

全国理疗医师进修讲义

**生物医学工程学
及其对医学发展的影响**

楊 国 忠

进修班教学办公室

目 录

一. 医学的过去与现在	(1)
二. 生物医学工程学的出现	(4)
三. 生物医学工程学的定义与性质	(5)
四. 生物医学工程学的主要内容	(6)
1. 基础研究	(6)
生物学 (包括生物流体力学)	(6)
生物材料学 (金属、陶瓷、高分子化合物等)	(8)
生物质量传递	(9)
生物能量传递	(11)
生物信息	(14)
生物控制	(14)

生物模拟	(17)
2. 应用研究	(18)
人工脏器的研制	(18)
医用电子技术	(22)
电子计算机的应用	(25)
其它新技术的应用(激光、红外、超声、……)	(30)
五. 生物医学工程学的一般发展概况	(34)
1. 国外概况	(34)
2. 国内概况	(35)
六. 生物医学工程学的作用与意义	(35)

生物医学工程学

及其对医学发展的影响

一. 医学的过去与现在

这里并非要冗谈漫长的医学发展史，也不想纵论今日医学的全貌，而只是通过今昔之比，看看医学的现在究竟与过去有何不同，以及是什么促使医学产生了这些变化。

自从有了人类以后，人们就不断地同疾病作斗争。医学就是在人们同疾病的这种长期斗争中产生并发展起来的。我们的祖国医学已有数千年的历史。先辈们为我们积累了极为丰富的经验，成为中华民族的宝贵财富之一。西方医学的历史也有数百年之久了。有人说十六世纪是近代医学的黎明时期，（我想）这大概是指在那个时期开始了真正的解剖学和生理学的研究吧。今日的医学就是在这漫长的历史过程中走过来的。如今我们对很多问题较之过去有了更为深刻的认识。例如在十六世纪时，人们对心脏的认识还是很肤浅的，甚至有人（如法国的 Rene Descartes）曾否定英国 William Harvey 的发现，认为心脏不是通过肌肉收缩，而是通过所谓热膨胀来推动血液循环的。今天，不仅心肌收缩是心脏推动血循的动力所在这已成为一般常识，而且也知道心肌收缩是由于兴奋引起的，并进而弄清了参与兴奋——收缩偶联（即兴奋引起收缩的过程）的关键物

质是钙离子。

又如，早在1857年人们虽然已认识了人类细胞中的染色体这样一种物质，但真正对它有所了解还是一百年后的1956年。今天，大家都已清楚在正常的细胞中共有23对染色体，其中1—22对(共44个)是常染色体，另一对为性染色体，分别以X、Y代表女性和男性(最近印度有个材料说明，根据X、Y的密度不同，可以用离心法将精液里的性染色体分离出来，Y密度大在试管底部，X的密度小，浮在试管上部)。如果染色体超过了23对，譬如50~250个那可能属于癌细胞的特征了。而且几乎所有遗传性疾病，无不与染色体畸变有关。染色体中的脱氧核糖核酸(DNA)就是遗传信息的载体，叫做遗传基因，是一种双股螺旋结构的高分子化合物。人类细胞共有24,000以上的这种基因，凭借它，生物体才能将某些特有的性状遗传给子代。今天，对染色体和基因的研究已经又形成了一门新的学科即“遗传工程”。而它与生物医学工程学，实际上是两个很不相同的学科。生物遗传工程，虽也用了个“工程”的说法，但这个工程学就目前来看，更多地还是用作比喻或形容的。研究生物科学的人，多少年来只研究已有的那些生命体。如今，利用现代科学技术也可以像工程师那样创造出人世间原来没有的某些生物，因此把这一学科比喻为生物遗传工程。生物医学工程和它是不同的，生物医学工程本身是地地道道的工程学，属于现在传统的工程学领域的。

过去的医学对人体的认识还是宏观的。现代医学的研究，已从宏观进入微观世界。所谓分子生物学、细胞生物学就是目前的研究水平。过去的医学医疗手段较局限，现代医学则采用多种技术，其最典型者就是人工脏器的出现。

