



21世纪高等学校规划教材

YIYONG
WULIXUE

医用物理学

主 编 王 涛



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

医用物理学

· · · ·



21世纪高等学校规划教材

医用物理学

主 编 王 涛

编 者 谭小丹 李贞姬

陈祎辰 辛学刚

北京邮电大学出版社

· 北京 ·

内 容 提 要

本教材是为适应我国高等医学教育的改革和发展,根据医学专业所需物理学基础知识和学时要求,参考国内外有关优秀教材和专业书籍而组织编写的。全书以物理学的基本概念、基本规律和基本方法为基础,体现了“以应用为目的,以必须够用为度”的基础理论教学原则。注意选择和突出这些物理学理论在生物医学中具有重要应用和影响的内容,结合医学中的实际问题展开论述。全书分为 10 章,分别介绍了力学、流体力学、振动和波、电磁学、波动光学、几何光学、X 射线、激光及磁共振等物理学知识。每章后均配有适量习题。

本教材可作为医学类各专业本专科学生的医用物理教材或参考书,也可供其他感兴趣的读者参考。

图书在版编目(CIP)数据

医用物理学/王涛主编.--北京:北京邮电大学出版社,2010.2

ISBN 978-7-5635-2125-8

I. ①医… II. ①王… III. ①医用物理学-高等学校-教材 IV. ①R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 009141 号

书 名 医用物理学
主 编 王 涛
责任编辑 唐咸荣
出版发行 北京邮电大学出版社
社 址 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)
电话传真 010-62282185(发行部) 010-62283578(传真)
电子信箱 ctrd@buptpress.com
经 销 各地新华书店
印 刷 北京忠信诚胶印厂
开 本 787 mm×960 mm 1/16
印 张 16.5
字 数 335 千字
版 次 2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-2125-8

定价: 32.00 元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

前 言

物理学的发展经历了长期的过程。特别是从16世纪末到20世纪初,物理学在一系列问题上取得了重大成就,并且孕育出包括天文学、电磁学、经典力学、放射物理学、核物理学等一系列分支学科,成为一切自然科学的基础。人们意识到总结物质世界运动规律的物理学在现实世界中的很多方面都起着重要的作用。但是从无生命形态的物质世界总结发展的规律是否适用于被认为是神圣的生命体上,这一认识的统一却不是一帆风顺的。生命体能够生长、繁殖和消亡,其复杂性和特殊性是所有其他物体所没有的。因此,19世纪早期很多科学家认为存在着不同规律来控制生命物质中有机分子的结构和组织。由于这类分子通常十分复杂和巨大,曾经认为存在一种现有物理学定律无法解释的“生命力”,只能由具有生命的个体通过它来产生有机分子。随着1828年有机化合物尿素的人工合成,这一观点终于被打破。现在,人们明白物理学定律也同样适用于生命有机体的各个层面。数百年来,物理学定律在对于生命系统的理解和认识中发挥了至关重要的作用。

本书是为普通医科高等学校医学专业学生编写的。编写过程中注意吸收国内外现有教材的优点,力求做到内容选择合适、结构编排合理、文字叙述通俗易懂、医学问题典型。使读者明确感受到物理学和医学的密切关系,激发学习热情,提高学习效果。

当前高等教育已经进入了快速发展时期,办学规模不断地扩大,本科普及型教育理念成为教育界的共识。教学内容和方式也随之不断推陈出新,各个学校的教学特色日益鲜明。为了适应这一发展的需求,根据医科学生的专业和学习特点编写了本教材。

