

館內閱讀

170015



脉冲技术

苏联 Я. С. 伊茨霍基著

吴佑寿 陈兆龙译

人民邮电出版社

脈 冲 技 術

苏联 Я. С. 伊茨霍基 著

吳佑寿 陈兆龙 譯

人 民 郵 電 出 版 社

Я. С. ИЦХОКИ
ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА
ИЗДАТЕЛЬСТВО "СОВЕТСКОЕ РАДИО" 1949

內 容 提 要

本书首先敘述分析脈冲的一般方法，然后分章敘述脈冲的变换和发生，介绍高频振荡的脈冲調制和各种脈冲調制器。

脈 冲 技 术

著 者：苏联 Я. С. 伊茨霍基
譯 者：吳佑寿 陈兆龍
出版者：人民邮电出版社

北京东四區6條胡同13號
(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇四八號)

印刷者：邮电部器材供应管理局南京印刷厂
南京太平路戶部街15號

發行者：新華書店

開本：850×1168 1/32

印張：9³⁰/₃₂ 頁數 159

印刷字數：249,000 字

印數：1—2,500 冊

1958年4月南京第一版

1958年4月南京第一次印刷

統一書號：15045·總723·无178

定價：(10)1.83元

作 者 的 話

近年来，采用脉冲方法来工作的无线电设备（即属于所謂“脉冲”技术領域內的设备）已經具有相当广闊的規模。直到目前，我們的无线电技术人員的教育系統，对于脉冲技术的研究，却还缺乏有计划的安排。但是，就在同一期間內，实际工作却迫使我們的技术人員碰到越来越多的采用脉冲方法的设备。这种情况显然可以用来解釋为什么許多无线电技术人員对作者在全苏动力函授学院工程师进修班中所讲授的脉冲技术課程会发生那么大的兴趣。

作者在1947至1948年授課的讲义就是这本参考书的基础。因为現在脉冲技术的范围非常广泛，所以这本参考书并不包含脉冲技术的所有問題。对于現在已經具有广泛用途的脉冲装置中的各种元件，作者也不准备在本书中作普遍的介紹，因为这种普遍的介紹在現有的技术文献中已經相当多了。但是，作者根据自己的教学經驗，认为百科全书式的文献，已經不能够滿足工程师的需要。因此，作者认为更重要的是闡明脉冲技术中最具有典型意义的过程的分析方法，以及分析脉冲设备的某些元件的工作原理。

本书主要是討論有关脉冲过程的分析，以及高频振荡器脉冲調制时所用脉冲的形成、产生和变换等問題。这里，很自然的，作者将更多地介紹有关他自己所研究的那些問題，例如形成电路，阻塞振荡器、脉冲变压器、脉冲調制器等。

作者认为，一个工程师，如果他对于某些脉冲设备的典型例子的工作特点具有深刻的了解，那么，他就能夠独立地解决脉冲技术的其他問題，能够了解其他脉冲设备的作用原理和分析方法。很多这样的设备現在已經被应用了；但是，毫无疑义，随着脉冲技术的

迅速发展，将会有更多的設備出現。

这本书的方向在教學法上究竟是否正确，还有待讀者們的实践来証明，如果讀者能提出批評性的意見，作者将深表感謝。这些意見，毫无疑問地会使这本书更趋于完善。作者更希望这本书对无綫电工程师能够有所帮助，使他們对于脈冲装置的特点能够有較深入的了解。

作者对H.H.基里尔采夫，特別是B.B.米古林和T.P.布拉赫曼表示衷心的感謝，他們担負了校閱本书原稿的工作，并提出了很多寶貴的意見，这些意見，作者在原稿付印之前都已采用了。作者还应该感謝Г.С.格拉德科夫，在整理这本书的原稿和画图上；他曾給作者以很大的帮助。

