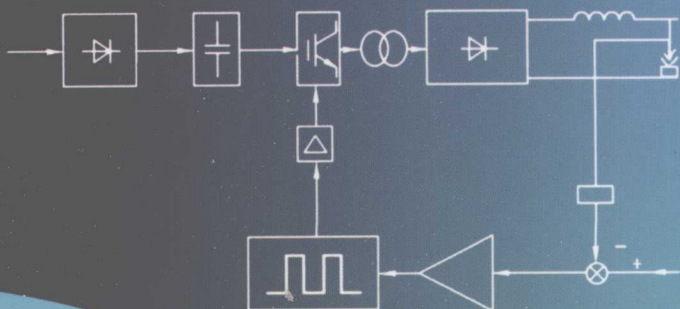


电力电子  
新技术系列图书

New Technology Series in  
Power Electronics



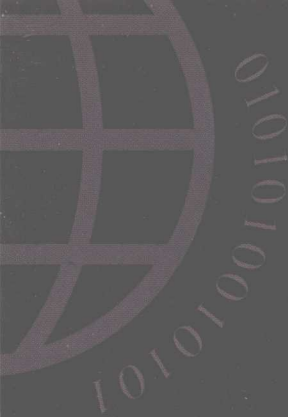
◎张光先 等编著

# 逆变焊机 原理与设计

NIBIAN HANJI YUANLI YU SHEJI

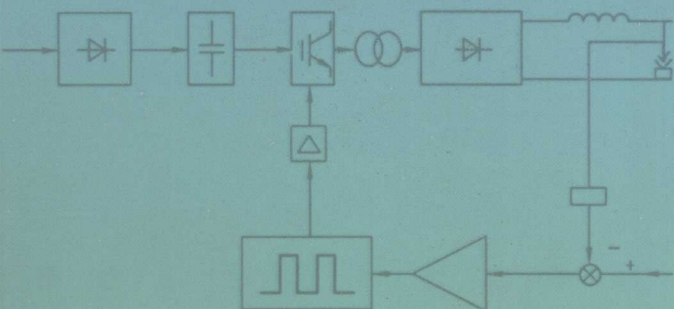


机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 电力电子新技术系列图书

## New Technology Series in Power Electronics



- ISBN 978-7-111-23637-5
- 封面设计/电脑制作：马精明

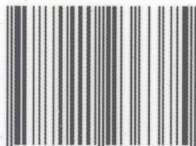
上架指导：工业技术 / 电气工程 / 电气自动化

编辑热线：(010)88379768

地址：北京市百万庄大街22号 邮政编码：100037  
联系电话：(010)68326294 网址：<http://www.cmpbook.com> (机工门户网)  
(010)68993821 E-mail: [cmp@cmpbook.com](mailto:cmp@cmpbook.com)  
购书热线：(010)88379639 (010)88379641 (010)88379643

定价：39.00元

ISBN 978-7-111-23637-5



9 787111 236375 >

电力电子新技术系列图书

# 逆变焊机原理与设计

张光先 等编著



机械工业出版社

本书系统介绍了逆变焊机的原理及设计方法,共分为5章。第1章介绍了焊机的发展过程:从弧焊发电机发展为逆变焊机,从晶闸管逆变焊机发展为IGBT逆变焊机,并向着数字化的方向发展。第2章介绍了逆变焊机的主电路设计、功率开关器件的选用和计算,以及控制电路的设计。第3章分析了各种焊接方法对焊机的要求。涉及了焊条电弧焊、TIG焊、CO<sub>2</sub>气体保护焊、脉冲MIG焊以及埋弧焊,并介绍了几种先进高效的焊接方法。第4章分析了国内外典型焊机实例,分为主电路分析、单元电路分析以及焊接电流与电压的分析。第5章以低飞溅软开关气体保护焊设计为例,给出了逆变焊机的设计实例及仿真过程。

逆变焊机的设计需要理论和实践的紧密结合,因而本书中尽量做到理论联系实际,书中给出了大量的实际资料数据、单元电路和电流与电压波形,可供读者参考选用。

本书适合焊接设备的有关技术人员阅读,也可作为大专院校有关师生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

逆变焊机原理与设计/张光先等编著. —北京:机械工业出版社,2008.3

(电力电子新技术系列图书)

ISBN 978-7-111-23637-5

I. 逆… II. 张… III. ①逆变换-焊机-理论②逆变换-焊机-设计  
IV. TG431

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第029936号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:孙流芳 责任编辑:罗莉 责任校对:申春香

封面设计:马精明 责任印制:邓博

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2008年5月第1版第1次印刷

169mm×239mm·11.125印张·406千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-23637-5

