

- 深度剖析家用电磁炉核心技术
- 系统阐述商用电磁炉设计流程

# 现代 高频感应加热电源 工程设计与应用

李定宣 丁增敏 编著



 中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 现代 高频感应加热电源 工程设计与应用

李定宣 丁增敏 编著



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 前 言



感应加热电源与电阻加热、燃油加热、燃气加热相比较，具有高效、节能、环保（无废气排放）、安全（无明火、爆炸危险）、加热速度快、可控性强等优势，因而广泛应用于金属热处理、透热、熔炼、焊接等方面，并已渗透到工业冶金、机械制造、石油、化工、电子、交通、通信以及民用、商用电磁感应加热等各个领域。

本书是在作者从事开关逆变电源、电磁感应加热与制造 20 多年实际工作经验及吸取国内外相关文献知识的基础上编著而成。本书的重点是介绍工作频率 20kHz 以上，以现代功率开关器件（IGBT 或 MOSFET）为主体的高频逆变感应加热电源。

本书第一章和第二章作为基础铺垫，叙述了感应加热电源的特点和发展趋势，感应加热的基础知识——三条定律和三个效应。第三～第五章分别叙述感应加热电源组成单元电路的工作原理、主要技术性能，感应加热电源串、并联负载谐振电路的特性及相关参数计算公式和相应的主电路拓扑结构，感应加热电源电流频率和功率容量两个重要参数选取原理及计算简式。通过上述内容叙述，构建了高频逆变加热电源的基本框架，目的是为后面的工程设计与应用奠定基础。第六～第八章的内容是关于感应加热电源实用电路各单元的工程设计与计算应用介绍。第九章汇编了感应加热电源常用的控制集成电路及多种资料数据，对于设计和应用感应加热电源的工程技术人员而言，是十分有益的工具性参考资料。

本书在编写和出书过程中，得到了合作单位——合肥顺昌电磁加热科技发展有限公司张家顺总经理的鼓励与帮助并提供了部分应用资料。顺昌公司罗婷、薛芸芸、赵鑫星、武方方参与了本书的文字打印、整理，廖自升工程师为本书图样编制和审核付出了辛勤劳动，很多同行对本书也给予了很大帮助，作者在此均深表谢意。

感应加热电源所涉及的学科和理论知识广泛而深刻，其技术与应用发展迅速，由于编者的学识和才能局限，书中定有偏颇之处，敬请同行及读者批评指正。

编者

# 目 录



前言

<b>第一章 概述</b> .....	1
第一节 引言 .....	1
第二节 感应加热的优势 .....	2
第三节 感应加热电源发展现状与趋势 .....	6
第四节 感应加热电源中使用的开关功率器件 .....	12
<b>第二章 电磁感应加热基础</b> .....	16
第一节 电流与磁场 .....	16
第二节 电磁感应原理 .....	20
第三节 高频电流集肤效应与穿透深度 .....	22
第四节 导体的邻近效应 .....	24
第五节 感应加热状态过程与终端 .....	26
第六节 本章总结 .....	29
<b>第三章 感应加热电源组成单元分析与主要技术性能</b> .....	30
第一节 概述 .....	30
第二节 逆变式感应加热电源的组成及功能 .....	30
第三节 感应加热电源的主要技术特性 .....	59
<b>第四章 感应加热电源谐振电路及逆变器主拓扑结构</b> .....	64
第一节 概述 .....	64
第二节 谐振回路中的电容与电感特性 .....	64
第三节 串联谐振电路 .....	69
第四节 并联谐振电路 .....	73
第五节 逆变器拓扑结构及相关参数 .....	83
<b>第五章 感应加热电源电流频率与功率的选取</b> .....	89
第一节 概述 .....	89
第二节 感应加热电源频率的选取 .....	90
第三节 感应加热电源功率容量的选取 .....	94

