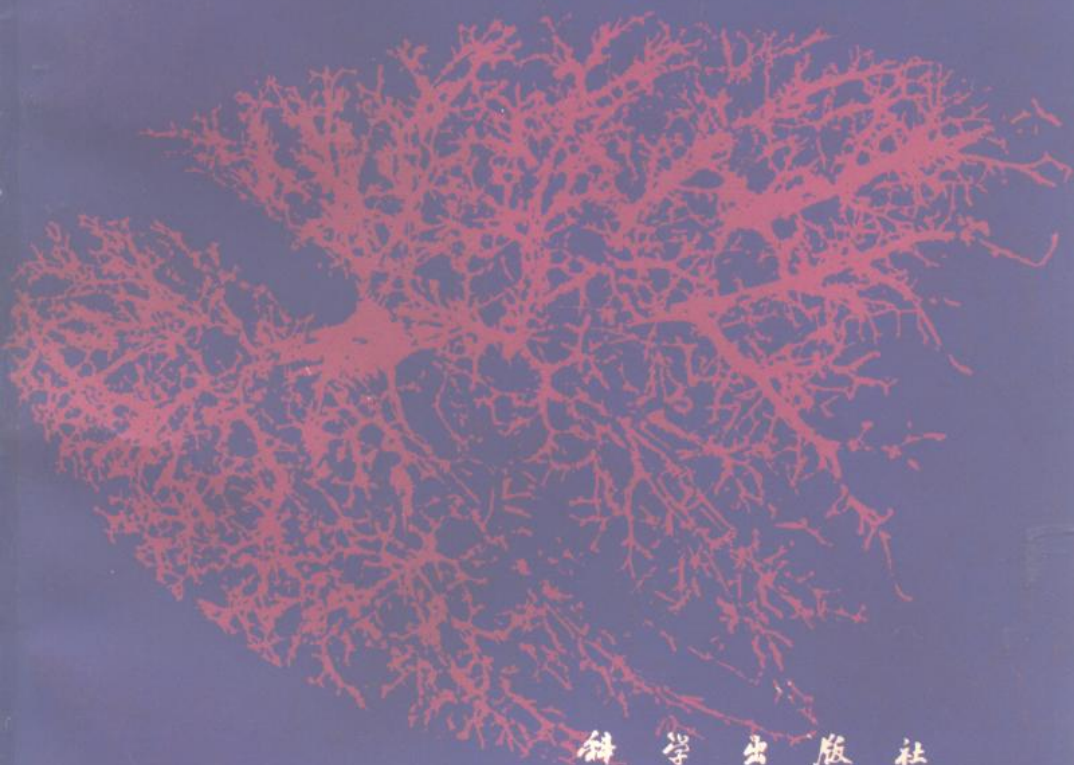


血液循环力学

C. G. 卡罗 T. J. 佩德利 著
R. C. 施罗特 W. A. 西特



科学出版社

血液循环力学

C. G. 卡罗 T. J. 佩德利 著
R. C. 施罗特 W. A. 西特

丁启明 倪一伟 译
陶祖莱 席葆树 校



科学出版社

1986

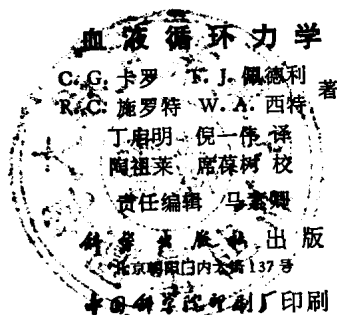
内 容 简 介

本书系统阐述了血液循环力学的基础理论,内容丰富,深入浅出。全书分两大部分,共 15 章。第一部分 (1—9), 主要介绍有关循环系统的力学基础知识,包括物体的运动、力学量的量度单位、流体力学、固体力学、波动和传质的基本知识。第二部分 (10—15), 主要介绍有关血液、心脏、动脉血管系统、微循环、静脉系统和肺循环等循环系统力学问题。书中引用了大量的图表,重点章后附有参考书目,是关于血液循环力学的一本较好的读物。可供生物学、生理学、医学、生物医学工程及力学研究工作者和医务人员阅读,也可供大专院校有关专业的师生、研究生参考。

