



中小型同步发电机 自励装置

哈尔滨工业大学土电厂著

水利电力出版社

7043
2.H48
51

內 容 提 要

本書介紹一種新的勵磁裝置——半導體整流自動裝置。這種自動裝置主要是由一只小型復式變壓器和几只整流器組成。在書中對這種電器的設計、選材、製造、試驗調整都有詳細的敘述。

本書讀者對象是電工方面的技術人員及工人。



中小型同步發電機自動裝置

哈爾濱工業大學土電廠著

*

1902D546

水利電力出版社出版（北京西郊科學路二里溝）

北京市書刊出版業營業許可證出字第105號

水利電力出版社印刷廠排印 新華書店發行

*

787×1092 $\frac{1}{2}$ 開本*1 $\frac{1}{4}$ 印張*30千字

1959年2月北京第1版

1959年2月北京第1次印刷(0001—20,100冊)

統一書號：T15143·354 定價(第9類)0.16元

目 录

第一章 概述	2
第一节 同步发电机的工作原理	2
第二节 用直流发电机(励磁机)励磁的缺点	2
第三节 发电机的电压降落及启动鼠笼式电动机的特性	3
第四节 自励发电机工作原理	4
第五节 自励线路的优点	5
第二章 氧化亚铜整流片的制造	6
第一节 作用原理	6
第二节 电气性能	7
第三节 制造方法	9
第四节 安装与设计	15
第三章 复合变压器	17
第一节 普通变压器的工作原理	17
第二节 复合变压器的结构及工作原理	17
第三节 复合变压器的设计	19
第四节 复合变压器的制造工艺	25
第五节 复合变压器的检查与试验	28
第四章 自励装置的设计举例	29
第一节 设计步骤	29
第二节 设计举例	30
第五章 自励发电机的运行试验	33
第一节 线路的联接	33
第二节 调整试验	34
第三节 自激试验	36
第四节 调差率试验	37
第五节 启动鼠笼电动机试验	38
第六节 短路试验	39
第七节 并列试验	39
第八节 运行时注意事项	40
第九节 经济比较	41
結束語	41

第一章 概 述

第一节 同步发电机的工作原理

电机分为异步机与同步机两种，异步机主要是作电动机用，而同步机主要是作发电机用。

我們知道，当导线在恒定磁场中运动时，例如导线在马蹄形磁铁中运动时，导线内就会有电势产生。同理，当导线不动，而恒定磁场运动，例如马蹄形磁铁运动时，也会在导线中产生电势。同步发电机一般就是利用后一种原理制成的。

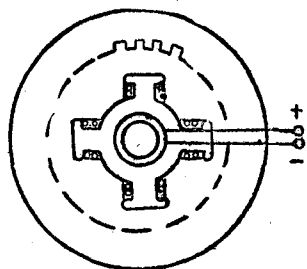


图 1-1 同步发电机

同步发电机的结构(图 1-1)主要分为两部分：(1)转子，即转动部分，它的作用相当于上述的磁铁，不过它是靠通过直流的线卷(励磁线卷)来产生电磁铁磁场的。(2)定子，静止的部分，相当于上述的导线，不过它已经通过了适当的联结绕制在迭成的矽钢片中，我們把它称作电枢。

第二节 用直流发电机(励磁机)励磁的缺点

前面已经指出，为了要使同步发电机发出电来，必须在励磁线卷内通过直流电流。目前，我国生产的中小型同步发电机，都是由与发电机联在同一轴上的直流发电机来供给励磁的，这种励磁(或激磁)方式有如下的缺点：

