

# 医学物理学

Medical Physics

约翰 R·甘 美 伦 著  
詹姆士 G·斯高弗朗尼克  
《医学物理学》 翻译组 译

# 医学物理学

编著者

J.R.Cameron. J.G.Skofronick

译者

(按章顺序排列)

|     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 阎肃  | 杨光  | 谭润初 | 王书光 | 葛成荫 | 张家修 | 时遵  | 周冠英 |
| 林意群 | 张国是 | 张均一 | 谢绎利 | 王仁宙 | 秦斌  | 段蔚莹 | 郑长魁 |
| 周述志 | 谢楠柱 | 黄微波 | 赵福华 | 贝琪  | 黄耀熊 | 廖海洪 | 徐纪湖 |
| 吴慕贤 | 沈友民 | 胡运惠 | 李元怀 | 戴仁恩 |     |     |     |

中国医学物理学会出版

广州日报印刷厂印

1981

## 译 者 的 话

《医学物理学》，J.R.Cameron等编，1978年版是一本供医学院校用的物理学教材。

生物学、化学在医学教学中的地位，已得到公认。物理学则不然。学过大学一年级物理学的医学生，对物理学和医学的关系不甚了了，学过的物理知识在前、后期学习中，又往往没有派上用场。因而不断出现“医学生为什么要学物理学？”以及“是否浪费时间？”等问题。虽然问题是多方面的，但没有一本合适的、针对性强的教材，引不起学生学习物理学的兴趣，恐怕是问题的症结所在。Cameron等为了从根本上解决这一问题，以医学为经，以物理学为纬，为大学一年级医学生编写了这本《医学物理学》教材。

在教材编写过程中，他们曾广泛征求意见，并数易其稿。有些章，如骨骼物理学和核医学的物理学，是在有关专家协助下写出的。有些章，如心血管仪器和医学中的计算机，干脆请专家代笔。由此可见，编者一丝不苟、认真负责的精神。这本书是我们迄今看到的、质量堪称上乘的、供大学一年级医学生用的物理学教材。

全书共20章，译本近35万字。内容分两大方面：一是骨骼、心、肺、耳、眼、血液循环等器官系统的物理学（如人体冷冻学、表面活性物质、分压与物质交换、射线的生物作用等），编者们用物理学的观点，对这些器官、系统作了精辟的论述，说理有独到之处，实属难能可贵。二是力、热、电、磁、超声、激光、X射线、核素等物理因子在医学上的应用，对热象图仪、心脏起搏器、心电向量环仪、超声A、B、M扫描、干板X射线照相术、计算机X线断层扫描、 $\gamma$ 照相机等物理仪器的原理和应用以及优缺点都作了详细的说明，以便有关工作者能更好地使用这些仪器。

我们深信，使用这本书作教材，不仅能解决“医学生为什么要学物理学？”的问题，而且也为医学生学好后继学科打下了牢固的物理基础。

本书虽是一本大学一年级教材，但多数医学工作者都能从中找到对自己有用的东西，凡是想知道人体是怎样工作的以及医用物理仪器原理的人，都会发现这是一本饶有兴趣的书。由于本书只用到代数和三角的数学知识，因而也不难体会其深刻内容。

本译本是筹备组成立以来组译的第三本书，参加翻译的有22所兄弟院校的30位教师。译本的铅印出版，得到广州医学院领导和广州日报印刷厂的大力支持，广州医学院和中山医学院的物理教师，在校对和发行方面也做了很多工作，特此一并致谢。

中国医学物理学会(筹)

80年12月

# 序

你想知道下面这些问题的答案吗？例如，你进行各种活动时出了多少力？你能做多少有用功？一张心电图与心电活动有什么关系？医用X射线机如何工作？以及你从X射线机接受多少辐射量等等？这些问题和许多其他类似问题都涉及物理学对医学的应用，都将在本书一一得到回答。

尽管化学和生物学在医学上的地位已得到公认，但物理学的地位就往往不那么明显。绝大多数医学生及与医学有关专业的学生虽然要学习一门基础物理课程，但他们并不或几乎不了解物理学和医学之间的关系。出现这种情况的主要原因是，传统的大学一年级物理学课程内容太多，从而挤掉了物理学的医学应用，使之得不到适当的论述。

本书主要是为将来以某项医学为职业的学生编写的，并简明地描述物理学对理解人体行为的价值。本书包括医学物理学两大领域：（一）物理学对医学的应用：例如，力学、热学、光学、声学、电学和电磁学等等对医学的应用；（二）各种器官、系统的物理学：例如，眼睛、耳朵、肺及心脏和循环系统的物理学。由于目前物理学在医学中的最主要应用涉及到放射学领域，因此，我们写了四章讨论放射学的几个侧面。它们是放射诊断、核医学、放射治疗和放射防护。医学物理学专家多在其中一个领域工作。最后一章介绍计算机在医学中的应用。

虽然这本书主要是为具有普通物理学知识的学生编写的课本，但我们认为对于想了解人体是如何工作以及在医学诊断与治疗中所用仪器的物理原理的任何人来说，其中许多内容都是饶有兴趣的，也是可以弄懂的。书中用到的数学基本上是代数水平，虽然用到对数和指数，但附录A对它们进行了复习。最常用的单位是国际制（SI）单位，但偶而也用到医学某些特殊学科中用的单位。血压用帕斯卡（ $\text{N}/\text{M}^2$ ）为单位，可能要花一点时间才能了解。附录B给出了国际单位（SI）和其他单位的换算。附录C中给出标准男人的物理数据。本书虽然不是一本参考书，但在每一章之后还是列入了一个参考书目提要（略），并在书后列出了一个总参考书目提要。