C. G. Caro, T. J. Pedley,
R. C. Schroter and W. A. Sead

THE MECHANICS OF THE CIRCULATION

Oxford University Press, 1978



新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1986 年 7 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32
1986 年 7 月第一次印刷 印张: 16 7/8 插页: 1
印数: 0001—3,200 字数: 444,000

统一书号: 13031·3214
本社书号: 4071·13-10

定价: 4.75 元

序 言

1808年,托马斯·杨(Thomas Young)向英国皇家学会介绍他的关于心脏和动脉功能的 Croonian 演讲时,说:

“动物体中发生的机械运动,是由支配着无生命体运动的同一普遍定律支配的。……很明显,如果要问血液循环以什么方式和在多大程度上依赖于心脏和动脉的肌肉力和弹性力,假定这些力的性质已经知道,那么,这样一个问题的探讨只不过是水力学理论中最精细的一个分支而已。”

对杨来说,这是通向生理学的一条很自然的途径;象十九世纪其他许多科学家一样,他对生物科学与物理科学之间的差异注意得不够。确实,他生前既是一位开业医生,又是一位物理学教授。尽管今天人们还记着他,主要是由于他在光学波动理论方面的贡献和以他的姓氏命名了材料的弹性模量;但实际上他在视觉机理、颜色视觉及包括动脉中波的传播在内的血液循环等方面也写过一些权威性的论著。

早期研究血液循环的学者,如 Borelli, Hales, Bernoulli, Euler, Poiseuille, Helmholtz, Pick 和 Frank 等人,都很博学,这似乎是一种传统。但是随着科学的发展,专业化也发展了,心血管系统的研究也从物理科学中分出来了。这个分出来的过程当然不是一刀两断的,因为各门学科的科学家的协作研究总还在进行着。但是协作的规模是十分有限的,由于许多生理学和医学的研究人员没有足够的数学和力学的基础,他们很难理解物理学家的语言;同样,物理科学家也感到生理学研究的复杂性和经验性,以及它的术语的难于理解。

现在,专业化所造成的分离具有新的重要意义。最近二十年

来, 物理学家和工程师已经对血液循环力学的研究作出了相当大的贡献。这些成就有力地推动了协作研究, 但同时也使该领域中那些物理学和数学素养有限的人感到越来越困难了。近代的一些评述和专著论证了这种边缘学科研究的重要性, 但这些文章对于从事医学工作的读者来说帮助不大, 因为这些文章的作者总是以为读者是懂得力学的, 且论述的形式也往往过分倚重于数学。

本书试图来缓和一下这个矛盾。我们打算把它作为血液循环力学的导论性教科书; 力求实用, 尽可能避免数学公式, 并用容易理解的术语来介绍力学。我们为生理学和医科学生, 以及心脏内科和外科的医生讲课的经验证明, 这种方法是很有帮助的, 而本书主要服务对象就是这类读者。此外, 我们认为对那些对此领域颇感兴趣的物理学家、数学家和工程师来讲, 本书也将是有用的, 因为它为力学原理提供了有关的解剖学和生理学基础, 并且只要可能就给出术语的定义和定量的数据。

本书分为两大部分。第一部分“力学基础”, 提供了血液循环中具有普遍重要性的物理过程和机理的非数学化的概要。这样, 它就成为后半部分内容的物理导论。然而, 由于它是自成体系的, 并且用一般的方式来讨论固体和流体力学及传质, 故除循环系统外, 它也可作为研究其它系统的基础。