今日的医学之所以能在这样广的范围，这样深的程度，取得如此大的进展，原因是由于现代科学技术对医学的发展起了重大的推动作用。实际上，任何一门学科都不是孤立地发展起来的，而是在各有关学科的相互促进、相互推动、相互影响下取得的，医学也同样如此。现代医学的渊源虽然可以追溯到很远的时代，但真正成为一门以自然科学为主要基础的学科还是十九世纪中叶以来的事情。它是在十八世纪第一次工业革命促使其它学科发展的基础上，迅速成长起来的。例如，早期的医学更多的是属于经验范围内，客观地验证手段还是比较少的。

1840年左右才建立了生命物质的细胞性质的根本思想，即生命物质是由细胞组成的。

今天，谁不知道某些疾病是由细菌引起的，但这个概念却是上一世纪医学界认识上的一个大飞跃，从此细菌学成为一门独立的新学科。

1846年外科上引用了全身麻醉（乙醚和氯仿）使外科学有了新的起点。（当然祖国医学早在三国时代，华佗就已用麻沸散进行麻醉施行手术了）。

1895年伦琴发现了X射线，1898年居里夫妇发现了镭，为新型的诊断和治疗技术奠定了基础。

十九世纪的医学，确曾有过许多重大的进展。这些进展与生物、理化等基础学科的影响分不开的，直到本世纪的三十年代，医学还是在尽享十九世纪时取得的丰硕成果，加以巩固提高，并为再次地飞跃积累着经验，作着准备。

第二次世界大战以后，即四十年代末期，医学开始逐步进入新的历史阶段——所谓“现代医学”阶段，但这也是战后才开始的，这个时期的特点是，技术科学逐渐渗透到医学领域中

来，并最终成为影响医学取得进一步发展的的重要因素。设想一下，如果没有三十年代出现的电子显微镜，没有后来居上的同位素技术，没有电子技术的参与……，人们怎么能够认识心肌细胞的超微结构，又怎么能了解兴奋—收缩偶联，细胞间的兴奋传导，钙离子的转运、贮存、释放呢？没有现代技术的支持，医学又怎能研究与人的生命悠关的体内的微量元素（在体内的30余种元素中，大部分为微量元素）呢？在神经学领域里，又怎会出现“突触学”这一新的分支？

因此，归纳起来可以说，医学今昔之比其不同之处在于基础研究的深度（已达到分子生物学的水平）和临床医疗手段的广度，其所以如此，原因在于工程技术亦成为推动医学发展的一个重要因素。

二. 生物医学工程学的出现

在医学发展的历史上，过去的一些发明创造如1819年法国医生Laennec发明的听诊器等虽然至今也是医生们的必备“武器”，但这些个别的单独的改进，甚至包括后来的企业规模的研究活动，也并未足以引起医学发生根本性的变化。到了本世纪四十年代末期，以电子技术为先导的整个工程技术开始陆续涌向医学领域，尤其是电子技术的进展给医学的发展以很大的推动力，而六十年代涌现出的大量新技术，如激光、红外、超声、纤维光学、射流技术、半导体技术……以至小型电子计算机等等，又都很快地引用到医学领域中来，从而使整个医学面貌焕然一新，好象披上了时代的盛装一样就在工程技术不断地向医学领域渗透的情况下，“生物医学工程学”作为一门新

兴的边缘学科也就应运而生了。

三、生物医学工程学的定义与性质

生物医学工程学作为一门独立的学科，迄今虽已有二十多年的历史，但因其涉及的学科较多，内容颇广，所以到目前为止也还未有一个统一而明确的定义，对其解释依旧众说纷纭。不过，总的轮廓还是定下来了。

根据诸家的说法，以及我们自身的理解，可以将其做如下的定义，即生物医学工程学是综合运用现代自然科学和工程技术的相应理论和方法，从工程学的角度、深入研究人体结构、功能及其相互关系，以解决医学中出现的有关问题的一门新兴的边缘学科。所谓技术科学是指研究各门专业技术中的基本理论科学，包括工程力学、机械工程学、材料学、电工学、电子学、计算机科学、半导体科学、自动化科学、应用光学、化学工程、仪器仪表工程……等等。而生物医学工程学也是技术科学领域里的一名新兵。如上所述，它实际上是工程学向医学渗透的产物。工程学是人们认识自然、改造自然的一种手段，它所探讨的多为非生命科学领域里的问题。现在则用来认识人本身的内在规律，根据医学提出的问题，以其独有的特点予以解决之。因此，它虽属工程学，但又不同于一般的工程学，而是以工程学为主要手段，专门研究和解决医学方法学问题的一门独立的学科。它的工作者是工程师，而不是医生；但这些工程师是具有一定生物医学基础知识的工程技术人员。

