

相对论 来龙去脉

| 陈昌康 —— 编著

R e l a t i v i t y |

O r i g i n s

t h e

i n

a n d

| o u t s



海峡出版发行集团 | 福建科学技术出版社
THE STRAITS PUBLISHING & DISTRIBUTING GROUP | FUJIAN SCIENCE & TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

相对论来龙去脉

R e l a t i v i t y I

O r i g i n s

t h e

i n s

a n d

I o u f s

陈昌康——编著



海峡出版发行集团

THE STRAITS PUBLISHING & DISTRIBUTING GROUP

福建科学技术出版社

FUJIAN SCIENCE & TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

图书在版编目 (CIP) 数据

相对论来龙去脉/陈昌康编著. —福州: 福建科学技术出版社, 2018. 6

ISBN 978-7-5335-5566-5

I. ①细… II. ①陈… III. ①相对论—研究 IV.
①O412

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 038983 号

书 名	相对论来龙去脉
编 著	陈昌康
出版发行	海峡出版发行集团 福建科学技术出版社
社 址	福州市东水路 76 号 (邮编 350001)
网 址	www.fjstp.com
经 销	福建新华发行 (集团) 有限责任公司
印 刷	福州万紫千红印刷有限公司
开 本	889 毫米×1194 毫米 1/32
印 张	6.75
字 数	155 千字
版 次	2018 年 6 月第 1 版
印 次	2018 年 6 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5335-5566-5
定 价	35.00 元

书中如有印装质量问题, 可直接向本社调换

自序

久仰爱因斯坦大名，受求知欲和好奇心的驱使，借来几本有关相对论书籍，原意只想浏览一下，略知相对论梗概即可。想不到一脚踩进去，就难以自拔。其中许多神奇、怪异、有趣的问题吸引着我，许多疑惑不解的问题纠缠着我，为求得对相对论来龙去脉有个大致的了解，不知不觉在其中消耗了三年多时光。

为了避免忘却，就提笔将三年来的苦读、苦思的心得整理成文，拟作“孤芳自赏”之用。再深入一想，何不多印几本，供几位老友作为“奇文共欣赏，疑义相与析”的素材，我抛砖，引你玉，互相交流、探讨。这样既可激活久违的聪明才智，又可舒畅尘封的豪迈情怀，说不定还能为社会释放出一些正能量，岂不美哉、妙哉！

我原是一名教书匠，退休后寄予学生的厚望之心仍不减，时刻总想掏心置腹将自己所知献给他们，以此激发他们的求知欲、创新精神和探究能力，期盼他们将来能成为社会有用之才。这一美好愿望激励我将原有的“心得”更上一层楼，拟从三个方面加以拓展：爱因斯坦是如何思考大自然的？相对论的基本原理和基础知识包含哪些方面，其中隐藏着哪些大自然的奥秘？相对论对人类生活、生产能够产生哪些影响？经一年多绞尽脑汁地苦写，今终于成册。自知水平低下，肤浅又无独到见地，为了却上述愿望，别无他法，只好硬着头皮，不自量力地和盘托出，让诸君见笑了！

由于相对论大部分内容与人们通过感觉获得的经验有很大

不同，因此理解它有一定难度，为了使相对论的基本思想能被中等文化程度的老中青广大读者所接受，笔者在编写过程中力求语言通俗易懂，条理清晰流畅，并尽可能贴近生活实际，使读者有亲切感，让读者能够在轻松愉快的氛围中把握相对论的要旨，而不致陷读者于云里雾里而不知所云。基于如何获得知识方法比知识本身更重要，两者是“渔”与“鱼”的关系，所以笔者用相当的笔墨着力描写爱因斯坦在创建相对论的过程中如何绽放他那非凡而卓越的聪慧之花，其中的思维方式和思考方法对青年朋友将来在探寻大自然奥秘的道路上或许有一定的启迪作用。任何重大理论的创立都与时代背景息息相关，对社会必将产生重大的影响。因此在阐述相对论基本原理时，笔者尽可能注入一些新元素，如核能发电、恒星演化过程、星际旅行、全球卫星定位系统 GPS 等有趣的例子，这既可弥补单纯的科学论述过于抽象、枯燥的缺陷，又能增添时代气息的清新气氛。不过每当逸闻趣事接近尾声时，笔者又每每发出警示，这未免给读者泼了冷水，扫大家的兴。但这是不得已而为之，因为在现实生活中，做梦易，美梦成真难，任何奇思妙想要变成现实，都是辛勤劳动、流血流汗的结果，真可谓“一份耕耘，一份收获”。