本书基本上是由我们二人编写的。但有些章，如第三章和第七章，就是在有关专家协助下写成的。有的，如第十章和二十章就是请专家写的。我们高度赞赏他们对本书的贡献。

本书在出版前虽数易其稿，但恐难免避免错误，希读者批评指正（译时有删节）。

J. R. Cameron

J. G. Skofronick

# 目 录

## 序

|                        |        |
|------------------------|--------|
| 第一章 医学物理学、模型法及测量 ..... | ( 1 )  |
| 1.1 什么是医学物理学? .....    | ( 1 )  |
| 1.2 模型法 .....          | ( 2 )  |
| 1.3 测量 .....           | ( 3 )  |
| 复习题 .....              | ( 8 )  |
| 第二章 作用在人体内的力 .....     | ( 10 ) |
| 2.1 静力学 .....          | ( 11 ) |
| 2.2 摩擦力 .....          | ( 15 ) |
| 2.3 动力学 .....          | ( 16 ) |
| 复习题 .....              | ( 21 ) |
| 第三章 骨骼的物理学 .....       | ( 23 ) |
| 3.1 骨是由什么组成的? .....    | ( 24 ) |
| 3.2 你的骨有多坚固? .....     | ( 25 ) |
| 3.3 骨关节的润滑 .....       | ( 30 ) |
| 3.4 人体的骨矿物质的测定 .....   | ( 31 ) |
| 复习题 .....              | ( 33 ) |
| 第四章 热和冷在医学上的应用 .....   | ( 34 ) |
| 4.1 热和温度的物理基础 .....    | ( 34 ) |
| 4.2 温度计和温标 .....       | ( 34 ) |
| 4.3 热象仪——测绘人体的温度 ..... | ( 36 ) |
| 4.4 热疗法 .....          | ( 39 ) |
| 4.5 低温在医学中的应用 .....    | ( 41 ) |
| 4.6 冷冻手术 .....         | ( 43 ) |
| 4.7 低温实验中的安全问题 .....   | ( 44 ) |
| 复习题 .....              | ( 44 ) |
| 第五章 人体的能量、功和功率 .....   | ( 46 ) |
| 5.1 人体的能量守恒 .....      | ( 46 ) |
| 5.2 人体的能量变化 .....      | ( 47 ) |
| 5.3 功和功率 .....         | ( 50 ) |
| 5.4 人体的散热 .....        | ( 52 ) |
| 复习题 .....              | ( 55 ) |
| 第六章 压强 .....           | ( 57 ) |
| 6.1 体内压强的测量 .....      | ( 58 ) |

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 6.2 颅骨内的压强 .....           | (59)  |
| 6.3 眼 压 .....              | (59)  |
| 6.4 消化系统内的压强 .....         | (60)  |
| 6.5 骨骼中的压强 .....           | (61)  |
| 6.6 膀胱中的压强 .....           | (61)  |
| 6.7 潜水时压强的作用 .....         | (62)  |
| 6.8 高压氧疗法 (HOT) .....      | (64)  |
| 复习题 .....                  | (64)  |
| <b>第七章 肺和呼吸的物理现象</b> ..... | (66)  |
| 7.1 导气管 .....              | (67)  |
| 7.2 血液和肺怎样相互作用 .....       | (68)  |
| 7.3 肺容积的测量 .....           | (72)  |
| 7.4 肺的压强、气流、容积的关系 .....    | (73)  |
| 7.5 肺泡的物理现象 .....          | (76)  |
| 7.6 呼吸的机制 .....            | (78)  |
| 7.7 导气管阻力 .....            | (79)  |
| 7.8 呼吸功 .....              | (80)  |
| 7.9 某些常见肺脏疾病的物理现象 .....    | (81)  |
| 复习题 .....                  | (82)  |
| <b>第八章 心血管系统的物理学</b> ..... | (84)  |
| 8.1 心血管系统的主要组成部分 .....     | (85)  |
| 8.2 毛细血管系统中氧与二氧化碳的交换 ..... | (87)  |
| 8.3 心脏作的功 .....            | (87)  |
| 8.4 血压及其测量 .....           | (88)  |
| 8.5 血管壁的侧压强 (跨壁压强) .....   | (90)  |
| 8.6 柏努利原理在心血管系统的应用 .....   | (91)  |
| 8.7 人的血液流得多快? .....        | (92)  |
| 8.8 血液流动——层流与湍流 .....      | (93)  |
| 8.9 心音 .....               | (94)  |
| 8.10 某些心血管疾病的物理学 .....     | (95)  |
| 8.11 血液的其他一些功能 .....       | (97)  |
| 复习题 .....                  | (97)  |
| <b>第九章 人体内的电</b> .....     | (99)  |
| 9.1 神经系统和神经元 .....         | (100) |
| 9.2 神经电位 .....             | (100) |
| 9.3 肌肉的电信号——肌电图 .....      | (103) |
| 9.4 心脏的电信号——心电图 .....      | (106) |

