

生物医学中的遥测技术

王保华 编著

科学出版社



前 言

生物医学遥测技术已广泛地应用于生物医学的基础研究和临床实验中。利用体外遥测装置可对运动员、宇航员及医院内自由行走的病人进行实时的连续监测,掌握在不同状态下人体生理参数的变化规律;利用吞服式的无线电遥测胶囊,可测定消化道器官中的各类病变;利用植入式遥测装置可探测人体深部的温度、压力、流量等,并辅以遥控手段实现闭环控制,来自动稳定人体的血压和血糖,这对高血压、糖尿病患者无疑是个福音;在大规模动物饲养时进行生态遥测研究,以及对野生动物实现自动跟踪等一系列应用领域展示了生物医学遥测技术诱人的前景。这一技术的进一步开发,将继续推动对人体的各种未知现象的研究,为探索生物体的奥秘提供有力的手段。

生物医学遥测技术是传感技术与通信技术相结合的产物,它是在工业遥测技术基础上发展起来的。随着所研究问题的深入,生物医学的研究要求有小型、轻质、安全、低功耗、多功能等一系列更高的指标,使得生物医学遥测装置具有本身的特色,而且将高于其他遥测技术。

由于生物医学遥测技术涉及到传感技术、生物材料、新能源的开发、无线电通信、测量技术、记录和显示技术、弱信号的检测及信息处理技术等许多新兴学科,要用工程的观点进行医学研究,用医学的知识指导工程实践。由于各类知识的交叉运用,使得这个领域的研究有趣而困难。本书只是将生物医学遥测技术中那些带有共性的基本原理和技术,作些有针对性的介绍,尽可能地在各章节中给出较多的应用实例,以提高读者的兴趣。本书的第一章介绍生物医学遥测的目的、意义、历史和现状以及构成生物医学遥测系统的基本要求和方法。第二章讨论目前在遥测技术中应用较广的几种传感器及检测、放大和滤波电路。第三章扼要介绍目前常见的几种遥测体制、频分制与时分制多道遥测原理,尤其对FM/FM、PWM/FM、PCM/FSK、PCM/PSK等几种典型的调制方式和电路进行较为深入的讨论,并给出其医学应用的实例。第四章介绍各类生物医学信号的记录、显示终端装置。第五章对一些典型的生物医学遥测系统,诸如植入式遥测遥控装置、遥测监护系统和野生动物跟踪装置等进行讨论,以便读者能较全面地了解生物医学遥测技术的实际应用。

本书是根据中国生物医学电子学会原主任委员秦诒纯先生的建议编写的,秦先生生前对本书在内容的选取方面提了许多积极的意见,并提供了许多宝贵的资料。西安交通大学蒋大宗教授、重庆大学郑邦信教授对本书进行了审定。

在编写本书的过程中,得到了上海科技大学傅丰钰、张台涌、张伟成以及上海大学工学院傅雅珠等同志的许多帮助,他们参与了自60年代起至1985年的国内外生物医学遥测技术方面的资料索引、查考和整理等大量工作,并参加了部分章节初稿的编写。朱之震

等同志绘制了本书的插图。本书初稿完成后曾对上海科技大学生物医学工程专业的学生进行了试讲,讲义的内容经教学实践作了较多的修改,但由于编者才疏学浅,错误和缺点在所难免,期望读者批评指正。

王保华

于上海科技大学

上海生物医学工程研究所

1986年10月

目 录

第一章 生物医学遥测概述	(1)
1·1 生物医学遥测技术的历史和应用简述	(1)
1·2 生物医学遥测分类	(4)
1·3 生物医学遥测系统的组成和体制	(7)
第二章 生物检测技术	(11)
2·1 生物电测量电极	(11)
2·2 生物电放大器	(16)
2·3 滤波	(26)
2·4 电参数传感器	(34)
2·5 温度检测	(51)
2·6 光电传感器	(57)
2·7 压电式传感器	(60)
2·8 化学传感器与生物传感器	(64)
第三章 遥测传输系统原理	(69)
3·1 引言	(69)
3·2 模拟式遥测系统	(73)
3·3 模拟式生物医学遥测系统举例	(102)
3·4 数字式遥测系统	(112)
3·5 数字式生物医学遥测系统举例	(129)
3·6 遥测信道	(134)
第四章 遥测终端装置——生理信号的显示与记录	(142)
4·1 磁电式曲线记录器	(142)
4·2 行式打印机	(146)
4·3 磁带记录器	(151)
4·4 示波器	(159)
4·5 LED 显示器和 CRT 字符显示器	(163)
第五章 生物医学遥测与跟踪系统	(170)
5·1 生物医学遥测系统设计中的一般问题	(170)
5·2 植入式遥测与遥控技术	(173)
5·3 遥测监护系统	(204)
5·4 动物跟踪遥测技术	(219)
参考文献	(228)

