



中国焊接协会会员读物之五

逆变焊机 选用手册

中国焊接协会焊接设备分会 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





中国焊接协会会员读物之五

逆变焊机 选用手册



中国焊接协会焊接设备分会 编著

 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

逆变焊机选用手册/中国焊接协会焊接设备分会编著. --

北京: 机械工业出版社, 2012.5 (2015.5重印)

ISBN-978-7-111-38406-9

I. ①逆… II. ①中… III. ①焊机—技术手册

IV. ①TG431—62

中国版本图书馆CIP数据核字 (2012) 第098233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: 于淑香

责任编辑: 于淑香 张维官

版式设计: 桑晓东

北京汇林印务有限公司印刷

2015年5月第1版·第2次印刷

185mm×260mm·24.75印张·235千字

00001-15000册

标准书号: ISBN-978-7-111-38406-9

定价: 58.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

封面无防伪标均为盗版

编写委员会

主 任 卢振洋

主 编 吴九澎

主 审 陈树君

编 委 于淑香 杨庆轩 彭亚萍 李新松

撰写专家组 (按姓氏笔画排序)

毛 宇 吴月涛 邱 光 张光先 杨庆轩

陈建武 何晓阳 陈 颀 郑 浩 宗像洋

侯润石 顾京君 唐咸靖 萧 波 黄鹏飞

舒宏瑞 鲍云杰 戴志展

前 言

近年来，中国在石油、能源、航空航天、汽车、造船、重机、建筑、机械等行业领域的长足进步，带动了钢铁生产的飞速发展。据统计，中国2011年钢产量为6.9亿吨，占全球钢铁总产量的70%，约相当于世界其他国家总和的2.5倍。随着我国钢铁和其他上游产业的迅速发展，中国从制造大国不断向制造强国迈进，为中国焊接市场注入了极大的活力，先进的焊接方法和焊接设备也随之而涌现积极的创新性革命，焊接设备制造业迎来了难得的发展时机和更为广阔的发展空间。

与传统焊割设备相比，逆变焊割设备的优势是不言而喻的：高效、节能，工艺性能优良、性能价格比高，体积小、重量轻，噪音低、电磁干扰小等等。我国逆变焊机的研究开发于20世纪70年代末期起步、80年代开始发展，目前已形成三代产品，正向第四代新兴数字化逆变焊机迈进。特别是进入新世纪以来，逆变焊机国内的行业领先企业在大量试验和长时间的实践中，经反复改进和完善，积累了大量产品研发与生产经验，对决定着逆变焊机可靠性的关键因素主电路和产品整体设计逐步趋于合理，技术日趋成熟，实现了产品参数较优匹配，基本解决了逆变焊机可靠性问题。

目前，欧美等发达国家逆变焊割设备的比重约为60%~70%，我国逆变焊接设备的使用比重约为28%，尚有巨大的上升空间。同时，我国逆变焊接设备产量每年以大约20%的速度增长，其发展速度大大高于传统焊接设备，特别是在经济发展的同时，全球能源供求矛盾越来越突出，使用高效、节能、低碳、环保的产品逐渐受到社会重视，逆变焊机因其在高效、节能、优质焊

接等突出特点，而越来越受到广大焊接用户的欢迎。随着逆变焊接设备生产成本及售价均有所下降，性价比优势显现，呈现出快速发展趋势，其应用范围越来越广，比重越来越高，替代传统焊接设备的趋势日益明显。

为进一步满足广大会员和焊接工作者了解、使用和推广逆变焊接设备，推进焊接行业技术进步，提高焊接设备生产、管理和经营水平，中国焊接协会焊接设备分会组织编写了这本《逆变焊机选用手册》，希望本书能够对广大会员和焊接工作者了解目前国内外逆变焊机发展现状、合理选择逆变焊机有所帮助，也希望本书的出版为推进逆变焊机技术进步、共同促进绿色环保逆变焊机的推广应用，为我国焊接事业的发展起到积极的作用。

