

高等学校教学参考书



普通物理学

力学部分

北京大学物理系普通物理教研室编

人民教育出版社

简装本说明

目前 850×1168 毫米规格纸张较少，本书暂以 787×1092 毫米规格纸张印刷，定价相应减少 20%。希鉴谅。

普通物理学

力学部分

北京大学物理系普通物理教研室编

人民教育出版社出版（北京沙滩后街）

国营五二三厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

统一书号 13012·0130 开本 787×1092 1/32 印张 7 12/16

字数 193,000 印数 325,001—525,000 定价(6) 0.60 元

1961 年 7 月第 1 版 1979 年 2 月第 11 次印刷

本书是北京大学物理系普通物理教研室于1961年编成的。内容包括：质点运动学、质点动力学、动量和动量守恒定律、功和能、万有引力、刚体力学、流体力学、振动、波和声学等十章。

现重版发行。可作为综合大学及高等师范学校物理各专业师生参考。

引 言

在物质的各种各样、千变万化的运动中,有一类是我们在生产和生活中经常遇到的,即物体位置的变动(包括物体各部分相对位置的变动),例如,各种交通工具的运行、各种机器的运转、大气和河水的流动、天体的运行等等。这类运动形态称为机械运动。机械运动是物质的各种运动形态中最简单的一种。力学研究的对象就是机械运动的客观规律。

通常把力学分为运动学、动力学、静力学。运动学只研究物体在运动过程中位置和时间的关系;动力学则研究物体的运动与物体间相互作用的内在联系;静力学研究物体在相互作用下的平衡问题,也可以把它看作是动力学的一部分。

和其他自然科学一样,力学是在生产实践的基础上逐步发展起来的。由于人们在生活和生产中随时随地都接触到机械运动,由于最原始的一些生产工具和交通工具都首先是利用物体的机械运动的,所以在物理学中力学最先得到发展。在我国古代,由于生产工具、交通工具、建筑、水利等等许多事业的发展,劳动人民就积累了相当丰富的关于力学的生产技术经验,而且还对力学的某些科学概念、原理有了一些初步的认识。这在记载和总结生产及工艺成就的一些著作和某些哲学著作中都有所反映,例如,在“墨经”、“考工记”、“论衡”和“天工开物”等书中,对于力的概念、杠杆原理、滚动摩擦、功的概念、材料强度以及天文学等等许多方面的知识都有相当多的记载。这些记载虽然只是许多成就中很少的一部分,但由此已可看出,我国古代勤劳勇敢的劳动人民在很早就积累了相当丰富的力学知识。不过,由于我国经历了几千年的封建

统治,生产力的发展很慢,因而不可能产生近代的自然科学。在埃及、古希腊、巴比伦等国,古代人民在生产实践中也积累了不少力学知识,特别是静力学的知识。欧洲在漫长的中世纪里经历了黑暗的封建统治,所以生产力和科学的发展也同样受到了严重的阻碍。

力学发展成为一门系统的独立的学科开始于十六到十七世纪。这时在欧洲资本主义生产得到了发展,航海、纺织、机械制造等事业发展的需要以及战争的影响,促进了天文学和力学的迅速发展。而且在研究方法上,由于生产技术的发展,提供了实验工具,因此观察和实验的科学方法也逐步地建立起来,这就有力地促进了力学规律,特别是动力学规律的发现。这样,到了十七世纪后期,在生产的推动下,经过许多科学家(特别是伽里略、笛卡尔、惠更斯等人)的努力,力学的实验基础已建立起来,在这个基础上,经过牛顿的分析、总结和概括,提出了力学的基本定律,奠定了经典力学的基础。在这以后的一个时期内,随着生产水平的进一步提高,结合着天文学、机械制造、水利的发展,开辟了流体力学、刚体力学、弹性力学等一系列新的力学分支。总之,十七到十八世纪,力学在广泛的领域内取得了很大的成就,并且在理论上形成了比较完整的体系。

到此为止,我们所说的力学,都是由观察大量原子构成的宏观客体(例如大小与人体可以比拟的机器、车辆,或是比人体大得多的星体)的运动而建立的,并且所观察的物体的速度比光速(3×10^{10} 厘米/秒)要小得多。这样的力学,称为“经典力学”。实践证明,经典力学原理对于一般宏观物体运动是相当精确的。