1. 直流发电机结构复杂，制造困难，制造工时多，成本高，据统计①发电机功率为400瓩时，励磁机成本占发电机成本的15%，发电机为10瓩时，则占35%。

2. 可靠性低，转动部件及换向器易出毛病。据统计，中小型同步发电机故障中85%由励磁机产生。

3. 直流发电机维护麻烦。

4. 技术性能差(下面将详细介绍)。

第三节 发电机的电压降落及起动鼠笼式电动机的特性

发电机的励磁是为了产生电势，励磁电流一定时，电势便不变，而发电机端电压为电势减去其内部电压降。内部电压降与负荷电流有关，负荷电流越大，此电压降越大，因此发电机端电压在带上负荷时，将发生显著下降，这是用励磁机的缺点，图1-2绘出普通同步发电机的线路图。从图中可见，应用励磁机励磁时，如果要维持端电压 $U_{\text{发}}$ 不变，可以在负荷增大时，相应的减小磁场电阻，以增大励磁电流 $I_{\text{励}}$ ，这样使得电势增加，内部压降就得到补偿，但是要变动磁场电阻就需要一个值班人员，这是很浪费人力的。当然，也可以应用一个自动电压调节器(例如自动炭阻调节器)来维持发电机电压恒定，

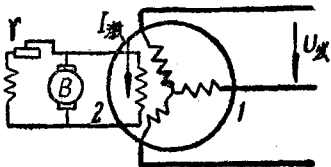


图1-2 同步发电机的线路图

但这使得发电设备复杂化，而且增加了设备投资。

即使有一个人来专门去调节电阻 r ，有时候也满足不了实际要求。例如起动异步电动机时，起动电流突然增加，发电机内

①根据某电机厂1958年第一季度资料。

部电压降急剧增加，端电压急剧下降，如果不相应的迅速增加励磁电流以维持端电压，电动机便起动得很慢，甚至起动不起来。另外端电压的猛烈下降又使线路上的电器工作不正常（电灯很暗，正在转动的电动机突然慢下来），甚至发生事故。

第四节 自动发电机工作原理

用半导体整流的自动励磁装置，可以消除以上的缺点，所谓自励，就是由发电机本身反过来给自己励磁。

图 1-3 是这种励磁线路的一种，里面包括三个元件：变压器 1，半导体整流器 2，干电池 3。当发电机转动起来以后，按按钮 4 使干电池接通，发电机得到一个不大的励磁电流而产生电势，这时发电机还没有接上负荷，此电势就是发电机的端电压，经过变压器变压后加到整流器上，整流器便有一个输出电流，此电流与干电池供给的电流迭加，使电压继续上升，这样循环作用，发电机电压就建立起来了。当电压稳定以后，就可将按钮 4 打开，发电机励磁电流便全部由本身变压器供给。

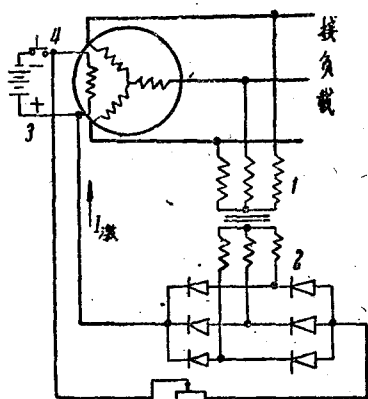


图 1-3 最简单自动发电机线路图

建立最初的电压，也可由增加剩磁来达到，但将使结构复杂，由于采用了容易在市場上买到的电池，而可以利用原有的普通发电机而不对发电机提出特殊要求。

图 1-2 仅能作为原理性的线路，实际运行是不被采用的，因为这里励磁电流仅决定于发电机电压，当发电机电压下降时，励磁电流也

减少，这是我們不希望的。

图1-4是一个利用复合变压器供电的励磁线路，这种变压器的结构如图5-1所示，它每一相有三个线卷：电压线卷 $w_{并}$ (w_1)，输出线卷 w_2 及电流线卷 $w_{串}$ ，发电机空载时(参阅图1-3)， $w_{串}$ 内无电流， w_2 与 $w_{并}$ 之间相当一个普通变压器，借此，发电机得到空载时的励磁。有负荷后， $w_{串}$ 中流过电流， w_2 内产生了附加电势，励磁电流增加，发电机电压便被维持在一定范围内。