<b>第六章 感应加热电磁炉工程设计计算</b> .....	100
第一节 概述 .....	100
第二节 感应加热电磁炉电路与结构 .....	102
第三节 感应加热电磁炉线路滤波器参数设计 .....	115
第四节 感应加热逆变电源整流输入滤波电容与电感设计 .....	120
第五节 感应加热电磁炉功率器件的选取计算与应用技术 .....	127
第六节 感应加热电磁炉谐振槽路参数计算 .....	139
第七节 感应加热电磁炉的电流取样检测电路设计 .....	143
第八节 感应加热电磁炉逆变器的功率开关驱动电路设计 .....	148
第九节 感应加热电源功率器件散热器设计 .....	167
<b>第七章 感应加热电源在工业及其他领域的应用</b> .....	174
第一节 概述 .....	174
第二节 感应加热电源在工业应用分类概况简述 .....	174
第三节 电磁感应加热烘干设备 .....	176
第四节 80kW/25kHz 感应加热电源 .....	180
第五节 20kW/200kHz 全桥移相感应加热电源 .....	182
第六节 光伏电能感应加热电源 .....	187
<b>第八章 感应加热电源的调试与安装布局</b> .....	189
第一节 感应加热电源调试的目的与步骤 .....	189
第二节 加热电源调试具体说明 .....	189
第三节 感应加热电磁炉安装布局 .....	196
<b>第九章 感应加热电源常用控制集成电路及数据资料</b> .....	198
第一节 晶闸管触发电路 .....	198
第二节 锁相环集成电路 CD4046 .....	201
第三节 高速锁相环集成电路 MM74HC4046 .....	203
第四节 感应加热电源常用 PWM 控制集成电路 .....	206
第五节 开关逆变电源输入电网配电容量 .....	217
第六节 开关逆变器中常见波形有效值与幅值的关系 .....	218
第七节 开关逆变电源开关管的热损耗 .....	219
第八节 电流穿透深度 .....	220
第九节 感应加热电源常用磁心 .....	223
第十节 开关逆变电源控制电路常用调节器 .....	227
第十一节 合金钢、碳素钢的比热容 C .....	231
<b>参考文献</b> .....	234

# 第一章 概述

## 第一节 引言

本章主要说明感应加热的优势与发展趋势，最后简要介绍感应加热电源的开关功率器件。

感应加热是相对于传统电阻的电流热效应加热及火焰加热而言的一种新型加热方式，它是一种高效、节能、节材、环保、安全的先进加热技术。

所谓感应加热，就是将被加热物质置于高频交变磁场（如通以交变电流的环形线圈）中，构成磁场的磁力线切割处于磁场中的加热物质，在垂直于磁力线的截面上，根据法拉第电磁感应定律，产生涡流，感生涡流在导电物质呈现的交流阻抗上依据焦耳热效应定律产生热能对工件进行加热。这种利用电磁感应原理产生高频感应涡流热效应进行加热的方式，简称为感应加热。

感应加热方式与传统加热方式的主要区别在于：①感应加热是加热源与被加热物质之间构成一个电磁耦合系统，采用隔离非接触加热方式；②电阻炉、火焰炉传统加热是热源和被加热物体之间为直接接触加热方式。二者虽然都是利用热能加热，其原理和方式有所不同。

感应加热设备是一个工程系统，其组成部分的核心部件是感应加热电源，它为感应加热提供电能。感应加热电源的性能指标为感应加热设备技术是否先进的标志，是影响和制约加热发展的主要原因。本书重点论述感应加热设备中的感应加热电源，即从电力电网电压输入至逆变器及电磁感应耦合回路。感应加热设备的其他辅助装置，如冷却系统、物料装卸自动控制机构、炉体结构等不作论述，关于这些方面的内容很多资料有详尽介绍，见参考文献 [1]、[2]。

感应加热电源的核心器件是电力半导体功率器件，电力半导体器件的制造水平（功率容量、工作频率、失效率、损耗等）决定了感应加热电源的技术水平。半导体功率器件在整台感应加热设备中的价值通常不会超过 20%~30%，但其对整个设备的总价值、质量、尺寸与技术性能，起着至关重要的作用。当前电力半导体功率器件的制造技术水平，比 20 世纪 90 年代又有了很大提高，

