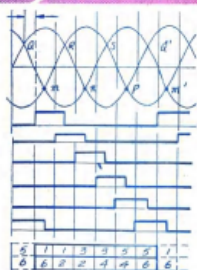
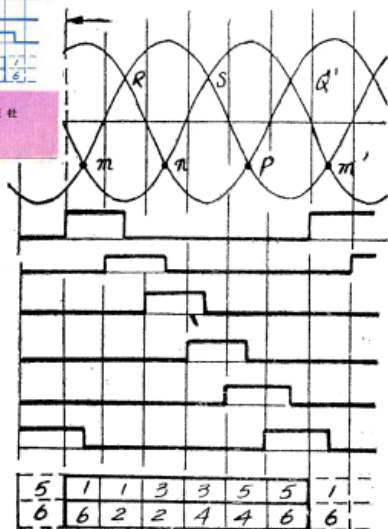


晶闸管中频电源基本知识

电源基本知识



浙江科学技术出版社



浙江科学技术出版社

责任编辑：任路平

封面设计：周盛发

晶闸管中频电源基本知识

杨恩俊 朱伯年 编著

汪栖生 审校

*

浙江科学技术出版社出版

浙江新华印刷二厂印刷

浙江省新华书店发行

开本：850×1168 1/32 印张：12.5 插页：3 字数：325,000

1989年11月第 一 版

1989年11月第一次印刷

印数：1—5789

ISBN 7-5341-0220-0/TN·3

定 价： 6.00 元

内 容 提 要

本书共分六章。第一章为基础知识；第二章为晶闸管知识；第三、四章叙述了中频电源线路的主要部分，作者在这两章中系统地讲述了整流和逆变电路的细节；第五章为负载电路和厂房布置，这部分内容常为读者关注；第六章详细介绍了中频电源的调试。全书有近300幅插图，附图提供了完整的中频电源的电原理图，内文对维修作了详细介绍。全书由浙江大学汪樵生教授主审。

前 言

晶闸管又称可控硅，是一种大功率电子开关。中频电源利用晶闸管将平常电网的三相50赫工频电能变换成几百赫或几千赫以至几十千赫的单相交流电能，它是一种高效率的频率变换装置。人们常利用这种装置作为感应加热的电源，它控制方便，效率高，使用时劳动强度比其他加热方式低，而且采用这种中频感应加热技术常常能形成生产流水线或自动线，提高产量和质量，因此这种感应加热技术已用于许多生产过程中，常见的如用于精密浇铸钢零件，不锈钢或合金钢的熔炼，真空熔炼，锻件的加热，钢管的弯曲，挤压成型工件的预热，钢零件的热处理，表面淬火和退火，金属零件的焊接，粉末冶金，以及输送高温工质的管道加热等。

我国自70年代初发展此项技术以来，全国已在机械、冶金、电力、铁道、交通、纺织，以及国防工业等部门中广泛采用。按照几个主要中频电源制造厂的历年产量，根据我们不完全统计，估计目前我国已有中频电源的总数在5000台以上，包括电源和感应炉及辅助设备，总投资已有几亿元，而且近年来中频电源的年产量和单机容量还在不断扩大，这些设备的正常运行对生产带来了巨大的经济效益，例如用中频弯管代替氧乙炔加热弯管能提高工效几十倍，用中频熔炼能保证钢的成分，用中频热加工可在相当范围内发展无切削或少切削工艺，采用中频加热可提高某些生产的自动化程度。不少工厂的中频电源往往是一条生产线上的主要设备，或者，甚至是整个工厂的关键设备，一旦中频电源出了故障，常使整条生产线或整个工厂停止生产，损失巨大。作者近十多年来在几十个中频电源使用单位，经手了许多台设备的调试和维修，深深感到提高中频使用单位操作人员的电源基本知识水平，是非常迫切的。中频电源正如

其他电力电子设备一样，是一种多焊点、多接插件、多零部件组成的大型水冷却电子设备，在长期使用中难免出现这样那样的故障或零部件的衰老。目前不少厂由于基本知识的缺乏，对一些不太复杂的故障也束手无策，或乱修乱碰，烧坏晶闸管，这就大大影响了生产的正常进行，因此，广大用户单位和制造单位都迫切希望有一本详细介绍中频电源基本知识的书，以提高维修水平。