本书的内容分为10章,主要是体现了物理学的基本理论和相关医学应用的结合。

第1章综合介绍了牛顿力学的基本定律。在介绍过程中注意结合实例,特别是以人体的力学分析实例加以说明,便于理解。

第2章以血液的流动为背景,介绍了流体力学的基本原理,结合心脏血液循环系统的动力学问题,用物理学的观点给出说明。

第3章通过肺泡生理功能的实现问题,引入液体表面张力、附加压强等一些有关液体表面现象的物理学原理。

第4章是与听力及耳科学密切相关的机械振动、波和声学等基本概念的介绍。包括了机械振动、机械波以及声和超声的物理性质和规律及其在医学上的应用。

第5章是与电生理学相关电学基础知识的介绍。内容从静电场理论过渡到电学元件和基本电路的规律。随后对于人体中电活动的基本原理进行了分析和介绍。

第6章以眼睛的屈光为背景介绍几何光学中近轴光的折射规律和薄透镜成像的基本知

识,解释了各类屈光不正的现象和矫正方法。

光的波动特性是对光本质认识的一个飞跃。第7章讨论重点是光的干涉、衍射、偏振等体现波动特性的典型实验现象和规律。

X射线成像是现代医学成像的一个重要内容。第8章简要阐述了X射线的产生、性质和基本成像技术。

激光和激光技术是一个目前还在快速发展的领域。通过第9章的学习可以了解关于激光产生的原理、基本特性以及光和生物学组织相互作用的机理,对于今后深入学习和理解激光的医学应用具有重要作用。

磁共振技术是现代医学影像学的基础,第10章从原子的磁共振现象原理入手简要介绍了磁共振成像技术的基本内容和发展前景。

每章后面都配有练习题,以此帮助学生加深对所学理论知识的理解和学习解决实际问题的方法。

参加本书编写的人员都是南方医科大学从事一线教学的老师,其中第1章和第2章由陈祎辰博士编写;第3章和第4章由谭小丹博士编写;第5章、第7章由李贞姬博士编写;第9章由王涛博士编写;第8章和第10章由辛学刚博士编写。全书由王涛博士统稿、定稿。本书在编写过程中还得到了南方医科大学生物医学工程学院研究生张爱桃、董洁、戴红娅等同学的协助,她们在整个编写过程中做了许多具体工作,在此一并表示感谢。

为了便于学生学习,对很多物理学原理的数学推导过程进行了删减,而相关生物医学内容的融入主要在于体现和说明基本物理学原理的应用,处理上难免有不妥甚至错误之处,希望读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 力学	1
1.1 质点运动	1
1.1.1 速度和加速度	1
1.1.2 自由落体	4
1.1.3 抛射体	6
1.2 动力学和牛顿运动定律	9
1.2.1 牛顿第一定律(惯性定律)	9
1.2.2 牛顿第二定律	9
1.2.3 牛顿第三定律	9
1.2.4 物理学中的基本力	10
1.2.5 摩擦和动物运动的关系	11
1.2.6 牛顿定律的应用举例	12
1.3 静力学	13
1.3.1 力矩与转动平衡	13
1.3.2 刚体的平衡	14
1.3.3 平衡与稳定性	16
1.3.4 杠杆及其机械利益	18
1.3.5 身体中的杠杆	19
1.4 转动	22
1.4.1 质点的圆周运动	23
1.4.2 向心力	24
1.4.3 离心机 and 细胞分离	25
1.4.4 鸟的滑翔	25
1.4.5 刚体的转动	26
1.4.6 角运动和角动量	29
1.5 骨的力学性质	31
1.5.1 应力和应变	31
1.5.2 弹性模量	34
1.5.3 骨的力学性质	35
习题 1	37



第2章 流体力学	40
2.1 非粘性流体的力学	40
2.1.1 密度和压强	41
2.1.2 流体静压、帕斯卡原理和水压机	42
2.1.3 阿基米德原理和鱼的浮力	43
2.1.4 运动的理想流体	45
2.1.5 连续性方程	47
2.1.6 伯努利方程	48
2.1.7 伯努利方程与连续性方程的应用	49
2.2 粘性流体的流动 血液的层流	51
2.2.1 流体的粘性	51
2.2.2 层流和湍流	53
2.2.3 泊肃叶定律	54
2.2.4 斯托克斯粘性公式	55
2.2.5 血液的流动	55
2.2.6 连续性方程 人体内血流速度分布	58
2.2.7 粘性流体的伯努利方程 心脏做功	59
习题2	60
第3章 液体的表面现象	62
3.1 液体的表面张力和表面能	62
3.1.1 液体的表面张力	62
3.1.2 表面能	64
3.2 弯曲液面的附加压强	65
3.3 毛细现象和气体栓塞	67
3.3.1 润湿与不润湿现象	67
3.3.2 毛细现象	68
3.3.3 气体栓塞	69
3.4 表面活性物质与表面吸附	70
3.4.1 表面活性物质、表面吸附	70
3.4.2 肺泡的物理现象	70
习题3	71
第4章 振动和波、声	73
4.1 简谐振动	73
4.1.1 简谐振动方程	73

