

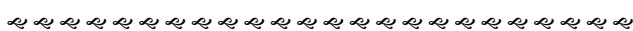
牛顿旋转水桶实验证明了什么

郭应焕 郭振华 郭 巍

近来看到一些广泛流行的图书与资料，他们强调了唯有牛顿绝对时空观才是正确的观点；并且人们通常认为牛顿的旋转水桶实验证明了牛顿绝对空间的存在。本文将指出，这些观点与看法可能是错误的，值得商榷与澄清。正如资深物理学教授沈致远先生所指出的：“这是 300 多年来物理学中的一个基本问题，触及物理学之根本”，因此，讨论并评述牛顿旋转水桶实验将是很有意义的，有必要重新评价牛顿的旋转水桶实验。本文将简要回顾并评述了牛顿的经典力学、牛顿旋转水桶实验、马赫原理及其实验检验、爱因斯坦与马赫原理，最后特别指出，牛顿旋转水桶实验的结果，严格证明了在惯性参考系中相对性原理是绝对成立的。

一、牛顿的经典力学回顾

牛顿（1642—1727）在他的经典力学中，不但提出有重物质实体，还首次提出了绝对空间实体(AS)和绝对时间(AT)概念。他认为，AS 是一个均匀连续的，独立存在的，静止而无限的三维欧几里得几何空间，AT 是在 AS 各处同步均匀的，定向流逝的，独立存在的一维直线，称(AS,AT)为绝对静止参考系。相对于(AS,AT)做匀速直线运动的参考系(S,AT)称相对参考系。有重质点 m 的独立实体，在(AS,AT)中的逐点迁移称为质点的绝对运动，在(S,AT)中的逐点迁移称相对运动。牛顿发现，在(AS,AT)和(S,AT)中， m 有一个特性：当没有外部作用时，静止的 m 永远静止，做匀速直线运动的 m 永远做匀速直线运动。把这个特性称为 m 的惯性， m 的这种运动称惯性运动，并因此把(AS, AT)和(S, AT)称为惯性参考

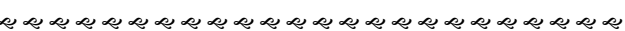


你不吃我，我就不侵犯你，是一种安于现状的思维；而“虎”的思维却是，只要你不吃我，我就要吃你，也就是一种主动出击的、创造性的思维，有怀疑就会提出来。多数的大学生在大学物理的学习中只满足于老师教授的那部分知识，而不能主动提出问题，想办法解决。出现这种状况，教师有着不可推卸的责任，这就要求我们在教授知

系， m 具有这个特性的结论叫惯性定律(牛顿第一定律)。这是人类认识的第一次大飞跃，它把人们从“走得快时费力大”的经验，而认为力与速度有关的概念彻底推翻。牛顿进一步把改变 m 的惯性运动状态的外部作用称为力 F ，当 m 确定时， F 与速度随 AT 的变化率(加速度 a)成正比，这即经典动力学定律(牛顿第二定律) $F=ma$ 。因为 $F-ma=0$ ，就把 $-ma$ 叫 m 的惯性力， ma 和 F 的方向相反，数值相等，就把 $-ma$ 叫相对于 F 的反作用力(牛顿第三定律)。把 m 称惯性质量，它是质点惯性大小的度量。从此牛顿完成了他的经典动力学，与他发现的万有引力定律，合称经典力学。

二、牛顿旋转水桶实验

在完成了经典动力学后，牛顿发现这个体系是不完备的。因为当任一个参考系(S,AT)中惯性定律成立时，这个参考系一定是相对惯性参考系。通过运动学的速度合成法则，全部相对惯性参考系{(S,AT)}便可建立，但是作为{(S,AT)}标准的绝对静止参考系(AS,AT)却不能先验的建立。于是他设计了一个旋转水桶实验，用以证明(AS,AT)存在。实验开始，使水桶顺时针旋转，当桶壁顺时针旋转时，以桶壁作参考系，水相对于桶壁是反时针旋转，水面应当在桶壁参考系中旋转水的离心力的作用下，其中心下凹。然而在实验开始时桶中水面却是平的，当桶继续旋转时，由于水被桶壁带动旋转，它相对于转动的桶壁显出趋于静止，而水面却会逐渐下凹。他把这个结果解释为：实验开始时，水虽相对于桶壁在旋转，但相对于绝对静止参考系是静止的（流



识的同时给他们留下提出问题的余地，介绍前沿知识及正在发展中的领域，比如纳米材料、天文学、核聚变等，使他们具有“虎”的思维，产生对科学探索的向往和追求，并且具有一定的方向性。

