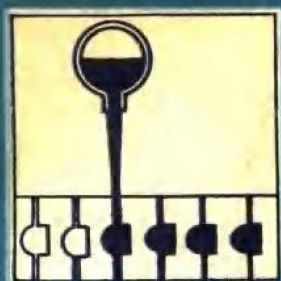
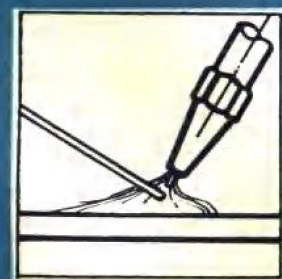
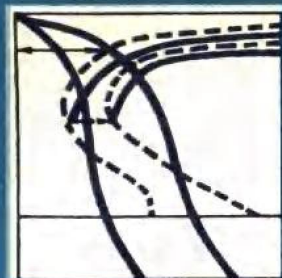


高等学校试用教材



感应加热装置

洛阳农业机械学院梁文林 编



机械工业出版社

感应加热装置

洛阳农业机械学院梁文林 编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $10 \frac{1}{2}$ · 字数 254 千字

1981 年 4 月北京第一版·1981 年 4 月北京第一次印刷

印数 0,001—6,600 · 定价 1.10 元

*

统一书号: 15033·5029

前 言

本书是根据《高等学校第一机械工业部对口专业座谈会纪要》的精神以及1978年6月召开的热处理专业教材大纲审订会议所通过的《感应加热装置》教材大纲编写的。本书重点讲述了高频感应加热设备的工作原理。书中系统地、详细地分析了目前我国生产的高频感应加热设备中,各种类型的可控整流器的工作原理、各种整流电路整流电压值的计算公式以及各种整流波形。针对高频感应加热设备中的高频振荡器和超音频感应加热设备中的超音频振荡器,综合分析了电子管振荡器的工作原理;分析了三回路振荡器和单回路振荡器实现临界调节的各种方法;介绍了60kW~200kW的几种典型振荡器的实际线路。在高频感应加热设备的调试一章中,着重介绍了根据可控整流器、振荡器的工作原理调试设备的方法;提供了调试时的一些参考数据,并介绍了调试中经常碰到的一些问题(如整流负载、电源侧的过压与过流)的处理方法。对于机械式(电动-发电机组)和可控硅中频电源也作了简单介绍。

对于“高频感应加热设备”的名称有多种不同的说法,诸如高频感应加热电源设备、高频设备、高频感应设备、高频发生器、频率发生器、高频电炉等等。目前,我国还没有统一的名称。鉴于现状,并考虑到多数的说法,本书采用高频感应加热设备的名称。

本书作为热处理专业《感应加热装置》课程的教材,也可作为从事这方面工作的工人、技术人员的参考书籍。

本书由洛阳农业机械学院梁文林同志编写,由山东工学院朱维平同志审校。在编写过程中得到了铁岭电子设备厂领导、工人师傅、技术人员的支持与帮助,他们对初稿中的重点章节提出了宝贵意见,夏越良、钟瑞璋二同志提供和推荐了必要的资料;还得到无锡电炉厂、开封电炉厂等许多厂矿单位的大力支持。在审稿过程中,洛阳拖拉机厂沈庆通、蒋良元二同志对书稿提出了宝贵意见。在制图过程中,得到洛阳农业机械学院热处理教研室部分同志的帮助。在此表示衷心感谢。

由于编者思想水平和业务水平有限,书中一定会有错误及欠妥之处,望读者批评指正。

目 录

概 述	1	(三) 阻容移相器与阳极变压器的配 合	34
第一章 可控整流器	4	(四) U_g^- 整流器	38
§ 1-1 高频感应加热设备的基本工作原 理	4	(五) U_g^+ 整流器	39
§ 1-2 真空二极管和充气二极管	7	§ 1-9 闸流管栅极电压的移相控制法	39
一、真空二极管	7	一、栅控变压器	40
二、充气二极管	8	二、电阻移相器 (R 移相器)	40
§ 1-3 单相整流电路及滤波器	10	(一) 电阻移相器的移相范围	40
一、单相半波整流电路	10	(二) 自给栅偏压的作用	43
二、单相全波整流电路	11	三、感应移相器	44
三、单相桥式整流电路	11	§ 1-10 三相电源相序对可控整流控制性能 的影响	46
四、滤波器	12	一、对控制性能的影响	46
§ 1-4 三相不可控整流电路	13	二、三相电源相序的确定	48
一、三相半波整流电路	13	§ 1-11 三相可控整流器的几种典型电 路	48
(一) 共阴极式三相半波整流电路	13	一、GP100- C_s 型高频感应加热设备的可 控整流电路	48
(二) 共阳极式三相半波整流电路	15	二、GP60-CR11 型 (260 型) 高频感应 加热设备的可控整流电路	49
二、三相桥式整流电路	15	三、GP200L- C_1 型高频感应加热设备的可 控整流电路	51
§ 1-5 可控整流	17	§ 1-12 感应调压器可控整流电路	51
一、闸流管	17	一、工作原理	51
(一) 闸流管栅极的控制作用	17	二、可控整流电路	52
(二) 闸流管的起燃特性曲线和临界栅 压曲线	19	§ 1-13 关于可控整流电压的脉动性	53
(三) 使用闸流管时的注意事项	21	第二章 电子管振荡器	55
二、实现可控整流的方法	21	§ 2-1 真空三极管	55
§ 1-6 闸流管可控整流电路	22	一、栅极的控制作用	55
一、单相可控整流电路	22	二、三极管的静态特性曲线及静态 参数	56
二、共阴极式三相半波可控整流电路	24	(一) 静态特性曲线	56
三、三相桥式半控整流电路 (不带零压 管)	25	(二) 静态参数	58
四、三相桥式半控整流电路 (带零压 管)	27	三、大功率三极管 (俗称振荡管、发射管) 的使用注意事项	58
§ 1-7 三相变压器的接线组别	30	(一) 振荡管的冷却	58
§ 1-8 闸流管栅极电压的幅度控制法	32	(二) 对振荡管灯丝电压的要求	59
一、直流负栅压控制法	32		
二、交、直流叠加控制法	32		
(一) 控制原理	32		
(二) 阻容移相器	33		