作 者

序 言

1895年5月7日，我們偉大的同胞A.C.波波夫發明了無線電。從這個時候開始，無線電技術就成為一門獨立的學科。無線電技術發展的特点是：在它的整個發展過程中都是以急劇的、直線性上升的速度發展着。雖然總的說來，無線電技術發展的速度很高，但是它的過程，也可以分為幾個階段，在這些階段中無線電技術發生了革命，並且從原則上確定了新的應用領域。電子管和高頻電子管的出現是最重大的事件，它們改變了無線電技術的面貌。短波技術的發展具有很大的意義，它使無線電信號能夠在整個地球上傳播。厘米波技術是一個決定性的進步，它使得在空中輻射的無線電波可以象光線那樣集中為紆細的波束，這就為無線電技術的新領域——無線電測位的發展開闢了燦爛的遠景。不能不注意到，上面所談到的無線電技術的成就在很大的程度上應該歸功於許多蘇聯學者、A.C.波波夫的天才的繼承者——M.B.舒列金，M.A.蓬奇—布魯耶維奇和A.A.羅然斯基等人的傑出的貢獻。

也許，在無線電技術中應用脈沖工作的方法是革命因素之一，利用這種方法可以從根本上解決一系列的最重要的問題。

在脈沖工作方法中，非常窄的（以百萬分之一秒，即微秒計）電磁能量的脈沖以比較長的休止時間相互交替地發生着。任何一種脈沖發生器的主要工作原理是：

在相當長的時間間隔 T_s 之內，發生器儲存能量，然後在產生脈沖的很短的時間 t_n 內，迅速地將儲存的能量釋放出來。

脈沖發生器在某些方面和機械打樁機很相象，當打樁機上升的時候，它慢慢地儲存着能量，當下降時就迅速地將能量放出來。利用這樣的工作原理可以得到很大的時間變換 $T_s/t_n \gg 1$ ，和相應的功率變換 $P_n/P_s \gg 1$ ，這裡 P_n 是脈沖功率， P_s 是儲存功率。這樣就可以

采用功率不太大($P_0 \cong P_3$)的能量供給电源。在理想情况下, 假设没有损耗, 那么由能量平衡条件, 可以得到下面的关系

$$P_0 \cong P_3 = \frac{P_n t_n}{T_3} \ll P_n。$$

当然, 实际上, 上面所讲的变换是有损耗的, 所以,

$$P_n = \eta P_3 \frac{T_3}{t_n},$$

这里 η 是产生脉冲的效率, 因为 $\eta T_3/t_n \gg 1$, 所以 $P_n \gg P_3$ 。

这样, 用脉冲方法可以得到功率很大的脉冲, 它比原来的电源功率要大几百至几千倍。当然, 要想得到所需的某一种形式的能量 (例如高频振荡能量), 就必须掌握从振荡设备 (电子管振荡器、磁控管等) 中, 在指定的波段内取出较大功率的技术。利用任何类型的电子器件所能产生的脉冲功率, 在相当大的程度上决定于脉冲功率的平均值。当电子器件的发热情况主要不决定于大功率阴极的热辐射、而是决定于电流在电极上的消耗时, 上述的结论就愈正确。近来, 由于电真空工业在制造高效率的电子器件 (电子管、磁控管和速调管) 方面获得了巨大的成就, 上述的电子管发热关系实际上差不多可以做到。这些成就使得具有氧化物阴极的电子器件, 在脉冲情况下, 即使工作电压比“额定”的数值 (即连续工作时允许的数值) 大几十倍, 仍然能够长时间地工作。因此, 用体积相当小的振荡设备, 在工作脉冲作用的短暂的时间内, 可以得到很大的发射电流。上面已经指出, 振荡设备所产生的脉冲功率的数值差不多等于极限值 (这个极限值决定于最大允许的平均振荡功率)。平均功率是

$$P_{cp} = P_n \frac{t_n}{T_n} = \frac{P_n}{Q}。$$

这里 $F_n = \frac{1}{T_n}$ 是脉冲重复频率, $Q = \frac{T_n}{t_n}$ 是所谓脉冲间隔度。显然当脉冲间隔度很高时, 脉冲功率 $P_n = Q P_{cp} \gg P_{cp}$, 这样就可以使能量在时间上高度地集中起来。