四、生物医学工程学的主要内容

生物医学工程学综合运用了现代技术科学的相应理论和方法，从工程学的角度认识人体的结构与功能，所以它包罗的面很广。其内容也和其它学科一样，可分为基础和应二部分。

1. 基础研究

生物力学，以力学的观点研究人体的脏器、肌肉、骨骼、关节等的结构和功能，它要讨论的是诸如应力与作用力的关系、张力、粘力弹性特点、顺应性、收缩与松弛等等。总之是用力学的语言来研究我们人体这些结构和功能。

人体的结构那些与力学有关系呢？比如：人的骨骼系统，从力学角度看就有许多值得探讨之处，它实际上是提供了一个防护和支撑结构，以及一个附着肌肉用的框架。譬如肋骨保护着肺，锁骨为其下面的动脉、静脉和肺提供了保护作用，肩胛骨为肩部的发达的肌肉提供了宽大的附着面。脊椎骨则被誉为是“力学的奇迹”，因为它既可以弯曲，又很强有力。这一点我们从杂技表演中可以看得很为分明，屈曲时甚至可以将人体折成一个圆圈，直立时又可以经得住许多人的重压。全身206块骨中，手和脚就占去了50%以上（手27块，足26块共106块），为什么手和脚的骨头这么多，因为手和脚是人体活动最多的部位。此外象肘关节，力学工作者认为是绞链结合，髋关节是球窝接合，通过这些结合，人体可以自如地转动、伸张和弯曲。对骨骼力学的研究会有助于使我们更深入地了解某些疾病的发生。如按照Pauwels的研究，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，如负荷呈点状时，股骨头上下

的压力为 220 Kg/cm^2 ，当通过适当的内翻或外翻骨切开后，可以恢复正常，负荷力下降到 16 Kg/cm^2 ，此外，这些研究也会为人工关节和假肢的制作提供理论数据。

生物流体力学认为人体内有各种不同类型的泵系统，以完成各自不同的功能。

膀胱，它有一个主要由平滑肌组成的膀胱壁，这个壁可以适应不断增多的尿量，而又使内壁压强并不依尿量增多而变化很大。在排尿时，它又能以相当大的流量输送尿流。

但对流体力学工程师们讲，最引人的还是血液循环系统了。它是人体内最明显、最典型的水力系统 (hydraulic system)，人的心脏在工程师看来是一个有四个腔室的双重泵，其中两个作为接收器 (心房)，另两个则是供抽汲用的泵 (心室)。当然这都是工程师的语言，医师们不会把心脏讲成泵的。这个天然的泵，其性能之优可以说是现有的任何机械泵都难以匹敌的。

人体血容量大概有5升左右，心搏出量大约5升/分，也就是一分钟血液循环一遍。如果静息时心率为65次/分，则每次心跳可以搏出76.9毫升血液。心肌的每次同步收缩将血液排到动脉里去的流量是很大的，可使血流速度峰值达100-200厘米/秒，而在加速时，则可达6000~10,000厘米/秒/秒。人体心脏还是一部自身带有从化学贮存产生能量的动力发生装置。每天要跳10余万次，其任何间歇时间都不得超过一二秒钟，非常的科学。不仅如此，在外界条件变化很大的情况下，比如：外界环境的变化，人体从平原到高山；从高温高到低温低的地方等。还有身体本身的变化机体从消瘦到肥胖（当然过于肥胖是不行的），以及运动量的加大，所有这些，它仍可安然地工