|      |                        |       |
|------|------------------------|-------|
| 9.5  | 脑的电信号——脑电图 .....       | (109) |
| 9.6  | 眼的电信号——视网膜电图和眼电图 ..... | (112) |
| 9.7  | 心和脑的磁信号——心磁图和脑磁图 ..... | (114) |
| 9.8  | 目前关于体内电的研究 .....       | (116) |
|      | 复习题 .....              | (117) |
| 第十章  | 心血管仪器 .....            | (118) |
| 10.1 | 心脏的生物电位 .....          | (118) |
| 10.2 | 电极 .....               | (118) |
| 10.3 | 放大器 .....              | (120) |
| 10.4 | 病人监护 .....             | (121) |
| 10.5 | 除颤器 .....              | (122) |
| 10.6 | 起搏器 .....              | (123) |
|      | 复习题 .....              | (124) |
| 第十一章 | 电和磁在医学上的应用 .....       | (125) |
| 11.1 | 电击 .....               | (125) |
| 11.2 | 高频电在医学中的应用 .....       | (128) |
| 11.3 | 低频电和磁在医学上的应用 .....     | (130) |
| 11.4 | 关于电对人体的作用的现代研究 .....   | (133) |
|      | 复习题 .....              | (134) |
| 第十二章 | 医用声学 .....             | (135) |
| 12.1 | 声的一般性质 .....           | (135) |
| 12.2 | 叩诊 .....               | (140) |
| 12.3 | 听诊器 .....              | (140) |
| 12.4 | 人体超声图 .....            | (142) |
| 12.5 | 超声测量运动 .....           | (147) |
| 12.6 | 超声用于治疗时的生理效应 .....     | (150) |
| 12.7 | 音语的产生(发声) .....        | (151) |
|      | 复习题 .....              | (154) |
| 第十三章 | 耳和听的物理学 .....          | (155) |
| 13.1 | 外耳 .....               | (156) |
| 13.2 | 中耳 .....               | (156) |
| 13.3 | 内耳 .....               | (158) |
| 13.4 | 耳的灵敏度 .....            | (159) |
| 13.5 | 听力测验 .....             | (160) |
| 13.6 | 耳聋和助听器 .....           | (161) |
|      | 复习题 .....              | (162) |
| 第十四章 | 光在医学中的应用 .....         | (163) |

|             |                                 |              |
|-------------|---------------------------------|--------------|
| 14.1        | 光的量度及单位 .....                   | (164)        |
| 14.2        | 可见光在医学中的应用 .....                | (165)        |
| 14.3        | 紫外线和红外线在医学中的应用 .....            | (166)        |
| 14.4        | 激光在医学中的应用 .....                 | (168)        |
| 14.5        | 显微镜在医学中的应用 .....                | (170)        |
|             | 复习题 .....                       | (171)        |
| <b>第十五章</b> | <b>眼睛和视觉的物理学 .....</b>          | <b>(173)</b> |
| 15.1        | 眼睛的聚焦成份 .....                   | (174)        |
| 15.2        | 眼睛的其他成份 .....                   | (176)        |
| 15.3        | 网膜—眼睛的光探测器 .....                | (177)        |
| 15.4        | 你能看见多么少的光? .....                | (179)        |
| 15.5        | 关于眼睛的衍射效应 .....                 | (180)        |
| 15.6        | 你的眼睛多敏锐? .....                  | (180)        |
| 15.7        | 视错觉及有关的现象 .....                 | (182)        |
| 15.8        | 视觉缺陷及其矫正 .....                  | (185)        |
| 15.9        | 色觉和色象差 .....                    | (189)        |
| 15.10       | 用于眼科的仪器 .....                   | (190)        |
|             | 复习题 .....                       | (194)        |
| <b>第十六章</b> | <b>X射线诊断物理学 .....</b>           | <b>(196)</b> |
| 16.1        | X射线束的产生 .....                   | (197)        |
| 16.2        | X射线是怎样被吸收的 .....                | (201)        |
| 16.3        | 拍摄X线照片 .....                    | (206)        |
| 16.4        | X射线对病人的辐射 .....                 | (209)        |
| 16.5        | X射线实况影象的产生—X线透视检查法 .....        | (211)        |
| 16.6        | X射线体层摄影 .....                   | (213)        |
| 16.7        | 不用底片的放射照片 .....                 | (215)        |
|             | 复习题 .....                       | (217)        |
| <b>第十七章</b> | <b>核医学物理学(医学中的放射性同位素) .....</b> | <b>(220)</b> |
| 17.1        | 复习放射性的基本性质和单位 .....             | (222)        |
| 17.2        | 供核医学用的放射源 .....                 | (227)        |
| 17.3        | 核医学的统计学概述 .....                 | (228)        |
| 17.4        | 基本核测仪表及其在临床上的应用 .....           | (230)        |
| 17.5        | 核医学成像设备 .....                   | (237)        |
| 17.6        | 核医学成像过程的物理原理 .....              | (240)        |
| 17.7        | 放射性治疗 .....                     | (242)        |
| 17.8        | 核医学中的辐射剂量 .....                 | (242)        |
|             | 复习题 .....                       | (244)        |

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| <b>第十八章 放射治疗的物理学</b>     | (245) |
| 18.1 用于放射治疗的剂量单位—拉德和戈瑞   | (246) |
| 18.2 放射治疗的原理             | (246) |
| 18.3 制定和执行放射治疗方案的简明过程    | (248) |
| 18.4 兆伏治疗法               | (252) |
| 18.5 短程放射治疗              | (254) |
| 18.6 其它放射源               | (256) |
| 18.7 关于放射治疗的结束语          | (258) |
| 复习题                      | (259) |
| <b>第十九章 医学中辐射防护</b>      | (260) |
| 19.1 电离辐射的生物效应           | (262) |
| 19.2 辐射防护的单位及限量          | (264) |
| 19.3 辐射防护仪器设备            | (266) |
| 19.4 放射诊断学中的辐射防护         | (268) |
| 19.5 放射治疗中辐射防护           | (270) |
| 19.6 核药物的辐射防护            | (272) |
| 19.7 放射事故                | (274) |
| 复习题                      | (274) |
| <b>第二十章 电子计算机在医学中的应用</b> | (276) |
| 20.1 病史记录                | (277) |
| 20.2 化验工作自动化             | (278) |
| 20.3 心电图解释               | (279) |
| 20.4 病人的监护               | (280) |
| 20.5 病物—试验的相互作用          | (281) |
| 20.6 开处方                 | (282) |
| 20.7 肺功能的测试              | (282) |
| 20.8 医学报告系统              | (282) |
| 20.9 医院的簿记               | (283) |
| 20.10 电子计算机在医学上的其他应用     | (283) |
| 复习题                      | (284) |
| <b>附录A 指数和对数</b>         | (285) |
| A.1 指数性能                 | (285) |
| A.2 对数                   | (286) |
| <b>附录B 单位</b>            | (287) |
| <b>附录C 标准人的参考资料</b>      | (289) |
| <b>习题解答</b>              | (293) |
| 封面设计: 吕荆如                |       |