定价:39.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379768

封面无防伪标均为盗版

# 电力电子新技术系列图书

## 编辑委员会

**主任：**王兆安

**副主任：**白继彬 牛新国 徐德鸿 杨 耕

**委员：**(按姓名拼音字母排序)

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 白继彬 | 陈伯时 | 陈道炼 | 陈 坚 | 陈守良 |
| 陈治明 | 高艳霞 | 郭世明 | 黄耀先 | 康 勇 |
| 李崇坚 | 李永东 | 刘进军 | 吕征宇 | 牛新国 |
| 钱照明 | 阮新波 | 孙流芳 | 童宗鉴 | 王鸿麟 |
| 王旭东 | 王兆安 | 邬伟扬 | 肖湘宁 | 徐德鸿 |
| 徐殿国 | 杨 耕 | 杨 旭 | 余岳辉 | 张 波 |
| 张承慧 | 张为佐 | 张卫平 | 张 兴 | 赵善麒 |
| 赵争鸣 | 钟彦儒 | 周 波 | 周维维 | 查晓明 |

**秘书组：**陈守良 刘进军 孙流芳 罗 莉

# 电力电子新技术系列图书

## 序 言

电力电子技术诞生近半个世纪以来，使电气工程、电子技术、自动化技术等领域发生了深刻的变化，同时也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前，电力电子技术仍以迅猛的速度发展着，新的电力电子器件层出不穷，新的技术不断涌现，其应用范围也不断扩展。不论在全世界还是在我国，电力电子技术都已造就了一个很大的产业群，如果再考虑到与电力电子技术相关的上游产业和下游产业，这个产业群就更加庞大了。与之相应，在电力电子技术领域工作的工程技术和科研人员的数量也相当庞大，且与日俱增。因此，组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列书籍，以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考，成为眼下的迫切需要。

在 20 世纪 80 年代，电力电子学会曾和机械工业出版社合作，出版过一套电力电子技术丛书，那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近，电力电子学会经过认真考虑，认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此，成立了专门的编辑委员会，负责确定书目、组稿和审稿工作，向机械工业出版社推荐，仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色：

1. 本系列图书属专题论著性质，选题新颖，力求反映电力电子技术的新成就和新经验，以适应我国经济迅速发展的需要。

2. 理论联系实际，以应用技术为主。

3. 本系列图书组稿和评审过程严格，作者都是在电力电子技术第一线工作的专家，且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于阅读学习。

本系列图书编委会中，既有一大批国内资深的电力电子专家，也有不少已崭露头角的青年学者，其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助，并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书  
编辑委员会

# 前 言

逆变焊机的出现已近20年,从最初的晶闸管逆变焊机发展成为场效应晶体管和绝缘栅双极型晶体管逆变焊机,逆变频率从2kHz发展为100kHz,主电路形式从硬开关发展为软开关,主电路的可靠性、可控性大大提高。由于数字控制技术的发展,逆变焊机从模拟控制发展成全数字化控制,可实现对熔滴过渡进行精细控制,这种全数字化的逆变焊机对整个焊接电源的发展产生深刻的影响。数字化逆变焊机已深入到焊接电源的各个方面,例如气体保护焊机中的带专家系统的单脉冲、双脉冲焊机,双丝协同高速MIG焊,交流MIG焊和冷过渡焊,埋弧焊中的交流方波埋弧焊,TIG焊中的直流高频脉冲TIG焊,交流方波TIG焊,以及变极性等离子弧焊和电阻焊中的逆变电阻焊。经过十几年的发展,逆变焊机的可靠性有了较大的发展,但存在大功率逆变焊机的可靠性不高、焊接质量有待提高、与国外先进技术有较大差距等问题。本书采用了理论分析和实际应用相结合的方法,将国内外先进的焊接产品技术介绍给读者,以学习其设计方法和设计思想,为推动我国逆变焊机的发展尽点力量。

近20年来,本人一直从事焊机研发并参与组建了山东山大奥太电气公司焊接设备研发团队。书中收录了许多山大奥太公司的科研成果和国内外典型焊机的研究技术资料。山大奥太公司的尹海、李思海、李爱文老师分别参加了焊条电弧焊、气体保护焊、埋弧焊的有关章节的编写工作,常兴国、李鹏、孙润生、李海涛、苗华伟、刘晨等工程师提供了许多技术资料。山东大学的张承慧老师作了全书的审订工作,对他们表示衷心的感谢。在编写过程中,我的研究生黄延龄、杨通作了文字工作,也在此表示感谢。