作。对多数人来讲，这种情况将保持整个一生（如果他不是因心脏病而死亡的话），而对个别的长寿者竟可保持一百多年！

生物材料学研究各种医用、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理化特性。对植入人体内的材料，要求是十分严格的，在化学性能方面应呈惰性，在长期与血液或其它体液接触时，非但本身不可变性，而且也不能产生凝血或溶血作用，对身体应无毒性，不致癌，不引起过敏反应或干扰机体的免疫机制等。目前植入体内的材料有金属材料（如不锈钢，钛，钴合金等），这些金属材料可用于人工关节、心脏起搏器的外壳；陶瓷材料如羟基磷灰石（ $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}$ ）是可以制成人工骨的无机化合物材料，也有用 Al_2O_3 陶瓷内包不锈钢来作人工骨骼，还有一种由磷酸钙等制成的蜂窝状陶瓷材料，在植入到骨海绵质后，可很快地被骨浸润并逐渐被吸收，不会引起全身反应。国内上海市第一人民医院1977年9月曾用陶瓷人工全髋关节为三例患者作了手术。

在生物材料学中，医用高分子化合物的研究是主要内容之一。可分为生物的和人工合成的两大类。猪瓣膜就是生物高分子材料。合成高分子材料，包括塑料、合成纤维和合成橡胶。塑料中常用的有聚乙烯、聚氯乙烯、聚甲基丙烯酸酯（有机玻璃）、聚四氟乙烯（Teflon）、聚氨酯等。合成纤维则有尼龙、涤纶、腈纶等。合成橡胶常用的有硅橡胶（silicon）和聚氨酯橡胶。这些都属于医用高分子材料。

五十年代为医用高分子材料的发展时期，多研究体外用的制品如硅橡胶导管、聚氯乙烯输血袋、装有孕甾酮的硅橡胶避孕环（在硅橡胶里面包埋了孕甾酮，可供一年），药物微胶囊等。

六十年代开始体内用材料和制品的研究，主要是人工器官、人工血管、涤纶纤维编织成的血管（治疗主动脉瘤或主动脉狭窄切除，上下腔静脉切除更换术）、人工肾、人工肺、……。医用高分子材料的发展，为医药科学研究和临床医疗提供了新的手段，大大促进有关学科的发展。人工脏器的出现和应用，救治了数十万人的生命。在材料学上要研究①生物相容性材料，如硅橡胶、亲水凝胶、聚氨酯等；②生物活性材料，如固相酶，在薄膜上培育活细胞；③口腔材料。

此外，也有用一些天然材料的如珊瑚，美国用一种“热水化学交换法”将珊瑚中的碳酸钙转化成为天然骨中的磷酸钙结晶，仍有蜂窝组织，移植后，小孔可被天然骨的生长所渗入从而使之更加坚固，用此材料可制成固定患骨的栓钉等，也可制成不同的骨骼或牙齿，现已试用于临床。

用于人工心脏的材料，在物理性能方面，要有足够的柔韧性，要耐疲劳，心脏每天跳动十余万次，换一个人工心脏应该至少可用十年，在十年中人工心脏的房室间隔须经得起近4亿次的屈曲而不会损坏（现在研制的材料已达到屈曲9000万次，距4亿次还有一定的距离）。

物质传递 研究各种质在体内传递的机理和过程，如气体、液体在体内的扩散、渗透规律等。

人的呼吸过程就是物质传递过程，血液（90%为水）循环到肺部将二氧化碳（气体）排到体外，又呼吸进新鲜氧气，并把它带到全身。肺部和呼吸道有所谓“死腔”区（dead space）。此区大约有150毫升的容量，但氧到二氧化碳的转换并不发生在这里，发生气体转换的主要在肺泡。这是些很小很小的囊，直径约100微米（0.1mm），有二亿五千万个左右，在肺泡的

气相和毛细血管的血液之间还隔着许多层。首先是肺泡膜，它有三个层：一个单分子层，是表面活性剂(磷脂)，它可以缩小沿着肺泡壁的表面张力；一个薄薄的流体层和一个上皮细胞层。毛细血管壁有二层：一个基底膜和一个内皮细胞层。在肺泡与毛细血管之间是充满间质液的插入空间(interstitial space)。所有这些将空气与血浆隔开的各层，统称为呼吸膜。令人吃惊的是，它的总厚度仅约0.1—1.0微米(随部位不同而薄厚不等)。一个中常的成年男子，其呼吸膜的全部表面面积为70平方米。而在任何情况下，肺部毛细血管内的血容量不会超过70—100毫升。肺毛细血管直径平均约为7微米，红细胞直径约8.4微米，这里，虽然红细胞的可变形性是关键，但实际上它也是被用力挤过去的。这样，血氧交换的大量集中，扩散的距离短和膜的表面面积大，结合在一起就使肺部成为特别经济有效的质传递装置。

