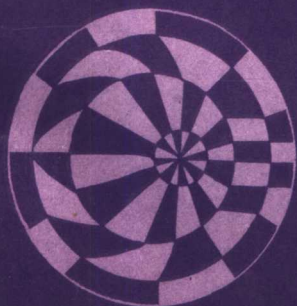


XIA YI XIANG DUI LUN DAO YIN

狭义相对论导引

李文博 编



东北林业大学出版社

狭义相对论导引

李文博 编

东北林业大学出版社

内 容 简 介

本书的内容主要包括四个方面：一、伽利略和牛顿的相对论；二、狭义相对论的时空特性；三、相对论力学；四、相对论与电磁学。书中详尽地介绍了伽利略和牛顿的相对论，并强调了狭义相对论对于伽利略和牛顿相对论的继承性，努力为读者建立狭义相对论的时空观，并注意了相对论力学与电磁学的一致性。

本书面对广大中学教师和具有高中以上文化水平的青年朋友。这是一本中级读物，也可作为师专或本科低年级教材或教学参考书。

狭义相对论导引

李文博 编

东北林业大学出版社出版发行
(哈尔滨市和兴路8号)

东北林业大学出版社印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米1/32 印张 5.375 字数 108 千字

1986年10月第1版 1986年10月第1次印刷

印数 1—15,000 册

统一书号：13447·004 定价：1.20 元

序

本世纪以来，物理理论基本上沿着两个方向——相对论和量子力学发展。狭义相对论不仅是近代物理的重要思想支柱之一，也是近代哲学思想基础之一，它对物理学和哲学的影响是带有根本性的。正如人们常常说的，它给物理学和哲学带来了一场深刻的革命。因此，能使更多的人，尤其是青年人了解它，掌握它，运用它，显然是有重大意义的。

在全面介绍狭义相对论的基本思想之前，本书首先要告诉读者，狭义相对论并不神秘。掌握好这门知识实际上也并不困难，并不比掌握牛顿力学和经典电磁学困难，甚至于它比以往的古典物理学（牛顿力学和电磁学）更简单，更明白，更清晰。它所描述的事实更基本。它的内部逻辑体系也较严谨，用它解决问题的手段也常常是简洁的，方便的。牛顿力学和电磁学在它们形成的初期，也曾被人们认为是“神秘”、“望而生畏”的，而现在它们已被青年朋友认为是很容易熟悉和掌握的一门知识了。

狭义相对论之所以常常使人感到神秘，令人望而生畏，大致有以下几个原因：

第一、它尚未被列入中学教材，甚至一般大学也没列为专门的重要课程，至使青年人不能尽早地接触它。而学过相对论的人都有一种“相见恨晚”的感觉。随着相对论的应用日益广泛，目前很多国家正在加强这方面的教学 (1)(2)(3)(5)(8)，

甚至尝试引入中学教材之中。应该指出，它并不是脱离经典物理之外的另一门知识，而是贯穿物理学始终的一条主线。

第二、目前介绍相对论的书以下面两种为多，一种是科学性的，只浮于表面，蜻蜓点水，一掠而过，几乎完全回避数学工具；另一种是采用了较难的数学工具^{(4) (10)}，从而忽视了用相对论原理对概念进行阐述。对于介绍相对论来说，突出阐明它的概念乃是极其重要的。固然，对相对论来说完全回避数学工具的应用也是交待不清的，这一点与古典物理是相同的。但也并非一定要高深的数学工具不可，使用较为初等的数学工具和简明的物理模型是完全可以建立起相对论的概念的，这一点也与古典物理相同。

第三、人们常说，相对论脱离“日常经验”，因为人们时只能与低速系统打交道，这种说法不完全对。牛顿力学是低速情况下的物理规律，但它是作为狭义相对论的特殊情况而包含在相对论之中的，可以说，整个牛顿力学都是相对论的一个极限验证。其次，在微观领域中，充满着高速运动，象原子弹爆炸这样的事实是人所共知的。再次，如电磁现象，更是我们现代人“日常经验”中的事了。现代人每天都与电磁现象打交道，而电磁现象是与狭义相对论精确相符的。

第四、人们在介绍相对论时，通常要大讲一番它的发展史，详尽地介绍许多实验。这样的开头常常是多余的，这样做往往会使一个初学者产生厌倦。狭义相对论已被大量的实验所验证，决定它的实验基础并非那几个历史上的实验。正象阐述牛顿力学一样，完全可以开门见山地按照它的理论结