(三) 振荡管的极限参数	59	电阻	88
四、振荡管的型号	60	四、电源电压(阳压) E_0 的调整	91
§ 2-2 真空三极管放大器	61	§ 2-7 与振荡器有关的其他电路	91
一、真空三极管放大器的分析方法	61	一、振荡与停振的控制电路	91
(一) 三极管放大器的图解分析法	61	二、阳流与栅流的测量电路	92
(二) 三极管放大器的微变等效电路		三、高频千伏表(槽路电压表)	92
分析法	63	四、防寄生振荡电路	95
二、放大器的类型	63	§ 2-8 振荡器的效率	96
§ 2-3 谐振放大器	64	一、振荡器的效率	96
一、LC谐振回路	64	二、提高振荡器效率的新途径	98
二、谐振放大器的工作原理	66	§ 2-9 几种典型的振荡电路	99
§ 2-4 电子管振荡器	69	一、GP60-CR11 型高频感应加热设备的	
一、LC并联回路里的电磁振荡现象	70	振荡电路	99
二、LC振荡器的工作原理	70	二、GP60-CR13-1 型高频感应加热设备的	
(一) 他激振荡器转换成自激振荡		振荡电路	101
器	70	三、GP100-C ₃ 型高频感应加热设备的振荡	
(二) 自激振荡器的起振	71	电路	101
(三) 自激振荡器产生等幅振荡的条		四、GP200-C ₂ 型高频感应加热设备的振荡	
件	72	电路	101
三、自给栅偏压电路	74	五、GP200L-C ₁ 型高频感应加热设备的	
(一) 自给栅偏压电路的工作原理	74	振荡电路	101
(二) 实际的自给栅偏压电路	75	六、SHP-100 双频感应加热设备的振荡	
四、振荡器阳极电源的供电方式	76	电路	103
五、其他几种基本振荡电路	76	七、CHYP100-C ₁ 型超音频感应加热设备	
(一) 振荡器的高频交流等效电路	76	的振荡电路	104
(二) 其他几种基本振荡电路	77	第三章 高频感应加热设备的	
六、电子管的并联运用	78	调试	107
§ 2-5 电子管振荡器的工作状态	79	§ 3-1 铁磁饱和稳压器	107
一、振荡器的三种工作状态	79	一、工作原理	107
二、 R_{0e} 对工作状态的影响	80	二、磁饱和稳压器的调整方法	108
三、反馈系数 β (或栅极反馈电压幅值 U_{fm})		三、磁饱和稳压器对振荡管灯丝的分级	
对工作状态的影响	80	供电	109
四、 R_{0e} 和 β 对振荡功率的影响	81	§ 3-2 高频感应加热设备的控制电路	110
§ 2-6 振荡器的调整	82	一、对控制电路的基本要求	110
一、改变 R_{0ef} 的方法	82	二、控制电路的动作程序	110
二、阻抗变换公式	84	§ 3-3 调试的一般步骤及准备工作	112
(一) 耦合电路的折算公式	84	一、调试的一般步骤	112
(二) LC谐振回路的阻抗变换	85	二、调试前的准备工作	112
(三) 并联电路转换为串联电路的		§ 3-4 控制电路的调试	113
折算	85	§ 3-5 可控整流器的调试	114
三、改变 R_{0e} 的方法	87	一、调试时的整流负载	114
(一) 改变回路内的总电感量	87	二、可控整流器的理相	115
(二) 改变折算到回路内的损耗		三、电源侧的过电压与过电流	119

四、常见故障及处理方法	120	原理	131
§ 3-6 振荡器的调试 (以 GP100-C ₃ 型 为例)	122	三、变频机的型号	132
一、振荡器的调试	122	§ 4-3 中频发电机输出电压的自动调节	133
(一) 调节耦合及反馈时 I_{00} 与 I_{90} 的 变化规律	122	一、中频发电机的主回路	133
(二) 调试方法	122	二、可控硅自动调压电路的工作原理	134
(三) 关于振荡器的匹配与临界 调节	122	(一) 可控硅整流主回路	134
(四) 关于高频感应加热设备的输出 功率	123	(二) 移相触发电路	135
二、调试时的注意事项	124	(三) 手动调压与自动调压	135
三、调试和使用中的一些常见故障	125	(四) 中频电流过流的自动保护	137
§ 3-7 高频感应加热设备的维护	126	§ 4-4 振荡回路电容量与变压比的估算及 调整	137
一、日常维护	126	§ 4-5 可控硅中频电源简介	139
二、定期维护	126	一、概述	139
§ 3-8 高频电磁场的危害及其防护	127	二、并联逆变器的工作原理	141
第四章 中频感应加热装置	128	三、倍频逆变器的工作原理	144
§ 4-1 中频发电机感应加热装置概述	128	附录	146
§ 4-2 中频发电机的结构和工作原理	130	I 阳极变压器和栅控变压器的接线 组别	146
一、中频发电机的简单结构	130	一、阳极变压器的接线组别	146
二、2500Hz 及 8000Hz 中频发电机的工作 原理	131	二、栅控变压器的接线组别	148
		II 几种典型的高频感应加热设备的电 原理图	152

概 述

人们很早以前就发现了电磁感应现象,知道导体在交变磁场中会产生感应电流从而发热。但是,长期以来人们视这种发热为损耗,并为保护电气设备和提高效率而千方百计减少这种现象的产生。直到十九世纪初期,人们才开始利用这种发热来进行有目的的加热——熔炼、热处理和各种热压力加工的加热等,这促进了感应加热技术的发展。随着生产的发展,相继出现了各种类型的感应加热装置。目前,它们已广泛地用于电子管的制造、等离子加热、金属的熔炼、金属工件的加热、以及金属表面热处理等各个方面。

金属表面热处理的感应加热法是一种利用电磁感应原理和感应电流通过导体产生的热效应,使工件表面快速加热的方法。当线圈(感应器)通过各种频率的交变电流时,周围就存在着交变磁场,如将金属导体(工件)放入此交变磁场中,导体就会在交变磁场的作用下产生感应电动势,从而在导体内形成感应电流。由于电流的热效应,使导体很快发热,迅速达到高温,甚至熔化。导体内形成之感应电流有两个重要特点:第一,电流沿工件断面呈旋涡状,故称涡流。第二,涡流的密度从工件的中心到表层分布极不均匀,愈靠近表层,其密度愈大;电源的频率愈高,表层的电流密度也就愈大。而在心部,基本上没有电流,故这种现象称之为集肤(或趋表)效应。

