

# 逆变焊接与切割电源

赵家瑞 编著

机械工业出版社



# 逆变焊接与切割电源

赵家瑞 编著



机械工业出版社

本书从实用观点出发,论述逆变焊接与切割电源的结构、原理、电路设计,生产制造及使用维修中必备的基本知识。并按现代电力电子开关器件分类较系统地介绍了晶闸管、GTR、MOSFET 及 IGBT 等各类逆变电弧焊、电阻焊及等离子弧切割电源的特点,主电路、控制电路等生产、使用维修中注意事项。考虑到逆变电源的发展和适应广大研究设计者、制造厂和用户的需要,本书还介绍了逆变电源微机控制及智能控制技术。附录中有 1994 年瑞典 ESAB 公司 K. Weman 编写的逆变弧焊电源的调查报告、国内逆变焊接与切割电源主要生产单位及其产品介绍。本书叙述的特点是深入浅出、理论与实际紧密结合。

本书可作大专院校机械、电子、自动化、造船、热能、汽车等专业师生教学用书,也可供从事焊接设备研究、设计、制造、使用和维修等有关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

逆变焊接与切割电源/赵家瑞编著.-北京:机械工业出版社,1996

ISBN 7-111-04916-0

I. 逆… II. 赵… III. ①逆变-电弧焊②切割-电源 IV. ①TG444②TG48

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 15581 号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)

责任编辑:金晓玲 版式设计:李松山 责任校对:丁丽丽

封面设计:姚毅

三河水和印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

1995 年 12 月第 1 版·1995 年 12 月第 1 次印刷

787mm×1092mm1/16·21 印张·520 千字

0001—5200 册

定价:29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

# 前 言

随着电力电子技术的发展, 逆变焊接与切割电源也得到飞速的发展。无论是国内还是国外, 逆变焊接与切割电源已成为当今发展的主流。虽然近年来有关这方面的论文发表不少, 但直至今日, 尚没有一本全面系统地论述逆变焊接与切割电源的专著。为了适应这个急需, 在中国电工技术学会电焊技术专业委员会支持下, 特编写了这本书。

本书共分 12 章, 前 5 章主要介绍逆变焊接与切割电源中的共性问题, 即设计、制造、使用和维修中一些基本理论知识, 包括逆变器的基本结构, 电路原理, 工作状态, 它与普通焊接与切割电源不同的特点, 在设计、制造、使用和维修中如何提高其可靠性等。从第 6 章至第 9 章分别介绍 FSCR(含 GTO)、GTR、MOSFET 及 IGBT 各种逆变弧焊电源。第 10 章介绍逆变电阻焊电源。第 11 章介绍逆变等离子弧切割电源。第 12 章介绍微机控制逆变焊接电源, 并着重介绍了以微机控制为核心的智能控制在逆变焊接电源的应用, 因为这是逆变电源的发展方向。

本书编写的特点: 着重从实用出发, 理论联系实际, 深入浅出。在介绍各类逆变电源时, 对逆变功率开关器件的结构、特性、驱动等特点均作了较系统的介绍, 使读者能较深入了解各类逆变焊接与切割电源的关键所在。

本书由天津大学赵家瑞教授负责编著。除第 1 章外, 各章还有下列同志参加编写: 第 2 章有天津大学侯文考博士参加; 第 3 章有机械工业部第五设计院李理工程师参加; 第 4 章有天津大学路登平副教授参加。第 5 章有扎努西电气机械天津压缩机有限公司赵一江工程师参加。第 6 章有成都电焊机研究所平庆恩高级工程师参加。第 7 章有天津大学孙栋工程师参加。第 8 章有天津大学胡绳荪副教授参加。第 9 章有天津大学柳刚博士参加。第 10 章有天津大学蔡国余高级工程师参加。第 11 章有清华大学博士后张绍彬参加。第 12 章有天津大学李义丹硕士参加。

全书由清华大学何方殿教授主审。

本书编写时得到中国电工技术学会电焊技术专业委员会史耀武、金晓玲、蔡加琛等同志的关怀; 还得到天津电焊机厂齐绍荣高级工程师、哈尔滨工业大学殷树言教授、吉林工业大学何树沧教授等提供有关逆变电源实例和参考资料。本书的出版还得到北京肯沃特电力电子科技公司李从军董事长、李冠军总经理, 天津市中环电器厂高学章厂长, 唐山焊接设备厂王凤仕厂长等的鼓励和支持, 在此表示衷心感谢。

由于作者水平所限, 加上时间较仓促, 书中错误或不妥之处在所难免, 敬请读者批评指正。

赵家瑞

1995 年 3 月 28 日

## 符 号 表

B	基极	$R_o$	输出电阻
C	电容, 集电极	RP	电位器
E	发射极	RS	分流器
$f$	频率	RV	压敏电阻
FU	熔断器	S	控制开关
HL	指示灯	T	变压器
$I$	电流	UI	逆变器
$I_E$	发射极直流电流	UZ	整流器
$I_B$	基极直流电流	V	电压
$I_C$	集电极直流电流	VC	发光三极管
$I_C$	集成电路芯片	$V_{CES}$	晶体管饱和电压
$I_{CBO}$	集电结反向电流(发射极开路)	VD	二极管
$I_{CEO}$	$eb$ 极间的穿透电流(基极开路)	VF	场效应晶体管(MOSFET)
$I_{EBO}$	发射结反向电流(集电极开路)	VG	可关断晶闸管(GTO)
IGBT	绝缘栅门(双)极晶体管	VH	晶闸管
K	继电器	VHD	双向晶闸管
KM	接触器	$V_i$	输入电压
L	电抗器	VI	绝缘栅双极晶体管(IGBT)
N	运算放大器	VS	稳压管
$N$	线圈匝数	VT	晶体管
PA	电流表	$\alpha$	共基极电流放大系数
PV	电压表	$\beta$	共发射极电流放大系数
R	电阻	$\Phi$	磁通
$R_f$	负载电阻	$\omega$	角频率
$R_i$	输入电阻		

