第2章　水轮发电机的自动并列

1. 水轮发电机的并列方式
2. 同期点的选择和同期电压的引入
3. 准同期点条件分析
4. 手动准同期
5. 自动准同期
6. 微机型自动准同期装置的工作原理

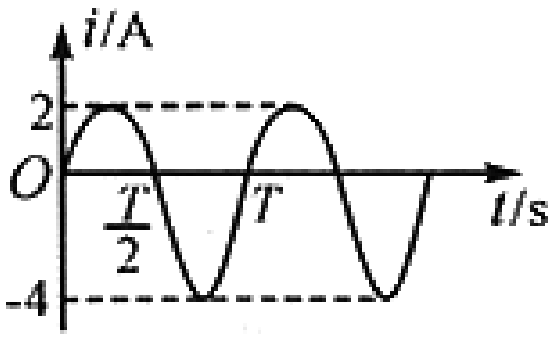
2.1 水轮发电机的并列方式

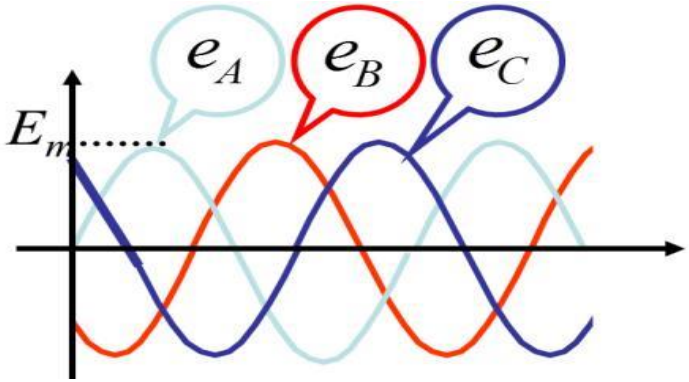
1、同步发电机在电网中并列运行的概念

电力系统的电压瞬时值可表示为：

$$u_{sys}(t) = U_m \sin(\omega t + \phi)$$

正常情况时，在电力系统中并列运行的同步发电机是以**相同的电角速度、出口的折算电压相等**的情况运行，称为并列（或同步）运行。





注：电角度与电机的极数有关，如果电机只有一对极（p=1），则电机一周是360个电角度；两对极（p=2），720个电角度；三对极（p=3），1080个电角度，等等，也就是电机的极对数p与电角度的关系是：**电机的总电角度=360×p**。

而电机每转一周，它的角速度是360度。由此可知，**电机的电角速度＝角速度×p**。**不同的极对数时，要求电角速度相同，则角速度就不一样，也就是转速不一样**。

★ 磁极对数与同步转速系列

磁极对数 P	3	4	5	6	7	8	9	10	12
同步转速n(r/min)	1000	750	600	500	428.6	375	333.3	300	250

磁极对数 P	14	16	18	20	22	24	26	28	30
同步转速n(r/min)	214.3	187.5	166.7	150	136.4	125	115.4	107.1	100

磁极对数 P	32	34	36	38	40	42	44	48	50
同步转速n(r/min)	93.8	88.2	83.3	79	75	71.4	68.2	62.6	60

由许多同步发电机并列运行组成的电力系统相对于孤立网来讲，具有以下优点：

①**可以提高供电的可靠性**：单台电机故障或检修不会引起停电事故。

②**可以提高供电的电能质量**：电网容量大，单台发电机投入与停机、个别负载的变化对电网的影响很小，衡量供电质量的电压和频率可视为不变的常数。

③**提高供电的经济性和灵活性**：若水电厂与火电厂并联，在枯水期和丰水期两种电站可以调配发电，在用电高峰期和低谷期可灵活决定投入电网的发电机数量，提高发电效率和供电灵活性，并使负荷分配更为合理，减少电力系统的备用容量，充分利用各种动力资源。

水轮发电机在投入电力系统并列运行以前，与系统中的其它发电机是不同步的，如果要使它与系统中已运行的发电机并列运行，则必须按一定的要求完成各种操作。

这种将发电机投入电力系统并列运行的操作，称为并列操作或同期操作；

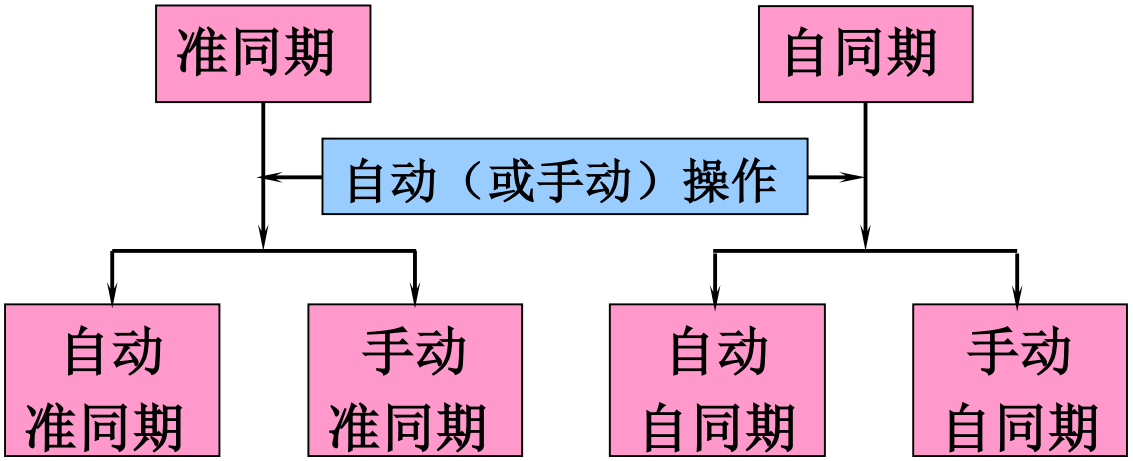
用于完成并列操作的装置称为同期装置；





由于同步发电机在开机时必须有并列操作，因此并列操作是水电站一项重要且经常进行的操作。**在正常运行时进行并列操作，以便使机组投入系统并列运行；在系统或电站发生事故时，通过并列操作来迅速恢复水电站甚至整个系统的正常运行。**

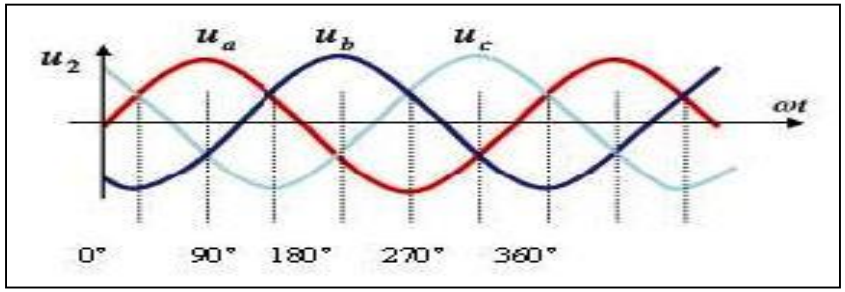
水轮发电机有**准同期**和**自同期**两种并列方式，并且各自又分为**手动操作**和**自动操作**：

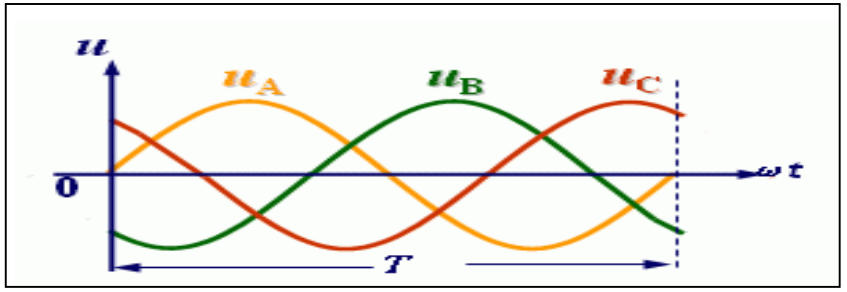


2、准同期

同步发电机准同期并列的条件：

发电机与电力系统的相序相同；	发电机与电力系统的频率相同；	发电机与电力系统的电压相同；	发电机与电力系统的相位相同。
$(A,B,C)_G=(A,B,C)_{sys}$	$f_G=f_{sys}$	$U_G=U_{sys}$	$\varphi_G=\varphi_{sys}$





如果完全满足并列条件的并列操作，发电机定子回路的冲击电流将为零，对机组将不会产生电流或电磁力矩的冲击。

发电机与电力系统的相序相同，在制造过程中保证：

发电机制造过程



但是，在实际操作中除了相序，很难精确满足并列条件。实际上，只要造成的电流冲击和电磁力冲击不超过允许范围，就不会对机组造成危害。但在采用准同期方式并列时必须防止非同期并列，否者可能使得发电机遭到破坏。

非同期并列操作可能使机组严重损坏：

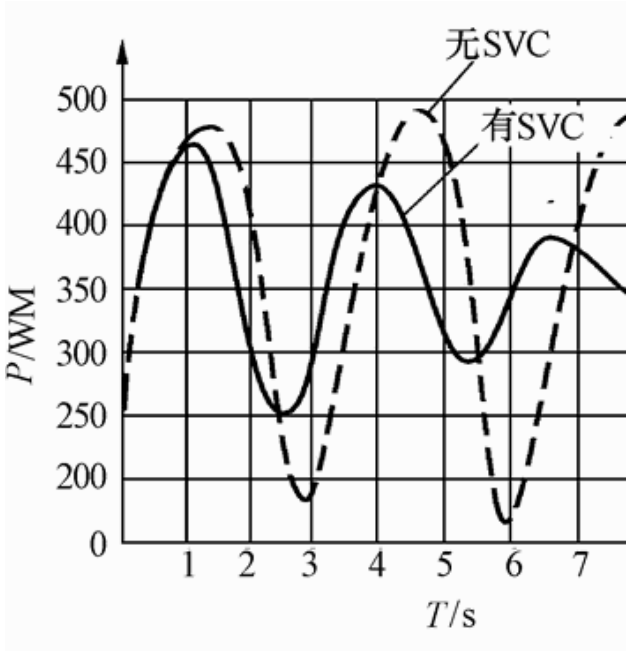
①如果相位差为*180*°时非同期合闸，则发电机定子绕组的冲击电流将比发电机出口的三相短路电流大一倍；

②如果电压或频率不相同，将对机组产生很大的电磁冲击力，甚至高达额定力矩的*8~26*倍。而发电机出口短路时的最大电磁力矩只有额定力矩的*3~8*倍；

非同期并列是发电厂的一种严重事故，它对有关设备如发电机及其与之相串联的变压器、开关等破坏力极大，严重时会将发电机线圈烧毁、端部变形，即使当时没有立即将设备损坏，也可能造成严重的隐患。

就整个电力系统而言，如果一台大型机组发生非同期并列，则影响很大，有可能使这台发电机与系统间产生功率振荡严重地扰乱整个系统的正常运行，甚至造成崩溃。





可能造成非同期并列的原因为：

(1)运行人员操作不当造成的非同期并列。有些运行人员总认为并网是一项很熟练的操作，就不严格执行操作制度，麻痹大意，不认真，同期控制开关忘合或打错位置，造成非同期并网。

(2)交流电压回路、同期回路有问题(包括电压互感器的一、二次接线错误)。准同期并网必须依靠同期检查装置来判断是否满足同期条件，而同期检查装置测量的都是电压互感器的二次电压，如果互感器的接线错误、交流电压回路和同期回路有问题，同期检查装置就会发生错误的判断，造成非同期并网。YY接线，YD接线。

(3)直流系统接地、主开关控制回路故障。主开关控制回路发生两点接地及其他一些故障，会使合闸回路自己接通，在发电机起动过程中给上控制电源就会造成非同期并网。

(4)**同期检查继电器、自动准同期装置故障**，此时就无法判断他们引入电源的真实性和准确性，这时进行操作，也会发生非同期并网。

(5)**主开关机械故障合闸速度慢**，当同期装置确认同期发出合闸命令，而主开关合闸速度慢就会错过同期的时间，造成非同期并网。



防止非同期并列的措施：

(1)发电机非同期并列的处理

发电机的非同期并列应根据事故现象正确判断处理：

①当同期条件相差不悬殊时，发电机无强烈的振动和轰鸣声，且表计摆动能很快趋于缓和，则不必停机，机组会很快被系统拉入同步，进入稳定运行状态。

②若非同期并列对发电机产生很大的冲击和引起强烈的振动，表计摆动且不衰减时，应立即解列停机，待**试验检查**确认机组无损坏后，方可重新启机并列。

试验检查：待发电机转动停止后，测量定子绕组绝缘电阻，并打开发电机端盖，检查定子绕组端部有无变形，查明确无受损后方可再次起动。

(2)设备变更时要坚持定相

发电机、变压器、电压互感器、线路新投入(大修后投入），或一次回路有改变、接线有更动，并列前均应定相。

所谓**定相**，就是对变压器、电压互感器、发电机、电源联络线路等需要联网或并网运行的电气设备，采用具体的操作方法和步骤，将定相设备的一次侧与运行中设备的一次侧接通，并以该运行设备二次侧接线组别为标准，同待定相设备二次接线组别作比较，确定他们电压相位和相序的方法。

