无论马赫效应的作用范围有多大，只要宇宙物质分布存在各向异性，那么惯性效应在空间不同方向上就存在差异。这种**方向差异**（各向异性）不随作用范围的增大而衰减——它只取决于物质分布的相对不均匀程度，而宇宙在任意有限尺度上都不是完美各向同性的。

对比维度	主方案（天地对比）	补充篇二（多轴指向）
探测方式	测不同**位置**的惯性差异	测不同**方向**的惯性差异
灵敏度决定因素	$\Delta r/R$（随 R 增大急剧衰减）	$\delta\rho/\rho$（物质各向异性度，与 R 无关）
擅长检验	局域马赫（地球主导）	全域马赫（宇宙物质主导）
原理性盲区	全域马赫（信号趋近于零）	完美各向同性宇宙（非我们所在的宇宙）

补充篇二在局域马赫里也可能检测不出波动，局部马赫模型作用范围越小，这种可能越大（例如，某个局部马赫原理标量模型成立，测量点刚好只在某一个天体的惯性作用范围内）。两者不是竞争关系，而是针对马赫原理光谱中不同波段的两台“望远镜”——各司其职，互为补充。

1.4.1 补充篇二的边界条件（诚实性声明）

补充篇二的判决力建立在以下前提之上：马赫效应的作用范围足够大，使得 L2 点仍在宇宙物质各向异性分布的“感受范围”内。如果局域马赫模型成立且作用范围极小——例如某个天体的惯性贡献仅在其附近有限距离内显著——那么 L2 点可能恰好处于该天体的作用范围之外，导致补充篇二无法探测到任何波动。

但这一“盲区”恰好被主方案完全覆盖。主方案正是通过比较地面与空间站的离心力差异，直接检验地球附近的局域马赫效应。因此：

- **补充篇二的盲区（极局域马赫）= 主方案的擅长领域**：

- **主方案的盲区（全域马赫）= 补充篇二的擅长领域**。

两者在检验能力上不是简单的互补，而是**主要可检验空间的互补覆盖**——它们的探测能力之和覆盖了马赫原理主要可检验变体，但极弱耦合模型仍可能逃逸。

二、理论框架：全域马赫原理必然预言惯性各向异性

本节是本提案的理论核心。我们将严格论证：任何基于“惯性源于宇宙物质”这一主张的理论——无论其具体数学形式如何——都必须预言惯性具有方向依赖性。论证建立在两个不可动摇的物理事实之上。本重写稿强调：这是定性必然性论证；定量可测性取决于耦合常数与传播速度。

2.1 事实一：宇宙物质处于运动之中

这是现代宇宙学的观测事实，无需理论假设：

- 太阳系绕银心运动速度：~220 km/s
- 银河系相对于本星系群质心运动：~40 km/s
- 本星系群朝向室女座星系团运动：~300 km/s
- 本星系群相对于宇宙微波背景（CMB）的本动速度：~627 km/s（方向：狮子座）
- 室女座超星系团整体朝向巨引源运动：~600 km/s

宇宙中不存在“绝对静止”的物质。每一团物质——从恒星、星系到星系团——都在参与宇宙学尺度的流动。

2.2 事实二：物理作用的传递速度有限

这是狭义相对论的基石，被一百多年的实验严格验证：任何物理作用的传播速度不能超过光速。如果马赫原理成立——即惯性由宇宙物质通过某种物理过程“赋予”实验物体——那么这一过程也必须遵守因果律。惯性效应的传递速度 c（未必等于光速，但必然有限）。

这意味着：**惯性不是瞬间在场的，也不是凭空产生的。** 一个物体的惯性，必须由宇宙中其他物质通过某种以有限速度传播的物理作用“投射”到它身上。

2.3 两个事实的结合：方向依赖性的必然产生

现在，将两个事实放在一起：

事实一：宇宙物质在运动。
事实二：惯性作用的传播速度有限。

考虑一个位于位置 r’、以速度 v 运动的物质元。该物质元对实验物体处惯性的贡献，以有限速度 c 传递。由于传播需要时间，实验物体在时刻 t “感受”到的，是该物质元在**过去时刻** t’ = t − |r − r’|/c 发出的作用。而在这一时间差内，物质元已经移动了 v • |r − r’|/c 的距离。

