



高电压技术教研室
HIGH VOLTAGE INSTITUTE

《高电压技术》

第十章 高电压试验技术 High Voltage Test

汲胜昌 祝令瑜

2021年02-05月





Section 2 直流高压的产生

1 概述

一、直流高压产生的必要性

- 传统设备的泄漏电流试验
- 大容量设备的交流替代耐压试验
- 直流设备耐压试验
- 其他设备的电源（如冲击电压发生器）

高压直流输电与交流输电相比有以下优点：

(1) **输送相同功率时，线路造价低：**

在有色金属和绝缘材料相同的条件下，2根心线的直流电缆线路输送的功率 P_d 比3根心线的交流电缆线路输送的功率 P_a 大的多。因此，直流输电可节省大量输电材料，同时也可减少大量的运输、安装费。

(2) **线路有功损耗小：**

由于直流架空线路仅使用1根或2根导线，所以有功损耗较小，并且具有“空间电荷”效应，其电晕损耗和无线电干扰均比交流架空线路要小。

(3) **适宜于海下输电：**

没有磁感应损耗，用于直流时，则基本上只有心线的电阻损耗，而且绝缘的老化也慢得多，使用寿命相应也较长。



(4) **系统的稳定性问题:**

在交流输电系统中，所有连接在电力系统的同步发电机必须保持同步运行。如果采用直流线路连接两个交流系统，由于直流线路没有电抗，所以不存在上述的稳定问题，也就是说直流输电不受输电距离的限制。

(5) **能限制系统的短路电流:**

用交流输电线路连接两个交流系统时，由于系统容量增加，将使短路电流增大，有可能超过原有断路器的遮断容量，这就要求更换大量设备，增加大量的投资。直流输电时，就不存在上述问题。

(6) **调节速度快，运行可靠:**

直流输电通过晶闸管换流器能够方便、快速地调节有功功率和实现潮流翻转。

如果采用双极线路，当一极故障，另一极仍可以大地或水作为回路，继续输送一半的功率，这也提高了运行的可靠性。



- **直流输电适用于以下场合：**

- 远距离大功率输电；
- 海底电缆送电；
- 不同频率或同频率非同期运行的交流系统之间的联络；
- 用地下电缆向大城市供电；
- 交流系统互联或配电网扩容时，作为限制短路电流的措施之一；
- 配合新能源的输电。

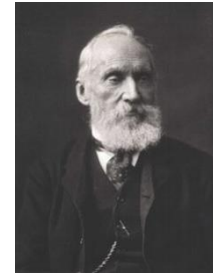


采用交流输电还是直流输电？——“电流之争”

1) 早期直流输电阶段

- 对电的认识和电科学的发展源于直流。(电报的启发)
- 主张直流输电的科学家：**爱迪生**、开尔文、德普勒

1879年创办爱迪生电力照明公司，
1890年创办爱迪生通用电气公司，
1892年联合创办通用电气公司





1882年

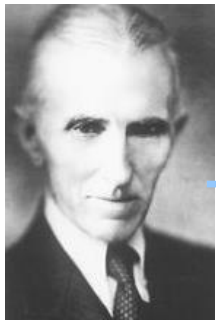
爱迪生在纽约建成世界上第一座正规发电厂，装有六台蒸汽直流发电机，共662kW，通过110V地下电缆供电，最大送电距离1英里，供59家用户，1284盏白炽灯，建成了一个简单的电力系统。

送端	受端	技术指标
米期巴赫煤矿 (Miesbach)	慕尼黑国际 展览会(Munich)	2kV、1.5kW、57km电报线
特点	<div>① 第一个电力系统；<div>蒸汽机驱动的发电机</div></div> <div>② 线路损耗：78%；</div> <div>③ 从此进入试验性阶段</div> <div>法国人 德普勒</div>	



- 主张交流输电的科学家：

特斯拉、威斯汀豪斯、法拉第、约瑟夫.亨利、奥斯特



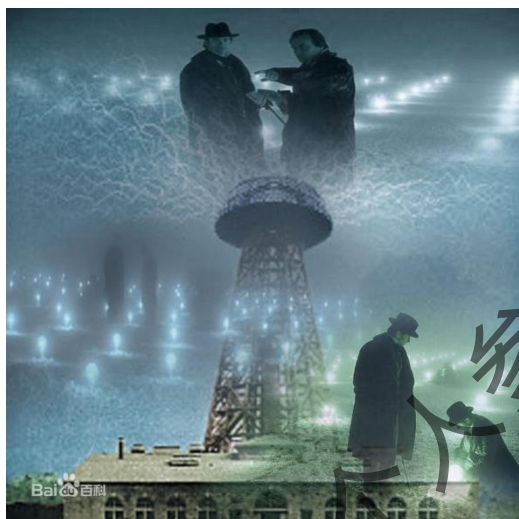
交流
电动
机



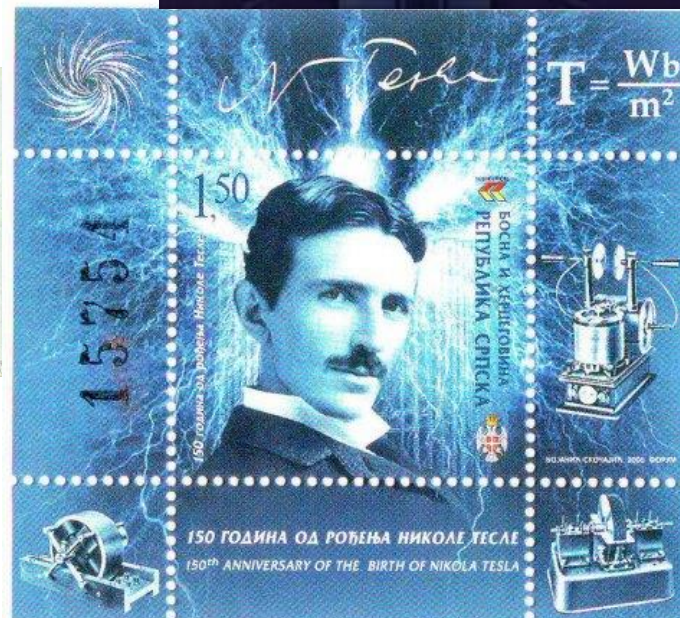
- 原因：

远距离送电——减少输电线路中的电能损失
——提高电压——改变电压——交流输电

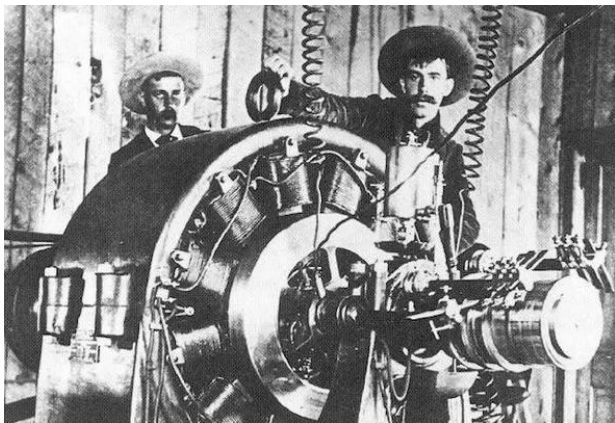
尼古拉·特斯拉 (塞尔维亚裔美籍科学家)