本书中焊接工艺方面主要参考了殷树言教授的《气体保护焊工艺基础》和俞尚知的《焊机工艺人员手册》,功率器件的参数主要参考了《塞米控功率手册》,在此表示感谢。

由于编者水平有限,本书中可能存在着许多不当之处,望读者批评指正。

张光先

# 电力电子新技术系列图书

## 目 录

- 矩阵式变换器技术及其应用 孙凯、周大宁、梅杨编著 (已出版)
- 逆变电焊机原理与设计 张光先等编著 (已出版)
- 太阳能光伏并网发电技术 张兴、曹仁贤、张崇巍编著
- 宽禁带半导体电力电子器件及其应用 陈治明、李守智编著
- 有源功率因数校正技术 徐德鸿编著
- 固态感应加热电源技术及其应用 陈辉明、金天均、李胜川编著
- 高压直流输电原理与应用 韩民晓、文俊编著
- 开关稳压电源的设计和应用 裴云庆、杨旭、王兆安编著
- 电力电子技术在汽车中的应用 王旭东编著
- 脉冲功率器件及其应用 余岳辉、梁琳、彭亚斌、邓林峰编著
- 新能源汽车技术 康龙云编著
- 开关电源的实用仿真与测试技术 陈亚爱、张卫平编著
- 高频开关型逆变器及其并联并网技术 邬伟扬主编
- 电能质量控制技术 查晓明 孙建军 宫金武编著
- 交流电动机直接转矩控制 周扬忠编著



## 已出版相关工具书目录

- 电气工程师手册（第3版） 电气工程师手册第3版编辑委员会
  - 电工最新基础标准应用手册（第2版） 杨振宽主编
  - 电力电子设备设计 and 应用手册（第2版） 王兆安、张明勋主编
  - 实用光学技术手册 王之江、顾培森主编
  - 最新通用晶闸管置换手册 本书编写组编
  - 电力电子设备用器件与集成电路应用指南 李宏编著
- 第1册 电力半导体器件及其驱动集成电路
- 第2册 控制用集成电路
- 第3册 传感、保护用和功率集成电路
- 第4册 其他配套元器件
- 变频器应用手册（第3版） 吴忠智、吴加林编著
  - 常用变频器功能手册 张燕宾编著
  - 软起动器实用手册 余洪明、章克强编著
  - 调速用变频器及配套设备选用指南（第2版） 吴忠智、黄立培、吴加林编著
  - 电力半导体模块选用和代换手册 杜柏田编
  - 电力电子技术手册（美）Muhammad H. Rashid 主编
  - 现场总线与工业以太网产品手册 蔡忠勇主编
  - 开关电源手册（原书第2版）（日）原田耕介主编
  - 西门子工业网络通信指南（上、下册） 崔坚主编
  - 电气传动自动化技术手册（第2版） 天津电气传动设计研究所编著
  - PLC编程实用指南（含1CD） 宋伯生主编
  - 电气设备机械结构设计手册 于庆祯、李锋编
  - 最新工业自动化测控应用手册 杨帮文编

以上图书由全国各地新华书店经销。也可由中国科技金书网（[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)）订购，联系电话：010-68993821 010-88379639 010-88379641