脈冲工作方法的意義，絕不只限于產生大的功率。它使得很多重要的問題可以從**原則上**加以解決，例如測量不可到達的和光學上不可見的目標的距離（用脈冲方法測量距離），這樣在很大程度上就確定了無線電測位的順利的發展。掌握非常窄的脈冲的產生和放大的技術，為無線電測位的進一步發展打開了燦爛的遠景。所用脈冲的持續時間愈短，無線電測位中的所謂**分辨能力**也愈高，在“電視”中看到更“微小”的細節的可能性也愈大。

在電視、脈冲無線電通信、無線電遙測、無線電遙控等技術領域中，以及在研究一些物理問題上，脈冲工作方法的應用同樣地也具有重要的意義。

Л. Н. 曼傑爾什達姆、Н. А. 巴巴列克西和他們的學生的經典著作，特別是А. А. 安德羅諾夫和С. Э. 哈伊金的巨著“振盪理論”，以及Б. А. 符維堅斯基、Ю. Б. 柯布扎廖夫、С. Н. 葉夫強諾夫、В. Н. 西福羅夫、Н. Н. 克雷洛夫、Н. М. 伊久莫夫、И. А. 希爾曼及其他等人的著作，奠定了脈冲工作方法的理論基礎。Л. А. 梅耶羅維奇、В. В. 米古林、С. А. 德羅包夫、Н. А. 熱列茲諾夫、В. В. 維特凱維奇、Ф. В. 魯金、А. А. 拉斯普列琴及其他等人對脈冲設備元件的理論研究和計算方法都有着很重要的貢獻。

各式各樣的應用使採用脈冲工作的方法迅速發展起來。這種發展是如此迅速，因而現在我們可以說脈冲技術是一門嶄新的技術領域，而且研究和試驗脈冲過程的方法和“連續”工作的設備中所用的方法是不同的。在後一種設備中，我們所感興趣的是**穩定狀態**。而在脈冲工作方法中所發生的過程則是**瞬變過程**。這種過程的研究表明：無論在它的理論分析方面或是實驗研究方面，都是更為複雜的，產生及變換各種形式的窄脈冲的方法的特點也就具有重要的意義。由於所有這些情況，把有關窄脈冲的形成以及這種脈冲在某種電路中的作用等作為一個獨立的綜合性的問題來研究（這些問題從前幾乎完全沒有研究過）是完全合適的。

這本書就是專門研究這些問題的。

目 錄

作者的話 序 言

第一章 脉冲电动势在直綫性系統上的作用

1. 脉冲电压和电流, 以及它們在电路中所引起的过程的性質 (1)
2. 脉冲过程的数学分析法 (11)
3. 分析瞬变过程的运算法 (15)
4. 杜阿美尔积分 (21)
5. 等次切綫图解法 (25)
6. 高频振盪包綫的迭加公式 (28)
7. 脉冲过程的頻譜成分 (34)
8. 几种脉冲电动势的頻譜 (39)
 - a) 矩形脉冲 i) 三角形和梯形脉冲
 - b) 单位脉冲 d) 鉤形脉冲
 - e) 指数脉冲 e) 視頻脉冲頻譜和射頻脉冲頻譜的关系
9. 直綫性电路的頻譜分析法 (50)
10. 脉冲通过直綫性电路时不产生波形畸变的条件 (55)

第二章 利用直綫性电路变换脉冲

11. 脉冲变压器 (68)
 - a) 引言 d) 渦流对鉄心工作的影响
 - b) 变压器电路的等效綫路 e) 脉冲变压器的計算
 - e) 被变换脉冲的前沿的畸变 ж) 脉冲变压器的結構
 - i) 脉冲变压器鉄心的磁化
12. 微分电路 (縮短电路) (104)
13. 积分电路 (延長电路) (112)

