

生物医学 电子学

刘克球 吕以乔 周以民 编著

北京大学出版社



生物医学电子学

刘克球 吕以乔 周以民 编著

北京大学出版社

内 容 简 介

本书共12章，主要讨论生物医学测量技术的基本原理和方法及仪器的使用。本书特点是能够从测量对象(生物体)本身的特点出发，提出对仪器系统的明确要求，在此基础上讨论生物医学测量问题。并对国内外电生理实验室和临床上常用的一些测量仪器、生化仪器的设计原则、工作原理、线路结构进行了比较详细的分析。

作者根据多年讲授生物电子学课程的经验，对某些疑难问题着重加以分析，更为具体。

本书是一本理论和实用相结合的教材。适合于综合大学生物系、医学院校师生及临床医务工作者、生物医学研究人员及从事生物医学仪器研究的工程技术人员使用。

生物医学电子学

刘克瑞 吕以乔 周以民 编著

责任编辑：李惠兰 韩慰曾（特邀）

*

北京大学出版社出版

（北京大学校内）

北京通县燕山印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

850×1168毫米 32开本 18.25印张 473千字

1988年10月第一版 1988年10月第一次印刷

印数：0001—2500册

ISBN 7-301-00293-9/Q·005

定价：4.35元

0104460

前 言

人体是一架极其精细、复杂而又充满奥秘的“机器”，它的控制和调节机能是任何其他机器都不能与之相比拟的。

生物电信号是生命的特征。生命一旦终止，组织和器官的活动也就停止，生物信号因此而消失。如果没有生物电信号，我们就很难设想人体的425块肌肉如何协调地活动。人脑的某些运算功能，虽不如先进的计算机那样快，但是，人脑凭借体内外各种感受器接受内外环境中的物理、化学等变化，并迅速转换为数据，编制成一定的程序，通过效应器的活动对环境作出一定的响应。人脑的存储容量高达100亿以上的信息单位，而其一天的功耗却不足一瓦，这也是任何现代计算机无法比拟的。

在病理情况下，人体对内外环境的变化不能作出适应性的反馈控制，致使机能失调，疾病加剧乃至死亡。为了预测或判定人体的生理机能状态，医务人员常借助于他们的视觉、听觉和触觉等感觉器官，去采集、记录和分析这些信息。但是，光凭感觉器官去诊治疾病是远远不够的。因为感觉不能提供精确、客观和定量地反映人体的各种生理信息，更何况人体内的很多生理信息无法凭感觉器官去察觉。

医疗诊治技术的革命，特别是医学电子技术的革命，为人类的健康带来了福音。各种各样的医疗仪器，为医生诊治疾病提供了强有力的手段，延伸了医生的感觉器官，并提供了无数新的方法，开辟了无数新的领域。X射线仪器和计算机断层设备的发明和应用，为骨科、肝脏和大脑等病变的诊断，提供了快速而准确的结果。心电图仪等各种心脏疾病监护和诊治设备的应用，对心血管系统的器质性和功能性疾病的诊断，提供了可靠的依据。

从本世纪50年代到今天，仅有三十多年的历史。但是，生物医学和工程学的结合，从一开始就显示其强大的生命力。它在医学临床和基础研究各领域发挥着巨大的作用。近20年来，随着空间技术的开发，为宇宙生理学的研究提供了新一代的遥测、监视和处理的新方法和新手段。

近年来，我国相继成立了全国性的和部分省市的生物医学工程学会和研究所，少数高等院校已设置了生物医学工程专业，这无疑为大力发展我国的生物医学工程打下了良好的基础。

本书仅对生物医学电子学的原理作一简要介绍。结合各章内容，对典型的生物医学仪器的电路原理作一些分析，以期取得理论联系实际的效果。本书第一章介绍生物医学仪器的一般概念；第二章讨论生物医学传感器；第三、四、五、六章和第七章讨论五种重要的生物医学电子仪器——生物电放大器、心电图仪、多道记录仪、微电极放大器和医用数据处理计算机；第八章讨论生物化学仪器原理；第九和第十章讨论电子刺激技术和电压钳制技术；第十一章讨论干扰、噪声和不稳定性；最后，第十二章讨论电气安全。

这本书是在生物物理专业、生物医学电子学专业本科生及医学工程、生理及生物物理专业进修生的教学讲义基础上编写而成。其中第九、第十两章由吕以乔同志编写，第八章由周以民同志编写，其它各章由刘克球副教授编写。初稿完成后，由吕以乔同志统一整理定稿。北京大学生物系生物物理教研室主任周培爱先生进行了认真的审阅。本书在编写过程中还得到了北京大学分校生物医学电子学专业祁尚云、曹思平、赵凤玉同志以及北京大学生物系孙博宁、刘春香、张月华等同志的热情帮助，在此表示衷心的感谢。由于我们水平有限，书中一定有不少不到之处，恳请读者批评指正，互相交流经验，以促进我国生物医学领域电子技术的应用不断开拓进展！