与炉中加热比较,感应加热有几个显著的优点:

(1) 由于感应加热设备是电能在工件内直接转变为热能,故热效率很高。拿高频感应加热来说,热效率可达到50~60%,而炉中加热只有30%左右。

(2) 由于电能直接转变为热能,故加热速度极高。如高频感应加热其加热速度可达到每秒几十度甚至几百度,而炉中加热只有每秒几度到十几度。

(3) 通过选择不同频率的感应加热设备,容易得到不同的加热深度,而炉中加热往往是穿透加热。

感应加热装置主要包括感应加热设备、感应淬火设备(过去称淬火机床)、感应加热配电柜(带滤波装置)等。目前,我国有些电炉厂根据第一机械工业部部颁标准《电炉产品型号编制方法》^①,制订了本厂关于感应淬火成套设备的产品系列型谱。某厂关于感应淬火成套

表1 感应淬火成套设备的主要技术参数

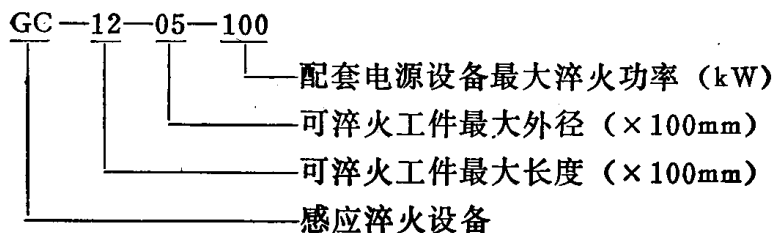
型 号 规 格	可淬火工件 最大长度 mm	可淬火工件 最大直径 mm	最大淬火 ^① 功 率 kW	淬 火 工 作 频 率 kHz	淬 火 工 件 转 速 rpm	淬火工件升 降 速 度 mm/min	备 注
GC-1203-60	1200	300	60	300			一般一台设备只有一种淬火工作频率,仅30/300表示一台设备上有2档频率。
GC-1205-100	1200	500	100	250, 30/300			
GC-1808-200	1800	800	200	70, 30/300	5~250(无级)	20~1300(无级)	
GC-2403-50	2400	300	50	8			
GC-2405-100	2400	500	100	8, 4, 2.5			
GC-3608-250	3600	800	250	8, 4, 2.5			

① JB2249-78

① 编者认为此处提额定振荡功率(对高频、超音频感应加热设备)、提额定输出功率(对可控硅中频感应加热装置)较为合适

设备（感应加热装置）的系列型谱见表1。感应加热设备是核心部分，按照使用电源的频率不同，它又可以分为工频、中频和高频感应加热设备。

产品型号含意如下：



工频感应加热设备 感应器的电源频率与电网的交流电频率一样，均为50Hz，加热深度可达10mm以上，其特点是可直接从工业电网吸取能量。设备简单，造价低廉，但感应器功率因数低，需要大容量电容器补偿。

中频感应加热设备 它不能直接利用电网电源，须用一套将50Hz电能变为中频（500~8000Hz）电能的装置，加热深度在5mm左右。目前有中频发电机（又称机械式）和可控硅变频器两种，前者也存在功率因数过低的缺点。

高频感应加热设备 它也有一套将50Hz电能转变为高频（70~1000kHz）电能的装置（通常为电子管式高频振荡器），加热深度一般在3mm以下。

目前，在机械工业、以及其它工业部门中，高频感应加热设备的应用是比较普遍的，之所以如此，是由于采用高频感应加热有着一系列的特点：

（1）热效率高、加热速度快。

（2）由于热源及加热过程由电气元件控制，故加热过程稳定，质量均匀，可以实现机械化生产并向自动化方向发展，是提高生产效率的有力措施。

（3）由于加热速度极高，避免了工件表面的氧化、脱碳等现象，因此所处理的工件质量优良。此外，工件淬硬层的金相组织细致，硬度、冲击韧性、耐磨性及耐疲劳性等均较炉内加热或其它方式加热时要好。

（4）不仅可以用于工件的表面热处理，而且还可以用于一定尺寸范围内工件的穿透加热与化学热处理。

（5）设备紧凑，占地面积小，操作使用方便。

（6）生产过程清洁，劳动条件好。

高频感应加热也有不足之处：造价高；生产中要求专业化程度高的淬火机床；对不同尺寸、形状的工件要求有相应的感应器；操作、使用和维护比一般加热装置要复杂得多，因此要求操作人员有较高的技术水平。

最近几年我国又试制成功了超音频感应加热设备，目前正在推广使用。它的工作原理与高频感应加热设备相同，只不过超音频振荡器的振荡频率比高频振荡器的要低，频率范围一般在30~60kHz。这种设备的主要特点是：

（1）由于高频感应加热设备与超音频感应加热设备容易通过闸刀开关进行转换（改变振荡回路的参数L、C），所以，容易实现“一机双频”。这对于中、小型企业进行多种热处理是有利的，既扩大了功能，又节省了投资。

（2）应用超音频感应加热设备解决了大量重要零件（曲轴、凸轮轴、模数2~6的齿

轮、链轮等等)用高频、中频淬火长期存在的质量问题。主要表现在,对各种形状复杂的工件,用圆形感应器淬火,淬硬层沿轮廓分布基本均匀,避免了高频及中频淬火不均匀之缺陷。

(3) 由于采用单回路振荡器,因而输出效率高,较之三回路高频振荡器来说结构简单,使用维修方便。

(4) 由于振荡频率低,可获得比高频深的加热深度,一般轴类可达3~5 mm。

我国常用感应加热设备的频率及主要特性见表2。

表2 感应加热设备的频率及主要特性

感应加热设备	频率范围Hz	功率 kW	效率 %	
工频发生器	50	50~5000	70~90	大型毛坯轧钢前的穿透加热、冷轧辊及车轮表面淬火(加热深度在10mm以上)、金属熔炼
中频发电机组	1000~8000	40~1000	70~85	中型毛坯轧钢前的穿透加热、曲轴与凸轮轴等机械零件的表面淬火(加热深度在3mm以上)、金属熔炼
可控硅中频变频器	400~8000	25~2000	90~95	
电子管式高频发生器	90000~300000	8~200	50~75	齿轮、轴等中小零件的表面淬火(加热深度为0.1~3mm)、金属熔炼
电子管式超音频发生器	30000~60000	60~200	50~75	齿轮(加热深度为3mm以上)、链轮、花键轴、曲轴和凸轮轴的表面淬火