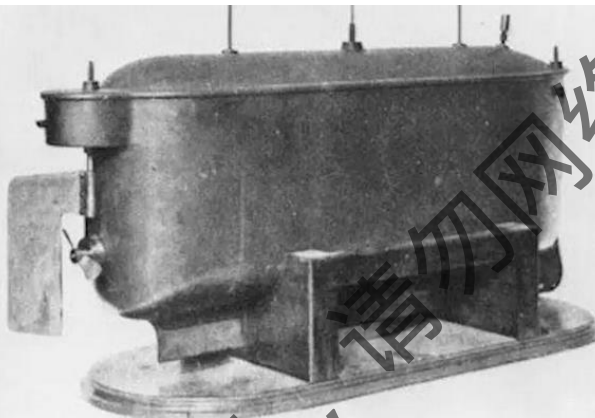
沃登克里弗塔



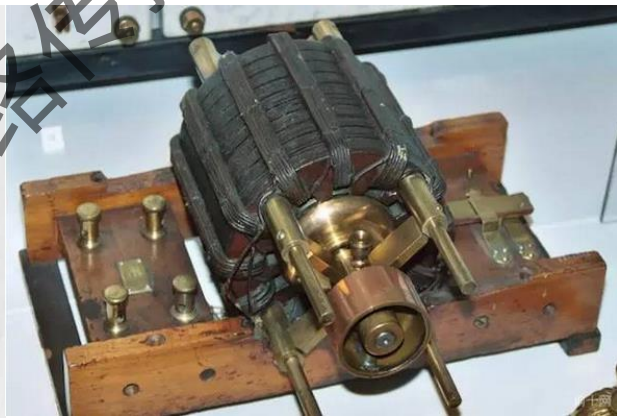
尼古拉·特斯拉（塞尔维亚裔美籍科学家）



交流系统



远程自动化



交流电动机



尼亚加拉水电厂



霓虹灯



无线电



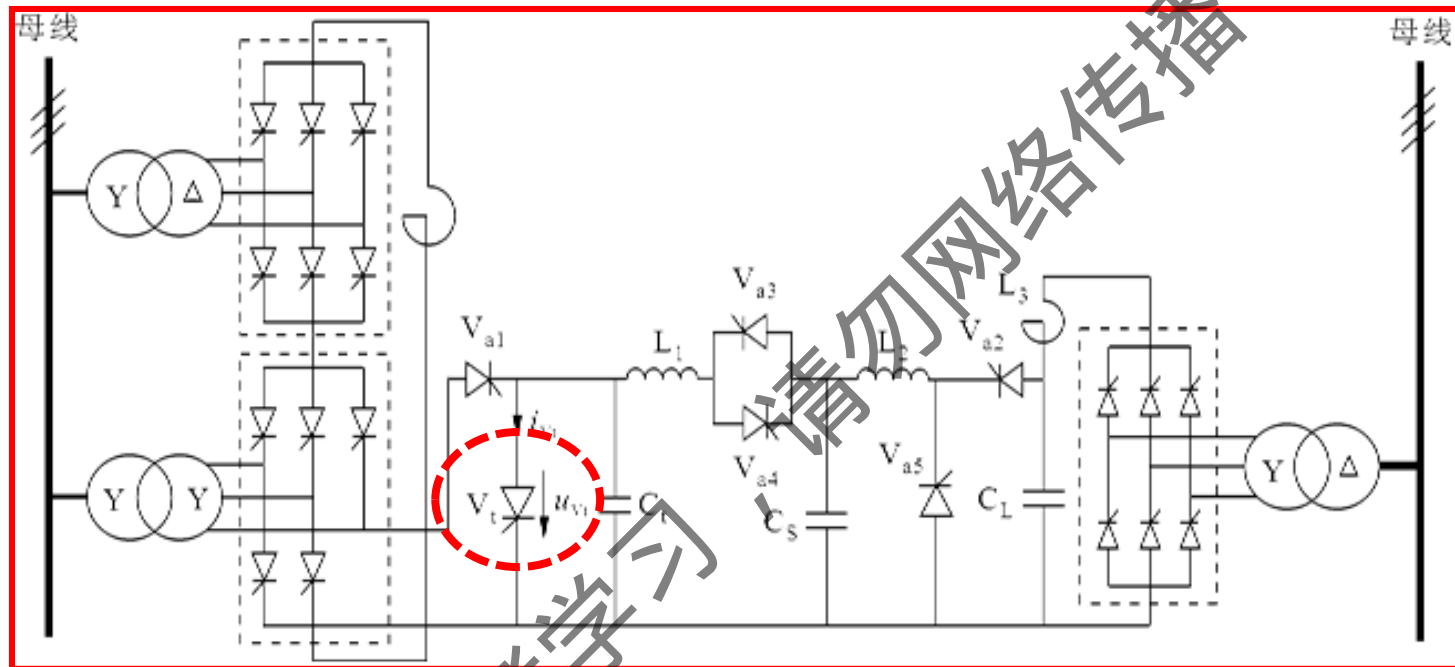
我国直流输电发展现状

- 1) 早在上世纪50年代初，我国就派人向前苏联学习高压汞弧阀的设计制造。1963年，**中国电科院**建设了一1kV、5A的物理模型。利用该套装置研究直流输电换流技术及控制保护系统；
- 2) 1974年，在**西高所**建成了8.5kV、200A、容量为1.7MW的背靠背换流试验站，主要用于对直流输电一次设备、二次设备进行考核试验，还对直流输电的控制保护特性以及各种故障类型进行试验研究；
(现在的能力：6500A,50kV) 国家科技进步二等奖
- 3) 1978年，在**上海**投运了一条31kV、150A、送电电缆全长为8.6km的直流输电试验工程（利用杨树浦发电厂到九龙变电所之间的23kV交流报废电缆建成，累计运行了2300h）。

以上2) 和3) 为以后舟山直流输电工程的设计、调试和运行积累了丰富的经验，进行了必要的技术准备。



电流源



电压源

电流源由两个6脉波桥串联而成为12脉波整流桥，**试品** V_t 作为Y/Y整流桥的一个桥臂；合成回路中的**电压源**由6脉波高压可控整流充电装置和带辅助控制阀的振荡回路组成。电流源和电压源的交流侧均由35kV电网馈电。电压源和电流源采用“电流引入”原理进行“合成”试验。

我国直流输电发展现状（直流工程）

• 舟山直流输电工程

时间进度：1984年第一期工程开始施工；1987年进行调试和投入试运行；1989年9月1日通过国家鉴定并正式投运。

发挥作用：我国依靠自己力量建成的中国第一项投入实际生产运行的直流输电工程，既解决了浙江大陆向舟山本岛的输电问题，又具有向建设大型直流输电工程过渡的工业性试验性质。