笔者上述的良苦用心，能否如愿以偿，只好等待时间的考验了。

本书可作为非物理专业大学生以及中学生的课外读物，也可作为中学理科教师举办科普讲座的素材之用，还可供老年朋友作为茶余饭后的精神甜点，以期增进全民的科普知识，提高全民的科学素养。

由于笔者水平有限，书中错误和疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

2017 年秋

引言	(1)
----------	-----

▶▶▶ 第一章

聊聊狭义相对论	(5)
---------------	-----

第一节 狭义相对论的基石是怎样奠定的	(5)
--------------------------	-----

一、爱因斯坦之前的经典力学理论	(5)
-----------------------	-----

二、爱因斯坦之前的电磁理论	(14)
---------------------	------

三、爱因斯坦是怎样奠定狭义相对论的基石的	(22)
----------------------------	------

第二节 狭义相对论的大厦是怎样建成的	(37)
--------------------------	------

一、时间的延展性	(37)
----------------	------

二、空间的收缩性	(52)
----------------	------

三、洛伦兹变换——时空的纠缠性	(59)
-----------------------	------

四、质速关系式——质量的肥胖性	(74)
-----------------------	------

五、质能关系式——质量和能量的一体两面性	(79)
----------------------------	------

▶▶▶ 第二章

聊聊广义相对论 (97)

第一节 广义相对论的基石是怎样奠定的 (98)

一、狭义相对性原理是如何推广至非惯性系的 (98)

二、如何建立广义相对论的两大公设 (101)

第二节 广义相对论的大厦是怎样建成的 (109)

一、引力场隐藏着哪些特性 (109)

二、万有引力与弯曲空间 (122)

三、爱因斯坦的场方程 (131)

结束语 (141)

▶▶▶ 第三章

聊聊宇宙的演化历程——诞生、成长与归宿

..... (153)

第一节 宇宙是怎样形成的 (153)

一、哈勃的惊人发现 (153)

二、伽莫夫宇宙大爆炸理论 (158)

三、“3K 宇宙微波背景辐射”的发现 (164)

第二节 宇宙之命运——宇宙的现状和未来 (165)

一、宇宙的年龄有多大 (166)

二、宇宙的范围有多广 (166)

三、宇宙有边际吗 (168)

四、宇宙是无限大的吗 (168)

五、宇宙有末日吗 (173)

▶▶▶ 附录部分

附录一	伽利略变换式中的速度相加原理推导	(179)
附录二	迈克尔逊-莫雷的光干涉仪两臂光行程时间差推导	(180)
附录三	洛伦兹动尺收缩效应推导	(181)
附录四	洛伦兹变换式的数学推导	(182)
附录五	质速关系式 $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ 的推导	(189)
附录六	质能关系式 $E = mc^2$ 的推导	(192)
附录七	太阳生命的历程	(195)
附录八	闵可夫斯基时空图	(199)
附录九	伽利略比萨斜塔实验关于惯性质量与引力质量 等效问题	(201)
附录十	迈克尔逊光干涉仪的光干涉条纹移动的测定 ...	(202)
参考文献		(205)
致谢		(207)

引言

在 19 世纪与 20 世纪之交的 20 年间，爱因斯坦凭借他那超凡卓越的思维和坚韧不拔的意志，不畏权威，突破常识，揭开了被表象所遮掩的时间、空间以及万有引力的最本源真相，并辅以设计精巧且富有创意的假想实验，让浓雾弥漫的“庐山真面目”一步步清晰地浮现在世人面前，伟大不朽的科学巨著——《狭义和广义相对论》也从此横空出世、降临人间。