第一章 生物医学遥测概述

1.1 生物医学遥测技术的历史和应用简述

生物医学遥测技术的历史可追溯到一个世纪以前,早在 1869 年,法国的 Marey 为了研究鸟类的飞行,将一个拍打接触片装在鸽子的翅膀尖端,并用长导线接到一个电磁测量系统,再推动笔尖,在记纹鼓上记录了鸽子翅膀的拍打信息,这是生物医学遥测史上有记载的第一个成功试验。1903 年著名的荷兰医生 Einthoven,用弦线检流计通过电话线记录了 1.5km 外的心电图(ECG),1910 年 Barker 建成了一个连接几个医院的有线传输 ECG 的监护中心。这一时期,生物医学遥测技术都局限在有线遥测的范畴。直至 1921 年 Winters 在美国陆军通信兵团利用所装备的舰载无线电通信系统,在没有医生参与的情况下,将患者的心音从军舰上传送给海岸医院,开创了由无线电来传输生物医学信息的先例。1948 年,Fuller 等制成了专用的无线电遥测装置,用来传送 100ft^① 内的动物脉搏和呼吸率信息,1949 年 Holter 等将此项成果应用于遥测人体生理参数。随着半导体器件及集成电路的发展,无线电遥测装置的重量越来越轻,体积愈来愈小,1957 年美国 Mackay 与 Jacobson 研制成小型植入人体内的无线电遥测装置,随后 Farrar 试验成功吞服式无线电胶囊,用来直接测定体内的生理和生化参数。空间生理参数的研究也在同一时期内利用火箭、人造卫星和宇宙飞船进行。1952 年 Henry 在进行一系列研究后,完成了火箭飞行中动物生理参数的遥测,1957 年苏联利用人造卫星中的遥测系统,对狗进行宇宙空间的动物生理研究。无线电遥测存在着一些固有缺点,主要表现在无线电系统之间的干扰、外界的工业和天电干扰,以及无线电波不适宜在水中传播。因此,在同一时期内,人们不断开展多种遥测方法的研究,1963 年,Holter 采用了存贮遥测方法,将心电图信号记录在小型的磁记录装置中,在另一地(医院)将其记录结果回放进行处理和分析。在海水环境中,Baldwith 首先应用了超声波来传送潜入深水中生物体的生理参数。1969 年,Kimmich 在室内应用远红外光进行生理参数的遥测传输。70 年代后,随着大规模集成电路技术的发展、低功耗器件的应用、长寿命电池的出现及供电方式的多样化、生物相容性材料研究的深入以及外科(尤其是显微外科)手段和技术的日益提高,各类植入式电子装置(研究用、诊断和治疗用)不断涌现。植入体内的电子装置通过无线电传输与体外的测量与控制装置联系,成为生物医学研究的一个有力手段。与此同时,遥测监护系统也朝着多通道、数字传输以及计算机处理的方向发展。60 年代后标志生物医学遥测技术发展的另一个方面是遥测技术应用范围的不断扩展,具有代表性的应用有:用全集成电路组成的植入式脑水压遥测系统、各类吞服式遥测胶囊的实用化[图 1-1-1 (a) (b) (c) 分别给出了用于测量压力的遥测胶囊电路、结构及体外接收记录装置]、研究猴子性格可

^① 1ft = 0.3048m.

控性的生理和心理遥测遥控试验系统、采用两块混合式集成电路的植入式脉冲多普勒超声波血流遥测装置、无损连续血压遥测监护系统、具有遥测和遥控性能的可编程植入式药疗系统(PIMS)、测定宇宙飞船中宇航员生理参数和环境参数的多路数字遥测系统和各类用于研究动物(鼠、猫、狗、蝉、猴、鸟、鱼等)生理和心理的遥测装置等。

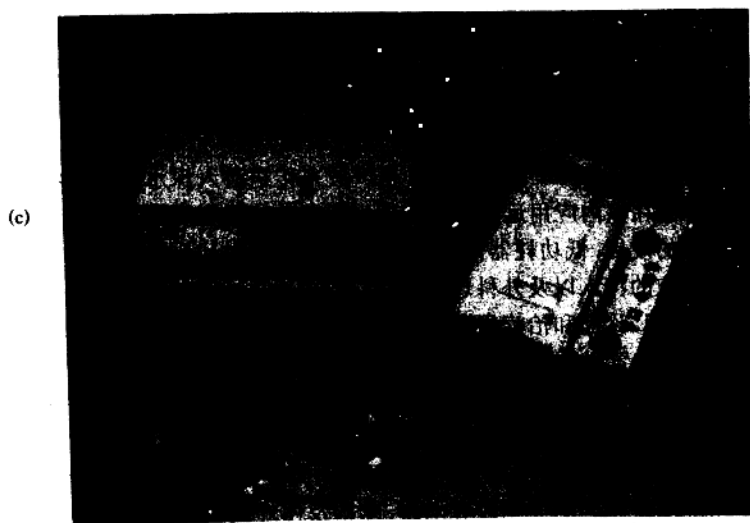
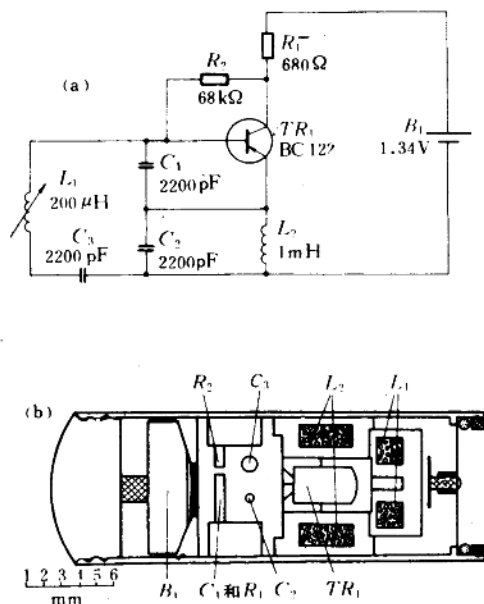