中国焊接协会 副理事长
北京工业大学 副校长



目 录

| | |
|------------------------------|----|
| 第1章 导论 | 1 |
| 1.1 逆变焊机技术的由来..... | 1 |
| 1.2 逆变对节能的作用..... | 3 |
| 1.3 逆变对节材的作用..... | 4 |
| 1.4 逆变对焊接工艺控制性能的提升..... | 5 |
| 1.5 逆变焊接选型时的几点考虑..... | 9 |
| 第2章 焊机分类与电气参数 | 11 |
| 2.1 焊机分类..... | 11 |
| 2.2 逆变电弧焊机主要技术参数..... | 14 |
| 2.3 逆变电弧焊机使用条件..... | 16 |
| 2.4 电焊机产品型号编制原则..... | 17 |
| 第3章 逆变焊接电源原理与控制 | 21 |
| 3.1 概述..... | 21 |
| 3.2 逆变电路的主要拓扑结构和工作原理..... | 23 |
| 3.3 控制电路工作原理..... | 36 |
| 3.4 控制系统的数字化..... | 44 |
| 第4章 焊条电弧焊机 | 47 |
| 4.1 电弧物理..... | 47 |
| 4.2 系统组成..... | 49 |
| 4.3 特点及分类..... | 51 |
| 4.4 工艺应用..... | 53 |
| 4.5 纤维素焊条电弧焊..... | 62 |

| | |
|--|-----|
| 第5章 钨极惰性气体保护焊机 | 65 |
| 5.1 钨极氩弧焊电弧物理..... | 65 |
| 5.2 钨极氩弧焊工作原理及系统组成..... | 66 |
| 5.3 钨极氩弧焊分类及特点..... | 74 |
| 5.4 钨极氩弧焊工艺应用..... | 80 |
| 5.5 几种高效TIG焊接方法..... | 87 |
| 第6章 熔化极CO₂/MAG气体保护逆变焊机 | 90 |
| 6.1 熔化极CO ₂ /MAG气体保护焊电弧物理基础..... | 90 |
| 6.2 熔化极CO ₂ /MAG气体保护焊机系统组成..... | 96 |
| 6.3 熔化极CO ₂ /MAG气体保护焊机的分类及特点..... | 101 |
| 6.4 熔化极CO ₂ /MAG气体保护焊工艺应用..... | 103 |
| 6.5 熔化极气体保护焊的新焊接技术..... | 111 |
| 第7章 熔化极惰性气体保护焊机 | 117 |
| 7.1 电弧物理..... | 117 |
| 7.2 工作原理及系统组成..... | 124 |
| 7.3 分类及特点..... | 128 |
| 7.4 工艺应用..... | 132 |
| 7.5 MIG焊的特殊运用..... | 134 |
| 第8章 逆变埋弧焊机 | 138 |
| 8.1 埋弧焊的原理及特点..... | 138 |
| 8.2 埋弧焊机的系统组成..... | 139 |
| 8.3 逆变埋弧焊机的分类及特点..... | 142 |
| 8.4 埋弧焊焊接工艺介绍..... | 156 |
| 第9章 等离子弧切割机 | 163 |
| 9.1 等离子切割电弧物理基础..... | 163 |
| 9.2 空气等离子切割机设备工作原理及系统组成..... | 164 |
| 9.3 等离子切割机分类及特点..... | 167 |

| | | |
|-------------|------------------|------------|
| 9.4 | 等离子切割机工艺应用 | 169 |
| 9.5 | 再约束精细等离子弧切割技术 | 173 |
| 第10章 | 等离子焊接机 | 174 |
| 10.1 | 等离子焊接电弧物理 | 174 |
| 10.2 | 等离子焊接机系统组成及工作原理 | 175 |
| 10.3 | 等离子焊接机分类及特点 | 179 |
| 10.4 | 等离子焊接机工艺应用 | 181 |
| 10.5 | 等离子复合焊接机 | 185 |
| 第11章 | 逆变电阻焊机 | 187 |
| 11.1 | 概述 | 187 |
| 11.2 | 逆变式电阻焊机原理 | 189 |
| 11.3 | 逆变式电阻焊机的种类 | 189 |
| 11.4 | 电阻焊的焊接方式 | 194 |
| 11.5 | 逆变式缝焊焊机 | 196 |
| 11.6 | 逆变式电阻焊机的选用方法 | 198 |
| 11.7 | 逆变式电阻焊接典型案例 | 202 |
| 第12章 | 自动焊接小车 | 204 |
| 12.1 | 切割小车 | 204 |
| 12.2 | 埋弧焊小车 | 206 |
| 12.3 | 气体保护焊小车 | 209 |
| 12.4 | 其他小车 | 210 |
| 第13章 | 送丝机 | 211 |
| 13.1 | 工作原理及系统组成 | 211 |
| 13.2 | 主要驱动机构的选择 | 211 |
| 13.3 | 分类及应用 | 213 |
| 第14章 | 熔化极气体保护焊枪 | 219 |
| 14.1 | 分类 | 219 |