我国高频感应加热技术的应用及设备的制造是在解放后才从无到有迅速发展起来的,目前我国已能制造振荡功率达400kW的高频感应加热设备。近几年来还对老产品进行了革新和改造,使高频感应加热设备更加适应我国机械制造业中机械零件表面热处理的需要,超音频感应加热设备的出现就是这一技术改造的例子。

科学技术在发展,高频感应加热技术也在发展。就高频振荡器而言,采用了新式高效率大型发射管,采用了蒸发冷却及超蒸发冷却技术。近年来,又有人在研究各种提高振荡器效率的新途径。目前,在无线电发送设备方面已经推广应用了丁类放大器,效率更高的戊类放大器也正在研究中。它们的效率比丙类状态要高许多,其效率高达90%和96%。我国冯秉铨教授从理论上探讨了丁类振荡器的相位关系和实现的可能性,目前在实施方面还有一定的困难。我国有的高等院校正在研究将高效率的戊类放大器应用于感应加热。另外,自动化生产促进了电子计算机与高频设备的结合,这一结合势必会把高频设备的可靠性、稳定性、自适应能力推到一个新的水平。

第一章 可控整流器

§ 1-1 高频感应加热设备的基本工作原理

高频感应加热设备实质上是一个大功率的变频器，通过设备本身的电子装置，将 50Hz 的工频交流电变为几十到数百 kHz 的高频交流电，用来加热金属，所以又称它为电子管式高频发生器，工厂中常称为高频炉。

高频感应加热设备主要由三相可控整流器、电子管振荡器和控制电路三大部分组成，其结构方框图如图 1-1 所示。三相可控整流器的作用是，将线电压为 380V 的工频交流电先经过阳极变压器升压，将 380V 升高到某一数值，例如 10kV，然后再由三相可控整流器整流为 6.75kV~13.5kV 连续可变的直流电压，并供电给振荡器。振荡器的作用是，将高压直流电变换为高频高压交流电，其常用的频率范围是 90~300kHz（超音频振荡器的常用频率范围是 30~60kHz）。由于高压对操作者来说是不安全的，所以必须经过淬火变压器降低电压，将内置工件的感应器接到淬火变压器的低压端作为振荡器的负载。当高频电流流过感应器时，感应器内便产生强大的高频磁场，金属工件因感应涡流而发热，在极短时间内就被加热到所需要的温度。控制电路的作用是，保证高频感应加热设备按操作规程安全地运行，以及确保操作者的人身安全。