目前我国使用的中频电源主要有并联逆变式、串联逆变式和倍频式三类，而其中约80~90%为并联逆变式，国际上以及我国进口的中频电源也以并联逆变式为主，因此本书主要讲授并联逆变式中频电源，兼顾讲授其他几种中频电源的基本原理和主要波形，本书以传授基本知识为主要目的。但维修的关键是一要分析，二要经验。而善于分析必须懂得电路原理，故本书在讲授基本知识的同时还系统地说明了中频电源的原理。本书的读者以具有高中文化水平的电工为主，书中避免采用较深的高等数学知识，对于具有大专文化水平的读者，本书可以作为一种典型电力电子装置读本来深入掌握，并由此能获得不少实际知识。对于中频电源中的触发系统和控制系统，目前我国现有的多数装置中采用分立元件和继电器接触控制，一小部分装置中采用了一些集成电路，至于微处理机，则刚刚才开始进入中频电源的控制系统。因此本书以讲授分立元件和继电器接触线路为主。以上是我们编写本书的几点原则。

本书内容共分六章，第一章为基础知识，已具备这方面基础的人可以不再阅读这一章；第二章为晶闸管知识，它不仅在中频电源中有用，在其他电力电子装置中也常用到；第三、四章内容为中频电源线路的主要部分，也是中频电源最易出现故障的部分，我们在这两章中比较有系统地详细讲授了整流和逆变电路的细节；第五章为负载电路和厂房布置。使用中频电源时负载匹配、母线馈电、感应器参数以及频率选择等问题是不少用户常常向我们询问的，要正确发挥中频电源的作用，这方面的知识常常是必需的；第六章详细而系统地讲授中频电源的调试。对于大修、改装或新安装的中频电

源需要作全面的调试，对于一些难于找出的故障，必要时也可将中频电源作局部调试，以排除无故障的部分。

本书经浙江大学顾逸新副教授审阅，全书由浙江大学汪轶生教授主审，其中第一、二、三、四章由杨思俊编写，第五、六章由朱伯年编写。本书编写时曾参阅国内各兄弟单位和个人撰写的教材、专著和文献。本书编写过程中还承蒙浙江大学电工厂、湘潭电机厂、上海华一电器厂、上海立新电器厂、杭州开关厂、江苏太仓阀门厂……等许多工厂大力协助，并蒙我校应用电子技术教研组林渭勋教授、宋韶工程师等许多同志大力支持，作者在此一并致以深切谢意。由于作者水平所限，书中内容不当之处，请读者批评指正。

编者 1988年9月于杭州

目 录

第一章 基础知识	(1)
第一节 中频电源概述.....	(1)
第二节 中频电源的电路组成.....	(6)
第三节 电阻和有关的几个基本问题.....	(9)
第四节 电容器.....	(21)
第五节 磁场和电感.....	(28)
第六节 交流电路.....	(39)
第七节 二极管和晶体管.....	(67)
第二章 晶闸管的使用	(78)
第一节 晶闸管的结构和工作原理.....	(78)
第二节 晶闸管的特性和定额.....	(82)
第三节 晶闸管的发热与冷却.....	(90)
第四节 晶闸管的使用要求.....	(94)
第五节 阻容吸收电路和串联电感.....	(100)
第六节 快速熔断器.....	(102)
第七节 晶闸管的串联和并联.....	(105)
第八节 晶闸管的检查和测试.....	(111)
第三章 整流电路	(113)
第一节 三相桥式不可控整流电路.....	(113)
第二节 三相可控整流电路.....	(119)
第三节 Δ -Y双整流桥(十二脉波整流电路).....	(128)
第四节 整流触发电路.....	(133)
第五节 负反馈及多机并联.....	(146)
第六节 限压、限流和电流电压调节器.....	(151)

第七节	过流过压保护	(160)
第八节	进线端的保护设备与电器	(167)
第九节	平波电抗器的作用及其故障	(173)
第十节	整流电路常见故障	(178)
第四章	并联逆变电路原理及维修	(183)
第一节	逆变电路分类	(183)
第二节	并联逆变电路的工作原理	(186)
第三节	并联逆变器的波形和常见故障	(188)
第四节	并联逆变电路的触发引前方式	(193)
第五节	逆变触发电路及其常见故障	(195)
第六节	并联逆变器的升降压运行	(201)
第七节	并联逆变器的过压和短路保护	(203)
第八节	并联逆变器的启动电路及其故障和提高 启动能力的方法	(206)
第九节	中频电源的继电接触电路	(213)
第十节	常用的中频电源原理电路图分析	(216)
第五章	负载电路与厂房布置	(220)
第一节	并联逆变器的负载电路	(220)
第二节	负载的阻抗匹配	(232)
第三节	感应加热器结构和简单计算	(237)
第四节	中频淬火感应器的设计	(285)
第五节	感应熔炼炉	(298)
第六节	母线与水冷电缆	(343)
第七节	冷却水系统	(350)
第八节	中频电源装置的厂房布置	(356)
第九节	负载回路的主要故障	(358)
第六章	中频电源的调试	(362)
第一节	中频电源的一般性检查	(362)
第二节	控制电路的调试	(367)