在十七到十八世纪里,自然科学的各部门中,只有力学和数学发展到较高的水平,这对于当时机械唯物论的形成起了重要的作用。而机械唯物论在与封建的经院哲学斗争中也起过进步作用。

然而，机械唯物論企图把自然界中一切現象都用力学的观点来解釋，把有质的区别的各种运动形态(如化学的、生物的等等)都归結为机械的运动形态，机械唯物論否认物体运动的內在源泉，否认运动形态的质的区别和运动由低級向高級、由簡單到复杂的发展。由于它这种形而上学机械論观点的局限性，在十九世紀末二十世紀初現代物理学进一步发展以后，便不能正确解釋一系列重大的科学发现。而且，当唯心主义曲解它們的意义而向唯物主义进攻时，机械唯物論就无法抵御这种进攻，一些抱着机械唯物論观点的物理学家就发生了向唯心主义方面的动摇。

十九世紀后半期以来，随着生产和科学的不断发展，产生了研究高速物体运动規律的相对論力学和研究微观客体运动規律的量子力学。在这些新的研究領域內，經典力学的理論已不再适用；經典力学只是在一定限度內和一定条件下近似地反映了客观现实。不过應該注意，在一般宏观物体运动的广闊領域內，經典力学的基本定律仍然是正确的，是解决广泛的理論和实际問題的基础。此外，还应当看到相对論力学和量子力学也正是在經典力学和其他物理学部門的基础上发展起来的。

July 11/77/24

目 录

引言	iii
第一章 质点运动学	1
§ 1. 参照系和坐标系	1
§ 2. 质点	2
§ 3. 直线运动	3
§ 4. 速度和加速度矢量·矢量的合成和分解	10
§ 5. 曲线运动	16
第二章 质点动力学	24
§ 1. 牛顿第一定律	25
§ 2. 牛顿第二定律	27
§ 3. 牛顿第三定律	32
§ 4. 弹性力和摩擦力	34
§ 5. 力和质量的单位·单位制和量纲	37
§ 6. 惯性参照系·力学相对性原理	43
§ 7. 惯性力	49
第三章 动量和动量守恒定律	57
§ 1. 动量·力的冲量·动量定理	57
§ 2. 动量守恒定律	62
§ 3. 反冲现象·火箭	65
第四章 功和能	68
§ 1. 功和功率	69
§ 2. 动能·动能定理	74
§ 3. 物体系的势能	76
§ 4. 机械能守恒定律	80
§ 5. 球的正碰	82
第五章 万有引力	88
§ 1. 开普勒行星运动定律	88
§ 2. 万有引力定律	89
§ 3. 引力势能	96
§ 4. 三种宇宙速度	99
第六章 刚体力学	102

§ 1. 刚体运动学	102
§ 2. 刚体的平动	107
§ 3. 质心和质心运动定律	109
§ 4. 刚体绕固定轴转动	116
§ 5. 刚体的动量、动能和动量矩	119
§ 6. 迴轉仪	123
第七章 流体力学	128
§ 1. 流体静力学	128
§ 2. 理想流体的稳定流动	132
§ 3. 流体的反作用及其应用	143
§ 4. 粘滞流体的运动	145
§ 5. 粘滞流体中运动物体所受的力	152
第八章 振动	158
§ 1. 简谐振动	159
§ 2. 阻尼振动	169
§ 3. 受迫振动	172
§ 4. 振动的合成	179
§ 5. 振动的分解	187
第九章 波	191
§ 1. 机械波的产生和传播	191
§ 2. 简谐波	195
§ 3. 波动方程·波速	197
§ 4. 波的能量	201
§ 5. 波的传播	205
§ 6. 波的叠加·驻波	208
§ 7. 多普勒效应	213
第十章 声学	216
§ 1. 声振动及其传播	216
§ 2. 声强	221
§ 3. 声的吸收·交混回响	224
§ 4. 声源	226
§ 5. 超声	233

