

生物医学工程原理

霍纪文 郑 谦 主编

中国医科大学科技编辑部

一九八六年八月

目 录

第一章	生物医学工程概述.....	(1)
第二章	人体概述.....	(20)
第三章	血液的特性.....	(31)
第四章	血液动力学基础.....	(52)
第五章	血液循环系统.....	(68)
第六章	循环系统的测量.....	(82)
第七章	生物电现象.....	(105)
第八章	心电图物理基础.....	(128)
第九章	几种心电描记法.....	(143)
第十章	感受器的电现象.....	(151)
第十一章	脑电分析.....	(170)
第十二章	人体的热系统.....	(201)
第十三章	人体模型.....	(227)
第十四章	跨膜转运.....	(259)
第十五章	肾功能模型.....	(277)
第十六章	人工肾.....	(293)
第十七章	肺转运功能的计量.....	(310)
第十八章	人工心肺装置.....	(335)

第一章 生物医学工程概述

一、 发展概述

生物医学工程学作为一门独立学科，迄今已有二十多年的历史。在它的推动下，医学取得了很大发展，因为它使人们的眼、手、脑都得到了更大限度的延伸，有助于人们对事物进行比较全面和客观的观察，并逐步从定性到定量，从表象到微观，从静态到动态，从手工到自动化；使人们对事物的认识较过去更深刻，分析更准确，取得的效果更好，为防治疾病提供了更为有利的条件。特别是六十年代以后，工程技术领域取得了许多重大进展，出现了不少新技术，如激光、红外线、纤维光学、超声技术、电子学中的集成电路……以至小型电子计算机的问世等。随着新技术不断地被引进到医学中来，使传统医学面貌一新。

早在1953年，在美国就开始了医用电子学的研究。后来又设一个生物医学工程研究院，作为生物医学工程的研究中心。其他各医学科学研究院和大学的生物医学研究所都分担有生物医学工程的研究项目。他们的研究项目主要有生物医学信息测量、人工脏器、人机系统和环境控制、计算机医学应用、生物力学和生物医学工程教育等方面。

在日本，自1962年才正式成立日本医用电子技术学会。1966年以来发展非常迅速，到1972年提出了医学全面电子化的口号。由于其医用电子技术工业生产向大型企业化发展，现在生产数百种医用电子装置，除供国内市场外，有将近一半的产品供出口用。

英国、西德、瑞典、荷兰等的生物医学工程水平也很高，并各有特色。如瑞典的地区医疗系统，荷兰的医疗器械，英国的检验自动化，西德的医院自动化等。

在国内，近年来的发展也很迅速。1978年全国科技大会时医科院提出发展生物医学工程后，1980年成立全国性学会，西安交大、浙江大学、华中工学院、清华大学等都积极开展生物医学工程学的研究工作，有的并开办了生物医学工程专业；招收该专业的研究生等，都在积极培养生物医学工程人才。

二、 生物医学工程学的内容

现在把生命科学与工程技术结合起来的科学有很多名称，例如有生物工程（Bioengineering）、生物医学工程（Bio medical engineering）、临床工程（clinical engineering）等。我们可以这样理解，凡是工程技术和生命科学结合的，都属于生物工程，它涉及范畴极广。其中，与医学有关的部分称为生物医学工程，它比生物工程的范围要窄些。临床工程则较生物医学工程更窄些。但在美国因许多大学中不是这样来划分的。他们把工程和医学基础研究相结合的叫生物工程，把直接为医学服务的应用研究叫生物医学工程。

生物医学工程的内容划分方法极不一致，我国在国外医学生物医学工程分册（1980

1) 有个分类建议。为了对生物医学工程有个轮廓的了解, 是否可以从医学的诊、断、治三方面来看工程学的渗入, 来划分生物医学工程的内容。

医生看病的过程, 可以概括为诊断和治疗两个阶段。现在讲“诊”和“断”时几乎是不能分开的, 但从工程学的角度来看, 诊和断是性质根本不同的两件事。“诊”实质上就是从病人身上取得信息。不管什么医生, 第一步必然是先取得病人的信息。信息愈精确、愈完整, 就愈容易确定病人的病症。不管用什么方法取得信息都必须和病人直接发生关系。和这相当的生物医学工程的内容就是生物信息测量工程, 其中包括有理论、观点、技术和方法等。医用电子技术和仪器是其主要内容。

“断”实质上是信息的分析和判断的阶段。从性质上来讲, “断”是一种模式认别的过程。模式认别的判据是医生的解剖学、病理学的知识和他的经验。当原始数据不足时, 不同人可以识别出不同的结果。和“断”相应的内容就是生物信息处理工程, 主要是电子计算机在医学中的应用。

“治疗”可以看作为一种反馈过程。即医生通过药物、手术或其他手段加于病人来改变病人的状态, 使之从失调状态, 转变为正常状态, 并力求以最佳过程来实现这种转变。这里包括生物技能代行工程和生物作用工程、生物材料人工器官、生物效应等也包括在这个范围之内。

这样, 可以大体上分为:

}	生物信息测量工程	(诊)
	生物信息处理工程	(断)
	生物技能代行工程	(治)
	生物作用工程	(治)

1. 生物信息测量工程

反映人体状态的信息是极其巨大的, 但医生所能测得的信息是极少的。最原始的, 但现在用的方法仍是触、问、望、听。这些方法很难测得确切的信息。随着工程技术的渗入医学, 这种方法不断在改进。早期的医工结合, 有听诊器 (1819 Leannec)、X线 (1895 Röntgen)、温度计、血压计等, 项目虽然不很多, 但对医学发展是个很大推进。

近几十年来, 由于电子技术的飞速发展, 使得生物信息的测量技术发生了很大变化。在这里, 关键是研制出各种换能器和探测器。如体温、血压、心电、心音等换能器以及生化分析中的各种电极等。它们使得对人体信息的探测精确化、定量化和自动化, 如心音测量用心音图机可记录出第一、二、三、四心音, 较用听诊器直接听要精确得多。并可通过频谱分析使之定量化 (正常心音60—100 CPS, 收缩期杂音 80~120 CPS, 大动脉闭锁不全杂音100~200 CPS等), 为诊断心脏病提供了可靠根据。

1) 无损伤测量

在生物信息测量工程中待研创的内容仍然很多, 急需工程与医学大力协作。现在, 国内外都把精力集中在无损伤测量的研究上, 如血流量测量, 过去用稀释法, 需注入色素或放射性同位素, 不但有损伤并且很烦琐, 后研制出电磁流量计利用血流中的带电粒子在磁场中的偏向运动, 测量流速得到准确血流量数值, 方法也简便。但得把血管放在

