

惯性、惯性定律和惯性参照系

张正华

(zhangzhsec@126.com)

摘要: 分析伽利略、牛顿、朗格等人对惯性、惯性参照系的阐述, 剔除其中不合理的内容, 分析牛顿力学定律的适用条件, 认为: 惯性是物体保持原来运动状态的能力。在不给物体施加新的作用力时, 物体保持原来的运动状态。而物体原来的运动状态是变速运动。惯性参照系就是能将被研究物体在特定力的作用下的运动从原来的变速运动中单独析出的参照系。如果力 f 作用于被研究物体而不作用于参照物体, 而且 f 之外的其他作用力不使两者产生相对运动, 或可以产生相对运动但能以合理的方式剔除, 则在此时考察被研究物体在力 f 作用下的运动规律, 固定于该参照物体的参照系就是惯性参照系。

关键词: 惯性; 惯性定律; 惯性参照系

Inertial, Inertial Law and Inertial Reference System

ZHANG Zheng-hua

Abstract: Analyze the explanation of inertial and inertial reference system by Galileo, Newton, Lange and so on, remove the unreasonable content, analyze the applicable conditions of the laws of Newtonian mechanics, think that: Inertial is the object's ability to keep the former motion state. The object will keep its former motion state without new forces acting on it. And the object's former motion state is variable motion. Inertial reference system is the reference system which can separate the motion of the object being studied under specific force out alone from the former variable motion state. If the force f acts on the object being studied rather than the reference object, and the other acting forces besides f don't cause relative motion of them, or may cause relative motion but can be removed by reasonable ways, then under this condition observe and study the motion law of the object being studied under the force f , the reference system fixed on the reference object is inertial reference system.

Keywords: inertial; inertial law; inertial reference system

1 引言

1632 年伽利略就提出了惯性问题。1687 年, 牛顿在《自然哲学之数学原理》中对惯性进行了阐述, 并提出了包含惯性定律在内的牛顿力学三定律。300 多年来, 牛顿力学理论取得了巨大的成功。但是, 针对牛顿对惯性所做的阐述, 和牛顿确立的惯性定律, 无论当时还是后世, 均有人对其合理性提出质疑。此外物理学认为, 牛顿力学定律只在惯性参照系内成立。但是, 惯性参照系究竟是什么, 物理学尚没有给出确定的回答。本文希望对这些问题进行讨论并给出一种说明。

2 惯性和惯性定律

对于惯性, 牛顿认为它是物体“固有的力”, 这种力使物体保持“现有的状态, 或是静止, 或是匀速直线运动”。^[1] 现在一般把惯性表述为“物体保持静止或匀速直线运动状态的性质”^[2]。对于惯性定律也就是牛顿力学第一定律, 牛顿的表述是^[3]: “每个物体都保持其静止或匀速直线运动的状态, 除非有外力作用于它迫使它改变那个状态。” 惯性定律是牛顿力学理论的逻辑基础。

但是, 不受力时物体保持静止或匀速直线运动, 这只是按照特定逻辑进行的推理, 无法证实, 也无法证伪。如在宏观领域, 因为引力无处不在, 因此真正不受力的物体并不存在, 我们无法知道不受力的物体将有怎样的运动状态。正确的认识应该是: 一个物体不受力, 在它周围一定没有物质堆积, 也就没有参照物,

物体也就没有运动状态。这一点，早已为后世的研究者指出。在牛顿时代，也已经有贝克莱对这一点提出批评。他认为^[4]：“要设想运动，至少应想到有两个物体的距离和位置是有了变化的。因此，如果只有一个物体存在，则它干脆就不能运动。”

基于自己的实验，伽利略认为在水平面上，“任何速度一旦施加给一个运动着的物体，只要除去加速或减速的外因，此速度就可保持不变”^[5]。但是这只是物体的运动距离与地球半径相比极小时的近似。如果该水平面足够长，物体持续运动下去，地球的引力在该水平面上的分力将会使运动物体停下来。如果认为地球的引力也应列在“加速或减速的外因”之内，设想除去，则该物体仍会处在太阳的引力场内，该物体的速度仍无法保持不变……而事实是，根本无法让地球的引力消失。在提出惯性定律后牛顿又进一步阐释到^[6]：“抛射体如果没有空气阻力的阻碍和重力向下牵引，将维持射出时的运动。……行星和彗星一类较大物体，在自由空间中没有什么阻力，可以在很长时间里保持其向前的和圆周的运动。”与上文的问题一样，地球和太阳的引力不可能消失，进一步来自其他恒星、来自银心的引力也不可能消失，抛射体、行星和彗星不可能沿直线向前运动。