随着场效应晶体管 (MOSFET) 模块、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 模块的高电压、大电流产品的等级升级, 工作频率的提高, 感应加热设备应用 MOSFET、IGBT 模块越来越普遍, 尤其在大功率逆变感应加热电源中, 采用 IGBT 作为功率开关器件具有较大的优势, 已逐渐成为现代感应加热电源的主流功率器件, 1200A/4.5kV 的 IGBT 已成为商品, 单模块功率容量已达几兆伏安, 工作频率已达 100kHz 以上, 具有较高的可靠性, 失效率为 1300Fit (Fit 表示在工作条件下工作  $10^9$ h, 发生故障的次数)。频率 10kHz 以上中高频 IGBT 逆变加热电源是本书介绍的重点。

## 第二节 感应加热的优势

### 一、加热装置的变革

保护人类赖以生存的地球资源、环境及节约能源, 是全世界面临的重大问题, 也是人类长期与自然和谐共处必然承担的责任。我国在世界如今面临新一轮以环境为特征的技术革命中表现出极大的积极性和责任感, 温家宝总理曾指出: “节能减排是我国实现可持续发展的必由之路, 是维护国家长远利益的必然要求, 淘汰落后产能是实现节能减排目标的重要手段”。随着人类对节能、减排、环境保护意识的增长, 加之各国制定节能减排相关政策保障, 在工业化生产、民用和商用等领域, 越来越多地采用具有节能、环保的新技术、新工艺、新设备, 电磁感应加热就是其中之一。工业感应加热以及民用、商用电磁炉发展迅速。

电磁感应加热是继木材、液化气、天然气、柴油燃烧产生热能加热及载流电阻热效应直接加热方式的重大变革。近 20 年来, 随着电力半导体功率器件的发展, 感应加热发展十分迅速, 工业电阻炉、火焰炉传统加热方式将逐步被具有节能、环保、安全并被誉为“绿色加热”方式的感应加热所替代。

另一方面, 随着电力半导体器件及控制技术的发展, 感应加热装置本身也发生了重大变化, 其系统构成更为紧凑精巧, 体积和质量在相同功率容量条件下更小, 不仅节能而且节材, 其控制自动化程度更高, 参数调整更为精细、准确, 使用操作更方便、简捷。如同频率、同功率容量条件下, 电力半导体固态晶体管 (MOSFET、IGBT) 为核心构成的高频感应加热电源与电子管构成的高频感应加热电源装置相比, 其体积和质量大致可缩小 2/3, 效率及节能提高 30%, 冷却用水量及占用安装用地面积均大大减小。

## 二、感应加热的优势

前面已提到感应加热与传统电阻炉、火焰炉直接加热相比，具有节能、环保、安全等明显优势，具体来说，这些优势主要表现为如下。

### 1. 效率高

感应加热的效率比火焰炉高 30%~50%，比电阻炉高 20%~30%，具有明显的节能效果。

### 2. 加热温度高、时间短

加热温度高、时间短，这意味着加热速度快。

(1) 说明感应加热比电阻炉、火焰炉的工作效率高，单位时间产量高；

(2) 加热速度快，被加热金属工件的表面氧化皮烧损率低，节约材料及费用，特别对贵重金属加热更显得重要。比如，一般情况下金属件热成型加热，感应加热的金属烧损率大约在 0.5%，而火焰炉加热的金属烧损率约为 1%~3%，也就是说感应加热比火焰加热节约材料 2%左右。

### 3. 容易实现自动控制

感应加热可以根据被加热工件的当前状态，进行适时、精确的自动控制，比如通过模拟或数字电路处理，调整功率或频率，使工件加热温度或深度自动调节，满足工艺要求。感应加热调节比较精细，通常是通过调节相移、脉冲占空比等参数调节加热功率，一旦加热温度根据工艺要求确定后，由于自身的负反馈作用，就会被保持在该温度恒定不变，实现恒功率恒温控制。温度均匀性好，温差可控制在 1%以下，提高产品质量和合格率。