关键推论：实验物体感受到的物质元贡献，其方向指向的是物质元的过去位置，而非当前位置。 每一个物质元对惯性效应的贡献，天然携带一个方向向量——从**过去时刻**的施力物质位置指向实验物体。

对于一个由大量运动物质元构成的宇宙，惯性效应是所有这些方向向量的叠加。如果宇宙物质是均匀静止的，这些向量可能因对称性而退化为一个标量。但**宇宙物质在运**

动——太阳系绕银心的运动、银河系朝向巨引源的运动、本星系群相对于 CMB 的本动速度——这些运动使得“过去时刻”的物质分布与“此时此刻”的分布之间存在系统性的方向偏差。

结论：运动的物质 + 有限传播速度 = 惯性效应的方向依赖性不可避免。

一个声称“惯性源于运动中的物质”却同时“严格各向同性”的理论，在物理上是自相矛盾的——它要么假设传播速度无限（违反因果律），要么假设物质绝对静止（违反观测事实）。

2.4 惯性张量—矢量混合场的数学表述

基于以上论证，构建惯性效应的模型类数学表述。本重写稿强调：这是模型类，不是单一模型；系数待测。

2.4.1 静态贡献——惯性张量场

宇宙中每个物质元对实验点 r 处的惯性张量贡献为：

```
T_ij^static(r) = G ∫_宇宙 [ρ(r') / |r − r'|³] · (r_i − r'_i)(r_j − r'_j) d³r'
```

其中 G 为马赫耦合常数，ρ 为宇宙物质密度。该张量是对称的，可进行本征值分解：

```
T = Σ_k=1..3 λ_k · ê_k ⊗ ê_k
```

其中 $\lambda_1 \geqslant \lambda_2 \geqslant \lambda_3 > 0$ 为本征值，ê_k 为相应本征向量。

在太阳系附近，银河系质量分布（McMillan 2011）给出：

- $\hat{e}_1$：大致指向银心方向（盘面内物质密度最高）；
- $\hat{e}_2$：大致指向银盘平面内与银心垂直的方向；
- $\hat{e}_3$：大致指向银极方向（垂直于银盘）。

本征值比值估算：$\lambda_1 : \lambda_2 : \lambda_3 \approx 1 : 0.3 : 0.1$。这是模型类中的一种估计，不是确定预言。

2.4.2 动态贡献——惯性矢量场（动感项）

运动的物质元产生一个类似“电流产生磁场”的矢量场。在最低阶近似下，该矢量与物质流密度 J = ρv 耦合：

```
V_i(r) = (G/c) ∫_宇宙 [J(r') × (r − r')] / |r − r'|³ d³r'
```

其中 c 为惯性作用的传播速度。

2.4.3 离心力修正的完整表达式

对于一个以角速度 ω 绕旋转轴 ω 做半径为 r 的圆周运动的质量块，其瞬时位矢为：

```
r(t) = ρ^cos ωt + τ^sin ωt
```

马赫效应对离心力的修正为模型类：

```
F_c(t) = m ω² r [1 + Σ_k β_k^static (r̂(t)·ê_k)²
                + Σ_l β_l^dynamic (r̂(t)·v̂_l)]
```

其中 β_k 为静态张量耦合系数，v_l 为宇宙物质大尺度运动的主导方向。**β_k、β_l 是待测量，不是预设理论值。**

代入 r(t) 的时域表达式，傅里叶展开：

```
F_c(t) = m ω² r [1 + A₀ + A₁ cos ωt + A₂ cos 2ωt
                + B₁ sin ωt + B₂ sin 2ωt]
```

其中各系数是旋转轴方向 ω 的函数，正是实验要提取的量。

2.5 关键结论

结论一：全指向波动性。 由于 $\lambda_3 > 0$ 且动态项独立于静态项，对于任意旋转轴指向，至少存在一个非零贡献产生波动。宇宙中不存在严格零波动的旋转轴方向。

结论二：物质运动封死了“标量马赫”的逃逸路径。 任何声称“惯性来自宇宙物质”的理论，都必须面对物质运动的物理事实。动态项的存在使得严格的各向同性在逻辑上不可能——除非惯性作用的传播速度是无限的（违反因果律），或者宇宙物质是绝对静止的（违反观测事实）。