构把狭义相对论呈现在读者的面前。

第五、提起相对论，常常讲它的“惊人”之处，强调它的高深的一面，误把“新”说成“深”，甚至把爱因斯坦本人神化起来。这种作法无疑会掩盖狭义相对论本身容易被理解，容易教学的一面。我们认为，在阐述爱因斯坦伟大贡献的同时，应该强调阐述他的哲学思想、物理思想与以往思想的联系和继承。

本书是面对广大青年读者的。书中把狭义相对论作为阐述牛顿力学和古典电磁学基本原理的主线，采用了较为初等的数学工具（最多用到简单的微积分），突出了狭义相对论概念的建立，强调相对论对于牛顿力学的继承性，阐明它是牛顿力学自然而然的合理发展，并且特别注重人们“日常经验”中的电磁现象。在用相对论阐述电磁理论时，注意了在这个与狭义相对论精确相符的阵地上，进一步为读者建立起狭义相对论的基本概念。本书将尽量少地回顾历史，简化对实验的描述，争取做到开门见山。

相对论是那样地令人神往！是那样地吸引人！要想了解它，就下个决心吧，将此书认真地、慢慢地、细细地读一下。可以肯定，您将在这踏踏实实的学习过程中坚定您追求真理的信心。当您读完此书时，会发现您自己原来正生活在这样一个美妙和谐的“相对论”世界之中，正是：“不识庐山真面目，只缘身在此山中”。可以肯定，您将进一步被相对论的魅力所吸引，并会下决心把它搞个水落石出。

一九七九年秋，高等教育出版社邹延肃同志曾热情地鼓励笔者写作本书，北京师范大学刘辽教授详细地审查了本书的初稿。一九八一年春，高等教育出版社的杨再石同志提出

了指导性意见，完善了本书的体系。本书于一九八二年底完稿。其重点部分曾先后在几家学报上发表。本书出版前曾由刘辽教授逐字逐句地详细修改，后又经山东师范大学洪铭熙教授、华东师范大学胡瑶光教授和上海师范大学阚仲元教授审查和推荐。在东北林业大学出版社和全国师专物理教学研究会的支持、资助下，终于使本书与读者见面了。笔者愿与广大读者一起对以上有关同志的指导和帮助深表谢意。

笔者特别欢迎来自读者的评论。

作者

一九八五年十月

目 录

序

第一章 伽利略和牛顿的相对论	(1)
§1.1 惯性参考系及其坐标系	(1)
§1.2 伽利略和牛顿的相对论	(3)
§1.3 伽利略和牛顿相对论的方法概述	(11)
第二章 新的力学实验、电磁学和牛顿力学的矛盾	(15)
§2.1 新的力学实验与牛顿力学之间的矛盾	(15)
§2.2 牛顿力学与电磁学之间的矛盾	(18)
第三章 狭义相对论的提出	(22)
§3.1 爱因斯坦所考虑的问题	(22)
§3.2 光速不变原理对时间测量的影响	(26)
§3.3 对钟方法	(30)
§3.4 爱因斯坦—洛伦兹变换的导出	(31)
第四章 狭义相对论的时空特性	(36)
§4.1 异地事件同时的相对性	(36)
§4.2 洛伦兹收缩	(39)
§4.3 不同惯性系中球面电磁波的测量	(42)
§4.4 时空不变量·爱因斯坦时空观小议	(45)
§4.5 固有时间·固有长度·三种惯性系的再讨论	(48)
§4.6 运动物体的视觉形象和测量结果	(49)
§4.7 多普勒效应与观看运动的时钟	(52)
§4.8 时间测量本性小结及“双生子佯谬”	(58)
第五章 狭义相对论运动学	(67)
§5.1 连续变换的几个重要公式和速度合成	(67)

§5.2	速度的变换	(69)
§5.3	托玛斯效应和电子自旋	(72)
第六章	狭义相对论动力学	(76)
§6.1	基本量的定义及其变换	(76)
§6.2	不变量和守恒定律	(82)
§6.3	力的定义及其变换	(84)
§6.4	力的类磁项及力的传播	(86)
第七章	狭义相对论表述的电磁学	(93)
§7.0	本章小序	(93)
§7.1	电荷不变性	(95)
§7.2	运动电荷场的分布	(98)
§7.3	库仑定律补注·运动电荷对静止电荷的作用力	(101)
§7.4	运动电荷之间的作用力·讨论	(103)
§7.5	电流对运动电荷的作用力	(109)
§7.6	导线中电流的各种构成方式的等效性	(112)
§7.7	关于电磁感应的本质	(115)
第八章	电磁学中的洛伦兹变换	(117)
§8.1	电流—荷密度 ($\mathbf{J}$, ρ) 的变换	(117)
§8.2	$\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{B}$ 的变换	(118)
§8.3	微分算符 (∇ , $\partial/\partial t$) 的变换	(122)
§8.4	麦克斯韦方程组的不变性	(124)
§8.5	介质中的极化强度 $\mathbf{P}$ 与磁化强度 $\mathbf{M}$ 的变换	(126)
§8.6	$\mathbf{D}$ 与 $\mathbf{H}$ 的变换	(130)
第九章	狭义相对论述评	(132)
§9.1	狭义相对论的意义	(132)
§9.2	狭义相对论中的一个重要研究方法	(133)
§9.3	场	(134)