(3)防止并列时人为发生误操作

1）值班人员应熟知同期回路及同期点。

2）在同一时间里不允许投入两个同期电源开关，以免在同期回路发生非同期并列。

3）手动同期并列时，要经过同期继电器闭锁，在允许相位差合闸。严禁将同期短接开关合入，失去闭锁，在任意相位差合闸。

4）两路分别接自不同频率的电源系统，不准直接并列。

5）电网电源联络线跳闸，未经检查同期或调度下令许可，严禁强送或合环。

（4）保证同期回路接线正确、同期装置动作良好

1）同期(电压）回路接线如有变更，应通过定相试验检查无误、正确可靠，同期装置方可使用。

2）同期装置的闭锁角不可整定过大。

3）自动(半自动）准同期装置，应通过假同期试验、录波检查特性（导前时间、频差、压差正常），方可正式投入使用。

4）采用自动准同期装置并列时，同时也可将手动同期装置投入。通过同期表的运转，来监视自动准同期装置的工作情况。特别注意观察是否在同期表的同期点并列合闸。

5）断路器的同期回路或合闸回路有工作时，对应一次回路的隔离开关应拉开，以防断路器误合入、误并列。

（5）同期系统的运行

1）同期系统的操作应编入运行规程，明确操作任务、操作要求、操作程序和注意事项，规程每年进行一次复核，并随设备改造及时修订。

2）手动准同期的运行操作，必须由经过手动准同期操作培训合格的人员担任，严禁未经培训合格的人员以手动准同期方式进行实际操作。

3）同期并列正常宜采用自动准同期并列方式，同期点的并列操作，应由有经验的主值班员及以上岗位担任监护人，经培训合格的运行人员担任操作员。

4）在监控系统工作站或现地单元上进行断路器合闸操作时，应区分检同期和检无压合闸两种状态，禁止检同期和检无压模式的自动切换。

5）同期装置参数写保护锁只能由继电保护专业人员解开，其他人员不得解锁；参数整定密码应注意保密，不得公开。

（6）准同期并列时应遵循的原则

1）同期检查闭锁继电器必须处于投入状态。

2）同步表最长运行时间不得超过15min 或按产品说明书规定。

3）完成同期并列操作后，应立即将准同期装置复位。

4）进行同期并列操作时，禁止检修人员在同期回路进行工作。

5）发生下列情况之一，禁止进行并列操作：

①同步表旋转过快、跳跃或同步表停在零位不动。

②待并发电机的原动机转速不稳定。

③同期点断路器异常。

④同步表与自动准同期装置动作不一致。

⑤同期回路有工作，未通过定相法确认同期回路接线的正确性前。

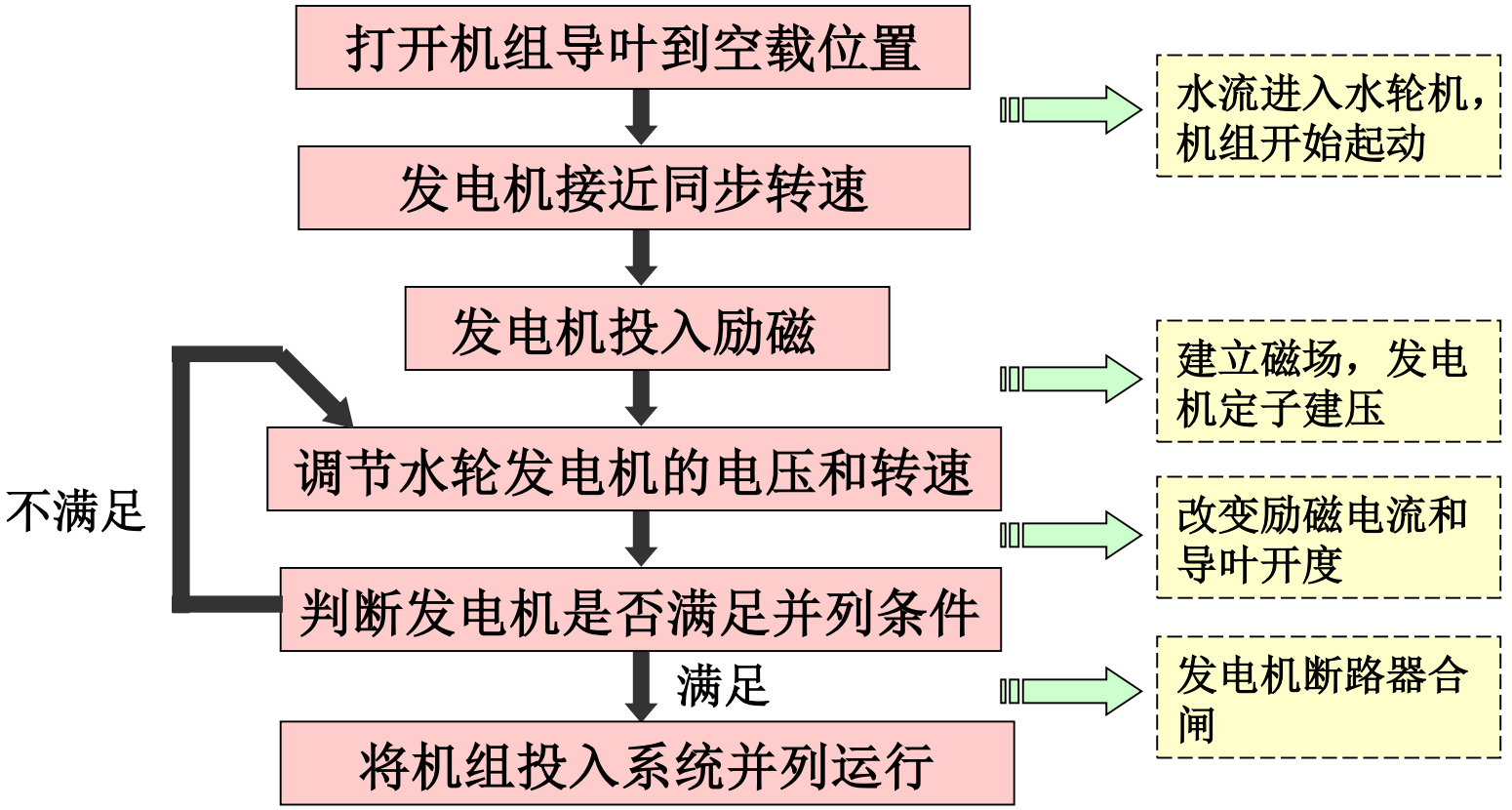
⑥同期点任何一侧三相电压严重不平衡时。

⑦同期装置异常或进行整定值更改，未通过试验方法确认整定值正确性前。

⑧同期装置的电源所在的直流系统发生接地故障时，禁止使用该装置进行并列操作，防止直流两点接地造成非同期并网事故。

有如此多防止非同期并列的措施，也对应说明非同期并列的可能性很多，但实际中准同期并列可能发生的危险并不是不可避免的。在正常情况下，特别是采用**自动准同期**时，这种并列方式可以得到比较理想的结果，因此这种并列方式得到了广泛的应用，成为水电站的主要并列方式。

同步发电机准同期并列操作的过程：

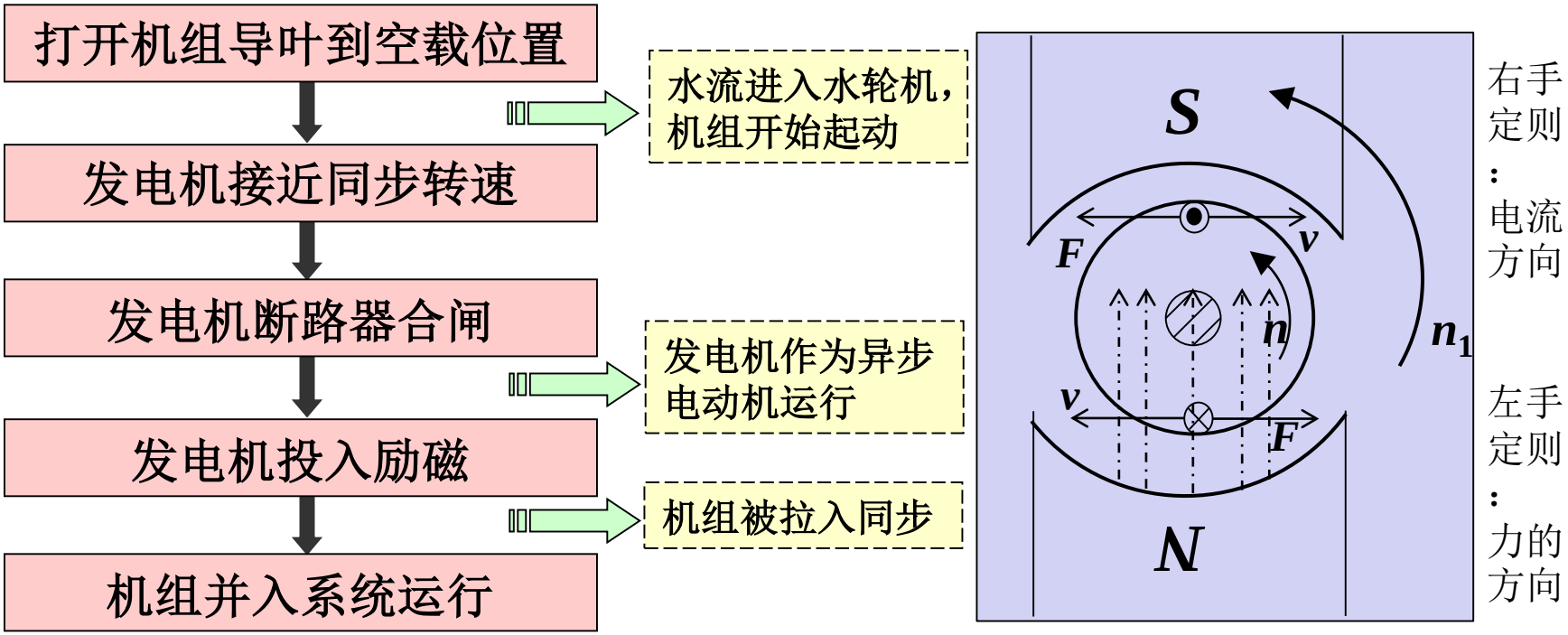


注：导叶空载位置，就是指在空载情况下，导叶开到这个位置，机组运转速度在额定转速附近，出力为0。

3、自同期

系统发生事故时，电压和频率可能降低并不断发生变化，此时用准同期方式并列将发生困难，因此就出现了自同期的并列方式。自同期是将未励磁而转速接近同步转速的发电机投入系统，并立即（或经过一定时间）加上励磁，这样发电机经很短的时间便被自动拉入同步（阻尼绕组作用）。

自同期操作的过程：



自同期的优点：

- 不需调整电压、相位和精确调整转速，操作简单；
- 由于并列操作时未投励，消除了非同期并列的可能；
- 与准同期相比，大大缩短了并列的时间。

采用自动自同期并列的水轮发电机，从发出开机脉冲到发电机投入系统，一般只需要20-40s甚至更短的时间。因此，自同期并列为电力系统发生故障而出现低频、低压时，启动备用机组创造了很好的条件，对于防止事故扩大，迅速恢复系统起到重要作用。事故备用

由于发电机以自同期投入系统时，未励磁的发电机相当于异步电动机，因此自同期存在如下缺点：

①出现短时间的电流冲击，并使系统电压下降；

②冲击电流引起的电磁力可能对定子绕组绝缘和定子绕组端部造成不良影响；

③冲击电磁力矩将使机组大轴产生扭矩，并引起振动。

冲击电流产生的电磁力可能对定子绕组绝缘和端造成累计性变形和损害。特别是自同期时发电机处于冷状态，造成的不良影响比热状态下的发电机出口三相短路更严重。



双手掰断铁丝

但一般情况下，冲击电流和冲击电磁力矩均比发电机出口三相短路时小，并且缩减快，通常不会对发电机造成损害。

因此，根据各种同期方式的优缺点，它们水电站在同期操作中的一般应用情况是：

- **首先**：以自动准同期作为机组正常时的并列方式，并带有同期闭锁装置；
- **其次**：以手动准同期作为备用，并带有同期闭锁装置；
- **最后**：在事故时，采用自动自同期并列。

注：为了防止手动操作失误或自动并列装置失灵而造成非同期并列，人们在同期操作回路中安装了同期闭锁装置。一般情况下，同期检查继电器是常闭接点，当待并的发电机电压和系统电压差及相位角大于整定值时，常闭接点打开，阻止合闸脉冲发出，从而起到了闭锁保护作用。

2.2 同期点的选择和同期电压的引入

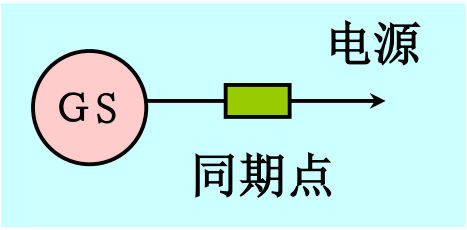
1、同期点的选择

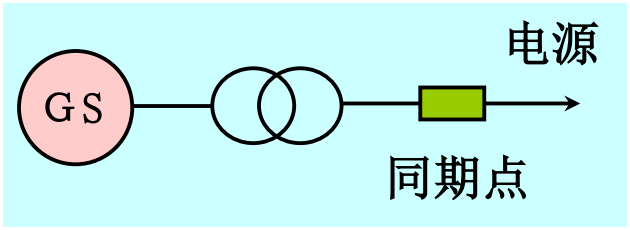
为了实现机组与系统的并列运行，水电站必须有一部分断路器由同期装置来进行操作，这些用于同期并列的断路器称为同期点。

选择同期点的基本原则是：如果一个断路器的两侧都有电源且可能不同步，则该断路器应该是同期点。

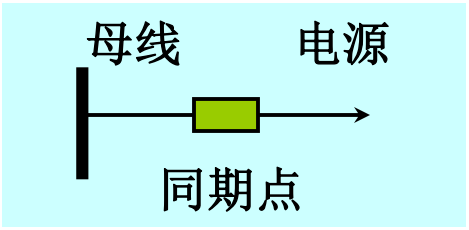
确定水电站同期点的一般原则有以下几点：

- 发电机或发变组的断路器是同期点；

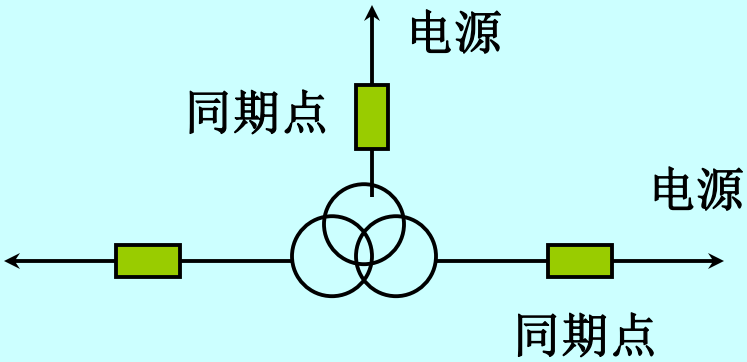




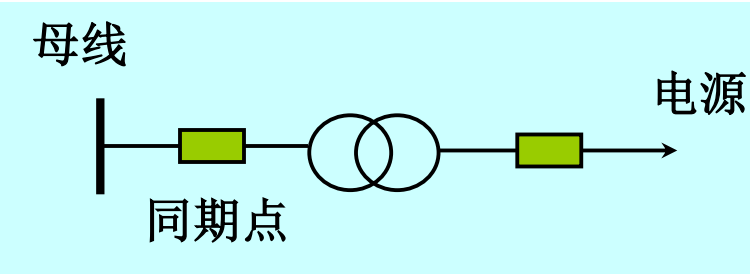
- 在对侧有电源的线路断路器是同期点；



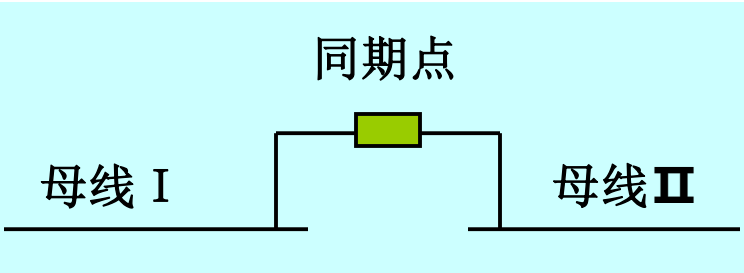
• 三绕组变压器或自耦变压器与电源连接的各侧断路器是同期点；



• 低压侧与母线连接的双绕组变压器，应有一侧断路器作为同期点，以便在变压器投入时进行并列操作；



• 分段断路器、母联断路器、旁路断路器是同期点。

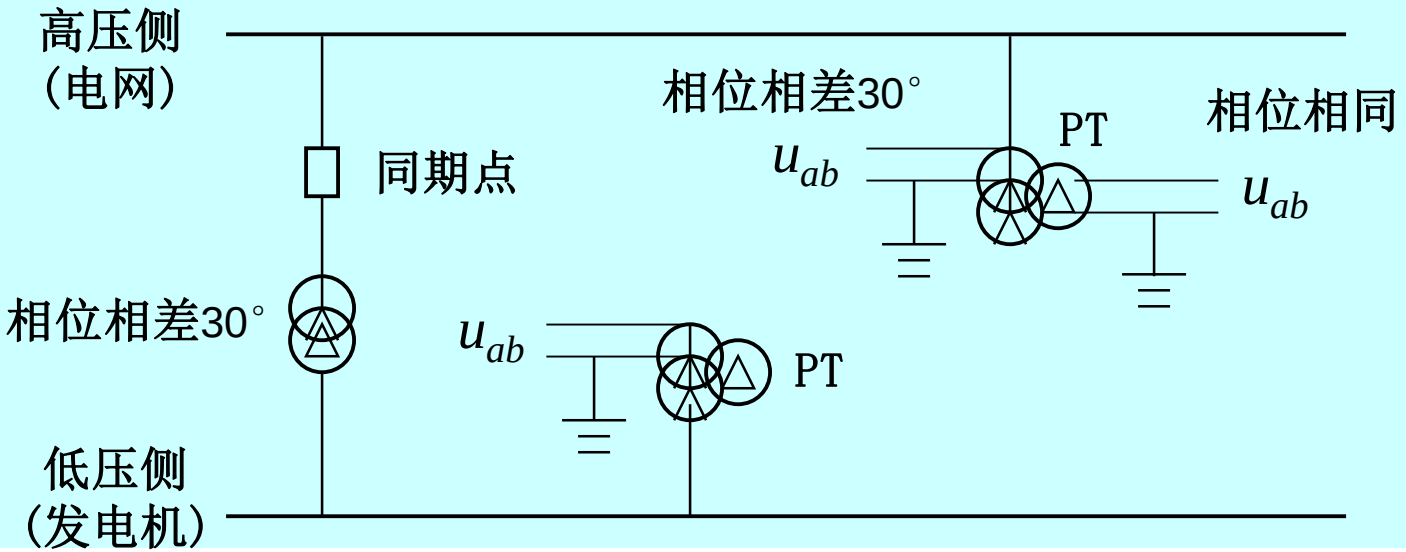


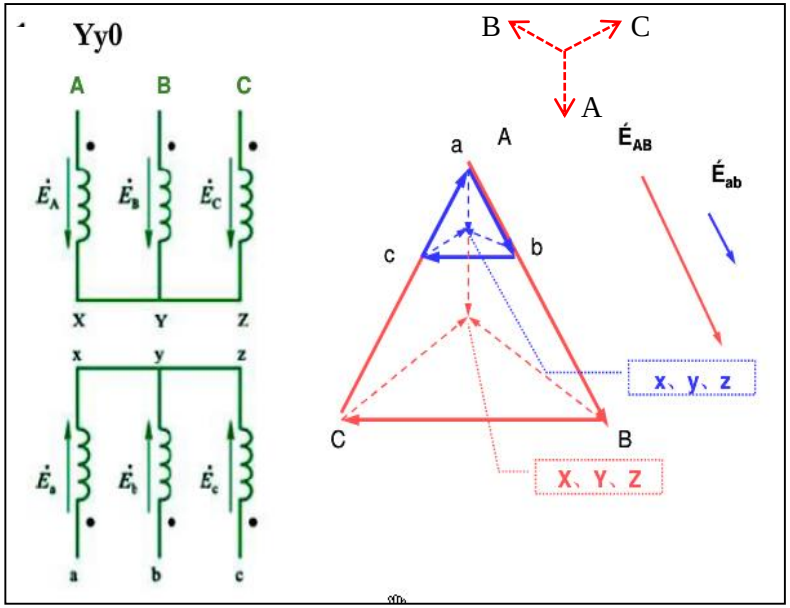
母联断路器：两条母线电气联系的纽带，一般情况下母联断路器是合闸状态，即母线并列运行；
分段断路器：连接两段母线的断路器。可将两段母线分段运行，也可实现单母线运行。
旁路断路器：在变电站多路供电时用到旁路母线，连接另一条电线进行供电的旁路切换装置