图 1-1-1 遥测胶囊与体外接收记录装置

动物跟踪也是生物医学遥测应用的一个重要方面。用来研究动物的生活方式、同类以及异类动物间的相互关系、外界环境条件对动物习性、活动、生死存亡和分布等因素的影响,以及用来研究动物对环境的适应能力等。有代表性的重要事件有:1957年, Trefethen 等用声学的方法对水生动物进行跟踪;1959年, Mayen 等进行了动物的无线电跟踪, Lack 对鸟类进行雷达跟踪;1972年 Craighead 等试验采用卫星来对活动范围很大的动物进行跟踪。图 1-1-2 是一个用卫星来对鲨鱼进行跟踪的示意图。鲨鱼拖曳一个频率为 401.65MHz 的发射机(发射机浮在水面上,重量约 2—3kg),发射信号通过上行线送至卫星,再由卫星中的中继装置转发,通过下行线送至地面的遥测站进行数据处理。图 1-1-3 是一个卫星跟踪装置,用来跟踪北极熊的行迹。卫星在与太阳同步的极地轨道上

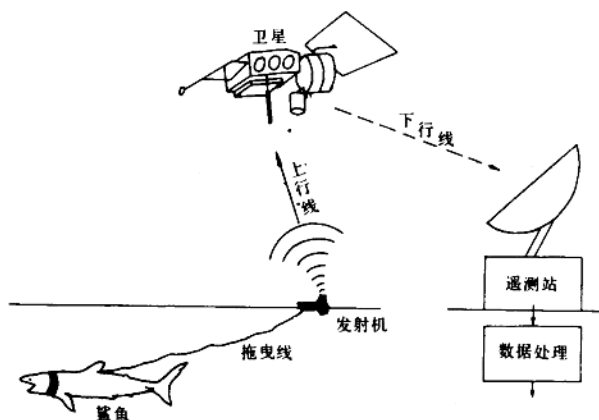


图 1-1-2 利用卫星跟踪鲨鱼(Priede, 1979 年)

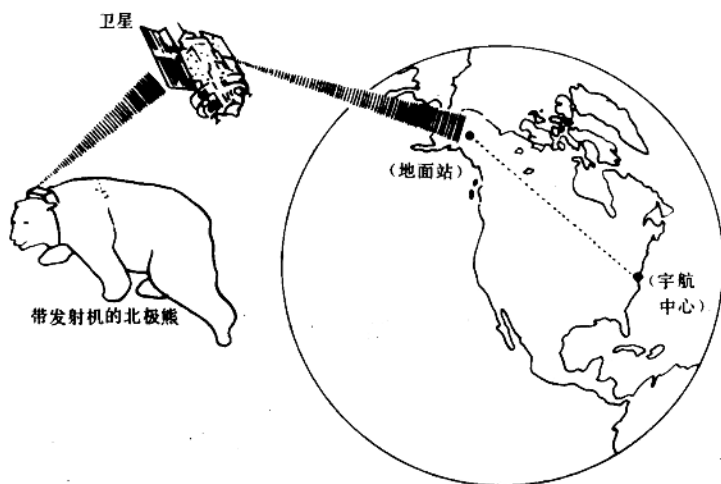


图 1-1-3 利用卫星跟踪北极熊(L.Kolz, 1974)

飞行,每 108 分钟绕地球一圈,飞行高度为 1100km,在美国的阿拉斯加 Fairbanks 地面站每天至少可以观察到 10 次,通过地面站命令,卫星把存贮的数据发回地面,这些原始数据经地面传输线路送到马里兰州的 Goddard 宇航中心进行综合处理,最后把数据提供给研究人员。

在我国,生物医学遥测技术的应用历史不长,但近 10 年来有了较快的发展,如对游泳及自行车运动员运动生理参数的遥测监护、飞行员高空生理参数记录、医院内活动病人的心电遥测监护系统、深水中的潜水员心率超声遥测装置、心电图的电话传输、登山运动员的高山生理参数遥测研究、野生动物(例如白暨豚、熊猫等)的声波及无线电遥测跟踪等一系列成果,标志着我国生物医学遥测技术已进入了一个崭新的发展阶段。值得推崇的是,在 1975 年 5 月我国登山队再次攀登世界第一高峰珠穆朗玛峰时,研究人员利用由上海生理研究所秦诒纯等研制的作用距离可达 30km 的无线电心电遥测仪,成功地记录了登山运动员攀登至海拔 76km、82km、83km、86.8km 及顶峰共 15 人次的心电图,这在世界登山史上还是第一次,海拔 82km 以上 10 人次的心电图是当前地球上最高的心电图。图 1-1-4(a)是该次遥测心电时的地形示意图,运动员将遥测发射机带上珠峰,科技研究人员在高山营地(海拔 65km)或大本营(海拔 5km)等较低海拔处接收和记录,图(b)是在海拔 86.8km 处利用遥测装置发送至大本营后记录下的心电图(Ⅱ导联)。

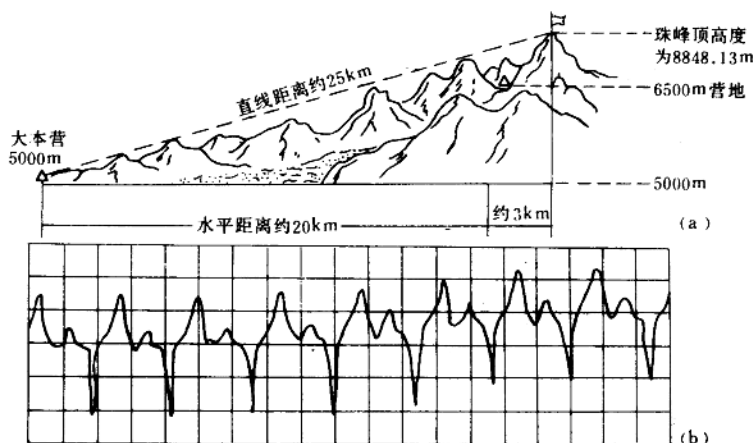


图 1-1-4 珠峰遥测心电时的地形图及 8680m 处的心电图

1·2 生物医学遥测分类

生物医学遥测系统可分为有线遥测、无线遥测与存贮遥测三大类,如图 1-2-1 所示。有线遥测是通过导线(电话线、电缆及波导等高频传输线、光导纤维等)将受测者的生理信号自测量端传送至分析、处理和显示、记录端。无线遥测不用导线,而采用电磁波、光、声等来传递生理信号。有线遥测和无线遥测一般采用实时工作方式,而存贮遥测则不

