

除颤电脉冲的波形和参数

(除颤器应用中的若干问题)

物理教研室

华蕴博

心肌细胞直接由电活动传递信息,使心肌细胞有序地、协同地收缩,因此电信号既是一部分心肌细胞兴奋的结果,又成为邻近心肌细胞兴奋的动因。室颤和心率失常是细胞电信息传导障碍或差错的结果。电除颤和电复律是用外部电刺激来阻断异常信息,迫使心肌细胞重新同步。电刺激可以治疗室颤,也可以引起室颤,关键在于取用电刺激的质和量,以及外部电刺激与心电活动之间的位相配合。本文拟对各种除颤器中电脉冲的特点以及它对心肌的影响进行讨论。除颤和复律意义上有所区别:除颤是针对室颤而言的,复律则对室颤以外心率失常而言,但在作用机制以及对电脉冲的要求来说,基本上是一致的。除颤和复律的机器结构上也属同一类型。

一、除颤脉冲的参数

正常心肌细胞电脉冲在100毫伏数量级。电除颤、电复律的脉冲电压峰值高达几百伏至上千伏,目的在于迫使绝大多数肌纤维同时进入不应期。因为房颤和室颤的原因正是心肌纤维兴奋不一致、收缩不同步,除颤脉冲使这些失却同步的心肌纤维在同一时刻进入除极状态。

除颤电脉冲有两类,一类用交流电,另一类用直流电。早期除颤器大多用交流电,因为电路简单、使用方便。以后发现有心肌梗死时,用交流电除颤往往无效,而对其他心律失常只有直流脉冲才能奏效。现在作为商品供应的除颤/复律机基本上都属于电容放电式,产生直流电脉冲。

电脉冲的主要参数有:最大电压(V_{max}),最大电流(I_{max})、平均功率(P_{mean})、积分能量(E_a)。实验证明,电压和电流两参数之间起决定作用的因素是电流。要使绝大部分心肌纤维同时除极,电流强度约需1安(有效值)。兴奋性是刺激强度和作用时间之积的函数,电脉冲必需有一定持续时间(t)。早期生产的交流除颤器中,交流电的持续时间长达200毫秒,除颤电压高达100伏,相应功率100瓦,输出能量为 $100 \times \frac{1}{10} = 20(\text{瓦} \cdot \text{秒})$ 。

直流除颤的电脉冲波形迥然不同,持续时间仅3~4毫秒,而所需功率高达5,000瓦,按输出能量计,不过20(瓦·秒)左右,由此可见除颤复律电脉冲最重要的综合性参数是输出能量(瓦·秒)。除颤脉冲的输出能量决定于除颤机中储能电容上的充电电压(V),因为能量 E 为

183, 1975

7.叶国钦等:微波低强度辐射对视网膜电位的影响,生理学报 32(4): 370, 1980

8. A W Guy: Miniature anechoic chamber for chronic exposure of small animals to plane-wave microwave fields, J Microwave Pow 14(4): 327, 1979

9. D I McRee, et al: Long-Term 2450 MHz CW microwave irradiation of rabbits: Evaluation of hematological and immunological effects, J Microwave Pow 15(1): 45, 1980