第一章 質点运动学

§ 1. 参照系和坐标系

一切物质都处在永恒的运动中。以物体的机械运动为例，地面上的物体相对于地球有位置的变动，而地球又繞着太阳运动，太阳与各恒星間的位置也在变动。这里特别要指出的是，任何物体的运动都是构成客观世界无限的、永恒的物质运动的一个組成部分，而不能抽象地当作一个孤立的事件来理解。随着学习的深入，我們將看到，在力学的范围內，正确地理解运动的描述、运动的变化規律、力的作用以及時間和空間的概念等等，都不能离开上述的前提。关于这一点，在本章里首先需要認識的是，当我们研究某一物体的运动时，必須具体指明，运动是相对于哪一个物体或哪一个物体群的。具体研究物体运动时选用来作为依据的物体或物体群，称为参照系。例如，研究月球相对于地球的运动，則地球就是参照系。若研究月球相对于太阳的运动，則太阳为参照系。又如研究河水的流速，若相对于地面，則地面为参照系，但若相对于行駛于河中的輪船，則輪船为参照系。研究某一物体的运动，究竟选哪一个物体或哪个物体群为参照系，要看問題的性質和計算的方便。

选定了参照系之后，要把物体在各个时刻相对于参照系的位置定量地表示出来，还需要在参照系上选择适当的坐标系。平时多用直角坐标系(x, y, z)，有时(如研究行星相对于太阳的运动)也选用极坐标(r, θ)或其他的坐标系。

参照系选定之后，物体的运动情况就确定了。至于在参照系上选什么坐标系(用 x, y, z 还是 r, θ)，則只是描述运动所用的变量不同而已。

§ 2. 质点

如果我们仔细地考察物体的机械运动，则运动情况总是比较复杂的。就以比较简单的落体运动来说，一方面物体受到重力，但另一方面它还受到空气的阻力，而空气的阻力又与落体的几何形状和大小有关。但是，在某些问题中，阻力起的作用很小，运动的情况主要决定于重力，因而可以忽略空气的阻力，这样一来，物体的运动就可看做与几何形状和大小无关。我们平常说地球绕太阳做椭圆轨道运动，如果仔细考察起来，由于地球还有自转，所以地球上各点相对于太阳的运动就不完全是椭圆轨道。但是由于地球到太阳的距离约为地球直径的一万多倍，所以，在我们研究地球的公转时，地球上各点的运动情况基本上可看做是一样的，也就是说，可以不考虑地球的形状和大小。类似的例子是很多的。概括这样一些事实，我们可以看到，在某些问题中，物体的形状和大小与研究的问题无关或者是起的作用很小，是次要的因素，为了首先抓住主要的因素和掌握它的基本运动情况，我们有必要忽略物体的形状和大小。这样一来就使得在研究的问题中，物体的形状和大小与问题完全无关，这样的对象称为质点。所以称它为质点，是由于这样的对象可抽象地看做为只有质量而无形状和大小的点。

应当注意，同一物体在不同的问题中，有时可看做质点，有时就不能。例如研究地球的自转时，就不能把地球看做质点。

质点的运动是机械运动中一种简单的运动形式，在相当多的实际问题中，我们可以把物体的运动近似地看作质点的运动，例如在研究一般的天体运动、带电粒子在电磁场中的运动、单摆的运动等等。另一方面，当我们进一步研究更复杂的运动（如刚体、流体、弹性体的运动）时，虽然不能再把整个物体看作质点，但在处理方法上，有时也把物体看成是由许多质点组成的质点组，由质点的运

动規律着手,来研究整个物体的运动規律。

质点是理想的“模型”,絕对的质点在实际中是不存在的。但是可以首先对实际問題进行全面、科学的分析,然后在此基础上在一定条件下引入抽象化、理想化的模型做为研究的对象,这种研究方法在物理学中是經常用到的。因为自然現象总是相互联系相互制約的,内部包含各种矛盾,但是这些矛盾有主要和次要之分,如果想把所有的因素毫无遗漏的一起考虑在內,这在人們一定的認識阶段上是不可能的,也沒有必要。因此,我們往往是在比較全面分析实际現象的基础上,抓住其中主要的因素,将实际情况进行簡化,以便于从理論上去研究它。所以在物理学中引入科学的“理想模型”,不仅是允許的,而且是很有意义的。以后我們讲的刚体、理想流体等等都是理想模型。

