

美国M·I·T·物理学导论丛书

A·P·弗伦奇 著

牛顿力学

3

郭敦仁 何成钧 译

人民教育出版社

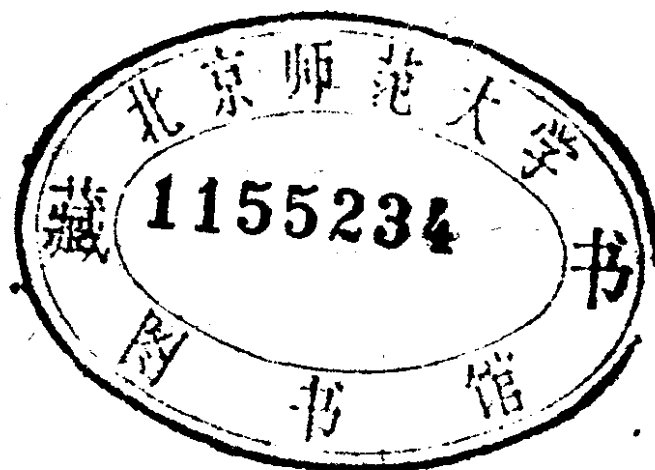
美国M.I.T.物理学导论丛书

牛 顿 力 学

3

A·P·弗伦奇 著
郭敦仁 何成钧 译

5911/02/15



人民教育出版社

内 容 简 介

本书根据美国 W. W. Norton & Company, Inc. 出版的 A. P. French 著《牛顿力学》(Newtonian Mechanics)一书 1971 年版译出。

《牛顿力学》为美国麻省理工学院教育研究中心的《M. I. T. 物理学导论丛书》(M. I. T. Introductory Physics Series)中的一卷。中译本按原书的三个部分分成三册出版,第一册为“牛顿动力学入门”;第二册为“经典力学的运用”;第三册为“专题”,第三册包括三章:惯性力和非惯性系;有心力作用下的运动;广延系统和转动动力学,以及附录。本册还包括本书第一、第二、第三册的全部习题的答案。

本书可作为高等学校物理学课程的教学参考书,也可供有关科技人员参考。

美国 M·I·T·物理学导论丛书

牛 顿 力 学

3

A·P·弗伦奇 著

郭敦仁 何成钧 译

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 8.375 字数 190,000

1982 年 2 月第 1 版 1983 年 5 月第 1 次印刷

印数 00,001—16,300

书号 13012·0720 定价 0.77 元

目 录

第三篇 若干专题

第十二章 惯性力和非惯性系	3
§ 1 从无加速参照系中观察到的运动	4
§ 2 从一加速参照系中观察到的运动	5
§ 3 加速参照系和惯性力	7
§ 4 加速度计	11
§ 5 加速参照系和重力	15
§ 6 离心力	18
§ 7 离心机	23
§ 8 科里奥利力	26
§ 9 旋转木马上的动力学	31
§ 10 在一转动参照系中的普遍运动方程	32
§ 11 作为一转动参照系的地球	37
§ 12 潮汐	43
§ 13 潮汐高度; 太阳的作用	49
§ 14 寻求一基本惯性系	51
§ 15 关于惯性的起源的揣测	56
习题	61
第十三章 有心力作用下的运动	71
§ 1 问题的基本特点	71
§ 2 等面积定律	73
§ 3 角动量守恒	76
§ 4 有心力运动中的能量守恒	79
§ 5 有效势能曲线的应用	81
§ 6 有界轨道	84
§ 7 无界轨道	85
§ 8 在一反平方力场中的圆轨道	89

§ 9 圆轨道的微扰·····	91
§ 10 行星的椭圆轨道·····	94
§ 11 由椭圆推导出反平方定律·····	100
§ 12 椭圆轨道: 解析处理法·····	102
§ 13 在一椭圆轨道中的能量·····	107
§ 14 地球表面附近的运动·····	109
§ 15 行星际的输运轨道·····	110
§ 16 根据初始条件计算轨道·····	112
§ 17 一族相关联的轨道·····	114
§ 18 作为两体问题的有心力运动·····	116
§ 19 从力的定律推算轨道·····	118
§ 20 卢瑟福散射·····	123
§ 21 散射截面·····	128
§ 22 一个历史性的简述·····	132
习题·····	136