一百多年前，年轻的爱因斯坦依据伽利略-牛顿的“绝对时空”观念和“速度相加原理”，提出一个奇思妙想：如果我乘坐速度不同的宇宙飞船（譬如光速的 0%、10%、50%、90%）去探测光的速度，并以我自己为参照物，在我看来，光应该以越来越慢的速度（光速的 100%、90%、50%、10%）离我而去；当我的飞船速度达到光速，我一定能追上光，并能与光并驾齐驱，光不运动了，如果我伸出手，我一定能抓住一大把光子。但是麦克斯韦方程组不允许光处于静止状态，不论人们以何种速度相对光运动，光永远以每秒 30 万公里的速度离开你或迎你来。事实也是如此，从盘古开天地至今，没有任何可靠的报告说过人们能够赶上光，并抓住了光子。这表明麦克斯韦是对的。此时，不停搔头的爱因斯坦反身自问：我的推理到底在哪里出了差错？对此，爱因斯坦首先关注物理学上最普通的速度概念，速度无非是物体运动所移动的距离与在该距离所耗费的时间的比值（ $V=s/t$ ）。经过缜密的分析对比，爱因斯坦得出如下的结论：其一，牛顿的“绝对时空”观念是错的。其二，处于不同运动状态的观测者，对于同一物理事件，所测量的时

间间隔和空间距离的结果是不可能相同的。因为彼此的运动速度各不相同，其时钟的指针跳动是不同步的，测量空间距离的准绳（“量尺”）长短也不可能等同，因而测量的时间和空间的数值肯定不一样。其三，这是最关键也是最易被人疏忽的一点，时间与空间，两者之间存在着精确的互补关系，即时缓效应和尺缩效应必须相互抵消，这样才能保证光速绝对相同，永远等于 c 。

爱因斯坦弄清了时间和空间具有相对性和互补关系的本质后，一切就显得顺理成章起来，狭义相对论也从此扬帆起航了。在此之前，人类为弄清时间和空间本质，奋斗了数百年，除了爱因斯坦外，几乎所有人都被时间和空间所打倒，可见爱因斯坦的成功来之不易。随后，爱因斯坦依据狭义相对论的两大公设，导出一系列推论。这些推论虽然与我们日常的生活经验不相符合，但却是千真万确且激动人心的，卫星定位导航系统 GPS 和世界各地核电站就是最好的证据。

1905 年爱因斯坦创立了狭义相对论，并取得巨大的成功之后，他却马不停蹄地去挑战牛顿的万有引力理论，因为万有引力定律的公式中有两点令他非常不安：其一，这种神秘莫测的力是怎样产生的？其二，物体两点间不论相距多么遥远，引力都能瞬间即达，意味着引力传递速度可以超过光速。这直接触犯了光速是宇宙万物运动速度上限的天条。因此，他别无选择，只能对牛顿引力论说：“不！”故事是这样展开的。

据说某天，牛顿坐在苹果树下，一颗熟透的苹果砸到他的头顶，这诱发了他发现万有引力定律。他认为宇宙万物的运动规律均受万有引力所支配。此时此境，如果熟透的苹果上居住着具有人类思维的微型人，他的第一个反应是：他失重了，仿佛身处太空深处飘飘欲仙、毫无被吸引的感觉。他顿悟，牛顿是在胡说八道，根本就不存在所谓的万有引力。并当众宣布：不是苹果砸了牛顿的头，而是牛顿的头以 980 厘米/秒^2 的加速度撞上了苹果。这使爱恩斯

坦意识到：引力与加速度运动之间潜藏着某种深层次的关联。对此，爱因斯坦深感有重新审视 300 年前伽利略在意大利比萨斜塔上的实验必要，因为伽利略放下手中不同重量、不同材料的小球均以同一运动的轨迹、同时落地的现象背后肯定隐藏着天大的奥秘。尤其是由此导出的惯性质量与引力质量在数值上严格相等的事实，正击中了他的思维核心。经过一步步合情合理的推理，最终他得出这样惊人的结论：引力与加速度运动是同一回事，引力与加速度是等价的，是一枚硬币正反两面而已。爱因斯坦据此建立了“等效原理”，这一原理曾被物理学家誉为理论物理学上的一颗明珠。