4.1.2	简谐振动的特征量	74
4.1.3	简谐振动的矢量图示法	75
4.1.4	同方向、同频率简谐振动的合成	76
4.2	弹性系统的振动	77
4.2.1	谐振子的自由振动	77
4.2.2	谐振子的阻尼振动、受迫振动和共振	78
4.3	机械波的产生和传播	80
4.3.1	机械波	80
4.3.2	波动方程	81
4.3.3	波的能量和强度	83
4.4	波的干涉	84
4.4.1	惠更斯原理	84
4.4.2	波的干涉	85
4.4.3	驻波	86
4.4.4	半波损失	88
4.5	多普勒效应	89
4.5.1	多普勒效应	89
4.5.2	多普勒效应的应用	91
4.6	声波	92
4.6.1	声波的性质	92
4.6.2	听阈、痛阈及声强级	94
4.6.3	超声波的性质	96
4.6.4	超声波在医学上的应用	97
	习题 4	99
第 5 章	电磁学	101
5.1	静电学	101
5.1.1	电荷与库仑定律	101
5.1.2	电场和电场强度	103
5.1.3	电势和电势差	105
5.1.4	电偶极子和电偶层	110
5.2	直流电	111
5.2.1	欧姆定律的微分形式	111
5.2.2	基尔霍夫定律	115
5.2.3	电容器的充放电	117
5.3	人体内的电	119



5.3.1	神经系统和神经元	119
5.3.2	心电知识	130
5.3.3	电泳	136
5.4	电磁场与交流电	136
5.4.1	磁感应强度 磁通量	136
5.4.2	电流的磁场 毕奥-萨伐尔定律	137
5.4.3	磁场对运动电荷的作用	139
5.4.4	磁介质 磁场的能量	144
5.4.5	生物磁场和磁场的生物效应	146
5.5	电磁波的辐射和吸收	148
5.5.1	辐射	148
5.5.2	电磁波中的能流	149
5.5.3	电磁波谱 辐射的传播	150
5.5.4	黑体辐射 从人体发出的辐射	152
5.5.5	温室效应	153
5.5.6	生物的红外辐射	154
5.5.7	辐射的吸收 吸收分光光度计	155
5.5.8	生物学中的紫外辐射	156
	习题 5	157
第 6 章 几何光学		160
6.1	球面折射	160
6.1.1	单球面折射	160
6.1.2	焦点、焦距和焦度	162
6.1.3	共轴多球面系统	163
6.2	薄透镜	164
6.3	透镜成像	164
6.3.1	薄透镜成像	164
6.3.2	薄透镜的组合	166
6.3.3	圆柱透镜	167
6.3.4	薄透镜的像差	167
6.4	眼的光学系统	169
6.4.1	人眼的结构	169
6.4.2	人眼的调节功能	170
6.4.3	孔径和焦深	170
6.4.4	眼睛的屈光系统	171



6.4.5 简约眼	172
6.4.6 光觉的产生	173
6.4.7 视力异常	174
6.5 放大镜 纤镜 显微镜	177
6.5.1 放大镜	177
6.5.2 纤镜	178
6.5.3 显微镜	179
习题 6	181
第 7 章 波动光学	183
7.1 光的干涉	183
7.1.1 光程和光程差	183
7.1.2 杨氏实验	184
7.1.3 洛埃镜	186
7.1.4 薄膜干涉	187
7.2 光的衍射	188
7.2.1 惠更斯-菲涅耳原理	188
7.2.2 单缝夫琅禾费衍射	188
7.2.3 圆孔夫琅禾费衍射和光学仪器的分辨率	191
7.2.4 衍射光栅	193
7.3 光的偏振	195
7.3.1 自然光与偏振光	195
7.3.2 玻片堆	198
7.3.3 双折射	199
7.3.4 二向色性	200
7.3.5 偏振光的产生和检验	200
7.3.6 旋光性	201
习题 7	202
第 8 章 X 射线及其医学应用	203
8.1 X 射线的产生	203
8.1.1 X 射线的产生	203
8.1.2 X 射线的硬度和强度	206
8.2 X 射线衍射和 X 射线谱	206
8.2.1 晶体对 X 射线的衍射	206
8.2.2 X 射线谱	207



