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，太空中的惯性效应应弱于地面。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，来寻找惯性效应随“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。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），每个方案都能单独验证马赫原理，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。**

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，那么在太空测得的惯性效应应当弱于地面。这是本实验最基本的判决逻辑。

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：物体的惯性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：宇宙物质对惯性的贡献是均匀的（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惯性的贡献是均匀的，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，惯性效应应无明显变化。在此框架下，天地惯性差异极小，远低于现有技术的探测能力。
- **局部天体主导模型**：如果物质对惯性的贡献随距离衰减（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

近物体的惯性起主导作用。在这种情况下，从地面到太空，惯性效应将发生显著变化。其具体变化幅度取决于理论模型的具体形式——例如，若惯性效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。

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，可能对附近物体的惯性效应起主导作用，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惯性效应的主导贡献，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。

马赫原理的核心预言：如果地球对附近的惯性效应起主导作用，那么当物体进入太空（更接近“空宇宙”）时，其惯性效应应当减弱。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 $\tau = I \cdot \alpha$。这个设计隐含了一个假设：惯性效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惯性效应确实减弱，那么情况将发生变化：

- 航天器的惯性效应减弱，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（因为它不知道惯性变了）。
- 结果：实际作用于航天器的力矩 τ 相对于其变小的惯性需求而言过大，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惯性需求相匹配。这正是航天工程实践中普遍发生的情况。

反过来说，如果惯性效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（惯性减弱导致需降低力矩）完全一致。这是一个强有力的间接线索。

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

7

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

8

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——局域物质影响惯性的直接证据

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

6

。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**惯性本身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惯性起主导作用，那么当物体远离地球时，惯性效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，一个是惯性本体的构成来源。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实证支持。Everitt 等在《Physical Review Letters》上发表的最终结果论文

6

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**（with its subtle connections to gravitomagnetism and Machs principle）。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**。

进一步的理论分析深化了这一联系。根据 Christillin 的论文

9

，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。

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。而本实验探索的是惯性本身的起源——如果马赫原理成立，地球作为最近的大质量天体，其对惯性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，地球对惯性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. 惯性力大小变化），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。

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。如果地球对惯性力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惯性绝对值的影响（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”这一大方向的重要里程碑。

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惯性效应的主导贡献？

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

   78

   ，且这种差异恰好与马赫原理预期的方向一致——太空中的惯性效应似乎弱于地面，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

   6

   ——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：**惯性效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、能够直接测量惯性效应绝对值随环境变化的实验才能回答。

在明确了局域物质可能影响惯性之后，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惯性效应绝对值随环境变化的实验。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，符合哪种理论预期？

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，将证实强马赫原理，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（相对于地球）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产生的惯性效应减弱”，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，而本实验检验的是惯性效应的绝对值是否随环境变化。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惯性效应差异，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，惯性效应完全消失（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，太空中的惯性效应应弱于地面。
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（或惯性为固有属性的零假设）；
    - 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。

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。

三、实验方案总览

本实验共设计三个相互独立的测量方向，每个方向都能单独验证马赫原理：

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，直接反映惯性大小。
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。
3. **角动量守恒效应测量方案（辅助方案）**：通过改变转动惯量观察角速度变化，检验惯性抵抗变化的能力。

三个方案均遵循同一逻辑：**在太空（更接近“空宇宙”）测得的惯性效应应弱于地面。**

四、离心力测量方案（核心方案）

4.1 物理原理

离心力公式为：$F_{\text{cent}} = m\omega^2 r$，其中 m 为测试物体质量，ω 为系统的旋转角速度（相对于地球参考系），r 为物体距离旋转轴的半径。

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 地面太空地面太空$F_{\text{cent,地面}} = F_{\text{cent,太空}}$。

- **备择假设（马赫原理）**：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 太空地面太空地面$F_{\text{cent,太空}} < F_{\text{cent,地面}}$。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）→ 支持“全宇宙均匀主导”模型；
    - 若差异显著（如百分之几）→ 支持“局部天体主导”模型。

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。

- **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 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 $\delta = (F_{\text{orbit}} - F_{\text{ground}})/F_{\text{ground}}$。

4.5 独立验证性说明

本方案直接测量离心力，是惯性效应的最直接表现。若天地离心力存在显著差异，即可独立证明马赫原理，无需依赖其他测量。

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：$F_{\text{cor}} = 2m\omega v_r$，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。

5.2 判决逻辑

- **零假设**：地面太空地面太空$F_{\text{cor,地面}} = F_{\text{cor,太空}}$。

- **备择假设（马赫原理）**：太空比地面更接近“空宇宙”，应有 太空地面太空地面$F_{\text{cor,太空}} < F_{\text{cor,地面}}$。 差异幅度同样用于区分贡献模型。