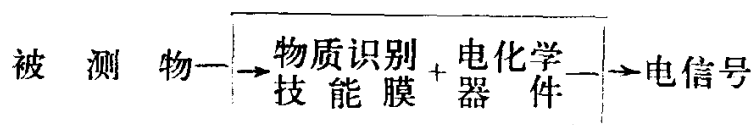
产生磁场的线圈中,仍有损伤。现又研制出超声多普勒血流量计,利用运动物体反射的超声波频率发生变化的特点来测血流速。也有的用激光多普勒效应来测微血管中的血流速。已测出了网膜血管的血流速,这对了解脑血管的血流很重要。有的测出了一个血管内不同层的血流速的分布情况,这对血管弹性、血液的粘性等都提出了过去得不到的信息。

又如对血气测量也在研制无损伤的检测方法。现在测量血中的氧分压、二氧化碳分压、血中的pH大小等用的较近代化的仪器要算丹麦 Radiometer 公司的ABL血气分析仪了,只需200 μ l动脉血则可分析出 PO_2 、 PCO_2 和pH、血红蛋白浓度(Hb)等。但它仍属有损伤,不适于连续监护。现已研制出经皮式 PO_2 测定装置,不用抽血,把电极放在皮肤上就可以测血中的氧分压,这对新生儿的氧分压测量和重患连续监护非常必要。

研制新的换能器方面仍是有大量工作待作的。现在医疗诊断中,仍有很多信息由于没有换能器得不到定量测量,如:口臭、舌苔、腹软……全靠医生这一主观性很强的“换能器”来输出信息。更有甚者,有的还靠患者的“换能器”,如头晕、乏力、疼痛……。如能研制出测痛、测味,以至测头晕、乏力等的换能器,对病症的确诊率一定会大大提高。医学将更快地接近于一门定量的科学,到那时病志上再看不到软硬中等、分泌较快、代谢旺盛等字样,而应是些数字了。

2) 生物传感器

在生物信息测量中,近年来出现一值得注意的变化,就是由人体内物理量的测量转向化学的测量。即血、尿、便、唾液、胃液等的成分的测量。因为这些量中含有大量疾病的信息。过去这些成分的测量是在生化室进行,多是利用酶反应引起色的变化,用比色法测量。这种方法有很多缺点,破坏试样、消耗物质多,是一种破坏性的测量方法,只适于从生物体取出试样,不能在生物体内测量。能否象一般换能元件(光敏、热敏、电阻式、电容式等换能器)那样,制作一元件和被测物体一接触就可以从含有很多成分的试样中测出欲测的成分的量来呢?为此,设计了一种新转换器叫生物传感器。研制的思想是仿生。模仿生物体内测成分的方法。例如一闻就知是什么东西(酸否、臭否……),一尝就知道是甜还是咸。原理是利用被测物质和接受器物质间特异亲和性来识别某成分的物质。这种生物传感器的结构是:



什么东西有识别技能呢?酶可以选择地识别对应的基质,免疫抗体可以从种种分子混合中选择地识别其特定抗原,激素受体和其相应的物质特异的形成复合体,微生物细胞中也有很多具有识别物质技能的东西。这样,就作成了酶传感器、免疫传感器、激素传感器、微生物传感器等。具体制作时,常是把它们固定在一膜上。酶传感器可测葡萄糖、尿酸、乳酸、磷酸、胆固醇、尿素、醇等。微生物传感器可测醋酸、葡萄糖、烟酸、甲酸、谷氨酸、赖氨酸。免疫传感器可测白蛋白、球蛋白等。

酶传感器可反复使用,不消耗物质,10秒内可以出结果。更重要的是在床头可作特殊项目成分的测量,可作急诊测量。

微生物传感器是把微生物菌体活着固定在膜上，可用作环境监测、发酵过程测量等。

3) 心电检测的发展

关于生物医学信息的检测系统，种类繁多，日新月异，不能一一介绍。我们可以通过大家都熟悉的心电图描记技术的变化来看该领域的发展情况。近年来，心电图方法学上，如记录时间的延长、记录空间的扩大、记录精度的提高、记录信号远程等都有很大发展。

在记录时间延长方面，Holter心电图近几年开始实用化。用磁带记录装置可记录长达24小时的心电信息，再由回放装置中的电子计算机处理，可分别表示心搏总数，室上及室性异位搏动及ST-T的轨迹图线。这种心电技术可用于各型心律失常的诊断及药物疗效观察；用于心肌缺血的判断及动态观察；用于心脏负荷后的各种动态观察；以及某些综合征如晕厥、胸痛等病因的探讨等。最近，又设计出各种回放装置，功能越来越完善。如西德的许互兹公司的回放装置有特慢的速度，0.5mm/S，可以使QRS波群很好地重叠在一起，便于医生作形态上的比较，以发现异常心电图。这些回放装置的显示，一般都采用多行页面（Page）显示，在一个屏幕上同时显示6行心电图，显示时静止不动，供医生观察，过一段时间突然换下面6行心电图，好象看书翻一页一样。

在记录空间扩展方面新兴起的有体表心电图。常规的心电图只反映人体电流的肢端总效应，而胸部体表心电图的研究将会全面地反映心电活动。一方面测量胸部心电电位的分布，另一方面研究人胸部的数学模型，从而可推出心脏外膜的电位分布。这种研究对心脏局部缺血和心肌梗塞病人的治疗很有价值。如心肌坏死，现在手术前无法确定其部位，有时作手术只得大块去掉心肌，现在利用心电分布（地图），若某处总是低电位，则该处心肌可能已经坏死。由此，可在手术前确定其部位。测量时，有的采用胸前多导联（35~72导联）心电图，有的将胸前及背部80~200个电极导出的心电图进行记录、处理并显示。其大致原理如图1-1所示。设用许多电极测得胸部体表电位 V_1, V_2, \dots, V_i ，心肌的电激动源为 S_j ， T_{ij} 是传递系数，则可写为

$$V_i = \sum_{j=1}^n T_{ij} \cdot S_j$$

即 $[V] = [T] [S]$ 式中 $[T]$ 是传递系数矩阵

$$[S] = [T]^{-1} [V]$$

即通过胸部的电位分布 $[V]$ 和胸部组织的传递系数来求心外膜的电位分布 $[S]$ ，这需要求解人胸部的拉普拉斯方程式 $\nabla^2 u = 0$

为了减少计算工作量，又兼顾到计算的准确度，所以在靠近心脏区分得密一些，采用非均匀切块法。有的上下切成17片，左右切成34条，前后切成22条。再考虑到人体躯干、血液、心脏、肺、肝、肾、肌肉等组织的不同，计算出一个人胸部的数学模型来。实际计算时有的把心膜分为26个区，如图1-3，计算所得的心外膜电位分布图如图1-4。显然，它是随时间变化，这是某一时刻的电位分布图形。