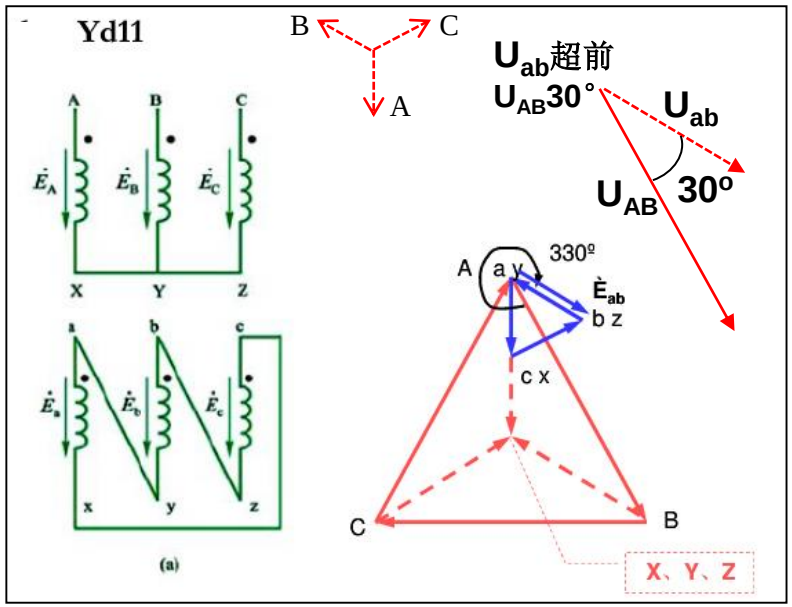
2、同期电压的引入

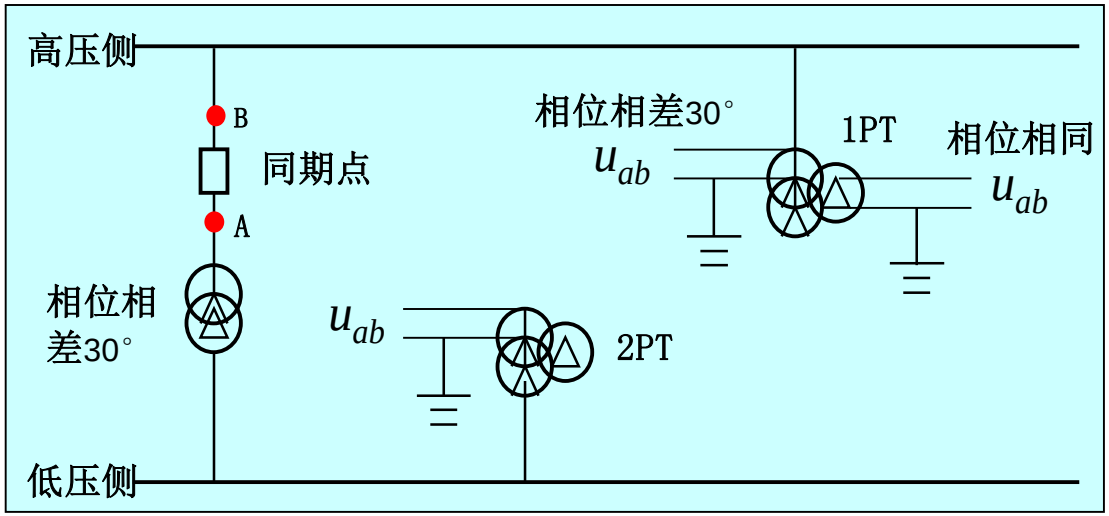
采用准同期方式并列时，需检查同期条件，而同期条件的判断是通过同期电压的检查来进行的。因此，需将待并发电机和系统的电压通过电压互感器引入同期装置，进行比较判断。

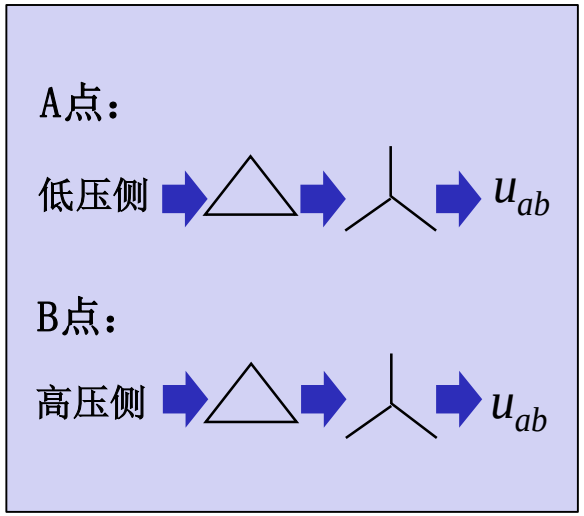
由于机组的升压变压器通常采用了Y, d_{11}接线，导致变压器两侧相间电压存在30°的相位差。在中性点接地系统中，为了校正引自PT(电压互感器)电压的相位，可从变压器高压侧PT接成开口三角形的绕组取得电压，使同期点两侧电压的相位相符。





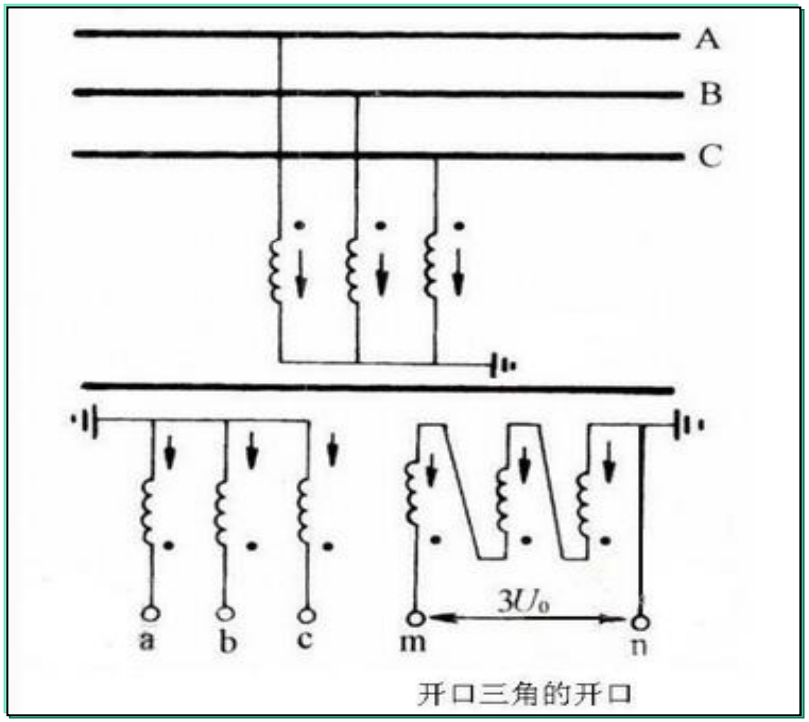




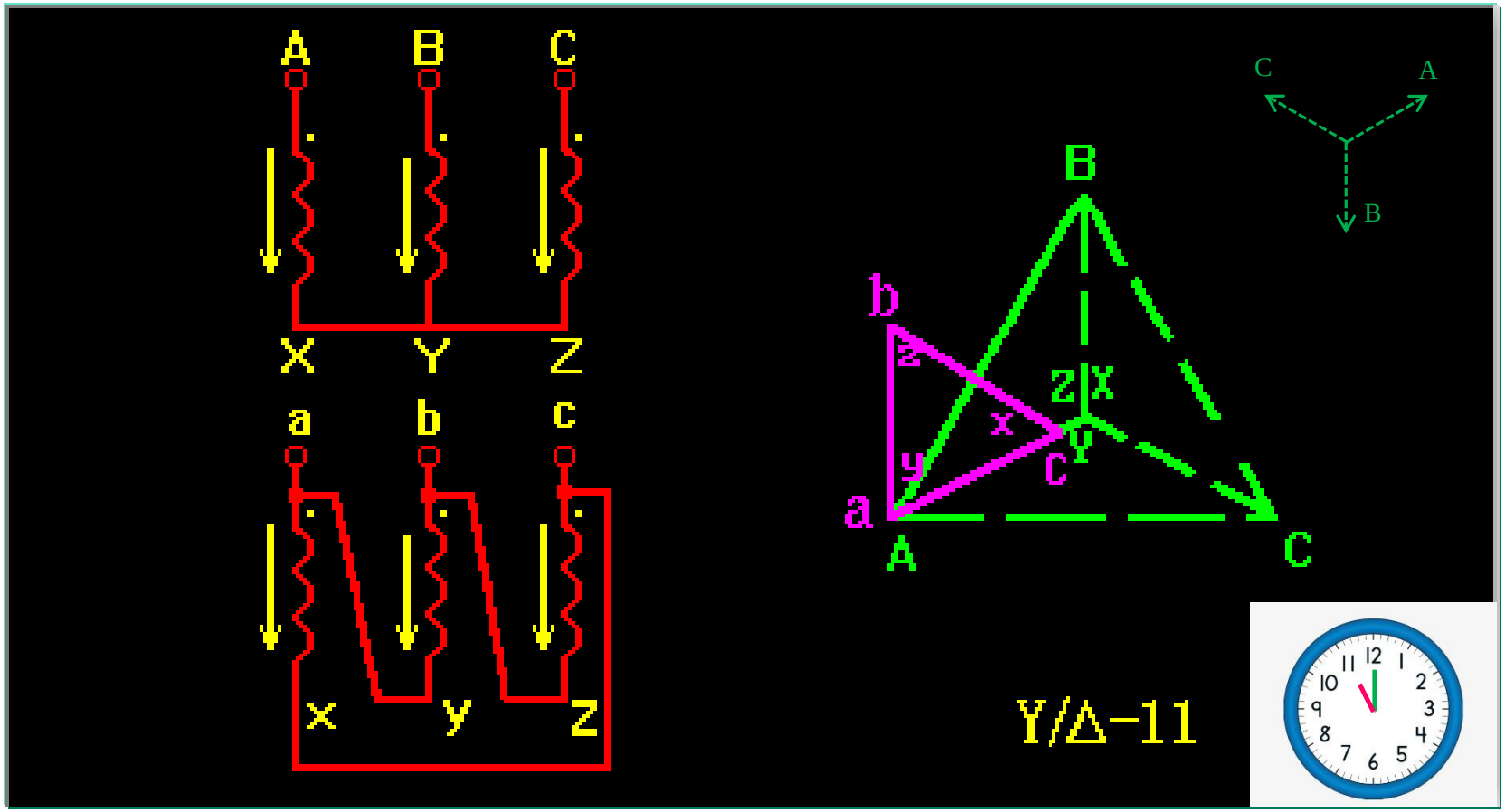


Y,d11接线，使A点所对应的U_{AB}的相位滞后2PT所对应的u_{ab}的相位30度。现对A点侧的u_{ab}与B点侧的u_{ab}进行同步检测，那么需要使B点所对应的U_{AB}的相位滞后1PT所对应的u_{ab}的相位30度，就可以消除接线差异带来的电位差，很显然1PT右边这个接线法满足要求。

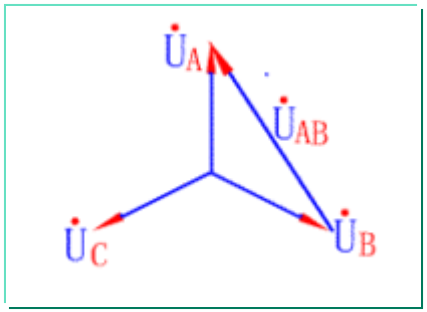
开口三角形接法如下所示，对于电压互感器的开口三角形接法。需注意的是，对于中性点不接地系统，上述引入电压的方法是不可行的，因为同期装置通常使用100V电压，而在那种系统中，互感器辅助二次绕组的两端，在正常情况下不可能得到100V电压。原因是在正常情况下，开口三角形的开口电压为零（三相平衡，矢量和为零），当发生单相接地短路，只有另外两相的电压矢量相加，开口处的电压就是正常两相的线电压，可实现输出100V。