# 目 录

前言	
符号表	
第 1 章 绪论	(1)
1.1 逆变焊接电源的发展概况	(1)
1.1.1 国内外现状	(1)
1.1.2 发展趋势	(2)
1.2 逆变焊接电源电路的基本型式	(7)
1.2.1 推挽式逆变电路	(8)
1.2.2 全桥式逆变器	(9)
1.2.3 半桥式逆变电路	(10)
1.2.4 单端式逆变电路	(11)
1.2.5 控制电路	(14)
1.3 逆变焊接电源的特点	(15)
第 2 章 逆变弧焊电源的工作状态 及基本要求	(18)
2.1 焊接电弧的特性及分类	(18)
2.1.1 焊接电弧的电特性	(18)
2.1.2 焊接电弧的分类	(20)
2.2 逆变弧焊电源的工作状态	(22)
2.2.1 半桥式逆变弧焊电源的工作状态	(22)
2.2.2 全桥式逆变弧焊电源的工作状态	(26)
2.2.3 单端正激逆变弧焊电源的 工作状态	(27)
2.2.4 逆变器电路工作不平衡问题	(27)
2.2.5 逆变电路的直通问题	(29)
2.3 对逆变弧焊电源的基本要求	(30)
2.3.1 对逆变弧焊电源外特性的要求	(31)
2.3.2 对逆变弧焊电源调节性能的要求	(33)
2.3.3 对逆变弧焊电源动特性的要求	(35)
第 3 章 中频变压器及输入、 输出电路	(37)
3.1 中频变压器	(37)
3.1.1 中频变压器磁心材料	(37)
3.1.2 中频变压器瞬态饱和及其防止	(47)
3.1.3 中频变压器绕组	(49)
3.2 输入电路	(53)
3.2.1 合闸浪涌电流	(53)
3.2.2 输入电路抗干扰	(54)
3.3 输出电路	(54)
3.3.1 全波整流滤波电路工作过程	(54)
3.3.2 单端正激逆变器整流滤波电路 工作过程	(56)
3.3.3 整流二极管	(57)
3.3.4 输出滤波电路的设计	(60)
3.3.5 干扰的抑制	(63)
第 4 章 脉宽调制控制电路及驱动 电路	(68)
4.1 脉宽调制控制电路	(68)
4.1.1 脉宽调制集成芯片的基本组成	(68)
4.1.2 SG1525/SG1527 系列集成 PWM 控制器	(70)
4.2 驱动电路	(73)
4.2.1 对驱动电路的要求	(73)
4.2.2 驱动电路的隔离技术	(73)
4.2.3 恒流驱动电路	(75)
4.2.4 比例驱动电路	(76)
第 5 章 逆变焊接电源的保护	(78)
5.1 开通与关断缓冲保护	(78)
5.1.1 常用的关断缓冲电路	(79)
5.1.2 常用的开通缓冲电路	(80)
5.1.3 复合缓冲电路	(83)
5.1.4 缓冲电路的辅助器件	(83)
5.2 过电流、过电压保护	(85)
5.2.1 过电压保护	(85)
5.2.2 过电流保护	(86)
5.3 过热保护	(92)
5.3.1 功率半导体器件过热保护的 必要性	(92)
5.3.2 散热措施	(93)
第 6 章 晶闸管逆变弧焊电源	(97)
6.1 概述	(97)
6.2 快速晶闸管	(97)
6.2.1 快速晶闸管的结构及工作原理	(97)

6.2.2 快速晶闸管的静态特性及主要特性参数	(98)	原理及产品介绍	(175)
6.3 晶闸管逆变弧焊电源的结构原理	(102)	8.4.1 结构原理	(175)
6.3.1 晶闸管逆变器	(102)	8.4.2 产品介绍	(181)
6.3.2 控制电路	(105)	第9章 IGBT 逆变弧焊电源	(200)
6.4 晶闸管逆变弧焊电源产品介绍	(112)	9.1 概述	(200)
6.4.1 ZX7-315Z、ZX7-400Z 系列晶闸管逆变手弧焊电源	(112)	9.2 IGBT 的结构及特性	(201)
6.4.2 ZX7 系列晶闸管逆变手弧焊电源	(116)	9.2.1 IGBT 的结构	(201)
6.4.3 晶闸管逆变 TIG、MIG、MAG 焊电源	(127)	9.2.2 IGBT 的静特性	(202)
6.5 可关断晶闸管(GTO)及其逆变器的保护	(128)	9.2.3 IGBT 的动态特性	(203)
6.5.1 GTO 的工作特性	(128)	9.2.4 IGBT 的安全工作区	(204)
6.5.2 GTO 的主要参数	(129)	9.3 IGBT 的驱动	(208)
6.5.3 GTO 的门极控制	(130)	9.4 IGBT 的保护	(211)
6.5.4 GTO 逆变器的保护	(132)	9.5 IGBT 逆变手弧焊电源	(212)
第7章 GTR 逆变弧焊电源	(134)	9.5.1 IGBT 逆变手弧焊电源电路原理	(213)
7.1 GTR 的基本结构及特性	(134)	9.5.2 外特性控制	(215)
7.1.1 GTR 的基本结构	(134)	9.6 IGBT 逆变手工/TIG 多用弧焊电源	(216)
7.1.2 GTR 的特性	(136)	9.6.1 主电路	(217)
7.2 驱动电路	(146)	9.6.2 程控电路	(218)
7.3 GTR 逆变弧焊电源的结构原理	(148)	9.6.3 焊接电流递增衰减电路	(219)
7.3.1 GTR 逆变器	(149)	9.6.4 脉冲给定电路	(220)
7.3.2 控制电路	(154)	9.6.5 电流反馈运算电路及电源外特性形成	(221)
7.4 GTR 逆变弧焊电源的能耗	(157)	9.7 IGBT 逆变交流方波弧焊电源	(222)
7.5 GTR 逆变弧焊电源产品介绍	(158)	9.7.1 IGBT 逆变交流方波弧焊电源的工作原理	(222)
第8章 场效应晶体管逆变弧焊电源	(164)	9.7.2 电弧稳定性试验	(223)
8.1 功率场效应晶体管的结构及特性参数	(164)	9.7.3 焊接工艺试验	(224)
8.1.1 结构原理	(164)	9.8 IGBT 逆变 CO <sub>2</sub> 焊接电源	(225)
8.1.2 静态特性与参数	(166)	9.8.1 IGBT 逆变多阶梯形外特性 CO <sub>2</sub> 焊接电源	(226)
8.1.3 开关特性	(169)	9.8.2 用电流波形控制的 IGBT 逆变 CO <sub>2</sub> 焊接电源	(229)
8.1.4 安全工作区	(170)	9.9 软开关 IGBT 逆变弧焊电源	(231)
8.2 功率 MOSFET 驱动电路	(171)	第10章 逆变电阻焊电源	(235)
8.2.1 直接驱动	(172)	10.1 概述	(235)
8.2.2 间接驱动	(172)	10.2 逆变直流点焊电源	(235)
8.2.3 栅极驱动电路实例	(173)	10.2.1 逆变直流点焊电源的特点	(235)
8.3 应用场效应晶体管时的注意事项	(174)	10.2.2 国内外现状	(238)
8.4 场效应晶体管逆变弧焊电源的结构		10.2.3 逆变直流点焊电源的电路原理	(240)
		10.2.4 逆变器工作频率及功率开关	