建设规模：双极±100kV、500A、10万kW，全长54km（其中12km为海底电缆）。

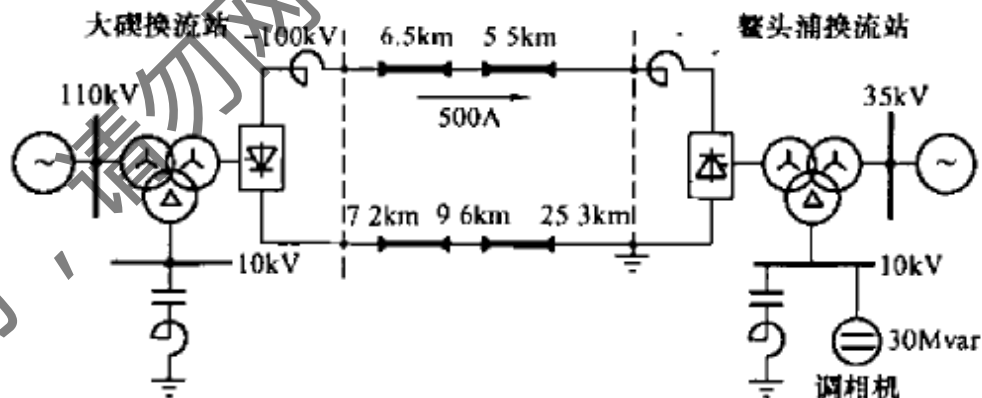
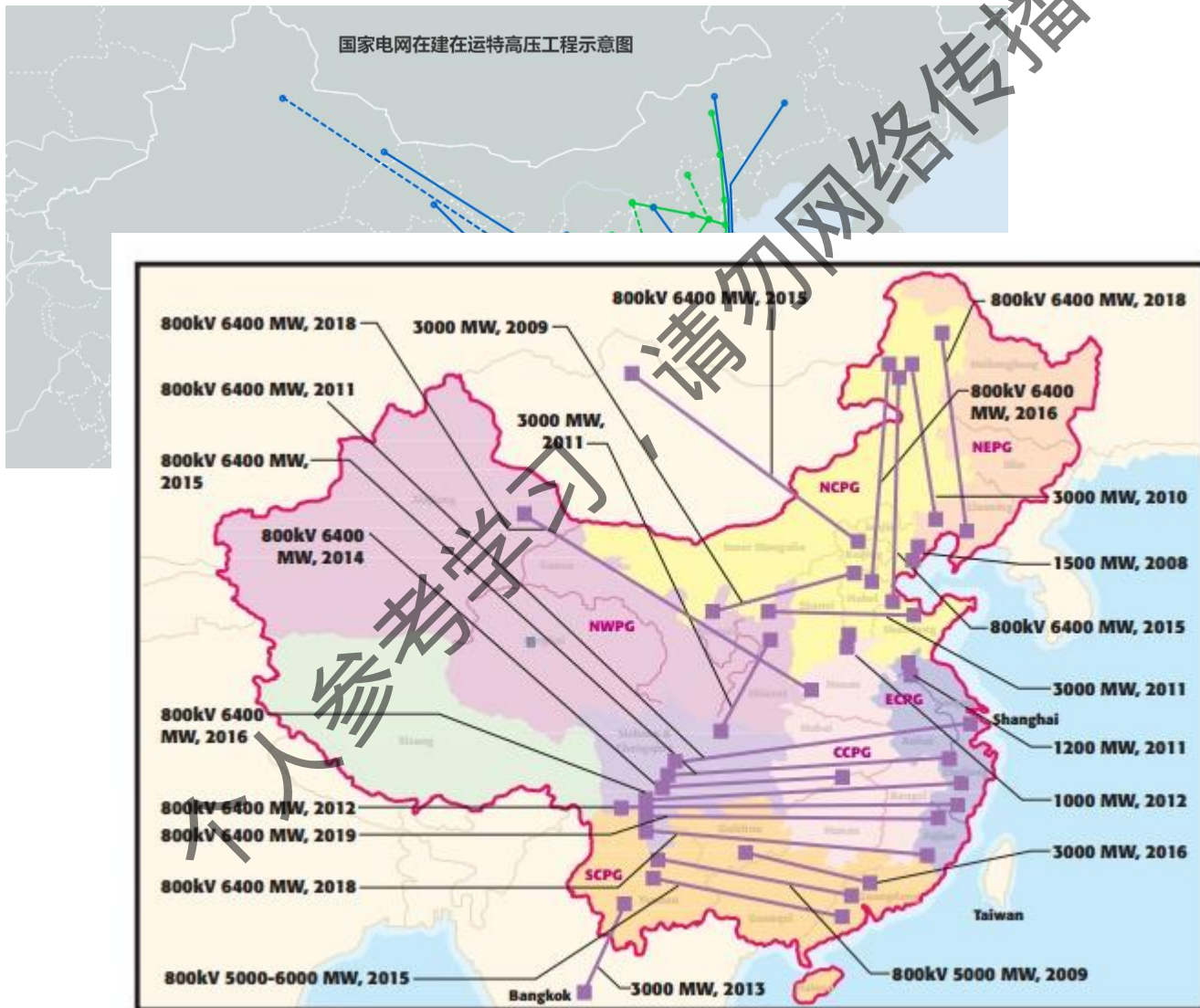


图 1-6 舟山直流输电工程原理接线图

—— 架空线路；—— 海底电缆



我国直流输电发展现状（直流工程）





我国直流输电发展现状（直流工程）

- 在建项目

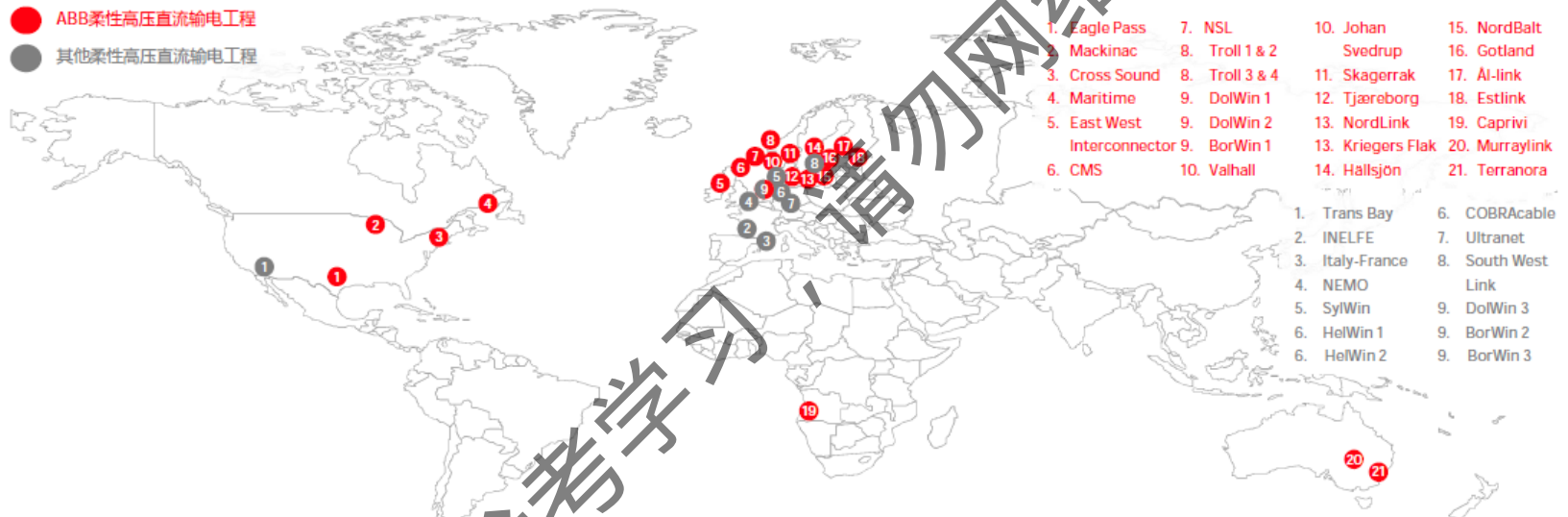
- 青海-河南
- 陕北-湖北（武汉）
- 雅中-江西
- 昆柳龙直流（乌东德特高压混合）
- 张北柔性直流