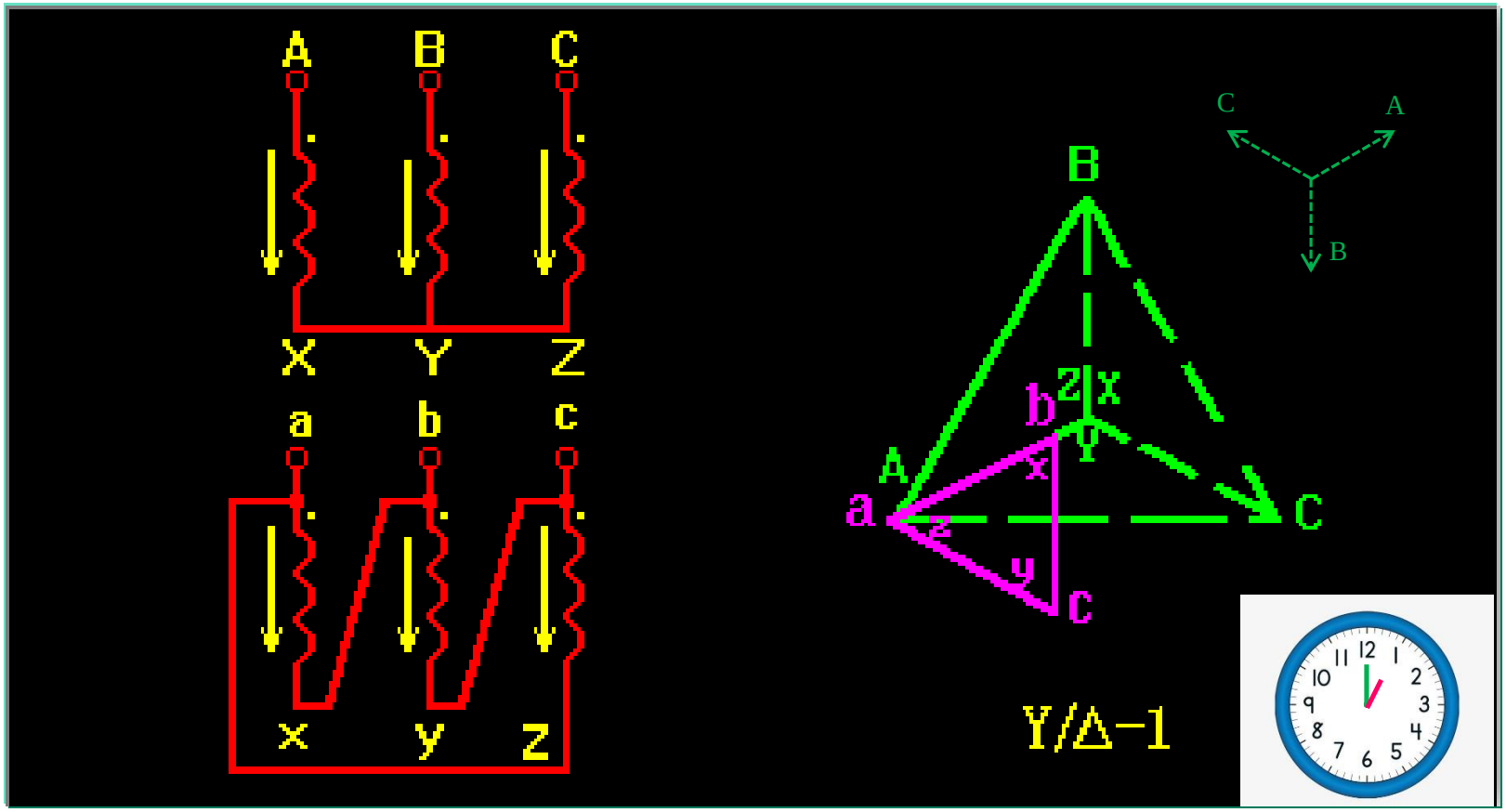


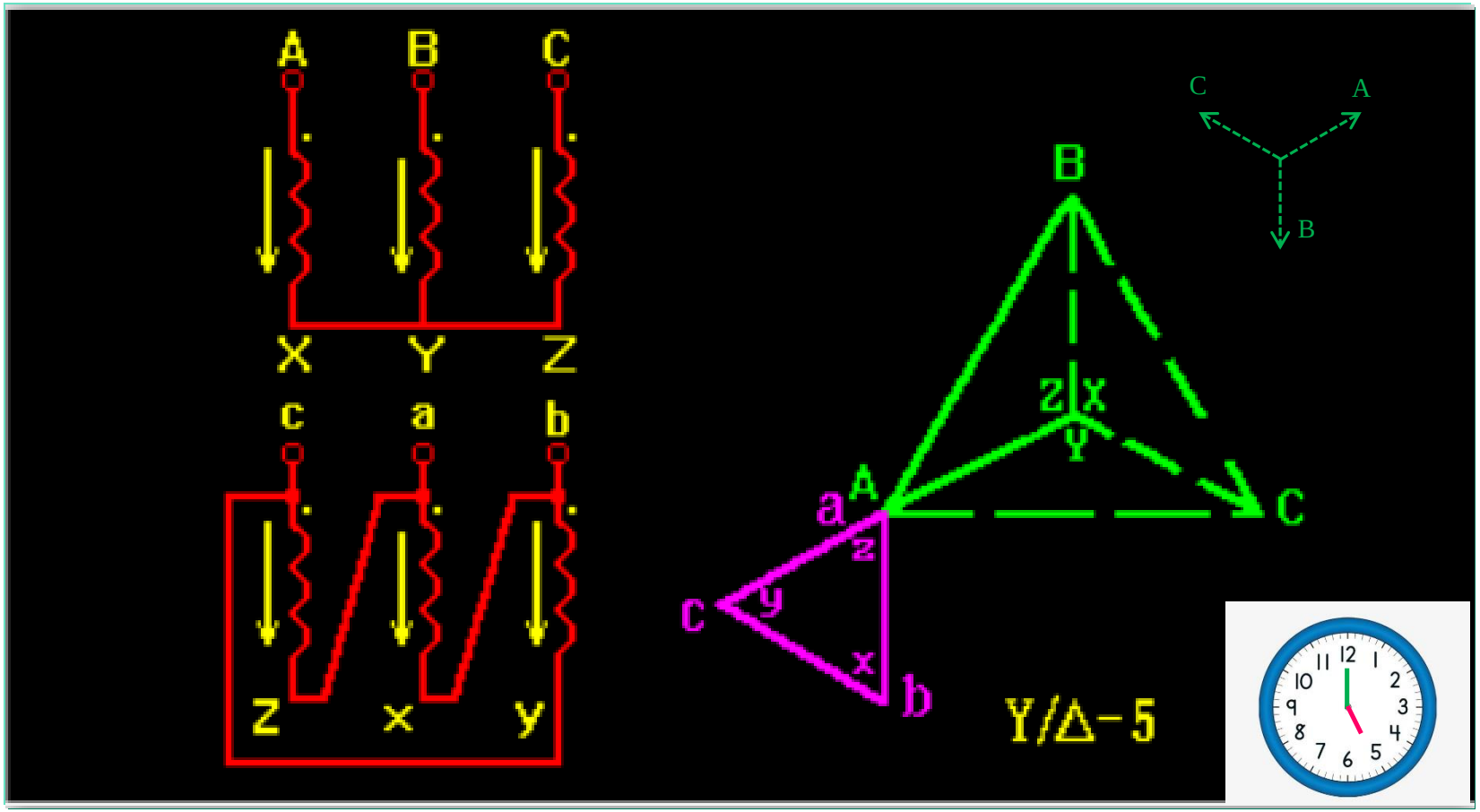
开口三角的开口

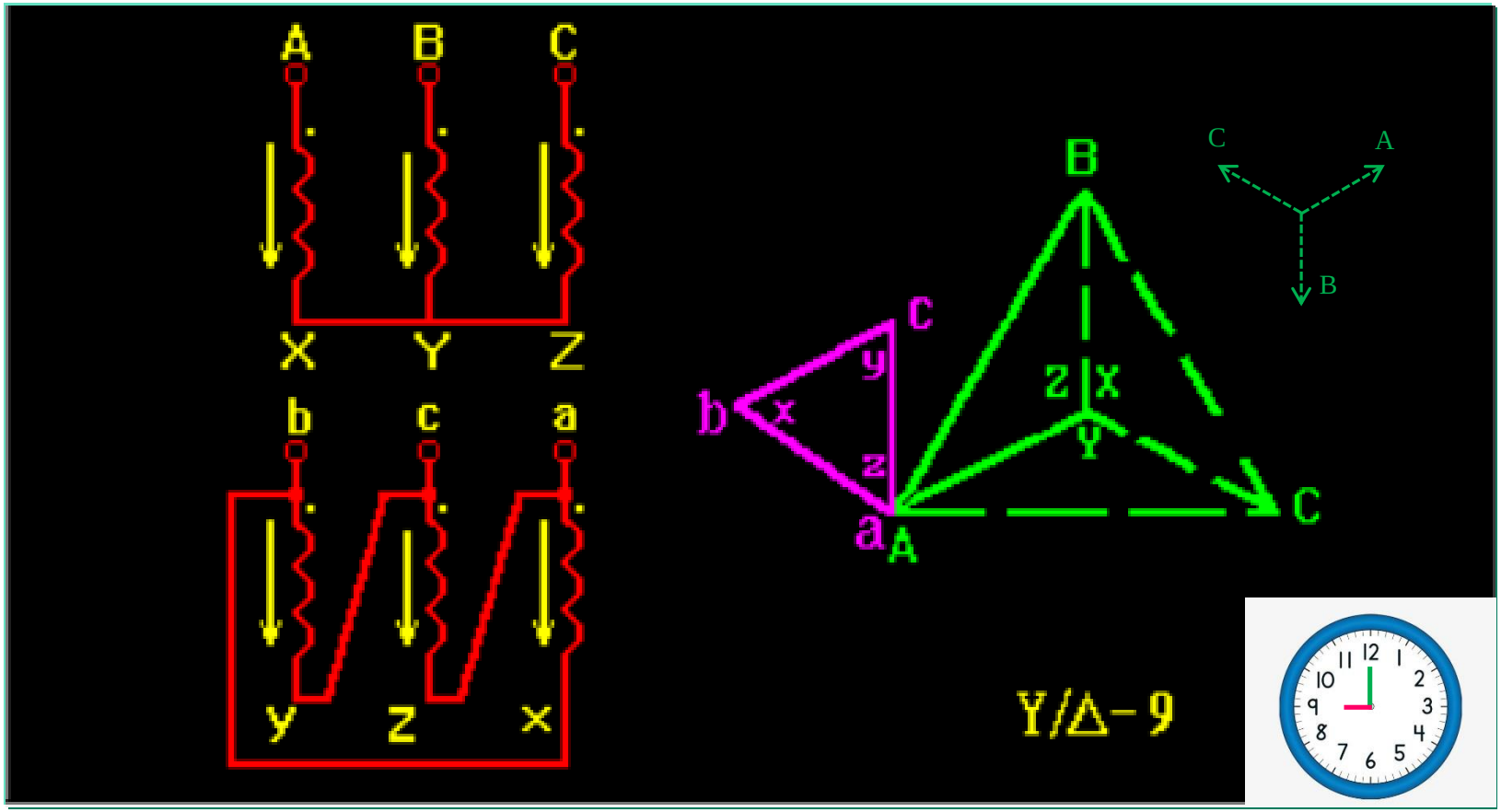


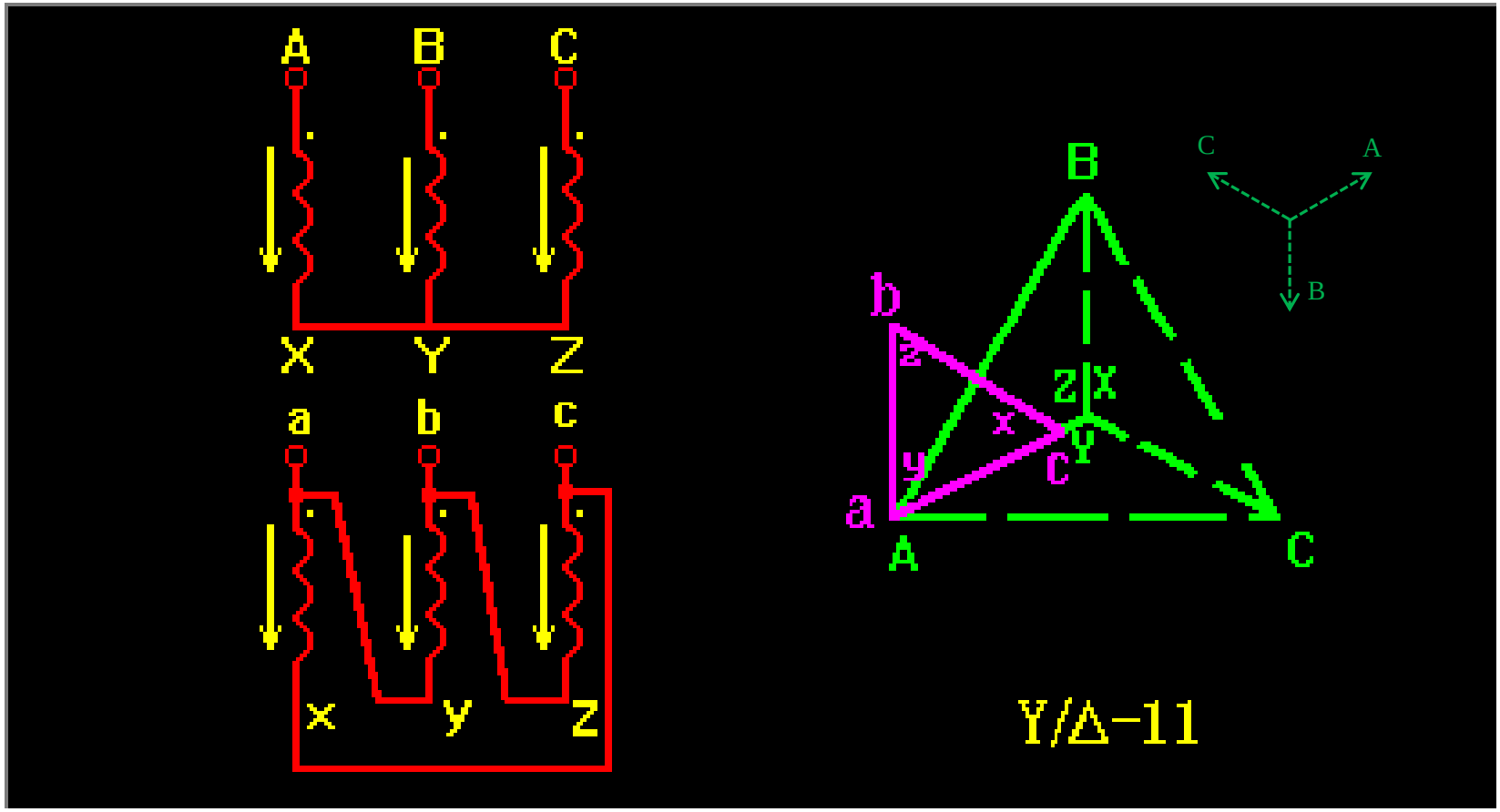
向量计算：




A
B
C
X
Y
Z
a
b
c
x
y
z
C
A
B
B
b
z
x
y
A
a
C
c
Y/Δ-1


A
B
C
X
Y
Z
c
a
b
z
x
y
C
A
B
B
z
x
y
A
a
C
c
z
y
x
b
Y/Δ-5


A
B
C
X
Y
Z
b
c
a
y
z
x
B
C
b
y
x
z
a
A
z
x
y
C
C
A
B
Y/Δ-9


A
B
C
X
Y
Z
a
b
c
x
y
z
B
C
A
B
b
z
x
y
a
c
A
C
Y/Δ-11

2.3 准同期点条件分析

准同期并列的理想条件是：待并发电机的电压与系统电压数值相等；频率相等；在投入发电机瞬间，电压间的瞬时相位差为零。此外，还应保证待并发电机与系统的相序（即旋转方向）相同，不过该问题在发电机安装调试时已经已经解决，可不作为并列的条件考虑。

在实际的并列操作中，上述三个条件一般很难同时满足。例如，当满足第二个条件时，发电机与系统是相对静止的，相位差保持不变。这样，第三个条件就难于实现。

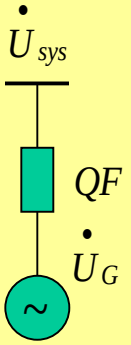
由于理想条件的难于实现，故并列时一般将产生电流和电磁力矩。为了把这些冲击控制在允许范围内，就必须对并列时的电压数值差、相位差和频率差提出一定的要求。

下面将以如图所示的发电机组并网为例来进行分析。

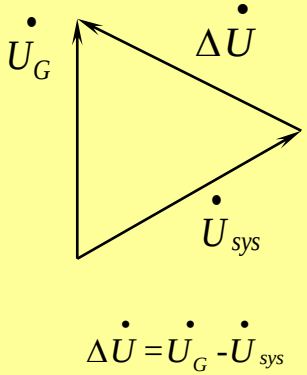
并列前同期点两侧的电压为：

发电机侧瞬时电压 $u_s(t)=u_G(t)=U_G\sin(\omega_G t+\varphi_G)$

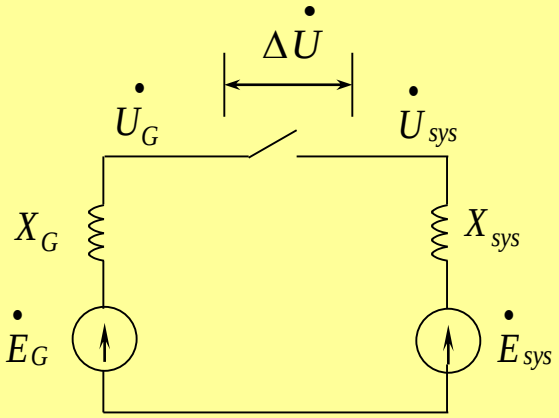
系统侧瞬时电压 $u_s(t)=u_{sys}(t)=U_{sys}\sin(\omega_{sys}t+\varphi_{sys})$



接线图



向量图



等效电路图

X_G 为发电机电抗，X_{sys} 为系统电抗。

1、对同期电压差的要求

设发电机并列时的电压向量图如下，设并列时：

- 发电机频率等于电网频率 $f_G = f_{sys}$；
- 发电机相角与电网相角差为零 $\Delta\varphi = \varphi_G - \varphi_{sys} = 0$；
- 发电机电压幅值与电网幅值不等 $\Delta U = U_G - U_{sys} \neq 0$。

此时，并网时冲击电流的瞬时值为

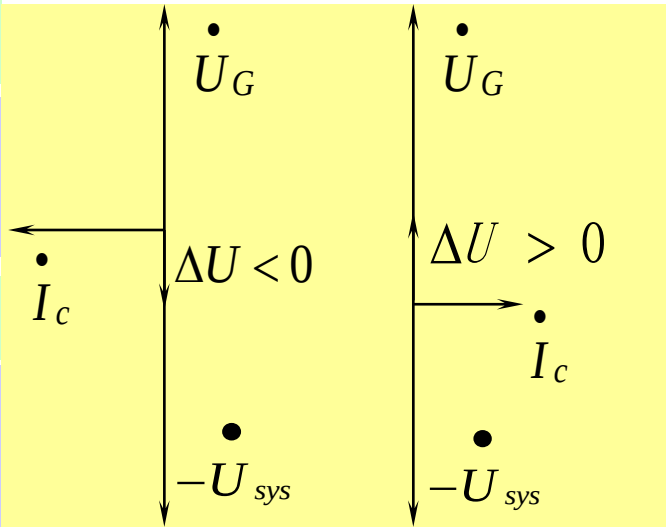
$$I_{c.\max} = \frac{1.8\sqrt{2}(U_G - U_{sys})}{X_d}$$

当 $\Delta U < 0$ 时，发电机吸收系统无功。

- 对发电机而言，I_c呈容性，起助磁作用；
- 对系统而言，I_c呈感性，起去磁作用。

当 $\Delta U > 0$ 时，发电机向系统输送无功。

- 对发电机而言，I_c呈感性，起去磁作用；
- 对系统而言，I_c呈容性，起助磁作用。



无功冲击电流不会引起电磁力矩冲击，但在I_c过大时可能使发电机定子过热，还可能导致绕组端部损坏。国家标准要求：

$$\Delta U \leq 5 \sim 10\% U_r$$

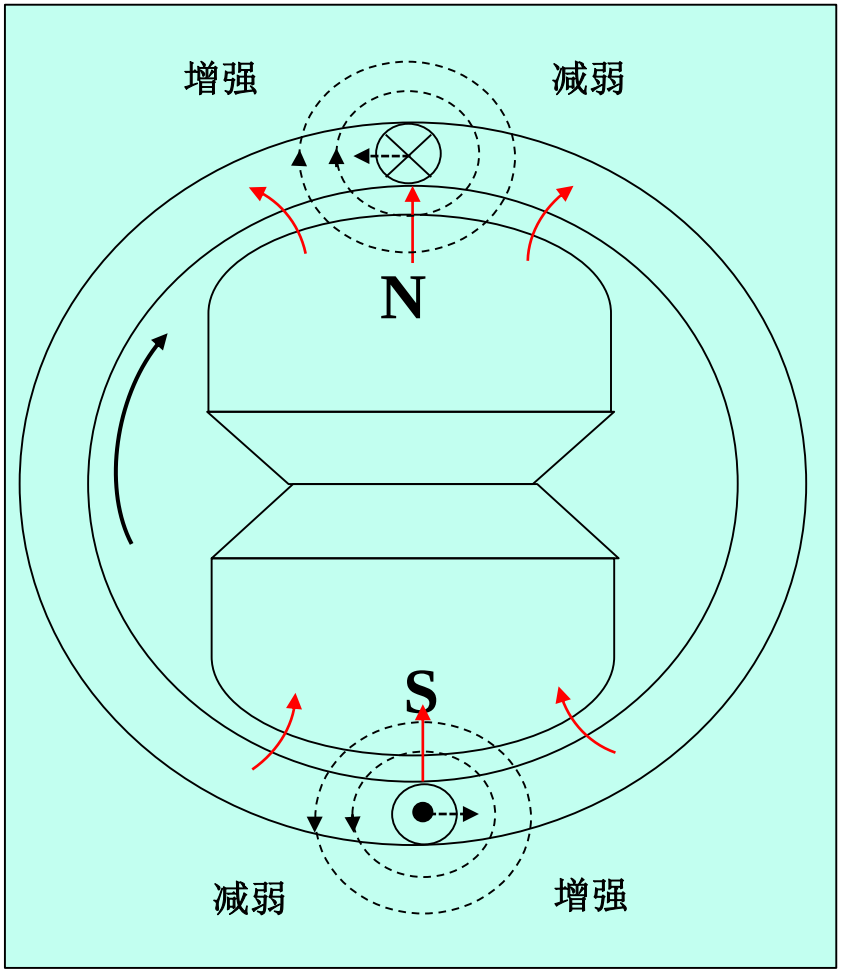
- 发电机发出或吸收无功主要是看机组运行时的励磁电流是否大于空载励磁电流，如果大于空载励磁电流则发出无功，小于空载励磁电流则吸收系统无功。ΔU>0时发出无功。ΔU>0说明U_G较大，即励磁较大
- 一般情况下机组都是发出无功、有功，同时负荷也多为感性负荷。根据功率平衡，机组发出的无功功率和感性负载吸收的无功功率基本相等时系统电压（或并网的机组电压）才能够维持恒定。
- 当机组发出的无功大于感性负荷消耗的无功时，发电机电压会大于额定电压，此时励磁系统会及时进行调整以维持并网机组的机端电压。

