

## 18. 相对性原理与力学定律

李学生 (Li Xuesheng)

山东大学副教授, 理论物理教师, 中国管理科学院学术委员会特约研究员, 北京相对论研究联谊会会员, 中国民主同盟盟员 (作者为中国科学院高能物理所研究员)

[xiandaiwulixue@21cn.com](mailto:xiandaiwulixue@21cn.com), [1922538071@qq.com](mailto:1922538071@qq.com)

**摘要 (Abstract):** 物理学是科学的基本学科。本文章分析探讨了现代物理学的重要问题, **相对性原理与力学定律**, 供参考。

[李学生 (Li Xuesheng). **18. 相对性原理与力学定律**. *Academ Arena* 2017;9(15s): 79-83]. (ISSN 1553-992X). <http://www.sciencepub.net/academia>. 18. doi:[10.7537/marsaaj0915s1718](https://doi.org/10.7537/marsaaj0915s1718).

**关键词 (Keywords):** 质点; 电荷; 引力; 电力; 空间; 方程; 量子力学; **相对性; 力学**

汤川秀树讲: “只用物体、空间和时间这样的概念, 还很难准确地描述运动, 所以人们进一步引进坐标系, 特别是直角坐标系。”

相对性原理: 如果  $S$  是惯性系, 则相对于  $S$  作匀速运动而无转动的其它参考系  $S'$  也是惯性系——物理学的基本定律对不同的惯性系是相同的, 即表达基本规律的数学关系式对不同的惯性系是相同的. 数学关系式相同的意思不是指数值相同, 而是有其严格要求的, 即表达基本规律的数学关系式在惯性系  $S$  中如果取某种形式, 则将其中相对于  $S'$  系的各量  $\vec{r}$ 、 $\vec{v}$ 、 $\vec{a}$  等改为  $\vec{r}'$ 、 $\vec{v}'$ 、 $\vec{a}'$  即成为另一惯性系  $S'$  中相应关系式.

相对性原理的后一半是指, 如果惯性系  $S$  中有一条定律, 则任意另一惯性系  $S'$  中必存在一条对应的定律, 并且两者的内容和形式(在同类坐标下, 例如都采用直角坐标, 但空间坐标轴不一定互相平行, 两个四维时空原点不一定重合.) 都相同, 即只要把前者表达式中的物理量理解为相对于惯性系  $S'$  而言即成后者, 而不需另行证明. 简言之, 对惯性系  $S$  中的任何定律都可以冠以“对所有的惯性系”的短语来扩大其适用范围. 所谓“自然界定律”, 其集合包括全部普遍的和特殊的定律. 在相对性原理中, 对  $S'$  与  $S$  之间的关系, 如果要求相对速度为零并且四维时空原点重合, 则相对性原理成为“方向相对性原理”; 如果要求空间坐标轴互相平行并且相对速度为零, 则成为“平移相对性原理”; 如果要求空间坐标轴互相平行并且四维时空原点重合, 则成为“平动相对性原理”<sup>[1]</sup>. 许多著作在介绍相对性原理时往往默认了方向相对性原理和平移相对性原理, 而把注意力集中在“平动相对性原理”上<sup>[2]</sup>. 物理学是优美的, 它的美表现在基本物理规律的简洁性和普适性.

彭加勒在 1895 年提出了相对性原理的概念, 认为物理学的基本规律应该不随坐标系变化. 1904 年彭加勒正式表述了相对性原理. 他在一次演说中讲道: “根据这个原理, 无论对于固定的观察者还是对于正在作匀速运动的观察者, 物理定律应该是相同的. 因此没有任何实验方法可以用来识别我们自身是否处于匀速运动之中.” 按照一般理解, 相对性原理对物理方程所提出的要求(或所加的限制)就是协变性要求(限制). 力学相对性原理要求力学定律对于伽利略变换是协变的, 即经伽利略变换形式不变. 狭义相对性原理要求物理定律对于洛伦兹变换是协变的, 即经洛伦兹变换形式不变, 因此可以说相对性原理就是协变性要求, 若某定律服从相对性原理就说它满足协变性要求. 要区分的不是相对性原理和协变性, 而是伽利略协变性和洛伦兹协变性, 即不能把力学相对性原理和狭义相对性原理混为一谈.