第二部分“血液循环力学”较详细阐述了发生在循环系统中的生理过程及其物理机理。在此, 首先讨论血液的有关性质, 然后从心脏开始, 逐章地沿着循环途径, 系统地叙述整个循环系统。本书不想详细讨论诸如生理反射这样主动的生理机理, 但是要研究由它导致的循环系统物理性质的变化。每章首先提出有关的解剖学和生理学基础知识, 然后才讨论它的力学原理, 并反复引证本书前半部分已经讨论过的物理过程。和循环系统某部分的力学有关的更专门的物理过程, 则在提到它们时再进行介绍。

我们力图把所有那些目前认为重要的力学特点包括进来。不过本书不想作为研究评论, 因此我们尽量避免在文中引用原始研究文献。我们只是在第二部分的每一章之后开列一些参考阅读书

目,以便为不熟悉文献的读者介绍适当的评论和文献的出处。此外,我们尽可能从有关的重要著述中选取插图,它们大多取自原始研究文献。这样一来图注中给出的参考文献也就补充了一些阅读书目。

写这类边缘学科书籍的一种不好的倾向是过分简单化,而且常常为简化而牺牲了某个学科。为避免这一毛病,我们作了很大努力。只要可能,我们就力图提供定量数据。为方便起见,在本书中要反复引用的比较重要的实测数据和导出数据都收集在目录后的表 I 中。所采用的单位是国际单位制(SI)。然而,象压力这种量在有可能混淆的地方,我们还加注了传统的单位。由于物理尺度和力学原理是同样重要的,而狗又是唯一的可得到范围广泛而又可靠的测量数据的动物,所以我们在本书中从头到尾采用了这种动物的数据。虽然如此,在论述微循环问题时,我们也不得不转向其它动物,不过在微循环范围内,物种之间的尺度差异相当小。最后,在那些力学原理不尽相同或者我们认为和循环系统疾病过程有关的地方,我们还要特别提到人的循环。

C. G. C.

T. J. P.

R. C. S.

W. A. S.

1977 年 7 月

目 录

第一部分 力学基础

第 1 章 质点与连续物质.....	1
第 2 章 质点力学.....	5
位置	5
速度	6
加速度	10
牛顿运动定律: 质量和力	12
动量	18
功与能量	19
第 3 章 单位.....	23
单位与量纲的差别	23
质量、长度和时间作为基本单位	24
力作为基本单位带来的麻烦	25
能量与热量	26
物质的概念	26
量纲谐和与单位一致	27
生理学中体积和流量的用法	27
国际单位制 (SI)	27
第 4 章 流体力学的基本概念.....	30
应力	30
流体静压力	32
运动流体中的应力: 粘性	34
流体的运动方程	38
迁移加速度与当地加速度	39
质量守恒	40
伯努利定理	42
第 5 章 管内流动与绕物流动.....	45
管内泊肃叶流动	45
进口区流动	50

边界层的概念	52
雷诺数	55
管流中的湍流	56
长管内的不定常流动	59
收缩对管流特性的影响	62
弯管流动	67
绕流	70
第 6 章 量纲分析	82
相似性与比例模化的概念	83
生物系统中比例模化的几个例子	84
求变量谱和关系的方法	85
第 7 章 固体力学和血管壁的性质	89
弹性的定义	89
血管壁的性质	94
弹性管的静力学	103
第 8 章 振动与波动	109
简谐运动	109
简单波动	116
阻尼	120
波的反射与共振	126
线性性质	129
傅里叶分析	131
第 9 章 传质导论	134
扩散	135
胶体状态	139
传质系数	140
通过孔与膜的扩散	141
通透性	144
通过膜的滤过	145
渗透	145
简单的传质模型	147
总体流动与扩散之间的相互作用	149