柔性直流输电发展现状

ABB-全球柔性高压直流输电领域的先锋

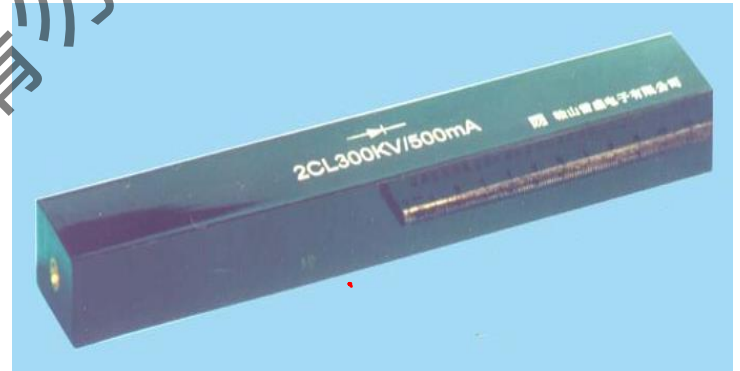
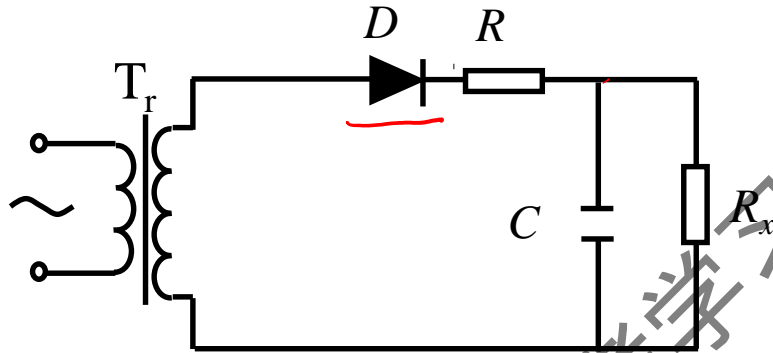
ABB 参与了全球70%的柔性直流工程建设





二、直流高压产生方法

交流高压整流产生直流高压





三、技术参数

➤ 额定直流电压 (算术平均值) (U_d)

$$U_d \approx \frac{U_{\max} + U_{\min}}{2} \quad (\text{平均值})$$

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u(\tau) dt$$

$$I_d = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$$

➤ 额定直流电流 (平均值) (I_d)

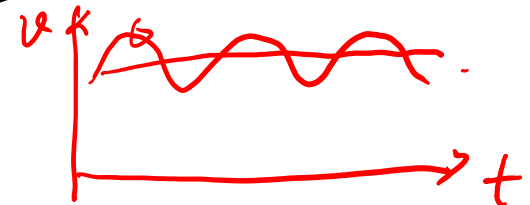
➤ 脉动系数 (纹波系数)

GB/T16927.1:
S 不大于3%

纹波
幅值

$$S = \frac{\delta U}{U_d}$$

$$\delta U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2}$$

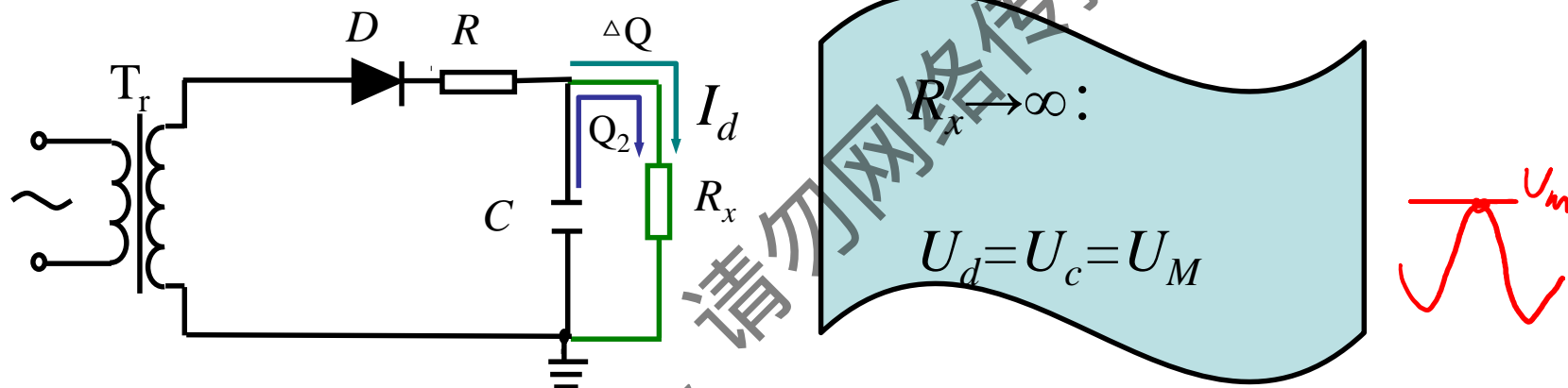


电压高、电流小、持续运行时间短



2 整流电路

一、半波整流电路

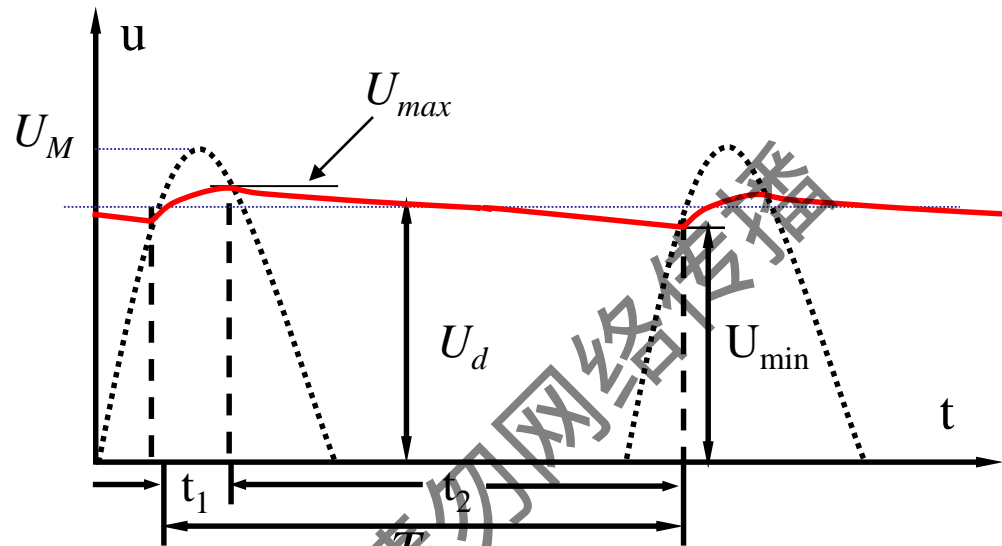
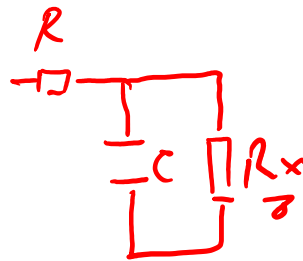


