

# 电 工 学

第六分册 交流發电机

章炎福 罗先植著

电力工業出版社

电 工 学  
第六分册 交流发电机  
章炎福 罗先植 著

336D131

电力工业出版社出版(北京前门西26号)

北京市图书出版业营业登记证出字第042号

北京市印刷一厂排印 新华书店发行

编辑:沈昌培 刘作婴 校对:刘露溪  
787×1092 $\frac{1}{32}$ 开本\*2 $\frac{1}{4}$ 印张\*41千字\*印1—50 100册  
1956年5月北京第1版第1次印刷  
统一书号:T15036·22 定价(第9类)0.26元

# 目 錄

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第十三章 交流發電機 .....      | 2  |
| 一、交流發電機的基本型式 .....    | 2  |
| 二、交流發電機的構造 .....      | 8  |
| 三、交流發電機的定額 .....      | 13 |
| 四、損耗和效率 .....         | 13 |
| 五、交變電動勢的大小和波形 .....   | 16 |
| 六、交流發電機的繞組 .....      | 24 |
| 七、交流發電機繞組的絕緣 .....    | 39 |
| 八、交流發電機的電壓調整率 .....   | 43 |
| 九、交流發電機的電壓調節器 .....   | 50 |
| 十、功率的測量 .....         | 58 |
| 十一、發電機的冷卻 .....       | 62 |
| 十二、發電機的通風 .....       | 64 |
| 十三、交流發電機的併列運行 .....   | 66 |
| 十四、交流發電機在運行中的保護 ..... | 70 |

## 第十三章 交流發電機

現代的發電設備，絕大多數是產生交變電流的交流發電機。這是因為：在構造上，直流發電機受到了換向器的限制，不宜產生太高的電壓和太強的電流；交流發電機沒有換向器，同時可以把電樞固定，把磁極作轉子，這樣就適宜用來產生很高的電壓和大量的電流。在送電方面，交流電可以通過變壓器來使電壓升高或降低，以適應實際的需要，例如遠距離輸電就可以用變壓器把電壓升高、電流減小，就能用較細的銅線輸送電能，並減小了電能的損耗。此外，在電能的使用上，一般交流電動機的構造和使用，比較直流電動機簡單可靠，故障也少，因此，對交流電的需要也比直流電大得多。

在少數特殊的場合，因為交流電不能用在電解、電鍍等電化設備上，也不能變成化學能量儲藏起來（例如蓄電池的充電），同時交流電動機不適宜改變它的轉速或產生較大的轉矩。因此，直流發電機和直流電動機仍有一定的用途，而且有許多需要供給直流電的場所，還要用整流設備來把交流電轉變為直流電。關於這些，我們將在“整流器”分冊中說明。

### 一、交流發電機的基本型式

交流發電機的基本型式分為旋轉電樞式和旋轉磁場式

兩種。我們知道，在直流電機中電樞繞組的每一線圈的二端分別聯接到換向器的截片上；如果把这些線圈不接到換向器的截片，互相串聯起來，再接到兩個或三個滑環上，如圖1所示，這樣就成為一座有旋轉電樞的交流發電機。這時，產生交變電流的發電機繞組，仍然是電機的轉動部分，磁極也仍然固定在電樞外

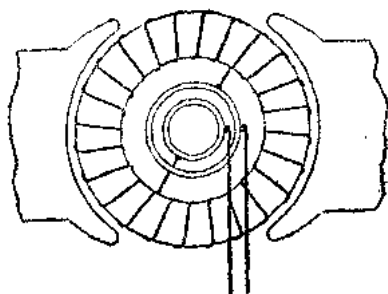


圖 1 旋轉電樞的交流發電機

閉的機殼上。可是，這一種型式的交流發電機實際上並不多見，而且只有小容量(30 仟伏安以內)和低電壓(500 伏以下)的。旋轉電樞的交流發電機，可以在電樞的槽內嵌置兩種繞組：一組是直流繞組，通過換向器和電刷引出供給激磁的直流電；另一組是交流繞組，通過滑環和電刷引

