

惯性力是真实的力吗

师婧然 张保成

(中国地质大学(武汉)数学与物理学院, 武汉 湖北 430074)

摘要 牛顿三定律是大家都熟悉的基础的物理学定律,但是为什么一定是三个定律却并不一定被理解。我们在该文中提供一种理解三定律完整性的有趣解释。牛顿定律的一个基础概念为力,但是与牛顿定律本身不同的是,力在非惯性系中和在惯性系中理解没有什么差别。惯性力是一个例外,它只存在于非惯性系中,没有施力者和反作用,因此被当作是一种虚构的力。在这篇文章中,我们研究了时空如何施加了惯性力并受到相应的反作用,因此惯性力可以被当作是真实的力,这为超出牛顿力学的框架(即牛顿的绝对时空观)理解力提供一种途径。

关键词 牛顿定律,惯性力,伦德勒时空,反作用力

IS INERTIAL FORCE A REAL FORCE

SHI Jingran ZHANG Baocheng

(School of Mathematics and Physics, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074)

Abstract Newtonian three laws are well-known laws in the classical physics, but why the number of laws should be three could not been well taught in the common classes. In this paper, we provide an interesting interpretation for the public understanding of the logical integrity for Newtonian three laws. Force is a fundamental concept in Newtonian laws, but it has the same meaning in the inertial and non-inertial frames, which is different from Newtonian laws themselves since they hold only in inertial frame. Inertial force exists only in non-inertial frame and is regarded as fictional, since the origin of the force and its reaction cannot be found. In this paper, when the space-time is introduced to study the inertial force, it can implement the force and can be reacted, so inertial force is real. This provides a novel way to understand force beyond the Newtonian frame (in particular, it means the absolute space-time).

Key words Newtonian Laws; Inertial force; Rindler space-time; reacting force

牛顿三大定律是大家对于物理学的启蒙定律。众所周知,其成立的前提必须是在惯性系中。所谓惯性系就是指选取处于静止或匀速直线运动状态下的物体为参考物而建立的参考系。这其中包含了一个关键的概念,即作为物质运动基本属

性的惯性。“惯性”一词的出现最早可追溯到伽利略 1632 年出版的《关于托勒密和哥白尼两大实际体系对话》一书中,但惯性究竟是什么,一直都是一个很难准确理解的事情。例如,与惯性或运动改变紧密相关的物理量是物体的质量,一般把这

收稿日期: 2022-03-06

基金项目: 本课题得到国家自然科学基金(No. 12375057)及中央高校基本科研业务费(No. G1323523064)资助。

通信作者: 张保成,中国地质大学(武汉)数学与物理学院教授, zhangbaocheng@cug.edu.cn。

引文格式: 师婧然,张保成. 惯性力是真实的力吗[J]. 物理与工程, 2024, 34(3): 28-32.

Cite this article: SHI J R, ZHANG B C. Is inertial force a real force[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(3): 28-32. (in Chinese)

种质量叫惯性质量,但是惯性质量的物理本质还不十分清楚,它是不是一定等于物体的引力质量目前实验还在不断检验中。费曼曾经在一次访谈上通过惯性的例子来解释知道与理解的区别:“那是个神秘的现象,没有人知道为什么。普遍的原理是,运动中的物体会保持运动的趋势,静止的物体会保持静止的趋势。科学家们把这叫作惯性,但事实上,没有人知道为什么有惯性,这只是一个称呼。”^[1]

既然有惯性系,那就对应的有非惯性系。牛顿三定律一般被认为在非惯性系里面是不成立的,但是巧妙的是,只要非惯性系中引入所谓的惯性力,牛顿运动定律或者至少牛顿第二定律也可以在此非惯性系下解决运动学问题,而结果保持和实际情况一致。惯性力和惯性原则上没有直接的关系,但是惯性力的使用却使得惯性系中成立的牛顿运动定律在非惯性系中仍然成立(至少形式上成立)。这为“惯性力”蒙上了一层神秘的面纱,特别是一般的力学教科书上都认为,惯性力不是真正意义上的力,是虚构的力。这个在教学或实践中对理解力学定律常常造成一定的困难,即为什么用虚构的力可以正确地处理一些运动学问题?之所以说惯性力是虚构的力,大体上的解释都是虽然它具有真实力的效果,但是却不满足力存在的条件,也无法确定其反作用力。实际上这是牛顿绝对时空观下的理解,如果用相对论的观点,可以获得一个完全不一样的解释。本文的主要目的一方面是对牛顿三定律的逻辑完整性提供一种有趣的解说,另一方面是希望突破牛顿绝对时空观来重新理解惯性力,为力学及理论力学教学中提供能够激发学生兴趣和探索欲的一个案例。