第三章 脉冲的形成(产生)

14. 具有均匀分布参量的長綫的形成特性 (117)

- a) 長綫上的瞬变过程 e) 双長綫
- б) 一段長綫的形成特性
- 15. 形成脈冲用的仿真綫 (126)
 - a) 网目式仿真綫 e) 諧振回路并联式的脈冲形成电路
 - б) 延迟綫 v) 反諧振回路串联式的脈冲形成电路
- 16. 阻塞振盪器 (139)
 - a) 阻塞振盪器中各种过程的一般特征 e) 几个阻塞振盪器綫路
 - б) 阻塞振盪器的自激条件 ж) 阻塞振盪器的結構和
 - в) 动态特性曲綫及所产生的脈冲的幅度 运用的特点
 - г) 脈冲頂部的持續時間 з) 去耦电路
 - д) 脈冲的重复頻率
- 17. 阻塞振盪器的工作状态及其类型 (164)
 - a) 阻塞振盪器工作的同步(“占据”状态和“分頻”状态)
 - б) 具有調諧(“撞激”)回路的阻塞振盪器(自激振盪状态)
 - в) 在柵极电路中具有形成綫的阻塞振盪器(“停滯”工作状态)
- 18. 多諧振盪器 (175)
 - a) 自激多諧振盪器 e) 电子繼电器
 - б) 同步和分頻
- 19. 利用非直綫性元件来变换正弦振盪 (190)
 - a) 利用电子管作为非直綫性的变换元件
 - б) 利用过饱和变压器(巔值变压器)

第四章 高頻振盪的脈冲調制

- 20. 脈冲調制(一般概念) (193)
- 21. 高頻間歇振盪(自調制) (195)
- 22. 阳极調制 (198)
- 23. 柵极調制 (199)

第五章 大功率調制脈冲的产生

- 24. 对电压調制脈冲的要求 (202)
- 25. 产生大功率脈冲的基本原理 (206)

- a) 具有电容儲能器的功率变换器
- 6) 具有电感儲能器的功率变换器

第六章 电閥的类型

- 26. 对电閥的基本要求 (225)
- 27. 电子管 (227)
- 28. 旋轉式放电器 (234)
- 29. 触发管 (242)
- 30. 閘流管 (251)
- 31. 非直綫性电感 (256)

第七章 脈冲調制器的类型

- 32. 調制器的分类 (257)
- 33. 具有电感儲能器的調制器 (259)
 - a) 綫路及工作原理
 - 6) 調制脈冲的形状和調制器主要参量的計算
 - e) 用作电閥的电子管的工作状态的选择
- 34. 触发脈冲发生器 (271)
- 35. 用电子管使儲能电容器部分放电的調制器 (274)
- 36. 具有仿真綫和閘流管的調制器 (283)
- 37. 利用仿真綫在充电阶段中形成脈冲的調制器 (285)
- 38. 用非直綫性电感作为电閥的調制器 (288)

第八章 几种无綫电測位电台的調制器

- 39. AN/TPS—3型搜索用地面无綫电測位电台的調制器 (291)
- 40. 飛船用攔截測位电台的調制器 (293)
- 41. 海岸无綫电測位电台的調制器 (295)
- 42. 炮瞄电台的調制器 (297)

結 束 語

参考文献

第一章

脉冲电动势在直綫性系統上的作用

1. 脉冲电压和电流，以及它們在 电路中所引起的过程的性質

在很多实际的情况下，我們有兴趣的主要是研究某种电路的稳定工作状态。这种状态可以是由某一直流电动势

$$e = E = \text{常数} \quad (1)$$

的作用而产生的，也可以是由某一正弦交变电动势

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi) \quad (1a)$$

的作用而产生的（这个电动势的振幅 E_m 、角频率 ω 和起始相位 ψ 的数值是不变的）。由这种电动势（或电流）的作用而产生的稳定状态可以用电路上某一元件中强度不变的电流（直流），或振幅不变的电流振盪（其频率等于作用电动势的频率）来表示。