10. 叶国钦等:微波急性效应的实验研究,生理学报 32(1): 10, 1980

$$E = \frac{1}{2} C V^2$$

通过心肌的放电电流为 i ，放出的能量

E 为：

$$E = \int_0^t i^2 R dt = \int_0^t \frac{v_R^2}{R} dt$$

一般假定心肌等效阻抗为 50 欧姆。 t 为脉冲持续时间。为了估计电脉冲的输出能量，可把输出脉冲拍成照片，分成 10 个 Δt ，

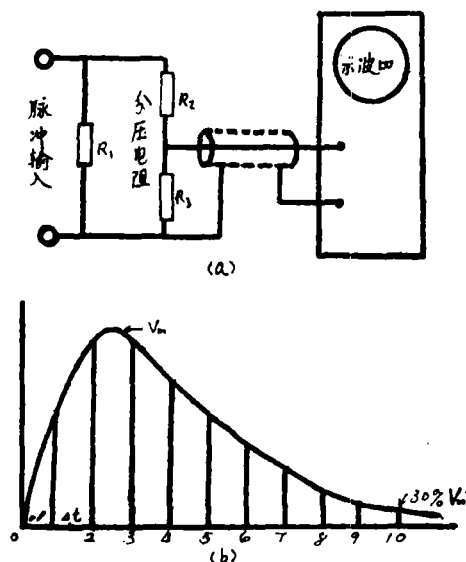


图1. 脉冲波形的能量估算

(a) 波形测量装置 (b) 用近似积分法估算脉冲能量 E

分别测出相应 Δt 时的 v_R 值，按下式直接累加，算出 E 。

$$E = \int_0^t \frac{(v_R)^2}{50} dt = \frac{1}{50} \sum_{n=1}^{10} (v_R)_n^2 \times \Delta t$$

除颤脉冲的 5 个参数：电压 (V)、电流 (I)、功率 (P)、能量 (E)、时间 (t) 中，反映效应的参数是能量 E ，而 E 是 I 和 t 的函数， I 又是 V 和 R 的函数，假设 R 为常数， E 最终要由 V 和 t 来决定。又因为放电曲线呈指数规律，持续时间 t 由 R 和 C 规定，所以按除颤要求选定 E 值后，必需选用电压 V 或电容量 C 来满足。如增大 C 值可以减少 V ，减少 C 值，则要提高 V 值。但是心肌所能耐受的最高电压和脉冲允许的延续时间都不是任意的， t 的延续时间一般为 3~8 毫秒，最高电压不超过 1,600 伏，这时的平均电流约为 1~2 安。在一般除颤器中， C 值是不能改变的，这就使得输出能量的大小，唯一地依靠改变电压 V 来调节。

二、除颤脉冲的波形

就是在 t 时间内能量的分配问题。目前应用的除颤器中主要有 4 种波形 (图 2)。

1. 纯电容放电波形 这种波形的特点是

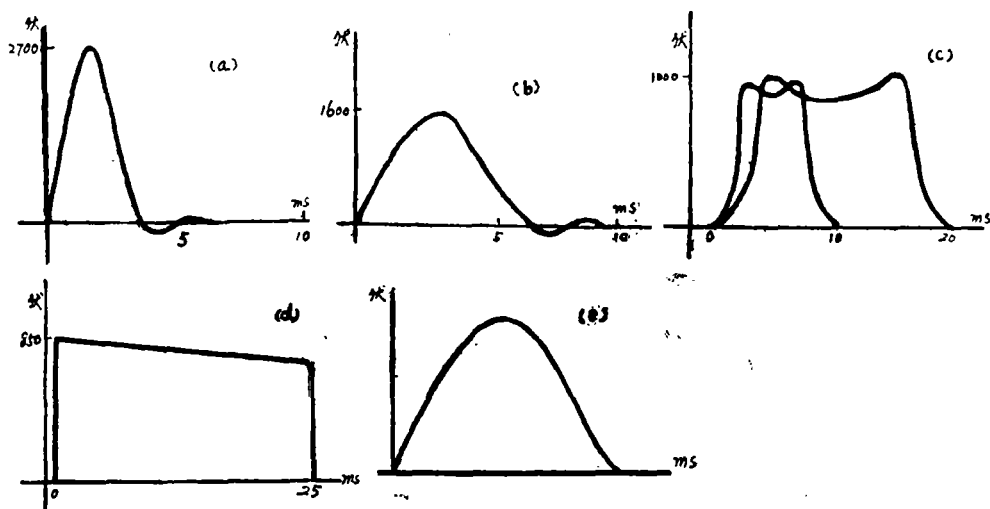


图2 除颤脉冲的波形

(a) 电容器放电波形 (b) 电容电感放电波形 (Lown 氏波形) (c) 延迟线单脉冲波形 (Balagot 氏波形) (d) 梯形波 (e) 半个正弦波形 (理想波形)

上升沿极陡,下降沿随放电电路的时间常数、即R和C的乘积值、按指数规律衰减(图2a)。

2.电感电容(LC)放电波形 也叫Lown氏波形。在电容放电回路中,串联一个100毫亨的电感L,目的使上升沿陡度变缓。实验证明这种波形可以酌减除颤能量,允许用较低的峰值电压,所以对心肌的损害小,安全性较大,电感L的值应和C值匹配,使放电波形呈临界阻尼或略呈欠阻尼,欠阻尼波形略有负冲。有人认为欠阻尼会改善性能,但亦有人认为可能诱发纤颤(图2b)。