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 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 F_{cor} 差异。

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）

6.1 物理原理

角动量守恒定律表述为 常数常数 $L = I\omega$ = 常数，其中转动惯量 $I = mr^2$。当旋转半径 r 变化时，角速度 ω 相应变化：$\omega_2/\omega_1 = r_1^2/r_2^2$。

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 地面太空地面太空$(\Delta\omega)_{\text{地面}} = (\Delta\omega)_{\text{太空}}$。
- **备择假设（马赫原理）**：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 太空地面太空地面$(\Delta\omega)_{\text{太空}} < (\Delta\omega)_{\text{地面}}$。

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：

太空地面

太空地面

$$(\omega_2/\omega_1)_{\text{太空}} > (\omega_2/\omega_1)_{\text{地面}}$$

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。差异幅度同样用于区分贡献模型。

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 $(\omega_2/\omega_1)_{\text{ground}}$。
    - 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 $(\omega_2/\omega_1)_{\text{orbit}}$。
3. **比较分析**：
    - 计算差异 $\Delta = (\omega_2/\omega_1)_{\text{orbit}} - (\omega_2/\omega_1)_{\text{ground}}$。
    - 若 $\Delta > 0$ 且统计显著，则支持马赫原理。

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：太空地面太空地面$(\Delta\omega)_{\text{太空}} < (\Delta\omega)_{\text{地面}}$，或等价地 太空地面太空$(\omega_2/\omega_1)_{\text{太空}} > (\omega_2/\omega_1)_{\text{ground}}$。

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惯性。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。

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。

误差源	影响估计	控制措施	残余影响
角速度不一致	$\Delta\omega/\omega = 0.1\% \rightarrow 0.2\%F$	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	$\Delta r/r = 0.01\% \rightarrow 0.02\%$ 影响	激光干涉测距 + 闭环控制	<0.01%
初始角速度差异	0.1% → 0.1% 影响	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：

- 若实验测得的天地惯性差异 **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惯性的影响，支持“全宇宙均匀主导”模型（或惯性为固有属性的零假设）；
- 若实验测得的天地惯性差异 **大于 0.2%**（统计显著），则表明惯性效应确实依赖于局域物质分布，支持“局部天体主导”模型。

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，即可确认强马赫原理成立；若小于探测阈值，则在该精度以上证伪局域主导模型。这一设计保证了实验的判决性。

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（天地惯性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，惯性效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。

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，表明惯性效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，测量天地惯性差异，并根据测量结果对所有类型的马赫原理模型（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（观测到显著的天地惯性差异）

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），都意味着强马赫原理成立——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惯性效应随环境变化，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 *78* ；
- 马赫关于“空宇宙中无惯性”的极端思想实验得到间接的实验支持。

在确认强马赫原理成立的基础上，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：差异与特定理论模型的预期相符

若测量值与某一理论模型的预言相符（例如，若惯性效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），则可确认该理论模型的有效性。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理论预期

若差异存在，但其数值与现有理论模型的预言不符，则表明惯性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“强马赫原理成立”这一核心结论的革命性意义。

注：差异幅度“6.7%”仅为基于“惯性效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）测量天地惯性差异，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惯性效应都应严格相同。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。

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 m^3，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，太空中的惯性效应应弱于地面。

实验的核心科学问题进一步细化为：物质对惯性的贡献是“全宇宙均匀主导”还是“局部天体主导”？通过测量天地惯性差异的大小，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。

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），每个方案都能单独验证马赫原理，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。

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证伪强马赫原理，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，都意味着强马赫原理成立，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 Machs 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.

提案人：罗星壹

零，不记入正文的特别篇章：

这里有一把理解文档逻辑的钥匙：【马赫原理本质是马赫从“水桶实验出发得出旋转是相对的”这一结论!

本实验矩阵测量的对象就是旋转是否相对，并不是一定需要涉及质量 m】

有太多人在阅读本实验时把实验测量对象理解成是测质量 m 了，实际测量对象是旋转的相对性!

我实际上已经把这一点写进 2.6 节里了，但仍然还是会有阅读者搞错，这部分写进正文依然如此，所有我干脆写个特别篇幅重点提示这把逻辑钥匙

具体原因我分析过!

马赫原理可以分为原始版本和爱因斯坦的拓展版本，马赫原理原始版本对应的是水桶实验，就是我这个实验矩阵要测量的，爱因斯坦拓展版就是提到的等效原理等实验涉及这一部分领域!

我这这个文件和后续俩个补充篇，往往总会被认为是在测量爱因斯坦版的马赫原理，这点我也很无奈，所以我设计了一个逻辑钥匙：

马赫原理不是“质量从哪来”，而是“旋转相对于谁