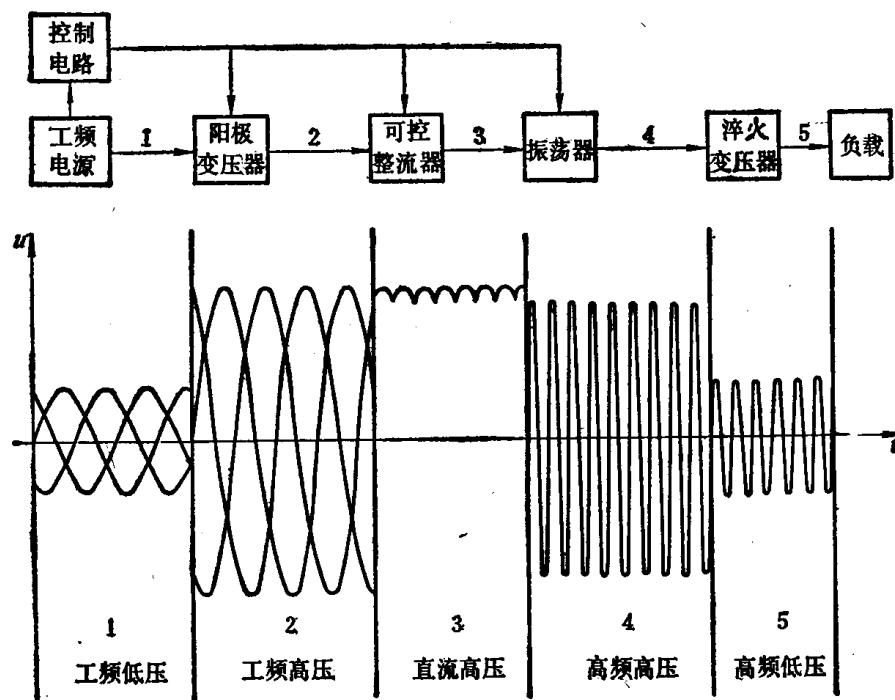


图1-1 高频感应加热设备结构方框图及波形示意图

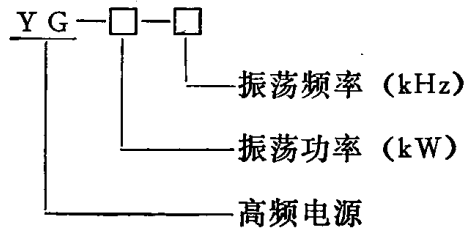
国产高频感应加热设备的频率及主要特性见表 1-1。

表1-1 高频、超音频感应加热设备的型号及主要技术参数

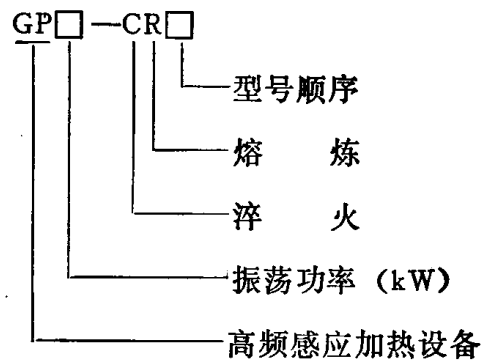
型 号	新①	旧	振荡功率 kW	设备视在 功率 kVA	振荡频率 kHz	最高阳极 电压 kV	振 荡 管		整 流 管		冷却水消耗量 m ³ /h (l/h)	主要用途	备 注
							型 号	数 量	型 号	数 量			
YG-60-250			60	100	200~300	6~10	FU-22S	2	2CZ-10A/ 1300V	6×30	3 (3000)	淬火、透热	
YG-100-250			100	175	200~300	7.2~12	FU-23S	1	2CZ-10A/ 1300V	6×30	3 (3000)	淬火、透热	
GP8-CR10 CR15		208 210 (JLГ3-10A)	8	18	300~500	8.1	FU-89S	1	EG1-1.25/10	6	0.54(540)	半导体材料加 热、小型工件热处理	
GP30-CR11 -CR16		230 (JLГ3-30)	30	55	200~300	13.5	FU-431S	1	ZG1-6/15	7	1 (1000)	熔炼、淬火	
GP60-CR11 -CR13 -CR14		260 (JLГП3-60)	60	100	200~300	13.5	FU-431S	2	ZG1-6/15	7	2.5(2500)	熔炼、淬火	
GP100-C ₂ -C ₃		ZR-100 (JLГ3-100)	100	180	200~250	13.5	FU-433S	1	ZG1-6/15	7	2.5(2500)	淬火、焊接	
GP200-C ₂			200	400	200~250	11.3	FU-23Z	2	ZG1-15/15	7	阳极(蒸馏水) 0.24(240) 槽路 2.8(2800)	淬 火	
CYP100-C			>100	180	30~40; 100~150	13.5	FU-433S	1	ZG1-6/15	7	2.5(2500)	淬 火	双频机
GP200L-C ₁			200	350	50, 150	11.5	FU-23S	2	ZG1-15/15	6		淬火、焊接	双频机
SHP-100-C			100	180	30~40; 90~110	13.5	FU-433S	1	ZG1-6/15	6	3 (3000)	淬 火	双频机

① 按书中介绍的型号命名法所命名的型号均归属于新型号，除此以外的型号归属于旧型号

高频感应加热设备型号的命名方法[⊖]如下：

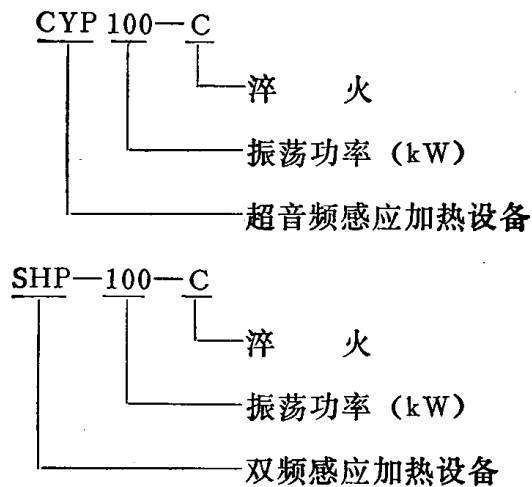


例如，YG-60-250 表示振荡频率为 250kHz、振荡功率为 60kW 的高频感应加热设备。由于这种命名方法刚开始使用，贯彻实施还需要一个过程，故目前我国大多数高频感应加热设备制造厂还采用原来的命名方法：



例如，GP60-CR11 表示振荡功率为 60kW，既可以淬火又可熔炼的高频感应加热设备；GP100-C₂ 表示振荡功率为 100kW，只作淬火用的高频感应加热设备。

近几年来出现的超音频感应加热设备，其型号的命名方法各生产厂不尽相同，常采用的命名方法有：



所谓“双频”感应加热设备，就是既可产生超音频振荡、也可产生高频振荡的感应加热设备。

⊖ 第一机械工业部部颁标准《电炉产品型号编制方法》JB 2249-78

§ 1-2 真空二极管和充气二极管

我们知道, 半导体二极管具有单向导电性, 从而广泛地应用在整流电路中将交流电变换成直流电。真空二极管和充气二极管是另一类具有单向导电性的整流元件, 它们也广泛地应用在整流电路中将交流电变换成直流电。直至目前为止, 在有些高频感应加热设备中, 其槽路电压表仍然采用真空二极管来进行整流。在老式的设备 (如 260 型) 中, 振荡管栅极的截止负栅压整流器是采用充气二极管来进行整流的, 而在新式的设备中几乎已全部被半导体二极管所代替。下面我们将分别讨论真空二极管和充气二极管。

一、真空二极管

真空管又名电子管。真空二极管的两种结构形式及其代表符号示于图 1-2。它是由一个阳极 (a), 亦称屏极或板极、一个阴极 (k) 和加热阴极用的灯丝所构成, 它们都放置在高度真空的玻璃泡内。有的二极管, 其灯丝本身就作为发射电子的阴极, 故称其为直热式阴极 (图 1-2 a)。有的真空二极管, 其灯丝与阴极是分开的, 故称它为间热式阴极 (图 1-2 b)。在电子线路中, 为了使线路图简洁清楚起见, 对于间热式阴极的真空二极管, 其灯丝是不画出来的。

当把灯丝电压 U_{ds} 供电给二极管的灯丝时, 电流通过它的灯丝, 其阴极的温度升高, 从而发射电子到周围空间, 形成所谓负空间电荷。这时, 如果在阳极与阴极之间加上阳极电压 $U_a (= E_a)$, 且阳极接电源电动势 E_a 的正极、阴极接负极, 则在阳极吸引电场作用下, 从阴极发射出来的电子将飞向阳极, 这便在二极管内形成了电流 I_a , 此电流是由于阳极吸收电子而形成的, 故称阳极电流, 电流的方向如图 1-3 a) 所示。如果电源电动势 E_a 反接 (见图 1-3 b), 则阳极电压 $U_a (= -E_a)$ 使阳极电位低于阴极电位, 阴极发射出来的电子将受到阳极与阴极之间拒斥电场的排斥作用而重新返回阴极, 电路内无电流通过, 即 $I_a = 0$ 。此时, 真空二极管阳极与阴极之间的电压称为反向电压。综上所述, 象半导体二极管那样, 真空二极管也具有单向导电性 (电流只能在一个方向上流