3.延迟线单脉冲波形 也叫Balagot氏波形。放电电路中再串一个延迟线脉冲形成器,或串二节LC串网络。其特性阻抗为

$$R_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}, \text{波形延续时间比较长。这种波}$$

形的最大优点在于能调节L和C使 R_0 等于电极间组织阻抗R,这时能量传输效率最高,克服了一般除颤器中t无法改变的缺点,在t时间内能量分配更加合理,除颤电流能在较长时间里保持在阈值之上。这里所指阈值是指除颤电流的最低值,低于它会产生纤颤,高于它则能除颤(图2c)。

4.截顶指数波 也叫梯形波。产生这种波要用很大的电容量的电容,使时间常数很长。利用开关在一段时间t内,截取出一段波形,这种波形的特点能在V不变情况下,调节t来满足输出能量E。它的优点是在同一需求能量E下,因延续时间长,允许电压幅度低,对心肌损伤更少,有可取之处(图2d)。实验研究认为理想的波形是半个正弦波,而截顶波的上升沿和下降沿都太陡,是它不足之处(图2e)。

上述4种波形文献评述各有优缺点,Balagot氏波可能最佳,但调节不便。目前多数除颤器还是用Lown氏波。除颤脉冲波形和电生理学效应的研究仍是提高除颤和复律效果的一个课题。

三、同步问题

电脉冲对心肌的效应不仅取决于电脉冲的参数,且和电脉冲落在心动周期的那一时刻有关(图3),如电脉冲落在T波顶点稍前

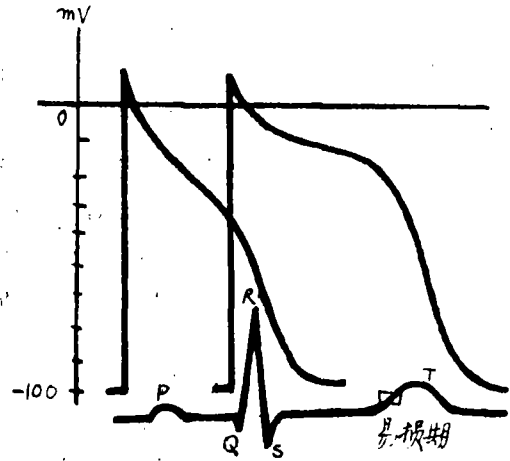


图3 心房心室的除极波和心电图

的时相上,由于心肌纤维的兴奋性恢复程度不一致,容易引起纤颤,这一时期叫做易损期(Vulnerable period),对除颤脉冲来说是应当回避的(图4)⁽²⁾。电复律时所谓

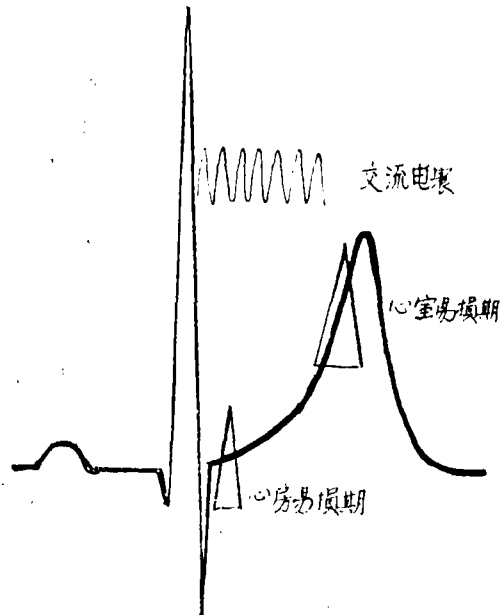


图4 心房和心室的易损期

同步,就是让除颤脉冲与心电图R波之间建立时间联系,以一定的延迟避开易损期。交流除颤脉冲,持续时间较长,落入易损期的

概率较大。直流除颤脉冲持续时间短暂（相对于心动周期），所以比较安全。但室颤时已不存在明确的R波，同步已失去意义。所以同步对复律有意义，除颤时同步电路可以撤出。临床调查发现，不用同步而导致意外的概率为2%。不少学者认为，如把能量加大1倍，不用同步关系也不大。