第十四章 广延系统和转动动力学 ····· 147

§ 1 多粒子系的动量和动能·····	147
§ 2 角动量·····	152
§ 3 作为一基本量的角动量·····	157
§ 4 角动量守恒·····	158
§ 5 广延物体的转动惯量·····	163
§ 6 有关转动惯量的两个定理·····	168
§ 7 转动物体的动能·····	172
§ 8 角动量守恒和动能·····	176
§ 9 扭转振动和刚性摆·····	181
§ 10 在力和转矩共同作用下的运动·····	185
§ 11 冲力和转矩·····	190
§ 12 回转运动的背景·····	193
§ 13 稳定进动的回转仪·····	200
§ 14 关于进动的补充·····	203
§ 15 导航回转仪·····	206
§ 16 作为回转仪的原子和原子核·····	208

§ 17 用 $F=ma$ 来说明回转运动	210
§ 18 章动	214
§ 19 二分点的进动(岁差)	217
习题	223
附 录	231
§ 1 米制单位	231
§ 2 换算因数	232
§ 3 一般常数	234
参考书目	235
一些经典著作	235
传记	236
强调历史方面和哲学方面的著作	237
天文学方面	239
一些一般性教科书	241
力学教科书	241
工程力学教科书	243
专门课题	244
习题答案	246

第三篇

若干专题

在开始学习力学时，人们有这样一种印象：在科学的这个分支里一切都是单纯的、带根本性的而且一成不变的。很少有人去怀疑存在着一个重要的、将近三百年没有人注意到的线索，这个被忽视的线索是和力学的基本概念之一——质量——有关的。

A. 爱因斯坦和 L. 因费尔德，
《物理学的演化》(1938)。



第十二章 惯性力和非惯性系

设想你坐在一辆汽车里，在很平滑的道路上行驶。你正抱着一个沉重的包。车在行动着，但从你所坐的地方你看不到车速计。突然，你有了这么一个感觉：这个包不再仅仅是压在你的膝上，而且还开始水平地向后推你。尽管除了你以外这包没有同任何物体接触，当你抱着它使它相对于车和你不动时，这效果就象是有一个力作用于它并传递给你一样。如果你不把它这样抱住，那它就真会被推向后面。你注意到从车顶上由一条原先是竖直的线悬挂着的吉祥物正是这样被推向后面了。

你怎样来解释所观察到的这个现象呢？如果你对于这类现象从前有过经验的话，你会毫不迟疑地说这是与汽车的速度增加（即一正加速度）相关联的。如果你对牛顿定律有充分的理解，那么尽管这是你第一次经验到的这种现象，你也会得到同样的结论。汽车的加速度要求一切同它相联系的物体有一加速度；根据 $F=ma$ ，这个包的加速度需要你的手给它一个大小恰当的力。然而，感觉到的却象是包裹受到某一外加的力——“惯性力”——只要企图改变一个物体的运动状态，它就起作用。

这些外加的力构成重要的一类力。在傅科摆、高速离心机的作用、宇航员在发射过程中受到的所谓 g 力，以及旋风在北半球和南半球所采取的旋转方向这一类现象中，起作用的就是这类力。然而，在以下的意义上，这些力都有同一独特之点，即无法把它们的来源追溯到某个其他物理体系，而对所有以前考虑过的力，这却是可能的。例如，引力、电磁力和接触力的来源是别的质量、别的电

荷、或者同别的物体的“接触”。但是当一个物体被加速时所出现的附加力却没有这样的物理客体作为其来源。这些惯性力是不是真实的力呢？这问题，以及它的答案，是与我们用以分析运动的参照系的选择紧紧相连的。因之，让我们从一个无加速参照系的角度对动力学作一回顾来开始这一分析。