R_x 存在时, R_x 上流过负载电流, $U_c < U_M$

若负载电流为 I_d , R_x 上一周内流过的电荷 $Q_1 = I_d \cdot T = Q_2 + \Delta Q$

- D 截止时, 电容 C 向负载提供电荷 Q_2 , C 上电压逐渐降低
- D 导通时, 电源补充电容损失的电荷 Q_2 , 并提供负载 ΔQ

一周内, 电容上的电压 U_c 是波动的 \Rightarrow 输出电压含有脉动



电压波动原因：一周内C损失电荷 Q_2 后，又获得电荷 Q_2

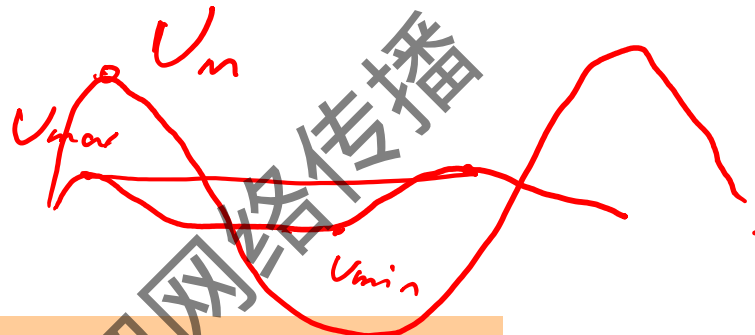
$$U_{\max} - U_{\min} = \frac{Q_2}{C} \quad \Rightarrow \quad \delta U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2} = \frac{Q_2}{2C}$$

由于 $t_1 \ll t_2$, $\Delta Q \ll Q_2$ 即： $Q_1 \cong Q_2$

$$\delta U = \frac{Q_1}{2C} = \frac{I_d T}{2C} = \frac{I_d}{2Cf} \quad S = \frac{\delta U}{U_d} = \frac{I_d}{2CfU_d} = \frac{1}{2CfR_x}$$



$$U_{\max} = U_M ?$$



输出电压出现电压降落

$$U_{\max} = U_M - \Delta U$$

原因： D 导通时，通过 R 给 C 补充电荷 Q_2 ，给负载 ΔQ 时变压器绕组及电阻 R 上将流过电流，产生压降，从而使得电容 C 上无法充到变压器输出电压的最大值，即 U_M 之值。

电压降落 ΔU 可以通过查曲线获得。

R . R_x . C

高压硅堆 *silicon stack*

- 直流高压发生装置中基本整流元件
多个硅整流二极管串联而成

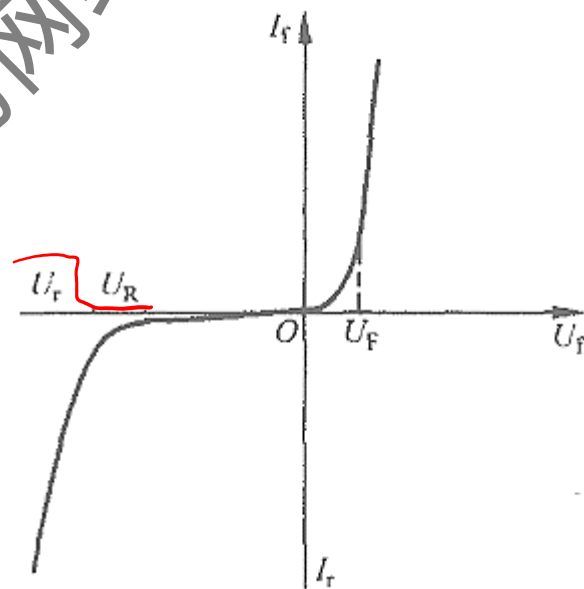
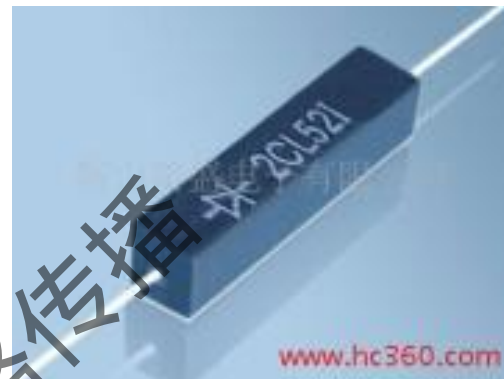
技术参数:

额定整流电流 I_f : 正向电流一个周期内平均值;

正向压降 U_f : 电流为 I_f 时管子两端压降;

额定反向峰值电压 U_r : 截止时管子两端允许出现的最高反向电压峰值

反向平均电流 I_r : 最高反向工作电压作用下, 反向电流平均值



U_F —— 死角电压; U_R —— 击穿电压;
 U_f, I_f —— 正向电压、电流;
 U_r, I_r —— 反向电压、电流



硅堆的使用

- 热击穿为主
- 一定要注意不要过载
- 高频信号要使用高频硅堆
 - 工频2DL, $< 3\text{kHz}$
 - 高频2DGL
- 注意使用环境温度
- 考虑反向功率损耗