（合肥解放军炮兵学院基础部物理教研室 230031）

体水还没有被桶壁带动起来),所以水面是平的。当桶壁继续旋转时,由于水的黏滞性,它会被旋转的桶壁带动起来,相对于绝对静止参考系水进入旋转状态。因此在相对于绝对静止参考系旋转的离心力作用下,水面中心会向下凹,从而证明了绝对静止参考系(AS, AT)的存在。牛顿得到的答案是:存在绝对空间。

三、马赫原理

对牛顿绝对空间的第一个建设性批评来自两百年后奥地利的物理学家和哲学家马赫(1838—1916)。马赫在他1883年出版的《力学史评》一书中对牛顿的绝对空间和绝对运动作了深刻的批评,马赫不同意牛顿对旋转水桶实验的解释,他认为不存在独立的绝对静止空间。对旋转水桶实验,他认为在实验开始时水由于惯性而保持静止,水桶继续旋转时,它的黏滞力克服惯性力使水也旋转起来,这时水受到的离心力导致水面下凹。水的惯性是整个宇宙物质的引力作用在水上所造成的,“如果使桶壁越厚越重,达到几英里厚时,就没有人能说出这实验会得出什么结果”。牛顿的绝对静止参考系中的物质惯性,被马赫用宇宙的全部质量(恒星坐标系)对局部物质的作用所导致的物质惯性代替,即任一物体的惯性是受宇宙中所有其他物体作用的结果(马赫原理)。

四、马赫原理的实验检验

Haghes 实验 这个实验的原理是,按马赫原理,地面物体的惯性质量 m 应来自两部分:一部分来自宇宙的整体影响,这个影响是各向同性的;一部分来自银河系的影响,这部分是各向异性。利用核磁共振仪测量 m 的各向异性值 δ_m , 结果是: $\delta_m/m < 10^{-20}$ 。这样的实验精度都没有显示马赫原理影响的存在。

Ivash 实验 这个实验是通过水星轨道进动来测定的,得出 $\delta_m/m < 1.57 \times 10^{-10}$ 。这个结果也不支持马赫原理。

五、马赫原理的历史变迁

爱因斯坦(1879—1955)在广义相对性(广义协变)原理、等效原理、马赫原理的基础上建立了广义相对论。爱因斯坦曾强调“坚持这个原理(马赫原理)的必要性,绝不是一切专业工作者都赞同的,然而我感到,要使这条原理得到满足,那是绝对必要的。根据 C (即马赫原理)按照引力(G)场方

程,没有一个 G 场是可以没有物质的。显然,公设 C 紧密的和整个宇宙的时空结构相联系,因此宇宙的全部质量都要参与 G 场的产生”(参见《爱因斯坦文集》第一卷)。然而,马赫原理导致了广义相对论中的二律背反:马赫原理认为建立在质量越重的物体上的参考系越接近惯性系;而广义相对论给出越接近质量越重的物体,时空越弯曲,远离物体的真空空间才越接近惯性系。因此爱因斯坦后来否定了马赫原理在广义相对论中的作用。

六、牛顿旋转水桶实验对相对性原理的证明

牛顿为了证明他的绝对静止参考系存在,设计了旋转水桶实验;为解释实验结果,出现了如上所述的巨大争议。这表明上述解释都可能是错误的,一个简明的解释是:不管水桶处于哪个惯性参考系,如地面上、匀速直线运动的船上或火车上……相对于选定的这个惯性参考系,水桶静止时水面是平的。当水桶(壁)开始顺/逆时针旋转时,水面是平的,这表示由于水的流体性,水没有被桶壁带动,而是在原来选定的惯性参考系中,继续保持惯性静止状态。随着水桶的持续转动,水面逐渐下凹,这表示转动的桶壁通过黏滞力作用,改变了水原来相对于开始选定的惯性系的惯性静止状态,水相对于惯性参考系也顺/逆时针转动起来,相对于所在的惯性参考系的离心力使水面凹下(严格地说,由于旋转物理系统中,当质点具有不平行于转轴的速度时,会出现科里奥利力,影响水面下凹的形状细节)。因此,牛顿旋转水桶实验的结果,严格证明了在惯性参考系中相对性原理绝对成立,牛顿水桶实验没有证明绝对空间的存在,这个实验实质上证明了空间的相对性。

(郭应焕,北京中国科学院高能物理所100049;郭振华,陕西宝鸡文理学院物理与信息技术系721007;郭巍,美国盐湖城犹他大学计算机系)