### 4. 改善和保护环境

感应加热不产生诸如一氧化碳、二氧化碳、氧化硫等废气和烟尘，对外辐射热量小，噪声低，工作环境得以净化，空气环境得以保护，操作人员劳动条件得以改善，健康水平得以保证。

### 5. 安全可靠

感应加热不产生明火，杜绝了火灾、爆炸等危险事件的可能发生，安全性大大提高。

### 6. 操作使用方便

现代感应加热装置的主体是以电力半导体功率器件为核心构造的逆变器感应加热电源，不用预热，可随时起动和关闭。由于这种特性，不仅使用操作方便，而且也省时节能。



### 7. 安装场地占用面积小

现代感应加热电源结构紧凑，其构成几乎是一种模块化、标准化的部件组成方式，质量、体积相对于电阻炉和火焰炉小，设备安装所占用地面积和空间小，单位面积的利用率高，节省场地和基建费用。

### 8. 可对工件进行局部加热

综上所述，感应加热工艺参数可控性强、输出的产品质量好合格率高，节能、环保、安全可靠，是一种技术先进，应用前景广泛的加热方式。然而，像任何事物都不是尽善尽美一样，感应加热的应用也有它的局限性，比如：①一种感应加热绕组（或感应器）对被加热工件而言，具有相应的匹配关系，加热工件的形状、尺寸有限，不如电阻炉、火焰炉那样有相对较大的自由度；②对于形状简单、品种少、批量大的工件加热具有更大的优势，而对批量小、形状复杂的工件适应性差；③维修费用相对电阻炉、火焰炉高，需要熟悉电力电子技术的专业人员维修。

## 三、感应加热与传统加热方式主要数据表

为了更清晰地说明感应加热与传统电阻炉、火焰炉加热方式在性能上的差异，表 1-1~表 1-4 中列出了相关项目与数据加以对比，可一目了然。感应加热炉的功率容量从商用电磁灶的 15kW 到工业工频感应炉的 1000kW，表中的数据基本上可反映出两种加热方式性能上的差异。其中表 1-1 和表 1-2 是工业金属热处理感应炉与电阻炉、燃油炉性能参数对比项，根据参考文献 [1] 中提供的相关实验资料，加以综合分析编制而成。

表 1-1 工业金属热处理感应加热炉与电阻炉性能比较

性 能	电磁感应加热	电阻加热炉
每吨能耗	235kW·h/t	348kW·h/t
加热温度	900℃	900℃
加热时间	720s	14 400s
生产效率	4 件/min	2 件/min
热效率	80%	40%
节能对比	感应加热比电阻炉节能 32.5%	
加热速度	感应加热比电阻炉快 95%	
设备占地面积	感应加热只有电阻炉的 16%	
年产 10 000t 节能费用	感应加热比电阻炉节省 904 000 元/年	
其他	感应加热比电阻炉使用方便、灵活、生产效率高，环境温度比电阻炉低 10℃	

注 1. 复铜钢板热轧制加热温度 900℃。  
 2. 复铜钢板尺寸 455mm×130mm×25mm。  
 3. 工频感应加热炉总功率 700kW。

表 1-2 工业金属热处理感应加热与燃油炉性能比较

性能	电力感应加热炉	燃油台车式加热炉
单件能耗	671kW·h/件	540kg/件
热值	1kW·h=3.6MJ	1kg=46.2MJ
加热至 1100℃时间	10min	10h
单位能价	1.0元/kW·h	8.78元/kg
单件耗能费用	671元	4741.2元
产品合格率	93%	50%
热效率	70%	15%
单件烧损金属量	2.7kg	20.4kg
耗能费用比	感应加热比燃油加热省 85.8%	
加热速度比	感应加热比燃油加热快 98%	
其他	燃油炉散发热量大、产生废气；感应加热工作环境清静、环保	