器件的选择·····	(240)	切割机的使用与维修·····	(277)
10.2.5 实际产品介绍·····	(240)	11.6.2 PCM-32i 逆变空气等离子弧	
10.2.6 逆变直流点焊电源的变压器·····	(244)	切割机的使用与维修·····	(280)
10.2.7 逆变直流点焊电源的		第 12 章 微机控制逆变焊接电源·····	(283)
输出电路·····	(245)	12.1 逆变手弧焊电源的微机控制·····	(283)
10.2.8 逆变直流点焊电源逆变器的		12.1.1 硬件系统·····	(283)
驱动电路·····	(246)	12.1.2 系统的调节方法·····	(285)
10.2.9 逆变直流点焊电源的		12.1.3 系统的程序组成·····	(286)
控制电路·····	(246)	12.1.4 抗干扰措施·····	(287)
10.2.10 逆变直流点焊电源的保护·····	(249)	12.1.5 试验结果·····	(287)
10.2.11 逆变直流点焊电源的		12.2 多功能电脑电源·····	(287)
噪声抑制·····	(255)	12.3 协同式微机控制脉冲 MIG 焊	
10.3 逆变交流缝焊电源·····	(256)	电源·····	(288)
10.3.1 逆变交流缝焊电源的主电路·····	(256)	12.3.1 控制系统·····	(288)
10.3.2 逆变交流缝焊电源的控制电路·····	(257)	12.3.2 控制算法·····	(289)
第 11 章 逆变等离子弧切割电源·····	(261)	12.3.3 控制软件·····	(291)
11.1 概述·····	(261)	12.3.4 控制实验·····	(291)
11.2 晶闸管式逆变空气等离子弧		12.4 双逆变交流方波弧焊电源的	
切割电源·····	(262)	微机控制·····	(292)
11.2.1 电路设计·····	(263)	12.4.1 硬件设计·····	(292)
11.2.2 逆变等离子弧切割电源基本		12.4.2 软件设计·····	(293)
参数及性能·····	(267)	12.5 微机控制电阻焊电源·····	(294)
11.3 晶体管逆变空气等离子弧		12.5.1 微机控制逆变电阻焊电源	
切割电源·····	(268)	的系统组成·····	(294)
11.3.1 主电路·····	(268)	12.5.2 系统程序·····	(296)
11.3.2 控制电路·····	(269)	12.6 智能控制及其在焊接电源中的	
11.4 IGBT 逆变空气等离子弧		应用·····	(297)
切割电源·····	(272)	12.6.1 专家系统在焊接电源中的	
11.4.1 逆变切割电源的电路系统·····	(273)	应用·····	(297)
11.4.2 控制系统·····	(274)	12.6.2 模糊控制在逆变焊接电源中	
11.4.3 切割电源的特点·····	(275)	的应用·····	(297)
11.5 逆变焊接与切割两用电源·····	(275)	12.6.3 神经网络控制在焊接电源中	
11.5.1 焊接与切割的转换·····	(275)	的应用·····	(305)
11.5.2 控制电路·····	(275)	附录 A 逆变弧焊电源的调查	
11.5.3 小型高频引弧器·····	(276)	报告(摘要)·····	(307)
11.5.4 电源外特性及工艺性能·····	(277)	附录 B 国内逆变焊接与切割电源主要	
11.6 空气等离子弧切割电源的使用		生产单位及其产品介绍·····	(315)
与维修·····	(277)	参考文献·····	(322)
11.6.1 KLG-200 型空气等离子弧			



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 逆变焊接电源的发展概况

### 1.1.1 国内外现状

1972 年美国海运科研开发部门研制出一台 300A 晶闸管逆变弧焊电源。1975 年 Powcon 公司又推出一台多用途晶闸管逆变弧焊电源样机。但当时由于逆变器的功率电子开关器件的性能和可靠性尚不成熟,且其价格较高,无法使其商品化。直到 80 年代初,由于电力电子技术的发展,功率电子开关器件的容量,性能大大提高,而且品种增多,功率电子开关器件不仅有晶闸管半控器件,而且电力晶体管,大功率场效应晶体管(简称场效应管)等全控器件相继问世。同时,这些器件的价格也不断下降。这就给发展逆变焊接电源创造了条件。1981 年晶体管逆变弧焊电源出现了。1982 年瑞典 ESAB 公司推出 LHH-250、LHH-400 晶闸管逆变弧焊电源产品,1984 年又推出 Caddg-130 场效应管逆变弧焊电源。1986 年日本大阪变压器公司推出 350A 场效应管逆变 CO<sub>2</sub> 弧焊电源,其逆变频率达 50kHz。总之,逆变焊接电源在 80 年代商品化以来,得到迅速的发展,几乎所有国际上焊接设备的制造商都大力开发和生产逆变焊接电源。目前,逆变焊接电源已成为国际上焊接设备的主流产品。从 1993 年在德国埃森国际焊接与切割博览会上就可以看到,整个展厅几乎成了逆变焊接电源的海洋。各公司都展出各式各样的逆变焊接电源,弧焊逆变器最多,包括系列手弧焊、TIG 焊、MIG、MAG 焊、CO<sub>2</sub> 焊逆变电源,容量为 130~630A。最轻的 130A 弧焊逆变器只有 4.0kg,体积可放在手提包里携带。逆变焊接电源采用的功率开关器件主要是快速晶闸管(FSCR)、电力晶体管(GTR)、场效应管(MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)。逆变开关频率为 2~50kHz。逆变焊接电源产品目前不仅有各种逆变弧焊电源,还有逆变点焊电源、逆变电子束焊电源等。与焊接电源有密切联系的切割电源也都以逆变形式出现了。逆变空气等离子弧切割电源几乎与逆变弧焊电源同时应运而生。