在静息的情况下，每次呼吸肺部一般吸进和呼出500毫升的空气。在每次呼吸周期之间，全部气容量在2300~2800毫升之间。通常每分钟呼吸12次，因此每分钟的呼吸容量为 $500\text{ml} \times 12/\text{min} = 6000\text{ml}/\text{min}$ 。由于每次呼吸有150毫升是在上部胸腔区域出出进进，并未进行氧气到二氧化碳气之间的转换，所以肺泡的换气率为 $4200\text{ml}/\text{min}$ ，这就是进行(使)氧气到二氧化碳气转换的那部分气体。

为了在手术时进行血液体外循环，人们也制作了不少人工肺装置，有转碟式、鼓泡式、膜式等。转碟式和鼓泡式人工肺(又称氧合器)都有其不足之处。由于血液与气体是直接接触的，所以在使用六小时以上时，血液就要受到相当严重的损害，其最大危害是出血，所以在作体外循环时，抗血凝用的肝素必须保

持在最低限度上。国外采用滤血器，以滤除红细胞碎片及其它微凝块，防止对肺、肾等器官造成损害。我国天津已研制出鼓泡式人工肺，换气率1000毫升/分或2000毫升/分。膜式氧合器使血液受到的损害很轻微，因为氧气并不与血液直接接触，而是通过一层硅橡胶膜进行，以模拟天然膜的扩散作用。

除呼吸外，消化和排泄也是质另传递的研究范围。

生物能另传递 研究能另在体内的传递机理和过程，能另包括声、光、电、磁、热以至射线等。比如热就是一种能另，生物能另传递则要研究它在体内是如何产生的、如何传递，又如何从人体散失的。

普通人的基础代谢率(BMR)大约为72千卡/小时(kcal/hr)，它与年龄、性别有关，一般说刚刚出生时，基础代谢率最高(可达52—53 kcal/m².hr)，以后随着年龄的增加而下降，但20岁以前下降得最快，以后则逐渐缓慢下降(Guyton 1971)，有人(Guyton)认为，体内产生热另最多的是肝脏(约占20%)，其次是脑(15%)、心脏(12%)，其余的热另则分散于其它部位。也有人(Wissler)认为，60%的热在躯干(主要是肝和心)，脑占20%，四肢占20%。总之，凡是以机械性或化学性活动最多的脏器(如肝、心、脑)，其产生的热另也最多。一般身体体核要比四肢和体表热得多。正常的肌肉活动能使BMR提高125%左右，而在最大活动度时可达基础代谢率的1500—2000%。

人体几乎利用了所有的食物，其中包括将它形成一种叫做三磷酸腺苷的化合物(ATP)，作为身体的总能源，ATP要为所有必需的功能，如为合成化学物质，为心肌收缩、神经

冲动提供动力等。

热能的传递有二方面，一个是在体内的传递，一个是向外界环境的散失。身体的所有组织导热性都差，肌肉与脂肪导热性与软木塞不相上下。所以如果体内的热传递主要靠传导的话，那就需要有很大的温度梯度，其适应不断变化的环境条件的能力也必然要小的可怜了。因此，体内的热传递不是靠传导，而是靠血流。血液循环通过三个主要途径调节体内的热：

(1) 它使体内的温差达到最小程度，代谢率高的组织如肝脏，给其灌注得较多，这样就可以使其温度与活性少的组织的温度相差不多。通过来自活性多的器官的血液温暖了温度较低的组织。由于血液在体内平均每分钟循环一周，因此热的传递是很快的。

(2) 它控制了皮肤区域的有效绝热性，当身体不需要热时，就通过血管扩张增加通向皮肤邻近部位的温热血流。当需要贮存身体的热量时，通过血管收缩血液就在较深的通道从动脉流向静脉。这种自动机制既未升高，也未降低通过皮下层的传导时的热传递温度梯度。