# 目 录

## 电力电子新技术系列图书序言

## 前 言

## 第 1 章 绪论 ..... 1

### 1.1 直流焊接电源发展的历史 ..... 1

#### 1.1.1 弧焊发电机 ..... 1

#### 1.1.2 二极管整流焊机 ..... 2

#### 1.1.3 晶闸管整流焊机 ..... 2

#### 1.1.4 斩波式焊机 ..... 2

#### 1.1.5 逆变焊机 ..... 2

### 1.2 逆变焊机的特点 ..... 3

#### 1.2.1 逆变焊机的优点 ..... 3

#### 1.2.2 逆变焊机的缺点 ..... 4

### 1.3 逆变焊接电源的发展方向 ..... 5

#### 1.3.1 可靠性的提高 ..... 5

#### 1.3.2 控制的数字化 ..... 5

#### 1.3.3 控制的精细化 ..... 5

#### 1.3.4 低电网污染 ..... 5

## 第 2 章 逆变焊机电路基础 ..... 6

### 2.1 逆变焊机中常用的主电路结构形式 ..... 6

#### 2.1.1 单端正激式电路 ..... 6

#### 2.1.2 半桥式电路 ..... 7

#### 2.1.3 桥式电路 ..... 7

#### 2.1.4 基本电路的变形 ..... 8

### 2.2 功率单元的控制方式 ..... 12

#### 2.2.1 电压型 PWM 控制器 ..... 12

#### 2.2.2 电流型 PWM 控制器 ..... 13

#### 2.2.3 脉冲频率调制 (PFM) 方式 ..... 13

#### 2.2.4 集成控制电路 ..... 14

#### 2.2.5 利用 MCU、DSP、FPGA 产生 PWM 信号 ..... 17

### 2.3 功率开关器件及其选择 ..... 22

#### 2.3.1 IGBT 的主要特性参数 ..... 22

#### 2.3.2 IGBT 模块的选择 ..... 25

#### 2.3.3 IGBT 的结温计算 ..... 25

#### 2.3.4 IGBT 的保护 ..... 28

#### 2.3.5 硬开关、软开关中 IGBT 应用的区别 ..... 31

#### 2.3.6 逆变焊机中常用的 IGBT 参数 ..... 32

#### 2.3.7 常用快速整流管的特性 ..... 34

#### 2.3.8 快速整流管的过电压保护 ..... 35

#### 2.3.9 快速整流管的并联 ..... 36

#### 2.3.10 常用的快速整流管 ..... 36

### 2.4 驱动电路 ..... 38

#### 2.4.1 驱动电路的基本要求 ..... 38

#### 2.4.2 驱动电路的隔离 ..... 38

#### 2.4.3 集成驱动电路 ..... 40

### 2.5 功率变压器的铁心材料 ..... 41

#### 2.5.1 铁氧体 ..... 41

#### 2.5.2 非晶合金和微晶合金 ..... 42

### 2.6 信号的取样 ..... 44

#### 2.6.1 焊接电流取样 ..... 44

#### 2.6.2 焊接电压取样 ..... 46

### 2.7 功率因数校正及高频信号的抑制 ..... 46

#### 2.7.1 功率因数校正 ..... 46

#### 2.7.2 高频干扰信号的抑制 ..... 48

### 2.8 逆变焊机的结构设计 ..... 51

#### 2.8.1 风道设计 ..... 51

#### 2.8.2 变压器、电抗器的结构设计 ..... 53

## 第3章 常用焊接设备及工艺的控制

|  |     |   |            |
|--|-----|---|------------|
| 控制 .....   | 55  | 3.4.2 钨极氩弧焊的基本特点 .....                                | 125        |
| 3.1 焊条电弧焊 .....                                  | 55  | 3.4.3 氩弧焊设备 .....                                     | 132        |
| 3.1.1 概述 .....                                   | 55  | 3.4.4 逆变直流氩弧焊机 .....                                  | 135        |
| 3.1.2 逆变电弧焊机 .....                               | 60  | 3.4.5 逆变交流氩弧焊机 .....                                  | 137        |
| 3.1.3 引弧特性与引弧电流 .....                            | 62  | 3.4.6 几种高效 TIG 焊接方法 .....                             | 145        |
| 3.1.4 熔滴过渡与电弧推力 .....                            | 62  | 3.4.7 高频引弧的抗干扰抑制 .....                                | 146        |
| 3.1.5 焊接电流的载波遥控技术 .....                          | 64  | 3.5 埋弧焊 .....   | 150        |
| 3.1.6 直流电弧焊中磁偏吹现象 .....                          | 66  | 3.5.1 概述 .....  | 150        |
| 3.2 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊 .....                | 66  | 3.5.2 埋弧焊焊接过程的控制 .....                                | 152        |
| 3.2.1 概述 .....                                   | 66  | 3.5.3 自动埋弧焊设备 .....                                   | 154        |
| 3.2.2 焊接材料 .....                                 | 68  | 3.5.4 逆变埋弧焊 .....                                     | 161        |
| 3.2.3 冶金反应 .....                                 | 71  | 3.5.5 高效焊接设备 .....                                    | 166        |
| 3.2.4 CO <sub>2</sub> 气体保护焊焊丝的<br>熔化与熔滴的过渡 ..... | 72  | <b>第4章 焊机实例 .....</b>                                 | <b>170</b> |
| 3.2.5 电弧的自调节作用 .....                             | 77  | 4.1 晶闸管逆变焊机 .....                                     | 170        |
| 3.2.6 焊接设备 .....                                 | 80  | 4.1.1 概述 .....  | 170        |
| 3.2.7 CO <sub>2</sub> 气体保护焊电源的<br>分类 .....       | 84  | 4.1.2 参数规格与功能 .....                                   | 171        |
| 3.2.8 CO <sub>2</sub> 气体保护焊飞溅与<br>成形问题 .....     | 87  | 4.1.3 主电路工作原理 .....                                   | 172        |
| 3.2.9 焊接电流波形控制技术 .....                           | 91  | 4.1.4 控制单元电路分析 .....                                  | 177        |
| 3.2.10 引弧与收弧 .....                               | 96  | 4.1.5 经常出现的故障分析 .....                                 | 183        |
| 3.2.11 送丝机的控制 .....                              | 99  | 4.2 奥太 ZX7 系列手弧/氩弧 IGBT<br>逆变焊机 .....                 | 183        |
| 3.2.12 载波遥控技术 .....                              | 100 | 4.2.1 概述 .....  | 183        |
| 3.3 熔化极气体保护电弧焊 .....                             | 101 | 4.2.2 参数规格与功能 .....                                   | 184        |
| 3.3.1 概述 .....                                   | 101 | 4.2.3 工作原理 .....                                      | 186        |
| 3.3.2 熔滴过渡形式 .....                               | 105 | 4.2.4 控制单元电路分析 .....                                  | 189        |
| 3.3.3 脉冲 MIG/MAG 焊控制<br>方法 .....                 | 113 | 4.2.5 经常出现的故障分析 .....                                 | 191        |
| 3.3.4 其他形式的脉冲 MIG/<br>MAG 焊 .....                | 118 | 4.3 奥太 NBC 系列 IGBT 逆变 CO <sub>2</sub><br>气体保护焊机 ..... | 192        |
| 3.3.5 逆变脉冲 MIG/MAG 焊<br>焊机 .....                 | 122 | 4.3.1 概述 .....  | 192        |
| 3.4 钨极氩弧焊 .....                                  | 124 | 4.3.2 参数规格与功能 .....                                   | 193        |
| 3.4.1 概述 .....                                   | 124 | 4.3.3 工作原理 .....                                      | 196        |
|  |     | 4.3.4 控制单元电路分析 .....                                  | 196        |
|  |     | 4.4 奥太 WSM 系列脉冲氩弧<br>焊机 .....                         | 202        |
|  |     | 4.4.1 概述 .....  | 202        |
|  |     | 4.4.2 参数规格与功能 .....                                   | 202        |
|  |     | 4.4.3 工作原理 .....                                      | 204        |
|  |     | 4.4.4 控制单元电路分析 .....                                  | 205        |