结论三：广义相对论无法产生此类信号。 在广义相对论中，惯性是时空的内禀几何属性，不包含来自远方物质运动的方向依赖性。旋转体在真空中做圆周运动时的离心力严格恒定，无论旋转轴指向何方。

结论四：本实验覆盖所有物质起源型马赫理论类。

理论类型	预言波动？	理由	补充篇二覆盖？
广义相对论	否（严格为零）	惯性是时空的几何属性	✅ 零结果→支持 GR
全域张量马赫	是	静态物质分布非各向同性	✅ 直接检验
全域标量马赫（声称）	**是（不可避免）**	物质运动产生动态项	✅ 直接检验
全宇宙均匀贡献模型	**是（不可避免）**	物质运动使“均匀”≠“各向同性”	✅ 直接检验

“标量马赫盲区”被封死。补充篇二的判决力覆盖所有基于物质起源的马赫模型类。本重写稿补充：这里的“覆盖”是定性覆盖；极弱耦合模型仍可能低于阈值。

三、与 Hughes-Drever 实验的本质区分

一个必须前瞻性回应的质疑是：Hughes-Drever 类型的实验已以极高精度（10^{-26} 量级）检验了惯性质量的方向依赖性。如果本实验测到信号，是否与这些结果矛盾？

答案：否。两者检验的是完全不同的物理量。

对比维度	Hughes-Drever 实验	本实验

对比维度	Hughes-Drever 实验	本实验
测量对象	原子核自旋方向	宏观质量块公转运动
物理机制	检验**静止质量**是否随方向变化	检验**旋转运动**中的惯性效应是否随旋转轴指向变化
可观测量	核磁共振频率偏移	离心力时域波动（cos ωt，cos 2ωt）
耦合方式	标量耦合（静质量依赖）	张量—矢量耦合（运动状态依赖）
对动态效应的敏感性	极低（原子核速度 ≪ 宇宙学速度）	高（旋转体的运动学状态直接耦合宇宙物质流矢量）

核心区分：Hughes-Drever 检验的是静止质量的各向同性；本实验检验的是运动物体与宇宙物质流矢量耦合产生的各向异性。 两者在物理机制上完全不同，互不覆盖。Hughes-Drever 的零结果以极高精度排除了静质量的标量各向异性，但无法约束运动状态依赖的动态各向异性——这正是本实验所要检验的。

四、实验方案设计

4.1 为什么必须在深空？

地面实验存在一个原理性的困境——地球引力扮演着无法摆脱的双重角色。

4.1.1 引力的压制效应（旋转平面水平时）

当旋转轴严格垂直于重力方向时：质量块在旋转过程中高度不变，引力势能恒定，不产生周期性力变化。地球引力梯度在水平面内为四极对称，旋转一圈净效应恰好抵消。

结果：引力不产生波动。但任何马赫信号也被“压”在零背景中——测不到波动，不等于马赫信号不存在。

4.1.2 引力的污染效应（旋转平面有任何倾斜时）

当旋转轴存在微小倾斜（与重力方向夹角 $\theta \neq 90°$）时：质量块高度周期性变化，$\Delta h(t) = r \sin\theta \cos\omega t$。引力势能变化直接产生基频 ω 的周期性力：

$$\Delta F_g(t) = mg \sin\theta \cos\omega t$$

即使 $\theta = 0.001°$（$\sin\theta \approx 1.7\times10^{-5}$），当 $\omega^2 r \sim g$ 时，引力波动幅度 $\sim 1.7\times10^{-5}$ mg，远大于马赫效应预期的 $\sim 10^{-6}\, m\omega^2 r$。

4.1.3 地面判决困境

装置状态	引力角色	测量结果	能否判决？
严格水平	**压制**	无波动	**不能。测不到 ≠ 不存在。**
任何倾斜	**污染**	大幅基频波动	**不能。测到的全是引力污染。**

地面不存在“刚好能测”的中间状态。马赫原理既不能被地面实验证实，也不能被地面实验干净地证伪。

4.1.4 L2 点：同时移除压制作和污染

日地拉格朗日 L2 点（距地球约 150 万公里）提供天然微重力环境：

参数	地面	L2 点
有效重力	9.8 m/s²	≈ 0
引力“压制”效应	强	无
引力“污染”效应	强	无
地球引力梯度	~1.5×10⁻⁶ g/m	< 10⁻¹² g/m（降低 10⁶ 倍）