# 第一章 医学物理学、模型法及测量

本章讨论三个问题，首先讨论医学物理学的含义，叙述一些与之有关和互相重叠的学科。其次，提出模型，它是一个在科学上、工程上及医学上最根本的概念，还讨论了反馈的概念，举了一些例，反馈是很多模型的一个重要特征。最后一节讨论测量问题。这一节的大部分是复习初等物理学课程教过的内容。在这节还讨论了准确测量人体体重的问题，读者会发现这种测量并不简单。

## 1.1 什么是医学物理学？

医学物理学是医学和物理学两大学科的会合。在本书中“医学物理学”这个词指两大方面：一方面指物理学用于阐明人体在健康和疾病时的功能，这应当称为生理学的物理学；另一方面指物理学用于医学实践，它包括：听诊、叩诊、激光、超声、辐射等等。

“Physical”这个词出现在一些医学词汇中。仅仅在一代以前，在英国“a professor of physic”实际上是一个医学教授，physicist（物理学家）和physician（医生）来自于希腊语中同一词根physike（自然的学问）。今天一个医生在记下患者的病历后，第一件要作的事就是物理检查：诸如听诊、叩诊、量脉搏和其他应用物理的方法。物理医学是医学的一个分支，它用物理手段诊断和治疗机体的疾病与损伤，例如推拿、按摩、体操、热疗及水疗等。物理疗法是用物理的方法对病人和体弱者进行治疗，如按摩和体操疗法，而不用药物。

原则上，生物物理学应包括医学物理学，把它作为一个重要的专门领域。但事实上生物物理学是一个规定得比较严格的学科，实际上和医学没有什么关系。生物物理学主要是关于生物高分子、病毒等等的物理学，尽管其通过细胞膜的物质输送这一领域是接近于医学物理学的。生物物理学家进行基础研究，这种研究可能对下一代的医学实践有所改进；而医学物理学家通常从事于实用研究，他们希望这些研究能改进当代的医学实践。

医学物理学又可细分为几个分支。美国大多数医学物理学家从事于放射物理学，它涉及物理学在放射问题上的应用，包括辐射在疾病的诊断和治疗方面的使用，也包括放射性核素在医学的应用（核医学）。医学物理学另一个大分支涉及到病人、工作人员和全民的辐射防护。在美国常把这个领域叫做保健物理学。保健物理学也包括对医院以外如原子能发电站和工业的辐射防护问题。保健物理学将在19章详细讨论。

物理学的应用领域经常被称为工程学，于是医学物理学也就可以叫做医学工程学。然而实际上，一个自称为医学物理学家的人，其工作领域很可能是放射物理学，而一个自称为医学工程师或生物医学工程师的人大概从事于医学仪器（通常是电子仪器）工作。此外，医学物理学家通常是理学士，而医学工程师则是（通常是电子工程的）工学士，在某些领域中，如超声在医学中的应用，计算机在医学中的应用，医学物理学家和医学工程师的人数大致相等（如果工作仅限于和医院伤病员密切相关的问题，“医学”这个词有时被“临床”这个词所代替，例如临床工程师和临床物理学）。

在美国只有少数医院或医学院有医学物理学科(系)或医学工程科(系)。然而,在英国和北欧国家的医学院中,这些学科(系)是常见的。这类中最大的科(系)在苏格兰的格兰斯格,1974年在这个北苏格兰政府支持的临床物理学和工程学科(系)有比150还多的专业人员,他们为这个区域内的医院服务。

虽然“医学工程”和“生物医学工程”这两个词基本上是同义语,但生物工程却有更广泛的意义。生物工程包括任何工程学在生物学任何领域中的应用。生物工程包括医学工程(作为一个分支),但它也包括另外一些领域,例如农业工程。设计牛房和施肥机都是生物工程的问题。

## 1.2 模型法

尽管物理学家相信自然界遵循物理定律,我们也知道有些物理现象的数学描述是复杂到难以求出解答的。例如,你撕下这页书的一小块并让它向地板下落,它在下落时将发生各种各样的回转。其所经路径无疑将由物理定律决定,但几乎不可能写出一个方程式来描述这个路径。物理学家确信如果没有其它力的影响,重力将使它沿垂直于地板的方向下落,但是空气流和静电将干扰它的路径。同理,虽然人体机能的一切方面都涉及到物理学定律,但其各个情况是如此复杂,以致根据我们现有物理知识几乎不可能预言其精确行为。虽然如此,但是物理定律的知识还是有助于我们了解人体的生理的和病理的现象。