从历史上看, 把相对性原理简称为协变性要求是从狭义相对论开始的. 后来人们干脆把相对性原理称为协变性原理, 但也一直有人把相对性原理称为不变性原理. 前者在广义相对论中最为普遍, 后者在经典力学中偶尔出现.

对于正确的物理定律来说, 满足协变性是必要的但不是充分的. 满足协变性要求只说明方程可能正确, 还不一定正确. 这是合乎逻辑的, 任何一个正确的命题, 它的逆命题不一定成立, 而逆否命题一定成立. 相对性原理在物理学中的权威性就由它的逆否表述来体现, 它有否决权, 不满足一定不正确. 功能原理满足力学相对性原理是一个正确的命题, 但它的逆命题却不一定成立, 即满足力学相对性原理的方程却不一定就是功能原理.

由于牛顿运动第二定律, 具有伽利略变换的协变性, 从一个惯性参照系转换到另一个惯性参照系, 牛顿运动第二定律的形式保持不变. 以牛顿运动第二定律为基础, 加上其他条件, 可以建立牛顿力学的全部理论体系. 在不同的惯性参照系中所加上的其他条件, 我们可以使之相类似; 于是牛顿力学的全部理论体系, 在所有的惯性参照系都是相同的, 这便是牛顿力学中的伽利略相对性原理. 伽利略相对性原理与狭义相对论的相对性

原理二者相同之处在于都认为,对于力学规律一切惯性系都是等价的.即无法用力学实验证明一个惯性系是静止的还是做匀速直线运动.所不同之处在于伽利略相对性原理仅限于力学规律,而狭义相对论的相对性原理则指出,对于所有的物理规律(不仅仅力学),一切惯性系都是等价的.

如果外界对一个系统的加速度的相等,在研究某个问题中,只要该问题所涉及的力对参考点的合外力为0,该参考点即为严格的惯性系.通常情况下,重力、摩擦力等对于地球的影响甚小,可视为足够好的惯性系或者说是近似惯性系,此时力学相对性原理不是严格成立,只是近似成立.

2000年2月高炳坤教授在《大学物理》上发表《“机械能守恒定律是否遵从相对性原理”辨》指出相对性原理可以分为两个层次.

第一个层次:从两个惯性系分别考察两个系统.由于牛顿定律对两个惯性系都成立,故在两个惯性系中所得到的力学规律(包括无条件的普遍规律和有条件的特殊规律)完全相同.由于是分别考察两个系统,故在两个惯性系中所得到的相同的规律之间,不存在“伽利略变换”这种联系.

第二个层次:从两个惯性系同时考察同一系统,由于牛顿定律对两个惯性系都成立,故在两个惯性系中所得到的普遍的(即不加条件由牛顿定律导出的)力学规律完全相同.由于是同时考察同一系统,故两个惯性系中所得到的相同的规律之间,必然存在着“伽利略变换”这种联系,即利用伽利略变换必能把S系中的规律变成要S'系中的规律,反之亦然.

**笔者认为,通常所说的力学相对性原理是指第二个层次的相对性原理,如果将伽利略变换换成洛伦兹变换,就是狭义相对论中的相对性原理,只满足第一个层次的相对性原理的结论在牛顿力学和狭义相对论中不一定成立,爱因斯坦本人有关狭义相对论的著述中的三段话便说明了这一点.爱因斯坦在回忆他建立相对论的经过时说,他“对于依靠已知事实通过创造性的努力来发现真实定律的可能性越来越感到绝望.”“空间和时间并没有绝对的意义,它们不过是相对的关系罢了.”“越发相信只有发现一个普遍的形式上的原理”才能得到“精确有效”的结果.他“直觉地感到”,“光速不变原理”和“相对性原理”正是这样的原理.**