目 录

前 言	(1)
第一章 生物医学仪器的基本概念	(1)
1.1 生物医学仪器系统	(1)
1.2 工作方法	(3)
1.3 生物医学仪器的分类	(4)
1.4 工作范围	(7)
1.5 生物医学仪器的主要特性	(7)
1.5.1 输入阻抗	(7)
1.5.2 灵敏度	(8)
1.5.3 线性和精度	(9)
1.5.4 频率响应	(10)
1.5.5 信噪比	(10)
1.5.6 共模抑制比	(11)
第二章 生物医学传感器的基本原理	(13)
2.1 主动传感器	(13)
2.1.1 电磁传感器	(14)
2.1.2 压力传感器	(17)
2.1.3 热电传感器	(19)
2.1.4 光电传感器	(21)
2.2 被动传感器	(22)
2.2.1 电阻式传感器	(23)
2.2.2 电容式传感器	(26)
2.2.3 电感式传感器	(28)
2.3 几种常用的生物医学传感器	(29)
2.3.1 力传感器	(30)
2.3.2 位移、速度和加速度传感器	(31)
2.3.3 压力传感器	(32)

2.3.4	数字式传感器	(33)
2.4	传感器测量系统	(33)
2.5	传感器的控制系统	(35)
第三章	生物电位及生物电放大器	(37)
3.1	生物电位的发生原理	(37)
3.1.1	静息电位	(37)
3.1.2	动作电位	(40)
3.1.3	动作电位的传播	(41)
3.2	信号及信号源	(42)
3.3	生物电放大器	(45)
3.3.1	运算放大器	(46)
3.3.2	生物电放大器的一般特点	(57)
3.3.3	生物电放大器	(67)
第四章	心电图和心电图仪	(82)
4.1	心电图的导联	(82)
4.1.1	标准导联	(82)
4.1.2	单极导联和中心电端	(84)
4.1.3	单极胸前导联	(85)
4.1.4	单极肢体导联和单极加压肢体导联	(85)
4.2	正常心电图	(87)
4.3	心电图向量图及其与心电图的联系	(88)
4.4	心脏传导系统的电活动	(94)
4.4.1	心脏的传导系统	(94)
4.4.2	导管希氏束电图	(96)
4.4.3	体表希氏束电图	(97)
4.5	心电图仪的设计特点	(99)
4.6	心电图仪的一般结构	(102)
4.6.1	常规心电图仪的一般结构	(102)
4.6.2	现代心电图仪的一般结构	(104)
4.7	心电图仪的电路工作原理	(108)
4.7.1	常规心电图仪的电路工作原理	(108)
4.7.2	现代心电图仪的电路工作原理	(123)
第五章	多道生理记录仪	(166)

5.1	多道生理记录仪的主要特点	(166)
5.2	多道生理记录仪的主要用途	(168)
5.3	多道生理记录仪的组成	(169)
5.4	生物电放大器	(173)
5.4.1	生物电位电极	(173)
5.4.2	浮置生物电放大器	(175)
5.4.3	浮置生物电放大器的实际电路	(176)
5.5	直流放大器	(179)
5.6	心音放大器	(183)
5.6.1	心音的发生原理	(184)
5.6.2	心音图的记录	(185)
5.6.3	心音测量系统	(186)
5.6.4	心音放大器	(188)
5.7	生理压力的测量	(195)
5.7.1	血压、阻力和血流	(195)
5.7.2	血压的检测	(196)
5.7.3	压力放大器	(198)
5.8	脉率及呼吸率的测量	(203)
5.8.1	脉率和呼吸率传感器	(203)
5.8.2	脉率和呼吸率放大器	(204)
5.9	血流及血容量的测量	(209)
5.9.1	电磁血流计	(210)
5.9.2	超声血流计	(210)
5.9.3	射线法	(211)
5.9.4	热稀释法	(211)
5.9.5	指示剂稀释法	(212)
5.9.6	阻抗法测量心输出量	(214)
5.9.7	阻抗图的临床应用	(218)
5.9.8	阻抗容积描记器	(219)
5.10	生物遥测	(222)
5.10.1	可遥测的生理参数	(223)
5.10.2	生物遥测系统	(224)
5.10.3	单通道遥测发射机	(230)
5.11	心率计	(232)