当然,理想模型的建立絕不允許主觀臆造,而必須是基于对客觀实际进行科学的分析。对已經引入的理想模型也不允許不分析其适用条件而到处搬用。尤其重要的是,“模型”是否真正反映了客觀实际,最后还必须在实践中經過檢驗。

理想模型絕不是一成不变的。随着人們对客觀实际認識的深化,必須針對問題的需要,不断修正和发展它,以便更加接近于客觀实际。

§3. 直綫运动

关于质点运动学,我們將着重于介紹描述质点运动的一些基本概念和物理量,而不着重于各种具体运动的詳細討論。

质点相对于选定的参照系的运动,可以按其軌迹分为直綫运动和曲綫运动。本节首先討論直綫运动。

(一)匀速直綫运动·速度·匀速直綫运动中的路程 如果质点始終在一直綫上运动,而且在任意的相等時間內,通过相等的路

程,这种运动叫做匀速直线运动。

这种运动的基本特点,就在于任意的相等时间内通过相等的路程,即通过的路程和所用的时间成正比,而其比值是不随时间改变的。一切匀速直线运动都具有这样的共同特征,这正反映了它们运动时快慢均匀的特点。

当我们比较两个以上不同的匀速直线运动时,就会发现,或者是在同样的时间内两者通过的路程不同,或者是通过相同的路程而所用的时间不同。总之,对于不同的匀速直线运动,前面所讲的比值的量值不同,这正是反映了它们彼此间运动快慢的不同。

因此,前面所谈的路程与时间的比值反映了匀速直线运动快慢的特点。我们称它为速度,所以匀速直线运动中速度的定义是:任意一段时间内质点所通过的路程与这段时间的比值。

设质点沿图 1-1 中 MN 线段向右运动,任取 O 为原点,设在

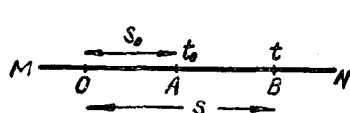


图 1-1

t_0 与 t 时刻质点分别处于 A 点与 B 点,它们与原点的距离分别为 s_0 与 s ,则匀速直线运动的速度 v 由下式决定:

$$v = \frac{s - s_0}{t - t_0} \quad (1.1)$$

不难看出,速度的数值等于单位时间内所通过的路程。速度的单位可由上式确定。在 CGS 单位制中,速度的单位是厘米/秒。在实用单位制中,则常用米/秒或千米/小时。

上式是速度的定义的数学表达式,同时也反映了匀速直线运动中路程与时间的关系。为了简便起见,若选开始时 $t_0 = 0$,选此时质点所处的位置为原点,即 $s_0 = 0$,则上式可写为

$$s = vt \quad (1.2)$$

当速度已知时,利用此式可求得任意時間内所走的路程。

(二)变速直綫运动·瞬时速度·变速直綫运动中的路程。

(1) 变速直綫运动·瞬时速度 当质点做直綫运动时,凡不是在任意的相等時間内通过相等路程的运动,叫做变速直綫运动。

对于变速直綫运动,不能简单的用建立在匀速直綫运动特点的基础上所引入的速度的概念去描述它,而必須将速度的概念作进一步的发展。

在变速直綫运动中,质点在各时刻运动的快慢情况不同,为了粗略地描述其运动的

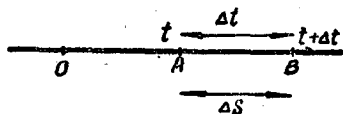


图 1-2

快慢,我們引入平均速度的概念。如图 1-2 所示,設质点在時間间隔 Δt 内,通过的路程为 Δs ,則平均速度 $\bar{v}$ 的定义是

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}. \quad (1.3)$$

应当注意,平均速度是与所考虑的時間间隔的大小有关的, Δt 取的大小不同,就得到不同的平均速度。所以平均速度总是指某一段时间内(或某一段路程上)的平均速度。

平均速度的意义还可以这样来理解:它等于某一个匀速直綫运动的速度,作这个匀速直綫运动的物体,在 Δt 時間内,也正好通过 Δs 的路程。所以,用平均速度来描述做变速直綫运动的质点在某段时间内的运动情况,相当于用某一匀速直綫运动“代替”了真实的变速直綫运动。这种“代替”只是反映了最后效果的一致(即用同样時間通过同样的路程),但在 Δt 時間内各个时刻的运动情况则是不相同的,一个是匀速运动,一个可能是先快后慢或先慢后快,也可能是时快时慢很复杂的运动。