表述A 自然界规律对于洛伦兹变换是协变的<sup>[3]</sup>

表述B 如果S是惯性系,则相对于S作匀速运动而无转动的其它参考系S'也是惯性系,自然界规律对于所有惯性系都是相同的<sup>[4]</sup>

表述C 自然规律同参照系的运动状态无关,至少在参照系没有加速运动时是这样<sup>[5]</sup>

笔者认为,爱因斯坦的表述B、C是指第一个层次的相对性原理,表述A是指洛伦兹变换下的第二个层次的相对性原理(麦克斯韦方程组满足洛伦兹变换,弹性介质中振动波传递方程满足类洛伦兹变换,只要把光速换成波速即可).“只有爱因斯坦真正认识到相对性原理的本质意义,并从根本上改变了牛顿力学及其时空观”,相对性原理最初是力学的基本原理.在广义相对论中基本物理规律在任何坐标系形式下都不变——广义协变原理.依照古典力学,物体在竖直引力场中的竖直加速度,同该物体的速度的水平分量无关.因此在这样的引力场里,一个力学体系或者它的重心的竖直加速度的产生,同它内在的动能无关.这就是等效原理的内容:惯性质量同引力质量相等,在引力场中一切物体都具有同一加速度.这就意味着爱因斯坦在狭义相对论框架中构造引力场论的尝试被等效原理否决了.从等效原理中,可以得到这样的结论:在均匀的引力场中,一切运动都像在不存在引力场时对于一个均匀加速的坐标系所发生的一样.爱因斯坦在等效原理的启发下,认为如果我们得到一种关于引力场的自然的理论,就需要把相对性原理推广到彼此相互作用非匀速运动的坐标系上去,引力场方程将在非线性变换的情况下保持不变,这就是新的广义协变性原理.

力学相对性原理是对称性原理在力学中的重要体现,对称原理是一个普遍的原理.海森堡提出:“万物的始原是对称性”,“对称性常常构成一个理论的最主要的特征”...“所有的自然界的基本定律都带有某些对称性”,而“所有的物理学的第一性原理都是建筑在对称性的基础上.”

相对性原理说明物理规律在相对运动中是等效的,狭义相对性原理指出一切物理规律对于各种惯性系都是相同的,广义相对性原理则把它推广应用于任意相对运动的参照系.相对性原理是一种变换中的不变性(某种守恒),它联系于空间的某种性质,例如均匀性,引力场与非惯性系的等价性等,它的数学形式是方程等的一般协变性.海森堡指出:“相对性原理构成一个十分普遍的自然规律”.对自然的研究和对自然力量的利用从一开始就是同使物体个体化联系在一起的.一个物体到另外一些物体的距离随时间发生变化.当这些“另外的”物体依然是所论物体的不可分割开来的背景的时候,我们就无法用数列对应于该物体的位置和位置的改变,也就是不能对物体的位置和速度施行参数化.给定一个物体,它相对于一些物体运动,标志出这些物体,然后用数列与这些距离相对应,于是这些物体就成为参照物,而给定物体到这些物体的距离的全体就成为参照空间.对应于距离的数之全体组成一有序系统.这样同参照物联系在一起的坐标系,也就被引进来了.所谓相对性原理就是坐标系的平等性,从一个坐标系转换到另一个坐标系的可能性以及给出坐标变换时刚体内部的特性

和刚体内部的各质点的距离及其结构的不变性。

近代科学表明，自然界的所有重要的规律均与某种对称性有关，甚至所有自然界中的相互作用，都具有某种特殊的对称性——所谓“规范对称性”。实际上，对称性的研究日趋深入，已越来越广泛的应用到物理学的各个分支：量子论、高能物理、相对论、原子分子物理、晶体物理、原子核物理以及化学（分子轨道理论、配位场理论等）、生物（DNA 的构型对称性等）和工程技术。在 20 世纪前的二百多年间，对称性与守恒律的关系未被人们发现，杨振宁认为其原因是：“在古典物理学中，这种关系尽管存在着，但不十分有用。当量子力学在 1925-1927 年间发展时，这种关系的重要性才实际上显露出来。在量子力学当中，动力学系统的态是用指明态的对称性质的量子数标记的。与量子数一起还出现了选择定则，它支配着在态之间跃迁时量子数的变化……在 1925 年后对称性才开始原子物理学的语言中。后来，随着物理学的研究深入到核现象和基本粒子现象，对称性也渗入这些物理学新领域的语言中”。

从几何观点看来，空时理论可分为均匀的（伽利略的）空间理论和非均匀的（黎曼和爱因斯坦的）空间理论。空时的均匀性表现在存在着一类变换群，它使两点间的四维距离（间隔）的表达式不变，间隔表达式在空时理论中至为重要，因为它的形式直接与物理的基本定律，即自由质点运动定律和自由空间中光波波前传播定律的形式有关，因此朗道的书《力学》中说，在惯性参考系中自由运动的质点，由于时间和空间的均匀性和各向同性，表征它所用的拉格朗日函数不显含时间和广义坐标和速度的方向。伽利略空间具有最大限度的均匀性，这表现在：在伽利略空间中：(a)所有的点和瞬时都是平权的；(b)所有方向都是平权的以及(B)所有作相对匀速运动的惯性系都是平权的。