此外，还有研究高频宽带心电图，它是通过拉长时间（快速走纸200mm/s）增大放

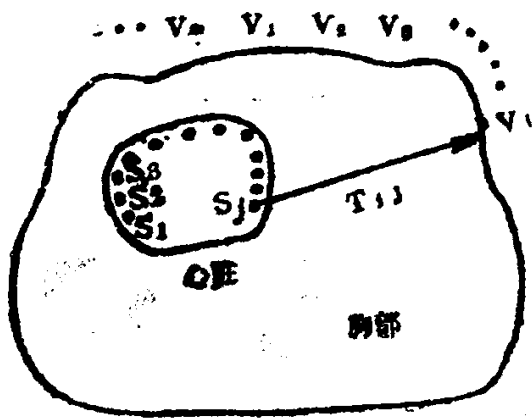


图1-1

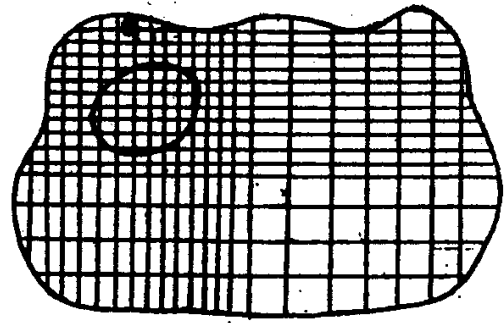


图1-2

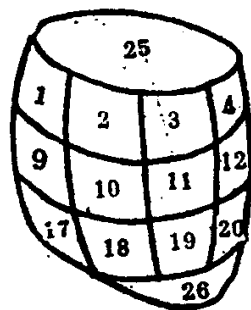


图1-3

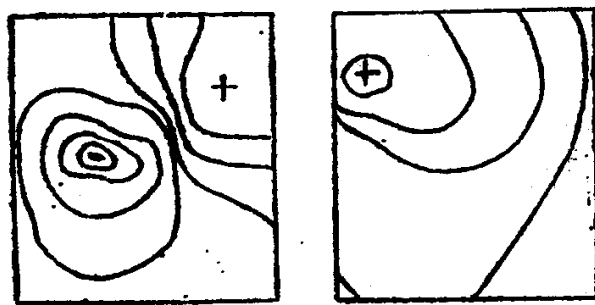


图1-4

大器频带宽度和放大倍数来记录心电图。借此观察某些心电图中的高频切迹，以此来判断隐性及小灶性心肌损伤，常用于缺血性心脏病诊断。

也有的研究心内心电图的数字频谱分析，即用心导管测得心脏内部的心电图，对它进行数字频谱分析，因为它是最直接的心电流信息。准备以此作为今后改变心脏起搏器设计的依据。

2. 生物信息处理工程

医生的判断是一种很复杂的事情，问题在于医生是在反映病人状况的信息不完整、不精确的条件下来作判断的，是一种模糊条件下的模式识别。在工程上则不然，识别的条件较精确、完整，即或是非常复杂的信息，经处理也能容易得出结论。大家熟知的卫星勘探、军事侦察，都能出色完成任务，就是由于有齐全准确的数据，有确定的算法的结果。

信息不准、信息不全就无法判断。解联定方程时如果未知数多于方程数，只能得数个解，得不出确切解。医生判断正是这样，由于信息不全，得不出确切结论，这时得借助医生的经验——主观信息的帮助得出判断。可见，欲使“断”科学化，就得把工程中的常用方法、观点、技术引入医学，在这里，首先是量化，其次是算法，最后是手段。

1) 简单的信息处理系统

血压自动检测仪就是一种简单的信息测量系统。图1-5是间接血压测定常用的方法，用泵自动的使袖袋中的压力升高或降低，并测出其内压，同时用mic测血管音。根据袖袋内压和血管音的发生和消失的位置确定最高压和最低压。在同时记有血管音和内压的纸带上，把血管音发生和消失时的内压读出来则可。这是一种最简单的信息检测系统。还可以把与血管音发生和消失相应的内压值用电子仪器显示出来，并可以对所读

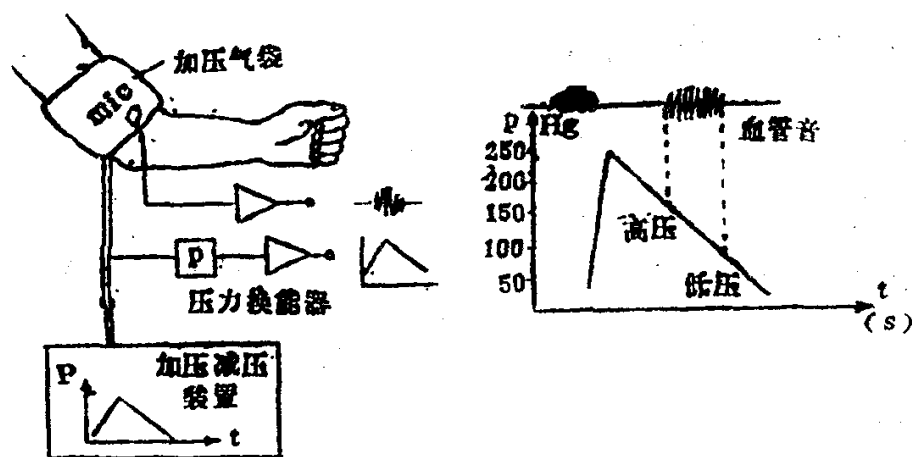


图1—5

出的血压进行正常与否的判断，例如超出予先任意选定的血压范围(180/60mmHg)时，可以自动报警。

2) 电子计算机的应用例举

电子计算机在中医学领域中的应用很活跃，都是属于专家程序，即把名中医的诊断程序存于计算机，让计算机起到该中医的作用。如北京中医学院、中科院自动化所等单位共同总结了关幼波教授治疗肝病几十年经验，用了200多个症状、化验及检查结果，作数据指标，编成程序送入计算机。看病时，只要把病人有关症状、化验结果送入计算机，则可给出诊断。北二医和北京医院共同将房芝萱教授医治脉管炎、大动脉炎、雷诺氏病等的经验编成程序用计算机诊断。又如急腹症辅助诊断程序，其标准程序是清华大学和南开医院所制定。准确率为91.8%。还有胆道感染与胆石症进行中医辨证论治的程序，准确率达96.1%。此外，重症肝炎诊断，先天性心脏病、肺炎、肺结核、肾病等诊断治疗，都已有编妥的程序，现在已可以用中文打印出诊断、处方和医嘱等，使用非常方便。

电子计算机在医学的应用中，在国外收效较大的是心电图自动诊断。60年代开始研究，现已经实用化，美国1977年10%左右是用自动诊断，80年代增到30%。在日本也正在急速发展这一应用。心电图自动诊断有两种方式，一是全国性的诊断服务中心，用电话把欲诊断的心电图送到服务中心，进行诊断；一是医院内系统，专为本院服务。1978年，在美国全国性的几个中心如下表：

	年处理数	每件收费	联系单位
丹 佛 CEIS	11万	5	45
纽 约 Cro-Med	50万	2~4	135
罗彻斯特 Mayo-Clinic	13万	4~5	24
芝 加 哥 Telemed	140万	2~4	1400
旧 金 山	14万	4~6	1120