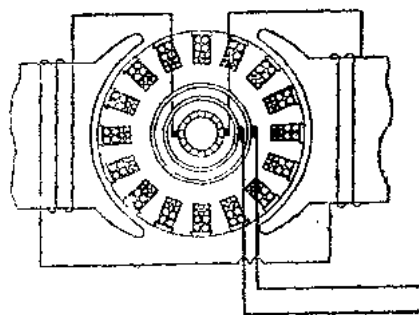


圖 2 具有交直流兩種繞組的交流發電機

出供給負荷的交流電。這樣的發電機除了交流部分的繞組和滑環外，很像一座普通的直流發電機，如圖 2 所示。我們在下一節還要作比較詳細的說明。

容量較大的交流發電機，特別是高電壓交流發電機，構造上和前面所談的恰巧相反，即是：把電樞固定在磁極的外圍，由原動機使磁極旋轉，如圖 3 所示，這樣就成為一座有旋轉磁場的交流發電機。

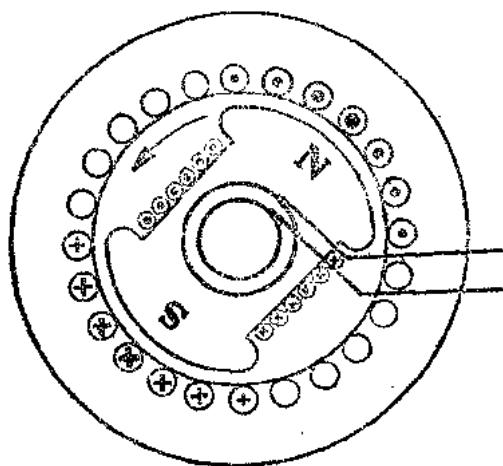


圖 3 旋轉磁場的交流發電機

在旋轉磁場的交流發電機中，繞組是安插在不需移動的槽子里，並且外圍的周界較大，具有較多的地位來裝置繞組的導體和絕緣；這種固定的結構，能使發出的電流不經過滑動的接觸裝置（滑環和碳刷）送到外面，電氣絕緣和機械強度都比較好，所以這種發電機能直接產生較高的

电压(一般大型发电机的电压总是在 6 600 伏以上,最高的可达到 35 000 伏左右)。

旋轉磁場所需要的直流电,可通过滑环來引入磁場繞組。因为磁場繞組的电压很低(在 250 伏以下),需要的电流較小,所以当电流通过电刷和滑环間的接触时,比大量的高电压电流安全得多。

在旋轉磁場的交流发电机中,我們往往把旋轉磁場簡称为轉子;把固定的电樞簡称为定子。这些轉子和定子的名称也用来表示交流电动机的旋轉和固定部分。

发电机中的轉子,还可以根据構造來分类,有凸極轉子和隱極轉子两种。凸極轉子的磁極凸出,如圖 4 甲所示,通常具有較多的磁極和較低的轉速,用于水輪机或往复式引擎轉动的发电机中。凸極式的中型或大型发电机的極数,总是在 6 極以上;因为这种轉子的轉速較低,所以構造上比較簡單。

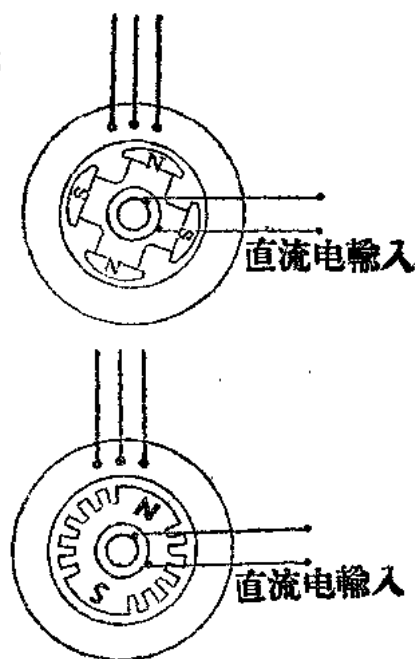


圖 4 凸極轉子和隱極轉子

隱極轉子(或圓柱形轉子)如圖 4 乙所示,繞組是分佈在轉子的表面。因為在高速旋轉的大型發電機中(每分鐘 1500 轉或 3000 轉,甚至 3600 轉),必須做成這種隱極的形式,才能耐受高速旋轉時所產生的離心力,同時也可減低空氣阻力和聲音。這種發電機一般都是用汽輪機來轉動的。