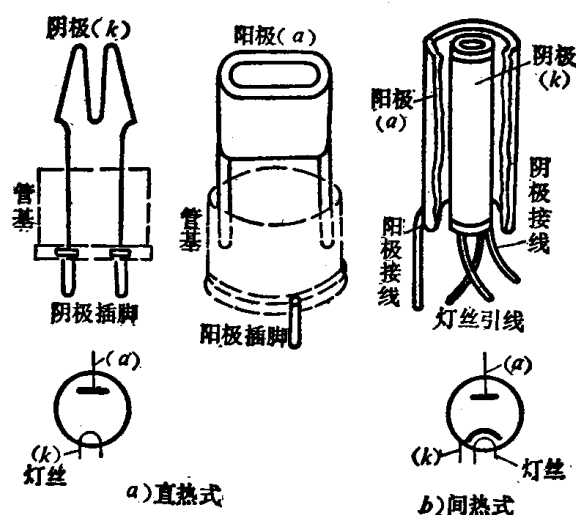


图1-2 真空二极管结构及代表符号

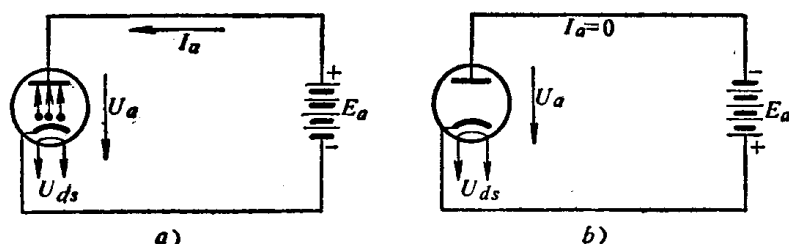


图1-3 真空二极管单向导电性试验电路

通)。因此, 它也可作为整流元件应用于整流电路中。

把真空二极管按照图 1-4 所示的电路接线, 用改变阳极电压 U_a 以改变阳极电流 I_a 的方法可以测出真空二极管阳极电流 I_a 与阳极电压 U_a 之间的关系曲线, 此关系曲线称为真空二

极管的伏安特性曲线,如图1-5所示。从伏安特性曲线可看到,当阳极电压 U_a 很低时,阳极电流 I_a 也很小。这是因为,从阴极发射出来的电子,只有很小一部分初速较高的电子能飞达阳极,而大部分初速较低电子则云集在阴极附近,它们形成了空间电荷,这些带负电的空间电荷,排斥从阴极飞向阳极的电子。所以,只有初速较高的电子才能穿过空间电荷区而飞达阳极,因此阳极电流随阳极电压的增加呈缓慢的增加,这就是伏安特性曲线的起始段 OA 的情况。当阳极电压增高时,阳极吸引电子的能力随之增大,于是有更多的电子穿过空间电荷区而飞达阳极,使阳极电流随阳极电压的增加而增加,这就是伏安特性曲线 AB 段的情况, AB 段近乎直线。但是,当阳极电压继续增高到某一数值时,阴极发射出来的电子全部飞达阳极,此后阳极电压再增高也不会引起阳极电流的显著变化,这就是伏安特性曲线 BC 段的情况,它表明阳极电流出现了饱和的情况。当 U_a 为负值时, $I_a = 0$,此时的伏安特性曲线与横轴的负半轴重合。由于阴极每秒钟发射出来的电子数与阴极温度有关,所以在阳极电流达到饱和后,只有提高阴极温度(增加灯丝电压 U_{ds})使阴极发射的电子数增加,才能提高阳极饱和电流。图1-5画出了灯丝电压不同的两条特性曲线。事实上,真空二极管一般都工作在伏安特性的 AB 段。

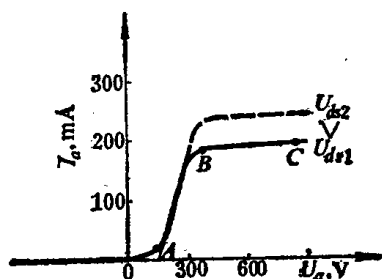


图1-5 真空二极管的伏安特性

真空二极管用于小功率整流和检波。小型整流二极管的型号如5Z4P,第一部分(数字)表示灯丝电压(V)的近似值;第二部分(拼音字母)表示管子种类,Z——整流管;第三部分(数字)表示设计序号;第四部分(拼音字母)表示结构形式,P——较大的玻璃管,如这部分没有字母,则为姆指式管。

真空二极管用于整流时的主要参数,是整流电流(mA)和最大反向峰值电压,通常简称为反峰电压(V)。其含义和半导体二极管相似,运用时若超过这些数值,管子将会损坏。

一般情况下,由于真空二极管内存在着负空间电荷,它们抑制阴极发射的电子飞向阳极,限制了阳极电流的增加,所以电子管的内阻大,功率损耗大(功率损耗等于阳极电流与管压降的乘积)。因此,真空二极管只适用于小功率整流电路,大功率整流电路中的整流元件一般采用充气二极管。

二、充气二极管

充气二极管也是一种单向导电元件。在制造时,先把管中的空气排除,而后把少量的汞或惰性气体充入管内。这样一来,管子的特性与真空二极管就不一样了。充气二极管的代表符号如图1-7 a)所示。

把充气二极管接入图1-7 b)的电路,测得如图1-8所示的伏安特性,它可分为几部分来说明。 OA 部分表示电离前的情况,此时热阴极发射出来的电子没有足够的动能使气体分

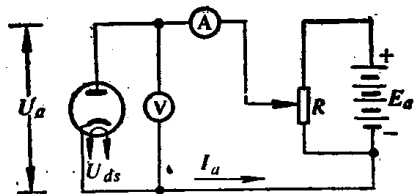


图1-4 测示真空二极管特性的电路

极温度有关,所以在阳极电流达到饱和后,只有提高阴极温度(增加灯丝电压 U_{ds})使阴极发射的电子数增加,才能提高阳极饱和电流。图1-5画出了灯丝电压不同的两条特性曲线。事实上,真空二极管一般都工作在伏安特性的 AB 段。

为了使用和制造上的方便,常把两个功用相同的二极管元件合装在同一个真空玻璃泡中,制成双二极管或复合二极管,它的代表符号如图1-6所示。

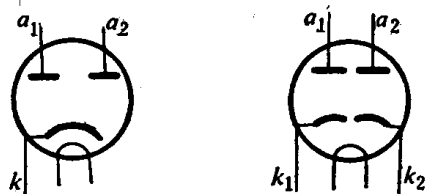


图1-6 双二极管的代表符号

子电离, 而由于空间电荷的影响, 限制了阳极电流, 所以阳极电流不大。在 A 点附近, 阳极电压已增加到一定数值, 由阴极发射出来的电子有了足够动能使气体分子电离, 电离后产生大量的正离子和电子。电子受到阳极的吸引而奔向阳极, 正离子则受到阴极的吸引而奔向阴极。奔向阳极的电子也碰撞分子, 使之电离。这样的碰撞电离雪崩式地发展下去, 管内的电子和离子数量就会剧烈地增加, 就为充气二极管通过较大电流提供了条件。此时的阳极电压 U_q 称为起燃电压, 其值一般在 $10 \sim 15 \text{ V}$ 之间。 AB 部分表示气体电离后, 由于正离子的存在, 抵消了部分负空间电荷的影响, 因此维持电离所需要的电压可以比起燃电压小些。 BC 部分则表示气体电离后, 正离子完全中和了负空间电荷, 阳极电流增加很快, 而管内压降基本上保持不变, 这段特性曲线就是充气二极管的工作部分。阳极电流 I_a 的大小决定于电源电压及电阻 R_a 的大小 (见图 1-7)。在 C 点, 阴极发射的电子几乎全部到达阳极, 阳极电流近乎饱和。 CD 部分表示阳极电流已增大到超过了阴极发射电子的能力,