注 1. 上述数据是  $\phi 331\text{mm}$  合金钢加热温度 1080~1150℃ 的值，用于锻压前加热。

2. 工频感应加热炉功率为 900~1000kW。

表 1-3 商用电磁炉与燃气炉性能比较

性能	$\phi 48\text{cm}$ 炒锅电磁炉	$\phi 48\text{cm}$ 炒锅天然气炉
标称功率	15kW	58kW
注水量	10L	10L
从 30℃ 加热至 100℃ 时间	216s	330s
消耗能量	3.24MJ	19.3MJ
热值	1kW·h=3.6MJ	1M <sup>3</sup> =36MJ
单位能价	1.00元/kW·h	5.6元/m <sup>3</sup>
耗能费用	0.90元	3.09元
热效率	90%	15%
噪声	约 45dB	约 80dB
耗能费用比	电磁炉比天然气炉省 70.9%	
加热速度比	电磁炉比天然气炉快 34.8%	
其他	电磁炉无热量散发、无燃烧废气、无泄漏、无明火，安全环保	

表 1-4 商用电磁炉与燃油炉性能

性能	φ48cm 炒锅电磁炉	φ48cm 炒锅柴油炉
标称功率	15kW	58kW
注水量	10L	10L
从 30℃ 加热至 100℃ 时间	216s=0.06h	335s=0.093h
消耗能量	0.9kW·h	19.53MJ
热值	1kW·h=3.6MJ	1kg=46.2MJ
单位能价	1.00 元/kW·h	8.78 元/kg
耗能费用	0.90 元	3.69 元
热效率	90%	15%
噪声	约 45dB	约 80dB
耗能费用比	电磁炉比天然气炉省 67.2%	
加热速度比	电磁炉比天然气炉快 35.5%	
其他	电磁炉使用方便, 散热少, 工作环境好	

### 第三节 感应加热电源发展现状与趋势

#### 一、感应加热电源发展与现状

作为感应加热技术的重要理论基础——电磁感应原理于 1831 年由法拉第发现至今, 已有近 180 年的历史, 然而人类利用感应加热这门技术开始于 20 世纪 30 年代, 到现在不过只有 80 年的时间。20 世纪 50 年代前的 20 年时间内, 感应加热技术发展缓慢、产品技术水平低, 主要是工频感应加热炉, 电磁倍频器、中频发电机组及电子管高频振荡器加热装置, 缺乏滋生感应加热成长的基础——电力电子技术及半导体功率器件的支撑。

感应加热电源的制造技术水平与电力半导体功率器件的发展密切相关, 20 世纪 50 年代晶闸管 (SCR) 的问世, 给感应加热电源的发展带来了生机, 感应加热装置的结构面貌焕然一新, 出现了高压大功率的变频器感应加热电源, 加热电流的频率从工频扩展到中频。20 世纪 60 年代研制出门极关断晶闸管 (GTO), 使感应加热电源又产生了一次变革, 可用外部控制信号关断, 避免了晶闸管需要结构复杂的强迫换流电路, 变频器电源的可靠性也得到提高。如果说晶闸管 (SCR、GTO) 的出现导致感应加热电源的一场革命性变革, 那么 20 世纪 70 年代场效应晶体管 (MOSFET) 及 20 世纪 80 年代绝缘栅双极型