5.11.1	平均心率计	(232)
5.11.2	瞬时心率计	(233)
5.11.3	平均和瞬时两用型心率计	(236)
5.12	积分器	(240)
5.12.1	积分器工作原理	(240)
5.12.2	积分器电路分析	(243)
5.13	微分器	(250)
5.13.1	微分器工作原理	(250)
5.13.2	微分器的电路分析	(252)
5.14	监视示波器	(257)
5.14.1	方框原理	(257)
5.14.2	电路分析	(259)
5.15	生理参数测量概要	(267)
5.15.1	生物电位的测量	(267)
5.15.2	皮肤电阻的测量	(268)
5.15.3	心血管参数的测量	(268)
5.15.4	呼吸的测量	(270)
5.15.5	温度的测量	(270)
5.15.6	其它生理参数的测量	(270)
第六章	微电极技术	(271)
6.1	概述	(271)
6.1.1	微电极	(271)
6.1.2	无关电极	(272)
6.1.3	微电极放大器	(273)
6.1.4	微动操纵器	(273)
6.1.5	输出装置	(273)
6.2	微电极的制作和充灌	(274)
6.2.1	玻璃	(274)
6.2.2	微电极拉制器	(274)
6.2.3	充灌液与充灌方法	(275)
6.3	微电极的物理性质	(276)
6.3.1	微电极的形状和大小	(276)
6.3.2	微电极的力学性质	(277)
6.3.3	微电极的电阻	(277)

6.3.4	电容	(279)
6.3.5	尖端电位	(280)
6.3.6	微电极的非线性电学性质	(281)
6.4	记录电路	(282)
6.4.1	微电极放大器的性能	(282)
6.4.2	微电极放大器的结构	(284)
6.4.3	驱动屏蔽	(285)
6.4.4	负电容补偿	(287)
6.4.5	失调电压的补偿	(289)
6.4.6	接地和干扰	(289)
6.4.7	噪声	(291)
6.4.8	电极电阻的测量	(291)
6.4.9	低通滤波器	(292)
6.4.10	定标	(293)
6.5	电流注入	(293)
6.5.1	电流源	(293)
6.5.2	电流监视	(295)
6.5.3	电流注入和电位测量	(296)
6.6	微电泳	(298)
6.7	微电极放大器的电路分析	(300)
6.7.1	最简单的微电极放大器	(301)
6.7.2	电流注入式微电极放大器	(303)
6.7.3	微电极放大器典型电路的分析	(309)

第七章 医用数据处理计算机 (317)

7.1	医用数据处理计算机工作原理	(318)
7.1.1	信号平均提高信噪比原理	(318)
7.1.2	系列化统计分析	(321)
7.1.3	非系列化统计分析	(321)
7.2	医用数据处理计算机的程序及其生物学意义	(322)
7.2.1	平均	(322)
7.2.2	记忆示波器	(324)
7.2.3	直方图	(324)
7.3	医用数据处理计算机的一般特点及方框原理	(332)

7.3.1	医用数据处理计算机的一般特点	(332)
7.3.2	方框原理	(333)
7.4	医用数据处理计算机的操作原理	(337)
7.4.1	显示控制部分	(337)
7.4.2	运算控制部分	(337)
7.4.3	输入板	(342)
7.4.4	直方图部分	(343)
第八章	生物化学分析仪器	(345)
8.1	光谱分析原理	(346)
8.1.1	光波	(346)
8.1.2	光的吸收	(348)
8.1.3	光的选择吸收	(351)
8.2	分光光度计的主要部件	(355)
8.2.1	光源	(355)
8.2.2	分光装置	(355)
8.2.3	光电效应和光电转换器件	(357)
8.3	72型光电分光光度计	(359)
8.4	单光束紫外/可见光分光光度计	(361)
8.4.1	单光束紫外/可见光分光光度计主要元件及材料	(361)
8.4.2	单光束紫外/可见光分光光度计的应用范围	(362)
8.4.3	单光束紫外/可见光分光光度计的光学系统	(362)
8.4.4	单光束紫外/可见光分光光度计的电学系统	(363)
8.4.5	单光束紫外/可见光分光光度计的光源电路分析	(363)
8.4.6	单光束紫外/可见光分光光度计的微电流放大和测量电路	(369)
8.5	紫外检测仪	(374)
8.5.1	紫外检测仪的检测器	(376)
8.5.2	紫外检测仪的电路分析	(378)
8.5.3	其它类型紫外检测仪的工作原理	(388)
8.6	双光束紫外/可见光分光光度计	(390)
8.7	双波长薄层色谱扫描仪	(393)
8.7.1	双波长TLC扫描仪的工作原理	(393)
8.7.2	双波长TLC扫描仪的光学系统原理	(398)
8.7.3	双波长TLC扫描仪的电学系统原理	(400)