§ 1 从无加速参照系中观察到的运动

一个无加速的参照系属于我们称之为惯性系的那一类参照系。在第六章中阐述动力学的基本思想时，我们曾看到，这些参照系（伽利略的惯性定律在其中成立）具有独特的重要意义。我们还看到过，如果认准了一个这样的参照系，任何别的、相对于它具有任意恒定速度的参照系也是惯性的，而且我们有关作用于一个物体的力的推断在两者中是一样的。

如我们所知，作为一个好的一级近似，地球表面就确定着一个惯性系。因之，一切在地球上以恒定速度运动的任何系统也是如此。伽利略本人是对这一事实表示出明确认识的第一个人，而他所讨论过的一个方面对于我们现在的起点是有用的。在他的《关于两个世界体系的对话》中，他支持哥白尼的太阳系观点而反对托勒密，指出从一条船的桅杆顶上落下的一石块总是落在桅杆的脚下，不管这条船是否在动。伽利略由此论证说，一个落体的竖直路径并不足以使人得出地球是静止不动的结论。这里是在一个相对于地球从静止而下落的物体和另一个相对于船从静止而下落的物体之间进行比较。如果我们只考虑一个相对于一运动着的船从静止而下落的物体，它的路径在以船为参照系中是竖直的，而在以地球为参照系中则是抛物线。更普遍一点说，如果我们考虑一个相对于地球以任意速度抛出的物体，它随后所走的路径从不同的惯性参照系中来看会具有各不相同的形状（参看图 12-1），但所有的都

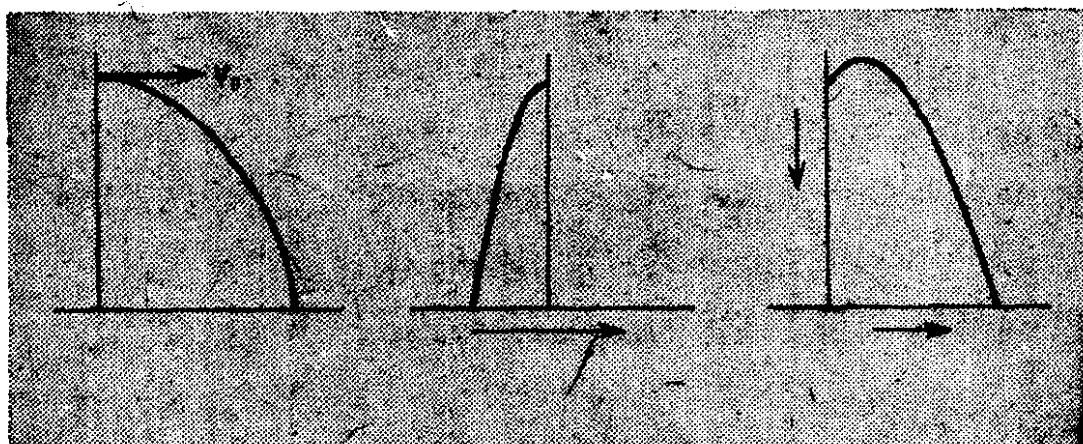


图 12-1 (a) 地球表面上观测到的、在重力作用下的抛物线轨迹，初速 v_0 在水平方向。(b) 在水平速度大于 v_0 的参照系中观察到的同一运动。(c) 在既有水平速度又有铅直速度的参照系中观察到的同一运动。

是抛物线，而且分析起来全都表明落体具有竖直加速度 g ，来自重力 $F_g (=mg)$ 。现在我们把这结果同人们在一自身具有加速度的参照系中所发现的情况对比一下。