第十章 四度势和辐射	(137)
§10.1 矢势和标势	(137)
§10.2 恒速运动点电荷的势场分布	(142)
§10.3 加速运动点电荷场的定性分析	(145)
§10.4 加速运动点电荷场的定量分析	(147)
§10.5 由四度势计算加速运动点电荷的场	(150)
§10.6 电磁辐射	(155)
编后记	(160)

第一章 伽利略和牛顿 的相对论

本书的前三章将向读者展示伽利略 (Galileo) 和牛顿 (Newtonian) 的相对论, 以及十九世纪以来物理学的两大成就 (牛顿力学和电磁学) 在理论上不可调和的矛盾, 爱因斯坦 (A. Einstein) 是怎样解决这些矛盾, 从而有继承, 更有发展地提出狭义相对论的两条基本假设。

§ 1.1 惯性参考系及其坐标系

万物都是运动着的, 运动是物质的固有属性。要描述物体的运动必须首先指明参考物, 这是我们从初中物理中得到的知识。与这参考物相对静止的所有物体也都与这参考物一样起着参考的作用。我们把这一系列物体叫做参考系统, 简称参考系。参考系显然构成我们描述的那个物体运动的空间“背景”。在各种各样的参考系中, 惯性系是最重要的, 也是最方便、最简单的, 它是我们认为“可靠”的参考系。构成惯性参考系的物体不受外力作用, 且作惯性运动, 即匀速直线运动, 这是牛顿第一定律 (也称惯性定律) 所指出的。可以说, 整个牛顿力学就是从惯性定律出发的。而狭义相对论也是从这里出发, 是遵守惯性定律的。

为了研究某物体的运动, 可任意选择惯性参考系。不同的惯性系观测物体的运动是不同的, 但是并不改变物体本身

的运动规律，因为物体的运动是客观的，而惯性系的选择则具有人为的特点。不同的惯性系的选用，只意味着描述方式的不同，或者说，只意味着“语言”的不同，就象用汉语或英语描述同一事物，语言形式不同，说的却是同一事物。这中间仅存在着一个“翻译”的问题而已，这个翻译过程并不改变事物本身的面貌。

为了进行定量的描述，首先要在惯性系中引入坐标系。我们的空间是三维空间，可以选取各种各样的坐标系，如极坐标系（用 r, θ, φ 表示）、柱坐标系（用 r, φ, z 表示）、笛卡儿（Cartesian）直角坐标系（用 x, y, z 表示）等等。在狭义相对论中最方便的是笛卡儿坐标系。应该指出，笛卡儿坐标系的三个相互垂直的轴向是可以任意规定的，原点的位置也是可以任意规定的。这种任意性也不影响物体的实际运动，就象要用不同的“方言”来说明同一件事一样，并不改变这事物的本来面貌。

相对论中常采用 x 轴与惯性系本身运动（匀速直线运动速度方向平行的惯性坐标系，这是较为方便的。在相对论中，一般说到坐标系就是指惯性参考系，有时就称为参考系。坐标系有时就代表物体在其中运动的空间，它实际上是惯性参考系的数学抽象，是对三维欧几里德（Euclidean）空间的一个数学表述。为了考察此空间中物体的运动，要在其中放一只（或几只，乃至无数只同步的）钟，来记录时间的演化，这对相对论来说是极为重要的。

狭义相对论常常要研究在不同惯性系中测量结果之间的联系（即上述“翻译”，在相对论中叫作变换）。为此常选取最方便的惯性坐标系，如图 1.1.1 所示。应注意，每个参考

系都有自己的钟静止其中，这钟图中没有画出。一般规定，当两坐标系的原点（ O 和 O' ）重合时各自坐标系中的钟开始记时，即当 O 与 O' 重合时， $t' = t = 0$ 。