严格地说，我們所讲的稳定过程以及上面所采用的电动势的分析式(1)和(1a)，是假定这些电动势在時間 $t = -\infty$ 至 $t = +\infty$ 的范围内都是存在的，而这些过程也是从 $t = -\infty$ 时开始的(图1a, 1b)。事实上，这样的电动势是没有的，因为所有的实际电动势都在完全确定的时刻发生。虽然如此，上述概念实际上仍然可以应用；这是因为在有损耗的实际电路中，在电动势开始作用之后的一段很短的时间內，瞬变过程就很快地衰減了。因此我們可以认为电路中的电的状态和稳定状态并没有什么分別。电振盪达到上述近似的稳定状态所需的时间决定于电路的时间常数和計算时所需要的准确度。以

最简单的电阻 R 和电感 L 串联的电路为例, 在時間 $t=3L/R$ 以后, 实际的情况和稳定情况相差約 5%, 如果時間 $t>5L/R$, 則两者的差别不超过 0.5%。

有时我們需要研究电动势开

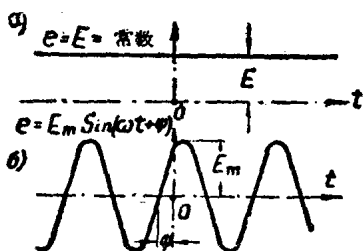


圖 1

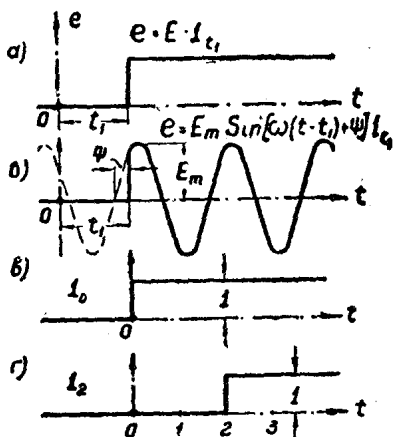


圖 2

始作用 (或者是发生变化) 之后的瞬变过程。在下面的分析中, 我們將采用

$$e = E \cdot 1_{t_1}; \quad e = E_m \sin[\omega(t - t_1) + \varphi] \cdot 1_{t_1}$$

的分析式来表示在某一定时刻 $t = t_1$ 开始作用的电动势 (以及和它相对应的电压及电流) (参看图 2)。这里 1_{t_1} 称为单位函数, 它的性質是:

当 $t < t_1$ 时, $1_{t_1} = 0$,

当 $t \geq t_1$ 时 $1_{t_1} = 1$ 。

图 2a 和 2c 画出了单位函数 1_0 和 1_2 的曲线。

当这种电动势加到能够儲存能量的电路时 (能量儲存在电路中电容器的电场或电感器的磁场里), 电路中就发生瞬变现象。一般說来, 这些瞬变现象就使得电路的各个元件上的电压的波形及流經这些元件的电流的波形和原来电动势的波形有所不同。在某些情况下, 这种波形改变是我們所需要的, 这就是所謂形成设备的主要用

途；但是在某些情況下，這種波形的改變使得由這個電路傳輸的信號發生畸變。

除了研究由於直流電動勢或正弦交變電動勢所產生的穩定狀態之外，我們還要研究**複雜波形的周期性**電動勢作用在電路時所產生的現象。我們所指的電動勢，是可以用時間的周期性函數

$$f(t) = f(t + KT_n)$$

來表示的任意形狀的電動勢。這裡 $K = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ， T_n 是函數的變化周期；和它對應的頻率

$$F_n = \frac{1}{T_n} = \frac{\Omega}{2\pi}$$

稱為**重複頻率**。

圖 3 畫出了幾個具有複雜波形的周期性電動勢（或電流）。圖 3a 的波形，在電流具有截止角的電子管振盪器中可以看到；圖 3b 是按照正弦規律調幅的高頻振盪；圖 3c 是鋸形波，它應用於電子束管的時間掃描裝置里；圖 3d, 3e 和 3f 所示的電壓是由張弛振盪器或特別的**形成設備**產生的，它們廣泛地應用於電視和無線電測位技術中。