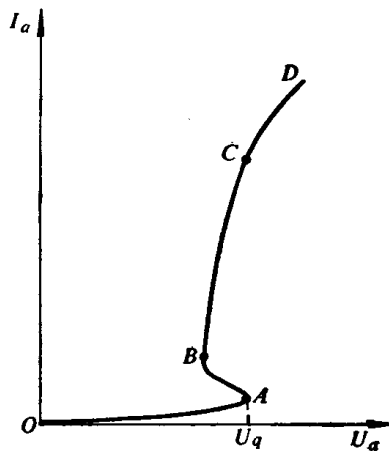


图1-8 充气二极管的伏安特性

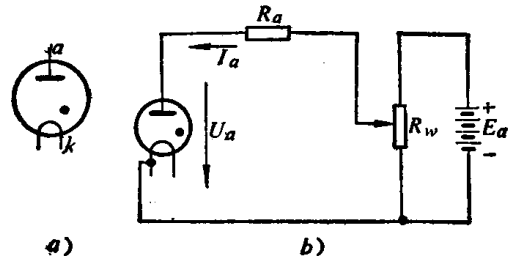


图 1-7

a) 代表符号 b) 测试充气二极管特性的电路

此时要想再增加电流就必须增加阳极电压, 使阴极表面的电场强度再度增高, 通过正离子对阴极表面的轰击而产生的二次发射电子来补足。但正离子直接轰击阴极, 会使阴极表面氧化物脱落而损坏。所以不允许工作在这个部分。

由于正离子的质量比电子大得多, 因此在阳极电场作用下, 它们缓慢地移向阴极。这些正离子虽然不参与碰撞电离, 但它们却起着中和管内负空间电荷的作用, 这不仅能促进阴极电子的发射, 而且能使电子顺利地飞向阳极。因此, 充气二极管的内阻要远远小于真空二极管的内阻。当用它作整流元件时, 其管压降小, 整流效率高, 因此适用于容量较大的整流器。

充气二极管的型号如 EG1-1.25/10, 其中 E——二极管; G——充汞 (若充气用 Q 表示); 1——序号; 分子 1.25——平均电流额定值(A), 运用时若超过此值, 轻则过载, 重则损坏; 分母 10——最大反向电压额定值 (kV), 若超过此值, 将失去单向导电性。

充气二极管的参数主要有最大阳极平均电流、最大反向电压、灯丝预热时间等。

使用充气二极管时的注意事项:

(1) 管内温度不能过高 因为充气二极管整流时, 当电源电压从正半周过渡到负半周时, 正常情况是管内电弧熄灭, 剩余的离子和电子复合为中性分子。但是这个过程不是一瞬间全部完成的, 若管内温度过高, 未复合的正离子和电子甚多, 结果在反向电压作用下, 有大量正离子撞击阳极, 致使阳极发射电子, 造成管子反向导电, 这个现象称为逆弧。发生逆弧时管子失去单向导电性, 从而失去整流作用, 并可能损坏阳极。管内温度过高的原因是灯丝电压过高或环境温度过高。

(2) 管内温度不能过低 由于充气二极管内的液态汞的蒸发需要一定的温度和时间,

也由于充气管的阴极相当粗大（为了大量发射电子），加热时间一般需要 0.5 分钟（小容量的充气管）到 30 分钟左右（大容量的充气管）。因此，在给阳极加上交流高压之前，其阴极必须预先加热到额定工作温度，这就要求灯丝电压不能过低，预热时间不能太短。否则，如果在阴极温度不够高时就接通阳极电源，会由于汞气浓度不够和阴极发射电子的数量不足，管子内阻增大，管压降将会大大地超过正常值，从而在阳极与阴极间形成强电场，正离子在电场作用下将强烈地冲击阴极表面的氧化物层，使阴极表面损坏，从而丧失发射电子的能力。同样，在停止工作时，也应先断开阳极电源，然后断开灯丝电源。另外，充气二极管不能承受幅度很大的脉冲电流。即使在很短的时间内，由于电流过大，管压降也会过大，正离子会把阴极撞坏。由充气二极管作整流元件的整流电路，不能使用电容滤波器，而只能用电感滤波，其原因就在于它不能承受冲击电流。

功率为 8 kW 及 10 kW 的高频感应加热设备中的三相整流器即用 EG1-1.25/10 这种充气二极管。在早期生产的高频感应加热设备中，振荡管截止负栅压整流器中的整流元件其型号为 EG1-0.3/8.5，或 EG1-0.25/10（30 kW 和 60 kW 设备中）、EG1-1.25/10（100 kW 设备中）。

§ 1-3 单相整流电路及滤波器

应用在高频感应加热设备中的单相整流电路有单相半波整流电路，单相全波整流电路，单相桥式整流电路。

一、单相半波整流电路

应用半导体二极管作整流元件的单相半波整流电路示于图 1-9 a)。图中，变压器 B 的作用是把电网电压 u_1 变为 u_2 ，以满足负载所需要的直流电压的大小。设 $u_2 = U_{2m} \sin \omega t$ (U_{2m} 为电压峰值)，当 u_2 在正半周，即 a 点为正、b 点为负时，二极管 D 因阳极电位高于阴极电位而导通，有电流 i 通过。流过负载电阻 R_{fz} 的电流 i_{fz} 与负载两端的电压 u_{fz} 的变化规律是一样的，为半个周期的正弦波。当 u_2 在负半周，即 a 点为负、b 点为正时，二极管因承受反向电压而截止，无电流通过，波形如图 1-9 b) 所示。