在 L2 点，引力的双重角色同时消失。马赫信号不再被压制，也不再被污染——它可被干净地检验或干净地排除。

4.2 硬件配置

组件	规格要求	说明
离心力测量单元	静电悬浮零位平衡传感器	与主方案技术继承
双轴伺服转台	指向精度优于 0.01°	实现旋转轴全天球自由指向
星敏感器	指向精度优于 1 角秒	提供绝对惯性姿态基准
数据采集系统	采样率 ≥ 20× 旋转频率	捕捉完整时域波形
平台	独立飞行器，部署于日地 L2 点	独立电源、通信、姿控

4.3 全天球扫描策略

阶段	扫描方式	目的
粗扫描	10° 步长扫描全天球（~648 指向）	确定主轴方向和动感项矢量方向
精扫描	候选主轴方向周围 5° 内，1° 步长	精确确定本征值比值和耦合系数
验证扫描	银心、银极、M31、巨引源等关键方向	验证模型类，排除系统误差

每个指向测量不少于 100 个完整旋转周期，确保傅里叶变换频率分辨率足够分离基频和二倍频。

4.4 信号分析流程

步骤一：直流分析。 提取每个指向的离心力时间平均值 $\bar{F}(\omega)$，构建全天球均值分布图。

步骤二：交流分析。 对每个指向的时域数据做傅里叶变换：

$$\mathrm{FFT}\{F_c(t)\} \to A_1(\omega),\ A_2(\omega),\ \phi_1(\omega),\ \phi_2(\omega)$$

步骤三：全局拟合。 用张量—矢量混合模型类同时拟合全天球所有指向的傅里叶系数，提取：

- 静态参数：β_1，β_2，β_3 和 $\hat{e}_1$，$\hat{e}_2$，$\hat{e}_3$；
- 动态参数：$\hat{\beta}_{\mathrm{dynamic}}$ 和 v；
- 耦合常数：α 和传播速度下限 c。

4.5 系统误差排除策略

措施	目的
改变质量（±50%）	马赫效应与质量成正比；仪器噪声与质量无关
改变半径（±30%）	马赫效应与半径成正比
改变频率（±20%）	马赫波动频率锁定旋转频率；非同步信号为仪器伪迹
地面同款装置复测	若信号来自宇宙，地面测不到（被引力压制/污染）；若来自仪器，地面可复现
交换传感器位置	消除传感器固有方向性偏差
在轨自校准	验证灵敏度未因空间环境漂移
盲分析	数据分析时隐藏指向信息，排除主观偏向

4.6 精度目标与分阶段科学产出

阶段	精度目标（ΔF/F）	科学意义
第 1 年	$< 10^{-5}$	覆盖朴素全域马赫模型（效应 $\sim 10^{-4}$ 至 10^{-5}）
第 3 年	$< 10^{-7}$	检测本星系群等更微弱的方向性效应
远期	$< 10^{-10}$	终极约束——与 Hughes-Drever 精度形成互补

五、完整判决逻辑矩阵

结合主方案与补充篇二的实验结果：

天地对比	深空扫描	唯一物理结论（加三重限定后）
零差异	全指向无波动	**广义相对论绝对时空观获得空前支持。** 在精度以上排除可测的局域梯度与方向调制，给出 α、β_k、β_1 的上限；不能“终极排除所有马赫型理论”。
零差异	全指向均有波动，符合模型类	**全域马赫原理成立。** 人类首次直接测量到宇宙物质分布和运动对局域惯性效应的方向性贡献。广义相对论的核心假设需根本性修正。需独立复现与系统误差排除。
零差异	有波动但不符合模型类	可能存在未知系统误差，或马赫原理以未预料的形式起作用（需重新分析）。
非零差异	任何模式	**局域马赫效应存在。** 进一步分析局域与全域贡献的相对比例。需系统误差排除与独立复现。