在有些情況下，具有複雜波形的電壓或電流，只是在每一周期中的一部分時間內產生作用。通常我們用所謂**脈沖間隔度**來表示這種現象。所謂脈沖間隔度是指在一個周期內整個周期的持續時間 T_n 和電壓（或電流）作用的持續時間 t_n 的比值，即

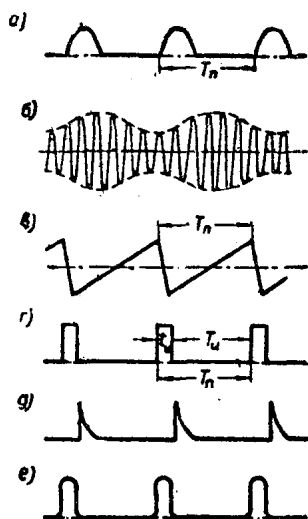


圖 3

$$Q = \frac{T_n}{t_n} = \frac{1}{F_n t_n}。$$

当复杂波形的电动势作用到电路时，我們所感兴趣的可能是电路的**稳定工作状态**（严格地说，要在电动势作用之后，经过无穷长的时间才达到这种稳定状态），也可能是加上电动势以后在电路中**立刻产生的瞬变过程**。在头一种情况下，我們可以假想給定的电动势的确是时间的周期性函数，在 $t = -\infty$ 到 $t = +\infty$ 的时间内它都存在。在第二种情况下，电动势在某一定时刻 $t = t_1$ 时产生作用；虽然由这个时间开始，每隔一定时间 T_n 之后，它又再产生作用（图4），但严格地说，这种电动势并不是时间的周期性函数，它应当利用单位函数以 $f_2(t) = f(t - t_1)1_{t_1}$ 来表示。这里 $f(t - t_1)$ 是真正的周期性函数。



圖 4

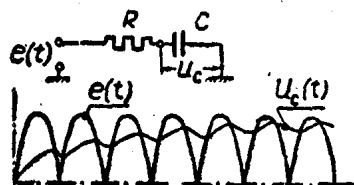


圖 5

实际上在很多情况下，在具有复杂波形的电动势开始作用，并经过了一很短的时间之后，电路中所产生的情况和稳定情况已经没有什么区别。这时，这种实际上是非周期性的过程就可以用时间的周期性函数的形式来表示。以串联的电阻 R 和电容器 C 为例（图5），在这个电路上如果加上脉动电压 $e(t)$ ，当 $u_c < e$ 时，电容器上的电压升高，当 $u_c > e$ 时，它则下降；在经过某一定的时间 $(5-10)RC$ 之后，电容器在“周期” T_n 中的一部分时间内所得到的电荷，差不多等于在这个“周期”中其余时间内所失去的电荷。因而这种情况实际上可以认为是稳定的，其过程也就可以认为是周期性的了。

虽然在一切具有損耗的实际电路中，在經過一定時間以后，可以认为电路中的情况已經和稳定情况非常相近，但是在很多場合下，用稳定的、周期性的時間函数来表示这种过程仍然是不恰当的。这是因为在很多实际場合中，时常要碰到脈冲間隔度很大的周期性电动势（图3, 2）。在这些电动势中，脈冲与脈冲間的間隔 T_n 很大，因此由于某一个脈冲所产生的作用，在第二个脈冲开始工作以前已經完全衰减掉。当第二个脈冲开始工作的时候，电路重新处于最初的起始状态，由于前一个脈冲的作用而儲存在电路中的能量已完全消耗掉，一点也沒有存留。当脈冲之間的時間間隔大大超过电路的時間常数时（这个時間常数决定着瞬变过程的持續時間）就会产生上述的現象。在这种情况下，稳定过程的概念就失去了它的意义，因为每一个脈冲电动势都产生瞬变現象，而这个瞬变現象又和前一个脈冲的作用无关。这种电动势就叫做**脉冲电动势**。在研究相应的瞬变現象时，可以假定电路中加上一些彼此沒有关联的、獨立的电压脈冲。