|                                      |     |  |            |
|--------------------------------------|-----|--|------------|
| 4.5 奥太 WSME 系列逆变式交直流<br>脉冲氩弧焊机 ..... | 207 | 4.11.1 概述 .....                                      | 262        |
| 4.5.1 概述 .....                       | 207 | 4.11.2 参数规格与功能 .....                                 | 262        |
| 4.5.2 参数规格与功能 .....                  | 208 | 4.11.3 焊机工作原理 .....                                  | 263        |
| 4.5.3 工作原理 .....                     | 210 | 4.11.4 单元控制电路 .....                                  | 266        |
| 4.5.4 控制单元电路分析 .....                 | 210 | 4.12 霍巴特 501 多功能焊机 .....                             | 270        |
| 4.5.5 常出现的故障分析 .....                 | 215 | 4.12.1 概述 .....                                      | 270        |
| 4.6 松下 YD-500EA 气体保护<br>焊机 .....     | 215 | 4.12.2 参数规格及功能 .....                                 | 271        |
| 4.6.1 概述 .....                       | 215 | 4.12.3 主电路 .....                                     | 273        |
| 4.6.2 参数规格与功能 .....                  | 216 | 4.12.4 单元电路分析 .....                                  | 273        |
| 4.6.3 主电路工作原理分析 .....                | 217 | 4.13 其他焊机电路实例 .....                                  | 281        |
| 4.6.4 控制单元电路分析 .....                 | 219 | 4.13.1 威特力 WSME-315<br>焊机 .....                      | 281        |
| 4.7 米勒 X304 逆变焊机 .....               | 226 | 4.13.2 松下 YC-315TX 直流 TIG<br>弧焊机 .....               | 284        |
| 4.7.1 概述 .....                       | 226 | <b>第 5 章 低飞溅 CO<sub>2</sub> 气体保护焊<br/>设计实例 .....</b> | <b>287</b> |
| 4.7.2 参数规格与功能 .....                  | 227 | 5.1 低飞溅 CO <sub>2</sub> 气体保护焊控制<br>方案确定 .....        | 287        |
| 4.7.3 主电路工作原理 .....                  | 228 | 5.1.1 CO <sub>2</sub> 气体保护焊等效电路<br>模型 .....          | 287        |
| 4.7.4 控制单元电路分析 .....                 | 231 | 5.1.2 不同取样点测得的焊接<br>电压、电流波形 .....                    | 288        |
| 4.8 林肯 STT-II 表面张力过渡<br>焊机 .....     | 239 | 5.1.3 在短路燃弧转换期间焊接<br>电压、电流波形的根部<br>特性 .....          | 289        |
| 4.8.1 概述 .....                       | 239 | 5.1.4 熔滴过渡特征信号的<br>提取 .....                          | 290        |
| 4.8.2 参数规格 .....                     | 239 | 5.1.5 焊接电压、电流取样<br>信号分析 .....                        | 290        |
| 4.8.3 工作原理 .....                     | 240 | 5.1.6 短路阶段特征量的分析 .....                               | 291        |
| 4.8.4 控制单元电路分析 .....                 | 243 | 5.1.7 几个特征信号的讨论 .....                                | 292        |
| 4.9 福尼斯 TPS5000 全数字化气体<br>保护焊机 ..... | 248 | 5.1.8 低飞溅 CO <sub>2</sub> 气体保护焊<br>控制策略 .....        | 292        |
| 4.9.1 概述 .....                       | 248 | 5.2 低飞溅 CO <sub>2</sub> 气体保护焊系统的<br>实现 .....         | 295        |
| 4.9.2 参数规格与功能 .....                  | 249 | 5.2.1 主电路的设计与实现 .....                                | 295        |
| 4.9.3 工作原理 .....                     | 250 | 5.2.2 空载、轻载时软开关实现<br>方案 .....                        | 299        |
| 4.9.4 控制电路功能分析 .....                 | 252 |  |            |
| 4.10 三社 IA-3001TPH 交直流氩弧<br>焊机 ..... | 254 |  |            |
| 4.10.1 概述 .....                      | 254 |  |            |
| 4.10.2 参数规格 .....                    | 254 |  |            |
| 4.10.3 焊机的操作功能 .....                 | 254 |  |            |
| 4.10.4 焊机工作原理 .....                  | 257 |  |            |
| 4.10.5 控制电路功能分析 .....                | 259 |  |            |
| 4.11 林肯 V300-1 逆变焊机 .....            | 262 |  |            |