以最大的中心Telemed为例，有100多工作人员，两套大型计算系统，昼夜不停的工

作。用电话把心电图的患者姓名、年龄、临床诊断送给中心。经自动检查基本数据齐全时，则送入计算机，不合格时，则退回原单位。同时可诊断12份，再多时，暂存于外存储器中，出结果后，则通知医院。这样作省人力省物力，不需要各医院自己搞。

在这里顺便介绍一下心电自动诊断是怎样进行的，以便大致了解这种技术的内容。

医生诊断心电图，主要是测量各波的高度、宽度、间距大小等。用目测时，一看所描的心电图，用尺规测量则可。但用电子计算机则需有些复杂手续。计算机不认识图，只认识数。所以，首先把图变为数，即模—数变换（A—D变换）。其次，得想一种办法，使机器识别出什么样的数集是QRS波，什么数集是P、T波等。为此，先进行关键点识别，即找到这点后就可以解决上述一系列问题。现在常用的关键点是R波的顶点（RTP），寻找此顶点主要是比较各数字间的关系。具体有一套公式，让计算机按此公式来算各点之间的关系。此公式的提出思想是：在某阈值以上，在QRS波宽内左右对称的尖点就是所找的关键点。这样，把一个心电图的所有数据用这公式筛选一下，很快就可得到RTP。

QRS波的识别：从PTP前移找到斜率不再变化之点就是QB。在这需要指出，求率斜不能用求曲线斜率的 $\frac{dy}{dx}$ ，因为这里是数组，不是曲线。从RTP后移，找到斜率变化小到某定值 $2\text{mv/sec}\sim 3.5\text{mv/sec}$ 时，就是SE。

T波：从SE再往后移到斜率开始急剧变化的地方就是TB，再后移找TE。

P波：P波较小，不易识别。有时用人眼还判别不好，用机器就更困难。到现在国外仍在研究识别P波的办法。有的从Q波逆移找PE，从T波顺移找PB。各波找出后，就可以测波高波宽和间距了。一个完整的心电图自动诊断过程如下图：



图1—6

3) 医学图象处理

生物信息处理工程中的一重要组成部分是医学图象处理，如对X光图象、超声图象和同位素图象的处理等。用计算机进行医学图象处理的方式，根据不同目的基本上有以下几种：（1）抑制噪声，（2）突出轮廓，（3）排除次要信息，（4）改善模糊图象。总之，图象经处理后不一定要它完全忠实于原来的面貌，而是根据医生的需要强调这一部分或那一部分的特征。

以图象灰度处理为例，说明图象处理基本原理如下：如果把图象的灰度分为256个等级，这相当于把灰度信号用8位二进制的模—数转换器转换成数字灰度信号，则原灰度可以用各种各样的函数转换为新灰度。如原灰度与新灰度间的转换关系是线性时（图1—7—*a*），处理后的图象可按比例变深或变浅；是二次曲线关系（图1—7—*b*）时，处理后的图象可以是暗的部分比亮的部分变化大，也可以是亮的部分比暗的部分变化大。前者可以把暗的部分灰度差别拉大，后者可以把亮的部分的灰度差别拉大。图1—7—*c*则可以把中等灰度部分的差别拉大。差别增大就便于分辨该灰度区的细节。图1—7—*d*

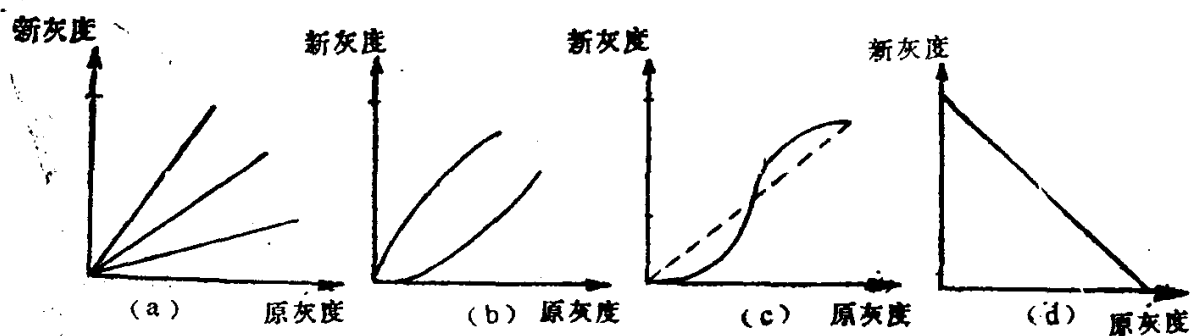


图1-7

使亮的部分变暗，暗的部分变亮，即使图象由正片变负片或由负片变正片。为了消除图象中的噪声，可以利用图1-8所示的关系，阈值的大小与所除去的噪声大小有关。但除去噪声的同时，往往也会去掉一部分有用信息，所以阈值不能取得太大，应由试验来确定最佳值。

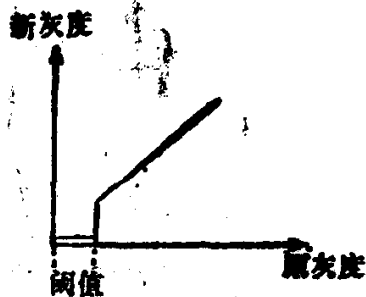


图1-8

计算机医学图象处理的一个引起人们重视的成果，是数字减影血管造影术。它可以得到过去看不到的清晰的动态的血管影像，其原理是X线透视电视图象逐点地转换为数据，然后将这些数据分两道工序进行处理。第一道是图象减影处理，即把造影剂尚未到达欲透视部位时的影象的数字数据和造影剂达到后同一部位的影象数字数据相减。其结果，消去了背景细节，使充满造影剂的结构清晰可见。第二道工序是

增强减影后的图象。实际上减影与增强都是实时进行的，就是说数据处理之快是在透视过程中实现的。

3. 生物技能代行工程

随着生物医学工程学的发展，人们越来越多的注意研究在生理功能上代替或部分代替自然器官的人造装置，从而形成生物医学工程学的一重要分支。它包括生物系统的模拟（如神经系统模拟、感觉系统模拟、循环系统模拟、运动系统模拟、消化系统模拟和代谢系统模拟等）、生物医学材料、人工器官和生物机械等。

1) 生物材料

生物材料是研究各种医用特别是适于植入人体内的材料的微观结构和宏观性能及其与人体组织相互作用时的生物物理的特性。对植入人体内的材料要求十分严格。化学上要求耐腐蚀、稳定，在长期与血液或其他体液接触时，非但本身不变，而且也不能产生凝血、溶血作用，对身体应无毒、不致癌、不引起过敏反应或干扰机体的免疫机制。