| | | |
|-------------|-------------------|------------|
| 14.2 | 典型焊枪介绍 | 223 |
| 第15章 | 常用的电力电子元器件 | 228 |
| 15.1 | 半导体元器件 | 229 |
| 15.2 | 磁性器件 | 237 |
| 15.3 | 电容器 | 242 |
| 第16章 | 焊机的相关标准与法规 | 250 |
| 16.1 | 电焊机的标准体系介绍 | 250 |
| 16.2 | 指令介绍 | 254 |
| 16.3 | CCC指令的查询方式 | 258 |
| 16.4 | 电焊机选用时应注意的明示信息 | 259 |
| 16.5 | 焊接设备的标准发展动向 | 265 |
| 第17章 | 逆变焊机的发展趋势 | 268 |
| 17.1 | 从模拟控制转向数字控制 | 269 |
| 17.2 | 逆变焊机将与信息技术深度融合 | 272 |
| 17.3 | 焊接工艺将是逆变焊机的核心竞争力 | 275 |
| 17.4 | 绿色环保性能将是逆变焊机的主要指标 | 281 |
| 17.5 | 关于逆变焊机发展的思考 | 283 |
| 第18章 | 重点企业介绍 | 286 |
| 后记 | | 368 |

第 1 章 导论

1.1 逆变焊机技术的由来

焊机的主要部分就是焊接电源，而焊接电源的性能决定了焊机的主要性能。从电源的角度看，焊机属于一种二次电源，所谓二次电源就是将电网的电能转换为工作负载所需的电压、电流的电能转换装置。在电能转换中有三种基本的方法：变压、整流和逆变。

变压：利用电磁感应原理制造的变压器降低或升高交流（AC）电压的过程，这是电能变换中最基本的方法，在焊接设备中主要就是降压，即将 220V 或 380V 的电网电压降低为几十伏的焊接电弧所需的电压值。变压是 AC-AC 的过程，此过程只改变电压的幅值。

整流：将交流（AC）变为直流（DC）的过程，因为很多电加工过程和用电器，特别是电子产品只能用直流供电，在焊接中，多数情况下直流电弧优于交流电弧，因此整流在电弧焊机中也是常用的方法。整流是 AC-DC 的过程，此过程改变电压的性质。

逆变：将直流（DC）变为交流（AC）的过程，逆变是整流的逆过程，而且整流早于逆变出现，所以后者就被称为逆变。在电弧焊机中，逆变通常不是最终目的，而只是一种中间环节的技术手段，因为所谓的逆变焊机的输出通常是直流。逆变是 DC-AC 的过程，此过程可以将直流变为任意频率、任意波形、任意幅值（低于直流输入）的交流。

传统的交流焊机的原理与结构如图 1-1 所示，它的主体结构是一个工频变压器，将电网的交流电降压至 40 ~ 60V，输出电流由串联电感调节。不过串联电感只是一个示意关系，实际上通常是由铁心的漏磁形成。