为什么I_c呈容性，起助磁作用？ I_c呈感性，起去磁作用？这可以从主磁场与电枢磁场的相互作用来理解，具体如下：

当电枢绕组中没有电流通过时，由磁极所形成的磁场称为主磁场，近似按正弦规律分布。当电枢绕组中有电流通过时，绕组本身产生一个磁场，称为电枢磁场。电枢磁场对主磁场的作用将使主磁场发生畸变，产生电枢反应：

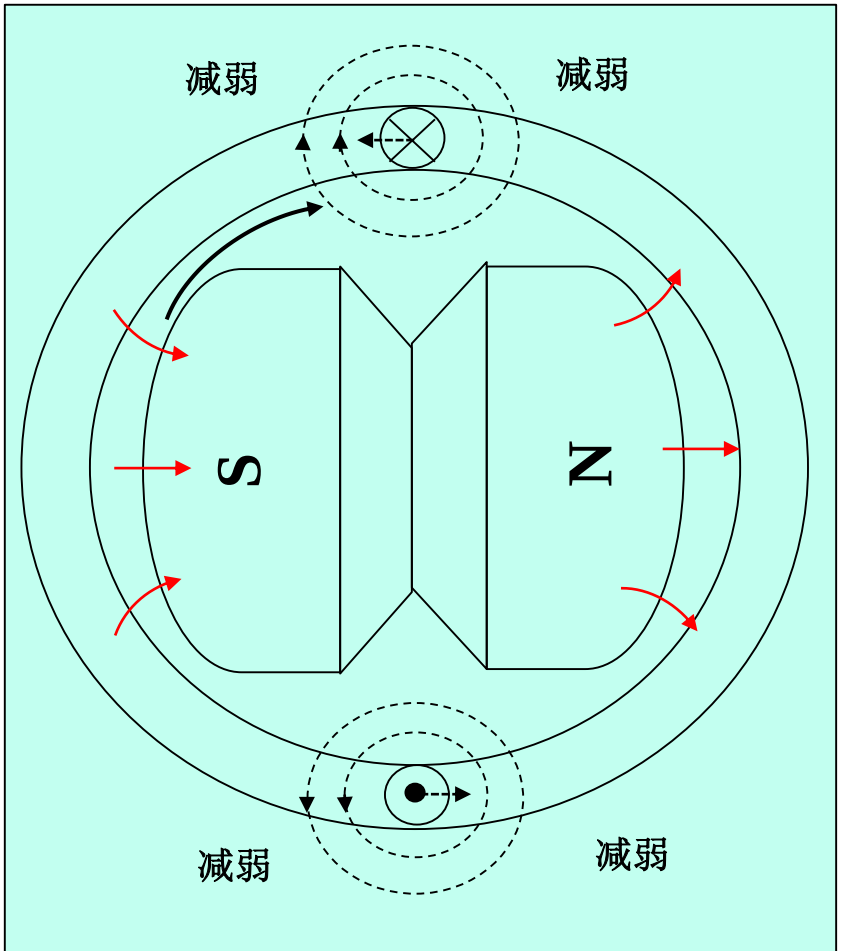
（1）纯电阻性负载时的电枢反应

电枢磁场的电动势与电流相位相同，电枢磁场使主磁场发生畸变，**一半加强，一半削弱**；



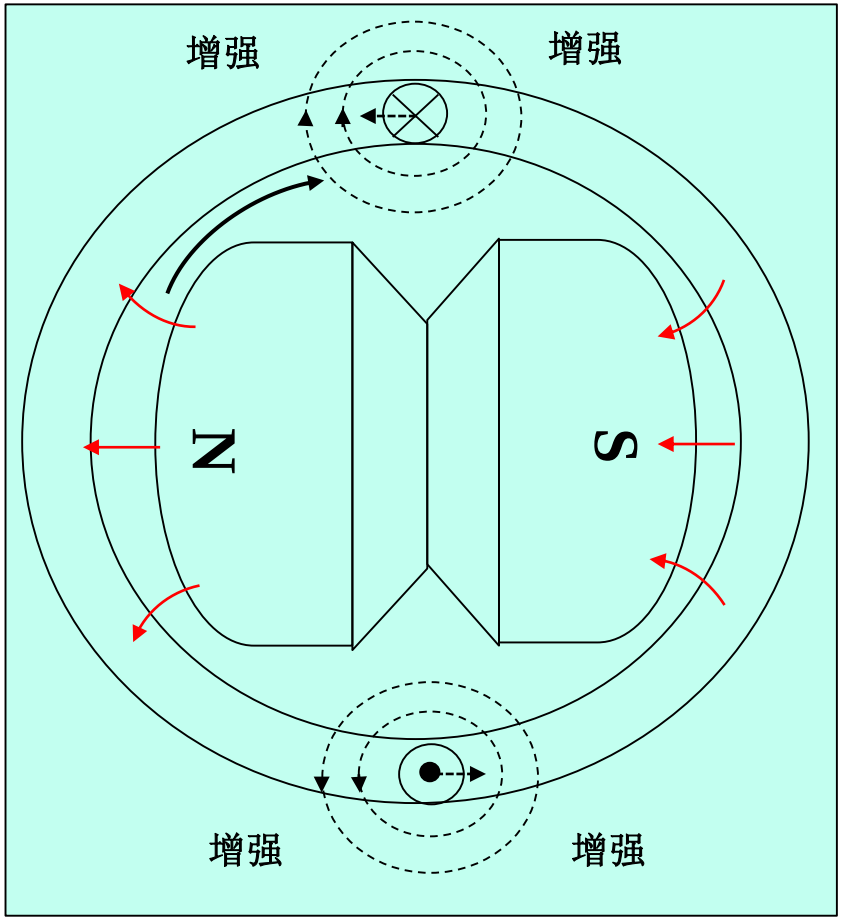
（2）纯电感性负载时的电枢反应

电枢磁场的电流滞后于电动势90度，电枢磁场产生的电动势与主磁场产生的电动势方向相反，因此削弱了主磁场电动势，这就是为什么三相电路中含有电感性元件时电压下降的原因；这叫**去磁电枢反应。**



（3）纯电容性负载时的电枢反应

电枢磁场的电流超前于电动势90度，因电枢磁场与主磁场成90度，电枢磁场产生的电动势与主磁场产生的电动势方向相同，因此加强了主磁场电动势，这就是为什么三相电路中含有电容性元件时端电压上升的原因；这叫**助磁电枢反应**。



2、对同期相位差的要求

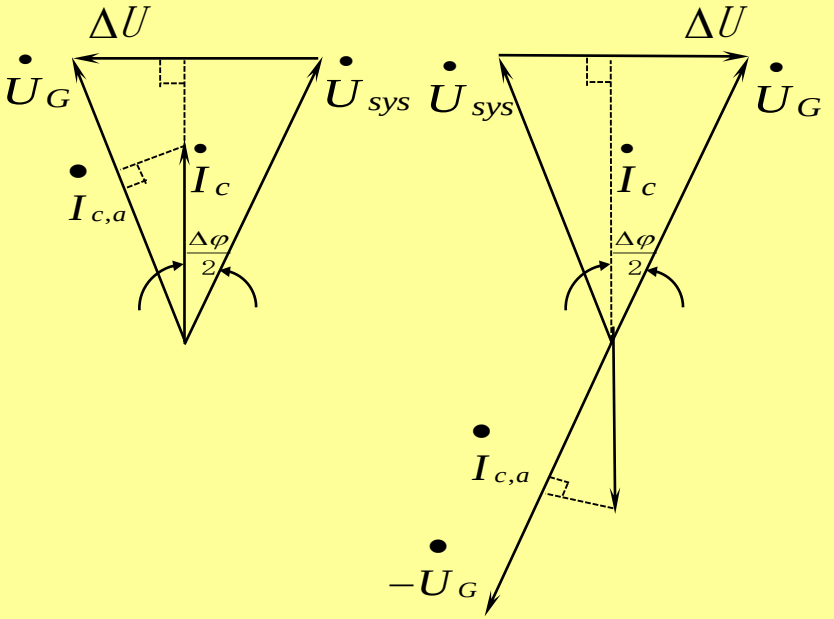
设发电机并列时的电压向量图如下，设并列时：

- 发电机频率等于电网频率 $f_G = f_{sys}$；
- 发电机相角与电网相角差不为零 $\Delta\varphi = \varphi_G - \varphi_{sys} \neq 0$；
- 发电机电压幅值与电网幅值相等 $\Delta U = U_G - U_{sys} = 0$。

此时，并网时冲击电流的瞬时值为

$$I_{c.\max} = \frac{1.8\sqrt{2}U_{sys}}{X_d}\sin\frac{\Delta\varphi}{2}$$

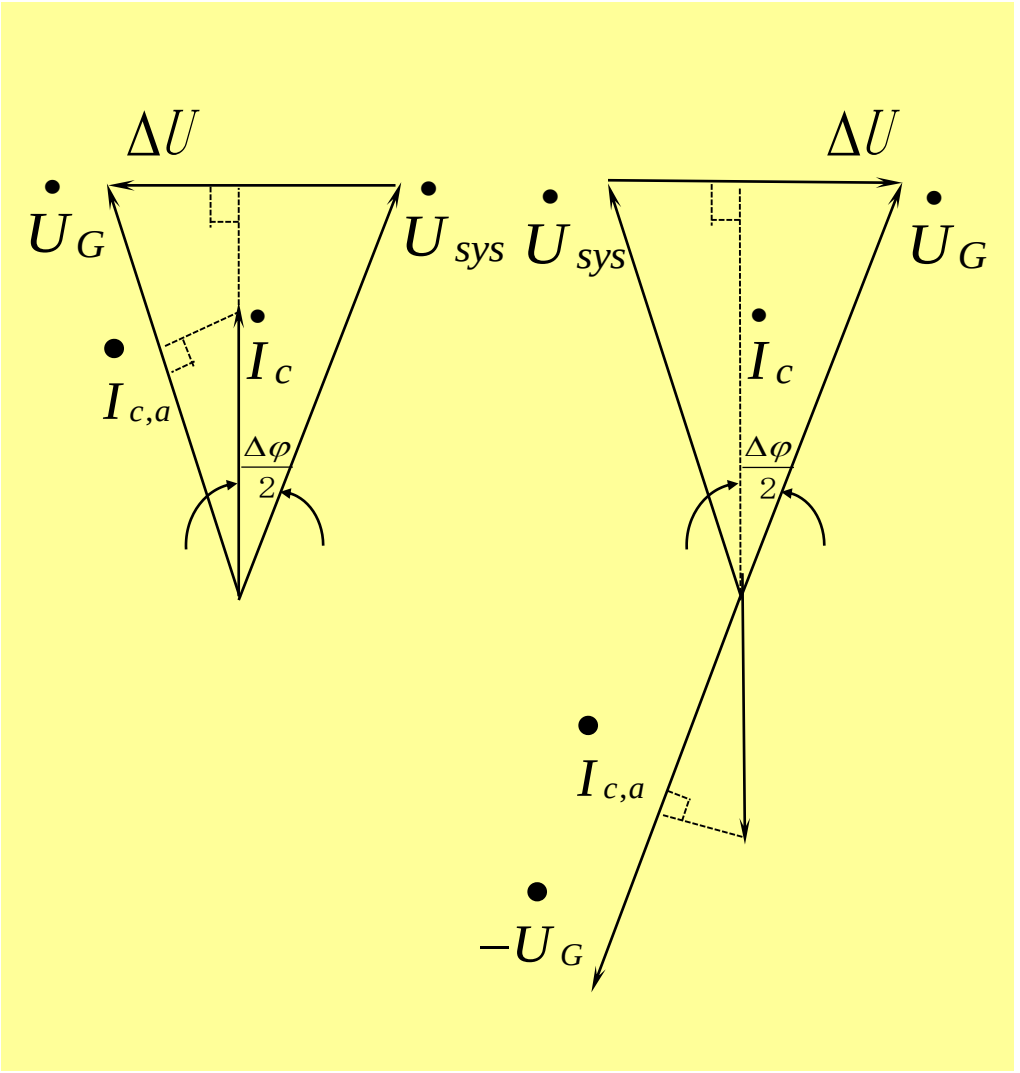
当$\Delta\varphi$很小时，可以认为I_c与U_G的夹角为0，所以由相位差产生的冲击电流I_c主要为有功冲击电流。



当U_G超前U_{sys}时：I_c的有功分量与U_G方向相同，发电机并列后向系统送出有功。（送出后，频率减小，直至重合后达到新平衡）

当U_G滞后U_{sys}时：I_c的有功分量与U_G方向相反，发电机并列后向系统吸收有功。（吸收后，频率增加，直至重合后达到新平衡）

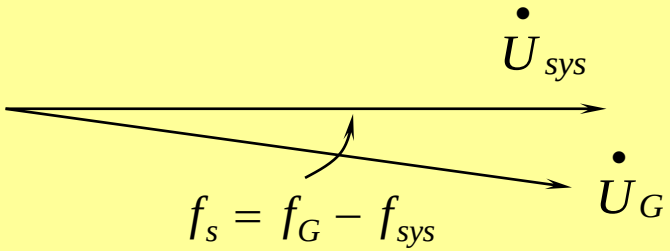
无论是向系统输出有功，还是吸收有功，都会对机组和系统造成冲击，因此国家标准要求发电机并列时的相位差$\Delta\varphi < 10^{o}$。

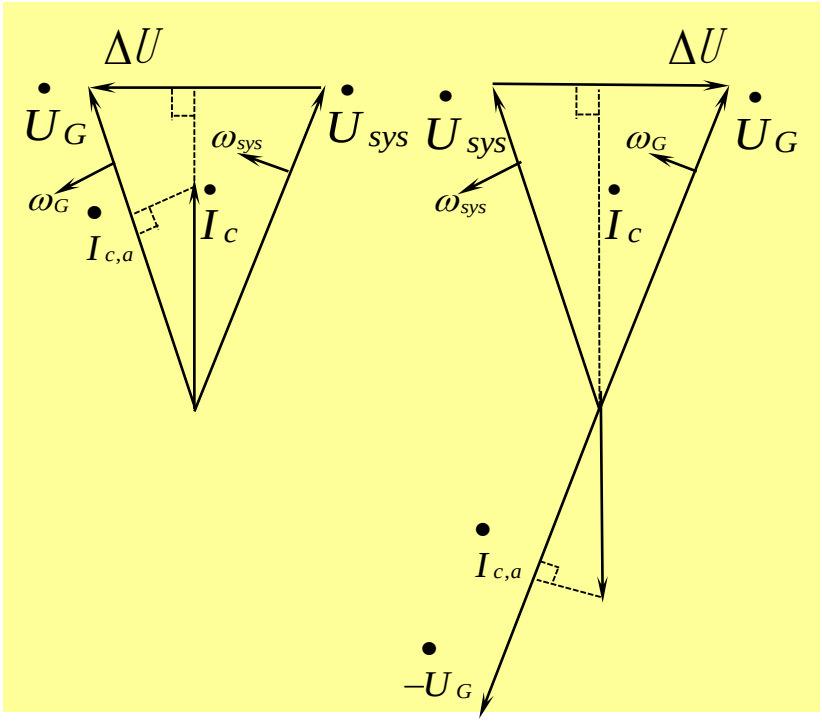


3、对频率差的要求

设发电机并列时的电压向量图如下，设并列时：

- 发电机频率与电网频率不相等 $f_G \neq f_{sys}$；
- 发电机电压幅值与电网幅值相等 $\Delta U = U_G - U_{sys} = 0$。