同,它是先将受测者的生理信号经存贮记录,然后在另一地(例如在医院或宇航中心等)回放输出处理显示,是一种非实时的工作方式。

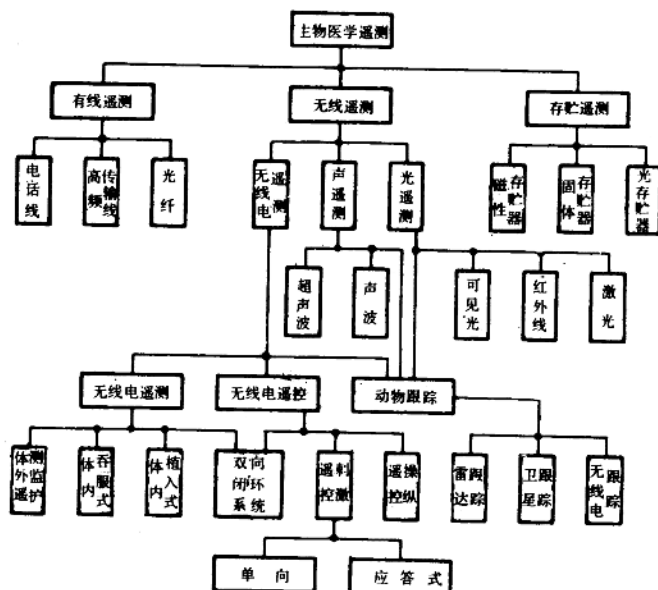


图 1-2-1 生物医学遥测系统的分类

有线遥测的优点是设备简单、使用方便,一般只要采用民用电话就可直接进行心电图、血压和体温等生理信号的传输。例如装有心脏起搏器患者的随访工作,可用电话线将病人的心电图信号定期传送给医生的办公室或医疗信息中心,中心采用计算机分析处理后,即可通过电话线送回至原处,以指导患者何时必须到医院进一步诊治或更换起搏器。当然利用电话线同样可以传送其他生物医学资料。某些国家也有采用专用的医学信息遥测电缆传输线路。采用有线传输可避免电磁辐射,信号传送质量高以及能进行城市间、国际间的远距离传输,以便于专家们会诊,对病情作出更好的分析与评价。目前这种系统每小时能分析处理 100 份心电图,若在城市内普及应用光导纤维通信,有线遥测可进一步发挥作用,例如可直接传送医学图像,以实现医生与患者间的多种信息联络。

无线遥测是目前应用最广泛的遥测方式。由于它是通过电磁波的发射和接收来传递生物医学信息的,因此,患者只是携带一个小型的生物医学信号发射装置,可以在自然的无拘束的工作或运动状态下向接收监视端传递信息,所以可直接进行对活动病人的监护,可开展运动生理研究,并可在特殊的环境或在负荷状态下监测劳动者、运动员、宇航员的生理参数。利用无线遥测还可用来保障患者的安全。这是因为目前生物医学测试仪器通常与漏电流较大的电子计算机等仪器组合使用,如图 1-2-2 所示,因地线开路等事故,会使电子计算机等仪器上的漏电流通过共用地线和信号输入线流到医学仪器和患者身上,而引起电击的危险,尤其是流出点是心导管或心内电极时,就会产生微电击而危及患者的生命安全。采用无线电遥测后,由于遥测发射机中采用的是浮地电源(一般采用干电池),患者与计算机等仪器处理装置间通过电磁波、光、声等能量的发射与接收联系,相互之间

处于完全的电绝缘状态,在产生地线开路等故障时,由于患者与市电电源无直接的联系,因而仍然是十分安全的。随着半导体器件、电子元件、电池的小型化,尤其是大规模低功耗多功能集成电路的发展,目前可将生物医学信号发射装置(含传感器、放大器和发射机)吞服或植入体内,来测量深部体温、消化道中的 pH 值、压力、血管中的血流量等,在这种场合,无线遥测更显示出其优越性。利用无线电胶囊和植入体内的遥测发射机,可将体内的生理信息射送至体外接收监视装置,而不需用导线,体外也可向体内射送射频能量,实现体外对体内电子装置的供电,或实现电刺激或进行对体内植入机构(例如给药装置)的操纵,这就是所谓遥控刺激和遥控操纵。遥控电刺激可采用单向工作,也可采用应答式,后者除向体内射送刺激信号外,还能从体内向体外送回实际的刺激波形,以供体外监视电刺激的实际情况。无线电遥测与无线电遥控可组成双向系统,实现闭环控制,也就是说利用无线电遥测装置测量人体的生理参数,根据被测参数的大小,经计算机等装置处理后,反馈至遥控装置,控制执行装置进入给药等医疗措施,使生理参数在正常范围内,用这种闭环控制系统可实现诸如血压、血糖等人体参数的自动控制。无线遥测除用射频辐射方式传送信息外,也可采用声波(含超声波)和光波(可见光、激光、红外线等)作为信息的载体实现无线传输。无线遥测(无线电、光、声等)在动物跟踪方面的应用越来越显示其优越性。在研究野生动物的生态时,可在被试的动物身上安装有标志的无线电遥测发射机,然后将该动物放回自然环境中,利用雷达、射频无线电及卫星中的中继转发装置跟踪其行迹,真实地测量其生态和生理参数。