§ 2 从一加速参照系中观察到的运动

假定在一相对于地球表面有恒定水平加速度的参照系中，一物体从静止而下落。我们来看看它随后的运动相对于地球和相对于加速系会是什么样子。我们取这加速度的方向作为正 x 轴，并竖立两个直角坐标系：相对于地球静止的 S 和固定于加速参照系的

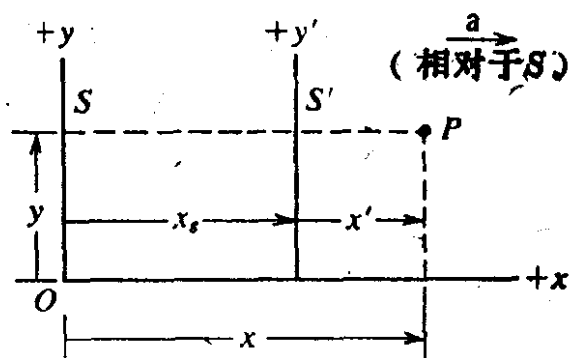


图 12-2 在两个作加速相对运动的参照系中，一粒子的诸坐标之间的关系。

S' (图 12-2). 令这两个参照系的原点在 $t=0$ 时重合, 并假定在这时刻 S' 相对于 S 的速度是 v_0 . 两坐标系的纵坐标以向上为正, 物体是在 $t=0$ 从静止的位置 $x=x'=0, y=y'=h$ 下落的.

在 S 和 S' 中看起来轨迹会是什么样子呢? 对于在 S 中的观察者来说, 答案是我们已知的. 对于他来说, 这物体是在以一个初始水平速度 v_0 而自由下落的[图 12-3(a)]. 因之我们有

$$(\text{在 } S \text{ 中观测到的}) \begin{cases} x = v_0 t \\ y = h - \frac{1}{2} g t^2 \end{cases}$$

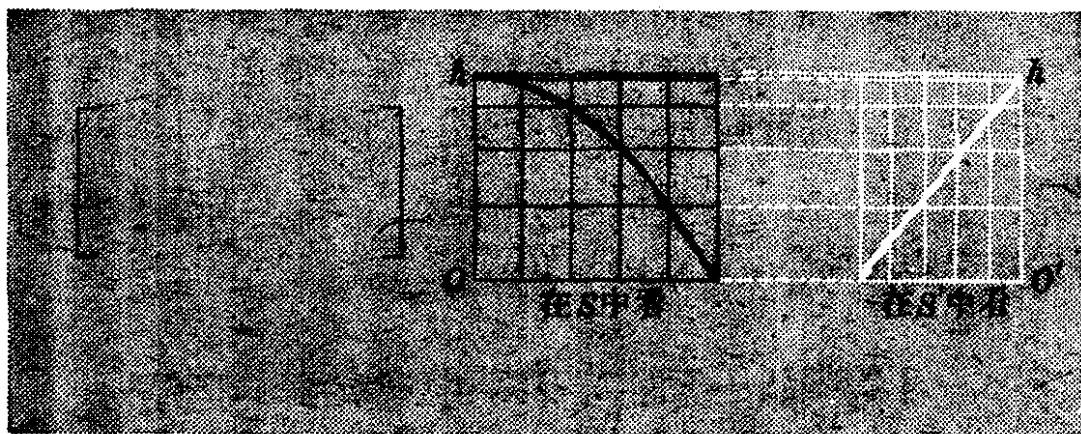


图 12-3 (a) 在重力下一粒子的抛物线轨迹, 参照系为地球. (b) 同一运动, 在具有恒定水平加速度的 S' 参照系中去看.

这两个方程唯一地确定物体在 t 时刻的位置, 但要描述在 S' 中观测到的运动, 我们必须把这些结果用 S' 参照系中测得的坐标 x' 和 y' 表达出来. 为了转换到 S' 参照系, 我们把下式代入

$$x' = x - x_s$$

$$y' = y$$

其中 x_s 是 S 和 S' 的原点沿 x 轴的距离 (见图 12-2).