|                                       |     |  |     |
|---------------------------------------|-----|--|-----|
| 5.2.3 超前臂并联电容 $C_1$ 、 $C_2$ 的确定 ..... | 302 | 5.4.7 输出回路电感对焊接稳定性的影响 .....              | 325 |
| 5.3 输出电流快速下降的实现方案研究 .....             | 309 | 5.4.8 液桥爆断后电弧重新引弧性能的分析 .....             | 327 |
| 5.3.1 逆变器控制方案实现方式 .....               | 309 | 5.5 低飞溅 $\text{CO}_2$ 气体保护焊系统的仿真 .....   | 328 |
| 5.3.2 输出串联斩波方案 .....                  | 311 | 5.5.1 焊接电源建模与仿真 .....                    | 328 |
| 5.3.3 电流型移相谐振电路的斜坡信号补偿问题 .....        | 312 | 5.5.2 输入整流部分 .....                       | 329 |
| 5.4 焊接电流波形与飞溅量及稳定性之间的关系 .....         | 314 | 5.5.3 软开关逆变器部分 .....                     | 331 |
| 5.4.1 短路前期 $t_1 \sim t_2$ .....       | 315 | 5.5.4 峰值电流控制部分 .....                     | 333 |
| 5.4.2 短路电流上升段 $t_2 \sim t_3$ .....    | 317 | 5.5.5 输出电流斩波器部分 .....                    | 335 |
| 5.4.3 缩颈判定信号 .....                    | 319 | 5.6 低飞溅 $\text{CO}_2$ 气体保护焊焊接试验及应用 ..... | 336 |
| 5.4.4 燃弧脉冲前的等待时间 $t_3 \sim t_4$ ..... | 322 | 5.6.1 熔滴过渡的图像分析 .....                    | 336 |
| 5.4.5 燃弧脉冲电流宽度与峰值 .....               | 323 | 5.6.2 焊接试验 .....                         | 338 |
| 5.4.6 电流基值段 $t_6 \sim t_7$ .....      | 325 | 5.6.3 在西气东输管线封底焊中的应用 .....               | 338 |
|                                       |     | 参考文献 .....                               | 341 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 直流焊接电源发展的历史

真正大批量商业化的直流焊接电源是从弧焊发电机开始的，弧焊发电机的结构是电动机带发电机，发电机的特性是下降特性或平特性，其外特性曲线满足电弧燃烧的需要，由发电机供给焊接过程的电能。随着半导体器件的发展，当大功率二极管、晶闸管出现后，出现了整流式焊机，焊接电源的特性可由半导体器件来控制，控制性能得到进一步提高。

大功率晶体管、金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET）、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）的成熟，使逆变焊机得到发展，由于逆变焊机节能及良好控制性能，一出现即受到关注，并对主电路形式、焊接性能及可靠性方面进行了许多研究，现在逆变焊机的可靠性已基本解决。

随着单片机、数字信号处理器（DSP）控制技术的发展，焊机的控制已从模拟控制转向数字化控制，由于控制精度和灵活性的提高，可实现对熔滴过渡的精细控制，实现了原来模拟控制法无法实现的功能。