用平均速度来描述变速直綫运动是粗略的。但是,如果我們

取的时间间隔 Δt 充分短,以至于在这样短的时间内,运动情况尚未发生显著的变化,这时用平均速度来描述质点的运动,就比较接近于真实情况了。 Δt 取的愈短,则愈能精确的反映实际运动情况。从理论上考虑,我们可以取 Δt 无限小,即令 $\Delta t \rightarrow 0$,这时, Δt 内的平均速度就趋于一个确定的极限值,这就是瞬时速度的概念。所以,质点做变速直线运动时,某时刻 t (或相对应的某点 A) 的瞬时速度 v ,就是在时刻 t 附近无限短的时间间隔 Δt 内平均速度的极限值。数学表达式如下:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}.$$

式中最后的表达式是运用数学分析的符号。因为每一时刻 t 对应一位置 s ,所以 s 是 t 的函数,而式中符号表示瞬时速度是函数 s 对时间 t 的一级微商。

用瞬时速度来描述变速运动,就可精确的反映出它在各个时刻的快慢情况。质点做变速直线运动时,每时每刻都具有一定的瞬时速度,而一般讲来,各时刻的瞬时速度又相互不同,结合前面对平均速度的分析,可以看到,用瞬时速度来精确的反映各时刻运动的快慢,也可以理解为是用无限多个、无限暂短的、前后相继而其速度又相差无限小的匀速直线运动来代替整个的变速直线运动。类似于这种处理问题的方法,我们以后还要经常用到。

瞬时速度这一概念是匀速直线运动中速度概念的发展。显

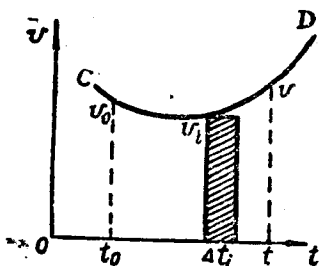


图 1-3

然,匀速直线运动不过是各个时刻的瞬时速度都相等的运动而已。以后我们所讲的速度,都是指瞬时速度。

(2) 变速直线运动中的路程 质点做变速直线运动时,每一时刻 t 都具有一定的速度

v , 因此速度 v 是時間 t 的函数。若以 v 为纵坐标, t 为横坐标, 則一变速直綫运动, 在图中对应一条曲綫(图 1-3)。不同的变速直綫运动, 曲綫的形状不同。現在我們就借助于 $v-t$ 图来求变速直綫运动中的路程。

图 1-3 中 CD 代表任一变速直綫运动。現在求由 t_0 到 t 時間内质点所通过的路程。为此, 我們將 t_0 到 t 整个時間分为許多小間隔, 如 n 个小間隔, 考虑其中任一小間隔 Δt_i , 假設在 Δt_i 內, 质点是以 Δt_i 开始时的速度 v_i 做匀速直綫运动, 則根据匀速直綫运动中路程的公式, 在此間隔內所通过的路程 Δs_i 为

$$\Delta s_i = v_i \Delta t_i.$$

由图中看来, 它在数值上正好等于画斜綫的小矩形面积。若对于每一小間隔, 都做这样的假設, 則从 t_0 到 t 時間內所通过的路程 s' 就等于 n 个匀速直綫运动所通过的路程的总和, 由图 1-4 上看, 則相当于 n 个小矩形面积的总和, 即

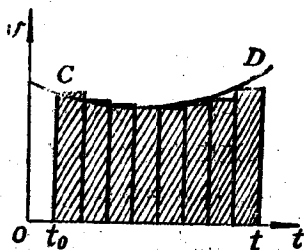


图 1-4

$$s' = \sum_{i=0}^{n-1} \Delta s_i = \sum_{i=0}^{n-1} v_i \Delta t_i = n \text{ 个小矩形面积的总和.}$$