關於產生交流電的基本方法,我們在“交流電路”中已經談過,這裡再簡單的說明一下。當導體和磁場間有相對運動時(不論是磁場運動或導體運動),在導體中就產生感應電動勢,如圖 5 所示,當線圈在磁極間旋轉時,由於導體切割磁力線的結果,就可產生往復的交變電動勢,通過滑環和電刷引出交變電流。

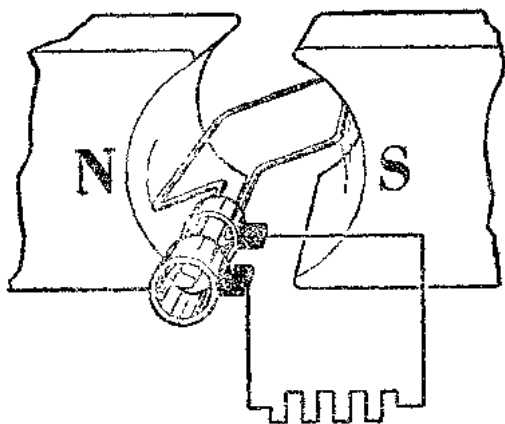


圖 5 產生交變電動勢的線圈

對兩極的交流發電機來說,導體每旋轉一圈,交變電

动势也恰巧完成一周，所以每秒的轉数也就是交流电的頻率。習慣上总是以每分鐘的轉数來計算电机的轉速，每秒的轉数等於每分鐘轉数的 $\frac{1}{60}$ ，因此，頻率和轉速的关系，可用下列公式來表示：

$$f = \frac{N}{60},$$

式中  $f$ ——交流电的頻率，以赫<sup>①</sup>為單位；

$N$ ——轉子的轉速，以轉/分為單位。

至於多極的交流發電機，因為當導體每移動一對磁極的位置，就可以完成一個周波。以6極（三對磁極）發電機為例，每一轉可以在N極或S極下掠過三次，完成三個周波，要是每秒鐘旋轉20次，就能完成60個周波（60赫）的交變電動勢，也就是交流電的頻率等於每秒的轉數乘上磁極的對數。因此，頻率和轉速的关系的公式應改為：

$$f = \frac{PN}{60}, \quad \text{公式(1)}$$

式中  $P$ ——磁極的對數。

表1可用來說明交流發電機的頻率、磁極和轉速的关系。

在交流發電機的电樞中繞置三組独立的繞組，彼此間相差 $120^\circ$ 电气角度，即可組成一座三相交流發電機。

三相交流中各相的頻率相同，也可用上面的公式來計算頻率。

①“赫”是頻率的單位，等於每秒一周波（見本書第四分冊“交流電路”第6頁“交變電流的頻率”）。

表 1

| 頻率<br>赫 | 轉 速, 轉/分 |      |      |     |     |     |       |     |     |     |
|---------|----------|------|------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|
|         | 2極       | 4極   | 6極   | 8極  | 10極 | 12極 | 16極   | 20極 | 24極 | 30極 |
| 25      | 1500     | 750  | 500  | 375 | 300 | 250 | 187.5 | 150 | 125 | 100 |
| 50      | 3000     | 1500 | 1000 | 750 | 600 | 500 | 375   | 300 | 250 | 200 |
| 60      | 3600     | 1800 | 1200 | 900 | 720 | 600 | 450   | 360 | 300 | 240 |

## 二、交流發電機的構造

交流發電機的主要型式，上節已經說過，現在分別說明它們的構造如下：

### (1) 旋轉電樞式交流發電機

圖 2 中所示的小型旋轉電樞式交流發電機，它的電樞鐵心和直流發電機相似，是由有槽的矽鋼疊片組成。在這些槽內嵌置的繞組，大部分是交流繞組，小部分是直流繞組，繞組間襯隔絕緣，交流繞組联接滑環，直流繞組联接換向器截片。這種發電機的磁場也和直流發電機的相似，場軛通常是一個低碳鋼制成的圓形外殼，磁極由低碳鋼或矽鋼疊片組成。磁極上的激磁繞圈，是由換向器引出的直流電來供電。