我国逆变焊接电源在 80 年代初期就开始研制,1982 年华南理工大学研制出一台 ZX7-50 型逆变场效应管手弧焊电源样机。1983 年成都电焊机研究所推出一台 ZX7-250 型晶闸管逆变弧焊电源样机。80 年代后期清华大学先后研制出 ZX7-130、ZX7-160、ZX7-250 型场效应管逆变弧焊电源。90 年代初期北京航空航天大学研制出 ZX7-160 和 ZX7-250 型 IGBT 逆变弧焊电源。与此同时,成都佳灵电气制造公司生产出 ZX7-250、ZX7-400、ZX7-500 型系列 IGBT 逆变弧焊电源。目前我国已有上百个生产逆变焊接电源的厂家。如四川电子焊接设备公司、成都皮克科技研究所、天津中环电器厂、唐山焊接设备厂等都成批生产晶闸管逆变弧焊电源;北京肯沃特电力电子科技有限公司、西安华山机械制造厂均批量生产场效应管逆变弧焊电源;成都佳灵电气制造公司、北京时代新技术总公司批量生产 IGBT 逆变弧焊电源。我国当前生产的逆变焊接电源都以手弧焊电源为主,其次是 TIG 焊电源品种还较少。逆变 CO<sub>2</sub> 弧焊电源,只有晶闸管用作功率开关器件的逆变 CO<sub>2</sub> 焊电源投入生产。逆变 MIG、MAG 焊接电源研制的单位较多,投入生产的还很少。逆变焊接电源的容量也与国外相当,弧焊电源均在 50~630A 范

围内。逆变点焊电源我国也正在研制，但正式产品尚未问世。制罐缝焊逆变电源上海交通大学已研制成功并在生产部门推广应用。我国生产的空气等离子切割逆变电源均小于100A。

逆变焊接电源是我国目前大力提倡的换代产品，但由于生产时间还不太长，无论在技术上和制造工艺上还需要不断完善和成熟。当前用户对这类产品还嫌返修率太高。返修率偏高的原因除了少部分是由于技术不成熟外，大都是元器件和制造工艺问题。功率开关器件除快速晶闸管外，其它品种的功率开关器件都依靠进口，而市场上进口器件水货很多，鱼龙混杂，真伪难分，如无检测手段，上当受骗在所难免。

目前，逆变焊接电源已成为国际上公认的最先进的焊接电源，虽然发展历史不长，而发展速度迅速。据80年代末期日本统计，逆变焊接电源已占日本焊接电源总数的20%。目前欧美也在大力推广应用。而这种焊接电源在我国的覆盖面还太小，还需要多方面做工作。

### 1.1.2 发展趋势

逆变焊接电源要成为更新换代的革命性电源，还应在提高焊接工艺适应性、提高可靠性和降低成本上下功夫。逆变电源的中频逆变器可控性特好，容易适应焊接工艺动、静特性的要求，容易做成比传统式焊接电源性能更好、功能更强的电源。这方面的潜力还很大。电源容量上还应该扩大范围，现在埋弧焊、电渣焊、大功率电阻焊的逆变电源还很少见。特别是可靠性方面应使用户放心，保证8~12年的使用寿命，返修率降到1%左右。而且价格不高于其它类型的焊接电源。只有做到这些方面，才能真正实现更新换代的目标。现从下面几方面分析，达到这些目标是指日可待的，前景是美好的。

#### 1. 从电力电子技术的发展分析

逆变焊接电源中的关键器件是功率开关器件，而这方面的迅速发展为逆变焊接电源的发展创造了条件。

当前功率开关器件正朝着高压大容量化、集成化、全控化、高频化及多功能化方向发展。概括起来可分为双极型、单极型和复合型三大类，如图1-1所示。其中除普通晶闸管(SCR)、逆导晶闸管(RCT)、非对称晶闸管(ASCR)和双向晶闸管(TRIAC)等器件外，其余均为全控型器件，各种全控器件的符号及等效电路见表1-1。

(1) 双极型器件 是指器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的半导体器件，已用于逆变焊接电源的有SCR、GTO和GTR，将用于焊接电源的有SITH，这类器件通态压降低，阻断电压高，电流容量大。

1) 晶闸管 在逆变焊接电源中最早使用的功率开关器件是晶闸管，主要是快速晶闸管。它的特点是控制功率大，但不能自关断，属半控器件；且其开关速度较慢，因此工作频率低，一般只有0.5~5kHz；有噪声。从发展趋势看，其产品占有比例将逐渐减少。

2) 可关断晶闸管(简称GTO) GTO是高电压大电流双极型全控型器件。目前最大容量为4500A/5000V、1000A/9000V。它与传统的晶闸管相比，具有自关断能力，但关断增益较小，门极反向关断电流较大，且需设置专门的缓冲电路以限制 $di/dt$ 及关断损耗。这部分电路

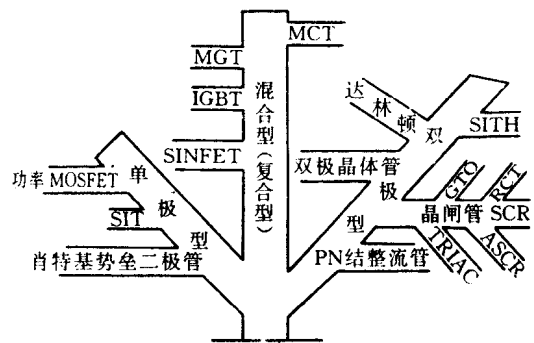


图1-1 电力半导体器件分类

表 1-1 各种全控型器件的符号及等效电路

类型 结构	双 极 型 器 件				单 极 型 器 件	
	晶体管	达林顿管	可关断晶闸管	静电感应晶闸管	场控晶体管	静电感应晶体管
名称	晶体管	达林顿管	可关断晶闸管	静电感应晶闸管	场控晶体管	静电感应晶体管
代号	GTR	Darlington	GTO	SITH	功率 MOSFET	SIT
等效电路						
类型 结构	复 合 型 器 件 (BI-MOS)					
	绝缘门极晶体管	MOS 晶闸管	MOS 晶体管 (MGT)			
名称	绝缘门极晶体管	MOS 晶闸管	达林顿式	并联式	串联式	混合式
代号	IGBT	MCT	达林顿式	并联式	串联式	混合式
等效电路						