引力被否定了，那么是什么力量导致不同重量、不同材料的小球以同一运动轨迹并同时落地呢？我们知道，受几何因素驱使的物体运动轨道是与物体的重量和组成无关的。具有敏锐洞察力的爱因斯坦已深刻预感到：小球们很可能仅仅受制于环境的几何因素，引力表象很可能是一种几何效应。这个推理过程后来被爱因斯坦称为“我一生中最快乐的思考过程”。随后，爱因斯坦再依据水星近日点每百年进动 43 弧秒以及恒星光线掠过太阳发生 1.75 秒偏转的天文观测事实，进一步促使他彻底地摆脱万有引力的思想束缚，他已有足够理由断定：牛顿的万有引力理论已遭遇了滑铁卢。所有这一切足以激发爱因斯坦在思维上作出惊人的跳跃：环境决定一切，宇宙万物在不受力的情况下，其运动走向完全取决于空间的几何形状，就像长江三峡河水只能顺势奔流一样，光线弯曲行进正是这种弯曲时空的反映。

那么是什么力量造成空间的弯曲呢？爱因斯坦认为，物质的质量和能量对空间的影响，就像四角被拉紧的橡胶布上面放一个铁球而使橡胶布弯曲凹陷那样发生了弯曲，在蜷曲空间穿行的任何事物，如八大行星在太阳周围运动那样只能沿着弯曲的轨迹运动。简言之：宇宙万物的运行规律均受制于弯曲时空环境，非万有引力所为。所谓万有引力其实是由时间和空间的结构本身特点而产生的几

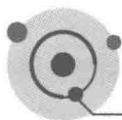
何效应。这就是爱因斯坦引力理论的本质。

以上论述是物理学思想，而物理学的语言是数学。爱因斯坦借助黎曼几何学，巧妙地使物理学几何化，又使几何学物理化，并于1915年完成了爱因斯坦场方程和自由质点运动方程，从而圆满地实现了物质的质量和能量是如何使时空发生弯曲，弯曲的时空又如何决定着物质在其中的运动。这就是广义相对论的真谛。

至此，爱因斯坦版的弯曲时空理论成功地取代了牛顿的万有引力定律，成为迄今为止描述宇宙万物的运动规律最完美的理论。

紧接着，爱因斯坦开始尝试将他的广义相对论应用于其他领域，他于1917年发表了论文《广义相对论的宇宙学探讨》，力图运用广义相对论的概念构建宇宙模型，这标志着爱因斯坦为创建宇宙学大厦奠定了坚实的基础。随后一百多年间，经广大天文学家们锲而不舍顽强拼搏，特别是哈勃太空望远镜升空后，宇宙学在理论上有了重大的发展，黑洞、宇宙膨胀以及宇宙演化历程等领域的探索都获得惊人的突破。其间爱因斯坦也有过失误，但他仍不失为宇宙学奠基者和开拓者的主帅角色。

为了人类的科学事业，爱因斯坦历尽常人所无法忍受的艰辛，如此一路走来，这不能不激起人们心中的涟漪，由衷地喊出内心深处的赞叹：“伟哉，爱因斯坦超凡思维！伟哉，爱因斯坦！”



第一章 聊聊狭义相对论

第一节 狭义相对论的基石是怎样奠定的

一、爱因斯坦之前的经典力学理论

爱因斯坦狭义相对论的核心内容是关于时间和空间的描述，以及时间和空间的结构是如何影响甚至决定物理学定律的科学论断。在我们还不理解爱因斯坦对于时间和空间这两个概念有着非凡的见解和精辟的解释之前，仔细思考一下时间和空间到底意味着什么？这是学习爱因斯坦相对论至关重要的一步。现在让我们沿着亚里士多德、伽利略、牛顿等这些科学巨匠们的足迹前行，预先领会一下他们是如何定义时间和空间的。

（一）亚里士多德的绝对时空观念

在亚里士多德-托勒密的理论中，地球处于宇宙的中心，永远保持静止不动状态，而太阳、月亮以及其他恒星和行星等所有天体都是围绕着地球旋转。根据这个观点，如果以地球为中心，用虚拟的三维立体坐标（例如笛卡尔三维直角坐标 x 、 y 、 z ）将整个宇宙空间标注起来，这样所有的物体就有了自己的确定位置。如果某一物体在这个空间里随着时间的变化而改变了位置，我们就说这个物体处于绝对运动中，并由此可以确定它的绝对运动速度。如果这个物体在这个空间里所处的位置不随时间而变化，我们就说这个物体处于绝对静止状态。这个巨大的盒子般的空间就是亚里士多德的绝对空间。