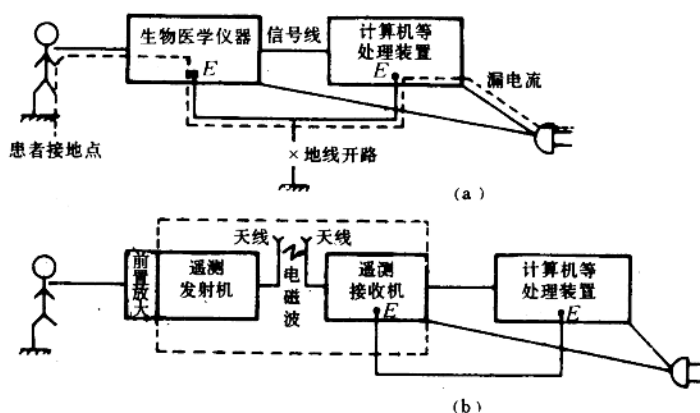


图 1-2-2 用无线电遥测来保证患者安全

(a) 因地线开路而引起电击危险示意; (b) 用无线电遥测的绝缘用系统。

存贮遥测按存贮器件的不同可分为磁性存贮器(含磁带、磁盘、磁鼓等)、固体存贮器(含半导体存贮器、电荷耦合器件存贮器)和光存贮器(光盘等)等几种常见的存贮遥测方式。存贮遥测是一种离线测量方式,在应用中也有其独特的优点。例如采用磁带记录的 Holter 装置便于病人携带,可记录 24 小时内的心电信号,只要将记录磁带送至医院的计算机处理中心,快速(60:1)放回,将记录的生理信息送至计算机分析,就可得到 24 小时的心率趋势、早搏次数、异常心电图等许多有用的信息。在卫星中的磁记录装置可记录地

球上各处的生态信息,然后在最佳位置时,快速回放,将全部生态信息送至地面站和处理中心进行分析。表 1-2-1 给出了各类遥测装置的应用领域。

表 1-2-1 生物医学遥测技术分类与应用领域^{a)}

传输方式 应用方法 应用领域	有线遥测	复合遥测 (有线遥测加 无线遥测)	无线电遥测	声(超声)遥测	光遥测	存贮遥测	植入式	吞服装置	携带装置	固定装置
动物应用										
实时测量	(*)	—	*	*	*	—	*	*	*	—
跟踪	—	—	*	*	(*)	—	(*)	(*)	*	—
控制	—	—	*	*	(*)	*	*	—	*	—
人类应用										
临床监视 (病人监护)	*	*	*	—	*	—	(*)	—	*	(*)
功能测试	—	—	*	*	*	—	*	*	*	—
康复	—	—	*	—	*	*	(*)	—	*	—
远距离诊断	*	*	*	—	—	—	—	—	*	—
远距离医疗	(*)	(*)	*	*	—	*	(*)	—	(*)	*
活动的临床 急诊系统	—	—	*	—	—	—	—	—	(*)	*
生理研究	—	(*)	*	*	*	*	(*)	*	*	—
运动与工作	—	(*)	*	*	*	*	(*)	*	*	—

a) 表内 * = 常用; (*) = 偶尔使用; — = 无实际应用。

1·3 生物医学遥测系统的组成和体制

图 1-3-1 是一个用来说明多道生物医学遥测系统的主要组成部分的方框图。图中信息源是来自生物体(动物或人)的生理信息,这些信息有的是电量,例如心电(ECG)、肌电(EMG)、脑电(EMG)、眼电(EOG)等生物电信号,也可能是非电生理信息,例如血压、血流、脉搏与心音、体温、呼吸、肌肉收缩、颅压、眼压等物理量,pH 值、P_{O₂}、P_{CO₂} 等生化量。生物电量用电极作为检测元件,而非电生理信息必须通过各类传感器(或称换能器)变换成电信号,在生物医学领域中,常见的传感器有电参数(电阻、电容、电感)传感器、压电式传感器、热电式传感器、光电式传感器等。由于生物医学测量的对象是人体或动物,传感器的形式和性能对人体安全和遥测仪的性能指标都有举足轻重的作用,因此必须精心设计、精心选择。经传感器变换后的电信号反映了生理信息的特征,信号的幅度通常是微弱的(微伏至毫伏量级),信号的频率范围通常在零至几千赫之间。常见的几种生物医学信号的信号幅度和频率范围如表 1-3-1 所示。这样的信号一般需经放大器放大和滤波,集成运算放大器是最常见的生物医学信号用放大器,因为这种放大器设计与调整方便,易与各类传感器配合使用,便于对信号加工处理,实现信号适调。多路复用器是用来

将各路信号 S_1 — S_4 加以综合, 形成多路复合信号 S_x 。多路复用的方法有频率划分法和时间划分法(频分制和时分制)两种。频分法是将各种被测信号加载于不同的频率上, 使它