晶体管 (IGBT) 的诞生, 使感应加热电源的发展如虎添翼, 加热的电流频率扩展到 MHz 级, 感应加热电源已趋向模块化、标准化。

我国开始电磁感应加热的研究与应用, 起步较晚, 大约是在 20 世纪 50 年代, 从借鉴、消化、引进国外先进技术和设备到自主创新, 经历了一段较长的过渡期, 感应加热主要是用于金属热处理, 制造水平不高, 与发达国家 (美国、德国、日本、法国、意大利、英国) 有相当大的差距, 其主要原因是: ①受半导体功率器件的制约, 半导体器件加工设备和制造工艺水平落后; ②是国外一些国家用控制中国半导体制造水平和能力, 来控制 and 制约中国工业现代化的进程和发展。目前国内仍有不少生产、销售功率半导体器件的商家, 购买国外芯片进行组装或直接引进国外产品销售。这些国家不可能将先进的加工设备和一流的制造技术与工艺输入到我国, 输入的是感应加热整机设备, 或者将感应加热公司搬入中国办厂。由于其技术先进、电源功率大、自动化程度高等优势, 抢占了国内感应加热很大一部分市场, 这些现象从一个侧面反映了我国感应加热发展的现状。近十多年来, 我国感应加热发展比较迅速, 广泛应用于工业领域装备和改造传统加热设备, 民用和商用中小功率感应加热产品也如雨后春笋, 已逐步形成一个重要的产业。据相关资料报道, 国内生产感应加热产品的厂商有近 400 家, 产值超百亿元。总的来说, 国内感应加热电源的制造水平同国外相比仍有较大差距, 尤其是高频大功率逆变器感应加热电源。国外 IGBT 逆变器感应加热电源普遍水平是 1200kW、180kHz, MOSFET 逆变器感应加热电源普遍水平是 1000kW、400kHz, 最近报道美国采用 MOSFET 制造的逆变器感应加热电源达到 2000kW、400kHz。国内 IGBT 感应加热电源的水平是 1000kW/50kHz, MOSFET 感应加热电源为 400kW、400kHz。

## 二、感应加热电源发展趋势

感应加热电源的技术发展与制造水平与电力半导体功率器件的技术发展密切相关, 同时也与先进的电路拓扑结构及控制技术不可分割。目前感应加热电源的发展趋势主要是朝着大功率容量、高频率和智能化控制技术发展。

### 1. 扩展功率容量

根据加热物质对象及吨位不同, 电源的功率容量可以从数百伏安到几十兆伏安不等。扩展感应加热电源的功率容量是感应加热技术及应用前景的关键, 主要可以通过如下途径提升加热的功率容量。

(1) 提高单体半导体功率器件的容量。根据被加热工件工况的具体要求, 正确选择目前国内外功率容量大的单体模块。在频率 2kHz 以下的中频感应加

热电源, 可选门极关断晶闸管 (GTO)、集成门换流晶闸管 (IGCT) 等优良半导体器件, 日本三菱、日立、瑞士 ABB 等公司 IGCT 单体模块可成为商品的已有 4000A/6000V 产品, 功率容量在  $20\text{MV} \cdot \text{A}$  以上。GTO 的产品有 10 000A/9000V 产品, 可能突破 10 000A/12 000V, 功率容量约  $100\text{MV} \cdot \text{A}$ 。在高频感应加热电源可选用 IGBT 绝缘栅双极型晶体管和 IEGT 电子注入增强栅晶体管, IEGT 是一种新型 IGBT 模块, 它兼有 IGBT 和 GTO 的优点, 低的饱和压降、低的栅极驱动功率、宽的工作安全区和高的工作频率。工作频率 150kHz、电压 6500V、电流 3600A 的 IGBT 模块在德国英飞凌公司已研制成功。一种高性价比、高效、高可靠性的第 6 代 IGBT 模块在日本三菱研制成功, 对于相同功率容量的 IGBT, 开通损耗比第 5 代降低 20%, 结温降低  $25^{\circ}\text{C}$ , 续流二极管比第 5 代降低  $21^{\circ}\text{C}$ , 集电极电流密度  $J_c$  与饱和压降  $V_{\text{cesat}}$  及关断损耗  $E_{\text{off}}$  乘积之比, 即  $J_c/V_{\text{cesat}}E_{\text{off}}$  比第 5 代降低 30%, 可降低散热系统的体积、质量和成本, 这种优良性能的 IGBT 模块对感应加热电源及其他电力电子装置的发展具有很大的潜力和意义。IECT 单模块目前的水平是 1000A/4500V。IGCT 与 GTO、IGCT 与 IGBT、IECT 与 IGBT 之间的竞争将给 21 世纪感应加热电源及其他电力开关变换器的发展带来新的生机。