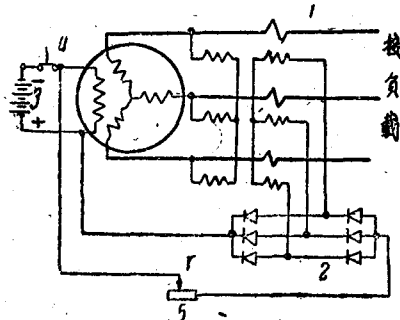


图1-4 利用复合变压器供电的励磁线路

由于电流线卷的作用，发电机在启动感应式异步电机时，励磁电流随起动电流增加而迅速增加，这就保证了异步电动机的顺利起动，而且不影响其它电器的正常工作。这一点在应用感应电动机很多的农村特别显得重要。

第五节 自励线路的优点

从以上所述可以看出，采用半导体整流器励磁的自励发电机有很多优点：

1. 这种线路用静止的变压器和整流器代替了转动的带有换向器的励磁机，大大增加了发电机运行的可靠性。
2. 励磁装置的所有元件结构简单，制造方便；干电池可在市上买到，氧化铜整流片可以自己制造，复合变压器的制造也很简单，不需要有复杂的机械加工设备。
3. 由于结构简单，制造方便，可以大大缩短制造时间，这

就加速了发电设备的生产。

4. 用这种线路，能起自动稳压作用，发电机从空载到满载，电压变化不超过 $\pm 5\%$ 的范围。

5. 用这种线路能顺利地起动大容量（与发电机的容量比较）的鼠笼异步电动机。

第二章 氧化亚铜整流片的制造

所有的东西，可以按照电流通过它难易的情况，即导电性分为三类：

1. 导体，电流很容易通过它的物体。
2. 绝缘体，电流很难通过它的物体。
3. 半导体，电流通过它的难易程度，位于导体和绝缘体之间。

现有氧化亚铜、硒、硫化物、锗、矽等几种半导体，前面两种应用的比较广泛。氧化亚铜整流片（或称氧化铜整流片）与硒整流片相比较，还有不少缺点，因为氧化亚铜整流片的反向电压仅为硒整流片的一半，同时它又消耗大量的铜，其电阻也随温度变化较大等等，所以目前工业中主要还是硒整流片。但在全民办电的情况下，采用氧化亚铜有它的优越性，因为它的材料（紫铜板）比较容易找到，设备及操作方法也比较简单。下面就着重地来谈谈氧化亚铜整流片。

第一节 作用原理

氧化亚铜整流片的结构如图2-1。在氧化亚铜与铜之间，有一很薄很薄的阻挡层，当正向通电时，它的电阻较小，但当反

面通电时，它的电阻就很大。

正向电流的方向如图 2-1 所示(即由金属电极到铜极)。金属电极可用铝、锌、镍等材料，它的作用就是使电流均匀的流过整个整流片，使正向电压降变小，提高整流片的效率。

第二节 电气性能

一、正向电流 $I_{\text{正}}$

氧化铜整流片不能在太冷和太热的条件下工作，只能在 $-30 \sim +60^{\circ}\text{C}$ 的条件下工作。温度过低，会使电阻增加，效率降低；当环境温度为 35°C 时，温升仅允许 35°C ，即是它所允许的最高温度是 $70 \sim 75^{\circ}\text{C}$ 。当温度为 80°C 或者更高时，即使短期工作，都是对整流片不利的。

发热的情况，决定了允许通过最大电流的数值，因而在环境温度低时，通过的电流可大些。采用人工冷却后（例如用风扇通风）可以使电流提高 $2 \sim 3$ 倍。

二、正向电压降 $U_{\text{正}}$

$U_{\text{正}}$ 主要分布在阻挡层上，其次是氧化亚铜上。它随着正向电流的增加而增加。温度增加时电阻变小，它会下降。此外老化的结果，会使它增加。

老化就是随着整流片工作时间的增加性能变坏，即正向电阻增加，反向电阻减小，从而使反向电流增加。

$U_{\text{正}}$ 在正常工作时，一般为 $1 \sim 2$ 伏，最大不应超过 2 伏，否则损耗太大，发热严重，降低了效率，也限制了允许通过的最大电流值。由此看出降低 $U_{\text{正}}$ ，是提高整流片质量的一个重要方面。