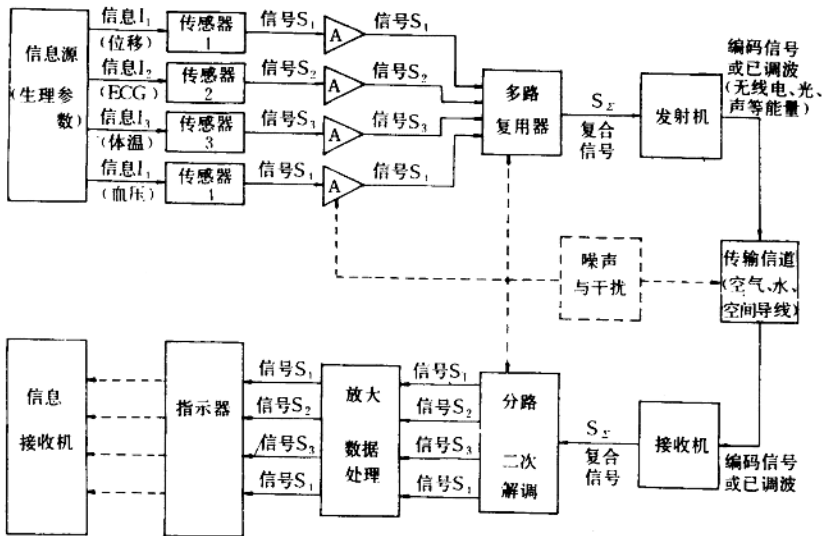


图 1-3-1 多道生物医学遥测系统的组成

们各占一段频谱, 然后将它们线性相加, 综合成含各路信号 S_1 — S_4 在内的复合信号 S_x , 只要在接收端采用调谐于不同频率的带通滤波器, 就能从复合信号 S_x 中划分出各路信号 S_1 — S_4 。时分法则是使各路信号的传输在时间上相互错开, 或者说用开关轮流接通各路信号 S_1 — S_4 , 综合成多路复合信号 S_x , 只要在接收端用相应的开关同步地轮流接通有关通道, 就能从复合信号 S_x 中分离出各路信号 S_1 — S_4 。各种不同类型的遥测方式, 诸如无线电遥测、光遥测、声遥测和有线遥测, 都必须有相应的遥测发射机、遥测接收机和传输信道, 而这些设备与通常的通信系统没有什么本质的差别。在发射机中, 必须实现信号的编码和调制, 将被测信号编码或加载于高频载波之上, 并经射频功率放大, 最后将载有信息的射频信号(编码和已调波)送至天线(无线遥测场合)或传输线(有线遥测场合)进行辐射或传输。对一般的生物医学遥测系统来说, 载波频率可在 36.7—37.9MHz 和 70—200MHz 的二个范围内选定, 但要避免与广播和电视的工作频段相重, 否则将相互产生干扰, 植入式遥测时, 为了减少生物组织的衰减, 应选用较低的载波频率, 例如常选在 0.5—10MHz 之间。生物医学用遥测发射机一般要求携带或植入人体内部, 故有小型化、长期、可靠和安全工作等高要求, 植入式遥测发射机还必须具有高密封性、生物相容性好, 形状及重量应与相应的组织匹配等一系列特殊要求。生物医学用遥测接收机与一般的工业遥测接收机没有什么差别, 在接收机中, 必须设有高频放大、变频和中频放大等环节, 以提高接收机的灵敏度与选择性。为了恢复原先的多路复合信号 S_x , 接收机中必须设置解码和解调装置, 接收机中的二次解调环节用来从复合信号 S_x 中分离出各路信号 S_1 — S_4 , 再经过放大及滤波等处理环节, 提高信号质量和幅度, 最后将具有一定幅值和信噪比的各路信号送至显示器和记录仪进行显示和记录, 或将这些信号变换成人能接受的信息。必须指

出,生物医学的信号通常是十分微弱的,系统内的本机噪声和外来干扰信号的混入,将成为限制测量精度和工作稳定可靠的重要因素。必须合理地选择器件和电路来降低噪声,以及采取各种有效的抗干扰措施(例如屏蔽和滤波)。对无线电遥测系统来说,由于遥测发射机一般采用干电池供电而对地浮置,因而具有较高的抗共模干扰的能力。

表 1-3-1 常见的几种生物医学信号幅度和频率范围

生理参数	信号幅度范围	频率范围
心电(ECG)	10 μ V—5mV (皮肤电极)	0.05—80Hz
胎儿心电	10 μ V (典型值)	2—100Hz
希氏束电图	1—10 μ V (体表)	40—300Hz
脑电(EEG)	10—200 μ V (头皮电极)	0.5—100Hz
	10 μ V—100mV (颅内电极)	0.5—100Hz
肌电(EMG)	20 μ V—1mV	10—5000Hz
视网膜电位	0—1mV	0—25Hz
眼电位	0.05—5mV	0—20Hz
血压	30—300mmHg (动脉直接)	0—100Hz
	-10—+20mmHg (静脉直接)	0—20Hz
心音	可变	2—2000Hz
脉搏波	可变	0.1—50Hz
心率	45—180 次/分	0.75—3Hz
血流量	0.05—200ml/秒	0—30Hz
呼吸频率	0.2—0.4 次/秒	0.2—0.4Hz
体温	35°—42℃	30—300Hz
柯氏音	可变	
pH	0— $\pm$ 700mV	
PO ₂	0—3000mmHg	0—1Hz
PCO ₂	1—1000mmHg (0— $\pm$ 150mV)	

生物医学遥测系统按信号变换的方式,可分为模拟式和数字式。模拟式遥测是一种将被测量按模拟(连续)方式传输的遥测体制,在这种体制中,常采用的调制方法有调幅(AM)制、调频(FM)制、调相(PM)制、脉冲振幅调制(PAM)、脉冲宽度调制(PDM 或 PWM)、脉位调制(PPM)等。数字式遥测是一种将被测信号的幅度离散化(数字化),形成脉码形式进行传输的遥测体制。在这种遥测体制中,常采用脉冲编码调制(PCM)和增量调制(Δ M)等多种调制方式。在多通道遥测系统中,通常采用多重调制(一般采用 2—3 重调制)方式,常见的形式有 FM—FM(双调频)制, PDM—FM(脉冲宽度调制—调频制)制, PCM—FSK(脉码调制—频率键控调制)制等两次(重)调制方式。第一次对副载波进行调制,第二次调制则是将已调副载波对载波进行调制。目前采用不同的遥测体制及调制方式,可实现单参数遥测到能对高达数百个参数同时进行遥测。