要消耗一定能量；还需快速恢复二极管、无感电阻、电容等元器件。目前 GTO 工作频率还偏低，现正向快速关断方向发展，高频 GTO(HF-GTO) 的容量已达 1000A/1500V，所以在高压大电流领域 GTO 将取代传统的晶闸管。

3) 电力晶体管(简称 GTR) GTR 是三层结构的双极型全控器件。它具有控制方便、开关时间短、高频特性好、通态压降较低等优点。GTR 经历了双极晶体管(BJT)、达林顿管和 GTR 模块等发展阶段。GTR 模块是将 GTR 管芯、续流二极管管芯以及辅助元件组装成一个功能单元，然后根据不同用途将几个单元组装在塑料树脂外壳内。目前生产的 GTR 已基本模块化。

由于 GTR 的结构所限，因此电压难以超过 1500V，在更高电压下运行难以与 GTO 匹敌，此外，由于存在二次击穿问题，因此 GTR 的进一步发展受到了限制。

GTR 是继晶闸管之后成功地应用于逆变焊接电源中，现阶段它在逆变焊接电源中仍将占一定的地位。

4) 静电感应晶闸管(简称 SITH) SITH 也称作场控晶闸管，它属于双极型半控型器件，是近几年逐步趋向成熟的器件。它是一种在栅极上加反向偏压即成为阻断状态，除去反向偏压即成为导通状态的常开器件，其阻断特性取决于栅极电压与阳极电压的静电感应作用。

这种用栅极控制开通和关断的器件，在导通期间不发生载流子再生作用，因而可使工作温度高、动态特性均匀、导通电阻小、正向压降低、开关速度快、开关损耗低、 $di/dt$  及  $dv/dt$  耐量大。这种器件还具有晶闸管的电流浪涌能力和耐压水平。SITH 是目前开发的开关速度最快的晶闸管，它的应用范围很宽，预计在逆变焊接电源中将会获得广泛应用。SITH 的制造

工艺比较复杂，因此更广泛的实用化仍需要一段时间。

(2) 单极型器件 所谓单极型器件是指器件内只有一种载流子，即只有多数载流子参与导电的功率半导体器件。目前成为商品的有功率场效应管和静电感应晶体管两种器件。

1) 功率场效应管(简称 MOSFET) 近年来功率 MOSFET 发展很快，已成为电力电子器件的后起之秀。它由多数载流子导电，无少子存储效应，因而开关时间短，一般为纳秒数量级，典型值为 20ns，工作频率可达 500kHz 以上，功率 MOSFET 的栅源之间被一层  $\text{SiO}_2$  所隔离，其输入阻抗大于  $40\text{M}\Omega$ ，功率 MOSFET 属于电压控制型元件，控制较为方便。这种器件的电流具有负的温度系数，因而使器件有良好的电流自动调节能力，不易产生局部热点，所以二次击穿的可能性极小。这一点与双极型 GTR 有根本不同。此外，功率 MOSFET 还有热稳定性好、抗干扰能力强等优点。

略为不足的是功率 MOSFET 导通压降高，而且随着器件电压和温度的升高导通压降也增加。功率 MOSFET 适用于高频工作，因为它的开关损耗极小，故可补偿导通压降高的缺点。

功率场效应管由于它的容量较小，一般只用于小功率(50~315A)逆变焊接电源中。

2) 静电感应晶体管(简称 SIT) SIT 也是一种多子器件，它为三层结构，不仅可工作在开关状态，也可工作在放大状态。这是一种非饱和输出特性的器件，具有输出功率大、失真小、输入阻抗高、开关特性好、抗辐射能力强等优点。现已商品化的 SIT 截止频率可达 30~50MHz，耗散功率可达几千瓦。目前，平面栅 BSIT 模块已达到 200A/300V，今后当耐压提高到 1200V 以上时，将在逆变焊接电源中一显身手。

(3) 混合型器件 是指双极型和单极型器件的集成混合。它是用 GTR、GTO 以及 SCR 作为主导元件，用 MOSFET 作为控制元件混合集成之后产生的 BI-MOS 器件。这种器件既具有 GTR、GTO、SCR 等双极型器件电流密度高、导通压降低的优点，又具有 MOSFET 等单极型器件输入阻抗高、响应速度快的优点。因此，这种新型混合器件已引起人们的高度重视。目前已开发的混合型器件有肖特基注入 MOS 门极晶体管(SINFET)、绝缘栅双极晶体管(IGT 或 IGBT)、MOS 门极晶体管(MGT)、MOS 晶闸管(MCT 或 MCTH)以及功率集成电路(PIC)，如图 1-1 所示。现就其中发展较快的器件简介如下：

1) MOS 门极晶体管(简称 MGT) MOSFET 技术与 GTR 技术的结合产生了 MOS 门极晶体管。目前人们所研究的等效结构形式有多种多样，就其基本形式可分为四种：达林顿式、并联式、串联式及串并联混合式，具体见表 1-1。

图 1-2 所示为各种 BI-MOS 晶体管最大电流密度与工作频率的特性曲线。由图可知，并联 BI-MOS 的电流密度较高，串联 BI-MOS 的开关频率较高，串并联 BI-MOS 兼有两者优点，因此具有最佳性能。

2) 绝缘栅双极晶体管(简称 IGBT 或 IGT)

IGBT 是发展最快而且很有前途的一种混合型器件，1982 年开始研制，1986 年投产。因为它的等效结构具有晶体管的模式，所以称为绝缘栅双极晶体管；又因为类似的产品还具有寄生晶闸管结构，所以也有人称为绝缘门极晶闸管。