$$I_a < I_f$$

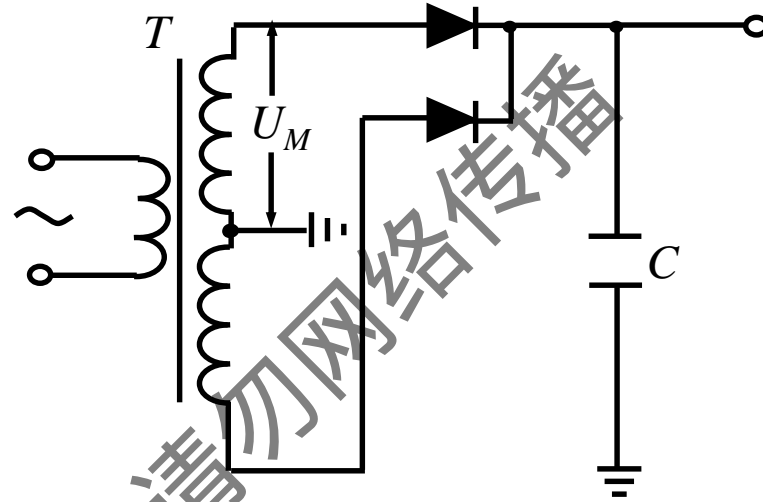
$$40^\circ\text{C 以下}$$

$$I_f \downarrow U_R \downarrow$$



二、全波电路

实际是两个半波
回路的并联工作。
但变压器特殊。

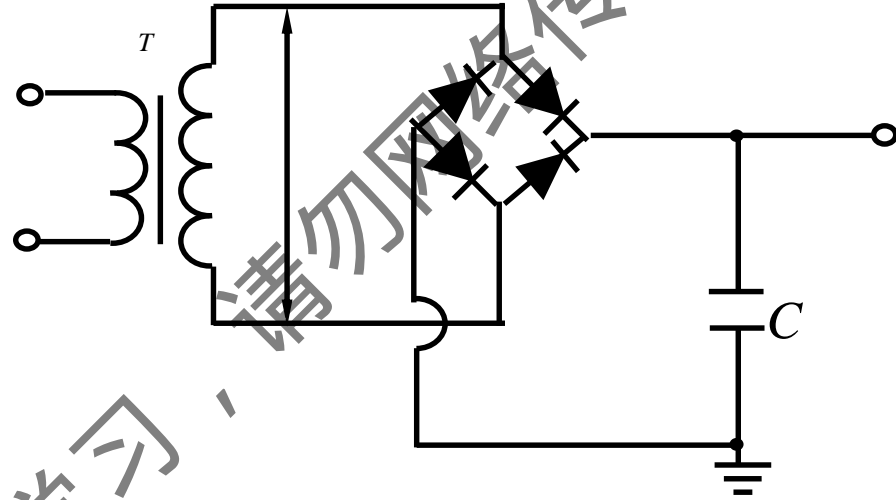


$$\delta U = \frac{Q_2}{2C} = \frac{I_d \cdot T/2}{2C} = \frac{I_d}{4Cf}$$

ΔU 的求取方法与半波整流电路时相同。
回路元件额定电压选取与半波类似。



三、全桥电路 变压器全绝缘

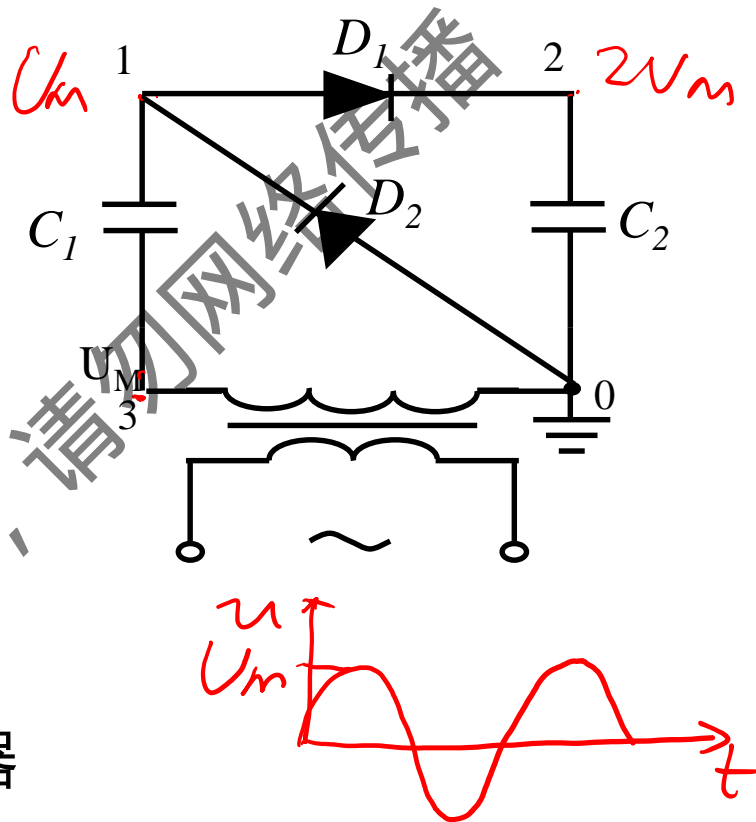


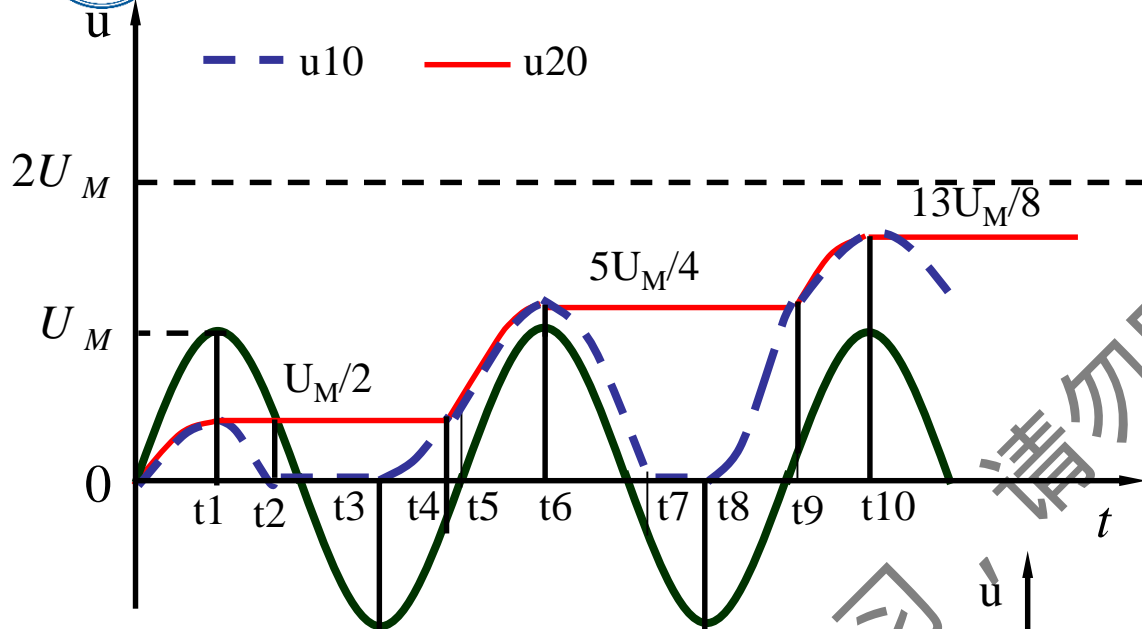


四、倍压电路

特点:

- 变压器一端接地
- 另一端输出高压
- 电路输出电压 $2U_M$
- C_1 的工作电压 U_M
- C_2 的工作电压 $2U_M$
- 可多级串联组成串级发生器

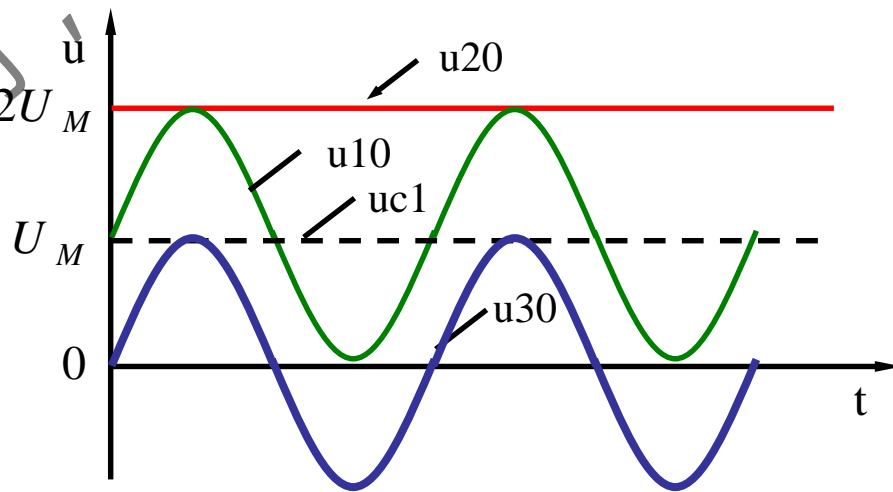
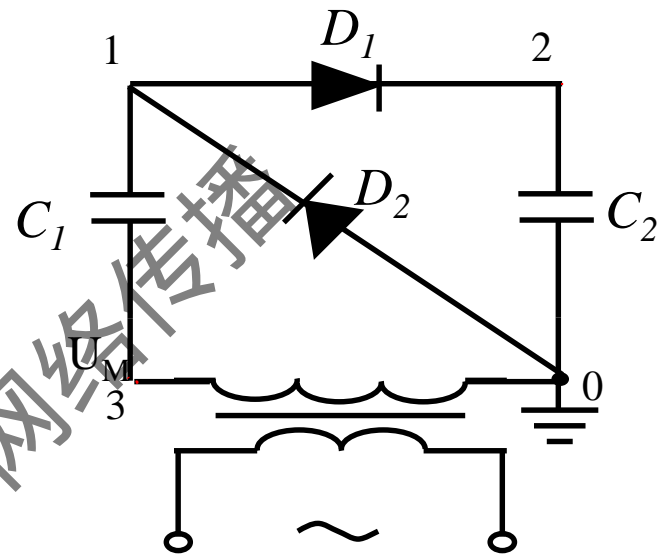