生物医学遥测体制、具体的遥测系统组成及结构形式、电路形式的选用乃至传承载波频率及其稳定度的选择,取决于遥测系统的技术要求,这些要求包括遥测对象的数目和种类、遥测系统的保真度、遥测装置的体积和重量、遥测系统的作用距离等。在高山生理遥测、野生动物跟踪等场合,主要要求有足够大的遥测作用距离,因此必须提高发射机的功率、接收机的灵敏度以及提高天线的增益和方向性,载波频率可选在超高频(UHF)和甚

高频(VHF)段。而体内参数的测量由于一般需采用植入式遥测技术,所以应采用体积小、重量轻、功耗低、电路简单的发射机结构形式,作用距离不是其主要要求,一般只需几米甚至不足 1m,考虑到生物组织对电磁波的吸收衰减随频率升高而加大,因此这种场合的载波频率不宜取高,一般在 10MHz 以内,而且不采用天线辐射,而采用电磁耦合的方式(详见第五章)。

第二章 生物检测技术

本章我们将着重讨论生理信息的检测问题。由于生物医学测量的对象是人体,人体的参数就其性质来说,可分为物理参数及化学参数两类,诸如光、电、声、力、位移、速度、加速度、压力、流量、磁、离子浓度、血清中的葡萄糖、胆固醇、激素乃至蛋白质等。也可分为生物电量与非电量,例如心电、脑电、肌电、神经电和眼电等都以电信号的形式出现,而血压、血流、呼吸、体温等则属于非电生理量。生物电量可通过电极来拾取与传递,并可通过生物电放大器进行放大。非电生理量则需采用传感器来转换成电量,传感器是一种能量的转换器,因而亦可称为换能器。目前生物医学领域中的传感器,通常分为物理传感器、化学传感器和生物传感器三大类。物理传感器是用来将光、声、力、热等物理量转换成电量,化学传感器则是完成将湿度、气体成分、离子浓度等化学量向电量的转换。生物传感器则是指用生物机能物质作识别器件所制成的传感器,例如酶传感器、微生物传感器和免疫传感器就是这种传感器的典型实例。

研究电极和各类传感器的原理和应用,以及在生物检测过程中有关的测量方法、信号的放大与滤波等问题,对整个遥测系统来说是十分关键的,它们是整个遥测系统的前置部分,其性能的好坏,将直接影响系统的特性。

由于电极、传感器及其相关的测量电路、放大器与滤波器涉及面十分广,因此本章拟对一些典型的生物医学遥测用的器件和电路作些扼要的介绍。使读者对生物医学遥测的信息获得、转换与预处理过程有一个完整的认识。

2.1 生物电测量电极

用于拾取人体电现象的电极,称为生物电测量电极。生物电测量电极目前广泛地应用于心电图(ECG)、脑电图(EEG)、肌电图(EMG)、眼电图(EOG)、视网膜电图(ERG)、神经电图(ENG)、皮肤电位及细胞电位等生物电位的测量,它对整个生物电测量系统的灵敏度、稳定性、信噪比及抗干扰能力,起着十分重要的作用。

生物电是机体生命活动过程的基本属性,生物电位产生的原因相当复杂,就单细胞来说,活机

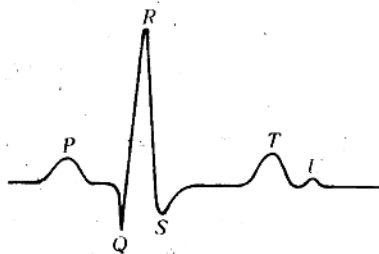


图 2-1-1 在体表检测到的心电图

体内有两种基本形式的电位,即膜电位和动作电位。膜电位是细胞内外钾离子分布不平衡而造成在膜的两侧形成的电位差(内侧为负,外侧为正),它是直流电位。动作电位是迅速变化着的电位,它来源于各种可兴奋细胞当接受刺激而兴奋时在细胞膜电位的基础上发生的短暂电位波动。在体表检测到的生物电位称为体表电位。体表电位是机体内某

处产生的电活动的结果,在体表上记录的心电图和脑电图都是合成矢量。以心电图为例,心脏可看成是一个等效的心电发生器,心脏的不同区域,有各自的电活动,因此心脏不同部分的单一细胞膜电活动与体表检测到的心电图波形之间有对应的时间关系:如图2-1-1所示, P 波是由心房去极所产生, QRS 波群基本上由心室去极所产生, T 波是由心室复极所产生, $P-R$ 间的零电位主要是房室结内的传导延迟而引起, $S-T$ 段的零电位与各个心室细胞的平台期平均时距有关。不常出现的小波 U 可能是心室乳头肌的缓慢复极所致。