有时为了研究一个物理现象,而对它进行简化,办法是选择其主要特征,而忽略不重要的方面,这种描述只能是基本正确的,但总比完全没有要好的多。在企图了解人体的物理现象时,也经常采用模拟的方法。物理学家习惯于用模拟的方法来说明和考虑问题。但要铭记模拟的方法从来不是完善的,例如,眼睛在很多方面和照相机类似,然而,当把需要冲洗和更换的胶片来与作为光探测器的视网膜相比较时,这种模拟就很差劲了。本书常用模拟来说明人体物理学的某些方面。我们希望这些说明是成功的,但请注意所有解释在某种程度上都是不完善的。实际情况总是比所描述的更为复杂。

物理学家应用的模拟时常采用模型。模型制作在科学活动上是常见的。19世纪著名物理学家开尔文说过,“直至我能够做出某一事物的机械模型以前,我从来不感到满足,如果我能够做出某一事物的机械模型,我就能理解它!”。有些模型所涉及的物理现象似乎与我们所研究的课题是完全无关的,例如,在研究人体循环系统时,常用一种以电流代表血液流动的模型。这个电流模型能很好地模拟心血管系统的很多现象。当然,如果你不了解电现象,这个模型就对你没有多大帮助。另外如前所述,所有模型都有其局限性。血液是由红细胞和血浆所组成的,并且当血液流向四肢时,红血球在血液中的百分比(红细胞容积)将随之变化。这个现象(第八章讨论)是很难用电模型来模拟的。

有些模型是数学的,方程式就是用来描述和预言一些系统的物理现象的数学模型,在日常的物理世界中,有很多这样的方程式,其中某些方程式具有如此广泛的应用,因而被称为定律。例如力 $F$ 、质量 $m$ 和加速度 $a$ 之间的关系通常写成 $F = ma$ ,这就是众所周知的牛顿第二定律。这个定律还有一些其他的数学表达式,一般人可能认为与上式完全不同,但物理学家认识到这是同一事物的另一表达方式。在第二章中牛顿第二定律就写成 $F = \Delta mv / \Delta t$ 的形式,

式中的 $v$ 为速度， $t$ 为时间， $\Delta$ 表示一个量的微小变化， $mv$ 是动量， $\Delta mv/\Delta t$ 表示某一量（此处为动量）对时间的变化率。

物理学家们常用函数 $f$ 这一概念，注意不应把表示函数的符号 $f$ 和表示力的符号 $F$ 相混淆，方程式 $W = f(H)$ 表示重量 $W$ 是高度 $H$ 的函数。但它既不能说明重量和高度的具体关系，也不能说明重量还和其他什么因素有关，它只是一种数学缩写方式。在医学领域里，可以用 $R = f(p)$ 来表示心率 $R$ 是人体所产生功率 $p$ 的函数。下一个步骤是消除 $f$ 的符号，并且写出表达这些事物各个量之间具体关系的方程式，这才是困难的课题。

一个医学研究者可以用人体某一机能的模型来预言原来没有想到的一些特性。另一方面，有些模型是非常粗糙的，它只能起抛砖引玉的作用。

人体的许多机能是被稳定的内环境控制的，类似于工程上的反馈控制。一个工程师如果希望控制某一随时间变化的量，他就从生产中取出一个样品，并且用此样品做信号去控制生产，以达到所要求的水平。这就是把输出的一部分向生产源反馈，以调节生产。如果系统是这样设计的，当某个量增加时，反馈将使这个量减少，反之当这个量减少时，反馈则使其增加，这就是负反馈，负反馈产生稳定的控制。当样品中某个量改变时，若反馈使生产发生同方向的变化，这是正反馈，因而不稳定的控制。

负反馈的一个简单例子是用恒温器控制室内温度。炉子产生热量，恒温器用温度计测量热的输出。当温度上升到高于某一预先给定固定点时，恒温器给炉子送出信号以停止热的产生。由于热量从室内散失，温度下降，一直降到上述固定点以下时，恒温器就送出一个信号使炉子重新生热。

负反馈控制在人体中是很普遍的。例如人体的一个重要功能是控制血液中钙含量。如果钙含量降到太低，人体就从骨中释放一些钙以增加血中的钙含量。如果释放的钙太多，则经过人体肾脏排出一些钙来降低血中的含钙量。

虽然人体的许多控制机理现在还不清楚，但是已经发现各种疾病的产生都和这些控制机理的失效有直接关系，例如当人体成长时，其细胞数持续增加，直至达到成年为止。以后身材将在某些类型反馈的控制下或多或少地保持恒定。有些时候某些细胞失去对控制的反应。因而变成肿瘤。

### 1.3 测量

科学的主要特征之一是(对感兴趣的量进行)重复测量的能力。科学的发展和测量能力的发展密切地联系着的。在医学实践中，测量临床感兴趣的量的早期努力常常被轻视，认为这会贬低医生的技巧。例如虽然早在17世纪就已经能够测量体温和脉搏率，但直到19世纪还没有把它们作为常规测量。在本世纪由于临床实践中使用的定量测量的数量和准确程度都增加了，医学科学才取得了稳定的进展。

图1.1是医学实践中常用的几种常见测量，其中一些比另一些更具有重复性，例如X射线就只能给出人体内定性的情况；由两台不同的X射线机拍摄的同一体同一部位的X射线照片，给门外汉看可能是完全不同的。