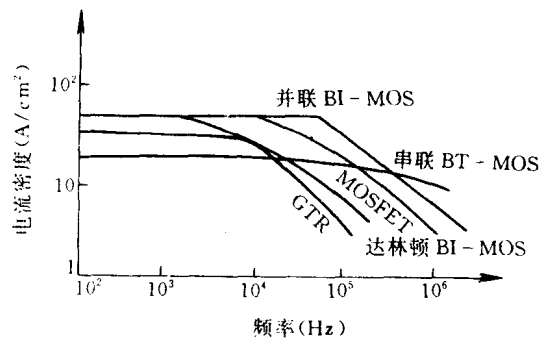


图 1-2 各种 BI-MOS 晶体管的特性比较

目前,IGBT 的单管容量为 1000A/1200V,开关频率已达到 10~30kHz,用在中大容量的逆变焊接电源中,现在已逐渐成为主流。

3) MOS 晶闸管(简称 MCT 或 MCTH) MCT 是晶闸管和 MOSFET 相结合的产物,它的主导器件是 SCR,而控制器件为 MOSFET。MCT 具有高电压、大电流、低通态压降、高电流密度、高输入阻抗、低驱动功率和高开关速度等优点。它是一种很理想的电力电子开关器件。它的出现虽不及当年微处理器那么重要,但是对大功率开关器件来说是一项重要突破。有人预测,和 30 年前 SCR 诞生后迅速取代汞弧整流器和闸流管一样,MCT 的发展可能使 GTR、SCR 及其派生器件被淘汰,并使 IGBT 和 MOSFET 限制在要求极高速开关的领域。由此可见,在当前电力半导体器件中 MCT 是被评价最高的一种混合器件。

目前在美国 MCT 的产品正开始系列化,其电压等级为 500~1000V,电流容量为 50~100A。

与 MOS 晶闸管相类似的混合器件还有 MOS-GTO,它是以 GTO 作为主导器件,以 MOSFET 作为控制器件的混合集成器件。MOS-GTO 比传统 GTO 具有更好的控制性能和工作特性,因而也是倍受关注的一种混合器件。未来发展的结果,MOS 晶闸管和 MOS-GTO 可能统称为 MCT 器件。预期 MCT 将在逆变焊接电源中会广泛应用。

表 1-2 给出部分全控型电力电子器件的比较表,可供选用时参考。

表 1-2 全控型电力电子器件比较

器件名称	GTR	GTO	IGBT	VDMOS	SIT	SITH
控制方式	电流	电流	电压	电压	电压	电压
常态	阻断	阻断	阻断	阻断	导通/关断	导通/关断
反向电压阻断能力 (V)	<50	500~6500	200~2500	0	0	500~4500
正向阻断电压范围 (V)	100~1400	500~9000	200~2500	50~1000	50~1500	500~4500
正向电流范围 (A)	400	3500	400~100	100~12	200	2200
正向导通电流密度 (A/cm <sup>2</sup> )	30	40	60	6	30	100~500
浪涌电流耐量	3 倍额定值	10 倍额定值	5 倍额定值	5 倍额定值	5 倍额定值	10 倍额定值
最大开关速度 (kHz)	50	10	50	20000	200000	100
门栅极驱动功耗	高	中等	很低	低	低	中等
dv/dt	中等	低	高	高	高	高
di/dt	中等	低	高	高	高	中等
最高工作结温 (°C)	150	125	200	200	200	200
抗辐射能力	差	很差	中等	中等	好	好
制造工艺	复杂	复杂	很复杂	很复杂	很复杂	很复杂
使用难易程度	较难	难	中等	很容易	容易	容易

## 2. 从材料学科发展分析

超导材料和软磁材料目前的发展速度也是惊人的。将这些新材料用于逆变焊接电源设备中，将会使逆变焊接电源更轻小型化及更为高效节能。

由于功率开关器件性能的改善，其开通关断损耗大为下降。因此，降低输出变压器的能耗已成为提高逆变焊接电源效率的另一个主要因素。

增大输出变压器功率的关键是磁性材料的选择与结构的确定。欲使其结构紧凑、损耗小、输出脉冲上升速度快，应选择饱和磁感应强度  $B_s$ 、电阻率  $\rho$  及脉冲磁导率均较大，且带材厚度小的磁性材料。同时，采用尺寸小、绝缘强度高的材料作为铁心、线圈间的绝缘，可进一步减小变压器的体积，提高能量传输效率。制造变压器用的材料系列化也是亟待解决的问题之一。

在晶闸管逆变弧焊电源中，还可以用超薄硅钢片作磁性材料。由于硅钢片的电阻率小、高频损耗大，对于更高频率的逆变焊接电源就不适用了。

目前，在逆变弧焊电源中，一般采用铁氧体作为磁性材料。铁氧体的电阻率高，其高频损耗小。但它的饱和磁感应强度  $B_s$  太低，使变压器的铁心结构较大，影响耦合系数  $K$  的提高。而且铁氧体是压铸而成的，具有易脆性，通过采取措施，一般可满足使用要求。但制造大规格铁心有一定的困难。

非晶态合金是近 20 年来发展起来的新材料。在其结构中，位错的迁移性很低；没有晶界，无各向异性；无阻止磁畴运动的障碍；易磁化，其磁感应强度高；电阻率大，对涡流阻力大，矫顽力小，能耗低。但以“U”形供货的磁感应强度大大降低。而以环形供货的则绕制线圈比较困难，影响生产率的提高。其尺寸不够大，要满足大容量的逆变器需求，还有待进一步加以解决。

表 1-3 列出了上述几种磁性材料的性能。从表 1-3 中可以看出，非晶态合金兼有电阻率高和饱和磁感应强度也较高的优点。因此，它是高频弧焊逆变器较为理想的磁性材料。

现在美国和日本在非晶态合金的生产和使用方面处于领先的地位。我国也形成了一定的生产能力。可以相信，今后几年内在弧焊逆变电源中，除进一步提高铁氧体的生产能力外，也将逐渐使用非晶态合金。从而进一步减小焊接逆变电源的体积和重量，降低能耗，提高效率。

近期国内外在非晶态合金的基础上经过处理使其变成微晶合金软磁材料，其性能参数比非晶态合金更高，更适合制作逆变焊接电源的变压器和电抗器。国内已有采用这些新型微晶材料制作逆变焊接电源，并获得较好的效果。随着材料学科的发展，一定会有更多更好超导材料和软磁材料的出现。为生产出更为高效节能、轻小型化的逆变焊接电源创造良好的条件。

表 1-3 几种磁性材料的性能比较

材 料	性 能	$B_s$	$H_c$	$\rho$
		(T)	(A/m)	( $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ )
非晶态合金	Metglass 2605sc	1.6	3.2	125
	国 产	1.6	4.0	130
铁 氧 体		0.4	16	1000000
超薄硅钢		1.8	36	57