第二部分 循环力学

第 10 章 血液	153
流体和悬浮液的粘性	153
血浆的渗透压	160

悬浮组分	161
血细胞	162
血液凝固	173
血栓形成	173
全血的力学性质	175
第 11 章 心脏	184
心脏解剖	185
心动周期	189
心肌的特性	193
心脏整体的力学性状	209
心脏功能的流体力学问题	234
第 12 章 体动脉	248
解剖与结构	249
体动脉中的血压与流量	267
动脉中波的传播	281
波在接合处的反射与透射	291
非线性的影响	311
粘性效应	313
其它类型的波	319
动脉中的流型	321
动脉中的混合与传质	343
附录: 阻抗	355
第 13 章 体微循环	360
微血管床的组织	361
微循环血管的构造	368
微循环血管的静力学性质	382
微循环中的压力	387
微循环模型和较大的微血管中的流动	397
毛细血管中的血流	413
微循环中的传质	421
第 14 章 体静脉	448
解剖	448
跨壁压力和静态弹性性质	451
大静脉中的血流动力学	463
可塌陷管中的流动	474
静脉床力学	483
第 15 章 肺循环	490
解剖	491

跨壁压力与血管的静态弹性性质	499
肺大血管中的血流动力学	513
肺血管阻力	518

第一部分 力学基础

第1章 质点与连续物质

力学这门科学是研究运动(或平衡)以及引起运动的力。血液受心脏泵作用的推动在血管中运动,由于血管壁是弹性的,因此它也在运动,血液和血管壁互相施加作用力,从而影响到它们各自的运动。所以,为了研究循环力学,我们必须首先懂得流体(如血液)和弹性固体(如血管壁)的基本力学原理,也要研究这两种互相接触而又运动着的物质(如血液与血管壁)之间作用力的性质。

我们不仅可以把力学定律运用到作为整体的血液和血管壁的大尺度性状的研究,而且可以一直运用于分子水平的运动。因此,“力学”在这里也理解为包括所有影响物质传输的因素,包括扩散和宏观流动。

力学的研究开始于古希腊时代,那时提出了决定孤立固体运动的“定律”。希腊人相信必定有某种力时时刻刻作用在物体上,物体才能运动。而这种作用在(譬如说)火箭上的力的物理本质是神秘莫测的。之所以需要这种力是跟希腊哲学家 Zeno 的一个似非而是的论点有关系的:火箭在某时刻占据着一个给定位置,但同时又离开它,以便在下一时刻能占据另一个位置。

直到十七世纪牛顿提出了他的三条运动定律,这些问题才得到完全的解决。这些定律构成了本书所述的整个力学的基础,说的是单个质点的运动。而质点则定义为具有质量(结果地球就对它施加了向下拉的重力),但仅占据一个点(即它们没有大小)的物体。当然,每个真实物体即使小到象一个原子或电子,也总还是有一定大小的,然而质点力学定律既可直接用到孤立的真实物体(如

Zeno 论点中的飞箭、围绕太阳旋转的地球或一个红细胞),也可用到联成一片并能变成多种形状连续物质。这些变形物质包括所有弹性固体,例如钢、橡皮和血管壁等等,以及象水、糖浆、血浆和空气等等的所有流体。由于运动定律完全能以同样的方式运用到液体或气体中,所以又把它们合称为流体。

牛顿定律可以用到有一定尺寸的物体,因为可以证明:物体运动起来就好象它的所有质量和作用于它的所有外力都集中在一个点上。这个点就称为质心¹⁾。于是 Zeno 飞箭质心的飞行跟同样重力和空气阻力作用下同样质量的质点的飞行是一样的。月亮、地球或其它天体在空间的运动也可类似地用质点力学来描述。只要周围血浆加给红细胞的力是已知的,那么它的质心的运动也可这样来描述。但是红细胞的滚动或地球绕轴的旋转,以及一个物体相对于它的质心的任何其它运动都跟物体的具体形状有关,就不能再把它看作质点了。