第三节 主电路调试..... (372)

第四节 双机并联调试的简单介绍..... (380)

附录：本书使用的主要物理量符号说明

第一章 基础知识

本章内容为针对目前多数第一代中频电源中所必需的基础电工知识。由于篇幅限制以及本书的性质,不宜深入讲述这方面的知识。同时由于本书是在学过高中物理学或专科电工学的基础上编写的,因此本章内容采取非常简要的讲述方式,希望能以不太深的数学推导和不太长的篇幅介绍比较广泛的电工基础知识。虽然本章内容比较扼要,但对学习和理解中频电源的原理是非常重要的。对于能较快看懂本章内容的读者最好能记牢本章的内容,对于一时不容易看懂本章内容的读者,建议首先复习一下高中物理学或中专电工学,然后仔细反复看懂本章内容,对于维修中频电源除实践经验和专门知识外,本章介绍的基础知识也是很必要的。

第一节 中频电源概述

中频电源是通过电磁感应对金属进行加热的电源设备。人们早在16世纪就开始研究了电磁感应现象。例如图 1-1 中两个线圈互相耦合在一起,在第一个线圈(左面的线圈)中突然接通直流电流(即将图中开关K突然合上)或突然切断电流(即将图中开关K突然打开),此时在第二个线圈所接的电流表中可以看出有某一方向或反方向的电流通过。这种现象称为电磁感应现象,第二个线圈中的电流称为感应电流,第一个线圈称为感应线圈。若第一个线圈的开关K不断地接通和
1—第一线圈; 2—第二线圈; 3—电流表; 4—开关

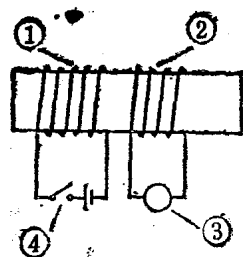


图1-1 电磁感应

第一方向和反方向的电流。每秒内通断的次数越多（即通断频率越高），则感生电流将会越大。若第一个线圈中通以交流电流，即它的电流不断地改变方向和大小，则第二个线圈中也将感生出交流电流。不论第二个线圈的匝数为多少，即使只有一匝也会感应出电流。如果第二个线圈的直径略小于第一个线圈，并将它置于第一个线圈之内，则这种电磁感应现象更为明显，因为这时两个线圈耦合得更为紧密。图1-2表示在一钢管上绕了感应线圈，钢管可以看作有一匝的直接短接的第二线圈。当感应线圈内通以交流电流时，在钢管中将感应出电流。平常在50赫的交流下，这种感生电流是不大的，所产生的热量往往仅使钢管温度略有升高（譬如 $n + ^\circ\text{C}$ 或稍高一些），不足以使钢管加热到热加工所需温度（常为 1200°C 左右）。上述赫为频率单位，符号为 H_2 ，1赫即每秒1周波。线圈中交流电的频率，譬如从50赫提高到1000赫或更高，此时相当于提高图1-1中开关K的通断频率，则钢管内感应的电流将会增大，可以大到将钢管局部（在感应线圈内的部分）烧红甚至熔化。控制感应线圈内的电流大小和频率，可以有效地将钢管加热到所需温度进行各种热加工（如弯管、焊接、封口、扩径等）。

这种感应加热方式不仅可用于钢管中，也可用于实心的钢棒或型钢件中。这些钢工件被加热到高温后再送到加工机床上进行热加工（如锻压、拉伸、轧制、剪切等），或者送到淬火机床上进行热处理。