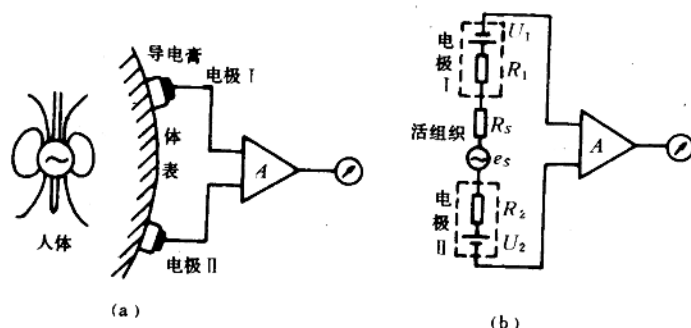


图 2-1-2 用电极自体表引出电信号

(a)示意图;(b)等效电路。

一对电极从体表引出电信号的示意图及其等效的测量电路如图2-1-2(a)和(b)所示。研究证明:当电极进入生物体组织或与生物体体表相接触时,由于生物体的活组织可看成是一种电解质,因此就会在电极与组织之间,出现一个电位差,鉴于它如同半个电解质电池,故称其为半电池电位。假若以 U_1 和 U_2 表示电极I和电极II的半电池电位,用 R_1 和 R_2 表示电极与活组织之间的接触电阻,活组织中被测量的有用信号及其内阻分别用 e_s 和 R_s 表示,则其等效的测量电路如图(b)所示。考虑到一对电极的半电池电位的不对称而引起的电位差,以及电极中流过电流时出现的极化电位,两个电极之间将出现一个组合电位差,这个电位差称作电极电位。电极电位随活组织的性质、电极与活组织接触面的变化、温度变化而波动,电极电位的存在及其波动和被测生理信号混叠在一起,造成了检测生理量过程中的困难。所以,在用电极来测量生物电信号时,应力求电极电位小而稳定。实际应用电极来测量生物电时,应采用半电池电位小而稳定的电极材料(例如银-氯化银)、采用对称电极(即 $R_1=R_2$, $U_1=U_2$)、在线路上分离电极电位与被测信号、采取使电极与组织稳定接触,以及在电极与体表间进行清理和加入导电膏等耦合介质等措施。

生物电测量电极的种类很多。按测量的部位来分,可分为体表电极与体内电极。按是否有耦合介质来分,可分为采用耦合介质的“湿”电极,和不采用耦合介质的绝缘“干”电极。按电极的大小来分,可分为大电极与微电极。电极还可以按刚柔分、按材料性质分和按电极形状分。下面我们介绍几种实用的生物电测量电极。

2·1·1 体表电极

心电、脑电、肌电、视网膜电等各种体内的电活动,都会传导至人体的表面。用来拾取体表电位的电极称为体表电极。图 2-1-3 是几种常见的体表电极。金属板状电极有平板式和圆盘形之分,平板式电极表面具有一定的弧度,便与四肢接触,常作为心电图测量的肢体电极使用。圆盘形电极作为躯干及头部电位(心电、脑电及肌电图测量)检测用,金属板状电极可采用德银(镍银合金)、镀镍的钢板或银-氯化银(Ag-AgCl)等材料制成。银-氯化银电极采用纯银作为电极片,然后再通过电解方法在这个极片的表面上覆盖一层氯化银层而制成。由于氯化银在水中的溶解度极低,在电极与电解质交界面上的电流不大时,电极和周围介质的作用基本上处于一个平衡状态,因此 Ag-AgCl 电极极化电位小(200—300 μ V)且稳定的原因。为了使极化电位保持不变,可在体表电极与人体体表接触处涂上饱和 NaCl 溶液或导电膏,使电极经一定厚度的导电膏与体表接触。金属板电极自体表拾取的生物电信号通过接线柱用导线送至生物电前置放大器。作为心电图测量

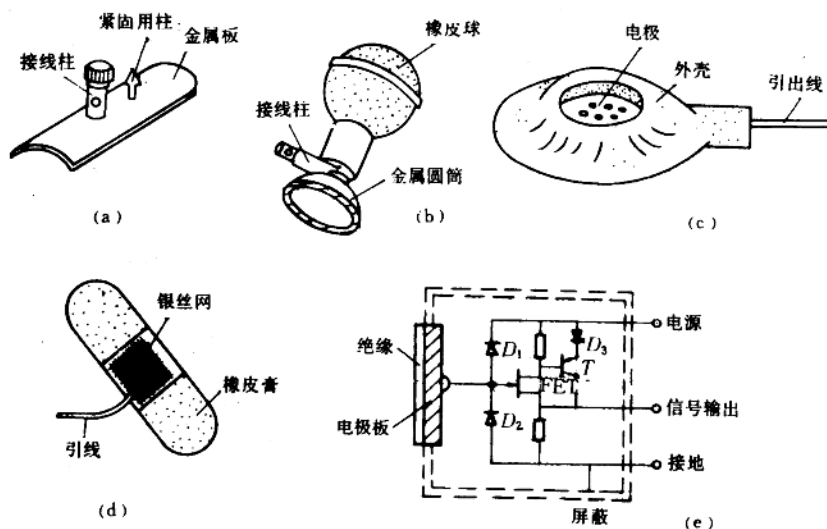


图 2-1-3 常见的几种体表电极

(a)金属平板式电极; (b)圆筒式吸附电极; (c)液体注入式电极;
(d)柔性电极; (e)干电极。

用的胸电极,有时采用圆筒式吸附电极,它可以通过橡皮球排出空气而得负压,使圆筒电极吸附于胸壁。与金属板状电极相比,由于圆筒电极与体表的接触面积较小,因而会出现较大的信号源阻抗,配用的生物电放大器应具有更高的输入阻抗,否则将可能导致生物电信号的失真。液体注入式电极的特点是具有一个用来注入导电膏或导电盐类溶液的凹坑,金属电极与体表不直接接触,贮存在凹坑里的导电液体不易干固,可长期保持电极与体表之间的阻抗稳定,保证信号测量的稳定性。柔性电极是相对于上述几种刚性电极而言的,电极是柔性的银丝网,引线也是柔软的导线,这种电极对皮肤嫩弱的早产新生儿测量与监护是十分必要的。干性电极是相对于采用导电膏或其他导体液体介质的“湿”电极