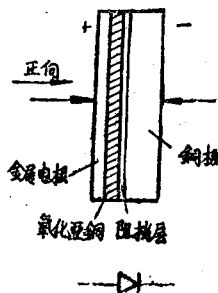


图 2-1 氧化亚铜半导体的结构图

三、反向电压降 $U_{反}$

当反向电压降过高时，会产生击穿，这样整流片将失去作用，因而有限制 $U_{反}$ 的必要。使整流片击穿的反电压称为击穿电压 $U_{击}$ ，它与整流片的质量、使用条件、时间及湿度等有关。

当加上百分之几秒后立即消失的脉冲电压时， $U_{击}$ 可达 70~100 伏。当加压时间不少于几秒的短期作用时， $U_{击}$ 为 20~30 伏。当在潮湿的情况下，即使 $U_{反}=2\sim4$ 伏都可能产生击穿，这是因为水电解后，产生氢的离子，它夺取了氧化亚铜中的氧，而使其还原成铜，从而造成了短路。这一点在制造和使用整流片的过程中，都要特别注意。

根据上述原因，设计时取一般工作的反电压为 8~10 伏，但在短期内，可以允许一定的过载。

对于图 2-3 (b) 的型号且双面的整流片我们实验结果如表 2-1。

表2-1

加 压 方 式	电 压 (伏)	时 间 (秒)	结 果
渐 渐 增 加	20	60~120	发热严重，电压加不上，击穿。
突 然 增 加	30	10	发热不很严重，性能不变
突 然 增 加	40	10	发热严重，性能变坏， $I_{反}$ 增大

室温 $t=13^{\circ}\text{C}$ ，单片，自然冷却，未经人工老化(由于时间短促之故)。以下全是在这样的条件下进行的。

四、反向电流 $I_{反}$

当然 $I_{反}$ 越小越好，否则会使整流器的输出电流平均值下

降，而且增加損耗，降低效率。

在滿載工作时，反向电流为正向电流的 5% 时，即認為整流片是可用的。

我們应当知道整流器伏安特性，以便判断整流片的性能。我們得到的伏安特性曲線，如图 2-2 所示。

第三节 制造方法

总的程序：剪料
 → 清洗 → 加热 →
 冷却 → 除去氧化銅
 → 电镀、貼錫箔 →
 檢查 → 老化。下面将一一叙述。

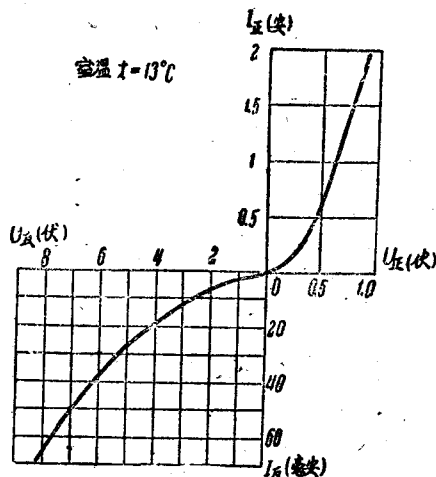


图 2-2 氧化亚銅整流片伏安特性

一、材料、尺寸

一般工业中比較好的紫銅板即可作为原材料。当然越純越好，最好含銅量不低于 99.96%。这实际上是很难办到的。但純度太低，那就会在还没有加热到 1,030°C 时就溶解，或者放入冷水中时，氧化膜大部分脱落。