图1-3中，我们将感应线圈绕在

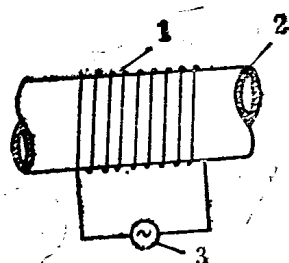


图1-2 感应线圈与钢管间发生电磁感应

1—感应线圈；2—钢管；3—交流电源

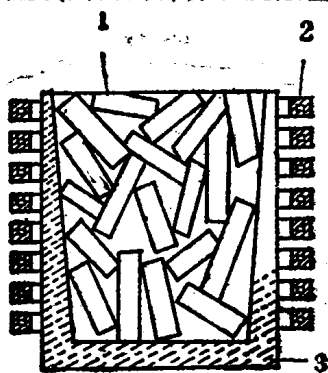


图1-3 感应熔炼炉

1—钢料；2—感应线圈；3—坩埚

一只耐高温的绝缘坩埚外面。在坩埚内放置了需要熔化的钢料。当感应线圈内通以中频（譬如1000赫）电流时，坩埚内的每块钢料都可看成一个单匝副线圈，每块钢料内部有感生电流，最后每块钢料都将被熔化成钢水。在熔化的钢水中加入各种所需化学元素，可以配制不同成分的钢材。人们常用这样熔化的钢水精密浇铸各种复杂形状的钢零件，以代替切削加工成形。也可用类似的中频熔炼炉在真空下或隋性气体保护下熔炼各种特种钢。

以上的工作方式都属于中频感应加热。中频感应加热不仅用于加热钢料，而且可加热其他金属，较常用的如加热铝、铜等。此外还可通过金属间接加热非金属物质，如通过不锈钢管道加热管道内流动的流体介质，通过钢压模加热模内的粉末压制品等。

中频电源是为了进行上述感应加热用的电源设备，按我国有关规定，中频电源的型谱如下：

表1-1 我国中频电源型谱

频 率	功 率 （千瓦）						
400	2000	1000	500				
1000		1000	500	250	100		
2500			500	250	100	50	
4000				250	100	50	
8000				250(300)	100(160)	50	25

根据实际负载需要，制造厂还提供型谱外的各种产品，如160千瓦/千赫，300千瓦/千赫，1250千瓦/千赫，以及500赫和8千赫以上的中频电源等。因为晶闸管中频电源的容量和频率很容易改变，故制造厂能灵活地根据用户的需要提供各种型谱外的产品。

中频电源的型号，如100千瓦/千赫，写成KGPS-100-1.0，其含义如图1-4所示。

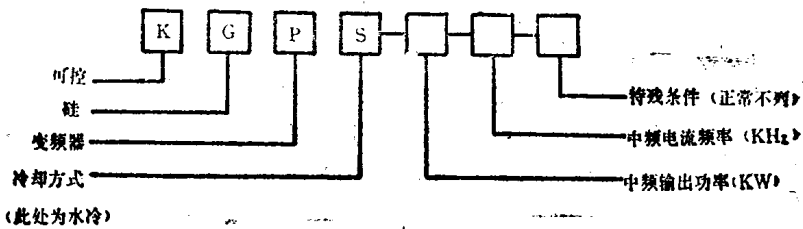


图1-4 中频电源型号意义

平常中频电源的所谓“中频”大多是指0.4千赫到几十千赫范围，但目前通常生产的中频电源，我国为8千赫及以下，国际上多数为10千赫及以下的电源。

在50年代中期我国开始生产中频发电机组。直到目前中频发电机组仍然是中频电源的一种类型。该机组内包括一台50赫三相交流电动机和一台结构特殊的等效多级感应子式发电机。发电机被电动机驱动，发出单相中频电能。这是一种旋转式发电机组。早期的中频电源基本上皆为这种形式。从60年代后半期，国际上开始发展了晶闸管中频电源。我国从70年代初开始生产晶闸管中频电源，现在它的生产量已远远超过中频发电机组。晶闸管中频电源所以会得到迅速发展的主要原因在于它比发电机组具有下列优点：

(1) 产品设计简单，制造方便，不需大量工夹模具和生产旋转电机的大型设备，对熟练技工的要求也比较少。它主要是装配、焊接、电工和一般钳工等性质的工作，随着标准化、组件化、集成化程度的提高，制造静止式晶闸管中频电源显得越来越比制造发电机组方便，而且功能越来越完备。

(2) 效率高。晶闸管中频电源的满载效率按我国行业标准为92%，而电动发电机组的效率是电动机与发电机效率的乘积，在满载时此乘积一般为80%左右。而且一般中频电源，不论是旋转式或是静止式，常不会整天工作于满载状态，平常都留有一定的设计余量，大多数负载在生产过程中也会不断发生变化，这种所谓“大马拉小车”的现象是常常存在的。在电动发电机组中，在半负载或更