牛顿定律对连续的可变形物质运动的应用是更难于证明的。它被一个暗含的假设所限制:我们感兴趣的流体或固体是连续物质。实际上,物理学家早就知道:所有物体是由分子组成的,并借助于不同强度的力²⁾把它们结合成种种形态,而分子又是由若干原子组成的。这些原子的结构则又是中心有核,在轨道上运动的电子云环绕在它周围,而轨道直径比核直径又要大很多。电子绕核运动跟行星绕太阳运动相类似,就跟太阳系一样。原子的绝大部分空间(因而也是物质的绝大部分空间)是空洞无物的。表 1.1 中罗列了几个典型的尺寸。可以假定每个核、每个电子或每个

1) 物体的质心跟它的重心相同:如果在地球表面范围内,相继在物体的不同部位用绳子把它挂起来,那末由绳子往下的延长线总会通过那么一个点,这个点就是重心。

2) 在固体中分子力是非常强的,分子只不过稍微改变其相对位置,分子的间距和它本身大小是差不多的。液体中分子力不那么强,分子随时可以运动并经受频繁的撞击,然而它们的间距跟它们本身尺寸仍是差不多的。气体中分子力很弱,分子间距比它们本身大得多,当然这个距离还是很小的(常温常压下约为 $3 \times 10^{-9} \text{m}$ ($30 \text{ \AA}$))。

表1.1 典型尺寸

直径	
原子核	$2 \times 10^{-12} \text{ m}$
原子或气体分子	$6 \times 10^{-10} \text{ m}$
聚合物分子	$\sim 10^{-8} \text{ m}$
气体分子的间距	$3 \times 10^{-9} \text{ m}$
直径	
血液红细胞	$8 \times 10^{-6} \text{ m}$
毛细血管	$4-6 \times 10^{-6} \text{ m}$
动脉	10^{-2} m
地球	$1.2 \times 10^7 \text{ m}$
太阳	$1.4 \times 10^9 \text{ m}$
太阳系	$1.2 \times 10^{13} \text{ m}$
银河	10^{20} m
银河间距	10^{22} m

原子,甚至每个分子都可以被看作为质点,它们在分子力影响下的运动,都可用牛顿定律推导出来。可是,在常温常压的空气中每立方厘米约有 10^{20} 个分子,每个分子的位置都应当精确地指明。这样的任务实际上是不可能实现的。分子之间的空间跟我们想要描述其运动的流体的自然区域或实验范围相比通常是非常小的(见表 1.1),这个事实指出我们应如何来克服这一困难。我们可以假定物质被分割成极大量的微元,其大小跟我们所关心的范围相比是很小的,但是它们仍然包含了许多分子。就实验而言,微元实际上只占据一个点,因而可以认为是个质点;但就分子运动而言,它是非常大的,它的所有性质如它的速度或其中物质的密度,都可对它的所有构成分子取平均值而求得。这样一来我们可以不管分子运动的无规性质而把物质当作是连续的。牛顿定律就能用到物质的每一微元(如果物质是流体就称为流体微元或流体质点)上,这就得到一个精确而又实用的描述整体运动的方法。

血液中有一些非常大的分子[例如脂蛋白,直径约为 $(3-5) \times 10^{-8} \text{ m}$] 在非常狭窄的管道(有些毛细血管直径低到 $4 \times 10^{-6} \text{ m}$)

中流动,即便这样管道直径比分子直径还是大得很多。于是血浆就仍可按上述方式处理为连续流体。但是全血并不总是可以这样处理的,因为它不仅有血浆,而且还有大量细胞,其数量在正常人体中约占体积的 45%,而且主要由红细胞组成(见第 10 章)。如果细胞很小而又很多,足以忽略它们各自的个性,它们对全血的影响可以用某种平均的方式来描述,那么全血就可以看作连续流体,这就很方便了。在大动脉中就是这种情况(例如主动脉直径约为红细胞直径的 2000 倍)。但是毛细血管直径跟红细胞直径相差不多,描述这种小血管中的流动就必须分别地处理血浆与细胞。总的说来,全血在大血管中实际上是连续的,在微循环中则不然,但血浆在两种情形下均为连续的。