S 与 S' 的三对坐标轴分别平行， v 与 x 平行。这样选定的

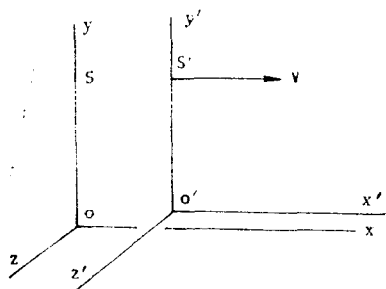


图1.1.1

的两个坐标系，我们称之为最方便的坐标系。

为了讨论问题的方便，

在此说明一下常用的三

种坐标系的代号。我们

今后用 S 表示实验室参

考系； S^0 表示与研究对

象固连的考系； S' 表

示相对 S 运动的参考

系。

§ 1.2 伽利略和牛顿的相对论

相对论并非爱因斯坦的创造，爱因斯坦不过改造了它，当然是从根本上改造了它。相对论的观点从伽利略的时代就有了。伽利略和牛顿在他们那个时代就已对相对论有了较深入的研究。

上节讲的是参考系问题，这对于学过初中物理的人来说并不陌生。但是就这么一个在今天看来很简单的问题，当初人类认识上的这个飞跃却要付出流血的代价。哥白尼（Copernicus）宣布地球是绕太阳运动的，从而纠正了托勒玫（Claudius Ptolemaus）的“地心说”。伽利略为之冒风

险，布鲁诺 (Bruno) 为之献出了生命。伽利略在宣传哥白尼学说的那个著作《〈关于托勒玫和哥白尼两大世界体系的对话〉》中，精辟地论述了相对性原理。目前大部分初中教材都把这段论述引来作为阅读资料。这段论述的中心思想是：

在任何惯性系中做力学实验，都不能判断这个惯性系本身的运动，换言之，牛顿运动定律的形式在任何惯性系中都是不变的。也有时说，所有的惯性系在力学定律面前都是等价的（或曰“平权的”，意即没有从优地位的惯性系）。牛顿运动定律系指牛顿三定律和万有引力定律。

这个思想就是伽利略和牛顿的相对性原理，也就是伽利略和牛 顿 的 相 对

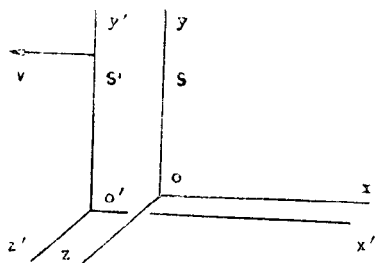


图1.2.1

论。事实上，伽利略和牛顿的相对论所包含的内容还有更深刻的东西。对此我们将在下面加以初步的说明，更深入的说明将留在介绍爱因斯坦相对论时再作。

为了方便，我们还是采用最简便的惯性系（本书除特殊情况外，一律采用这种惯性系）。如图1.2.1所示，质点的质量为 m ，在实验室参考系 S 中受力 F ，加速度为 d^2r/dt^2 ；在另一参考系 S' 中受力 F' ，加速度为 d^2r'/dt'^2 ，按照牛顿第二定律，应有：

$$F=md^2r/dt^2 \quad \text{和} \quad F'=md^2r'/dt'^2 \quad (1.2.1)$$

这样的写法是符合伽利略和牛顿相对性原理的。我们考察一下 S 和 S' 中的 $r=[x, y, z]$ 和 t ; $r'=[x', y', z']$ 和 t' 应有什么关系才有 (1.2.1) 式中两个相同的形式。

在 S' 中测质点的位置有:

$$x'=x+vt, \quad y'=y, \quad z'=z \quad (1.2.2)$$

现将两边对 t' 求导数:

$$\left. \begin{aligned} dx'/dt' &= dx/dt' + v dt/dt' \\ dy'/dt' &= dy/dt', \quad dz'/dt' = dz/dt' \end{aligned} \right\} \quad (1.2.3)$$

再对 t' 求二次导数:

$$\left. \begin{aligned} d^2x'/dt'^2 &= d^2x/dt'^2 + v d^2t/dt'^2 \\ d^2y'/dt'^2 &= d^2y/dt'^2 \quad d^2z'/dt'^2 = d^2z/dt'^2 \end{aligned} \right\} \quad (1.2.4)$$

显然, 仅当 $t=t'$ 时上三式可变为:

$$x'=x+vt, \quad y'=y, \quad z'=z \quad (1.2.5)$$

$$\left. \begin{aligned} dx'/dt' &= dx/dt + v, \\ dy'/dt' &= dy/dt, \quad dz'/dt' = dz/dt \end{aligned} \right\} \quad (1.2.6)$$

$$\left. \begin{aligned} d^2x'/dt'^2 &= d^2x/dt^2 \\ d^2y'/dt'^2 &= d^2y/dt^2, \quad d^2z'/dt'^2 = d^2z/dt^2 \end{aligned} \right\} \quad (1.2.7)$$