(3) 在主要的动静脉之间经常进行逆流热交换(Counter-current heat exchange)。

倘若需要保存热量时，沿着四肢流动的动脉血通过向邻近的静脉血流散热的方式预冷。这样就可以降低了肢体的温度，从而减少了热的散失。这是人体通过血管扩张—血管收缩机制进行的体内温度的自动调节。人体为了保持自己体内温度的平衡，还要向外界环境散热，人体产生的热必须通过向外界环境散热来保持平衡。在正常情况下热散失是按比例进行的：辐射60%，蒸发25%，对流12%，传导3%。所以我们的人体主要是靠辐射向环境散热以调节体温的。

能量还包括声、光、电、磁、射线等。有些是体内的电能、磁能的传递，可能经络现象与此极为相关；也有些是从体外来的能量如超声、激光、X射线等进入人体后的传递情况。

比如苏修有人研究光作用于眼睛的视网膜上时，有一种蛋白质叫视紫质可将光能变为电能，从而在大脑皮层显现，实际上是起着光电转换器的作用。如果把这种蛋白质的结构和作用机理搞清的话，对阐明视力的机制及治疗与失明有关的复杂疾病都很重要。当然，也可以由此出现一些新的技术和装置。

电能的传递在体内很重要。电是“生命的火花”当体内的电现象消失时，人的生命也就终结了。人体的电属于生物电如心电图、脑电、肌电、视网膜电……它们都很微弱，心电图为毫伏级，脑电为微伏级，但都很重要，那怕微小的改变，都可能给人带来不堪设想的后果。

磁，有电就有磁，如心磁场、脑磁场。外界磁场的变化也会使人体受到影响，磁疗就是以此为依据的。1973年日本曾有人（砺崎）认为针麻的作用可能在于电磁场，为此，他在一难产产妇的双手和双脚，相隔10厘米处分别置一长10厘米、宽15厘米的铝箔片，並通以300伏的直流电，从而形成一电磁场。25分钟后施行了剖腹产，手术进行了40分钟，据说母女安然无恙（小孩体重3400克）。当然针麻的原理国内外都还在继续进行深入的探讨中。又如太阳的活动可引起地磁场的变化，人生活在这个环境中会诱发脑电活动增多。因此，有人（印度 Venkata Raman）注意到当发生日晕和地磁扰乱时，癫痫患者易发作。他在观察到的147例中，32例发生在当时，24例发生在日晕后，11例发在日晕前。

人们利用各种能量在体内传播的规律，研制出了许多新型的诊

断与治疗仪器，如超声波、微波……。微波的波长为厘米级，在电磁波谱内仅短于无线电波。在人体内传播时，可穿透软组织和空气，这是有别于超声波的地方（超声波不能穿过气体）。这个特点对研究肺的病理过程有很大的便利。组织的形状和其电容率可以影响微波能量的传递。电容率是衡量微波电场和组织电荷之间相互作用强度的一个尺度。就是这种相互作用引起微波的反射，从而改变了它的传递。除组织形状外，不同组织的密度和液体的含量等也会使微波的传递和反射发生改变。由于所有影响肺部的病理异常都能引起肺液的变化，因而可望用微波检查及诊断肺水肿。美国犹他大学生物工程系研制成一种手提式仪器。频率 300 ~ 950 MHz，实际上多用 915 MHz，入射能量密度 $< 10 \mu W/cm^2$ ，（比安全标准还低 1000 多倍）。动物实验证明，微波反射的改变与产生肺水肿的肺生理指征之间有良好的相关性。特别是微波信号的幅度改变直接与左心房压力曲线的增高相对应，且早在 X 线胸片和听诊发现的异常之前，微波检查即已出现改变。

生物信息和生物控制 生物信息是指生物体内随时间或空间而变化的某些参数，如压力、温度、电压、电流、流量、浓度、PH 值等。这里是研究人体信息的发生、提取、分析和处理的。信息可以用各种不同的能量作为载体，生物电就是以电能为载体的。也是最重要的生物信息之一。医学上有许多新的诊断技术是由于对生物电信息的发生机理及其提取、分析、处理等技术的研究而产生的。比如心脏在收缩和舒张过程中，就产生有一定节奏、方向、强度的心脏电流，是有一定规律的。但如发生病变，其所产生的生物电的规律性也就遭到破坏，从而有了变化。根据这些变化，人们就可以作出相应的诊