1 什么是真实的力

牛顿运动定律在初中物理中就开始介绍,后来高中物理、大学物理会再次介绍。如果是物理专业的话,理论力学中也会再次介绍。但是我们在平时的教学中发现即使是物理专业的学生对牛顿三定律的理解也没有形成一个有机的整体。经过思考,我们将牛顿三定律和语文学习中记叙文的写法,即事件的起因、经过和结果联系起来,可

以有机地把牛顿三定律整合起来理解。

牛顿三定律叙述如下^[2-4]:

牛顿第一定律:任何物体(质点)如果没有受到其他物体的作用,都将保持静止或匀速直线运动状态。

牛顿第二定律:当一物体(质点)受到外力作用时,该物体所获得的加速度和外力成正比,和物体本身的质量成反比。

牛顿第三定律:当一物体对另一物体有作用力时,另一物体也会同时对该物体产生反作用力,作用力和反作用力大小相等,方向相反。

实际上我们要考虑的事件是“运动状态的改变”,而这个事情发生的原因就是因为定义了一个类似基准的运动状态,即静止或匀速直线运动状态。只有这种情况下,才能说运动状态没有发生变化,而其条件就是物体没有受到任何的外部作用力。正是因为有了不变的运动状态(这个即是牛顿第一定律的内容),人们才会考虑怎么改变运动状态,而运动状态改变的过程就是牛顿第二定律所叙述的内容,即运动状态的改变需要物体受到外力作用,而运动状态改变的程度则由加速度的大小来衡量。一般情况下,事情既然发生了(物体运动状态被改变),就一定会导致一定的后果,这个后果就是反作用力。也就是说,有外部作用想要改变物体的运动状态,而所谓的外部既然想要做这个事,那就要承担做这个事的后果,后果就是外部施力的物体会受到大小相等,方向相反的反作用力。这样,我们就通过描述一个特定事件的起因、经过和结果,从一个便于理解的角度说明了牛顿三定律的内在依存逻辑,也更方便于理解牛顿三定律的内容,的确是缺一不可,而且是完整的。

以上对牛顿三定律的解释虽然便于理解,但是实际上没有增加内容。其实牛顿三定律中一个看似简单,但是其实不简单的概念,就是力。首先我们要问什么是力,这是个不好回答的问题。一般字面上说,力就是物体之间的相互作用。这个解释实际上没有任何用处,而从牛顿三定律中提取的关于力的理解又有循环的味道,即可以说导致物体运动状态发生改变的作用就叫力,但是我们描述运动状态改变的时候也需要力的概念。这

个就导致“物体运动状态改变”和“力”两个概念处于类似先有鸡还是先有蛋的尴尬境地。虽然可以脱离力的概念,专门描述物体运动,即物体的位置、速度、加速度等,但是要想给物体运动状态有一个较为明确的说法,还是不能脱离力。这个可以从牛顿第一定律看出,即要想定义一个不变的运动状态,必须知道什么是不受外力作用。

牛顿三定律只在惯性系中成立,但是惯性系的建立需要能够定义静止或匀速直线运动状态,因此,还是脱离不了对力的理解。此外,还有一个理解上有些模糊的地方,即牛顿三定律只在惯性系中成立,但是力可以脱离惯性系,即使在非惯性系里面也没有任何理解上的差别。但是,要想让牛顿定律也能在非惯性系下使用,就必须添加一个虚构的力,即所谓的惯性力。为了明白为什么说惯性力是虚假的力,我们首先说明在牛顿力学框架下什么是真实的力。真实的力要满足以下三个条件:

- (1) 要有受力的物体;
- (2) 要有施力的物体;
- (3) 要能产生反作用力。

这三个要素缺一不可。从这三个条件来看,惯性力不满足后两个,因此不是真实的力。这个也是目前许多力学或理论力学教科书上的解释,在牛顿力学框架下也没有什么问题。实际上,我们只要稍稍突破一下牛顿力学的框架,将时空也归在物质的范围^[5]以内,就可以使惯性力也满足以上三个条件。

2 惯性力

什么是惯性力?首先我们需要知道惯性力只存在于非惯性参考系中^[2,3]。举一个生活中的常见例子来说明非惯性力。假设有两个观测者,其中一位A处于一辆即将行驶的火车上,在A面前悬挂了一个小球;另一位B在火车对面的站台上。此时观测者A和B观察小球,都会看到小球竖直向下,垂直于地面。当火车以匀加速 a 开始行驶后,在站台上的B观察小球会发现小球仍然是竖直向下。因为B处于惯性参考系中,所以观察不到惯性力,特别是其动力学分析中不需要惯性力。火车上的A观察小球会发现小球开始运动,最终悬线与竖直方向成一定夹角后处于静止状态。因

为此时小球相对A静止,因此A会认为小球受力平衡,而受力平衡会要求小球受一个水平方向的力,这个力就是惯性力。对处于匀加速参考系中的观测者A而言,虽然引入惯性力可以使小球达到力学平衡,但是没有发现施力者,也不知道该力的反作用效果,因此惯性力被定义为虚构的力。它的方向与加速度方向相反,大小等于小球质量乘以加速度,单位是牛顿。

从上一节的分析我们可以看出来,在牛顿力学的框架下,一些概念,例如“力”“惯性系”“物体运动状态”等的定义是存在逻辑循环的。为了打破这个逻辑循环,就必须能预先定义出来一个概念。牛顿是个非常聪明的天才,他使用著名的水桶实验说明运动是绝对的,一定存在一个优越的参考系可以作为惯性系。进一步地,牛顿也使用水桶实验验证他的绝对时空观。这样一来,整个的牛顿力学就有了很好的逻辑顺序,不同概念之间的关系也就基本理通了。但是对于概念本身,其实也还是有一些问题,例如“力”。特别是惯性力,既然可以解决实际问题,那为什么又得说是虚构的呢?

1883年,奥地利的科学家马赫在其出版的《力学及其发展的批判历史概论》中否认了牛顿的绝对时空观,他提出一个孤立物体的惯性是没有意义的;物体的运动不是绝对空间中的绝对运动,而是相对于宇宙中其他物质的相对运动,因而不只速度是相对的,加速度也是相对的;在非惯性系中物体所受的惯性力不是“虚构的”,而是一种引力的表现,是由宇宙中质量的分布决定的;是宇宙中其他物质对该物体的总作用,物体的惯性不是物体自身的属性,而是宇宙中其他物质作用的结果。但马赫原理在实验中却没有得到很好的证明。之后爱因斯坦在马赫的观点中受到启发,提出了完整的相对论体系证明了没有绝对的时间和空间。在广义相对论背景下,爱因斯坦运用等效原理,即自由下落的电梯可以抵消电梯里的重力场,电梯内的观察者无法断定电梯是静止于太空中还是在重力场中自由下落,证明惯性力等价于万有引力,惯性质量等价于引力质量,并用升降机说明两者是不能区分的^[6]。虽然间接证明了惯性力真实存在,但是我们在这里给一种直观的解释使得惯性力能够符合真实力的三个条件。

仍以匀加速行驶的火车上悬挂的小球为例,

此小球自然是惯性力施加的对象,而惯性力的施力者则是时空本身,而力的反作用效果就是使时空发生变化,即由原来的平直时空变为伦德勒(Rindler)时空^[6]。这个解释从广义相对论的角度看不是那么准确,但是却很形象,特别是能够和真实力的条件结合起来,容易接受和理解。下一部分我们介绍一下伦德勒时空是如何施加惯性力的。