在本书第一部分中我们将阐述连续流体与固体的力学基本知识,而首先介绍质点力学的牛顿定律。其中出现的数学符号,可以当作是便于精确表达力学定律的一种速记形式,在它们首次出现时都稍加解释,懂得一些微积分的读者对其中大部分符号一定是很熟悉的。

第2章 质点力学

位 置

为了描述质点的运动，我们必须能够精确地描述它在运动时不断改变的空间位置。为此我们假定在空间中通过给定点 O 画三条直线并把它们固定住，同时使每条线跟其它两条都互相垂直。房间的两堵墙的交线以及它们和地板的交线就是个例子，这时 O 点是房间的某一角落。如果一只苍蝇在房间墙壁上爬动[图 2.1(a)]，把它离地板的高度（譬如说 z ）和离另一堵垂直墙壁的距离（譬如说 x ）记下来，我们就能指明它在任一时刻的位置。类似地，如果苍蝇在房间内飞行，那么把它离开互相垂直的平面（地板和两堵墙）的距离记下来，就能指明它的位置。对于我们想要指明位置的任何一点都可这样做。如果通过 P 点引出三条线跟原来的三条线以直角相交于点 X, Y, Z [图 2.1(b)]，三段长度 OX （称 x ）、 $OY(y)$ 和 $OZ(z)$ 就唯一地指明了 P 点的位置。这些长度称为 P 点

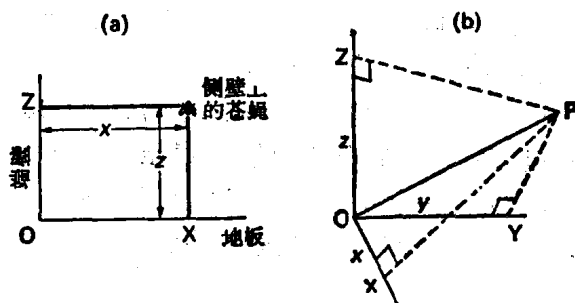


图 2.1 (a) 苍蝇在墙壁上的位置由它到端壁的距离 x 和到地板的距离 z 来指明； x 与 z 是它相对于由 OX, OZ 线所形成的轴的坐标。(b) 三维空间中 P 点的位置可用它（在房间内飞行的苍蝇）到三个互相垂直的平面（两堵墙和地板）的距离来指明。 P 的坐标是 (x, y, z) ，房间角落 O 是坐标原点。

相对于通过 O 的三根轴的坐标。直线 OX, OY, OZ 通常分别称为 x 轴、 y 轴和 z 轴。P 点到 O 点的距离根据勾股定理可知等于 $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, 这个值跟轴的方向无关。

重要的是要记住这种描述方法包含两点。首先, 虽然 O 点和三根轴的选择是任意的, 然而一旦选好后就必须一直固定不动。例如, 如果相对于房间内两个不同角落来分别指明两个质点的位置, 那么要想讨论它们的相互作用是毫无希望的。我们常常用最方便的方式来选择这些轴。例如, 如果质点在一个平面上动来动去(苍蝇在墙上爬), 聪明的办法是选取一根轴(譬如 OY)垂直于该平面, 结果 y 总是保持不变, 就只需要指明两个长度 x, z 。其次, 必须明确地指明测量 x, y, z 时所用的长度单位, 而且自始至终就用这个单位。长度不仅仅是一个数值, 它是带有量纲的量, 就得有单位才能测量它。在本书中我们常常采用米 (m) 或厘米 ($1\text{cm} = 10^{-2}\text{m}$) 或微米 ($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$); 所有单位问题将在稍后(第 3 章中)再充分地加以讨论。