目前有下面这几种尺寸(如图 2-3 所示)，同时也有双面的与单面的。所謂双面就是两面都有氧化亚銅，这就相当两个整流片并联。对于大功率來說，应采用双面方形的。

采用何种方式，可視需要决定，也可自行設計。考慮到設備和技术条件，建議取电流密度 $j = 20$ 毫安/公分²，这样，用

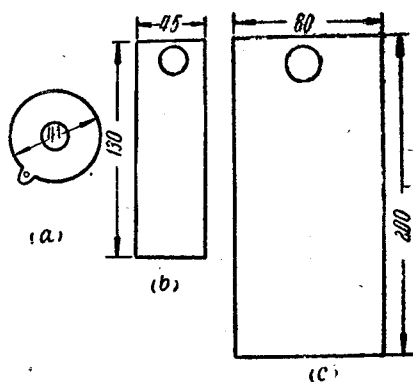


图 2-3 氧化亚铜整流片的几种尺寸

以下的公式就可以决定所需面积尺寸之大小。

$$S = \frac{I_{\text{正}}}{2 \times j}$$

$I_{\text{正}}$ 为要求通过的电流平均值，乘 2 就是因为一般采用双面的。

二、清 洗

把铜料放入浓度为 30% ① 的硝酸中约 1 分钟，取出后用清水冲，刷子刷；然后放入 5% 的苛性钠中，把残存的酸中和掉，然后再用刷子刷，清水冲；最后烘干。这是酸处理的全部过程（以后酸处理全是这样，不再重复）。

放入酸中的时间最好不要过长，以免被腐蚀的太深，腐蚀物附于其上面而不脱落；采用砂纸擦时，砂纸不可过粗，用力也不可过大，否则会造成深纹；这样都对氧化膜生成不利。当然，用一般的清洗方法清洗一下也是可以的。

三、加 热

把铜料放入 1,030~1,040°C 的炉子中（温度应始终保持恒定），对图 2-3(a) 的尺寸加热时间为 10~12 分钟，对 (b) 为 12~14 分钟，对 (c) 为 20 分钟。

在这一过程中，氧化铜及氧化亚铜开始生成。温度的高低还可视铜的质量而定，不过一般在这样的温度下最适合，再高

① 30% 是指 70 份重量的水与 30 份重量的酸相配合。以下的百分数均与此类似。对此比例关系要求并不严格。

就不易控制了，因为純銅的熔点为 $1,080^{\circ}\text{C}$ ，加热時間的长短，可由炉子、共同加热的片数等情况，作适当的变动。我們确定加热的时间越长，反向电流越小，而正向电压降一般就大些，反之，結果也相反，而且会使 $U_{\text{击}}$ 变小。

放入炉中的方法，可採用图 2-4 的架子。

从炉中取出时，有白、黄、紅等几种綜合的颜色，而且半透明平滑，象鏡子一样。

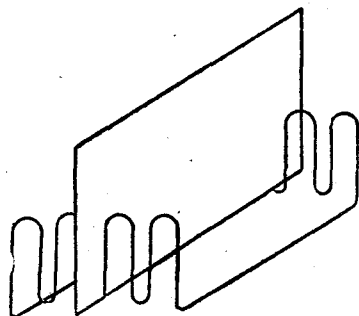


图 2-4 加热氧化亚銅时所用的架子

四、冷 却

迅速地把 1030°C 的銅片，投入 600°C （应保持恆定）的炉子中，停留的时间，对于(a)为 5~7 分，对于(b)为 7~9 分，对于(c)为 17 分。之后迅速投入流动冷水中。

上述冷却过程，对整流片的性能有巨大的影响。在此炉中，氧化亚銅进一步形成和稳定，而且开始分为两层，一是含有 0.03% 过剩氧的氧化亚銅，另一是純氧化亚銅即阻擋层。

当把整流片从冷水中取出时，表面就有一层光滑的深灰色的氧化銅。在棱角处，由于收縮情况不一样，氧化銅及氧化亚銅部分的脫落，露出銅色、紫紅色及紅宝石色。我們認定：在这个炉子停留的时间应比加热炉中的时间短些；半透明紅宝石色越多越深，阻擋作用越好，但正向电压降一般就較大。