我们知道

$$x_s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

把这些值代入,得

$$\text{(在 } S' \text{ 中观测到的)} \begin{cases} x' = v_0 t - \left(v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \right) = -\frac{1}{2} a t^2 \\ y' = h - \frac{1}{2} g t^2 \end{cases}$$

因之,在 S' 中观测到的粒子的路径是一条直线,其方程为

$$x' = -\frac{a}{g}(h - y')$$

见图 12-3(b). 在这加速的参照系中,物体看来不仅有一恒定的向下的加速度分量,而且还有一个在 $-x$ 方向的恒定水平加速度分量,从而使它沿着一条非竖直的直线路径运动. [一个类似的简单例子是第三章中所描述的枪击猴子的故事. 如果我们选择那下落的猴子静止的参照系来描述这些事件,其结果就几乎是不证自明的了. 对这一参照系来说,子弹正好是沿着一条直对猴子的直线飞行,而地面却以 9.8 米/秒^2 加速向上升.]

图 12-3(b)所表示的、不为人们所熟悉的运动并没有什么神秘之处. 它是从一个本身在加速着的参照系去描述普通的自由下落运动的直接的运动学结果. 我们可以充分有效地利用这条完全在 S' 里面测得的路径去揭示这一参照系的加速度,只要真正的竖直方向为已知. 但是,通过动力学的方法来了解这加速度却具有更大的意义. 这正是下一节所要讨论的.

§ 3 加速参照系和惯性力

从上面所说,惯性系显然有一个特殊的地位. 所有的惯性系在以下的意义上是等价的,即用动力学实验不可能揭示它们在任何绝对意义上的运动——只有它们的相对运动才有意义. 从这一动力学的等价性就有了被称为牛顿的相对性原理:

没有任何动力学观测使我们能认为一个惯性系比另一个

惯性系更优越. 因而没有任何动力学实验会告诉我们, 我们是否正以一恒定的速度通过空间.

可是, 正如我们刚刚看到的, 两个参照系之间的相对加速度却是以动力学方法可以侦断出的. 正如在加速参照系中观测到的, 物体具有意料所不及的加速度. 因之, 由于牛顿定律在力和加速度之间建立了连系, 我们就有了一个定量的根据, 从测得的加速度来计算相关联的惯性力的大小. 反之, 更为重要的是, 我们有了一个动力学根据, 从有关的惯性力推断出一相应加速度的大小. 这是所有称为加速度计的仪器的基本原理. 它们是根据某个物理质量的惯性而工作的.

为了使分析清楚明白, 我们考虑一粒子 P 相对于上一节所讨论过的、并在图 12-2 中表示出来的那两个参照系(一个惯性系 S 和一加速系 S')的运动. 我们还是有

$$x = x' + x_s$$

$$y = y'$$

因之, 在这两个参照系中测得的、 P 的速度分量由下式给出

$$u_x = u_x' + v_s$$

$$u_y = u_y'$$

其中 v_s 在任何特定时刻都等于 dx_s/dt . 如果 S' 有一恒定的加速度, 我们可以令 $v_s = v_0 + at$, 但是加速度恒定这条件对于我们的分析是完全不必要的.

对这些瞬时速度求微商, 我们就得到

$$a_x = a_x' + a_s$$

$$a_y = a_y'$$

其中 a_s 是参照系 S' 的瞬时加速度. 虽然我们选择了用笛卡儿分量来开始从事计算, 但是很明显, 一个单独的矢量陈述就把在 S 中测得的、 P 的加速度 $\mathbf{a}$ 和在 S' 中测得的、它的加速度 $\mathbf{a}'$ 以及 S' 本身