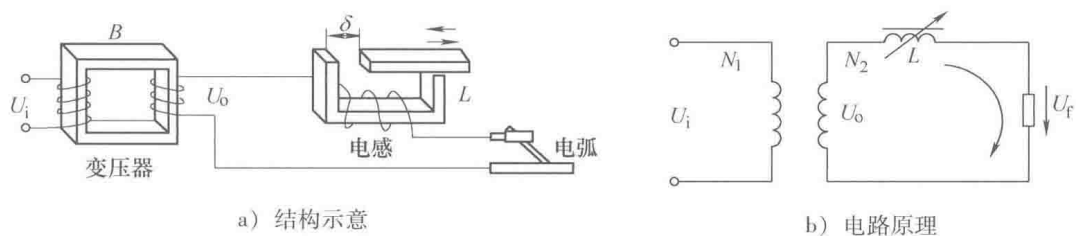


图 1-1 变压器式交流焊机结构与电路原理

传统直流焊机的原理如图 1-2 所示，它的输入部分也是个工频变压器（可以是单相，也可以是三相），将电网的交流电降压至 40 ~ 60V，之后通过控制晶闸管的导通时间来调节输出电压或电流。

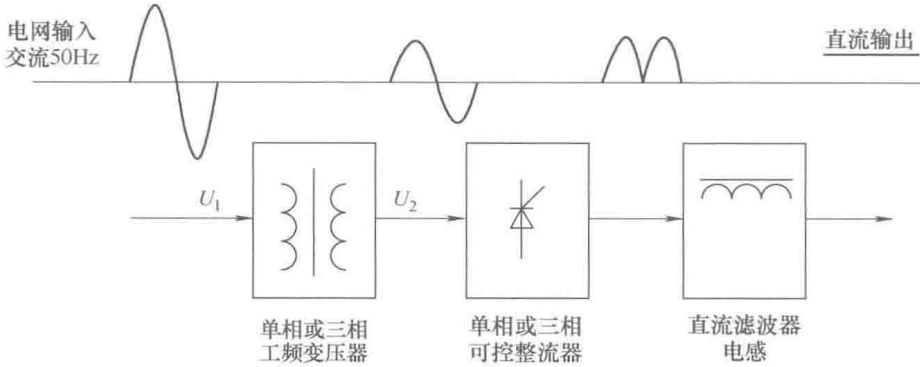


图 1-2 整流式直流焊机原理框图

逆变焊机的原理如图 1-3 所示。在图 1-3 中可以看到，逆变焊机则涵盖了所有的电能变换方式，一台逆变焊机从交流电网到直流输出经过了 AC-DC-AC-AC-DC 四个步骤的变换过程：将电网来的交流电压整流变为直流电压，即第一个 AC-DC 的整流过程；通过电子开关的切换将直流变为交流，即 DC-AC 的逆变过程；逆变后通过变压器降压，即 AC-AC 降压过程；降压后再整流变为直流输出，即第二个 AC-DC 的整流过程。

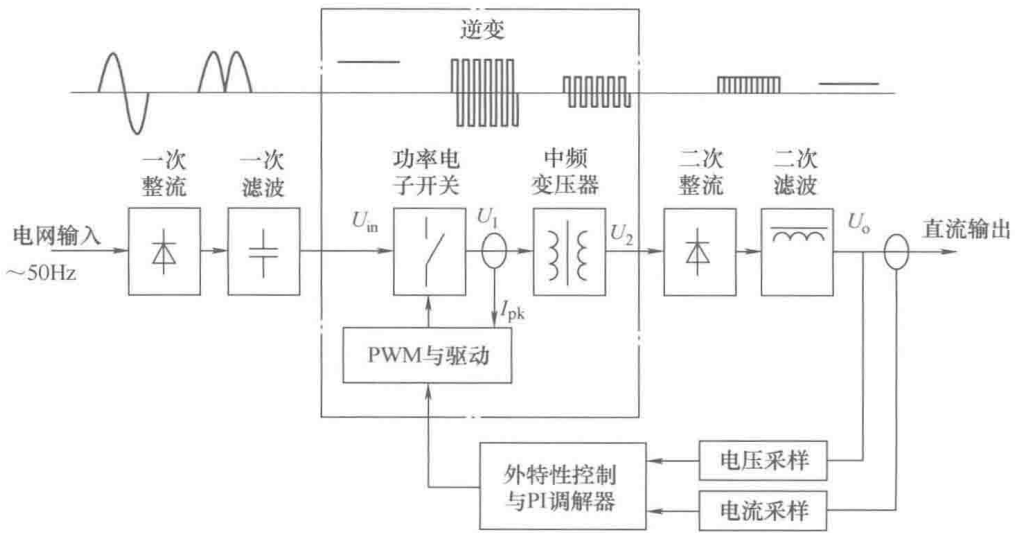


图 1-3 逆变焊机的原理框图

在逆变焊机的上述四个变换过程中，最关键也是最复杂的是第二步的 DC-AC 逆变过程。对于逆变焊机，逆变频率在（16 ~ 100）kHz 之间，根据变压器原理中的线圈匝数与磁心面积之积与频率成反比的关系，在同等功率下，AC-AC 降压过程中所