五、清除氧化銅

氧化銅各方面的导电性都不好，必須清除。为此用酸处理，有关文献指出，把整流片放在酸中 4~6 分鐘后，氧化銅

就基本上自行脫落。但是我們一般在 15~30 分才脫落，而且表面粗糙，有極小的孔發生，結果常常發生短路現象，使成品率降低。所以後來我們就干脆不用酸，而用砂紙擦，然後用清水沖洗淨，並烘乾（注意不能超過 80°C）。這樣，短路現象就減少了。要注意砂紙應細些，不要把氧化亞銅擦破，造成短路。

我們認為在酸處理過程中，造成短路的原因是由於腐蝕不均勻，在氧化亞銅薄弱的地方，氫離子把整個氧化亞銅還原成銅了。但這並不能把用酸腐蝕這一方法否定掉，因為它已成功地被廣泛採用了。上述短路現象，僅是少量實驗中的事，我們尚未做進一步的研究。況且用砂紙有這樣一些缺點：即消耗大量的砂紙，又浪費人力。

六、附上金屬電極

大約按照硫酸鋁 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 60，硫酸鋅 ZnSO_4 250，硫酸鈉 Na_2SO_4 150，糊精 10，蒸餾水 H_2O （較清潔的水也可以）1,000 的重量比例配製電解液。放入 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 和 Na_2SO_4 的目的，是使電解液的導電性變好和生成復鹽。糊精是澱粉，作用是使電鍍的表面細致些，而且附着的好些。用甘油也一樣。這兩種材料不用也可以。

把氧化銅整流片露出銅的地方，用漆絕緣或其他的方法絕緣，並烘乾。放入裝有上述電解液的槽中（如圖 2-5）並把銅板作為負極。同時把鋅板（比較純的就可）對稱地放在整流片的兩旁，並做正極。接上直流電源，當有 $j = 15$ 毫安/公分² 的電流通過，時間約為 40 秒即可取出整流片（我們作的整流片截面積 $S = 50$ 公分²，通過 1 安培電流，時間為 40 秒）。我們認為電鍍時採用大電流、短時間的辦法是好的，因為時間長了，往往形成

短路。其原因我們認為也是氫離子在氧化亞銅薄弱的地方，把它全給还原成銅了，或者是鋅離子滲入了涂漆的地方，因而與銅接觸（因為我們漆涂得太厚，電鍍時內部還沒干）。

由於鍍的鋅層較薄，表面電阻還不是很小的，貼上一層錫箔就能使電壓下降，一般可以從3伏多降到1伏多。貼合劑是由石墨、酒精、胶水混合成的，其間無一定的嚴格比例，不過胶水不可過多，否則會使電壓降增加；

但也不可太少，否則貼的不牢。具體比例可通過實驗來配調。應當注意的是石墨粉的顆粒不可過粗，否則成不了漆狀。一般用細銼在固體石墨上銼下來的石墨粉即可。同時更要特別注意，在把石墨漆粘合劑涂到整流片上去時，不要與露銅的地方接觸，而造成短路（這往往是容易犯的毛病）。

貼錫箔有很多缺點，首先就是不牢固，易損壞，特別是在整流片發熱比較嚴重的时候，錫箔都翹起來了，其次手續也并不簡單。我們認為可以考慮用其他的辦法來代替貼錫箔。

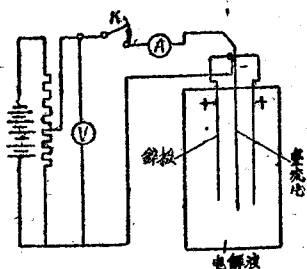


圖 2-5 電鍍裝置

七、質量檢查

採用這樣的綫路圖，可以節省大量的時間。

1. 正向 看流過正常工作電流時，電壓降等於多少，是否合格；一般應當滿足 $U_{正} < 1.5$ 伏。我們一般獲得的 $U_{正} = 1.3$ 伏左右（當 $I_{正} = 2$ 安時）。