（二）哥白尼—伽利略—牛顿的时空观念

到了公元 2 世纪，托勒密站在地球上对着夜空繁星进行数月的

仔细观察后，发现有五颗星星“行为不轨”，不是从星空的一端平稳地运动到另一端，而是画出一些螺旋形的运动轨道，它们被称为“游荡之星”。这些星星的怪异运行现象，直到 16 世纪中叶才被哥白尼揭开。从此，哥白尼创立的“日心说”取代了“地心说”。“日心说”的主要内容是地球并不是宇宙的中心，它只不过是所有围绕着太阳公转的行星之一。地球相对于太阳的公转速度为每小时 107826 公里，同时还在不停地自转。人们为了保持亚里士多德的观点所勾勒的空间框架，建议把设在地球上的中心搬到太阳上去。遗憾的是，太阳也不是静止不动的，它本身也是处在距离银河系中心 24140 兆公里的轨道上以每小时 782141 公里的速度向与其他星系相反的方向奔跑。这样一来，我们就无法决定该把这个虚拟的三维坐标系统的中心放在哪里。无法确定这个中心，也就无法表达任何物体的准确位置，自然也就无法判断什么是“静止不动”，什么是“正在运动”。既然我们无法从实践中判断，甚至无法从理论上定义什么是“静”、什么是“动”，这样“绝对空间”“绝对运动”“绝对速度”等概念就成了多余，也就没有任何存在的意义了。

现在我们所知道的全部只是物体之间的相对位置，也就是说，我们所说的物体“静止”或者“运动”总是在有参照物的情况下，才变得有意义。简言之，物体的“静止”或“运动”是相对于参照物而言的。以我们日常生活中所熟悉的火车车厢和铁轨路基为例，我们可以用下列两种方式来表述这里所发生的运动。

(1) 车厢相对于路基而言是运动的。

(2) 路基相对于车厢而言是运动的。

在 (1) 中是把路基当作参照物，在 (2) 中是把车厢当做参照物。究竟要选择哪一种物体作为参照物来考察另一种物体运动，在原则上无关紧要，都是允许的，主要视我们所要观察的运动比较容易观察和描述为主。这就是人类对运动相对性的粗浅认识。

直到 17 世纪中叶，意大利天文、物理学家伽利略才深入研究

了有关运动相对性问题，但他着重探讨的是关于力学规律在不同的彼此之间作相对运动的观察者眼里究竟是什么样子。他发现只要处于匀速运动的系统中，观察者们看到的所有力学规律都保持不变，形式完全相同。比如，松开手中的石头，石头将永远是垂直落地。无论他是在家里，还是在时速为 200 公里的疾驰火车上。如果把一个实验室里所做的实验搬上火车，只要火车是匀速行驶，这个实验所得出的结果和实验室里得出的结果完全一致。为了让人们更容易接受他的观点，他在 1632 年出版的《关于两大世界体系的对话》一书中巧妙地通过塞尔维特斯所说的一段生动而精辟的话来表述他的观点。塞尔维特斯是这样说的：“……设想把你和你的朋友关在一只大船的舱板下最大的房间里，再让你们带上几只苍蝇、蝴蝶和其他小飞虫。再拿一只盛满水的大桶，里面放一些小鱼。再把一只瓶子挂起来，让它可以一滴一滴地把水滴出来，滴入下面放着的另一只窄颈瓶子中。在船停着不动时，你留神观察：小虫都以等速向舱内各个方向飞行，鱼向各个方向随便游动，水滴全部落到下面所放的瓶子中。你把任何东西扔给你的朋友时，只要距离相等，向这一方向不必比另一方向用更多的力，你双脚齐跳，无论向哪个方向跳过的距离都相等。当你仔细地观察这些事情后，再使船以任何速度前进，只要运动是匀速的，也不忽左忽右地摆动，你将发现，所有上述的现象丝毫没有变化，你也无法从其中任何一个现象来确定，船是在运动还是停止不动……这种等效（等价）关系产生的原因是：船的运动是船中包括空气在内的一切事物所共有的，我的意思是假定这些事物都被关在房间里……”

塞尔维特斯（代表聪明的外行）：“虽然我在航海时从来没有想过要实验这些现象，可我相信它们会像你所说的那样发生。为了证实这一点，我想起了我在船舱里经常不知道船究竟是在运动还是静止不动，有时我猜想船是朝某个方向行驶，其实它是朝另一个方向走。所以我承认并确信前面提出的所有证明相反说法的实验都是毫