爱因斯坦是这样表述的^[7]：“经典力学是从下述定律出发的：离其他质点足够远的质点继续作匀速直线运动或继续保持静止状态。”这是指其他质点足够远作用力极微，因此可以认为其作用力为0。作为一种理论形式，将此当作牛顿第二定律的逻辑基础无疑是有效的。但是，如果认为这种表述是合理的，则会掩盖一些事实，使问题变得含混不清，影响我们认识惯性的本质等问题。因为无论离其他质点多么远（只要不是距离无限大），也不能认为这个质点所受的力为0。何况，在足够大的空间内只有一个质点或一个物体的情形并不存在。

自然界是否存在静止和匀速直线运动？一、对于分立的质点（或天体），由于两者之间有引力作用，因此不可能相对静止或相互作用匀速直线运动。如果两天体绕两者公共质心旋转，两者轨道均为正圆，且各自自传、公转周期的巧合使两者质心的连线始终通过两物体表面不变的两点，则此时一个天体相对于另一个天体是静止的。但是，目前并未观测到完全符合这种情形的天体。人力可以刻意使两个物体以同样的速率沿相同的方向运动，在不考虑两者的自转时两者相对静止。但是，居于宇宙一隅的两个质点（天体）由于相互有引力作用，因此两者的运动方向不可能维持不变，于是两质点（天体）不可能维持相同速率相同方向的运动，因此质点（天体）以这种方式保持静止的情形也不可能存在。二、在地球表面观测地面上不在运动的物体，物体是静止的。但由于物体与地球已被引力束缚为一体，因此这等于以物体的一部分观测另一部分的运动，这种情形并不能说明自然界存在静止的物体。因此有理由认为，自然界并不存在静止或作匀速直线运动的物体。

由于牛顿力学理论的成功，有理由坚信牛顿第二定律的合理性，因此，我们容易接受上文所述伽利略、牛顿所作出的推论：既然抛射体、行星、彗星在地球、太阳引力下运动状态的改变符合牛顿第二定律，那么就可以设想，如果没有地球和太阳的引力，抛射体、行星和彗星的运动状态就不会改变，它们就会沿着直线飞出，至少将此作为牛顿第二定律的逻辑基础还是合理的。但是，本文认为，我们如果接受伽利略、牛顿也包括爱因斯坦的推论，或至少把它们作为理论的逻辑起点，就将陷入从伽利略直到牛顿以来形成的一个思想的漩涡。可能正是这个思维的漩涡使我们无法认识到惯性的真正本质。不难确立的信念和事实是：在给物体施加一个新的力时，物体运动状态的改变符合牛顿第二定律。如果不施加该力，

物体将保持原来的运动状态，但是原来的运动状态不是静止或匀速直线运动。也就是，惯性是物体保持原来运动状态的能力；在不给物体施加新的作用力时，物体保持原来的运动状态。而物体原来的运动是变速运动。

但是，“物体在不受力时保持静止或匀速直线运动”给牛顿力学第二定律提供了一个稳固的逻辑基础。物体在不受力时运动状态不发生变化，因受力所致运动状态的变化才能被定量研究，牛顿第二定律才能适用。作为一种理论形态，这在逻辑上的确是完美的。于是，“在不给物体施加新的力时物体保持原来的变速运动状态”能否在理论形式上给牛顿力学第二定律提供一个合理的逻辑基础呢？本文认为，要想使之成为该定律的合理的逻辑基础，只有一个出路，就是在用该定律研究一个力的效应时，设法将该力的效应从背景中析出，也就是设法将其他力的效应剔除或过滤掉，而惯性参照系恰恰能满足这一目的。这也正是牛顿力学定律在惯性参照系内能够成立的原因。

3 惯性参照系

惯性参照系简称惯性系，这一概念由朗格（L.Lange）于1885年提出^[8]。目前物理学认为牛顿力学定律在惯性系内成立，但是什么样的参照系是惯性系，尚没有确定的回答。在具体研究中，是依据经验选择较为可靠的参照系作为惯性系来使用的^[9]。

朗格认为^[10]：“惯性定律成立的参考系为惯性系。”基于前文，不受力的物体的运动状态是一个不存在的问题，也不能期望自然界存在静止和匀速直线运动，因此，沿着这一线索寻找惯性系是无法达到目的的。朗格还认为^[11]：可以取在其中的三个非共线运动的孤立质点都做匀速直线运动的参照系作为惯性系。在这样规定的参照系里，任何其他孤立质点的运动必然都是符合动力学规律的。由于三个非共线运动的质点之间及它们与参照物之间均存在力的作用，因此在严格的意义上无法找到朗格所描述的情形。在实际的研究中，比如研究行星在太阳引力场中的运动，使用太阳行星公共质心参照系是较为理想的，但是由于太阳引力的存在，在这个参照系中，即使在近似的意义上也无法找到作匀速直线运动的物体。