值得提出的是随着材料学科的发展，一些相关学科如致冷、导热技术的发展，也会给逆

变焊接电源带来一些革命性的改进，例如热管技术用于输出变压器、电抗器的导热，试验研究表明，效果很好。

### 3. 从控制技术发展分析

在焊接逆变电源中，其控制部分对整机性能的优劣起到至关重要的作用。所用的控制方法可分为三类：分立硬件、微机软件、VLSI 硬件。对于某一具体电源来说，究竟采取何种方式，则应视焊接工艺的复杂程度和所用功率开关器件的速度来确定。分立硬件只适于简单的低速开关系统中，如晶闸管类逆变电源。目前，多采用后两种方法，特别是微机软件控制将成为未来发展的主流。它具有以下优点：改善系统的可靠性；减少漂移和电磁干扰；软件设计灵活，并可方便地加以修改和更新，以适应系统的变化；可存储有关的信息；实时监控和诊断工作过程；能够实现分级控制。在国外单片机和可编程控制器已普遍用于弧焊逆变电源的制造中。工业控制机和集散控制系统也将在复杂的弧焊逆变电源设备中得到使用。

随着对焊缝质量和自动化程度要求的提高，实现焊接逆变电源的智能化控制将成为必然的发展趋势。现代控制技术的最新进展也为实现这一目标提供了依据。专家系统、模糊控制和神经网络技术将会逐渐渗透到弧焊逆变电源的控制中。

专家系统是人工智能的一个分枝，它在弧焊逆变电源系统的设计、建模、仿真、实时控制和诊断等方面的应用潜力很大。

模糊控制中的变量可以是一些以语言表达为特征值的集合，如一模糊变量可定义为“负大”、“负小”、“正大”“正小”等，它用来处理不确定或不精确的关系。模糊控制通常是以过程的一般行为加以直观推断为基础的。模糊控制适于模型很复杂或无法确定的过程，而且规则数量少，自适应能力强。目前，日本等国已将模糊控制技术应用于焊接领域中。预计不久它会在弧焊逆变电源中逐渐得到广泛的应用。

神经网络即神经计算技术可看作为并行输入和并行输出分布计算的系统。其特点是运算速度极快，适于在线控制。现在神经网络芯片已经面市。国内外已有关于神经网络技术在焊接领域中应用的报导，在焊接逆变电源的控制中也将会发挥巨大的作用。

值得指出，近来功率集成电路(简称 PIC)的发展。功率集成电路是指功率器件与驱动电路、控制电路以及保护电路的集成，它包含着至少一个功率器件和一个独立功能电路的单片集成，这与 GTR、GTO 等单元器件集成有根本的区别。目前 PIC 被分为两大类：一类是高压集成电路(HVIC)，它是横向高耐压器件与控制电路的单片集成；另一类是所谓智能功率集成电路(SPIC)，它是纵向功率集成器件与控制电路、保护电路以及传感电路的多功能集成。就其本质来说，PIC 由两部分组成，一是功率器件，二是控制电路。功率器件有的是双极型晶体管，有的是 MOSFET，还有的是 BIMOS 晶体管；控制电路多数采用 MOSFET。由此可知，功率集成电路实质上也是 BIMOS 混合集成器件。目前主要着眼于中小功率的应用，工作电压和工作电流分别在 50~1000V、1~100A 之间，实际传送功率可达数千瓦。

功率集成电路使器件与电路集成，强电与弱电相结合，动力与信息统一，使其成为机和电的关键接口和机电一体化基础部件。因此可以预料，PIC 的发展和应用将使逆变焊接电源设备进入智能化时代。

## 1.2 逆变焊接电源电路的基本型式

逆变焊接电源是从电网吸取电能经逆变器变换供焊接使用的电源。其结构框图如图 1-3

所示。图 1-4 给出晶闸管弧焊整流电源的结构框图。由图 1-3 及图 1-4 比较可知，逆变焊接电源与一般焊接电源的差异就是不像一般焊接电源从电网吸取电能后先通过变压器降压隔离，然后整流滤波输出，而是从电网吸取电能后，先整流(AC→DC)，再通过逆变器将直流变成中频交流(DC→AC)，然后经变压器降压隔离、再整流滤波输出(AC→DC)。因此逆变焊接电源电路最大特点是有一个逆变器。