附录 用袖珍电子计算器求溶液浓度的方法	(401)
第九章 电子刺激器和刺激隔离器	(405)
9.1 电子刺激器	(405)
9.1.1 电刺激与电兴奋的基本因素	(409)
9.1.2 电刺激的作用原理	(411)
9.1.3 电子刺激器的组成及方框原理	(413)
9.1.4 分立元件构成的多功能电子刺激器	(421)
9.1.5 一种数字式电子刺激器的构成方案	(435)
9.1.6 一种典型的数字式电子刺激器电路分析	(447)
9.2 刺激隔离器技术	(479)
9.2.1 伪迹产生的原因	(479)
9.2.2 减小伪迹的措施	(481)
9.2.3 刺激隔离器	(484)
9.2.4 一种常用的刺激隔离器	(491)
第十章 电压钳制技术	(495)
10.1 电压钳制技术在细胞兴奋性研究中的作用	(495)
10.2 电压钳制的定义及其原理	(500)
10.2.1 电压钳制的定义	(500)
10.2.2 膜电位的钳制原理	(502)
10.3 电压钳制实验的必要条件	(504)
10.4 关于电压钳制实验设备的一些说明	(507)
10.4.1 枪乌贼轴突	(508)
10.4.2 电极	(508)
10.4.3 神经轴突槽	(510)
10.5 电压钳制的实验系统	(510)
10.5.1 系统框图	(510)
10.5.2 电压钳制系统的实验电路	(512)
10.5.3 一种典型的电压钳制放大器	(517)
10.6 斑片钳制技术	(528)
10.6.1 斑片钳制技术的原理	(530)
10.6.2 斑片钳制实验设备介绍	(533)
第十一章 噪声、干扰和不稳定性	(536)
11.1 噪声的特性	(536)

11.2	噪声的种类	(538)
11.3	信噪比	(540)
11.4	低噪声电路的设计	(541)
11.5	干扰	(542)
11.6	共模干扰	(544)
11.7	减小干扰的措施	(545)
11.8	基线漂移	(548)
第十二章	电气安全	(551)
12.1	电流的生物学效应	(551)
12.2	电源分配系统和医疗仪器的潜在危险	(560)
12.3	防止电击的主要措施	(560)
参考书目		(570)

第一章 生物医学仪器的基本概念

生命机体为一极其复杂的系统。在这里存在着声、光、电、机械、热、化学以及其他功能的分系统，这些分系统在中枢神经系统的支配下，协调地、一刻不停地运动着，维持着人和动物的生命活动。

为了取得有关生理系统的活动数据，我们常用某种仪器系统去检测某一生理变量。但是，得到的结果常常是不理想的，因为在无创伤情况下，很多生理变量不能直接测定，而变量与变量之间存在着复杂的相互作用，反馈控制调节机能又常常模糊某些变量的输出。即使在给定的输入情况下，一般也难以找到输入与输出之间简单的线性关系，有时其关系似乎是随机的。这一切为我们设计和使用生物医学仪器系统增加了复杂性。

1.1 生物医学仪器系统

一般的生物医学仪器系统，应具有下列功能：

一、生物信号的采集

生物信号的采集是生物医学仪器系统最基本的功能。采集系统用来取得描述生命系统活动的生理变量，以帮助人们了解生物体各大系统的正常和异常的机能。通过电极直接采集生物电信号及通过传感器把一切非电生理变量转换为电参量并加以放大，这是信息采集系统常用的方法。

二、信号调节和信号处理

采集系统搜集到的信息往往只反映生命活动的表面现象，有时还混杂假象，尚不能反映生命活动的本质，这些信息人们常称之为一级信息（或称为初级信息）。通过比较和去伪存真的信号

调节和处理，才能得到可靠的数据。经过再处理的一级信息，常称为二级信息。

三、 监视或读出

用监视系统来观察生命系统某一变量的变化过程，用读出装置把这些变量记录下来或作进一步处理。

四、 控制或反馈系统

有时为了更确切地了解生命活动的本质，常设计控制或反馈系统，把人与机器组成一个闭环系统，使仪器系统自动地运行。同时可给定生物组织或机体一个特定的输入，观察并研究其有关变量的输出。