使用的中频变压器体积相对于 50Hz 工频变压器可以做得很小。因此从结构上看, 逆变焊机区别于传统焊机的最本质差别在于电源的主电路中没有笨重的工频变压器。逆变焊机较传统焊机在结构上的变化完全依靠逆变技术, 由于逆变技术在这种新型焊机中的重要性, 因此这种采用逆变技术的焊机被称为: Inverter Welder, 即逆变焊机。

1.2 逆变对节能的作用

无论是从节能与绿色环保的社会责任的高度, 还是从降低焊接制造过程生产成本的经济角度, 电焊机的节能作用都是用户选择产品时的主要考虑因素之一。降低焊接过程电能消耗有两方面的问题: 一是提倡使用高效焊接方法; 二是提倡使用高效焊接电源。对于高效焊接方法主要是提高单位电流的焊丝熔敷率; 高效焊接电源主要是提高电源自身的工作效率, 或者说是在同等电弧功率输出的条件下降低电源自身能量损耗。焊接的电能消耗占电焊机的电能消耗是焊接过程生产成本的主要构成元素之一, 因此在确定高效焊接方法之后, 电焊机的节能指标是用户选择电焊机产品时的重要参考因素之一。

逆变焊机是否节能, 逆变焊机如何节能, 是用户选择电焊机时关心的一个重要问题。关于逆变焊机相对传统焊机的节能问题以前有过很多测试结果, 而且所有结果都指出逆变焊机相对传统焊机有显著的节能效果。但是这些测试数据的可比性并不是很好, 有些对比对象也不尽合适。因此, 为了说明逆变焊机的节能效果, 需要一个更有信服力的理论依据。这个理论依据是建立在两种焊机的效率相同的基础上, 因为这实际也是可以做到的。通过理论分析可以发现, 即使两种焊机的效率相同, 逆变焊机也比传统焊机节能。

电焊机的节能首先可以从焊接电源的效率指标衡量。所谓电源效率是指焊接电源在额定负载时的效率, 电源的效率可用公式表示, 公式中 P_1 为输入功率, 也就是电源从电网上所消耗的功率; P_2 输出功率, 也就是焊接电弧功率。 P_1 可由交流有功功率表测得, P_2 可由电弧电压与电流的乘积计算得到。

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

任何一个电源的输出功率 P_2 都小于输入功率 P_1 , 即效率都小于 100%, $P_1 - P_2$ 能量消耗在电源自身。但是对于电焊机的节能效果还不能简单地用电源标称的效率指标衡量。这是因为焊接电源的实际工作效率与一般电源的工作效率标称有较大的差别。通常电源的工作效率指标都是指电源输出在额定负载时的效率, 一般电源的实际工作负载都是与额定负载值相等或接近的, 而且是连续使用, 因此电源的效率越高就表示电源自身的能量消耗越少, 换言之也就是越节能。但是焊接电源使用时

负载通常只有额定负载的 35% ~ 65%，而且除了重型结构的自动焊接之外，焊接电源都是间断使用，使用率或称为负载持续率一般在 30% ~ 70% 之间。这样一来，尽管传统焊机的效率指标与逆变焊机相差不大，但是实际使用中的耗能量可能有较大差别。目前用户实际使用中的测评结果表明：标称效率相同的逆变焊机的节能效果远高于晶闸管焊机。这是因为在传统焊机中，工频变压器的空载损耗可以达到额定输出功率的 5% 或更高，例如 ZX5—400 的空载损耗可以达到 800W 以上。而逆变焊机的空载损耗极低，通常在额定输出功率的 1% 以下，例如 ZX7—400 的空载损耗低于 100W。因此如果假设两者的标称效率都为 85%，即在额定负载时两者的效率相同，且电源内部的损耗与输出功率成正比，但是由于两者空载损耗差别很大，当实际负载小于额定负载时，空载损耗小的电源的实际效率要高于空载损耗大的电源，两者间的差异如图 1-4 所示。