将 (1.2.5)、(1.2.6)、(1.2.7) 式写成矢量形式:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} + \mathbf{v}t; \quad (1.2.8)$$

$$d\mathbf{r}'/dt' = d\mathbf{r}/dt + \mathbf{v}; \quad (1.2.9)$$

$$d^2\mathbf{r}'/dt'^2 = d^2\mathbf{r}/dt^2 \quad (1.2.10)$$

在这个过程中我们不得不承认 $t'=t$, 把它与 (1.2.2) 式写在一起表示成:

$$x'=x+vt, \quad y'=y, \quad z'=z, \quad t'=t \quad (1.2.11)$$

此式便是著名的伽利略变换。

先假定在 S 和 S' 中质量 m 是不变的。这样，对于牛顿第二定律的 (1.2.1) 式，有：

$$d^2\mathbf{r}'/dt'^2 = d^2\mathbf{r}/dt^2 \quad (1.2.12)$$

从而有：

$$\mathbf{F}' = \mathbf{F} \quad (1.2.13)$$

由以上这些公式，我们看一下其中所包含的物理内容。

一、时空的均匀性和对称性

把空间和时间作为物理量，(1.2.11) 式是分别从 S' 和 S 上测量得到的物理量之间的联系，这是极为重要的，它把两个不同惯性系对时空测得的结果联系起来。这种联系在数学上叫作坐标变换，它的物理内容既深刻又丰富。

1. 有一个不引人注目的事实，但却很重要，这就是：力学定律在任何地方都不变，可谓“放之四海而皆准”，它的深刻物理含意是：空间是均匀的。正是由于人们事先承认了这一前提，才有 S 和 S' 的空间测量值 (x', y', z') 和 (x, y, z) 之间的简单的线性关系。还有一个不引人注目但又很重要的事实：力学实验无论朝着哪个方向，力学定律都是不变的。它的深刻含意是：空间是各向同性的，换句话说，即空间沿各个方向都是均匀的。这种说法在 y 和 z 方向上是很显然的，而沿 x 方向就需要进一步讨论，因为 $x' = x + vt$ 式说明必须讨论时间。

2. 力学定律无论何时都是不变的，从来没有变过，永远不变。力学定律不随时间而变，这又是一个不引人注目但又很重要的事实。它的深刻物理含意是：时间也是均匀的。

时间均匀流逝,这是牛顿力学中的一条基本前提,是(1.2.11)中第一式成立的前提之一,只有这样才能保证空间沿 x 方向也是均匀的。无论是在 S 中还是在 S' 中都是如此。

3. S' 中的 x', y', z', t' 都是相互无关的,相互独立的;同样, S 中的 x, y, z, t 也是相互无关的,相互独立的。这两个惯性系上的时间和空间都构成了数学上四维的抽象空间,而空间与运动(v)有关,时间 t (或 t')则与运动无关。时间测量与运动无关的深刻含意,我们将在下面专门讨论。

这些便是人们常说的牛顿力学的时空观,也常被人们说成是绝对时空观。所谓“绝对”是一层不变的意思,是指与运动无关的意思。其实(1.2.11)中的第四式仅反映了时间的这种绝对性。而空间位置的测量并非不变,即 $r \neq r'$ 。但是如果对空间中确定两点的距离进行测量,则与运动无关,例如测量一个刚性杆的两端位置。在 S' 和 S 中分别测得 r_1, r_2 和 r_1', r_2' 。这个杆的长度为:

$$|r_2' - r_1'| \quad \text{和} \quad |r_2 - r_1| \quad (1.2.14)$$

或:

$$\begin{aligned} & [(x_2' - x_1')^2 + (y_2' - y_1')^2 + (z_2' - z_1')^2]^{1/2} \quad \text{和} \\ & [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (1.2.14)$$

由(1.2.12)式有:

$$\left. \begin{aligned} x_2' &= x_2 + vt \\ y_2' &= y_2 \\ z_2' &= z_2 \end{aligned} \right\} \text{和} \left. \begin{aligned} x_1' &= x_1 + vt \\ y_1' &= y_1 \\ z_1' &= z_1 \end{aligned} \right\} \quad (1.2.15)$$

将(1.2.15)代入(1.2.14)有:

$$|r_2' - r_1'| = |r_2 - r_1| \quad (1.2.16)$$