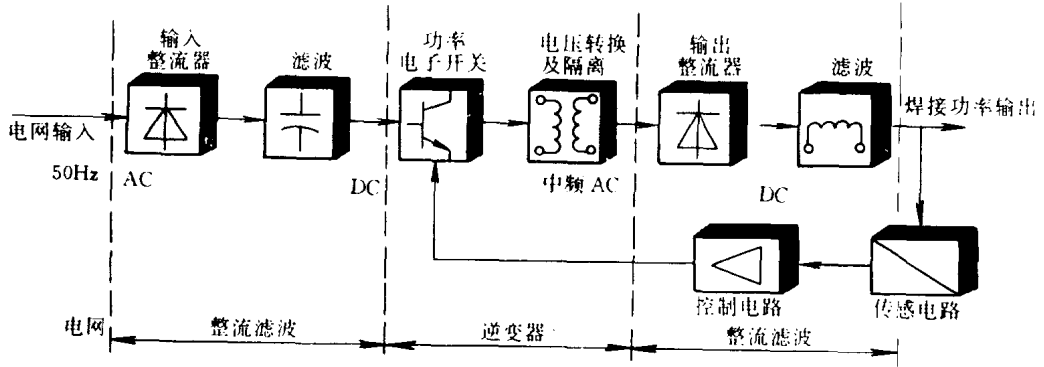


图 1-3 逆变焊接电源的结构框图

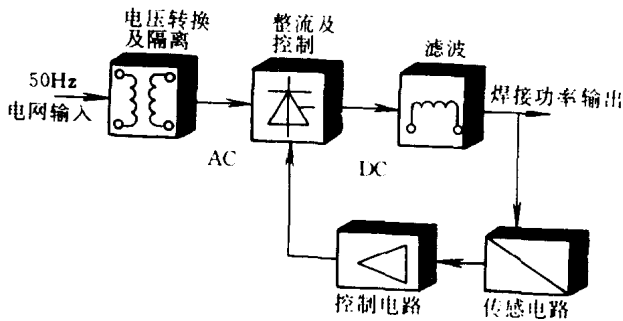


图 1-4 晶闸管弧焊整流电源结构框图

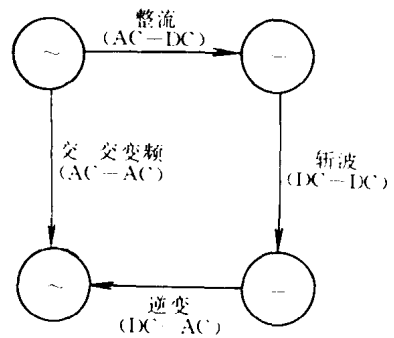


图 1-5 变流技术的基本型式

逆变器的功能是将直流功率转换成交流功率(DC→AC)，焊接电源中的逆变器是将直流转换成比电网交流频率高得多的中频交流。在变源技术中交流(AC)和直流(DC)互相转换有 4 种型式，如图 1-5 所示。AC→DC 称整流，DC→DC 称斩波，DC→AC 称逆变，AC→AC 称交交变频。在 DC→AC 逆变中又有两种型式。一种是把直流电变换成与交流电网同频率的交流电，如直流输电，将三相高压交流电先变换成高压直流，进行远距离输电，输到目的地后利用逆变器，再将直流逆变成与电网同频率的交流电，这种逆变称为有源逆变。另一种逆变是把 50Hz 电网交流电变换成直流电，然后再将直流电逆变成频率和幅度均与电网不同的交流电供负载使用，这种逆变称为无源逆变。显然，逆变焊接电源中的逆变器是属无源逆变。

由电力电子开关器件和中频变压器组成的逆变功率转换电路称为逆变器，它是逆变焊接电源的核心部件。这种功率转换电路有推挽、全桥，半桥以及单端反激、单端正激等型式。介绍各种功率转换逆变器的电路时，为了叙述方便，功率开关管都用晶体管(GTR)表示。实际上采用其它功率开关管时，其基本电路是一致的。

### 1.2.1 推挽式逆变电路

推挽式逆变电路如图 1-6a 所示。功率开关管  $VT_1$ 、 $VT_2$  由基极驱动电路以脉冲方式激励



而交替通断，输入直流电压被变换成中频方波交流电压。 $VT_1$  导通时，输入电源电压  $E$  通过  $VT_1$  施加到高频变压器  $T_1$  的一次绕组  $N_1$  上，由于变压器作用，截止晶体管  $VT_2$  上将施加两倍电源电压(即  $2E$ )。当基极激励消失时，一对高压开关管均截止，它们的集电极施加电压均为  $E$ 。下半个周期， $VT_2$  被激励导通，截止晶体管  $VT_1$  上施加  $2E$  的电压，接着又是两晶体管都截止的时期， $V_{CE1}$  和  $V_{CE2}$  均为  $E$ 。下一个周期重复上述过程。

在晶体管导通过程中，集电极电流除负载电流成分外，还包含有输出电容器的充电电流和高压变压器的励磁电流，它们均随导通脉冲宽度的增加而线性地上升，这便是功率开关管稳态运行时集电极电压和电流的基本规律，其波形亦示于图 1-6b。

此电路的中频变压器上直接施加输入电源电压，因而，只用两个功率开关管便能获得较大的功率输出，而且，一对晶体管的发射极相连，两组基极驱动电路彼此间就无需绝缘，这样不仅驱动电路和过电流保护电路可以简化，而且可供选择的余地也就增大，这是该电路的优点。

但在开关的暂态过程中，由于中频变压器二次侧开关整流二极管反向恢复时间内所造成的短路，以及为了抑制集电极电压尖峰而设置的  $RC$  吸收网络(图中未画出)的作用，当高压开关管开通时，集电极稳态电流上将会伴以尖峰；在关断瞬间，由于高频变压器漏感储能的作用，在集电极稳态截止电压上会形成电压尖峰，如图 1-6b 所示。尖峰电压的大小随集电极电路的配置、中频变压器的漏感以及电路的关断条件的不同而异，该尖峰电压有可能使高压开关管承受两倍以上输入电压，以  $220V \pm 10\%$  的电网电压为例，稳态截止电压的最大值约为  $680V$ ，加上暂态过程中的尖峰电压，则推挽式电路高压开关管必须能承受  $800V$  以上的电压，这给选择使用开关管带来了困难。此外，一次绕组只有一半时间工作，中频变压器的利用率也差。因此在目前生产的逆变焊接电源中这种型式逆变电路很少被采用。

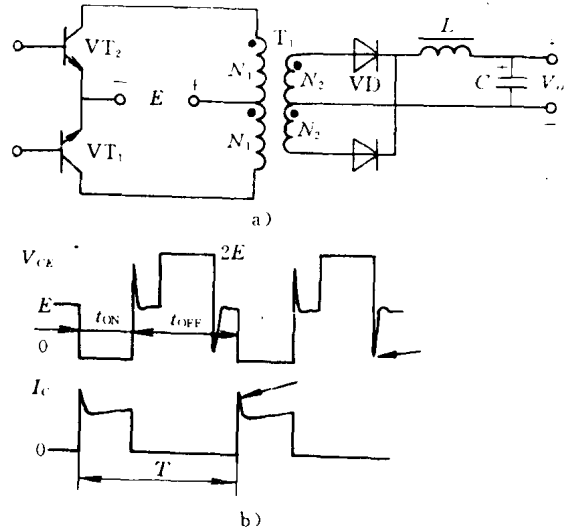


图 1-6 推挽式逆变电路及其波形

注：图 b 中  $V_{CE}$  波形标箭头处是漏感储能引起的电压尖峰

$I_C$  波形标箭头处是 VD 的恢复特性和集电极电容引起的电流尖峰

### 1.2.2 全桥式逆变电路

全桥式逆变电路如图 1-7a 所示。功率开关管  $VT_1, VT_2, VT_3$  和  $VT_4$  组成桥的四臂，中频变压器  $T_1$  连接在它们中间，相对桥臂上的一对晶体管  $VT_1, VT_4$  和  $VT_2, VT_3$  由驱动电路以脉冲方式激励而交替通断，将直流输入电压变换成中频方波交流电压。其工作过程和推挽式逆变电路一样。

显而易见，当一组功率开关管(例如  $VT_1, VT_4$ )导通时，截止晶体管( $VT_2, VT_3$ )上施加的电压即为输入电压  $E$ ，当所有晶体管均截止时，一组两个高压开关管将共同承受输入电压(即  $E/2$ )。由中频变压器漏感引起的电压尖峰，当其超过输入电压时，反向并接在高压开关管集射之间的高速箝位二极管便导通，集电极电压被箝位在输入电压上。集电极电流同样也有