无论结果落在哪一格，都得到唯一、无简并的物理诠释——前提是达到设计精度、独立复现、系统误差排除。

六、三步检验架构的完整图景

6.1 为什么必须有三步？

三步架构不是数量的堆砌，而是逻辑的必然。

第一步（地面海拔梯度）是基础。 以最低成本验证装置可行性，建立地面基线。若测到与海拔同步的可逆变化，极近地马赫效应被确证——这是最高性价比的“探路”。

第二步（空间站天地对比）不可替代。 直接回答：地球这个具体天体是否贡献惯性？这是检验局域马赫的唯一直接方法。若结果非零，局域马赫成立，任务完成。若结果为零，局域马赫被排除——但问题未终结，因为全域马赫的可能性仍然存在。

第三步（L2 点深空扫描）同样不可替代。 当第二步得到零差异时，第三步是打破“GR vs 全域马赫”解释简并、并绕过“探测范围悖论”的唯一手段。其原理是：不通过空间位移（位移太小），而通过方向变化（对远处物质的敏感度与距离无关）来探测。

三者检验的物理量是正交的：

层次	实验	检验对象	原理	可替代性
第一层	地面海拔梯度	极近地短程效应	空间位移（千米级）	验证装置
第二层	空间站天地对比	近处（地球尺度）	空间位移（百千米级）	**不可替代**
第三层	L2 点多轴指向	远处（宇宙尺度）	方向变化（原地转动）	**不可替代**

6.2 决策树

```
地面先导实验
├── 测得正信号 → 极近地马赫成立 → 公开异常 → 推进空间站实验
└── 零结果
    └── 空间站天地对比
        ├── 测得非零差异 → 局域马赫成立 → 任务完成
        └── 零差异 → 局域模型排除 → 启动 L2 点深空扫描
            ├── 测得波动 → 全域马赫成立 → 范式革命
            └── 零波动 → GR 绝对时空 → 马赫原理被排除（在精度以上）
```

6.3 经费独立性

阶段	地点	科学目标	经费来源
第一步	地面（海拔梯度）	验证装置、建立基线	本次申请
第二步	空间站（天地对比）	检验局域马赫模型	本次申请
第三步	L2 点（深空扫描）	区分 GR vs 全域马赫	另行独立申请

补充篇二所述深空实验为独立远期项目，经费不纳入当前空间站任务申请。当前立项范围仅限于第一步和第二步。本补充篇二的功能，是展示完整科学目标的逻辑闭环——让评审专家理解当前申请的实验在更大科学图景中的不可或缺地位。

七、科学史定位

本实验体系的完整执行，将产生两种可能的科学史级成果。

场景一：全域马赫原理被证实

如果深空扫描发现离心力各向异性波动，且结构符合张量—矢量混合模型类：

- **人类首次直接测量到宇宙物质对局域惯性效应的贡献**；
- 广义相对论关于“惯性是绝对时空属性”的核心假设需根本性修正；
- 马赫长达 140 年的哲学思辨获得实证支持；
- 开启“马赫物理学”全新研究领域；
- 与牛顿力学、麦克斯韦电磁学、狭义相对论、广义相对论、量子力学并列的基础物理范式革命；
- 产生一种全新的宇宙观测手段——通过局域惯性测量来探测宇宙物质分布和流动。

场景二：全域马赫原理被严格排除

如果深空扫描全指向无波动，且精度达到 10^{-7} 甚至更高：

- **所有基于“惯性源于物质”的马赫型理论类被严格排除**（在精度以上可测的方向调制型模型）；
- 广义相对论的绝对时空观获得其历史上最强有力的实验支持；
- 惯性起源问题被从物质相互作用领域彻底移出，转向时空几何或量子引力；
- 与迈克尔逊—莫雷实验（1887）并列的科学史事件——一个长期存在的理论可能性被严格排除；
- 为基础物理划定明确边界：“不必再在物质贡献的方向上寻找惯性起源”；
- 释放大量可能被投入马赫模型研究的理论物理资源。

两种结果，同一特征

无论结果如何，这都符合**判决性实验**的本质特征：**结果未知，但无论结果如何，都推动认知边界。**

这正是本提案体系最值得支持的根本理由：它不是一次性的“博彩式”探索，而是一条无论结果如何都能产出科学史级成果的确定性路径。本重写稿补充：这里的“确定性”是条件句中的确定性——前提是各实验达到设计精度并独立复现；若出现正信号，先作为“待解释异常”。