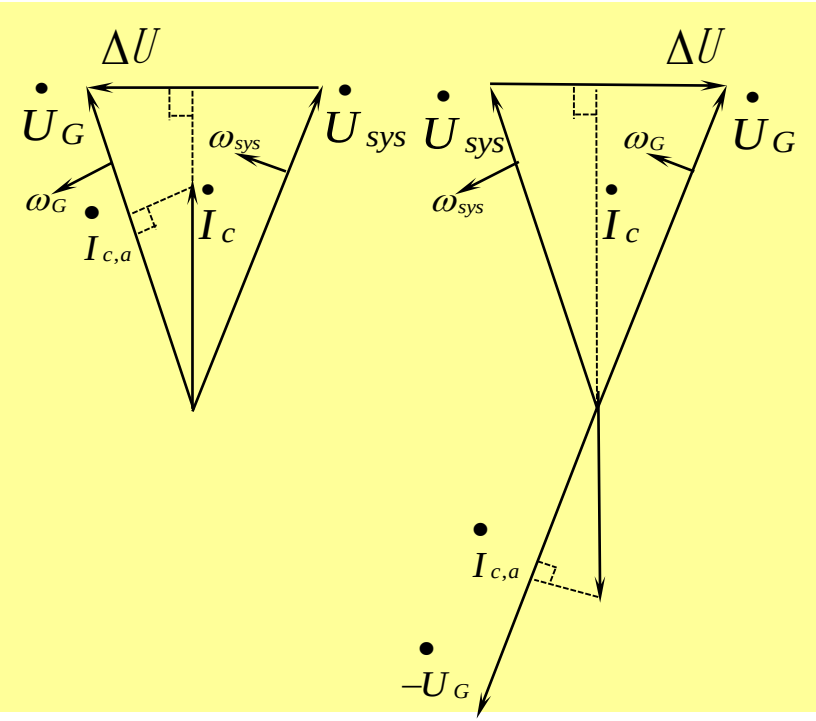


当 $f_G > f_{sys}$ 时：发电机并列后，U_G 将超前 U_{sys} ，因此产生冲击电流，由于冲击电流 I_C 的有功分量与 U_G 方向相同，故发电机并列后向系统送出有功功率，对机组而言将产生制动力矩(转子能量减少)，结果使转子减速而与系统同步。

当 $f_G < f_{sys}$ 时：发电机并列后，U_G 将滞后 U_{sys} ，因此产生冲击电流，由于冲击电流 I_C 的有功分量与 U_G 方向相反，故发电机并列后向系统吸收有功功率，机组的转速上升，最后与系统同步。

国家标准要求并列时的频率差不超过其额定值的**0.2~ 0.5%** f_r，即：

$$0.1 \sim 0.25Hz$$

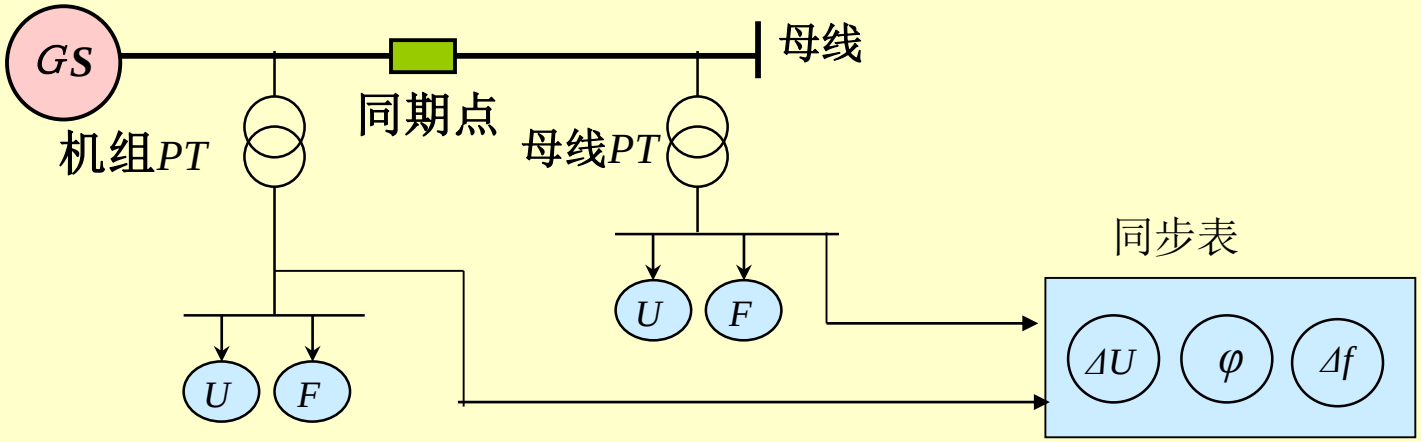


2.4 手动准同期

手动准同期是指：由运行人员借助于仪表对发电机的电压和频率进行调节，在满足准同期并列的三个条件时，运行人员手动操作同期点断路器合闸，将发电机并入系统。

1、手动准同期操作时所需要的仪表

- 指示机组电压和系统电压的两只电压表；
- 指示机组频率和系统频率的两只频率表；
- 指示机组与系统频率差与相位差的一只同步表。



同步表是一种指针可以旋转的仪表，当待并发电机电压频率与系统电压频率相同，相位差相同时，表的指针将固定在垂直向上的位置（同步位置）上不动。

当待并发电机电压频率与系统电压频率相同，但相位差不为零时，表的指针将偏离上述位置一个角度，并保持不动：当发电机电压相位滞后于系统电压相位α角时，指针将向“慢”的方向偏转α角；反之，则向“快”的方向偏转α角。



当待并发电机电压频率与系统电压频率不相同，则指针将不停的旋转，当发电机频率高于系统频率时，指针将向“快”的方向旋转；反之，则向“慢”的方向旋转。频率差越大，指针旋转就越快。

手动准同期并列时的操作：

- 当发电机的电压低于或高于系统电压时，调节发电机的励磁电流，以改变机组的电压；
- 当发电机的频率低于或高于系统频率时，调节水轮机的导叶开度，以改变机组的转速；
- 通过同步表观察频率和相位差，以便选择合适的时机发出合闸，使断路器合闸瞬间的相位差很小。

手动准同期的缺点是：

- 并列的时间较长；
- 最佳合闸瞬间的选择与运行人员的经验和操作水平有关；
- 不能实现机组的自动启动和并列。

因此，手动准同期一般只作为机组备用的并列方式。

2.5 自动准同期

自动准同期是指：由自动准同期装置完成的水轮发电机并列操作与控制。

自动准同期装置应具有如下功能：

- 自动检查准同期的三个条件，在条件满足时自动提前（包含机械动作时间）发出合闸脉冲，使断路器在相位差为零时接通；
- 当频率差不满足要求时，自动向调速器发出调整信号，以消除频率差；
- 当电压差不满足要求时，自动向励磁调节器发出调整信号，以消除电压差。

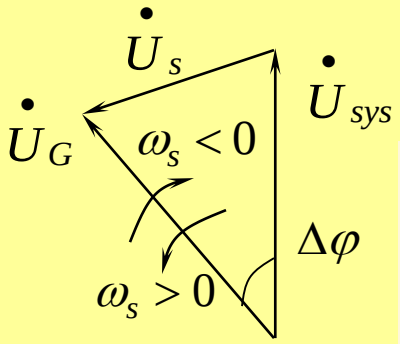
在自动准同期中，涉及几个术语，一个是**脉动电压**，一个是**滑差周期**，还有个是**导前时间**，分别介绍如下。

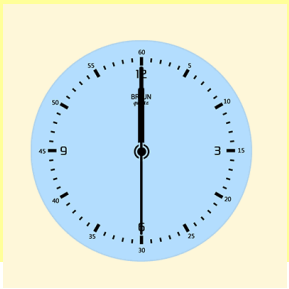
1、脉动电压

脉动电压（滑差电压）$u_s(t)$是指合闸前同期点两侧的电压之差：

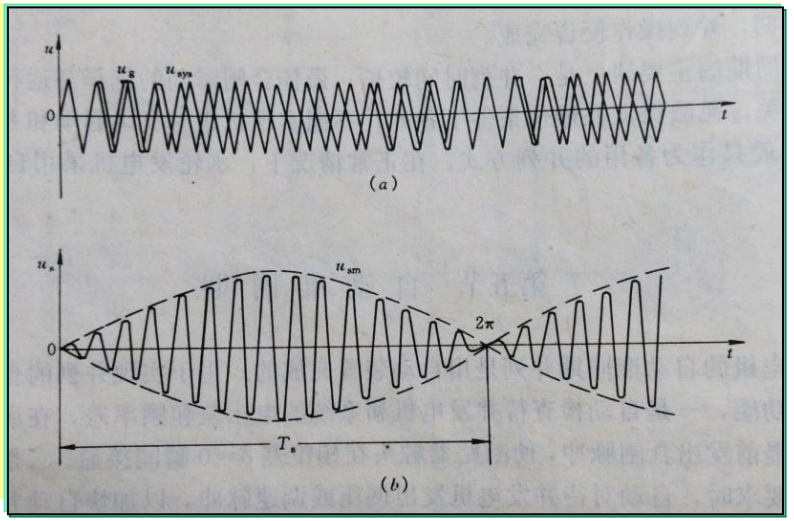
$$u_s(t) = u_G(t) - u_{sys}(t) = U_G \sin(\omega_G t + \varphi_G) - U_{sys} \sin(\omega_{sys} t + \varphi_{sys})$$

当两个交流电压 U_G和 U_{sys} 的频率不相等时 $\omega_s = \omega_G - \omega_{sys} \neq 0$，一般可用两个有相对旋转速度$\omega_s$ 的向量来表示它们，如图。两个交流电压向量的相角差 $\Delta\varphi = \varphi_G - \varphi_{sys}$ 就是图中的夹角；两者间的电角频率之差称为滑差角频率 ω_s。





脉动电压波形图

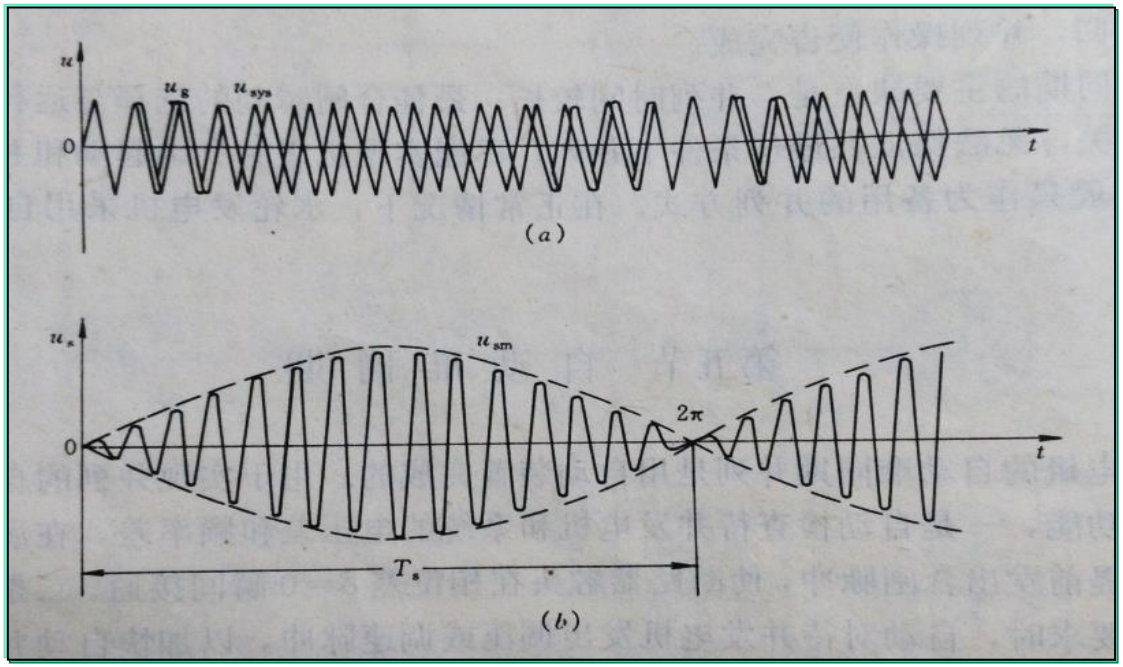


2、滑差周期

定义滑差周期T_s是指脉动电压频率差的变化周期，而ω_s在$[0, 2\pi]$内完成一个周期，那么显然有：

$$T_s = \frac{2\pi}{\omega_s}$$

- 机组与系统的频率差越大，滑差周期T_s就越小；
- 机组与系统的频率差越小，滑差周期T_s就越大。



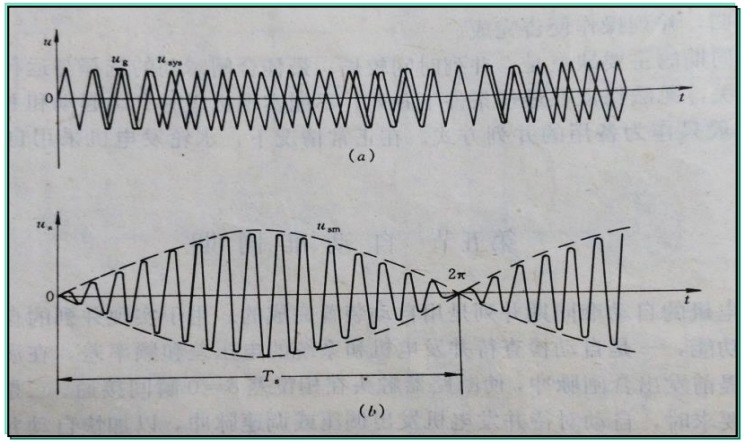
$$u_s(t) = u_G(t) - u_{sys}(t) = U_G \sin(\omega_G t + \varphi_G) - U_{sys} \sin(\omega_{sys} t + \varphi_{sys})$$

若初相满足： $\phi_G = \phi_{sys} = 0$ 且电压幅值满足： $U_G = U_{sys} = U_m$ 则有：

$$u_s(t) = U_m \sin \omega_G t - U_m \sin \omega_{sys} t$$

$$= 2U_m \sin \frac{(\omega_G - \omega_{sys})}{2} t \cos \frac{(\omega_G + \omega_{sys})}{2} t$$

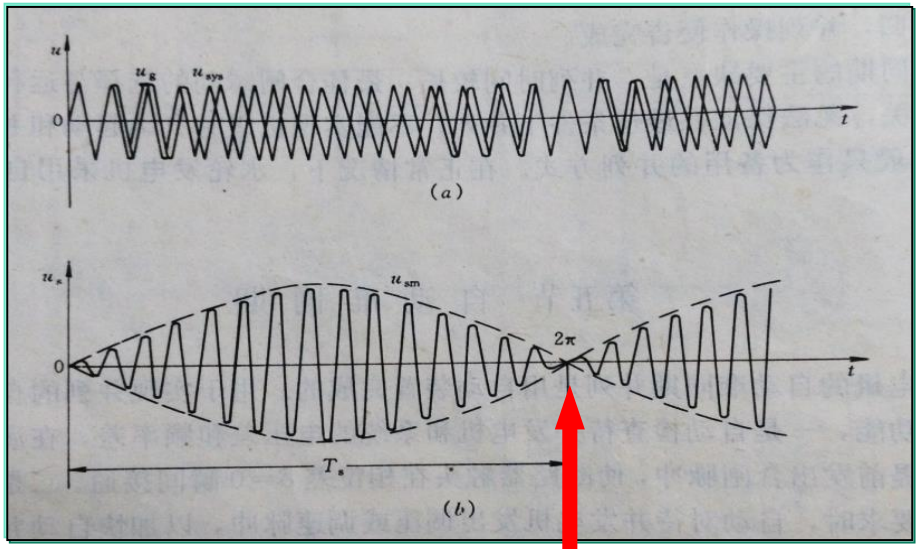
$$= 2U_m \sin \frac{\omega_s}{2} t \cos \frac{(\omega_G + \omega_{sys})}{2} t$$



幅值：0、2π时最小， π时最大

由于在准同期并列时，频率差要求0.1~0.25*Hz* ，则相应的滑差周期（频率倒数）T_s = 10~4s ，即T_s 应大于4~10s。由此可见，用滑差周期T_s的大小，判断发电机与系统的频率差，从而确定准同期并列条件是否满足要求是十分有效的。