对于 400A 的手工电弧焊机，最常用的焊接电流在 250A 左右，焊接使用的平均空载率在 50% 左右。如果按使用电流为 250A，使用率为 50% 计算，在一个工作班次（8h），ZX7—400 可以比 ZX5—400 省电 4.6kW·h。

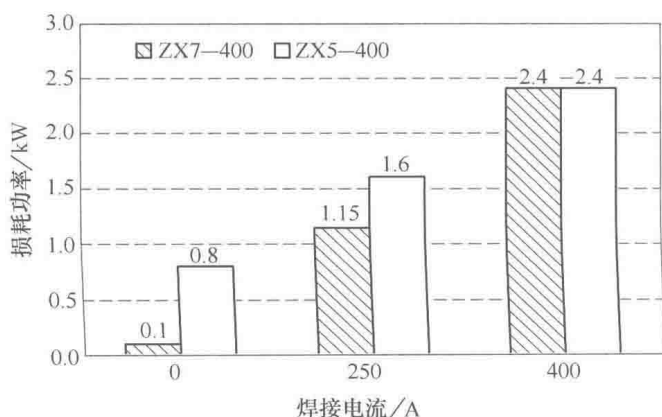


图 1-4 逆变焊机与传统焊机在不同输出电流时的能量损耗差异

在实际使用中，用户测试的节电结果通常比上述理论计算值还要高，这与目前传统焊机的变压器所用材料因素有关。由于现在传统焊机的制造成本已经高于逆变焊机，因此多数传统焊机为了降低材料成本，多将主变压器线圈改用铝线材代替铜线材。而且铁心材料也非高质量硅钢片，因此变压器的空载损耗和负载损耗都会增加很多。也就是说，传统焊机的实际额定负载时的效率也会低于逆变焊机，所以在实际使用中逆变焊机较传统焊机有着更突出的节能效果。

1.3 逆变对节材的作用

逆变焊机在节约材料方面的作用是最显而易见的，因为逆变焊机区别于传统焊机的一个主要特征就是体积小、重量轻，而与体积和重量对应的就是材料的用量。同等功率、同等暂载率的逆变焊机的重量是传统焊机的 1/3 或更低。在重量构成上，逆变焊机与传统焊机是有很大差异的。传统焊机主变压器的重量占整机的 50% 以上，如果对于交流变压器焊机来说几乎就是 100%。而逆变焊机的主变压器仅占总

重量的10%以下。此外输出电抗器的重量在传统焊机中也是相当大的，特别是交直流两用焊机的输出电抗器的重量等于甚至大于主变压器，而在逆变焊机中输出电抗器可以做得很小，有的甚至可以不用，完全依靠焊机输出电缆的寄生电感就可以满足电源输出电流连续的要求。由于这种差异，对于高暂载率焊机，逆变焊机具有更加突出的节材效果。因为对于变压器和输出电感占主要重量的传统焊机，其重量与暂载率之间近似呈线性关系增加，而对于变压器和输出电感占次要重量的逆变焊机，其重量与暂载率之间近似呈指数关系增加。由此可见，逆变焊机在节省材料方面较传统焊机有显著的优势。特别是随着金属材料价格的上涨和电子器件价格的下降，由逆变焊机的节材效果逐渐转换为材料成本优势也日见突出。

目前，同等功率和暂载率的逆变焊机与晶闸管焊机相比已经具有显著的成本优势，因此，用逆变焊机取代晶闸管焊机已经成为大势所趋。过去在焊接领域曾经提倡过用ZX5系列焊机（晶闸管焊机）替代BX1系列焊机（焊接变压器），但是实际上并未实现，主要原因就是ZX5焊机对于BX1焊机不具备价格竞争力。而现在ZX7系列逆变焊机已经成为BX1焊机的有力竞争对手，特别是在高暂载率焊机（60%），ZX7已经具有价格优势。近年来，国内逆变焊机的快速发展在很大程度上是由于材料成本带来的价格竞争力，逆变焊机不仅占领晶闸管焊机市场，而且也在不断占领交流焊机的市场份额。