的加速度 a_s 联系起来了：

$$a = a' + a_s \quad (12-1)$$

以 m 统乘方程(12-1)，我们认出左方给出作用于 P 上的(总的)实在力 F ，因为这决定着在一惯性系中测得的它的加速度的实在原因。这就是说，在 S 系中

$$F = ma \quad (12-2)$$

但是，利用(12-1)式，我们有

$$F = ma' + ma_s \quad (12-3)$$

我们现在遇到了这个关键性的问题：从在加速系 S' 中作观测的观点，如何解释方程(12-3)？

牛顿的观点——作用于一个物体的合力是加速运动的原因 ($F_s = ma$)——是如此深深铭刻在我们的思维中致使我们在一切时候强烈地要保存这一关系。当我们观察到一个物体在加速运动时，我们把它解释为加在这物体上的力的作用。我们能否为现在这加速参照系找到一个形式上是 $F_s = ma$ 的数学结构呢？能的。把除了 ma' 以外的项都移到左边去，而把这些项作为作用于 m 的力来处理，这样得到一合力 F' ，它正好具有能产生加速度 a' 的正确值：

$$F' = F - ma_s = ma' \quad (12-4)$$

S' 系中的合力因此是由两部分组成的：一个具有分量 F_x 和 F_y 的“实在”力 F ，和另一个等于 $-ma_s$ 的“虚假”力，它来源于这样一个事实：参照系本身具有加速度 a_s 。(12-4)式的一个重要特例是“实在”力 F 为零的情形，这时，在 S' 中观测到的粒子是在惯性力 $-ma_s$ 的单独作用下运动。

(12-4)式所表达的结果并不仅是一个数学戏法。从一个在加速系中的观察者的观点，这惯性力是确实存在的。如果有人在 S' 中企图使一个物体“静止”而用弹簧把它拴着，就会观察到弹簧被

拉长或压缩了,正好提供一个力来抵消惯性力。因之,把这样的力说成是“虚假的”是有点使人误解的。人们期望有一个合适的标记以便区别惯性力和那些来自于真正的物理的相互作用的力,因而常用“赝力”这个词。然而,即使如此,对于真正处于加速系中的某个人所感受到的这种力来说,这还是不太公道的。也许最初的、纯粹是技术性的名词“惯性力”仍是最好的描述,它是不带有任何引起争论的色彩的。

作为一个例子,说明同一动力学情况可以从不同的观点来描述,一方面是一个惯性系,另一方面是一个加速系,让我们来考察一个从车顶上悬挂下来的单摆。设摆锤的质量为 m 。从附着于地球(假定是不转的)的参照系 S 的观点应用 $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$,可以对车的可能运动作出力的隔离体图如图 12-4。在每一情形中,都只有两个