随着逆变焊机的大量应用，由于非线性整流器件以及高频逆变器产生的对电网的谐波干扰以及电磁空间辐射日趋严重，提高功率因数、降低谐波干扰成为逆变焊机急需解决的问题。

### 1.1.1 弧焊发电机

弧焊发电机一般采用两种结构：电动机—发电机结构和内燃机（包括汽油机、柴油机）—发电机结构。电动机—发电机结构是先将电能转化为机械能，再由机械能转化为电能，效率较低，空载时电动机、发电机的空转损耗较大。例如，我国的AX系列焊机由于能耗大而被淘汰。

在野外作业无电源的情况下，内燃机驱动的发电电焊两用机则用途较广泛，既可作为辅助电源使用，又可作为焊机使用，利用率较高，由于焊接方法越来越多，发电机不可能有很灵活的外特性控制方法，因而发电机和电力电子技术配合起来，将发电机的输出进行逆变或斩波控制，很灵活地产生多种电流波形，以适应不同焊接方法的需要。

### 1.1.2 二极管整流焊机

出现了大功率整流二极管后,产生二极管整流焊机,其结构是三相变压器降压后通过二极管整流输出供给焊接使用。有两种外特性曲线:下降外特性曲线和恒压外特性曲线。由于二极管不具备相控整流作用,因而下降外特性曲线一般采用磁放大器控制。恒压外特性曲线是通过变压器一次侧和二次侧紧密耦合实现的,焊接电压的调节是通过改变变压器抽头来进行的,可进行一次侧抽头调节,也可通过二次侧抽头进行调节,现在的抽头式 CO<sub>2</sub> 气体保护焊机仍然在大量使用。

### 1.1.3 晶闸管整流焊机

晶闸管的出现使焊机的特性控制由电磁控制变为电子控制,外特性曲线可由晶闸管进行相控整流调节。晶闸管整流焊机的电路结构是采用三相变压器降压、双反星形电路整流。通过控制晶闸管的导通角可以实现下降特性和平特性,下降特性的控制是通过输出焊接电流闭环反馈来实现的,平特性的控制是通过网压前馈补偿来实现,由于控制周期为 3.3ms,因而提高了焊接电流、电压的控制精度,对电网波动等有较好的抑制作用。现在大量应用的晶闸管整流 CO<sub>2</sub> 气体保护焊机、直流埋弧焊机就是采用这种形式。

晶闸管相控整流焊机的控制精度有一定提高,但仍然带有较重的变压器,焊机静态特性的调整采用相控整流方法完成,但动态特性是由内阻和焊接回路电感决定的,控制电路几乎无法对动特性进行控制。

### 1.1.4 斩波式焊机

逆变焊机需要较复杂的控制电路,但控制灵活;二极管、晶闸管整流式焊机电路简单可靠,因而将两者结合,将抽头焊机进一步发展成为斩波式焊机。主电路结构是采用三相变压器降压、二极管整流而变为低压直流,再通过功率开关器件组成的直流斩波器控制焊机的输出特性,由于没有过多的电路环节,可靠性较高,但由于大功率开关管串联在焊接回路中,功耗较大。德国的雷姆公司等生产此类产品。

### 1.1.5 逆变焊机

随着逆变电路拓扑形式的发展和半导体器件的成熟,出现了逆变焊机。逆变焊机的电路结构,一般是采用整流→逆变→再整流的过程,即交流→直流→交流。由于逆变过程中工作频率提高,因此控制过程的动态特性得到提高,焊机的体积小、重量轻。逆变焊机的发展是随着功率开关器件、铁心材料、电路拓扑形式和控制技术而发展的,主要有晶闸管逆变焊机、大功率晶体管逆变焊机、场效

应晶体管逆变焊机、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）逆变焊机的几个发展阶段。

### 1. 晶闸管逆变焊机

早期的逆变焊机是快速晶闸管逆变焊机，主电路形式采用半桥串联谐振结构。由于晶闸管是半控器件，无法自动关断，必须利用谐振电路中谐振电流自然过零进行关断，快速晶闸管的逆变频率较低，约为 $2\sim 3\text{kHz}$ 左右，故主变压器的铁心采用硅钢片。相比整流焊机，由于工作频率的提高，焊机的体积和重量都有大幅度降低，工作频率为 $2\sim 3\text{kHz}$ 对 $\text{CO}_2$ 气体保护焊的焊接过程仍无法进行精细控制，因此晶闸管逆变焊机真正商业化是焊条电弧焊/氩弧焊系列焊机。