目前的植入材料有金属材料、陶瓷材料和硅橡胶材料等。金属材料例如用钛、钴合金、不锈钢等可用于人工关节、起搏器外壳、导线和电极。这方面待开发的问题是很多的。金属材料与有机体接触时的相互作用，会造成金属材料的腐蚀。有的正研究人工关节植入材料的金属离子的生成过程以及金属长期地和骨及其他人体组织接触时，金属的电化学平衡状态的形成和钝态氧化层的损坏而引起的腐蚀率的研究。心脏起搏器的电极

和引线材料的研究正在受到多方面的重视。目前,约有3~5%在埋藏手术后发现折断,以致需再次进行手术更换,造成患者极大的痛苦。现在的目标是希望能降低折断率至1%以下。目前正在改进材料和处理工艺。材料用的是Elgiloy(钴镍合金)。把新研制的材料放在一台微计算机控制并记录的拉伸试验机上进行材料性能试验,争取能达到 10^6 次拉伸的寿命。陶瓷材料多用在人造骨、髋关节等方面,有羟基磷灰石、 Al_2O_3 陶瓷及磷酸钙等。还有多孔状陶瓷材料,在植入到骨海绵质后,可以很快地被渗润,不引起全身反应。医用高分子化合物是应用较多的一种。它分生物的和人工合成的两类,如猪、牛心包瓣膜是生物高分子材料,人工合成的医用高分子材料包括有合成橡胶、合成纤维和塑料等,广泛地应用在各种人工器官、手术修补器材、粘合剂、整形材料等。最常用的合成橡胶有硅橡胶和聚氨脂橡胶,常用的塑料有聚四氟乙烯(Teflon)、聚氨脂和聚氯乙烯等,合成纤维则有尼龙、涤纶和腈纶等。

2) 人工器官

目前已经研制成功的或接近实用阶段的人工脏器和器官种类很多。在内脏方面有**人工心、人工肾、人工肺、人工胰和人工肝**等,在五官方面有**人工眼、人工耳、人工鼻、人工喉**等;在四肢方面有**人工手、人工足、人工臂**等;在管腔方面有**人工食道、人工气管、人工血管、人工尿道和输尿管**等;在一般组织方面有**人工关节、人工瓣膜、人工肌腱、人工骨、人工血**等。

(1) 人工肾

人工肾是实用价值较大,较为成熟的人工脏器(1943 Kolf提出),在国内外已得到广泛应用,已成为抢救肾功能衰竭的有效工具。国外很多国家都建有人工肾透析中心,透析患者逐年增多,有的长期透析达十多年之久。

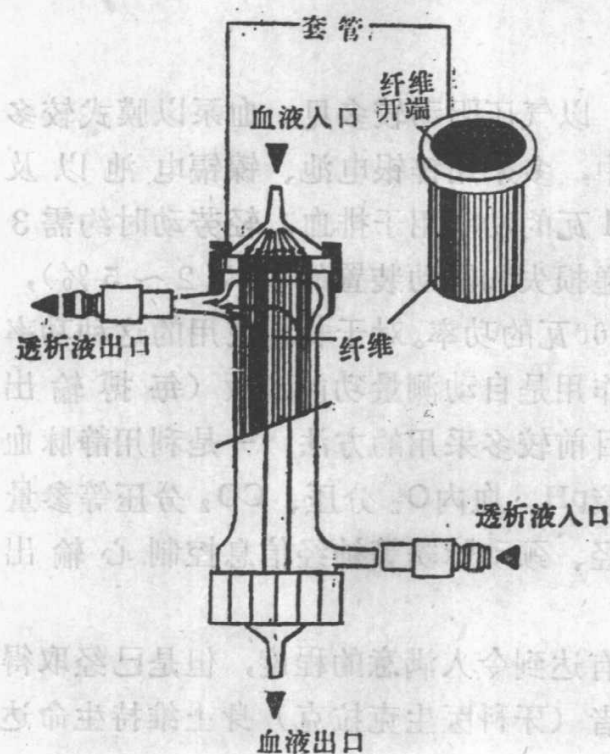


图1-9

人工肾实质是血液透析器。根据董南平衡原理,用半透膜把血液和透析液隔开,从肾功能不全患者的血液中将尿素、尿酸、肌酸酐等高价离子有毒物质,扩散到透析液中,达到净化血液的目的。过去的平板型血液透析器和卷型血液透析器体积较大,不能随身携带。后来出现了空芯纤维型血液透析器(如图1-9)。这种透析器是由内径约为 $225\mu m$,壁厚约 $30\mu m$,长 13.5 cm 的半透膜作成的毛细管 $11,000$ 根左右所组成。管内流血液,管外流透析液,透析面积较大,透析速率较快。

具有型小、阻力小,不需加血泵等优点。最近国外又出现了一种微粒人工肾,微粒内含有脲酶和离子交换树脂或活性炭,当此微粒不断与血液接触时,血内尿素和肌酸酐等废物为微粒内的脲酶所分解,产生氨和二氧化碳,并被离子交换树脂或活性炭所吸

附。大多数病人用活性炭型人工肾做血液透析时，每周一次，每次二小时即可，而一般人工肾需6小时。

(2) 人工心脏

人工心脏的研究早在30年代就已经开始。但初期进展较慢，直到五十年代才有了显著的进步。人工心脏总的可分为两大类，一类是辅助人工心脏，另一类是完全人工心脏。

辅助人工心脏又分B型(Bypass型)和S型(Series型)两种。对于需要辅助的心脏某一部位来说，B型相当于与之“并联”，S型相当于与之“串联”。

人工心脏的制作材料主要是甲基硅橡胶、聚四氟乙烯和亲水性丙烯聚合物。对材料的性能的主要要求是能够在100~180 mmHg血压下耐受反复搏动的冲击，并有一定的力学强度和弹性，不易老化，不引起凝血和溶血等。

完全人工心脏的组成如下图所示

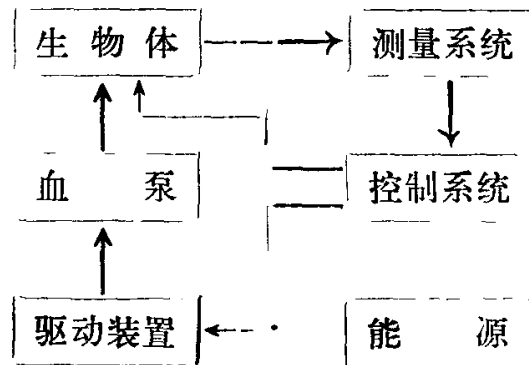


图1—10

血泵的驱动方式有电动、气压、液压驱动等，以气压驱动较多见。血泵以膜式较多见。能源的持久性和小型化问题尚在不断改进之中，多采用锌银电池、镍镉电池以及 Pu^{233} 密封电池。在静息时，成人心脏收缩约需1瓦的功率用于排血，轻劳动时约需3~4瓦，重劳动时则约为6~8瓦。如果考虑到传递损失和驱动装置的效率(2~5%)，那么较为适用于人工心脏的能源应需提供约20~100瓦的功率。对于长期使用的这种功率范围的小型能源还没得到很好解决。控制系统的作用是自动测量功能参数(每搏输出量、心率等)并进行调节，使之符合生理要求。目前较多采用的方法，一是利用静脉血回流量来控制心输出量，二是利用肾上腺素、血液pH、血内 O_2 分压、 CO_2 分压等参量控制心输出量。也有研究利用交感神经、迷走神经、颈动脉窦等神经信息控制心输出量。