2. 反向 看接入8伏時，反向電流為多少，是否合格；一般應當滿足 $I_{反} < 150$ 毫安。我們做的 $I_{反} = 70$ 毫安。

这两条件满足后，整流片即算合格。在作实验时要特别注意以下几点：

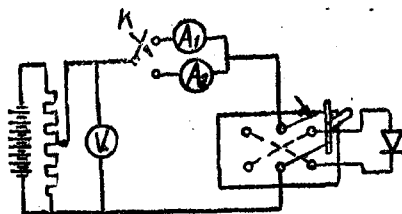


图 2-6 检查线路

A_1 —正向时用安培表； A_2 —反向时用毫安表。

(1) 与整流片接触处必须良好，否则会使电压降变大，或者形成短路。不仅如此，当接触面积增大、压力增加，均会使正向电压变小，一般可以由 2 伏多变成 1 伏多。

(2) 不要带电操作，这样往往由于局部接触不良，而形成火花，把氧化亚铜毁坏。

(3) 当整流片不合乎要求时，不要马上否定，应找找原因。若反向电流过大，或短路，就应把短路的地方找出来，用 30% 的硝酸把锌腐蚀掉。若电压降过大，就可以用酸处理一下，或采用其他办法。这样处理后仍不行者，才算是废品，并考查其原因。

应当提出，在制造过程中，往往容易把过多的精力放在加热和冷却的时间上，而忽视了酸处理及电镀时的时间过长，以及实验时的不正确。根据我们的实验结果来看，造成废品的增加，跟后面这些因素有着重大的影响。

八、人工老化

氧化亚铜整流片的老化现象，比其他半导体整流片均严重。特别在初期时。为了使之尽早稳定下来，为了加速老化这一过程，我们就必须采用人工老化。人工老化就是将整流片放入 50° 的保温箱中，经过 24 小时后取出。对于要求高稳定的整流片，应把它放在 90° 中保温，时间长些，甚至数日。

第四节 安装与設計

一、安 裝

我們是采用如下的联結方法：即把整流片鑽有孔的一端，用帶有絕緣紙的螺杆联結起来，并把两金屬板并联，而在銅板上焊上導線，每片之間应注意絕緣，这样就可以按照我們的需要串并联了。具体如图 2-7 所示。

最后再把它和变压器統一裝置在一通风好的箱內，这就是整个励磁裝置。

二、設 計

前面已經談到，我們采用桥式联結，就能把交流变成我們励磁所需要的直流。励磁电流 $I_{\text{励}}$ 和电压 $U_{\text{励}}$ 都是事先給定的。为了满足这一具体要求，在电桥中的每臂必然会有相应的电流通过，以及相应的电压加于其上。并联多少整流片，以及串联多少整流片才能即满足 $I_{\text{励}}$ 和 $U_{\text{励}}$ 的要求，又不至使整流片损坏呢？这就需要我們設計。

在串并联的过程中，必須注意選擇性能相同的，起碼也要性能相近的整流片。否則，在并联时，会造成电流分配得不均匀，在串联时，会造成电压分配的不均匀，这样都可能引起整流片的毀坏，或者有些整流片的效力沒有得到充分发挥。也必須注意到由于整流片的非线性，串联并联計算电阻的公式不再实用。

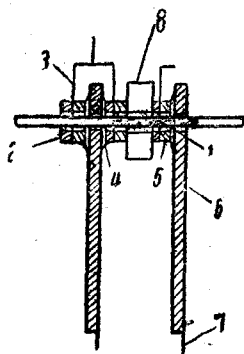


图 2-7 整流片的安装

1—包有絕緣紙的螺杆；2—鉄墊圈；3—銅綫；4—接触彈簧片；5—紙絕緣片；6—氧化銅整流片；7—焊在銅板上的導綫；8—絕緣套。