以上的考虑是以一个基本假設为前提的, 即假設每一小間隔內, 都可看做是匀速直綫运动, 也就是說, 用一系列的匀速直綫运动代替变速直綫运动。根据前面对瞬时速度的討論可知, 只要所分的間隔数 n 无限多, 而每一間隔 Δt 又无限小, 則上面的假設就可以成立。因此, 变速直綫运动在 t_0 到 t 時間內所通过的路程 s 就是在 $\Delta t \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$ 时 s' 的极限值, 即

$$s = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ n \rightarrow \infty}} \sum_{i=0}^{n-1} \Delta s_i = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ n \rightarrow \infty}} \sum_{i=0}^{n-1} v_i \Delta t_i = \int_{t_0}^t v \, dt. \quad (1.4)$$

式中的表达式是运用数学分析的符号,它表示路程是速度函数对时间的积分。

由图上看,当 $\Delta t \rightarrow 0$, $n \rightarrow \infty$ 时,则小长方形面积的总和就趋于 t_0 与 t 之间曲线下的面积。因此,路程 s 在数值上也等于 t_0 与 t 之间曲线下的面积。

(三)匀变速直线运动·加速度·匀变速直线运动中的路程 质点做直线运动时,其速度一般讲来是经常改变的。下面我们将进一步讨论如何反映其速度变化的情况。

首先讨论一种最简单的变速直线运动,即在任意的相等时间内,质点的速度改变相等,这种运动叫做匀变速直线运动。这种运动的特点是速度的改变与所经过的时间成正比,因而其比值是一个不随时间而改变的确定的值,而且对于不同的匀变速运动,这个比值的量值不同。

类似于在匀速直线运动中引入速度概念的方法,我们这里引入加速度的概念,即任意一段时间内速度的改变量与这段时间的比值,叫做匀变速直线运动的加速度。设开始时 $t_0=0$, 此时速度为 v_0 , 在时刻 t 其速度为 v , 则加速度 a 为

$$a = \frac{v - v_0}{t} \quad (1.5)$$

不难看出,加速度在数值上等于单位时间内速度的改变量。

要注意的是,加速度可正、可负,这要看速度是随时间增加还是减小。如果增加,即 $v > v_0$ 则 $a > 0$, 即质点做匀加速直线运动,如忽略空气阻力的落体运动。反之,若速度减小,即 $v < v_0$, 则 $a < 0$, 即质点作匀减速直线运动,如忽略空气阻力的上抛运动。

加速度的单位可由上式确定,在 CGS 单位制中,其单位为厘米/秒²。

上式是加速度的定义的数学表达式,同时也反映了速度与时间的关系,上式可改写为

$$v = v_0 + at. \quad (1.6)$$

当知道了初速 v_0 和加速度 a 后, 就可利用此式求得任意时刻 t 时的速度 v 。

下面我們来求匀变速直線运动中的路程。由上式不难看出, 匀变速直線运动在 $v-t$ 图上为一斜的直線, 其斜率等于加速度, 即 $a = \tan \alpha$ (图 1-5)。根据前面所讲, 在 t 時間内所通过的路程 s 应等于图中 Ot 間斜綫下的梯形面积, 即

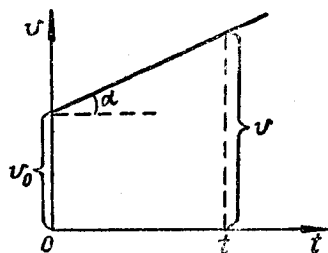


图 1-5

$$s = \frac{1}{2}(v_0 + v)t.$$

将(1.6)式中的 v 代入此式, 可得

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2. \quad (1.7)$$

这就是匀变速直線运动中路程和時間的关系式。

如果要直接写出路程和速度的关系, 則可由(1.6)、(1.7)两式中消去時間 t , 得

$$v^2 = v_0^2 + 2as. \quad (1.8)$$

忽略空气阻力的落体运动, 就是最常見的一种匀变速直線运动, 可以运用上面这些公式来具体的处理各种有关的问题。

(四)任意直線运动中的瞬时加速度 上面讲的匀加速直線运动是变速运动中一种最简单的。一般的直線运动, 速度变化并不均匀, 即不是在任意的相等時間內, 速度作相等的改变。为了反映其速度变化的情况, 須要将匀加速直線运动中加速度的概念做进一步的发展。

类似于前面引入平均速度的方法, 这里我們引入平均加速度