8.3	X射线的基本性质	209
8.3.1	物理效应	209
8.3.2	化学效应	210
8.3.3	生物效应	210
8.4	X射线的衰减规律	211
8.5	X射线在医学上的应用	211
8.5.1	治疗方面的应用	212
8.5.2	药物分析方面的应用	212
8.5.3	诊断方面的应用	212
8.6	X射线的辐射防护	214
8.6.1	X射线辐射防护的基本原则	214
8.6.2	医疗放射诊断X射线防护	215
	习题8	216
第9章 激光及其医学应用		217
9.1	原子模型	217
9.2	光的自发辐射和受激辐射	218
9.2.1	光子和能量	218
9.2.2	光和物质的相互作用	219
9.3	激光产生的基本原理	220
9.3.1	介质中光的受激辐射放大	220
9.3.2	玻耳兹曼分布	221
9.3.3	粒子数反转分布	221
9.3.4	光谐振腔(optical resonating cavity)	222
9.3.5	激光的横模	223
9.3.6	激光器的种类	224
9.4	激光的物理特性	225
9.4.1	激光的高强度性	225
9.4.2	激光的高单色性	225
9.4.3	激光的高度定向性	226
9.4.4	激光的高相干性	226
9.5	激光在生物医学中的应用	226
9.5.1	激光和生物体组织的相互作用	226
9.5.2	光凝结术(photocoagulation)	228
9.5.3	光蒸发术(photovaporization)	229
9.5.4	光的波长和光的吸收特性	229



9.5.5 生物体的光谱测量和诊断	230
9.5.6 光学计算机断层成像(optical computed tomography)	231
9.5.7 光学相干层析术(optical coherence tomography)	231
习题 9	232
第 10 章 磁共振成像及其在医学中的应用	233
10.1 原子核的磁共振现象	233
10.1.1 原子核的基本结构和基本特性	233
10.1.2 原子核的自旋角动量和磁矩	234
10.1.3 原子核在外磁场中的运动	234
10.1.4 非磁性物质在外磁场下的磁化效应	236
10.1.5 射频脉冲的共振吸收及弛豫过程	236
10.2 磁共振成像原理及基本参数测量	238
10.2.1 磁共振成像原理	238
10.2.2 基本磁共振序列及其测量原理	238
10.3 医学磁共振成像	239
10.3.1 正常组织的磁共振成像特点	239
10.3.2 病理组织的磁共振成像特点	241
10.3.3 医学磁共振成像的突出优点	241
10.4 磁共振成像系统	242
10.5 磁共振成像的进展	244
习题 10	244
附录 中英文名词对照	246
参考文献	252

第 1 章

力 学

力学是研究力作用于物体使之产生运动的物理学分支.它是第一个将物理定律成功地应用于生命体系的物理学领域,主要用于理解动物运动的规律.现代的力学概念首先由伊萨克·牛顿在其出版于 1687 年的有关力学的著作《自然哲学之数学原理》中阐明.而人们对力学的研究起源更早,可追溯到公元前 4 世纪的古希腊哲学家.此外,沉迷于科学和体育的古希腊人也最先将物理原理应用于动物的运动.亚里士多德曾写道:“运动之动物乃通过推挤其下之物而改变其位置……”尽管希腊哲学家提出的一些概念是错的,但是他们对自然普遍原理的寻求为早期的科学思想打下了烙印.

古希腊衰落之后,科学研究工作进入了停歇期.直到文艺复兴开始,包括科学在内的各种活动又重现生机.在文艺复兴期间,达·芬奇(1452 ~ 1519)对动物的运动与肌肉的功能做了详细的观察和研究.达·芬奇之后,数以百计的科学家做了进一步的研究,随着分析技术和仪器的发展,增进了对动物运动的力学原理的理解.今天,人体运动的研究已成为人体运动学以及生物力学的一部分.人体运动学主要针对运动员的活动研究人体运动,而生物力学则涵盖更广的领域——不仅包括肌肉运动,也包括骨骼和组织(如肺、心脏)的力学性质的研究.义肢与人工心脏等设备的制造是当前生物力学研究的活跃领域.

本章内容分为以下几部分:前两节是有关质点的运动学和动力学;1.3 节主要讨论静力平衡与作用在人体肌肉和骨骼上的力;1.4 节讨论刚体的转动;1.5 节讨论骨的力学性质.