到目前为止，关于人工心脏的研究虽然还没有达到令人满意的程度，但是已经取得可喜的成果。在美国已把完全人工心脏装在一患者(牙科医生克拉克)身上维持生命达200多天。它的发展前途是非常可观的。

(3) 人工肺

1953年吉本先生在临床应用了人工心肺机，做为一种体外循环装置，对心脏外科的发展起了十分重要的作用。它一方面可以维持循环，另一方面还可以进行血气交换。它的主要组成部分是血泵和氧合器。

氧合器（人工肺）的功能是：血液与气体（氧气）之间进行直接或间接（通过膜）交换氧气和二氧化碳。其要求是：① 每分钟能将5升静脉血氧合到血红蛋白90—100%饱和度；② 适量除去二氧化碳（避免呼吸性酸中毒和硷中毒）；③ 避免溶血和蛋白质变性。

氧合的方法是扩大血液与气体交换面积。类型有：① 气泡式氧合器，它使气体分散成大量小气泡（直径 $5\mu\text{m}$ ）进入血液槽，气泡与血液交换后，即与血液分离，用去泡剂（硅化合物）使气泡消失；② 膜式氧合器，象空心纤维人工肾那样，但其膜只透过气体不透过液体。材料多是塔夫纶、硅橡胶。在日本已制成长20毫米 $\varphi=0.25\mu$ 的纤维管组成的人造塑料肺，代行呼吸功能。

其他人工器官，如人工血管、人工关节、人工皮、人工角膜等，都有临床实际应用。在辽宁，人工食道（硅橡胶）、人工关节（钛、陶瓷）等都有研制与使用。最后指出，这里所说的人工器官，有的是人工制成和自然形一样的器官（如人工血管、食道、关节、角膜等），有的则不一定是自然器官的形状，而是起自然器官的功能。如人工肾、人工心脏、人工肺、人工胰脏等，它们常常是很大的不能移动的仪器组合。

现在，人工脏器的研究，可以说是已由模拟技能的第一阶段过渡到提高性能，使用方便的第二阶段。如何改进材料性能，使之全部植入体内，尚需大量研究工作。

4. 生物作用工程

医学上的治疗过程是外界对人体施加各种影响的过程。所以与治疗相结合的工程可称为生物作用工程。对疾病的治疗用工程上的语言来讲叫“加反馈”。工程上，在一个自动控制式调节系统中，用检测器测出系统状态，然后经过分析比较作出判断，形成反馈信号，用它作用于失调系统使它保持平衡，这整个过程叫反馈。把人体看成一个复杂的调节系统，上面讲的过程正好和诊、断及治疗相对应。所以把治疗过程看成一种反馈过程。

1) 人工胰岛 β 细胞

以反馈这种认识从事生物医学工程的研究内容是很多的，如人工胰岛 β 细胞的研究。糖尿病患者需要注射胰岛素，注射的剂量要有良好的控制，其剂量应随患者每天的饮食和活动量而加以调节。若注射剂量不足，起不到治疗作用，若注射量过多，会造成低血

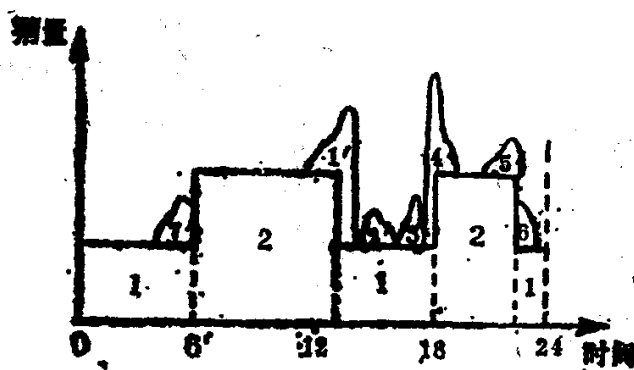


图1—11

糖昏迷。所以根据患者血糖量自动调节注入（给患者）胰岛素剂量的系统和胰岛 β 细胞

的作用一样，故称之为人工胰岛β细胞。现在已研究它成可携式体外使用的、可编程序的胰岛素注射系统。其特点是注射剂量的程序是可编的，由微处理器执行，并给患者一定的灵活性。注射程序分为基本程序和随加程序两种。基本程序中有两个（图1—11中的1和2）。再有几个附加程序，各附加程序的工作时间为：1'是3小时，2'~7'各是2小时。附加程序的剂量图形可以由医生根据病人生活习惯任意加以制定。

这个注射系统具有独特的剂量精度，有特别微细的螺旋驱动注射器，每次剂量可在0.05 μl到25 μl的范围内调节。整个装置象半本书那样大小，可以带在病人的手臂上。整个系统的框图如图1—12所示，程序由8 bit的cpu 1802微处理器来执行，cpu是CMOS的，整个系统的电流仅为13.5 mA，电机耗电约20~25 mA。

程序由医生编制，编制过程很简单，只要在微计算机系统(Appel)中接有的x—y坐标数字化盘上放一张白纸，然后医生用电笔在纸上描上所需的程序曲线，即被存入EPROM，取下EPROM放入病人的注射系统中即可工作。医生可定期检查，程序是否合适，以决定是否需改编。病人还可以根据自我感觉来进行调节，注射系统上带有一个简易键盘，病人可以选择附加程序，并可以增加剂量，乘一个因子（8、4、2三种），或减少剂量，乘以1/8、1/4或1/2。

1979年报导，美国 Mayo 医院研制成一扑克牌大小的自动适应患者血糖量的装置，对糖尿病患者是很有意义的。它的程序可根据每一餐的卡路里摄入量来调节胰岛素的注射量。患者只需将每一餐的种类、数量输入计算机，就能象正常胰脏那样地把所需的胰岛素输入血中。

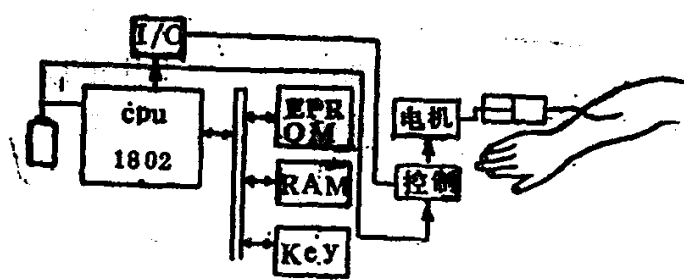


图1—12

有的正在研制实现闭环控制植入体内的人工胰岛β细胞。所用金属材料选用钛合金，所用葡萄糖传感器选用酶传感器。现在的问题是，稳定性和选择性尚不理想。欲把注射器变为埋入体内的，当然不能使用电动机驱动，