3 伦德勒时空

在牛顿力学框架下,描述粒子运动一般默认在平直时空下,也就是在欧几里得空间中,并同时默认该空间中各处的时钟已经对准并且走时率一样,这样空间和时间在物体运动过程中都不会发生变化了。现在我们将空间和时间置于同等地位来描述,引入闵可夫斯基时空的度规

$$ds^2 = -dX_0^2 + dX_1^2 + dX_2^2 + dX_3^2 \quad (1)$$

这里取真空中光速 $c=1$, 因此 X_0 为闵可夫斯基时间, 即 $X_0=T$ 。

考虑一个匀加速观测者, 容易得到其在时空中的运动轨迹为双曲线^[7,8]。而加速的观测者看到的时空实际上是伦德勒时空。取伦德勒时空的坐标为 (x_0, x_1, x_2, x_3) , 其中 x_0 为时间, 令 $x_0=t$ 。伦德勒时空坐标和闵可夫斯基时空坐标之间存在相应的变换公式为^[9]

$$\begin{aligned} T &= x_1 \sinh(At), \quad X_1 = x_1 \cosh(At), \\ X_2 &= x_2, \quad X_3 = x_3 \end{aligned} \quad (2)$$

代入闵可夫斯基度规得到伦德勒时空度规为

$$ds^2 = -(ax_1)^2 dx_0^2 + dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 \quad (3)$$

其中, a 为观测者的适当加速度。现在我们可以重新考察匀加速直线运动的火车上的观测者的问题了, 他和惯性观测者的差别在于时空的不同。惯性观测者是在闵可夫斯基时空中看小球运动的, 而火车上的观测者是在伦德勒时空中看小球运动的。这两个时空有一个明显的差别就是伦德勒时空存在视界(就是加速观测者可以观测到的边界)^[9]。除此之外, 真空中加速的观测者也会观察到一些有趣的现象, 例如会看到热现象和纠缠变化, 感兴趣的可以参看综述文献^[9]和我们的一些工作^[10-12], 这里不再详述。那么火车上的观测者看到的惯性力是不是由于这个时空的差别引起

的, 如果是的话, 我们就可以解释惯性力也可以是真实的力。

为了方便计算我们只保留与 a 同向的空间维度 x_1 , 和观测者的时间维度 t , 令 $x_1=x$, 可以将伦德勒时空的度规表示为

$$ds^2 = -(ax)^2 dt^2 + dx^2 \quad (4)$$

其中, 度规 $g_{00} = -(ax)^2$, $g_{11} = 1$ 。下面我们在该时空中计算粒子的测地线方程。

根据相对论, 粒子在弯曲时空运动的测地线所满足如下方程^[7,8]

$$\frac{d^2 x^a}{ds^2} + \Gamma_{\mu\nu}^a \frac{dx^\mu}{ds} \frac{dx^\nu}{ds} = 0 \quad (5)$$

由于取真空中光速为单位 1, 加速观测者(与弯曲时空中的粒子同步运动)世界线元段的线长 $\sqrt{-ds^2}$ 可以表示其适当的时间长度^[8], 即 $\int_{p_1}^{p_2} \sqrt{-ds^2} = \tau_2 - \tau_1$, 而测地线方程中 Christoffel 记号和度规张量之间满足关系式^[7,8]

$$\Gamma_{\mu\nu}^a = \frac{1}{2} g^{a\beta} (g_{\mu\beta,\nu} + g_{\nu\beta,\mu} - g_{\mu\nu,\beta}) \quad (6)$$

根据方程(4)给出的伦德勒时空的度规形式可以得到

$$\begin{aligned} \Gamma_{00}^0 &= \Gamma_{11}^0 = \Gamma_{11}^1 = \Gamma_{10}^1 = \Gamma_{01}^1 = 0 \\ \Gamma_{10}^0 &= \Gamma_{01}^0 = \frac{2}{x} \\ \Gamma_{00}^1 &= a^2 x \end{aligned} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5), 两边同乘质量 m , 可以得到粒子的运动方程为

$$m \frac{d^2 x}{d\tau^2} + ma^2 x \frac{dt}{d\tau} \frac{dt}{d\tau} = 0 \quad (8)$$