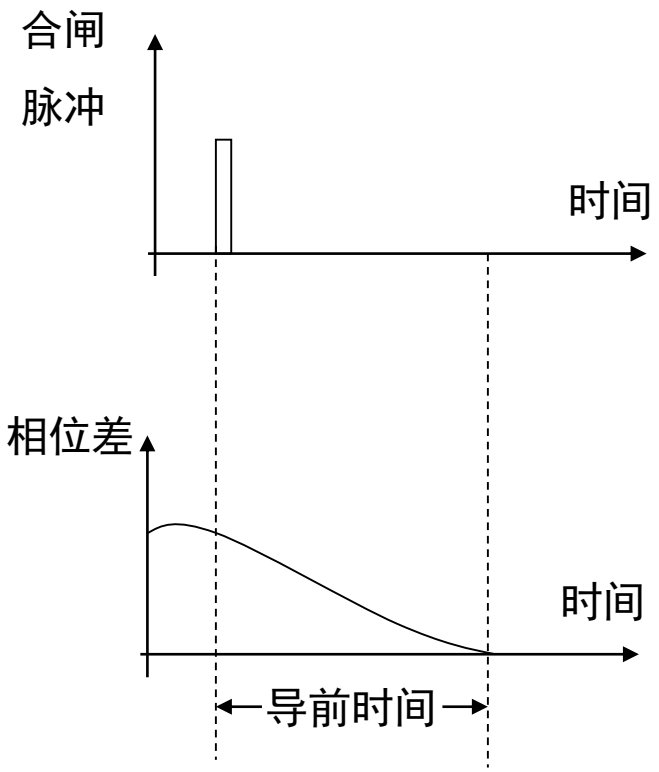
此外，并列时电压幅值差对应脉动电压的最小幅值（U_G和U_{sys}重合时，此时相位差为0）。



并列
时刻

3、导前时间

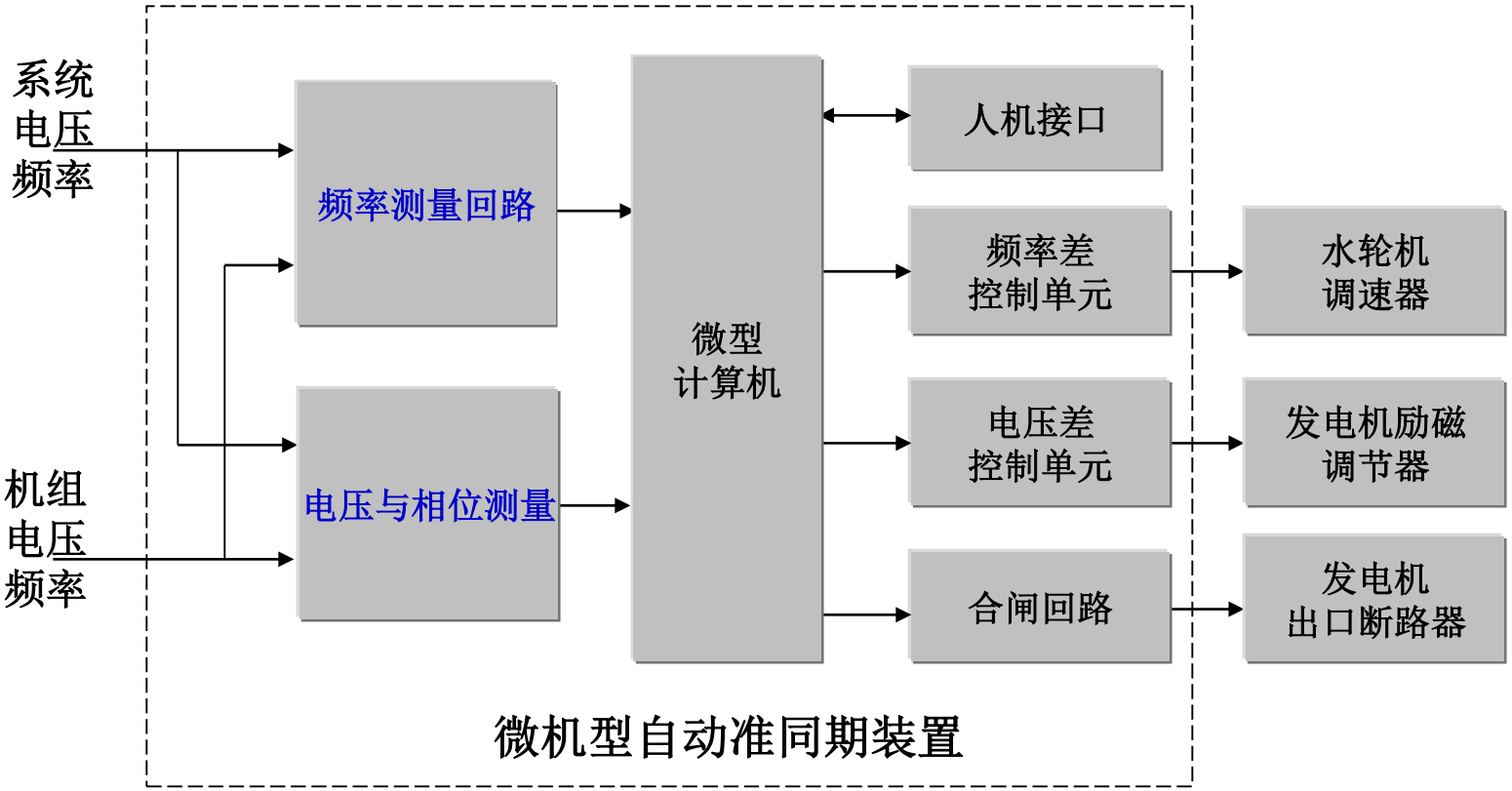
由于同期点断路器、合闸接触器和辅助继电器等合闸机构的元件存在固有动作时间。因此，在满足准同期条件下，为了使断路器触头在$\Delta\varphi=0$ 时接通，自动准同期装置必须提前发出合闸命令。从装置发出合闸脉冲到相位差为0的这一段时间称为导前时间t_D，显然，导前时间t_D应等于合闸机构所有元件的固有动作时间之和。



由于t_D只与固有动作时间有关，与频率差无关。按此原理构成的自动准同期装置称为恒定导前时间的准同期装置。

2.6 微机型自动准同期装置的工作原理

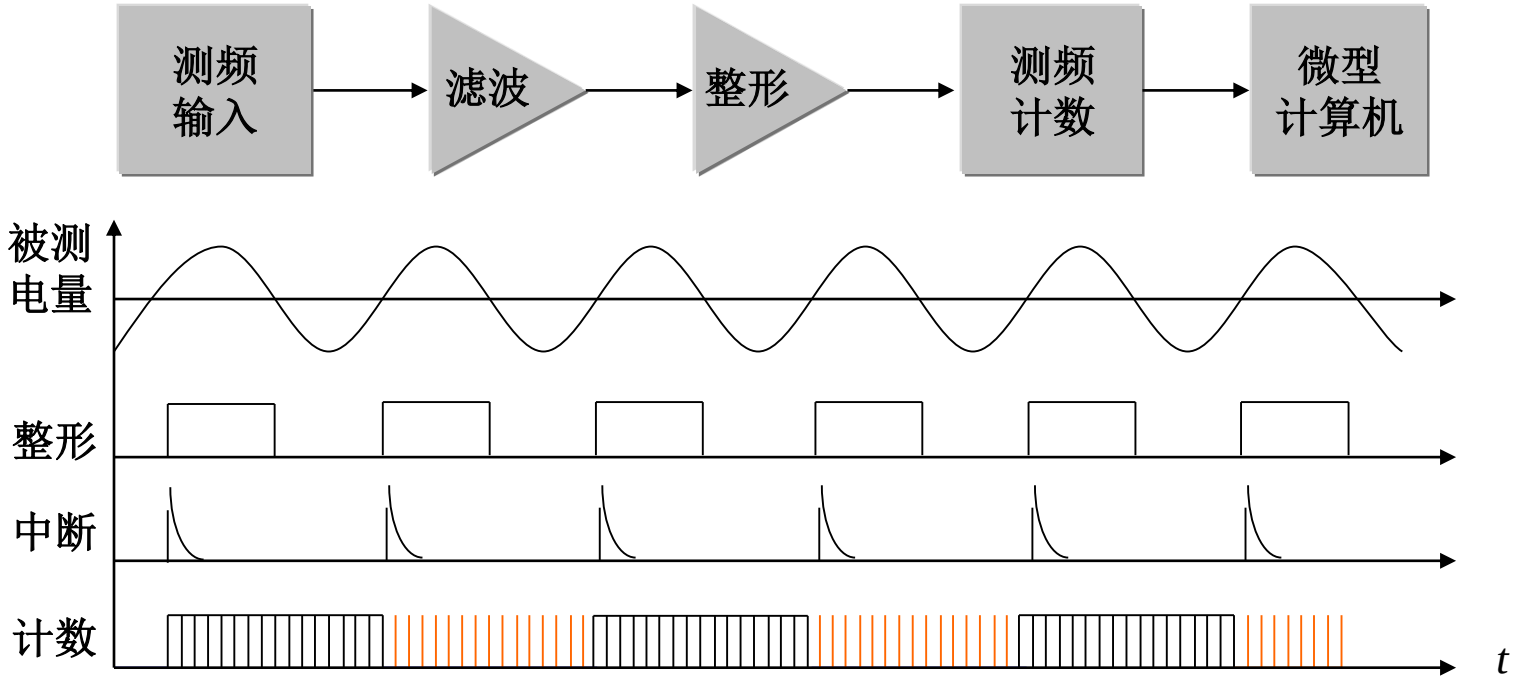
微机型自动准同期装置由频率测量部分、电压-相位测量部分、数据处理与计算部分、合闸回路以及人机接口部分组成。 其硬件构成如图所示：



1、频率测量

1）基本原理与硬件构成

应用计算机测量交流电量$\mu(t)$的频率时，常采用测周法：首先利用计算机高精度的计数功能测量被测量电量$\mu(t)$的周期T；然后，将周期T转换为频率：$f=1/T$



滤波是为了滤除谐波和纹波，为整形提供较好的检测信号，整形则是通过整形电路将滤波后的正弦信号转换为方波信号。

如上图所示，两次中断之间的时间即为交流电量的周期T。利用计算机内部稳定的高频时钟信号对两次中断之间的时间进行计数，以计算交流电压的周期T。

若计算机的计数频率（单位时间内计数个数）为f_c，计数值(一个周期T内)为N_c，则被测交流信号的周期为：

$$T = \frac{N_c}{f_c}$$

于是求得交流信号的频率为

$$f = \frac{f_c}{N_c}$$

例如，若f_c =1MHz，当被测交流信号的频率为f =50Hz时，该信号的实际周期为T=0.02s。则测量中，在计算机计数频率准确的情况下一个周期有计数值N_c =T×f_c =0.02×1M=20000，对应的频率计算值为

$$f = \frac{f_c}{N_c} = \frac{1000000}{20000} = 50$$

此外，若f_c=1*MHz*，但计算机计数频率不准确：

①假设实际f_c偏大，为1.2*MHz*，则在一个周期内有计数值N_c=T×1.2*MHz* =0.02×1.2*M*=24000，对应的频率计算值为：

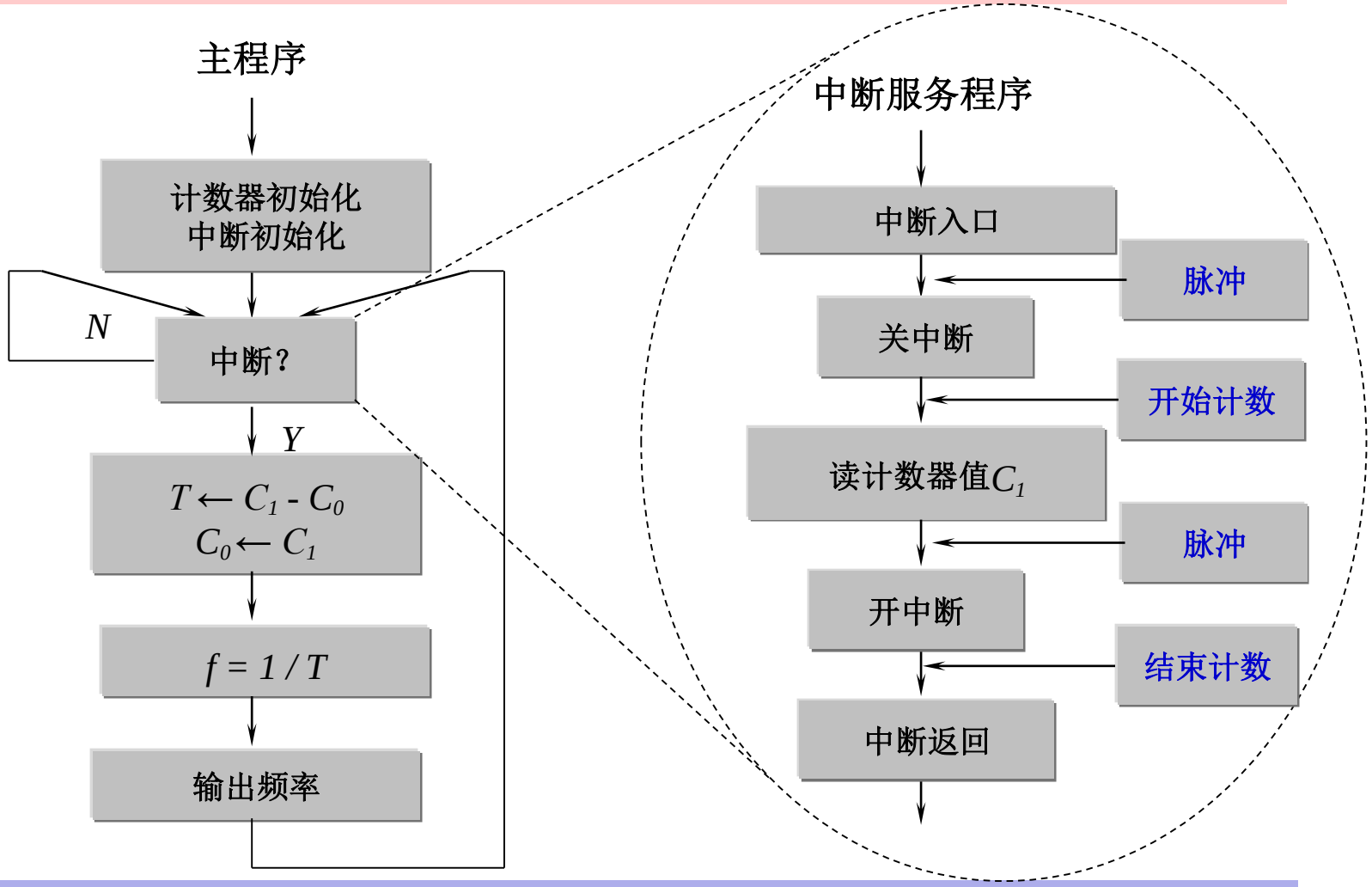
$$f=\frac{f_c}{N_c}=\frac{1000000}{24000}=41.7$$

②假设实际f_c偏小，为0.8*MHz*，则在一个周期内有计数值N_c=T×0.8*MHz* =0.02×0.8*M*=16000，对应的频率计算值为：

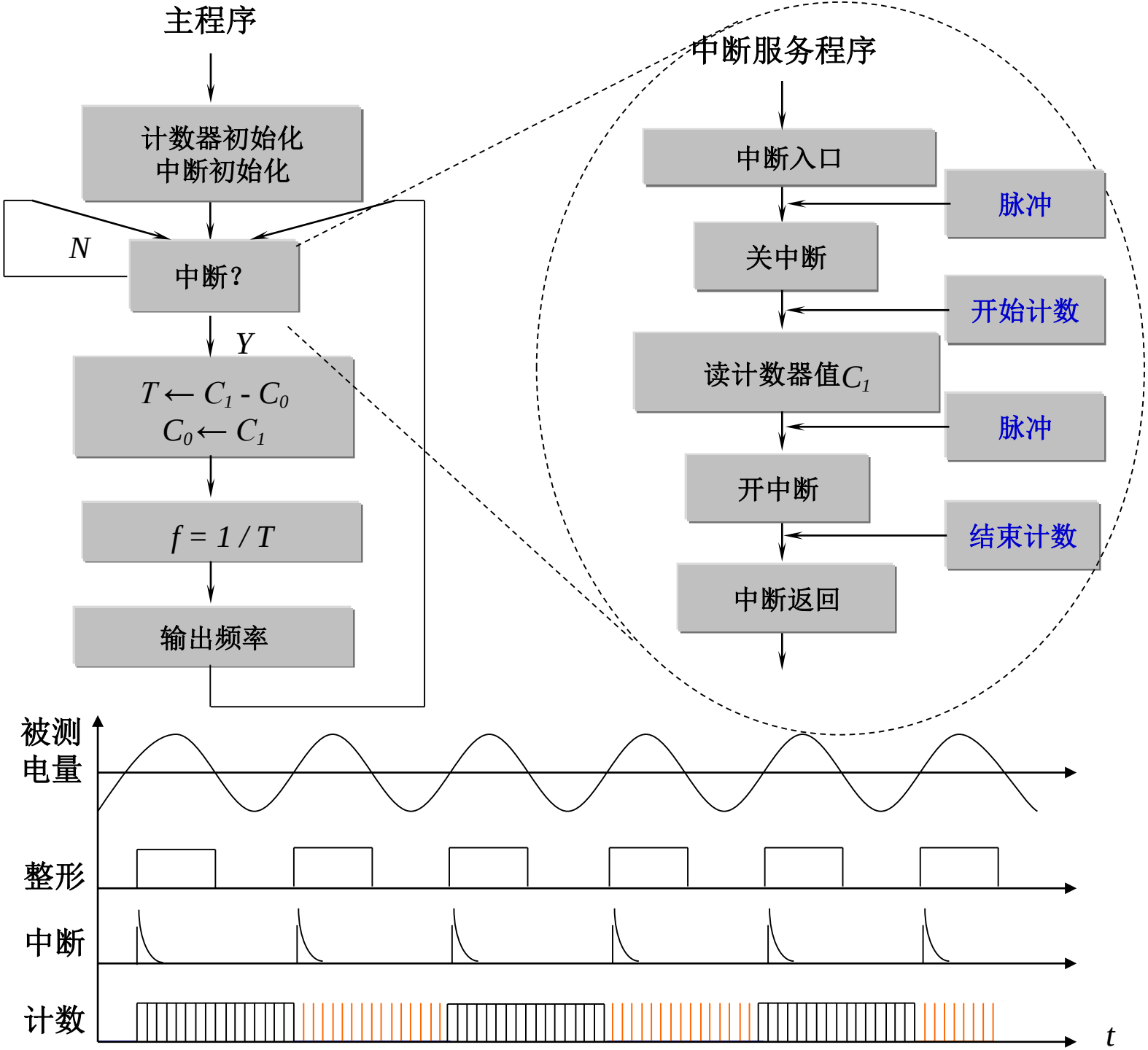
$$f=\frac{f_c}{N_c}=\frac{1000000}{16000}=62.5$$