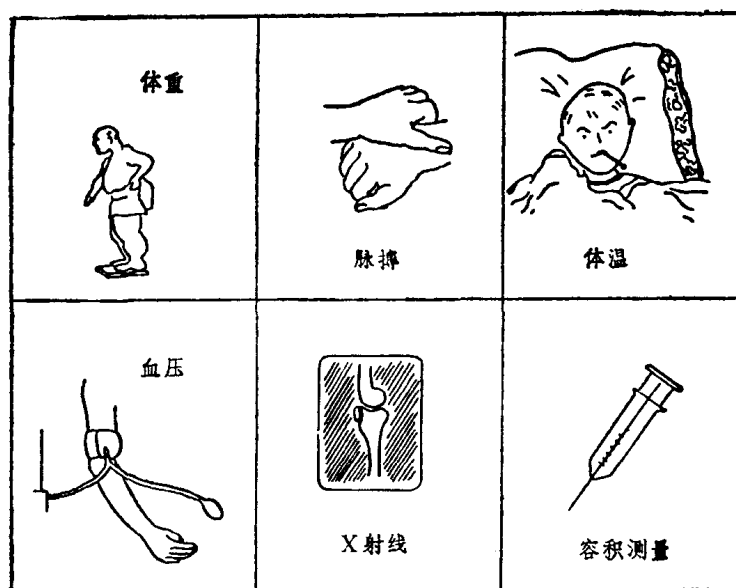


图 1.1 医学领域中的一些常见测量

在普通物理学课程中，将学习很多不同类型的测量，通常用国际单位系统（SI）即米制单位来测量各种量（见附录 B）。可惜它们在美国还没有像世界各国那样普遍采用。本书所采用的基本国际单位：长度是米（m），质量是千克（kg），时间是秒（sec）。为了方便，我们常用更大或更小的单位，如厘米（cm）为百分之一米，毫米（mm）为千分之一米，克（g）为千分之一千克；毫克（mg）为千分之一克或百万分之一千克。为了直观感觉，有时也用英制单位，如英尺、磅、加仑。有时也使用医学的特殊分支中的通用单位（见附录 B）。

使用单位时就意味着有一个“真正”的或标准的单位，所测量的量可以和这个单位相比较。大多数现代国家都设有专门的、使测量系统标准化的实验室。在美国，位于华盛顿（D.C）附近的国家标准局（NBS）就执行这个任务，NBS和医学接触很少，但它在电离辐射（用于治癌）测量的标准化方面起着重要作用。

在医学中有时为了方便，在测量时用非标准单位，例如压力涉及每单位面积上的力，它的正确单位为牛顿每平方米，达因每平方厘米和磅每平方英寸，而血压一般用毫米水银柱高（Hg）来表示，这是一个液体的高度！这样高度的水银柱底部所具有的压力等于血压。我们在第六章进一步讨论压力。

下面给出一个早已不用的但有历史意义的非标准单位的例子，你或许记得加里略在教堂里观察吊灯架摆动而发现单摆原理的情况，他是用脉搏来测量摆动的周期，并且发现大摆幅所用的时间和小摆幅所用的时间相等。这导致摆钟的发明。其后不久（1602年），加里略的一个医学界朋友桑克托罗斯（Sanctorius）发明了测量病人脉搏的仪器（Pulsologium），这实际就是一个单摆，由一个助手调整摆长直至使摆动频率等于病人的脉搏率（这是Sanctorius命

名的)，于是脉搏率就以摆长的形式记录下来！

关于另一些涉及身体和时间的物理测量，可把它们分为两组：重复过程的测量（如脉搏）和非重复过程的测量（如肾从血液清除异物所需的时间）。在人体内的非重复过程的时间有长有短，短到1毫秒（如神经细胞的作用电势），长如一个人的寿命。

重复过程的测量通常包括每秒、每分、每小时等重复的次数。例如，脉搏率大约是70次/分，而呼吸率是15次/分。由精神活动引起的大脑中的电信号，其频率是从小于1次/秒到多于20次/秒。（每秒一个周期，用一个专门的单位赫兹（Hz）表示）。

人体很多精细的过程是重复性的。例如，人体有一种生理节律（大约24小时）。甚至当一个人生活在一个深洞里，而没有任何显示时间的途径时，这种节律依然存在。生物控制的另一种时钟，是一个运转得很慢的钟。它控制一个正在成长的人的体骼。这个时钟引起增长率的波动，周期为14到18个月。

在科学上，准确度和精密度具有不同的意义。准确度涉及一个给定的测量接近公认的标准到什么程度。例如，一个人的高度，测量值是1.765米，与标准米尺对照能够准确到0.003米（3毫米）。精密度涉及到测量的可重复性，并且不必与测量的准确度有关。例如，相继测量一个病人的体温10次，得到了下列摄氏温度值\*：36.1 36.0 36.1 36.2 36.4 36.0 36.3 36.3 36.4和36.2。精密度是相当好的，对于平均值36.2°C的变差为0.2°C。然而，当把这支温度计与一支最近校准过的标准温度计比较时，可能发现这支温度计有缺陷，读数低了3°C，这支不准确的温度计不能用于临床。

人们通常希望测量同时具有好的准确度和精密度。然而，有时甚至在采用具有良好精密度的测量技术时也得不到一个准确的测量值。在这样情况下，这个精密的、但不准确的测量值可能还是有用的。例如，上述的那支不准确的温度计，就可以用来确定一个患者的体温是稳定的，上升的或是下降的。有时，准确度为一些不能控制的因素所限制。例如，要准确地测量身体的内部（如骨中矿物质的含量）是困难的。用来测量骨中矿物质的某一技术，有大约1%的精密度，但只有大约3—4%的准确度（参看第三章），这种技术对于显示骨中矿物质含量的变化仍然是很有用的。