而改用电压效应驱动。可直接把电信号转变为机械压力，而把胰岛素注入体内。

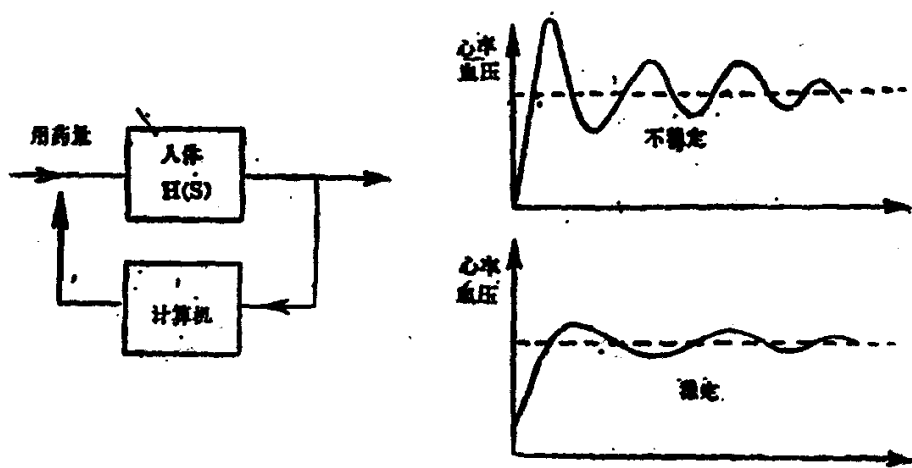


图1—13

根据人工胰岛 β 细胞的研究思想, 如果能用各种不同的生物传感器, 从人体探测到不同的病变信息, 在计算机配合下往人体输送不同的适量药物, 就会实现各种治疗机。

此外, 根据反馈思想, 还可以控制术后病人尽快地恢复到平衡状态。例如, 术后病人的心率和血压波动较大(图1—13), 一般都是用药物控制这种波动。问题是如何选用最佳剂量以使这种波动尽快恢复平衡。从工程角度看, 这时病人有个传递函数 $H(S)$, 根据用药过程中的病状变化, 应用计算机根据此传递函数就可以算出最佳用药量。可见, 欲实现这种反馈, 主要是研究手术后病人的数学模型, 把传递函数求出来。这要医工密切配合才行, 或由生物医学工程人员来完成。还有的研究心脏手术后的病人模型, 控制给病人的液体输入量来使中央静脉压和肺动脉压最快趋于平稳。

2) 生物反馈疗法

上述的反馈系统是利用反馈思想具体组成一反馈装置, 利用药物对人体进行作用的(治疗)。还有一种不用药的反馈作用, 常称为生物反馈(BF)。它是用电子仪器将人们平常意识不到的生物信息的如肌电、脑电、血压等体内功能活动, 转换为可以被人们感觉到的视听信号, 并把这些信号通过眼、耳等感受器官回输(反馈)给大脑, 以使人体能够依据这些信号来了解、认识和学会控制其自身的不随意功能, 是一种借助电子仪器, 锻炼调整生理机能, 从而治疗疾病的一种自我疗法。生物反馈的机理是运用生物控制的原理在仪器的启示下运用心理诱导法, 达到机体的平衡、调节作用。适用于心理原因引起的身心疾病。如肌肉紧张性头痛、痉挛性瘫痪、创伤和脑血管意外引起的肢体机能障碍的再训练等, 可以通过肌电生物反馈而得到调整(肌电BF)。通过指温生物反馈可以有效地减轻偏头痛(指温BF), 因为中枢交感神经的状态可在体表温度反映出来, 所以通过体表温度(或指温)的控制反过来又能改变中枢交感神经的状态, 由交感神经兴奋性过高引起的头痛就可得到治疗。还有脑电生物反馈, 训练病人产生特定的脑电节律治疗癫痫; 心电生物反馈, 训练病人能控制心律快慢, 治疗室性早期收缩; 血压生物反馈治疗高血压等。

3) 电刺激作用

在生物作用工程中, 电再生引起医学界很大兴趣。据报导, 电刺激可以促进再生。现正在研究蝶螈的肢体再生原理, 以应用于人体。近年来利用电刺激已成功地再生了蛙从膝部到趾, 老鼠肩部到肘部的组织。这种再生技术是多年来人们所不敢想往的, 现已有了可能。

电刺激促进骨愈合方面也有较大进展。Bio-Osteogen已用了五年, 在美国、西欧24个医疗中心临床使用这种方法。近年来哥伦比亚老年医疗中心、哥伦比亚大学等取得一致意见, 都认为对假关节形成、骨折不连接、骨折延迟愈合都得到理想疗效。261例中206例达到功能连结(79%), 21例部分连结。其具体作法是在石膏绷带表面绕上线圈, 通入特殊的脉冲波, 就可达到治疗目的。

电刺激止痛也是受到重视的生物作用, 对癌晚期的疼痛抑制很有效。镇痛区有三: 脑、脊髓、皮肤。刺激脑时, 把接收电极埋在颅骨内, 在体外发射脉冲, 所用脉冲的宽度为 $150 \mu s$, 幅度为 $0.5 \sim 3 V$, 频率为 $25 \sim 250 Hz$ 。刺激脊髓止痛时, 用脊柱电极, 脉冲的宽度 $0.25 \mu s$, $f = 100 Hz$, 疗效不够稳定。通过皮肤作刺激止痛时, 得寻找合适的

点安放电极,一般在痛区或有关的神经干处,电流 $I = 20 \sim 30 \text{ mA}$, 脉冲宽度 $50 \sim 100 \mu\text{s}$, $f = 40 \sim 60 \text{ Hz}$ 。

5. 生物力学

生物力学是六十年代以来的一门新兴学科,它是以研究生命现象中的各种力学规律为主题,包括有:①生物组织的力学性质—生物流变学;②人体内的物质运输,如大血管、呼吸道内的流动,微循环中的物质交换过程等;③应力和生长的关系,如生长及骨折愈合过程和应力的关系。它的萌芽可追溯到古代。伽利略(1564~1642)首先用单摆来测定心率,用和心率同步的摆长来表示心率。笛卡尔(1596~1650)第一个试图用力学来解释生命过程,提出了生理过程的模型,并进行分析。欧拉(1707~1783)等曾对脉搏波的机理作过精辟的分析。泊肃叶(1799~1869)关于血液流动阻力的实验,奠定了粘性流体力学的基础。十九世纪以后,随着学科的分化,力学与生物学的联系淡薄了。但从五十年代以来,科学技术的发展,使得各个学科在不断深化,分化的同时又互相渗透,形成了现代化的生物力学。