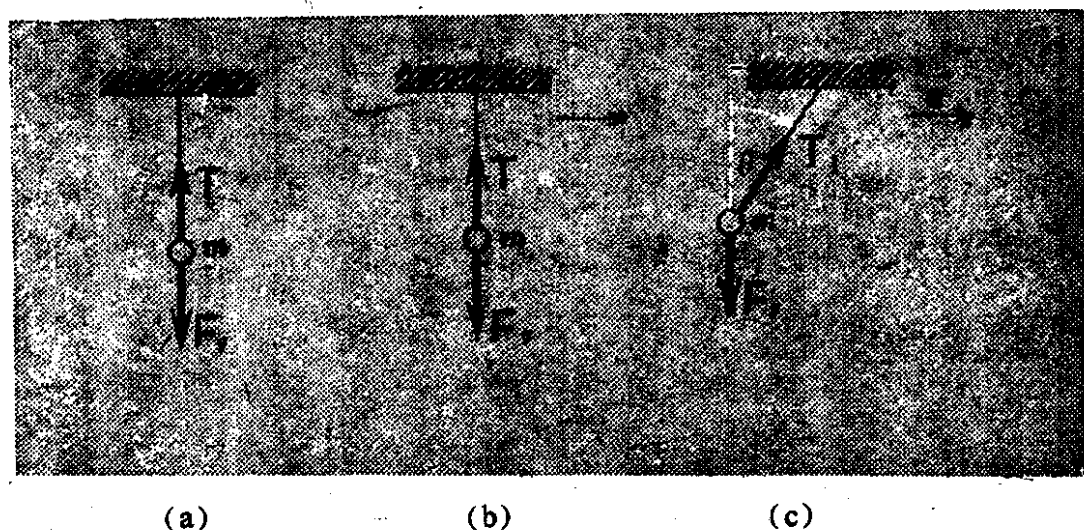


图 12-4 (a)在一个静止的车中, (b)在以匀速运动的车中, (c)在加速运动的车中,作用于一个悬挂着的质量的力。

“实在的”力作用于摆锤:重力 $\mathbf{F}_g$ 和绳的张力 $\mathbf{T}$ 。(a)和(b)两种情形没有加速度,因而应用 $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ 没有多大意义。在(c)的情形中,摆锤经受着一向右的加速度,悬绳同竖直方向有一角度,绳中的张力也有所增加(由 T 到 T_1)。图 12-5(a)的隔离体图使我们在应用 $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ 时得

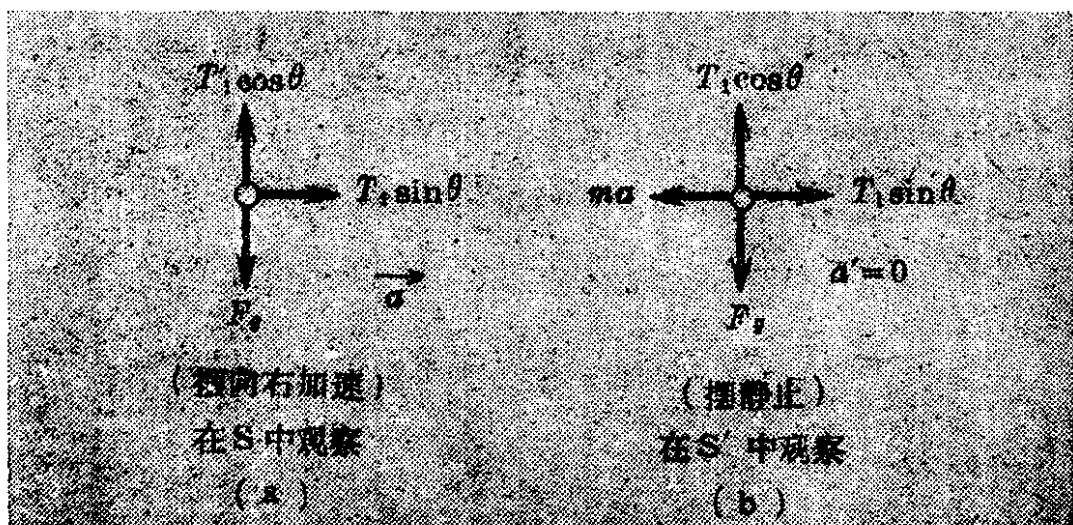


图 12-5 作用于一物体上的力, 物体相对于一加速运动的车静止
(a)在一惯性系中所作判断, (b)在加速参照系中的判断.

水平分量: $T_1 \sin \theta = ma$

竖直分量: $T_1 \cos \theta - mg = 0$

然而, 在 S' 系中, 由于参照系的加速度, 就会在与参照系的加速度相反的方向上有一个大小为 ma 的附加力. 图 12-5(b)给出在 S' 中看到的摆锤的隔离体图. 摆锤处于平衡状态. 因而应用 $\mathbf{F}' = m\mathbf{a}'$ 时(由于 $\mathbf{a}' = 0$)有

$$T_1 \sin \theta - ma = 0$$

$$T_1 \cos \theta - mg = 0$$

因之, 单摆处于平衡时的倾角由下列条件决定:

$$\tan \theta = \frac{a}{g} \quad (12-5)$$

§4 加速度计

(12-5)式所表达的结果为简单的加速度计提供了一个理论根据. 如果我们先确定了真正的、表示 $\theta = 0$ 的竖直方向, 那么在以后的任何瞬间就可以通过方程