由此可见，变压器二次侧电压 u_2 虽然是正弦交流电压，但经二极管与负载串联后，使负载得到单方向的脉动电流，其上电压为脉动电压，一个周期内脉动电压波形面积的平均值就是负载 R_{fz} 两端的直流电压 U_{fz} ，其值为

$$\begin{aligned} U_{fz} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{180^\circ} u_{fz} d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{180^\circ} U_{2m} \sin(\omega t) d(\omega t) \\ &= \frac{\sqrt{2} U_2}{2\pi} (-\cos \omega t) \Big|_0^{180^\circ} = \frac{\sqrt{2} U_2}{2\pi} (1 + 1) \\ &= 0.45 U_2 \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中 U_2 ——有效值

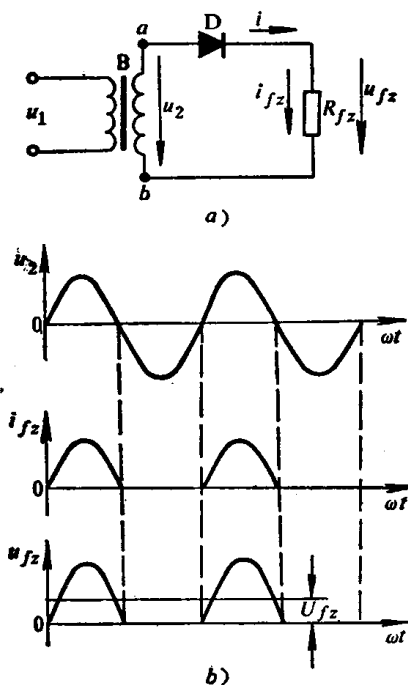


图1-9 单相半波整流电路及波形图

$$I_{fz} = \frac{U_{fz}}{R_{fz}} = 0.45 \frac{U_2}{R_{fz}} \quad (1-2)$$

式(1-1)略去了变压器损耗及二极管的管压降,若考虑这两个因素,则 U_{fz} 约低 10%。

二极管不导通时,加于二极管的反向电压就是 u_2 。因此,二极管所承受的最大反向电压 U_{Fm} 即为 u_2 的峰值 U_{2m} :

$$U_{Fm} = U_{2m} = \sqrt{2} U_2$$

单相半波整流电路的优点是结构简单。但因被削掉了半个波,脉动很大,且整流效率很低,故一般用在负载电流很小的整流电路中。在高频感应加热设备中,振荡器之振荡管的截止负栅压整流器采用的就是单相半波整流电路(见图 2-65)。

二、单相全波整流电路

电路如图 1-10 a) 所示,它由两个二极管及有中心抽头的变压器组成。变压器二次侧两个半边的电压,大小相等,相位差 180° 。设 $u_{2a} = U_{2m} \sin \omega t = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$, $u_{2b} = U_{2m} \sin (\omega t - 180^\circ) = -\sqrt{2} U_2 \sin (\omega t - 180^\circ)$ 。

当 u_{2a} 为正半周时, a 点为正, o 点为负, D_1 因承受正向电压而导通,电流流通的路径是 $a \rightarrow D_1 \rightarrow R_{fz} \rightarrow o$ 。与此同时, u_{2b} 为负半周, D_2 则因承受反向电压而截止。当 u_{2a} 为负半周时, D_1 因承受反向电压而截止,但与此同时, u_{2b} 则为正半周, b 点为正, o 点为负,则 D_2 因承受正向电压而导通,电流流通路径是 $b \rightarrow D_2 \rightarrow R_{fz} \rightarrow o$ 。可见,通过负载的电流是 D_1 与 D_2 轮流导通的结果。所以,负载两端的整流波形如图 1-10 b) 所示。显然,这种电路的整流电压平均值 U_{fz} 及整流电流平均值 I_{fz} 比半波整流电路大一倍。即

$$U_{fz} = 0.9 U_2 \quad (1-3)$$

$$I_{fz} = \frac{U_{fz}}{R_{fz}} = 0.9 \frac{U_2}{R_{fz}} \quad (1-4)$$

通过每个二极管的平均电流 $I_1 = I_2 = \frac{1}{2} I_{fz} = 0.45 \frac{U_2}{R_{fz}}$ 。

二极管不导通时,所承受的最大反向电压也高一倍。即

$$U_{Fm} = 2 \sqrt{2} U_2$$

由上讨论可知,全波整流电路比半波整流电路其输出电压的脉动程度减小了,整流效率提高了,但二极管承受的最大反向电压大了一倍。在采用交、直流叠加控制的可控整流器中(如 GP100-C₃ 型高频感应加热设备),其 U_o 整流器采用了全波整流电路(见图 1-63)。

三、单相桥式整流电路

单相桥式整流电路如图 1-11 a) 所示,图 1-11 b) 是该电路的另一种习惯画法。设 $u_2 = U_{2m} \sin \omega t = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$ 。

当 u_2 为正半周 (a 点电位为正、 b 点为负) 时,加于 D_1 、 D_3 的为正向电压, D_2 、 D_4 的

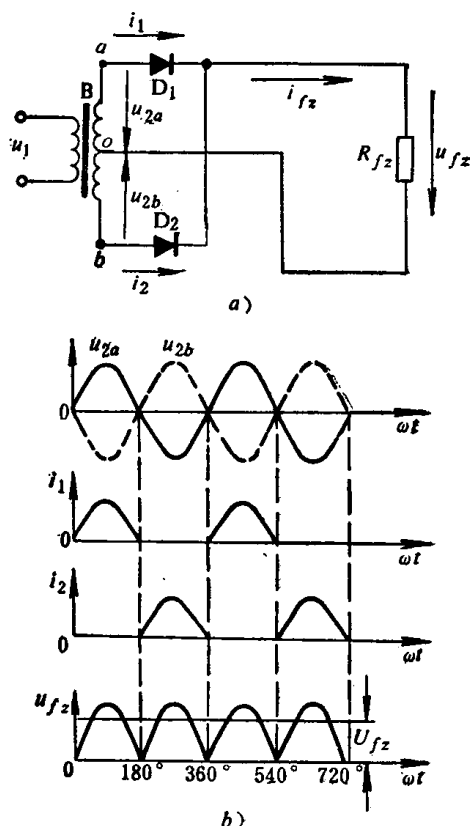


图1-10 单相全波整流电路及波形图