这种材料的变化同时带来了产业结构和产业链的变化。在传统焊机制造业中，主变压器及其输出电感不仅占了焊机总重量的绝大部分，而且也是焊机制造技术最核心的部分。但是在逆变焊机制造过程中，尽管主变压器仍然是关键器件，但已经不是逆变焊机的关键制造技术了。现在很多逆变焊机制造商，特别是大规模生产逆变焊机的制造商，几乎都不自行生产逆变用的主变压器，而是采用了外购方式。逆变用主变压器已经成为一种焊机关键配件，由专业化的配件厂家生产。事实上目前作为逆变焊机的生产厂家，其关键生产技术和控制技术（包括数字化控制技术），因此与传统焊机的变压器制造技术是完全不同的技术领域。在逆变焊机产业链中，更多的是功率电子器件的制造与配套问题。

1.4 逆变对焊接工艺控制性能的提升

从焊接工艺研究与焊接制造应用领域（中高端用户）的角度看，逆变焊机的最主要优势表现在对焊接工艺控制性能方面的提高。逆变焊机采用（16~100）kHz中频逆变，一方面有效地降低变压器的体积和重量，同时也有效地提高了电源的响应速度。也正是由于逆变电源响应速度的提高，使得很多新型焊接工艺的实施成为可能。

逆变焊机对焊接工艺的提升主要有以下几个方面：

1.4.1 脉冲 MIG 与焊接过程的复杂波形控制

脉冲 MIG 是 20 世纪 60 年代就提出的一种电弧焊机工艺技术，但是直到 20 世纪末才被广泛使用，其中主要原因就是在逆变焊机出现之前，没有一种适合于焊接应用的大功率、高速响应的电源。脉冲 MIG 的主要优点是可以在很低的电流下实现射流过渡。射流过渡的优点是无飞溅、焊缝成形美观、可全位置焊。对于 $\phi 1.2\text{mm}$ 的低碳钢焊丝，在普通直流 MIG 条件下，要在 250A 以上电流才能实现射流过渡，而采用脉冲 MIG 在 60A 的电流下即可实现射流过渡。脉冲 MIG 对于铝合金、不锈钢的焊接也是非常有效的，用脉冲 MIG 替代 TIG 已经成为一种新的趋势，可以获得 TIG 的高质量和 MIG 的高效率的双重优点。图 1-5 是脉冲 MIG 的熔滴过渡高速摄像与电流、电压的波形图，波形图中时间刻度为 2ms/格，高速摄像帧频为 10 000 帧/s。

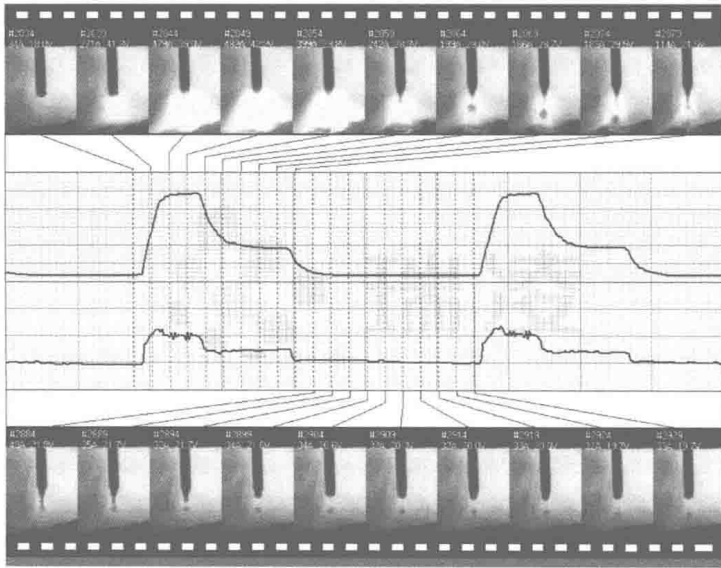


图 1-5 脉冲 MIG 焊接过程的熔滴过渡与电压电流波形

由图 1-5 可以看到，使用逆变焊机可以对脉冲电流波形的上升与下降过程进行复杂的波形控制，从而可以精确地控制熔滴过渡过程。另外，由图像中可以看到，脉冲 MIG 过程的电弧与熔滴过渡都是非常稳定的。