### (2) 旋轉磁場式交流發電機

圖 6 甲表示一旋轉磁場式凸極交流發電機。定子由矽鋼片沖成的疊片(圖 6 乙)制成，在槽內嵌置繞組，矽鋼片的外面是一個由鋼板焊成的外殼(电机的外殼也有由鑄鋼

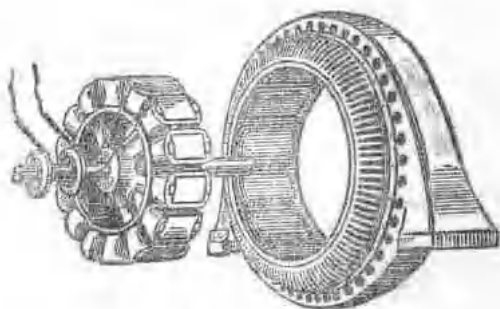


圖 6 甲 凸極交流發電機

或鑄鐵做成的)，在靠近外殼處開有徑向通風孔。此外，在疊片間每隔一定的距離還有些幅向的通風孔。凸極交流發電機的轉子，常具有很多的磁極；每一個磁極，用鳩尾形楔桿裝固在鑄鋼制的軸幅上，在小型電機中也有用螺釘來裝固磁極的，轉子的一端裝有激磁電流的滑環。

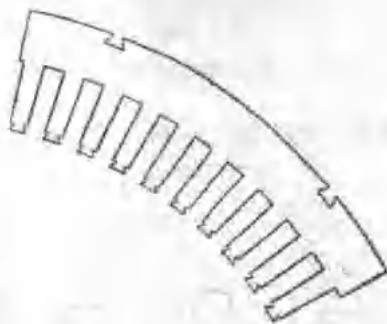


圖 6 乙 交流發電機定子的部分疊片

隱極交流發電機的轉子，在構造上可分為整塊的和組合的兩種。整塊的轉子就是整個轉子由整塊鍛鋼製成，如圖 7 甲所示，這樣的轉子在大型發電機中（如 100,000 瓩的大型發電機）可能重到 100 多噸；組合的轉子（圖 7 乙），有一個空心的圓筒和兩個端頭；也有用多塊的空心圓盤組

成,如图 7 丙所示。转子的材料在转速不高的情况下,用含

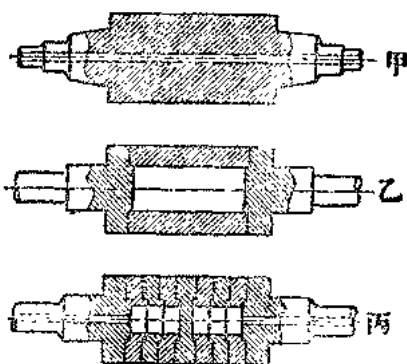


圖 7 隱極發電機轉子的構造

硫、磷很低的普通碳鋼制成,在轉速較高的情況下,需要用鉻、鎳、銅等合金鋼制成。

轉子的槽用銑刀銑出,槽形有輻向式和平行式兩種,如圖 8 甲和圖 8 乙所示;實用上,輻向式的比較多。

轉子上沒有槽的部分稱為大齒,發電機的

磁通大部分通過大齒,使它成為磁極。

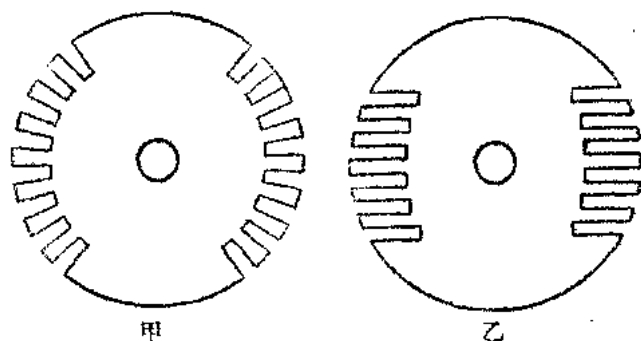


圖 8 隱極發電機的轉子槽

### (5) 汽輪發電機和水輪發電機

汽輪發電機有很多是兩極的(50 赫時是 3000 轉/分),它們的轉速很高。這是因為高速汽輪發電機的製造成本

比低速的便宜些，运行也比较经济。

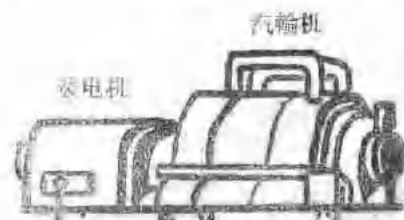


圖 9 汽輪發電機

水輪發電機是依靠水流自高处向下冲击水輪來轉動發電機的，水輪的轉速較低，而且大部分是立式的，所以水輪發電機也多为立式。

这种發電機具有很多凸

出的磁極，它的體積和重量比電功率相等的汽輪發電機大得很多，整套設備的費用也貴得很多。但是因為它所用的是水力，不需要燃料，所以運轉費用很省，即使最初的設備費大些，結果还是很合算的。所以在有水力可以利用的地方，都應該盡量利用水力。