轻负载下，照样有满载时那么大的旋转损耗、铁心损耗以及变化不太大的激磁损耗，因此在轻负载时它的效率明显地降低。在晶闸管中频电源中它的主要损耗为直流电抗器、母排和晶闸管中的电阻损耗，轻负载时这些损耗也随之减少，故在轻负载时仍能保持较高的效率。因此实际运行中发电机组的效率比晶闸管中频电源要低得多。例如在40~50%负载下，晶闸管中频电源仍可保持90%以上的效率，而发电机组的效率降到70~75%左右。

(3) 晶闸管中频电源中采用了频率自动跟踪系统。即电源发出的频率始终自动接近于电容电感负载回路中的谐振频率。平常的负载为感应线圈，线圈内放置钢料工件，线圈两端并联了中频电容，组成负载谐振回路（如图1-5中的第④部分）。线圈的等效电感常常随线圈内部工件（如钢管、钢块等）的温度、形状、数量而变化，在升温过程中一般均会不断变化（譬如钢材温度过了居里点时就变成非磁性材料，电感就明显变化）。因此谐振频率不断发生变化（谐振频率与电容、电感的关系见以后说明）。中频电源必须工作于负载回路的谐波频率附近（其理由见以后第四章说明），才能提供足够大的功率。即中频电源必须工作于所谓“准谐波”状态。在晶闸管中频电源中，由于电源频率可以自动跟踪负载回路，因此很容易保持准谐振状态。可是在电动发电机组中，中频发电机的频率是由电动机的转速和发电机感应子极数决定的，它不能随负载电感的变化而调整，这对它的运行带来不便。不仅如此，在晶闸管中频电源中切换中频电容器可以随意改变负载回路的振荡频率，电源始终能自动跟踪这振荡频率，这样就容易实现负载回路和电源之间的阻抗匹配（其理由见以后第四章说明），这种阻抗匹配对于充分利用设备，输出最大功率，缩短热加工时间和提高加工质量都是很有影响的。

(4) 晶闸管中频电源惯性小，能迅速控制其电流和电压，甚至频繁地开停，并容易实现自动控制，所需控制功率甚小。而发电机组惯性大、反应慢、起动时间长，即使不停转机器，也只是改变电

压，改变也较慢，而且每次建立感应子中的磁场都要消耗一定的瞬态能量。

(5) 晶闸管中频电源没有旋转部分，体积小，重量轻，故安装简单，噪声和振动均较小。而中频发电机组往往有很强烈尖锐的中频噪音，常不得不为此设立专门的封闭式房间。

然而晶闸管中频电源也有某些缺点，主要是：

(1) 它从电网所吸取的电源为方波，对电网产生谐波干扰。这个问题在大型中频电源中比较突出，因大型电源谐波电流的大小可能会超出电网的允许值。为此在大型中频电源中常采用12相或更多相整流（见以后第三章说明），以减少谐波电流。

(2) 由于晶闸管中频电源接插件多、继电接触点多，焊点多、以及部分产品所用元件和工艺不够完善，容易造成故障，而维修故障需要一定的技术经验和理论知识，这对使用上造成困难。但另一方面，若是具备一定的技术经验和理论知识则修复这类电力电子产品却往往比修复发电机组快，中频发电机组中常见的故障如轴承损坏、气隙不均匀甚至转子铁心相擦、线圈损坏等，对用户而言容易检查但修复较困难。而本书目的正是为了提高维修人员的电力电子技术水平以弥补此项缺点。

因此总的来讲，晶闸管中频电源技术上比较先进，经济上有明显效益，制造安装投产均较迅速，故它的应用范围日益扩大。它的频率、容量也在不断发展。组件化、集成化和标准化程度正在不断提高。新型元件开始研究应用，控制方式在更趋完善，微机控制也已开始。