无价值……”这就是伽利略的相对性原理。伽利略当时提出的相对性原理是仅对力学实验而言的，所以在物理学史上被称为力学相对性原理。其主要内容是：在所有匀速运动系统中，一切力学规律都完全相同。现在人们把所有处于匀速运动状态的参照物系统称为惯性参照系，简称惯性系；把处于变速运动状态的参照物系统称为非惯性参照系，简称非惯性系。这样我们又可以把伽利略的相对性原理改写为：在所有惯性系中，一切力学规律都一样。

在伽利略相对性原理中，我们可以看出有如下两个特性。

(1) 等效性：对于力学规律，在所有惯性系中都是等效的、一致的、平等的，也就是说，在不同惯性系中，一切力学规律表现的形式完全相同。

(2) 不可区分性：处于惯性系中的观察者，无法从任何表象中判断自己是处于静止状态，还是处在运动之中，也无法通过任何物理手段来测量其运动速度。比如地球相对于太阳的公转速度为每小时 107826 公里，太阳围绕着银河系中心以每小时 782000 公里的速度旋转着……我们这些地球的子民实质上既跟随着地球又跟随着太阳一起绕着银河系中心旋转，虽然这个速度大得惊人，但只要其速度恒定不变，我们永远也不会觉察出自己是处于运动之中，也无法测得自己的运动速度，总觉得自己是稳稳当当地站立在地面上。这也是人们在匀速行驶的卧铺车厢中可以和在家中床铺上一样熟睡的原因。值得指出，经典力学的全部论述都是基于这个观点之上。同时，它也是现代物理学的一块奠基石。

在学习相对论过程中，我们还必须注意到“运动相对性”“相对性原理”和“相对论”三者之间的区别和联系，不可混为一谈。“运动相对性”指的是：每一种运动都只能被认为是相对于某参照物而言的，绝对静止或绝对运动是不存在的。而“伽利略相对性原理”，它主要是表述所有力学规律在不同惯性系中表现的形式皆相同。反过来说，所有惯性系，不论它们的运动状态如何——处于静

止状态或是正在匀速运动中，对于力学规律的描述都是等效的、一致的。“相对性原理”可以不加证明而直接应用，它是作为一个假设的前提，去证明或者去推导其他理论的。也可以这样说，通过“狭义相对性原理”（以后我们将详细说明该原理是伽利略力学相对性原理的推广）推导而得出“狭义相对论”的许多推论。可见“狭义相对论”的结论是“狭义相对性原理”的衍生物。

伽利略创立了“力学相对性原理”的同时，还推出一套与之相对应的数学式，来表述不同惯性系之间对于同一个物理过程的空间坐标和时间坐标相互变换的规则。

如图 1 所示，有两个惯性系 K 和 K' ，惯性系 K' 相对于惯性系 K 以速度 v 沿着 x 方向作匀速直线运动，在 y 和 z 方向上，坐标轴保持平行。开始时 K 和 K' 的坐标轴重合在一起。此时有一质点 M 停留在 K 和 K' 的坐标系中，其空间坐标分别以 (x, y, z) 和 (x', y', z') 表示之。经过一段时间，它们的时钟指针指向 t 和 t' 。质点 M 在两个坐标系的空间坐标和时间坐标分别为 (x, y, z, t) 和 (x', y', z', t') 。

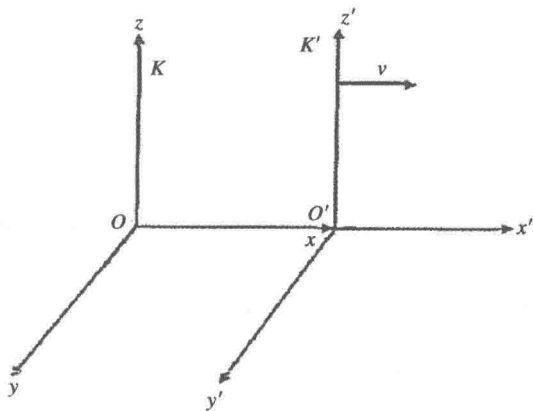


图 1 两个惯性系可沿 $x-x'$ 轴的方向以匀速 v 做相对平动