(1) 伽利略变换下的牛顿第二定律

$$\begin{aligned} \text{在 } s \text{ 系中, } \quad \sum \vec{F} &= m\vec{a}' \\ \text{在 } S' \text{ 系中, } \quad \sum \vec{F}' &= m\vec{a}' \end{aligned} \quad (1)$$

由于  $\mathbf{F}=\mathbf{F}'$ , 所以  $\mathbf{a}=\mathbf{a}'$

(2) 伽利略变换下的质点动量定理

$$\begin{aligned} \text{在 } s \text{ 系中, } \quad \int \sum \vec{F} dt &= m\Delta\vec{v} \\ \text{在 } s' \text{ 系中, } \quad \int \sum \vec{F}' dt' &= m\Delta\vec{v}' \end{aligned} \quad (2)$$

(3) 伽利略变换下的质点动能定理和理想流体的伯努利方程

$$\begin{aligned} \text{在 } s \text{ 系中, } \quad \sum W_{\text{外}} &= \Delta Ek = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 \\ \text{在 } s' \text{ 系中, } \quad \sum W'_{\text{外}} &= \Delta E'k = \frac{1}{2} m v_2'^2 - \frac{1}{2} m v_1'^2 \end{aligned} \quad (3)$$

由于动能定理满足伽利略变换，因此动能定理的推论——伯努利方程也满足伽利略变换。

(4) 伽利略变换下的功的公式

$$\begin{aligned} \text{在 } s \text{ 系中, } \quad w &= \int \vec{F} \cdot d\vec{r} \\ \text{在 } s' \text{ 系中, } \quad w &= \int \vec{F}' \cdot d\vec{r}' = \int \vec{F} \cdot d\vec{r}' = w - \int \vec{F} \cdot \vec{u} dt \end{aligned} \quad (4)$$

若  $\vec{F}$  为质点所受的合外力，则有

$$w' = w - n\Delta\vec{v} \cdot \vec{u} \quad (5)$$

(5) 伽利略变换下的动量守恒定律

$$\text{在 } s \text{ 系中, 若 } \quad \sum \vec{F}_{\text{外}} = 0, \quad \text{则 } \sum_{i=1}^n M_i \vec{v}_i = \text{恒量 } (\vec{c})$$

对两个质点组成的封闭系统的一维动量传递问题则有

$$m_1 v_{10} + m_2 v_{20} = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

在  $s'$  系中, 若  $\sum \vec{F}'_{外} = \sum \vec{F}_{外} = 0$ , 则

$$\sum_{i=1}^n m_i \vec{v}'_i = \text{恒量} (c') \quad (6)$$

$$\vec{c}' = \vec{c} - \vec{u} \sum_{i=1}^n m_i$$

(6) 伽利略变换下的机械能守恒定律

在  $s$  系中, 根据前面的分析可知只要系统非保守力做功为 0, 系统的机械能守恒.

在  $s'$  系中, 根据伽利略变换力是伽利略变换的不变量, 非保守力做功之和仍然为 0, 因此机械能仍然守恒. (7)

根据动能定理, 设保守力做的功为  $W$ ,  $W = E_{k1} - E_{k0}$ ,  $E_{k1}$  是  $t_1$  时刻的动能,  $E_{k0}$  是  $t_0$  时刻的动能. 根据势能的定义,  $W = E_{p0} - E_{p1}$ ,  $E_{p1}$  是  $t_1$  时刻的势能,  $E_{p0}$  是  $t_0$  时刻的势能. 所以  $E_{k1} - E_{k0} = E_{p0} - E_{p1}$ , 所以  $E_{k1} + E_{p1} = E_{k0} + E_{p0}$ . 机械能守恒定律成立, 满足伽利略变换, 也具有单独的协变性.