八、结论

本补充篇二提出了一种能够在**广义相对论**与**全域马赫原理**之间做出唯一判决的实验方案。

双重必要性： 主方案面临两个独立且都无法通过提高精度来解决的困境——（1）解释简并：GR 与全域马赫对天地零差异给出相同预言；（2）探测范围悖论：主方案灵敏度随作用范围增大而原理性衰减，对全域马赫完全失明。补充篇二通过从“测梯度”转向“测方向”，同时破解了两个困境。

核心理论贡献： 我们指出，任何基于“惯性源于宇宙物质”的理论都必然预言惯性具有方向依赖性。这一结论建立在宇宙物质运动与物理作用传播速度有限这两个不可动摇的事实之上。运动的物质与有限传播速度的结合，使得严格的各向同性在逻辑上不

可能。“标量马赫”的逃逸路径由此被封死——本实验覆盖所有物质起源型马赫理论类。本重写稿补充：这是定性覆盖；极弱耦合模型仍可能低于阈值。

实验方案： 在 L2 点微重力环境中进行全天球扫描，测量离心力的各向异性波动，用惯性张量—矢量混合模型类拟合数据。深空环境是必要的——地面实验中，地球引力要么“压制”信号（水平时），要么“污染”信号（倾斜时），无法做出干净判决。

判决能力：

- 全指向均有波动，结构符合模型类 → 全域马赫原理成立。范式革命。
- 全指向无波动（在精度内） → 广义相对论绝对时空观获得空前支持。所有马赫型理论类被严格排除（在精度以上可测的方向调制型模型），并给出 β_k、β_l 的上限。

体系定位： 本方案与地面先导实验（补充篇一）和空间站天地对比（主方案）共同构成递进式三层检验架构——从局域到全域、从静态到动态、从探路到终极判决。

无论结果如何，这将是人类对“为什么物体会抵抗加速”这一千古难题，给出的第一个基于实验的、而非基于先验假设的答案。

参考文献

1. Mach, E. (1883). *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development.* Open Court.
2. Einstein, A. (1916). “The Foundation of the General Theory of Relativity.” *Annalen der Physik*, 49, 769–822.
3. Bondi, H., & Samuel, J. (1997). “The Lense-Thirring Effect and Mach’s Principle.” *Physics Letters A*, 228, 121–126.
4. Touboul, P., et al. (2017). “MICROSCOPE Mission: First Results of a Space Test of the Equivalence Principle.” *Physical Review Letters*, 119, 231101.
5. Everitt, C. W. F., et al. (2011). “Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity.” *Physical Review Letters*, 106, 221101.
6. McMillan, P. J. (2011). “Mass models of the Milky Way.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414, 2446–2457.
7. Hughes, V. W., Robinson, H. G., & Beltran-Lopez, V. (1960). “Upper Limit for the Anisotropy of Inertial Mass from Nuclear Resonance Experiments.” *Physical Review Letters*, 4, 342.
8. Drever, R. W. P. (1961). “A search for anisotropy of inertial mass using a free precession technique.” *Philosophical Magazine*, 6, 683–687.
9. Will, C. M. (2014). “The Confrontation between General Relativity and Experiment.” *Living Reviews in Relativity*, 17, 4.
10. Planck Collaboration (2020). “Planck 2018 results. I. Overview and the cosmological legacy of Planck.” *Astronomy & Astrophysics*, 641, A1.

11. Bergmann, E., et al. (2018). “On-orbit identification of spacecraft inertia parameters: A review.” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 41(5), 1023–1038.

12. Titterton, D. H., & Weston, J. L. (2004). *Strapdown Inertial Navigation Technology*. 2nd ed. IET.

补充提案撰写人：罗星壹 • 日期：2026 年 8 月 10 日

实验矩阵总结

本实验方案由主提案、补充篇一与补充篇二构成一个递进式判决矩阵。三者不是重复测量，而是测量逻辑正交互补。

主提案测“空间梯度中的局域效应”：地面与空间站对比，检验局域物质背景是否改变无量纲旋转系数

$$\chi_c = F_{cent} / (m_{ref} \cdot \omega_{ref}^2 \cdot r_{geom})$$

$$k = \ln(\omega_2/\omega_1) / \ln(r_1/r_2)$$

补充篇一测“近地梯度中的可逆性”：海平面与高山站之间低—高—低往返，以低成本探路，检验旋转响应是否随局域引力势呈现可逆变化。

补充篇二测“方向各向异性”：在 L2 点改变旋转轴指向做全天球扫描，检验离心力是否存在由宇宙物质运动与有限传播速度共同导致的方向调制。

主提案与补充篇一属于“测梯度”，灵敏度依赖位移与作用范围之比；补充篇二属于“测方向”，灵敏度不依赖空间位移大小。二者盲区互补：局域马赫模型在 L2 可能信号太弱，由主方案覆盖；全域马赫模型在天地对比中梯度太小，由补充篇二覆盖。因此，三文件在逻辑上构成正交判决矩阵，而非简单叠加。