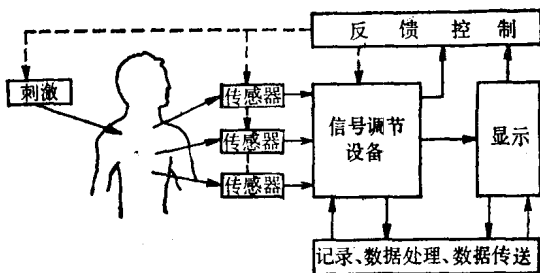


图1.1 一般医学仪器系统的组成

图1.1为一般医学仪器系统的组成框图。电极和传感器 用来测量生命机体的生物电位、压力、温度、位移、速度、阻抗等生理信号。测量方法常可归纳为直接测量和间接测量两种，如脑电图 (EEG, electroencephalogram)、心电图 (ECG, electrocardiogram) 等生物电位，用表面电极缚于体表即可直接测量，将导管插入静脉或心脏可直接取得有关部位的电压变化。前者又称之无创测量，后者称为有创测量。有些生理参数不能直接测得，往往用间接测量法。例如：呼吸流量和血流量，我们只能通过测得与这些参数有关的流速或阻抗变化来求得。从测得的呼吸和血液流速求得肺和心脏每分钟气体和血液输出的容积，这些是间接测量的例子。

某些被动传感器在测定生理参数时，尚需外加电流、射线或其它激励能量。这些能量经由被测组织的调制或直接刺激被测组织，其输出直接反映某一生理参数的变化。但不管采用哪种电极或传感器，测得的生物信号都是十分微弱的。因此在进一步对信号处理、监视或记录之前，由信号调节单元加以放大与控制，使其达到一定的电压幅度，排除不需要的噪声和其它生物信号的干扰。信号处理单元对生物信号进行微分、积分、比较、调制或数字化等二级信号处理。例如，上面谈到的呼吸和血流速度，经过积分后得到的呼吸流量和血流量；眼震电图（ENG, *electronystagmogram*）经过微分处理求得在临床上有意义的慢相速度；心音信号经过调制转换成低频记录器可以记录的调制心音图。而像心率和其它一些缓慢的生物电信号，经过数字化便于直接读出。为了进一步处理生物信号，或者为了了解生物信号的变化趋势和分布规律，在现代的一些生物仪器系统内，常设计有数据存贮和处理单元，例如瞬时记忆装置，某种专用的医用数据处理计算机和信号处理机等。

1.2 工作方法

生物医学仪器有多种工作方法。

一、采样与连续

有些生理变量的变化极为缓慢，我们可以采用连续采样方式进行测定即可满足要求。例如，体温、离子浓度等测量仪器，心电图、心律等生理变量常需连续监视。

二、模拟或数字

一般医学仪器常取模拟工作方式。这是因为模拟工作方式的设备结构简单，模拟输出在传统上常为医学接受，便于分析和比较。目前多数传感器是用模拟工作方式，但人们也在不断发展新的数字传感器，例如石英温度计和数字流量计等。

数字工作方式具有速度快、精度高等优点。由于数字器件的

不断发展，把模拟量转换为数字量或经计算机处理后读出数字成为某些医用仪器的发展方向。象数字心率计、数字体温计以及心输出量计算机等数字读出设备已为临床和科研中广泛采用。

三、实时或延时

一般的电极和传感器均是实时工作方式。因此，使用这些电极或传感器测量生物信号，均具有实时显示或记录的特点。数字化仪器把模拟量转换为数字量则存在一定的延迟。但由于转换速度相当快，与生物信号变化的速度相比可以忽略不计。在测量生物微弱信号的过程中，常采用计算机平均或相关程序来提高信噪比。虽然平均结果需要连续多次重复输入，即经过一定时间的延迟才能获得满意的信噪比，但在平均过程中，一般仍可获得直接测量的显示。

在监视设备中，由于对病人某些生理参数需要实时监视，而当超出正常范围时即可发出警报，以报告医务人员采取必要的应急措施，所以这类仪器一般均处于实时工作方式。

四、有差或检零

有差工作方式的医学仪器，其输出装置常以位移来指示。位移的偏转角和被测量信号成正比。例如，记录器和电压表指针常显示与输入生理参数成正比的位移。这种显示精度不高，通常作为辅助指示，或者用作精度要求并不高的参数指示，如温度、压力和心输出量仪器的基础阻抗显示等。

检零工作方式的医学仪器常设有平衡检测器。被测模拟量与之相反的给定量两者相比较，只要检测器具有较高的灵敏度就可输出相当精确的读数，而无需给以定标，因为给定量由仪器本身设定。肌电峰电位的幅度分析装置以及采用模数转换器的数字化医学仪器就是检零工作方式的一个例子。

1.3 生物医学仪器的分类

生物医学仪器名目繁多，测量原理和功能各异。但我们仍可