1.1 质点运动

运动学是对运动的定量描述.就沿着空间某一轨道运动的质点来说,它能够精确地描述质点的位置、速度和加速度是如何随时间变化的.就物体来说,它能用数学描述物体在空中移动和旋转时的位置和取向.运动学能精确地描述运动,但不涉及运动的原因.运动学可以说是力学的“解剖学”.

1.1.1 速度和加速度

物理学中对一个物体的最基本描述是确定其在空间的位置,它是一个三维空间的问题.例



如,欲确定室内一点 P 的位置(见图 1-1),可从一角(称为原点 O) 开始,先沿一边测其距离 r_x ,再测沿另一边的距离 r_y ,最后测其高度 r_z . 物理测量常常从一个适当的参考点 O 开始,这个点即是一组相互垂直的轴(即坐标系)的原点. 一个质点的位移 r 是同时指它的方向和离原点 O 的距离. 在直角(笛卡儿)坐标系中 r 可由它在 x, y 和 z 轴上的投影(分量)决定. 图 1-1 中的 r 的大小可用毕达哥拉斯定理求出:

$$r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}$$

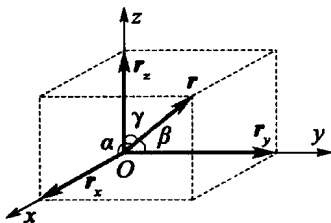


图 1-1 一点在直角坐标系中的位移

r 的方向可由 r 相对于 x, y 和 z 轴的夹角 α, β 和 γ 求出,即 $\cos \alpha = r_x/r, \cos \beta = r_y/r$ 和 $\cos \gamma = r_z/r, \cos \alpha, \cos \beta$ 及 $\cos \gamma$ 称为方向余弦.

对二维空间中的位移,如图 1-2 所示,某一点的位移只用分量 r_x 和 r_y ,其方向用一个角 θ 确定.

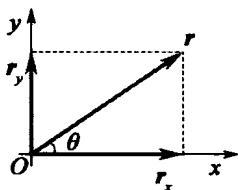


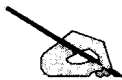
图 1-2 二维空间中的位移

速率(speed)是指单位时间内运动的总路程(不计方向),如 70 km/h. 速度(velocity)是指单位时间内的位移,如向北 70 km/h. 匀速度意味着不仅速率不变同时方向也不变. 假设在 30 min 内向正北方驾车行驶了 25 km,则平均速度为 $25 \text{ km}/0.5 \text{ h} = 50 \text{ km/h}$. 在这次短途旅行中,瞬时速度很可能是改变的,瞬时速度是指某一时刻速度的数值(可以看一下速度表得知). 质点的瞬时速度是位移随时间的变化率,其数学表述式为

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} \quad (1-1)$$

即,瞬时速度是在非常小的时间间隔中的平均速度的极限值,用微分表示. 一个物体的最简单的运动是匀速直线运动.

加速度(acceleration)是速度随时间的变化率. 与速度一样,加速度也是一个矢量,即



$$a = \frac{dv}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1-2)$$

在运动学中为什么需要加速度的概念呢?伽利略(Galileo Galilei, 1564 ~ 1642)曾在他的落体运动的研究中作了部分回答.下面是引自伽利略的《两种新科学》中的一段话.

“因此,当我观察原来静止的物体,从高处下落而速度不断获得新的增加时,为什么我们不能认为这种增加的方式是格外简单而又为人们所易理解的呢?现在如果仔细地考察这件事情,我们就会发现再也没有比重复等量的增加更简单的了.”……“正如考虑和定义匀速运动时,用相等的时间间隔通过相等的距离一样,我们也以类似的方式,考虑相等的时间间隔的速度增加,可以想象其并不复杂.所以,我们要讨论的运动的定义可以陈述如下:物体从静止出发,在相等时间间隔内获得相等的速度增加的运动,称为匀加速运动.”

后来,伽利略进一步用实验证明了落体运动确实是匀加速运动,伽利略当时是用他自己的脉搏来测量时间的.尚需牛顿解决的问题是:为什么所有落体都具有相同的加速度而与其重量无关.但牛顿还从更一般上证明了,作用在物体上的力与其加速度的关系.所以,只要确定了作用在物体上的合力,就等于确定了该物体上的加速度.然后,由加速度经过两次积分就能解出运动学方程.