关键推论：因为测量逻辑正交，精度不需要无限制追求下去。主方案测的是空间梯度，马赫作用范围越大，空间梯度越平缓，主方案所需精度越高，且存在原理性天花板——当作用范围扩展至宇宙学尺度时，天地差异趋近于零，再提高精度也测不到。但这不意味着必须把主方案精度推到极限，因为补充篇二接替的正是主方案精度失效的那段作用范围：主方案只需达到“覆盖局域到中等作用范围”的设计精度，剩余更大作用范围的理论空间由补充篇二的方向扫描负责。两者在精度需求上形成分工：主方案管“近处梯度”，补充篇二管“远处方向”；主方案不需要无限提精度，只要做到其擅长区间的判决力，剩下的交给正交的另一半。

判决逻辑可以压缩为一句话：

> 如果“惯性源于宇宙物质”这一最原始版本的马赫原理是错误的，那么局域实验应无空间梯度，深空扫描应无方向调制；在实验达到设计精度并独立复现的条件下，正交矩阵的联合零结果将必然收敛到同一最终结果——在实验精度以上排除物质起源型马赫模型类的主要生存空间，并给出模型类参数 α、β、β_k、β_1 的上限。

需要保留的限定是：这里的“必然”是条件句中的必然——前提是原始版本错误，且各实验达到其设计精度并完成独立复现。若出现正信号，则先作为“待解释异常”，经系统误差排除和独立复现后，再讨论其理论含义。先发权靠公开数据与可复现分析，不靠“宣告验证成功”。

一句话：主方案与补充篇一测局域梯度，补充篇二测全域方向；两者正交，覆盖马赫原理从局域到全域的主要可检验空间。正因为正交，精度不必无限追求——主方案做到其擅长区间的判决力即可，更大作用范围交由补充篇二的方向扫描。若原始版本错误，达到各自设计精度后的联合零结果就是最终判决；若出现异常，则矩阵同样给出明确的复核路径。

本重写稿的方法论说明：为何不提供单一马赫模型，但提供模型类

1. **马赫原理没有标准模型。** 马赫 1883 年只有定性命题，没有场方程、作用量或耦合常数。Sciama 模型、Brans–Dicke 马赫项、Lense–Thirring/引力磁解释、Christillin 解释、惯性张量—矢量现象学模型，预言不同，甚至符号相反。押注单一模型会被现有约束绑死，也会被评审追问“为什么不是另一个”。
2. **类比迈克尔逊—莫雷。** 该实验没有预设以太动力学模型，而是检验一般性预言“是否存在可观测以太漂移”；零结果排除一大类以太模型。本方案用 $x = 1$、$k = 2$ 做同样的一般性检验。
3. **数据驱动，先看再建模。** 三层矩阵先测 $x(h)$、$x(\omega)$、k，再回头找函数形式。补充篇一明说“实际函数形式未知，这正是本实验要测量的核心内容”。
4. **但模型无关不等于无判决力。** 完全不给模型类，零结果排除范围不清、非零结果无法归因、评审会问备择假设。因此本重写稿补上模型类参数化：

```
χ = 1 + α · g(背景)

k = 2 + β · g(背景)
```

5. $g \in \{\Phi/c^2,\ \delta\rho/\rho,\ \omega,\ \bullet v,\ _CMB,\ \cdots\}$，$\alpha$、$\beta$ 待测。这样零结果给上限，非零结果给测量值，理论家可以使用，实验仍不押注单一模型。

6. **一句话：不提供单一模型，是因为马赫原理没有标准模型、且硬给模型会被现有约束绑死；但提供模型类参数化，既保留一般性，又让零结果和非零结果都可被理论使用。**