$t \rightarrow \infty$

$$u_{c2} = u_{20} = 2U_M$$

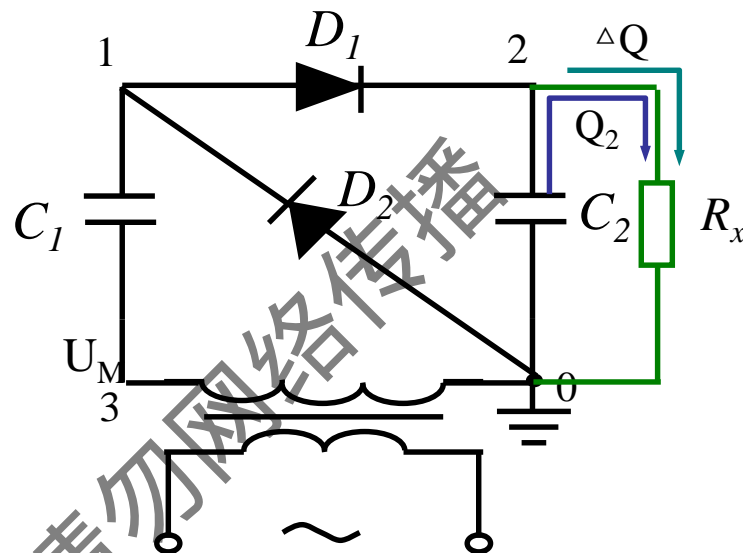
$$u_{c1} = U_M$$





2. 存在负载时

R_x 存在时, R_x 上流过负载电流



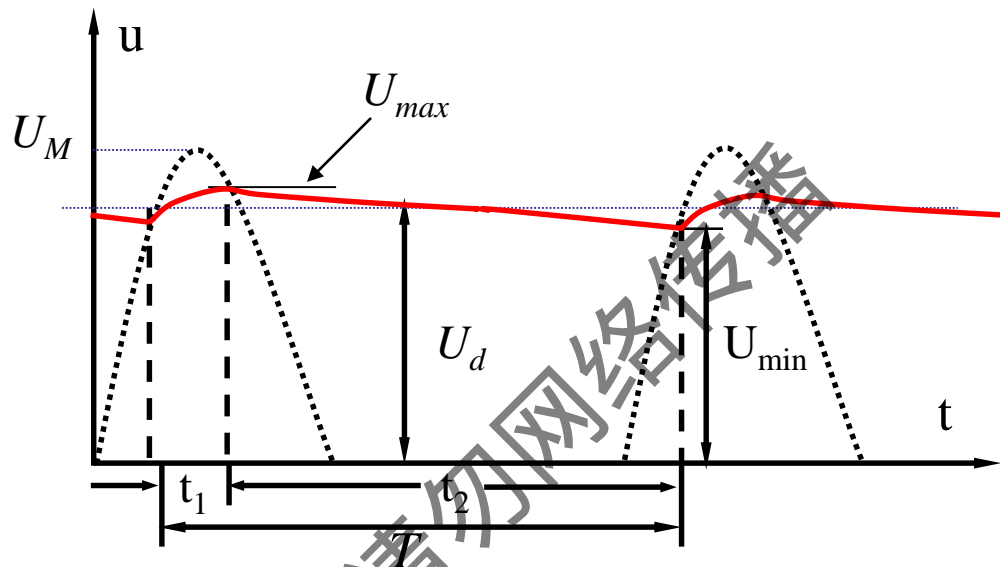
若负载电流为 I_d , R_x 上一周内流过的电荷 $Q_1 = I_d \cdot T = Q_2 + \Delta Q$

- D_1 截止时, 电容 C_2 向负载提供电荷 Q_2 , C_2 上电压逐渐降低
- D_1 导通时, 电源补充电容损失的电荷 Q_2 , 并提供负载 ΔQ

一周内, 电容 C_2 上的电压 U_c 是波动的 \Rightarrow 输出电压含有脉动



电容上电压波形



电压波动原因：一周内 C_2 损失电荷 Q_2 后，又获得电荷 Q_2

$$U_{\max} - U_{\min} = \frac{Q_2}{C} \quad \Rightarrow \quad \delta U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2} = \frac{Q_2}{2C}$$

由于 $t_1 \ll t_2$, $\Delta Q \ll Q_2$ 即: $Q_1 \cong Q_2$

$$\delta U = \frac{Q_1}{2C} \cong \frac{I_d T}{2C} = \frac{I_d}{2Cf} \quad S = \frac{\delta U}{U_d} = \frac{I_d}{2Cf U_d} = \frac{1}{2Cf R_x}$$



除产生脉动外，输出电压最大值还出现电压降落

原因： D_1 导通时， C_1 给 C_2 补充电荷 Q_2 ，给负载 ΔQ ， C_1 能给 C_2 充的电压最大值达不到 $2U_M$

$$Q_1 = \frac{Q_2 + \Delta Q}{\delta}$$

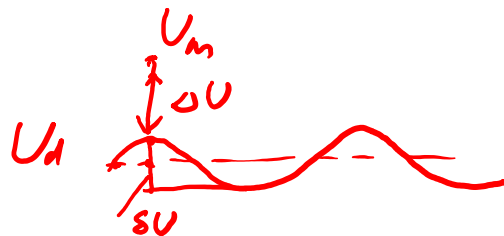
$$C_1 = C_2 = C$$

$$\Delta U = \frac{Q_1}{C} = \frac{I_d T}{C} = \frac{I_d}{Cf} \quad \delta U$$

平均电压降落：

$$\Delta U_a = \Delta U + \delta U = \frac{I_d}{Cf} + \frac{I_d}{2Cf} = \frac{3I_d}{2Cf}$$

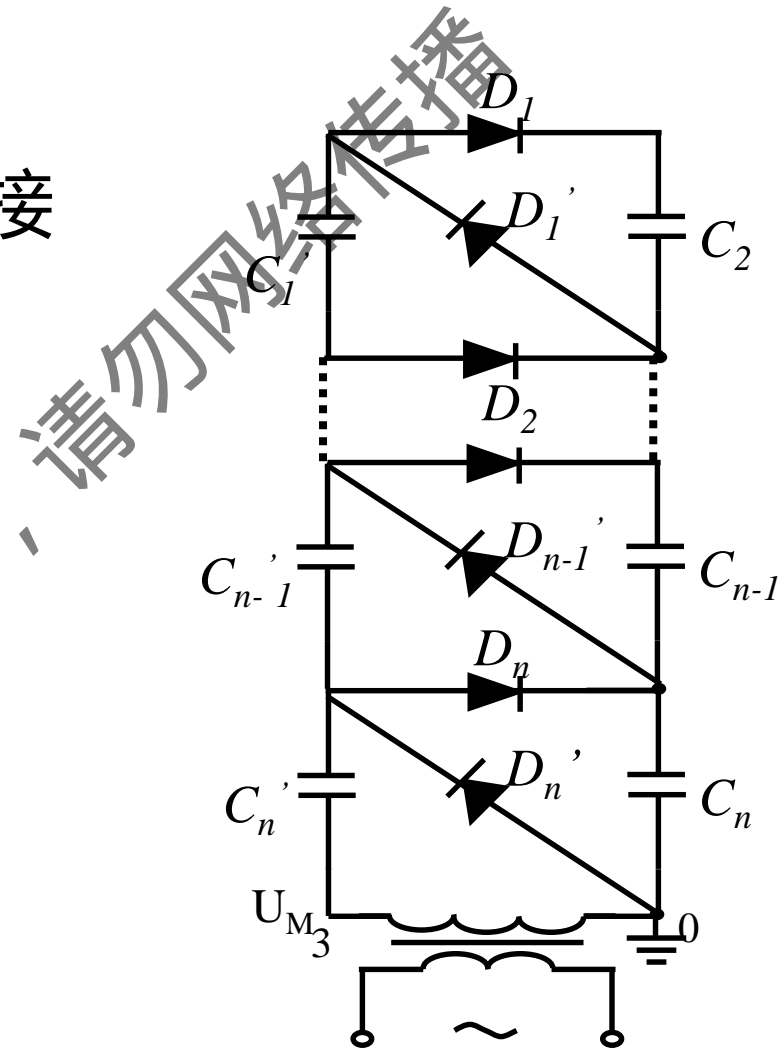
$$U_a = 2U_M - \Delta U_a = 2U_M - \frac{3I_d}{2Cf}$$