**动能定理满足伽利略变换是机械能守恒定律满足伽利略变换的充分条件, 牛顿定律满足伽利略变换是动能定理满足伽利略变换的充分条件, 因此牛顿定律满足伽利略变换是机械能守恒定律满足伽利略变换的充分条件.**

综上所述, 力学规律在伽利略变换下具有不变性. 即力学规律在不同的惯性参照系中具有相同的形式, 是规律的形式相同, 而不是每一个物理量的数值在不同惯性系中都相同. 有不少人认为相对性原理仅仅适用于封闭系统, 文献[5]认为机械能守恒定律和角动量守恒定律对于开放系统不满足力学相对性原理, 仅仅对于封闭系统成立. 持有这种观点的人认为对于开放系统能量不守恒, 其实这种看法是完全错误的, 对于开放系统可能对于所有的惯性系都不守恒, 但只要对于一个惯性系守恒, 对于所有的惯性系都守恒. 相对性原理对于开放系统和封闭系统都成立, 这是判定一个动力学规律正确与否的标准.

物理学中的守恒定律被看作是最基本的自然法则, 它们以切实的可靠性和极大的普遍性预言哪些过程是允许的, 哪些过程是不被允许的, 而不必考虑过程进行的细节. 与自然界所有定律一样, 守恒定律的正确依赖于实验. 新的实验可能会发现某个不满足守恒定律的假象, 只要仔细分析, 必然发现是那些从前未被发现的因素影响了结果. 守恒意味着不变 (如一定条件下动量、角动量、能量的总量不变), 这种不变又由对称性法则所制约. 从空间平移的不变性 (也称空间平移对称性、空间的均匀性) 推出动量守恒定律; 从空间转动不变性 (也称空间转动对称性、空间的各向同性) 推出角动量守恒定律; 从时间不变性 (也称时间对称性、时间的均匀性) 推出能量守恒定律.

通常认为方程的协变性具有特别重大的意义, 协变性的含义如下: 凡施行坐标变换, 应变量 (函数) 亦必按确定的 (例如张量的) 规则而变换, 我们研究坐标变换时必须同时注意原来的和变换后的函数所满足的方程形式, 如果变换后所得到的新变量的新系数和旧变量的旧函数一样能满足同样形式的方程, 则方程就是协变的, 由方程的协变性, 使我们无须预先选定坐标系就能写出方程, 此外因为方程的协变性限制方程形式的种类, 同时还帮助挑选正确的形式, 故方程的协变性对推动研究工作有重大的意义. 但必须着重指出, 仅当引入函数的数目亦有限制时, 协变性对方程的形式限制方属有效; 如果能引进任何数目的新辅助函数, 那事实上可以赋予任何方程以协变的形式. 因此方程协变性本身绝不表示任何物理定律, 例如在质点系力学中, 第二类拉格朗日方程对任意坐标变换都是协变的, 而用直角坐标系写出的第一类拉格朗日方程则不是协变的, 但前者与后者比较, 并不表示任何新的物理定律. 在拉格朗日方程的情况下, 协变性是这样达到的, 就是引进用速度表示的二次 (不一定是齐次的) 拉格朗日函数的系数作为新的辅助函数.

迈克尔逊光学实验表明: 三维空间牵引运动系间必有的伽利略变换及其不变性不能成立, 经典物理学出现危机. 狭义相对论纠正经典物理学“绝对时间”的错误观念, 使时间也成为, 位置矢量参考系的, 虚数的, 另外一维 ict, 而时空就共有, 虚、实坐标的四维.

惯性牵引运动系 (牵引运动系间无作用力) 间的变换, 就是四维时空牵引速度各方向余弦组成的么正矩阵的洛伦兹变换. 非惯性牵引运动系 (牵引运动系间有作用力) 就是四维时空牵引位移矢量各方向余弦组成的么正矩阵的变换, 也会随时空而变, 即产生时空弯曲. 不能继续使用不变的坐标系. 也还应注意: 原坐标系中任意矢量与牵引运动矢量本身变换结果的不同. 因此研讨质点粒子运动必须弄清楚以上各种不同坐标系和不同矢量的不同处理, 否则就会出相应的各种错误.

**参考文献:**

1. 爱因斯坦 A. 相对论的意义[M]. 北京: 科学出版社,1961. 16.
2. 福克B A. 空间、时间和引力理论[M]. 北京: 科学出版社, 1965. 19.
3. 爱因斯坦 相对论: 相对论的本质[A].爱因斯坦文集[C],北京: 商务印馆, 1976.455.
4. 爱因斯坦 相对论的意义[M].北京: 科学出版社, 1961.16.
5. 高炳坤, 用伽利略变换审视牛顿力学.大学物理, 1994 (6) : 1~2, 8.

5/4/2017