### 2. 大功率晶体管逆变焊机

随着大功率晶体的出现，产生了大功率晶体管逆变焊机，晶体管是全控器件，电路拓扑形式较灵活，有单端、半桥、全桥等，逆变频率近 $20\text{kHz}$ ，变压器采用铁氧体铁心。但大功率晶体管有二次击穿现象，易损坏，逆变焊机可靠性较低，很快被以后出现的功率场效应晶体管和绝缘栅双极型晶体管所代替，由于逆变频率的提高，逆变焊机的体积小、重量轻的特点更加明显。

### 3. 场效应晶体管逆变焊机

场效应晶体管具有工作频率高、无二次击穿效应、电压驱动、正温度系数、易并联等特点，在小容量逆变焊机中得到迅速应用。工作频率可提高到 $100\text{kHz}$ 以上。场效应晶体管单只容量较小且耐压较低，因此场效应晶体管逆变焊机大多集中在单相输入和输出容量较小的品种，主电路多为全桥逆变形式，为扩大功率和电压等级，需要多个功率单元的并联和串联。由于多个功率单元的串并联后造成整机的可靠性降低，因而大功率的场效应晶体管逆变焊机应用较少。

### 4. IGBT 逆变焊机

IGBT具有场效应晶体管电压驱动的特点，电压等级和电流容量相比场效应晶体管大得多，因而在中大功率的逆变焊机中获得应用，其工作频率达 $20\text{kHz}$ 以上，电路形式以半桥和全桥为主，焊机输出容量等级为 $200\sim 2000\text{A}$ ， $200\text{A}$ 以下由于成本相比场效应晶体管逆变焊机高，因而竞争力较差。现在IGBT逆变焊机成为逆变焊机的主流，覆盖了焊条电弧焊、氩弧焊、 $\text{CO}_2$ 气体保护焊、熔化极氩弧焊、埋弧焊、切割机等所有弧焊电源领域。

本书的电路分析主要以IGBT逆变焊机为例。

## 1.2 逆变焊机的特点

### 1.2.1 逆变焊机的优点

#### 1. 体积小、重量轻



由于逆变焊机的逆变频率较高, 变压器重量降低, 现在逆变焊机变压器铁心材料主要采用铁氧体材料和微晶材料, 小功率逆变焊机已作为工具进入家庭。传统焊机中变压器的重量占了焊机重量的 80% 以上, 逆变焊机中变压器重量是焊机重量的 1/5 ~ 1/10。逆变焊机重量是同容量整流焊机的 1/2 ~ 1/4。

## 2. 节能

逆变焊机的节能体现在两个方面: 空载时节能和负载时节能。空载时逆变焊机可以将主电路、风机等全部进入停止状态, 空载功耗仅有几瓦, 逆变焊机负载时的效率要比晶闸管整流焊机的高。表 1-1 是输出电流为 350A 的某款 IGBT 逆变焊机和晶闸管整流焊机效率的对比。

表 1-1 效率对比表

| 参数 \ 类型            | 逆变焊机            | 晶闸管整流焊机         |
|--------------------|-----------------|-----------------|
| 额定输入电压             | 三相 AC 380V/50Hz |                 |
| 额定输入功率/有功功率        | 13.7kVA/12kW    | 15.7kVA/14.1kW  |
| 额定输入电流/A           | 21              | 24              |
| 输出电流/A             | DC 60 ~ 350     | DC 60 ~ 350     |
| 输出电压/V             | DC 14 ~ 40      | DC 16 ~ 40      |
| 满载效率               | 0.916           | 0.78            |
| 额定负载持续率(%)         | 60              | 60              |
| 外形尺寸(长 × 宽 × 高)/mm | 636 × 322 × 584 | 675 × 436 × 762 |
| 重量/kg              | 42              | 100             |

## 3. 可实现熔滴过渡的精细控制

由于逆变焊机的工作频率为 20kHz 以上, 可以对熔滴过渡细分为多个阶段进行控制。对 CO<sub>2</sub> 气体保护焊来讲, 可大幅度降低飞溅, 对脉冲熔化极惰性/活性气体保护焊 (MIG/MAG), 可有效地控制射流过渡的稳定性, 还可以将熔滴过渡和送丝机构的运动结合起来, 进行一步控制熔滴过渡的过程。这些是传统整流焊机无法做到的。

### 1.2.2 逆变焊机的缺点

#### 1. 电路较复杂

由于逆变焊机存在整流 → 逆变 → 再整流的过程, 电路环节较多, 控制较复杂, 相比现阶段的整流焊机, 制造水平要求相对比较高。

#### 2. 对电网有谐波污染

逆变焊机的输入侧采用二极管整流、电解电容滤波, 对电网的冲击电流较大。为了降低对电网的冲击, 降低电流的尖峰, 将电解电容改为小电容量无极性