3 串级直流高压发生器

组成：多个倍压电路串接





减小脉动 S 和电压降落 ΔU_a 的途径

- 合理选择级数

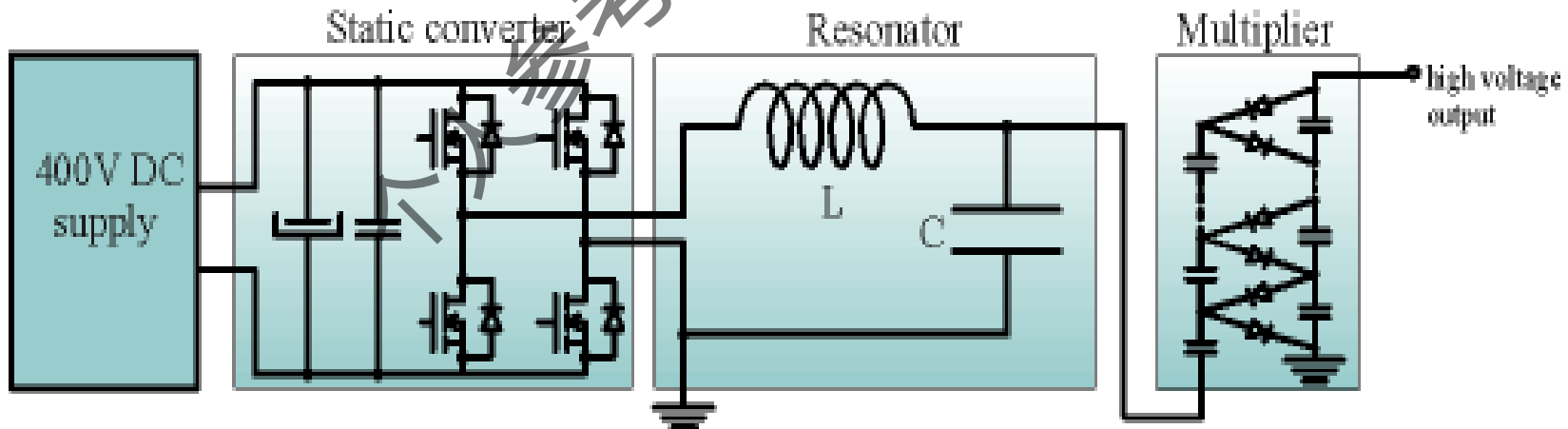
$$S = \frac{n(n+1)I_d}{4CfU_d}$$

$$\Delta U_a = \frac{I_d}{6Cf} (4n^3 + 3n^2 + 2n)$$

考虑电容的耐压 U_c 和容量 C

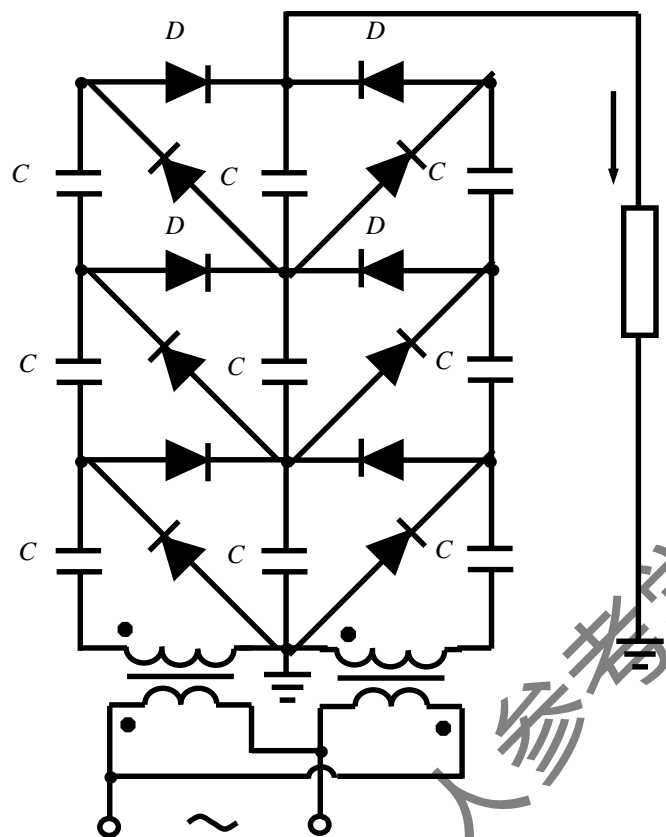
- 提高电源的频率

采用中频 (400~800Hz) 或高频 (1~20kHz) 电源供电

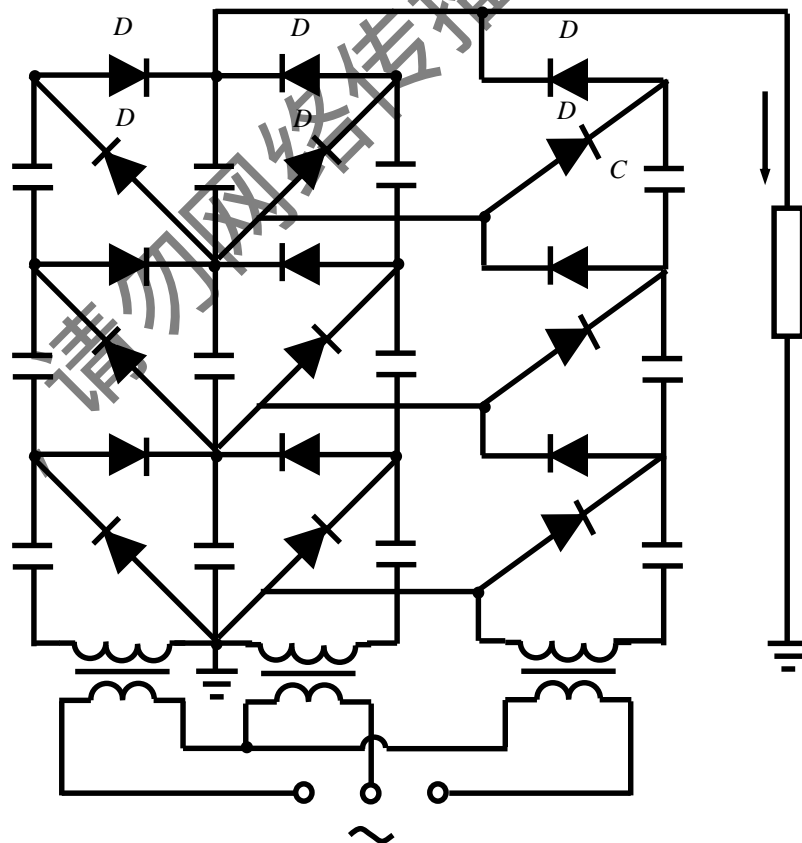




• 采用对称回路或三相供电



每半周电容器充电一次，
流失电荷时间不到半周



每三分之一周电容器充电一次，
流失电荷时间不到三分之一周