由红移条件 $\frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} = \frac{1}{ax}$, 得到粒子运动方程为

$$m \frac{d^2 x}{d\tau^2} = -m \frac{1}{x} \quad (9)$$

其中伦德勒参考系中如果 a 表示适当的加速度(沿双曲线), 则 $a=1/x$, 代入方程(9)即可得伦德勒度规下的测地线方程为

$$m \frac{d^2 x}{d\tau^2} = -ma \quad (10)$$

这样, 伦德勒时空提供了加速参考系中粒子运动需要的惯性力, 即 $-ma$ 。以上的计算在相对论的意义下是不难理解的。现在我们根据这个计算和

之前我们列出的真实的力的三个条件可以重新解释惯性力。仍以匀加速直线运动的火车上的小球为例,小球即为惯性力的受力者,因此悬线和竖直方向有一个夹角;而惯性力的施力者可以认为是时空;正是因为时空施加了惯性力,所以受到反作用,从闵可夫斯基时空变成了伦德勒时空。这个解释至少在讲述力学时可以为理解惯性力增加一些兴趣,同时也为合理解力提供了一种途径,因为虽然牛顿的三定律要求其本身在惯性系中成立,但是力的概念可以超出惯性系来使用。

4 结论

本文重新分析了牛顿三定律的内在联系,并通过一种记叙文常用的事情的起因、经过和结果来对三定律进行重新理解。当然不是对内容本身进行理解,而是对牛顿三定律之间的关系进行理解,可以较为容易地明白牛顿三定律是逻辑完整的,缺一不可。虽然大家都知道牛顿三定律是在惯性系中才成立的,但是一些基础的概念仍然存在逻辑循环的缺陷,因此牛顿假设自然界存在绝对的静止系来优先定义惯性系,这样整个牛顿力学的框架至少在逻辑上就是通顺的(逻辑通顺并不代表其基础就是完全正确的)。但是其中仍然存在一个问题,即对力的理解。因为力不依赖于惯性系,在非惯性系中也是一样的。那么对真实的力的理解是不是也可以突破惯性系,或者准确说是突破牛顿力学框架。我们以此为出发点,研究了非惯性系中的惯性力,发现只要突破牛顿的绝对时空观,将时空也考虑进来,那么就可以为惯性力找到施力者和其反作用力的效果,从而将惯性力也归为真实的力,那么牛顿力学也可以在非惯性系中成立。对于转动的参考系^[10,11]中出现的附加力,也可以做类似的理解,但是需要强调的是,这些理解对于准确地把握牛顿力学的基础是

非常有意义的,但是从科学的准确性上来说,还是需要进入相对论的框架来理解。事物总是有两面性,因为学习牛顿力学的时候,还没有接触到相对论,因此我们提供的理解可以一方面帮助初学者明白牛顿力学基础的缺陷,另一方面能激发进一步学习相对论的兴趣。

参 考 文 献

- [1] 理查德·费曼. 发现的乐趣:费曼演讲·访谈集[M]. 朱宁雁,译. 北京:北京联合出版公司,2016.
- [2] 梁昆淼. 力学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2010.
- [3] 周衍柏. 理论力学教程[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2018.
- [4] 牛顿. 自然哲学的数学原理[M]. 王克迪,译. 北京:北京大学出版社,2005.
- [5] 爱因斯坦. 相对论的意义[M]. 郝建纲,刘道军,译. 上海:上海科技教育出版社,2016.
- [6] RINDLER W. Kruskal space and the uniformly accelerated frame[J]. American Journal of Physics, 1966, 34: 1174.
- [7] 赵峥,刘文彪. 广义相对论基础[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
- [8] 俞允强. 广义相对论引论[M]. 2版. 北京:北京大学出版社,1997.
- [9] CRISPINO L C B, HIGUCHI A, MATSAS G E A. The Unruh effect and its applications[J]. Reviews of Modern Physics, 2008, 80: 787.
- [10] LI T T, ZHANG B C. Would quantum entanglement be increased by anti-Unruh effect? [J]. Physical Review D, 2018, 97: 045005.
- [11] PAN Y J, ZHANG B C. Influence of acceleration on multibody entangled quantum states[J]. Physical Review A, 2020, 101: 062111.
- [12] PAN Y J, ZHANG B C. Anti-Unruh effect in the thermal background[J]. Physical Review D, 2021, 104: 125014.
- [13] BELL J S, LEINAAS J M. Electrons as accelerated thermometers[J]. Nuclear Physics B, 1983, 212: 131.
- [14] BELL J S, LEINAAS J M. The Unruh effect and Quantum fluctuation of electrons in storage rings[J]. Physics Letters B, 1987, 284: 488.