速 度

描述质点运动的另一个重要的量是它的速度, 即质点位置的变化率。考虑沿直线 OX 运动的一个质点(图 2.2 (a)), 它的位置只用一个坐标, 即它到 O 的距离 x 就可指明。如果在时刻 t 它的坐标是 x , 一会儿之后 (t') 它的坐标是 x' , 那么质点在 t 到 t' 的时间间隔内的平均速度或速率是 $v = (x' - x)/(t' - t)$ 。不管时间间隔是多么短, 这是一个完全确定的量。甚至当我们使间隔 $t' - t$ 变成无限小, 因而 $x' - x$ 也是无限小时, v 还是确定的。当 $t' - t$ 趋于 0 时, v 趋近于一个值, 它就称为质点在时刻 t 的瞬时速度, 记为

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (2.1)$$

如果质点返向 O 点而运动, x' 比 x 还要小, 所以速度显然是负的。

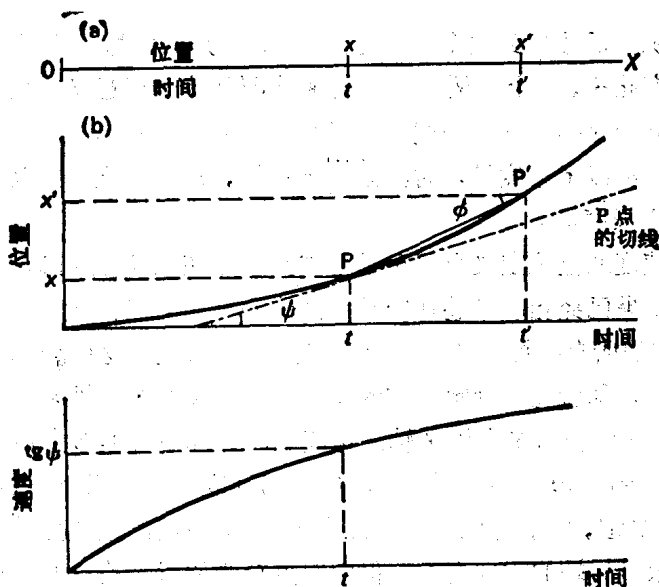


图 2.2 (a) 质点沿直线 OX 运动, 它到固定点 O 的距离在时刻 t 为 x , 在时刻 t' 为 x' 。量 $(x' - x)/(t' - t)$ 是质点在时间从 t 到 t' 的间隔内的平均速度。当间隔取得越来越小时, $t' - t$ 趋于零, $x' - x$ 也变得越来短, 但平均速度趋于一个确定的极限 v 。这就是质点在时刻 t 的速度。(b) 上图表示某个质点运动的距离 x 对时间 t 的关系曲线图。量 $(x' - x)/(t' - t)$ 是直线 PP' 的斜率 (等于 $\tan\phi$)。当 $t' - t$ 趋于零时, 该直线成为曲线在 P 点处的切线 (点划线), 它的斜率等于 $v (= \tan\phi)$, 即在时刻 t 的质点速度。下图表示相应的 v 对 t 的关系曲线图。

dx/dt 的定义可从图 2.2 (b) 得到说明。上图表示 x 如何随时间 t 而改变。标注了两个代表性的点 $P(x, t)$ 和 $P'(x', t')$ 。量 $(x' - x)/(t' - t)$ 是两点连线与时间轴夹角 ϕ 的正切。这个量称为该直线的斜率。当 $t' - t$ 趋于零时, 点 P' 移向 P , 它们的连线趋向于曲线在 P 点的切线 [图 2.2 (b) 中以点划线表示]。于是, 量 dx/dt , 即 v , 是曲线在 P 点的切线的斜率, 取值为 $\tan\phi$ 。在图 2.2 (b) 中还画出了表明 v 如何随 t 而改变的相应曲线。

Zeno 似非而是的论点的解决就在于取极限这种方法所具有的性能, 只有它才能用质点在相继时刻的位置来确定它的瞬时速度。事实上, 一直到十七世纪牛顿和莱布尼兹 (Leibnitz) 首先发