由此可见，交流信号频率测量的精度取决于计算机的计数频率f_c。若实际f_c偏大则计算所得频率偏小；若实际f_c偏小则计算所得频率偏大。

2）频率测量的软件流程



中断指当出现需要时，CPU**暂时停止当前程序的执行**转而执行处理新情况的程序和执行过程。主程序中用C_1-C_0计算T，计算之后再把C_0用C_1更新，以备下一次计算。


主程序
计数器初始化
中断初始化
N
中断?
Y
$T \leftarrow C_1 - C_0$
$C_0 \leftarrow C_1$
$f = 1 / T$
输出频率
中断服务程序
中断入口
脉冲
关中断
开始计数
读计数器值C_1
脉冲
开中断
结束计数
中断返回
被测电量
整形
中断
计数
t

2、电压及相位测量

1）基本原理

在交流电量的测量中，常采用周期函数的傅氏算法（傅里叶级数）。对于待分析的周期为T 的时变函数$\mu(x)$，在一个周期 $[-T/2,T/2]$上，皆可以正弦及余弦函数组合而成的无穷（n）级数表示，即傅里叶级数。

周期函数：$\mu(t)=\mu(t+T)$

傅里叶变换

$$\mu(t)\sim a_0+\sum_{n=1}^{\infty}(a_n\cos n\omega t+b_n\sin n\omega t)$$

三角函数正交性

傅里叶系数：

$$a_n=\frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2}\mu(t)\cos n\omega t dt$$

$$b_n=\frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2}\mu(t)\sin n\omega t dt$$

三角函数系{1, cosx, sinx, cos2x, sin2x, … }正交性：三角函数系中任何不同的两个函数的乘积在区间[-π,π]上的积分等于0。

$$\mu(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

辅助角公式

直流分量

$$\mu(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

n次谐波

幅值：$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$

相位：$\varphi_n = arctg \dfrac{b_n}{a_n}$

实现电压及相位测量

此外，可以看出，周期信号是由一个或几个、乃至无穷多个不同频率（$n\omega$）的谐波叠加而成。

这种算法在计算机上实现时，也是对离散的采样值进行运算。离散运算式为：

$$a_n = \frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2} \mu(t)\cos n\omega t dt \qquad b_n = \frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2} \mu(t)\sin n\omega t dt$$

$$a_n = \frac{2}{N}\sum_{k=1}^{N} \mu_k \cos nk\frac{2\pi}{N} \qquad b_n = \frac{2}{N}\sum_{k=1}^{N} \mu_k \sin nk\frac{2\pi}{N}$$

式中：N 为一个周期中的采样数；μ_k为第k个采样值。

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \mathrm{dt} = \frac{T}{N} \quad t = \mathrm{k} \quad \mathrm{T} = \mathrm{N}$$

上述算法是利用一个周期T内的全部采样值来进行计算，在计算机上作实时计算时，每隔一个采样周期$T_N = T/N$就对$\mu(t)$采样一次。也就是说，随着时间的变化，每隔一个T_N就出现一个新的采样值，因而作实时计算时，一般须在每出现一个新采样值后就计算一次。根据计算式的要求，计算机应对这一新采样值前的N个采样值（包括新出现的采样值）同时加以运算。在运算时，对N个采样值都分别乘以不同的系数$\cos nk2\pi/N$和$\sin nk2\pi/N$ ，然后求和。

例：若采用8（N=8）点采样的傅氏算法计算一个周期函数$f_T(t)$的基波（n=1）和二次谐波（n=2）的幅值和相位，写出相应的计算式。

$$A_n=\sqrt{a_n^2+b_n^2} \qquad a_n=\frac{2}{N}\sum_{k=1}^{N}\mu_k\cos nk\frac{2\pi}{N}$$

$$\varphi_n=arctg\frac{b_n}{a_n} \qquad b_n=\frac{2}{N}\sum_{k=1}^{N}\mu_k\sin nk\frac{2\pi}{N}$$

则：当n=1 时（基波）

$$A_1=\sqrt{a_1^2+b_1^2} \quad ; \quad \varphi_1=arctg\frac{b_1}{a_1}$$

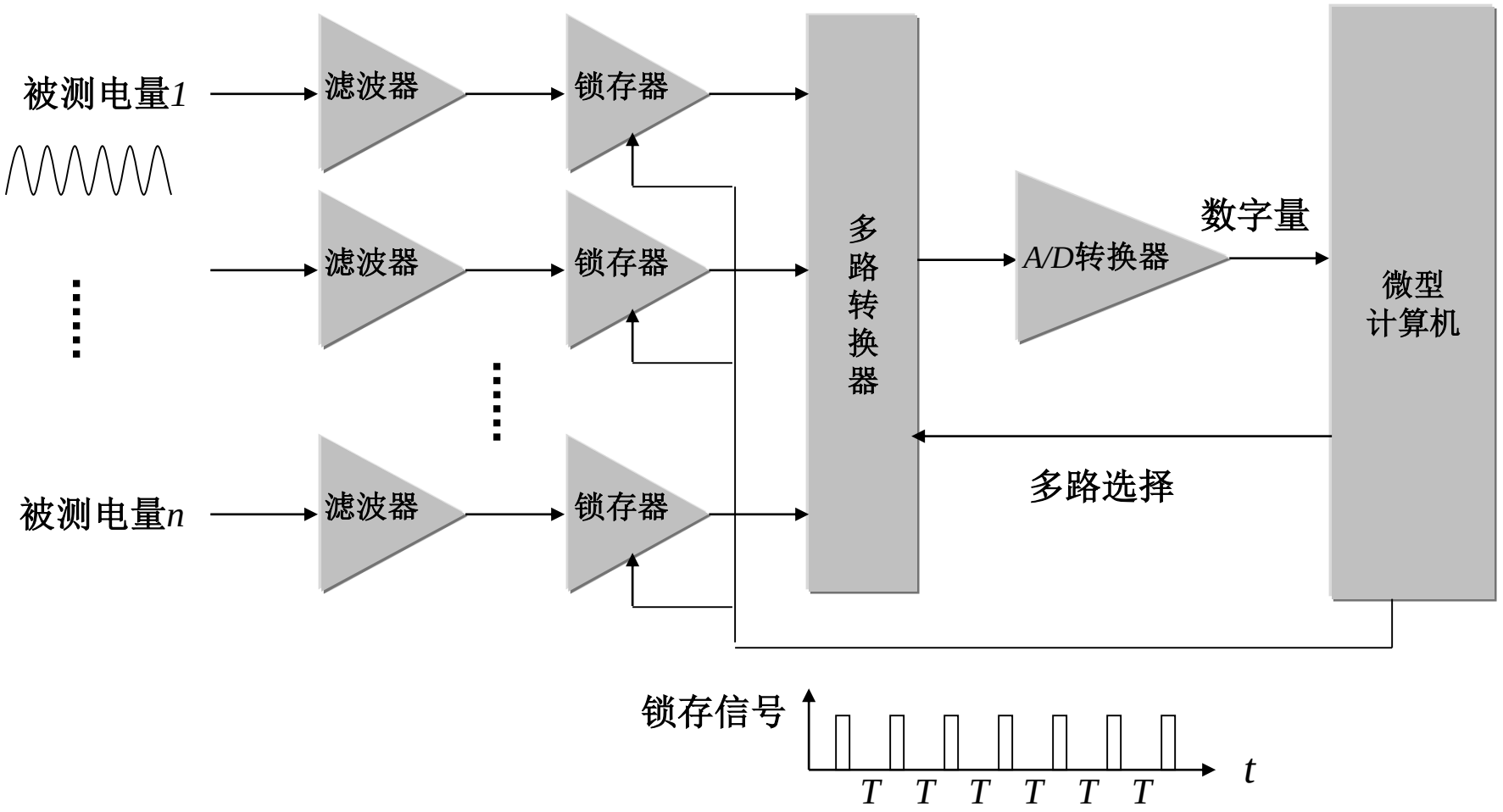
式中：$a_1=\frac{1}{4}\sum_{k=1}^{8}f_k\cos k\frac{\pi}{4}$ ；$b_1=\frac{1}{4}\sum_{k=1}^{8}f_k\sin k\frac{\pi}{4}$

则：当n=2 时（谐波）

$$A_2=\sqrt{a_2^2+b_2^2} \quad ; \quad \varphi_2=arctg\frac{b_2}{a_2}$$

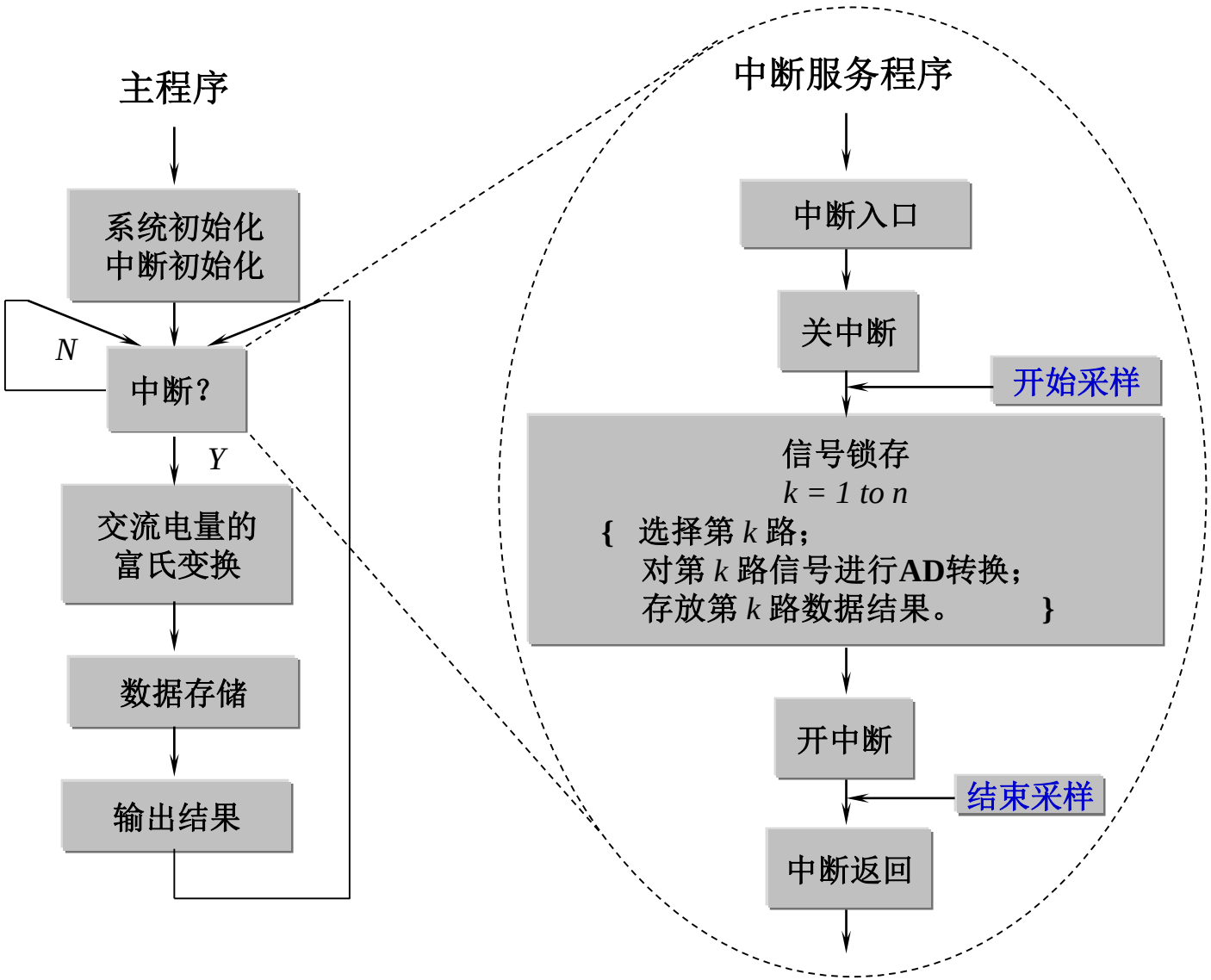
式中：$a_2=\frac{1}{4}\sum_{k=1}^{8}f_k\cos k\frac{\pi}{2}$ ；$b_2=\frac{1}{4}\sum_{k=1}^{8}f_k\sin k\frac{\pi}{2}$

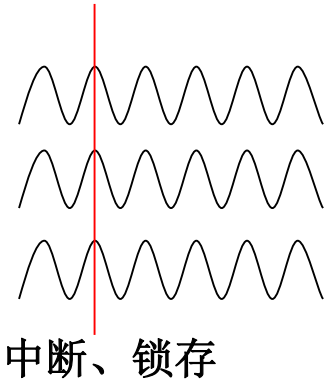
2）硬件构成

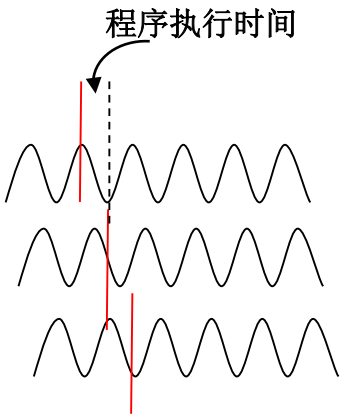


锁存器作用：使得采集的各路（A、B、C、AB、BC、AC）电量值的相位值相同，若此时不发生同时中断，并锁存信号，而是按程序顺序执行采样，会使得各路电路的采样值存在相位差，或者不同步。

3）电压及相位测量的软件流程







3、微机型自动准同期装置的软件原理

微机型自动准同期装置借助于微处理器的高速处理信号的能力，利用编制的软件，在硬件的配合下实现发电机的并列操作。

1）电压检测与调节

设测量的发电机电压为U_G，系统电压为U_{sys}，电压偏差的阈值为δ_U，则

①当$|U_{sys}-U_G|>\delta_U$时，不允许合闸信号输出；**(5~10%*Ur*)**

②当$|U_{sys}-U_G|\le\delta_U$时，允许合闸信号输出。

若$U_{sys}>U_G$时，同期装置输出升压信号；反之，输出降压信号。

2）频率检测与调节

设测量的发电机频率为f_G，系统频率为f_{sys}，频率偏差的阈值为δ_f，则

①当$|f_{sys}-f_G|>\delta_f$时，不允许合闸信号输出；**(0.2~0.5%*fr*)**

②当$|f_{sys}-f_G|\le\delta_f$时，允许合闸信号输出。

若$f_{sys}>f_G$时，同期装置输出增速信号；反之，输出减速信号。

3）相位检测

设测量的发电机相位为 φ_G，系统相位为 φ_{sys}，相位偏差的阈值为 δ_φ，则

①当 $\left|\varphi_{sys}-\varphi_G\right|>\delta_\varphi$ 时，不允许合闸信号输出；**(10^o)**

②当 $\left|\varphi_{sys}-\varphi_G\right|\le\delta_\varphi$ 时，允许合闸信号输出。

作业：

1、简述同步发电机两种同期并列方式的操作步骤，并分析各自的特点和用途。

2、简述自动准同期的条件，并说明可能造成非同期合闸的原因及其危害。

3、设待并发电机的电压为$u_G(t)$，系统电压为$u_{sys}(t)$，其频率差和相位差为0，电压差为$\Delta U = U_{sys} - U_G = 0.9U_G$，试计算并列时的最大冲击电流$I_{su.\max}$。

4、设待并发电机的电压为$u_G = U_m \sin \varpi_m t$，系统电压为$u_{sys} = U_n \sin \varpi_n t$，简要说明如何根据脉动电压$u_s(t) = u_G(t) - u_{sys}(t)$分析电压差和频率差。

5、若采用8点采样的富氏算法计算一个周期函数$f(t)$的基波和二次谐波的幅值和相位，试写出相应的计算式。

The End