在无綫电測位技术中，經常要碰到脈冲电动势，这些周期性重复着的脈冲的間隔度很大，約为1000或者更高些。脈冲本身的持續時間很小，約为几微秒，甚至是十分之几微秒。这些時間和电路的時間常数（后者决定着瞬变过程的持續時間）是完全可以比拟的（在某种情況下，甚至还可以大于电路的時間常数）。因此，在研究脈冲电动势所产生的現象时，主要是研究瞬变現象。在現代的“脈冲”无綫电技术中，瞬变現象是很重要的。

实际上所碰到的脈冲电动势主要有两种，即**視頻脈冲**和**射頻脈冲**。

所謂**視頻脈冲**是指这样的脈冲：只是在脈冲的起始部分，有时也可能在它的終結部分（而不是整个脈冲），脈冲数值急剧地变化着（图6）。換句話說，視頻脈冲可以具有很陡的**前沿**（ $t_{\phi} \ll t_n$ ）或

很陡的后沿 ($t_c \ll t_n$)；但是脉冲的绝大部分时间内，脉冲数值变化的速度是不大的。在电视和无线电测位的同步及控制电路以及脉冲

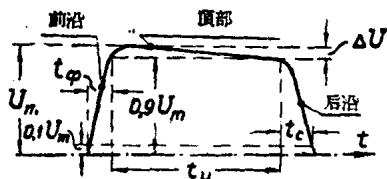


圖 6

调制设备中，视频脉冲有着极其广泛的应用。最常用的是近于矩形的梯形脉冲。这种脉冲的特点是具有平坦的顶部，它占有脉冲的主要部分（图 6）；脉冲的前沿和后沿通常是脉冲持续时间的（5—20）%。在我们谈到整个脉冲的持续时间或者它的一部分时间的时候，通常是指所谓脉冲的有效持续时间，这个有效持续时间是附加的条件来确定的。现在这些条件还没有确定的、为大家所公认的规定。有时以脉冲振幅的 0.9 作为标准来计算脉冲的有效持续时间 t_n （图 6），而有效前沿的持续时间，则以脉冲由其振幅的 10% 增加至 90% 所需的时间来计算；脉冲后沿的有效持续时间则等于振幅由 90% 降低至 10% 所需

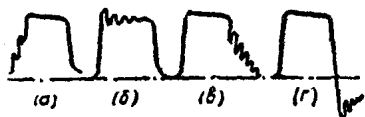


圖 7

的时间。在有些实际的应用中，脉冲顶部平坦部分的降落是脉冲的重要的参量，它可以用 ΔU 来表示（图 6），或者用比值 $\Delta U/U_m$ 来表示。我们还时常可以碰到这样的脉冲，在它们的前沿（图 7, a）、顶部（图 7, b）或尾部（图 7, c 和 7, r），带有高频振荡。在大多数情况下，这些不需要的（寄生的）振荡，通常很快地就衰减掉了。

振幅固定的高频振荡脉冲，或者是振幅按照某一定的规律而慢慢变化的高频振荡脉冲都称为射频脉冲。射频脉冲可以看作是以视频脉冲作过振幅调制的高频振荡。例如，假设 $E_m \cos \omega t$ 是未调制的高频振荡，其角频率为 ω ，振幅为固定值 E_m （图 8, a），又 $e_1(t)$ 是具有某种波形的调制视频脉冲的分析式（图 8, b），那么 $e_1(t) \cos \omega t$ 就是已调制振荡的分析式（图 8, c），其振幅按照 $e_1(t)$ 的规律而变