测量过程可能显著地改变被测量的量，这是一个公认的科学事实，在医学中尤为正确。例如，血压的测量过程可能引入误差（不可靠性），当一个逗人喜爱的女子给一个年青男子测量血压时，血压会偏高。反之亦然。虽然论据不充分，但通常是可信的。在了解患者的病史时，也能出现这种类型的错误。患者可能不愿意回答有关其私生活的问题，如性习惯。人们认为使用计算机询问患者可以减少这类误差（参看20章）。

一种临床测量，本身不能完全确定一个患者是健康或是有病。因为对于每一种医学检验，其正常值，通常都有一个确认的范围。此外，当测量值恰好刚刚在正常值范围以上或以下时，通常只认为可疑，用这些测量值，不能作出任何确定的诊断。同样，很多临床检验室的实验结果，可能由于外界因素，如加入药品，而受到了影响，我们将在第二十章里讨论，如何用计算机来排除这种药品-检验的相互作用。

---

\* 正常体温约是37°C或98.6F

一个医生在全面考虑了一个患者的病史，物理检查的发现，以及临床检验室的测量结果之后，他（她）就应该确定患者是否有病。如果有病的话，那末是什么病。医生有时也会作出错误的诊断，这并不奇怪。这些错误的诊断有两种类型：假阳性和假阴性。当他（她）被诊断为害某种病，而实际并没有时，这就是假阳性。反之当他（她）被诊断没有害某一种病，而实际却有时，这就是假阴性。在某些情况下，一个错误诊断对一个患者的生命可能给予很大的打击。例如，一个被认为害风湿性心脏病的年青妇女，在完全卧床休息消磨了几年时光以后，才发现诊断为假阳性；而她实际患关节炎，患这种病的入应该经常活动，以避免关节僵硬。对于许多种类的癌，在早期很容易作出假阴性的诊断错误，因为这时肿瘤是很小的。由于癌的治愈可能性依赖于癌的早期发现，一个假阴性诊断会大大减少患者存活的机会。

研究检验室检验值之所以错误的原因，发展新的临床检验方法，以及制造更好的仪器，就能够减少误诊（假阳性和假阴性）。减少测量中的错误和不可靠性的办法是：小心谨慎进行测量，多次重复测量，使用可靠的仪器并且适当校准这些仪器。为了说明测量误差如何能够被减少，让我们考虑如何准确地、精密地测定一个人的体重问题（下面讨论中的数据全部都是虚构的）。

我们首先让山姆（Sam），一个自愿的受试者，站在浴室的磅称盘上，然后小心谨慎地用放大镜读标度。虽然，比较理想的是，让他裸体，这样后来就不必称量他的衣服以校准重量，但我们还是让他穿着衣服。让他几次踏上和踏下磅称，看看每次是否都得到相相同的体重。结果，由于他在磅盘上的位置不同，体重有微小的变化，测量值列在表1.1的第二行。他的平均体重是156.3磅，全部测量读数有三分之二在156.0~156.3磅之间。这个结果可以写成 $156.3 \pm 0.3$ 磅，而0.3磅常常叫做测量的不准确度或标准偏差（SD）。

我们想到浴室的磅称可能不很准确，因为它很旧。有人建议到当地的药店去，那里有一个收费磅称，他认为这种磅称当然应该是准确的，否则物主就不会在人们使用它的时候收那么多钱！这项研究所需要的财政投资似乎过高，由于这是一项没有得到支助的研究工作。我们决定使用体育馆的几台新磅称，在其中两台磅称上获得的结果列在表1.1的第三行和第四行，其平均和标准偏差分别是 $155.2 \pm 0.2$ 磅和 $155.5 \pm 0.2$ 磅。我们正准备讨论浴室磅称的误差的时候，想起山姆在这两次量体重之间已经吃了午餐，并上过厕所。由于我们既没有称量他的食物，也没有称量他的排泄物，似乎以不作任何结论为宜。

当山姆站在体育馆的磅称上时，我们注意到无论他怎样小心翼翼地安静站着，他的体重总会有微小的晃动。有人认为这种晃动可能是由于山姆的心跳引起的。他指出，每次心跳将迫使一团血液向上流动，这就迫使身体向下运动（牛顿第三定律），结果是体重随着每次心跳而出现表现的增加。当急速流动的大量血液到达主动脉弓并转向下肢流动时，这就会产生与前相反的效应，从而引起体重的表现减少。如果摸山姆的脉搏，就会发现脉搏与这种晃动是同步的。

我们想到，如果有一台响应更慢的磅称，它将能够从心跳而引起的变化中得到平均数，从而消除这种晃动，有人建议到地方医院里去使用杆式磅称，移动金属杆上游码，通过杠杆系统就可以平衡称盘上的重量。果然，我们再也不可能看到由心跳而引起的晃动了。并注

表1.1 几台磅称多次测量体重的结果

| 测量体重<br>次数 | 浴室<br>磅称 | 体育馆<br>磅称 1 | 体育馆<br>磅称 2 | 医院<br>磅称 |
|------------|----------|-------------|-------------|----------|
| 1          | 156.3    | 155.0       | 155.6       | 156.0    |
| 2          | 155.9    | 155.2       | 155.4       | 156.2    |
| 3          | 156.0    | 155.3       | 155.3       | 155.9    |
| 4          | 156.7    | 155.4       | 155.5       | 155.8    |
| 5          | 156.8    | 155.1       | 155.7       | 156.1    |
| 6          | 156.1    | 155.5       | 155.2       | 156.0    |
| 7          | 156.3    | 154.9       | 155.8       | 155.9    |
| 8          | 156.2    | 155.3       | 155.4       | 156.1    |
| 9          | 156.4    | 155.1       | 155.7       | 156.1    |
| 平均值        | 156.3    | 155.2       | 155.5       | 156.0    |
| 标准误差       | 0.3      | 0.2         | 0.2         | 0.1      |