近代水輪發電機的構造，有懸吊式和傘式兩種；懸吊式的推力軸承放在轉子的上端，傘式的推力軸承放在下端。從這兩種水輪發電機的重量和裝置時的高度等各方面相比較，傘式的有許多勝於懸吊式的優點。

水輪機中，構造比較困難的是推力軸承<sup>①</sup>，但是在目前的技術水平下，可以做到載重很大的推力軸承，蘇聯目前能夠做到負荷 3500 噸的推力軸承<sup>②</sup>。圖 10 甲表示懸吊式水輪發電機的剖面，圖 10 乙表示傘式水輪發電機的剖

<sup>①</sup> 推力軸承就是能承受軸向壓力的軸承，在立式電機中承受着發電機巨大的重量。

<sup>②</sup> 根據 1955 年 5 月 15 日蘇聯科學院士斯琴科主講是 3500 噸；另據蘇聯卡德羅夫斯基所著的“電機學”第三分冊 450 頁附表中推力軸承最大壓力是 4500 噸。

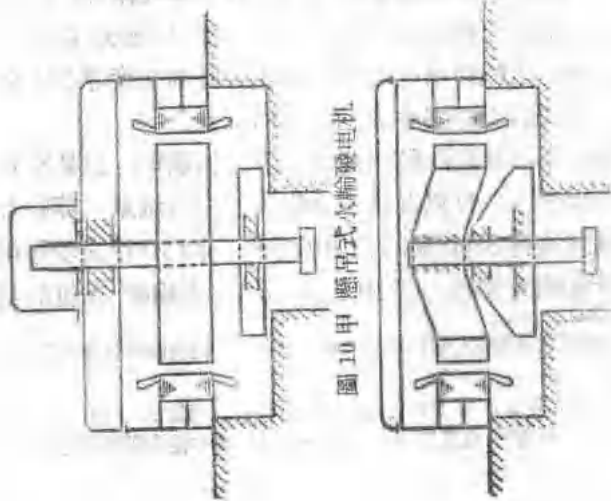
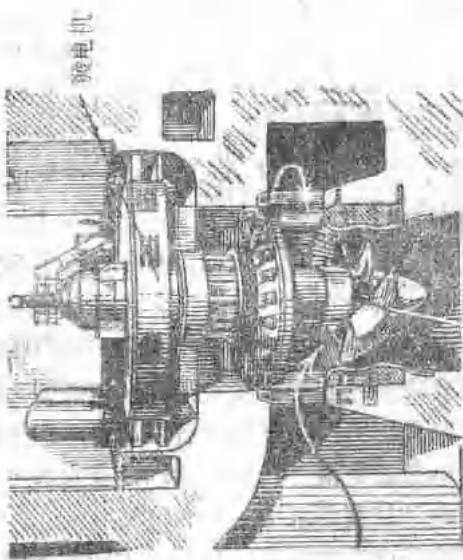


圖 10 甲 懸吊式水輪發電機

圖 10 乙 傘式水輪發電機



水輪機

發電機

圖 10 丙 水輪發電機

面。圖 10 丙表示水輪發電機的一般形狀。

### 三、交流發電機的定額

交流發電機的定額通常用仟伏安來表示，定額的大小，決定於相數、電流和電壓等幾個因素。端電壓的高低，在一定頻率時，和磁極的磁通有關：增加激磁電流，可以使磁通增加；但是在這一方面常受到磁通飽和的限制，而且超額的激磁電流，將引起磁場繞圈的發熱。至於交流發電機定子的電流，同樣是受到發熱或溫升的限制。