四、心肌功能状态和电脉冲参数的选择

电除颤、电复律的成功概率达90%，药物复律无效、改用电复律效果也有86%，但成功概率和剂量（能量）的大小依赖于心肌的功能状态。输出能量多少为最合适？因目前并没有简捷地判断心肌功能的工具，还只能用逼近法逐渐递增剂量。体内除颤成人初剂量为20~40（瓦·秒），如初剂量无效，则每次递增20（瓦·秒），最大剂量勿超出100（瓦·秒）。体外除颤初剂量就可以用400（瓦·秒）。对慢性心律失常复律剂量一般不希望超过300（瓦·秒）。但急性心律失常伴有严重血流动力学障

碍时，应当用最大剂量400（瓦·秒）。

总的来说，用电脉冲来除颤和复律是比较安全的，但有一定比例的并发症，如血清转氨酶升高（10%），低血压症（3%），心电图提示心肌损伤（3%），肺栓塞（1.4%）等。并发症的出现率和能量、电压峰值密切相关。能量为150（瓦·秒）时约6%、400（瓦·秒）时约30%。电压峰值为1,600伏时，心肌有中度损害，2,000伏时会有重度损害。

所以，不论除颤或复律，要取得良好效果，则：1.要有产生理想电脉冲波形的机器。2.要根据对象情况选取合适的参数。

参 考 文 献

1. Spooner B R: Hospital Instrumentation Care and Servicing for Critical Care Units, 143, Pittsburg, USA, 1977
2. Resnekov L: Theory and practice of electroversion of cardiac arrhythmias, Med Clin North Amer 60: 325, 1976
3. Frank Biloon: Medical Equipment Service Manual, 171, Prentice-Hall Inc 1978

（紧接第136页）时即摄片，宫腔充盈时再摄片1张；若造影剂注入宫腔较迅速，宫腔已充盈，也可先摄宫腔充盈片，然后拔除Rubin头，使部分造影剂外流，此时再摄1张半充盈像，两片对照观察，可防止遗漏病灶或与假性缺损相鉴别。

三、若能作水平位投照拍摄侧位像，则对子宫前后壁病灶的观察和子宫位置与形态的确定更有帮助。部分病例可联合作子宫输卵管碘油造影术与盆腔充气造影术，因宫腔造影只能显示宫腔内膜面的病灶，而对子宫肌层深处或向浆膜面突出的病灶无法了解。本文44例中有3例宫腔造影无明显异常，但手术后病检均见转移结节位于肌层向浆膜面突出，如能配合盆腔充气造影，观察子宫外形轮廓及大小改变，对诊断更有帮助。

此外，对需保留子宫者，观察输卵管是否通畅也属重要，若见输卵管闭塞或部分通畅者，则需加强抗炎治疗。

四、宫腔造影一般均采用40%碘化油，

因具有价廉、对比度清晰、有一定粘稠度、不易溢出，使摄片时间比较从容等优点，但对子宫内膜创面较大，有血行逆流可能的病例，一般采用水溶性有机碘化合物造影剂（如胆影葡胺）较为安全。

五、应用子宫造影片除可确定子宫内有无转移灶、对比观察化疗效果、病灶有否消除和决定子宫去留外，它对病灶定位也有很大参考价值。本文中有2例未生育的年轻恶性葡萄胎患者，根据子宫造影发现，进行了保守性手术——子宫内病灶挖出术，保留子宫获得成功。（图1~7见插页10,11）

参 考 文 献

1. 杨柯，戚延龄：临床妇产科子宫输卵管造影术，P.1 天津人民出版社，天津，1974
2. Liukko P, et al: Methods for evaluating the intrauterine location carcinoma, Acta Obstet Gynecol Scand 58(3): 275, 1979
3. 宋鸿剑，吴葆桢：应用6-巯基嘌呤治疗恶性葡萄胎保留生育机能，中华妇产科杂志10(4): 276, 1984
4. 东条伸平：绒毛上皮肿について，临妇产 18(12): 946, 1984
5. 石塚直隆，可世木成明：绒毛性肿瘤的化学疗法における进步，日本临床 27(6): 56, 1989