最简单的加速运动的例子是伽利略考虑过的,即匀加速运动,见例 1.1.

例 1.1 一辆沿直线行驶的汽车,其速度在 10 s 内由 30 km/h 均匀增至 70 km/h,它的加速度多大?

解

$$1 \text{ km/h} = \frac{1\,000 \text{ m}}{3\,600 \text{ s}} = 0.278 \text{ m/s}$$

因此

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(70 - 30) \times (0.278 \text{ m/s})}{10 \text{ s}} = 1.1 \text{ m/s}^2$$

因为 $\Delta v = v_t - v_0$, 式中 v_0 是物体的初速度, v_t 是物体的末速度, 所以由加速度定义可得

$$v_t - v_0 = at \quad (1-3)$$

此式表明,速度的改变值等于加速度乘以速度改变所经历的时间.

当速度均匀变化,平均速度等于初速度和末速度的平均值,即

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v_t}{2} \quad (1-4)$$

在时间 t 内移动的距离可由 $s = \bar{v}t$ 求出.则由方程(1-3)和(1-4)可得

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (1-5)$$

以及

$$v_t^2 = v_0^2 + 2as \quad (1-6)$$

对匀加速运动,已知 v_0 、 v_t 、 a 、 t 和 s 中的任何 3 个量,从公式(1-3) ~ (1-6) 选择适当的



方程式就可以求出其他的未知量. 把数值代入各方程的过程中, 注意选择一个方向作为正方向, 并且要把这个正方向统一用于位移、速度和加速度中.

例 1.2 高速赛车是以它的速度从 0 增至 100 km/h 的加速能力来鉴定其性能的, 较好的赛车要在 9 s 内做到这一点. 试问在这样的测试中赛车行驶的距离多远?

解

$$100 \text{ km/h} = \frac{100 \text{ km/h} \times 1\,000}{3\,600 \text{ s}} = 27.8 \text{ m/s}$$

所以

$$a = \frac{27.8 \text{ m/s} - 0}{9 \text{ s}} = 3.1 \text{ m/s}^2$$

由公式(1-5)得

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 = \frac{1}{2} \times 3.1 \text{ m/s}^2 \times (9 \text{ s})^2 = 126 \text{ m}$$

1.1.2 自由落体

自由落体是除它自身的重量(即重力)外不受其他力作用的物体. 自由落体的加速度在纬度 45° 的海平面上近似为 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$. g 的值随在地球上的不同地区而有改变, 但为计算简单, 近似认为是常量. 因为一个自由落体是被均匀加速的, 所以 1.1.1 节导出的公式(1-3) ~ (1-6) 完全可用于这种运动形式.

我们平常观察到的落体并非严格的自由落体, 因为它们还受到空气阻力, 由于空气阻力随速率的增大而增大, 因而加速度不再是均匀的. 对于一个很轻的落体, 如一片羽毛或一粒灰尘, 其空气阻力很快大到与它的重力相等, 之后即以匀速下落, 这个匀速率即是它的最终速率.

一个从飞机里跳出来的人, 如他延迟张开降落伞, 则其最终速率可达约 190 km/h. 如他张开降落伞, 由于增加了空气阻力, 他的最终速率减小到约 22 km/h, 这个速率大致等于一个人从 2 m 高跳下而获得的速率.

例 1.3 证明上面所说的这个人从 2 m 高跳下, 是以 22 km/h 的速率着地.

解 因为要求末速度, 利用公式(1-6)有

$$v_i^2 = v_0^2 + 2as = 2 \times 9.8 \times 2 = 39.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

因此

$$v_i = \sqrt{39.2 \text{ m}^2/\text{s}^2} = 6.26 \text{ m/s} = 22.5 \text{ km/h}$$

我们可以利用匀加速运动公式来分析各种动物的相对跳跃能力. 表 1-1 列出了一些动物垂直跳跃高度的记录. 注意, 人的跳跃高度比跳高纪录(约 2 m)要低. 这是因为人只要把他的身体横过来就已经能越过大约为他身体高度一半的横杆. 由于这种所谓俯卧式的跳高方法并不为其他动物采用(见图 1-3), 所以对于跳跃能力的比较来说, 表中所列的数据是合适的.