1.4.2 改善 CO₂ 气体保护焊短路过渡的电子电抗器

在逆变 CO₂ 气体保护焊机的控制面板上经常可以看到一个标志为电感符号的电弧特性（软硬）调节旋钮，这就是所谓的电子电抗器功能。

短路过渡是目前大量使用的 CO₂ 气体保护焊的主要熔滴过渡方式，为了控制短路过渡过程的稳定性，主要方法是通过输出回路电抗器的电感值调节短路电流上升速度和短路电流峰值，因此选择合适的输出电抗器的电感值对于改善焊机的焊接性能是非常重要的。另外还有一个问题就是：一个固定的电感值是难以兼顾所有的焊

接参数，但是电感值难于调节，通常只能通过线圈抽头实现，从而增加了制造工艺的难度，对于使用者也不方便。因此一种可用电子电路控制方式实现对输出回路短路电流进行控制方法，即所谓“电子电抗器”一直是电焊机所期待的技术。

电子电抗器的原理如图 1-6 所示。图中 A 为具有高速响应特性的恒流源， Z 为负载（电弧）， U_f 为负载 Z 上的电压， α 为电压反馈回路的采样系数， K 为电压误差放大器， $1/(Ts+1)$ 为由电阻电容构成惯性环节（ $T=RC$ ）。

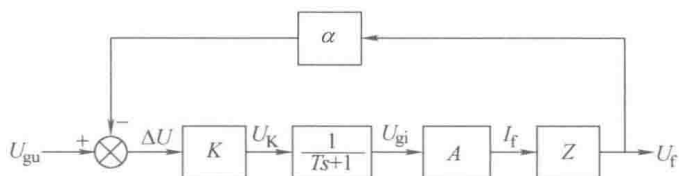


图 1-6 电子电抗器原理框图

所谓电子电抗器也就是其中惯性环节的作用，使得输出电流 I_f 对于输出电压 U_f 的变化具有与输出回路串联电感相同时间响应特性。其工作原理可以简述如下：

当负载 Z 缓慢变化时，输出端电压 U_f 也缓慢变化，电压反馈作用可以调节恒流源 A 的输出电流，使负载 Z 上的电压 U_f 恒定，满足熔化极气体保护焊的平特性电源要求；当负载 Z 突变，电压 U_f 也随之突变，但是由于惯性环节的响应特性，使得 U_{gi} 不能突变，则恒流源 A 的输出电流 I_f 也不能突变，即相当于输出回路串有电感。改变惯性环节的时间常数 T （即 RC 值），即可以调节负载 Z 短路时 I_f 的变化速度，即等效于调节输出回路的电感值。

由上述分析可见，电子电抗器的原理并不复杂，其中关键是恒流源 A 要具有快速响应特性。所以，尽管电子电抗器原理在晶闸管焊机中也曾有应用，但实际效果较差。这是因为晶闸管电源的响应速度低，无法实现对电流变化率的快速调节。而逆变电源的调节速度是晶闸管电源的数百倍，可以在微秒级的时间内控制输出电流的变化，所以电子电抗器设计思想只有在逆变电源中才能得以真正的实现。

应用这种电子电抗器技术，不仅可以降低逆变焊机输出电抗器的电感值，而且输出回路的等效电感值可以通过一个可变电阻方便地调节，即前述焊机控制面板上标志为电感符号的电弧特性（软硬）调节旋钮。为了进一步改进焊接工艺性能，电子电抗器可以做成所需的非线性模式，分多段控制电流的上升速度、峰值和下降速度，因此使用电子电抗器可以更有效地控制焊接短路过渡过程，降低焊接飞溅。

1.4.3 高性能交流电弧焊接

尽管多数场合采用直流焊机比使用传统的交流焊机焊接电弧更稳定、焊缝成形更美观，但是直流电弧在磁场作用下会发生偏移，有些情况下这种特性可以利用，但多数情况下是希望避免的。交流电弧在磁场作用下的位置则是稳定的，因此采用