交流發電機的定額也可以用瓩來表示，不過這時必須附帶說明負荷的功率因數。

### 四、損耗和效率

交流發電機的損耗可分為基本損耗和附加損耗(或雜損耗)兩種，分別說明如下：

#### (1) 基本損耗

基本損耗是機械方面的各種摩擦、風阻等損耗，和電磁方面的鐵心、銅繞等損耗。

摩擦損耗包括軸承摩擦、電刷摩擦。風阻損耗包括轉子和空氣的摩擦、通風等損耗。軸承的摩擦損耗，和軸承的種類、潤滑油的性質、負荷的大小、工作的溫度等都有關係；尤其是由皮帶傳動的發電機，和負荷的關係更大。但是，通常在無負荷時測量的損耗，可認為是不變的。電刷和滑環間的摩擦損耗，除了在容量很小的電機中以外，所佔的比重一般很小，在測量時可同軸承摩擦一併計算。

風阻損耗，是轉子及風扇轉動時克服空氣阻力而損耗的能量，通風損耗是使冷卻空氣通過通風道所損耗的能量。這許多損耗，常在無負荷時合併在一起測量和計算，作為一項損耗；但是也可以分別測量。在大型發電機（尤其是空氣冷卻的汽輪發電機）中，這些損耗往往佔全部損耗的一半以上。因此，在大型高速發電機中，怎樣減少這些損耗和改善通風系統，是一個很重要的問題。

鐵心損耗——簡稱鐵損，包括渦流和磁滯的損耗。渦流是磁通變動時在鐵心內部感應出來的週行著的電流，所以渦流損耗是一種鐵心內部的電阻損耗。磁滯損耗是磁勢來回變動時磁分子內部阻力的摩擦損耗。這兩種不同的鐵損，通常也是在無負荷時測量，不包括有負荷電流時產生的額外渦流和磁滯等損耗。

銅線損耗——簡稱銅損，是指負荷電流通過定子繞組時，所生的電功率損耗（ $I^2R$ ），在三相交流發電機中等於一相損耗的三倍（ $3I^2R$ ），電阻 $R$ 通常指繞組本身的直流電阻，折合成 $75^\circ\text{C}$ 時的數值計算。除繞組本身的電阻以外，由於交流電所產生的額外損耗，都歸入附加損耗項內。磁場繞組的銅損是激磁電流通過磁場繞組時的電阻損耗，也折合成 $75^\circ\text{C}$ 時的數值來計算；這項損耗在功率因數滯後得很多的時候，因需要較大的激磁電流，因此損耗的能量也跟着增加。

磁場變阻器的電阻損耗——變阻器損耗是激磁電流通過變阻器時的電阻損耗，可直接用功率表量出。如果以變阻器冷卻時量得的電阻值來計算，不能得到正確的結果，

因为在使用时变阻器的温度总是較高的(这项损耗通常作为发电厂损耗,而不作为发电机电损耗計算)。

激磁机损耗——激磁机全部机械的和电气方面的损耗(这项损耗通常也作发电厂损耗計算),还有激磁电流通过电刷接触点时的电阻损耗(数值極小,可以不計)等。

## (2)附加损耗

附加损耗包括:有負荷电流后在导体、鉄心,以及外殼、机盖等等里面由於磁場畸变和漏磁等現象而產生的损耗。發生这些损耗的原因,主要是由於电樞(定子)的漏磁通和在电樞和磁樞表面由於高週率諧波的磁动势,以及齒諧波的磁通振盪。这些损耗,可折算为附加损耗,和定子繞組的损耗折成一个总的电阻或有效电阻來計算总电阻耗。

效率——交流发电机的效率和直流发电机效率的定义相同,等於額定輸出和全部輸入的比,通常以百分数計算。對於較小的电机可同时測量电机的輸出和机械的輸入來算出發电机的效率,但是對於中大型电机不可能这样測量,而是改用計算损耗的办法來算出發电机的效率。即:

$$\text{效率} \quad \eta = \frac{\text{輸出}}{\text{輸出} + \text{全部损耗}} \times 100\%$$

所以,在三相平衡負荷时的效率:

$$\eta = \frac{\sqrt{3} UI \cos \varphi}{\sqrt{3} UI \cos \varphi + P_{\rho} + P_{\sigma} + P_M + P_d + P_a}$$

式中:  $\eta$ ——效率以百分数計算;