人体的骨骼系统蕴藏着丰富的力学原理,脊柱被誉为“力学的奇迹”,屈曲可以成圈,直立可耐受数百斤的力。对骨骼力学的研究会有助于深入了解某些疾病的发生。在髋关节病的致病病因中,关节负荷面的大小起着决定性的作用,如负荷呈点状,股骨头缺血坏死,股骨头上的压力为220公斤/平方厘米,当通过适当的内翻或外翻骨切除术后,可以恢复正常,负荷力下降到16公斤/平方厘米。

人体的循环系统是典型的水力系统。心脏泵的优越性质,可以说现有的机械是难以匹敌。每天心脏搏动10万余次,每分钟使全身血液循环一次。人体从平原到高山,从高温到降温以及运动量加大和减小,心脏都可安然工作,保持一生。在这里,从材料到结构,有一系列力学问题需要研究。

微循环中的力学更有其特殊的力学规律。因为,一方面,血液中的红细胞直径约8微米(人的),而毛细血管的直径约3~8微米,故血液通过毛细血管时,血球是一个一个地挤过去的,它们中间是有间隙的,这需要发展离散介质力学。另一方面,血液流过毛细血管时,血液和周围组织要进行物质能量的交换,这是一个开放的热力学非平衡系统,而传统的力学是建立在平衡系统的基础上。这说明,力学进入生命世界后有很多新问题需要探索,这就是生物力学的任务。

生物力学的实际意义可从以下几方面来理解:

1) 生物力学的研究推动了解剖学、组织学和生理学的发展,使人们对生命现象的认识逐步由定性的现象描述上升到定量的规律。定量解剖学、定量生理学就是这样发展起来的,例如关于肺泡结构模型和表面张力的分析,纠正了传统的关于肺泡不稳定的说法;对可塌陷管中的流动分析,则为呼气流量极限提供了理论根据。

2) 澄清某些疾病的病理机制。例如,动脉粥样硬化是一种常见的慢性病。病理解剖表明,斑块发生的位置有一定的选择性,多发生于血管弯曲或分支部位;而这些地方从组织上看并无特异。流体力学分析表明:①血管分叉处远心端有明显的应力集中;管腔狭窄处易产生血流分离现象从而产生逆流;③涡流的产生等。正是这些地方的流动特点,为斑块的形成提供了条件。

3) 为创立新的灵敏可靠的无创伤诊断方法提供基础。例如, 血液流变学的研究表明, 许多疾病与血液流变特性的异常有关。微循环研究证明, 青年人眼底微血管的变异可作为糖尿病早期诊断的依据。

4) 为某些疾病的治疗提供指导。例如适当大小的应力及其分布能促进骨折愈合, 而不适当的应力, 将使创口萎缩或愈合不佳。

5) 为某些装置的改进提供理论根据。例如人工心脏瓣膜置换术在国内外都早已开展, 各地做了不少人工心脏瓣膜, 并应用于临床, 取得一定效果。但这些瓣膜的性能如何? 怎样改进等问题就必须有生物力学的分析为基础。

可见, 无论从实际应用上还是从理论研究上, 生物力学在生物医学工程中占重要地位, 它是生物医学工程的基础理论的重要组成。

三、几个生物医学工程问题

1. X线CT (Computerized Tomography) X线计算机断层

1971年, 英国EMI公司Hounsfield在神经放射线科医生 Dr Ambrose 协助下, 经四年制成了X线CT。是1895年 Rontgen 发现X线以来最重要的发明。为此, 发明者获得诺贝尔医学奖。它如此受到重视, 有什么优点?

1) 无损伤探测。过去检查脑病需脑室造影, 危险性很大;

2) 比超声和RI成象清楚;

3) 对比度分辨力好, 不但看到脑内异物形状, 并可看到器质性变化。脑血管病后的出血量, 可辨出是凝血块还是流动的血。不只分辨骨、组织和空气, 还可分辨体液和软组织, 甚而脑内的灰白质和白质都可分辨, 有0.5%密度之差则可区分。

此发明也是在前人的工作基础上得到的。主要基础有三: 一是立体复元理论, 1917年奥地利数学家J·Radon 证明二维或三维的物体能够从它投影的无限集合来单一地重建图象。二是X线断层摄影术, 当X线管和胶片同步移动时可得到体内某一断层的象。三是RI图象术, 它用了晶体接收射线, 大大提高了灵敏度。

结构与原理: 台架、X线管、接收晶体、数据收集处理及存贮系统、显示照象和打印机等(如图):

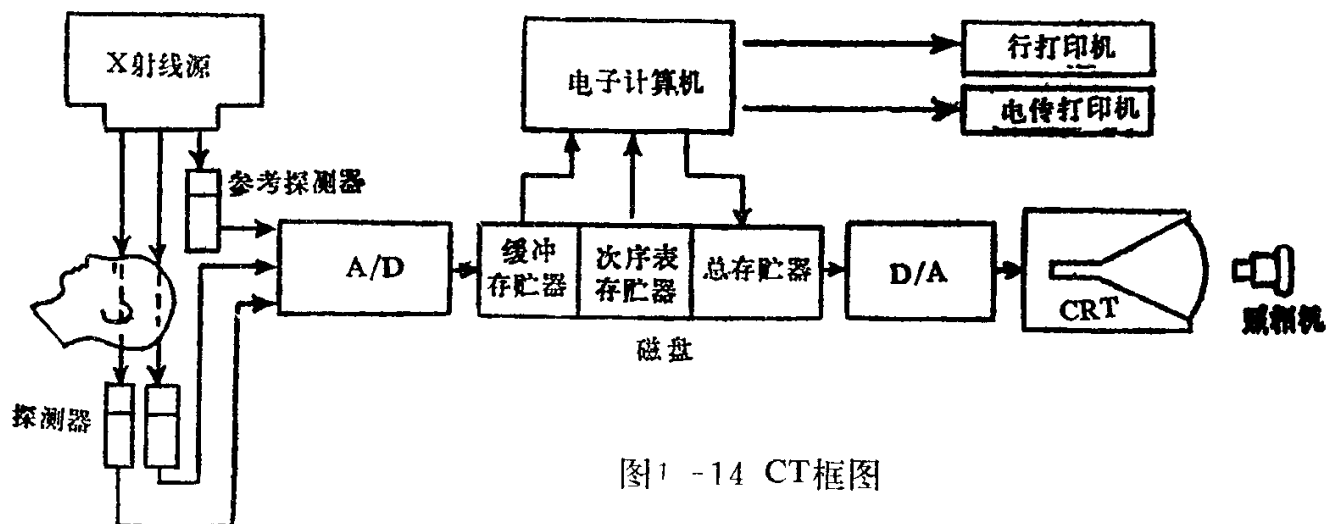


图1-14 CT框图