本文认为，惯性系只能沿着以下线索寻找。

由于牛顿力学定律的成功，我们有理由相信，任何物体的运动都符合牛顿力学第二定律。具体地说就是，一物体在一个力的作用下或在若干力的合力作用下，其运动的改变都符合牛顿力学第二定律。但是，空间中的一个物体（天体），往往受到无数个力的作用。我们无法也不需要考虑在所有力的作用下物体是如何运动的。即使考虑有限范围的受力和运动情况，也由于数学的困难无法得出物体的运动轨迹。比如，目前连三体问题也没有解决。事实上我们总是试图考察物体（天体）在一个力作用下是如何运动的。这时我们需要的是将其他力的效应剔除或过滤掉，也就是将这—个力的效应从众多力的效应中析出。本文认为，惯性系就是能够达到这一目的的参照系。退一步，即使相信存在绝对空间或绝对静止参照系，对于一个受到无数个力作用的物体，既然受力情况无法准确描述，有绝对空间或绝对静止参照系也无济于事。也就是，将物体在特定力作用下运动状态的改变析出是研究的唯一出路。作者认为以上是本文中的最重要的观点。

分析可知，目前根据经验选出作为惯性系使用的参照系，都是符合这一目的的。比如人们研究实验室平面上物体的运动，是使用实验室参照系。研究地球卫星在地球引力作用下的运动使用不旋转的地心参照系。研究行星在太阳引力作用下的运动使用不旋转的日心参照系。这些参照系恰好能剔除或过滤掉不希望研究

的那些力的效应。如实验室参照系，是剔除了来自太阳、银心和其他星系的引力的影响。在物体运动距离与地球半径相比极小的意义上，该参照系也能够剔除地球引力的效应。地心参照系能剔除来自太阳、银心和其他星系引力的影响，进一步还可以将卫星、地球的共同质心作为参照系，以剔除卫星对地球引力的影响。日心参照系能剔除来自银心和其他星系引力的影响，同样还可以进一步使用行星-太阳质心参照系。此外，这些参照系所以能使牛顿第二定律适用，还因为被研究的力只作用于被研究物体，而不作用于参照物体。因为如果这个力同时作用于参照物体，则只有两种情形：一种情形是使被研究物体和参照物体产生相同的运动；另一种情形是使两者产生不同的运动，也即使两者产生相对运动。在前一种情形，研究变得没有意义。在后一种情形，将该物体相对于该参照物体的运动作为该力的效应显然不合理。

由此本文认为，惯性系应是符合以下条件的参照系：

对作为参照物的物体 A 和被研究的物体 B，如果作用力不超出以下 5 种情形：

[情形一] 该力与研究的问题无关。如在研究地球绕日运动时，可以不考虑强相互作用和弱相互作用，一般也不需要考虑电磁相互作用。

[情形二] 该力同时作用于 A 和 B，但未使 A 与 B 产生相对运动。如来自银心的引力在近似的意义上不会使太阳与行星产生相对运动。

[情形三] 该力只作用于 A 或只作用于 B，但未使 A 与 B 产生相对运动。如研究物体在实验平面上的运动，平面对物体的支撑力、物体对平面的压力不会使两者产生相对运动。

[情形四] 力 f 作用于 B，使 B 相对于 A 发生运动。但力 f 不作用于 A。

[情形五] 该力使 A 与 B 产生相对运动，但可以借助观测和理论计算将 B 相对于 A 的运动剔除。

则在固定于 A 的参照系中研究 B 在力 f 作用下的运动规律，固定于 A 的参照系就是惯性参照系。也可以表述为：当在固定于物体 A 的参照系中研究物体 B 在力 f 作用下的运动规律时，如果除了力 f 以外所有其他力的作用均不影响物体 B 在参照系 A 中的运动规律，或其他力影响物体 B 在参照系 A 中的运动规律但其影响可以用合理的方法剔除， f 不作用于 A，则固定于 A 的参照系就是惯性参照系。

可以看出，前三种情形是作用力未使 A 与 B 产生相对运动，第五种情形是使 A 与 B 产生了相对运动但其影响可以剔除。第一种情形无需考虑；第二、三两种情形只要选择固定于 A 的参照系其效应就可以剔除；第五种情形需要采用其他合理的方法将力的效应剔除。理想的情形是所有的作用力不超出前四种情形，这时只需选择固定于 A 的参照系，就可以将力 f 的效应单独析出。但是这种理想的情形似乎并不存在，如选择地球-太阳质心参照系研究地球在太阳引力作用下的运动，仍然无法将其他行星的摄动剔除，需要根据理论和观测以合理的方式剔除行星的摄动。因此，需要列出第五种情形。