第二节 中频电源的电路组成

中频电源的主线路有若干种，但目前大部分用的是并联逆变式中频电源（简称并联式中频），本书主要根据这种形式的电路来说明。

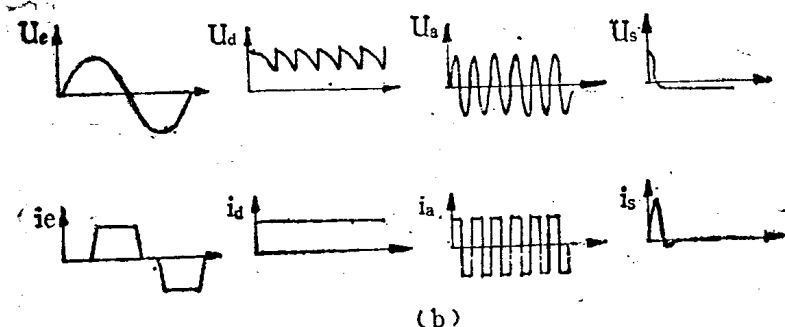
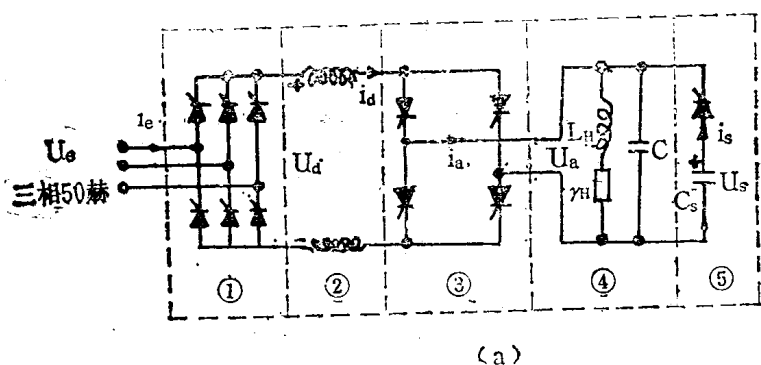


图 1-5 中频电源原理示意图

图 1-5 为并联逆变式中频电源的原理示意简图，其中①为整流电路，图中所示为常用的三相全控桥式整流电路，它的作用是将三相电网输入的 50 赫电压整流成脉动的直流电压，如图下部示意波形所示，从 u_s 变成 u_d 。此时电网每一相中的交流电流波形为近似矩形波，如图中 i_e 波形所示。这部分的原理将在第三章中说明。图中②为滤波电路，它实质上为上下分列。通常共一铁心的两组电抗器，使得从脉动的直流电压源 u_d 获得平直的直流电流 i_d 。这部分作用也将在第三章中说明。图 1-5 中③为单相桥逆变器，它的作用为将平直的直流电流 i_d 变换成单相中频交流电流 i_a ， i_a 的波形也近似矩形波，但频率较高（譬如 1000 赫）。这部分的作用将在第四章中说明。

图 1-5 中④为负载谐振回路。它是由一感应线圈（内含工件），

即图中的 L 、 r ，和一组中频电容 C 并联组成， r 常甚小。它们形成一并联谐振回路。它的振荡频率接近于中频电源的工作频率（譬如1000赫）。由于此负载回路由 L （及 r ）和 C 并联组成，故这种中频电源称为并联逆变式中频电源。由于并联负载回路固有的谐振特性，使得矩形中频电流 i_a 流过此并联电路时，会在负载端引起近似正弦的中频电压 u_a ，如图中所示。这部分工作原理将在第四和第五章中说明，图中⑤为起动电路，起动时在起动电容 C_s 上预先充足电荷。起动时 C_s 上的电荷迅速放出到 C 上，引起 C 、 $L(r)$ 电路的初始振荡。有了这种初始振荡，逆变器将会按此振荡频率补充能量，使中频电源最后达稳定工作，这部分的作用将在第四章第八节中说明。

从上面说明，我们可将图1-5画成更为简单的框图，如图1-6所示。

从图1-5中可以看到整流电路、逆变电路和起动电路中均采用晶闸管。这些晶闸管每个都是一个大功率电子开关。这些晶闸管是整个电路中的最关键元件。故这种电源叫做晶闸管中频电源，或叫可控硅中频电源。晶闸管的开关作用将在第二章中说明。

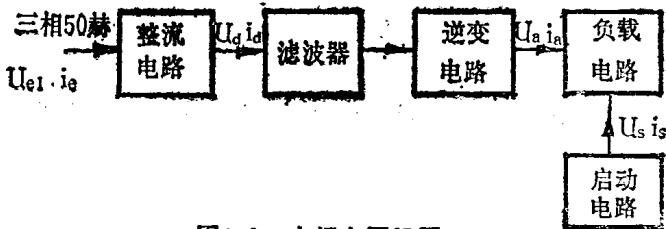


图1-6 中频电源框图

图1-5和图1-6所示的只是中频电源的主电路示意图。实际上还需要更多的二次电路和元器件设备。例如每一只晶闸管都需要适当的触发脉冲去触发它，每一部分电压都需要根据负载的性质进行控制，电源的输出频率必需与负载回路的固有谐振频率相接近，整个电路需要针对各种异常状态和故障状态作出判断和必要的保护，整个电路中还要配备必要的电器设备和各种指示设备，电源中还要