意到一个读数者的结果比其他读数者的结果好得多，而且每次都得到相同的数值。原来他不是轻轻地移动游码来达到平衡，而是每次都把游码放在同一点上来判断磅称是否平衡，他的这些数据并不代表独立的称量，因而被弃置不用。一个医院磅称的测量结果列在表1.1第五行。平均体重是 $156.0 \pm 0.1$ 磅。

我们问一个护士，这些磅称的准确度多大，每隔多长时间校正一次。他说：准确度没有多大关系，因为一磅的误差没有多大的临床意义。他建议我们找医院里的物理学家谈一谈，他应该知道这件事。我们在放射疗区找到了他，他正在喝茶。（他好像对跟他正在闲聊的技术员比对我们提出的科学问题更感兴趣）。在说明了我们的来意之后，他解释说一切测量设备都有一定的误差。他说如果我们想要更进一步探索这个问题，就应该去找国家度量衡实验室，因为它有检查肉称用的砝码等等。我们访问了这个办公室。显然这里的人们不愿意参预了我们的研究计划。因为这超出了他们的工作领域。他们还是告诉了我们，他们有专用的砝码，它仅仅被用来检查他们日常工作中使用的砝码。他们说，这些砝码被叫做第二标准，已经与NBS的第一标准比较过，得到了证书，并愿意让我们看看证书来证明这事。

我们决定放弃医用磅称的校准问题，因为看来护士的意见是正确的——1磅的误差无关紧要。然而，所有这些研究引起了我们对其他误差原因的兴趣。有人提出关于呼吸对体重的影响问题，一个人肺中充满气体是否比肺空着的时候重些呢？我们决定做这个实验。让山姆作一次深吸气，而后强迫排气，山姆的体重在这两种情况下是相同的。但是我们注意到，当他做深吸气和深呼气时，他的体重似乎在晃动。有人想起，空气大约每公升重1克，而肺大约容纳5公升的空气。由于每磅等于454克，肺内的空气的重量就大约是0.01磅，这比我们希望用不准确度为0.1磅的磅称所能观察到的重量小得多，另一人又想起了阿基米德原理。因为人体处在空气的“海洋”之中，它就受到空气的浮力，这浮力等于人体所排开的空气的重量。这样，不论空气是在肺内还是在肺外，都不会有什么差别。我们决定计算一个154

磅(70公斤)的人受到多大的浮力。人体的密度大约和淡水一样(这就是为什么他刚好能够飘浮在淡水里的原因),而1公斤的水有一公升的体积,于是70公斤的人大约有70公升的体积。由于1公升的空气有大约1.1克的质量,空气对人体的浮力作用就将是70克或0.15磅。

这个计算并不能说明为什么山姆的体重在他呼吸时会出现变化。我们记得,吸气时,膈肌下降,从而引起重心稍有下降,呼气时,膈肌上升,从而引起重心稍有上升。吸气开始时,重心向下的加速度将引起体重的瞬时的表观减小;而呼气时,重心向上的加速度将引起类似的增加(图1.2)。我们还发现山姆较快地吸呼时产生的影响较大。

我们决定到一个附近的酒吧间去讨论获得准确重量时的其它误差。有人想起,连续不断地从体表和肺蒸发的水分会使体重随时间而稍有减轻,也有人记得在本书第七章里谈到的:每次呼吸时排出的 $\text{CO}_2$ 的量比体内吸收氧的量稍低,虽然他记不得低多少。在又喝了一杯啤酒之后,我们就放弃了准确称量的问题,有人提出了准确地测量膀胱压力这个医学物理学的问题。

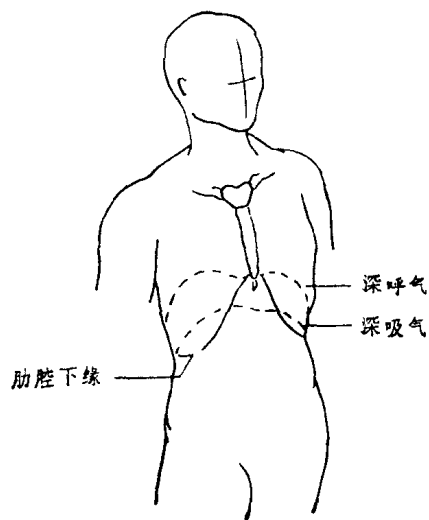


图1.2 深吸气和深呼气时的横脉位置,重心也随着稍有下降或上升

概括地说, (1) 一切测量都是不确定的和不准确的, (2) 用特殊的方法能减小误差和不确定度, (3) 在许多情况中, 由于被测量是变化的, 实际上没有改进测量的必要, (4) 喝啤酒会使膀胱压强增加。

## 复习题

- 1、一个医学工程师能否总是被叫做临床工程师呢?
- 2、一个保健物理学家的更合适的头衔是什么?
- 3、在什么意义上说酒精中毒是一个包含正反馈的疾病?
- 4、列举物理检查的常做的三个物理测量?
- 5、详细地用“分”来表示你的年龄, 包括误差的估计。
- 6、a、叙述一种可以用来测定一个还在生长的人的身高的方法, 其误差来源是什么?  
b、测量高度是否是确定生长的最好方法? 你能想出其他方法吗?
- 7、以15秒为一个周期, 测十次你的脉搏,  
a、你每分钟的平均脉搏数是多少?  
b、估计该测量的准确度和精密度。怎样才能改善准确度?
- 8、单摆的周期由  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$  给出, 这里  $l$  是摆长,  $g$  是重力加速度, 用Sanctorius