用这一框架衡量，目前通常使用的惯性系都是较为理想的惯性系，但是又不能不看到，这些参照系都只有近似意义。比如研究实验室平面上物体的运动，物体运动的尺度与地球半径相比虽然很小但不为 0，因此它仍然是近似的。此外，在给物体施加一个力时，施力者将受到一个反作用力。尽管与实验物体相比实验室和地球的质量巨大，但仍然不能忽略由此造成的近似意义。而上文提到的地球-卫星质心参照系和太阳-行星质心参照系，以后者为例，由于太阳和行星的距离

不为 0，因此不能认为太阳和行星所受来自银心的引力相同，也就不能认为来自银心的引力使太阳和行星产生的运动相同。此外，其他行星对被研究行星的摄动也并不能精确地剔除。所以，这种惯性系也只有近似的意义。此外，这种参照系只是推理的产物。因为我们无法在不旋转的地球-卫星质心或太阳-行星质心观测卫星或行星的运动。事实上，我们是以“不动的恒星背景”参照系来确定卫星或行星的运动，再通过推理得到被研究天体在地球-卫星质心参照系或太阳-行星质心参照系中的运动规律。“恒星背景”代表的是整个宇宙（总星系）。由于恒星和恒星系统的自行，“恒星背景”并非是不动的。只是由于宇宙深处的恒星和星系与我们距离遥远，因此“恒星背景”的变化无法观测到。在“恒星背景”参照系中研究天体在某一个力 f 作用下的运动规律时，虽然同时会有其他的力使该天体产生在“恒星背景”上的运动，或者表述为会有其他的力使该天体与“恒星背景”产生相对运动，但是其他力的效应或者可以通过观测和计算剔除，或者其影响极微可以忽略不计。而所有的力都无法作用于“恒星背景”。因此，“恒星背景”的确是一个较为理想的惯性系。但是，因为“恒星背景”的不动永远是近似的，而其他力的影响有的是因数量极微被忽略，有的则因数学的困难无法精确剔除，因此，不能忽略“恒星背景”作为惯性系的近似意义。

严格意义上的惯性系在自然界或许就是不存在的。也就是，我们无法真正精确地将一个力的效应从背景里析出。这也正好说明，任何理论形式都只是对自然规律的模拟，是在一定条件下对自然规律的近似表述。

基于上文，在非惯性参照系中牛顿力学定律不成立的原因是明显的。把上文中固定于物体 A 的参照系叫做 A 系，假定它已被确认为惯性系。如果有 A' 系相对于 A 系有加速度 a ，则当考察物体 B 在力 f 作用下的运动规律时，A' 系就是一个非惯性系，牛顿力学定律在其中将不成立。因为 A' 系不能只是一个概念，它一定是固定于某一个物体的。把这个物体叫做 A'，物体 A' 相对于物体 A 有加速度 a ，则必有一个力加在物体 A' 上。因此，物体 B 与物体 A' 之间的相对运动，是由该力和力 f 这两个力造成的。于是，在 A' 系中研究物体 B 在力 f 作用下的运动规律，等于将该两个力的效应当作力 f 一个力的效应来研究，显然是不合理的，牛顿力学定律不可能成立。但是，这不能成为牛顿力学定律有局限的证明。

参考文献：

- [1] 牛顿著，王克迪译，自然哲学之数学原理[M]，1. 北京：北京大学出版社，2006，1.
- [2] 陈鹏万，大学物理学手册[M]，1. 济南：山东科学技术出版社，1985，20.
- [3] 同文献[1]. 8.
- [4] 李艳平，申先甲，物理学史教程[M]，1. 北京：科学出版社，2003，240.
- [5] 同文献[4]. 99.
- [6] 同文献[1]. 8.
- [7] 爱因斯坦著，杨润殷译，狭义与广义相对论浅说[M]，1. 北京：北京大学出版社，2006，55.
- [8][9][10] 高炳坤. 探索惯性系[J]大学物理，2010，29（8）：11-15.
- [11] 同文献[4]. 241.

[作者信息] 姓名：张正华。机构：中国，山东，济南 250021，济南铁路公安局济南公安处。zhangzhsec@126.com。(ZHANG Zheng-hua. Jinan Police Division, Railway Police Bureau of Jinan, Jinan 250021, Shandong, China)