(2) 采用串、并联功率器件提高容量。当使用单体电力半导体功率器件模块不能满足感应加热电源输出功率时, 需要采用功率器件串、并联工作方式, 以提高输出电压或电流, 提升加热电源的功率容量, 比如在高频、大功率感应加热电源中使用场效应晶体管模块 (MOSFET), 需要串、并联器件以提升功率容量。功率器件串联使用时, 必须妥善解决好器件间均压问题; 功率器件并联使用时, 必须妥善解决好器件间均流问题, 同时还需对器件的参数进行测试、筛选、配对使用, 无论是串联还是并联使用, 要尽量选配参数一致的功率器件进行串、并联。用于串、并联的功率器件还应根据串、并联个数实行降额使用, 以提高加热电源的可靠性。

(3) 多台感应加热电源并联扩容。功率器件串、并联数目受器件参数离散性导致可靠性下降及控制驱动复杂的制约。在器件串、并联不能满足功率容量时, 采用多台加热电源并联工作扩充电源的总容量。电源并联工作扩容, 应保证各台电源均匀输出, 并有冗余设计。并联均流可以采用简单的软连接方式, 也可以采用专用均流控制芯片, 电流不均匀性控制在 5% 以下, 以保证各并联电源组件的安全运行。

## 2. 感应加热电源高频化

随着感应加热电源的应用不断扩展到各个领域,对感应加热电源的要求越来越高,不仅是功率容量越来越大,加热交变电流的频率也越来越趋向高频化。加热频率主要与加热工艺要求和性质有关,频率越高,功率密度越集中,表面加热深度越浅。比如对于细微工件的表面淬火工艺,加热的工作频率要求达到数兆赫兹以上,用于介质加热及金属高频溅射时,加热的工作频率要求可达数十兆赫兹。

提高感应加热电源的频率主要通过以下途径。

(1) 选用工作频率高的电力半导体器件。目前感应加热单元工作频率高于100kHz可应用的电力半导体器件主要有MOSFET、SIT及IGBT:①MOSFET的最高频率可达300MHz;②SIT的工作频率在300kHz,极限频率可达500kHz;③IGBT的工作频率可达150kHz,软开关工作模式时,IGBT的最高工作频率可达300kHz。

场效应晶体管(MOSFET)的电压和电流容量比较低,大功率感应加热电源用MOSFET需要大量的器件串、并联使用,会使控制电路复杂,可靠性降低。静电感应晶体管(SIT)开通速度比MOSFET慢,通态压降即通态损耗大,单管容量小,在大功率应用也存在串、并联带来的问题。它是日本西泽润一教授等人研制成功的高频电子功率器件,因此在日本SIT应用于电力电子变换器比较多,涉及高频感应加热、电气传动及超声波、家用电器等许多领域。

(2) 采用软开关技术提高工作频率。感应加热电源高频化受开关器件损耗的制约,开关频率越高,损耗越大,不仅使电源效率低,而且温升高,需要庞大的散热系统,以保证器件在规定的允许温升下可靠工作,所以功率开关器件工作频率的提高,只是为感应加热电源的高频化提供基础。要实现加热电源的高频化还必须改进加热电源的控制技术,以使开关损耗近似为零,即开关损耗与开关频率无关,软开关变换技术可以实现这一目的。软开关控制技术是在硬开关PWM基础上,附加一个谐振网络。谐振网络通常由电感器、电容器和功率开关器件组成,谐振网络谐振工作使功率开关器件在零电压或零电流状态下开关,即ZVS、ZCS状态。功率器件开通或关断时刻不会出现电压、电流重叠现象,大大降低开关损耗,同时降低了开关过程中产生 $di/dt$ 、 $du/dt$ 磁干扰噪声。

因此,软开关变换技术可适当提高电力半导体功率器件的应用频率,是实

现感应加热电源装置高频化、高效率最有发展和应用前景的一种技术。

(3) 采用倍频式逆变桥电路拓扑提高频率。倍频式感应加热电源对提高电源加热频率和功率,具有重要的现实意义,见参考文献 [6]。倍频式逆变器的电路结构,是在标准常规逆变桥式电路中的每个功率器件上再并联一只功率器件,即相当于两个全桥电路中的超前臂相互并联中点相连,滞后臂相互并联中点相连,共同一负载,这样就构成了由 8 个功率开关器件组成的倍频式逆变桥电路。在一个周期内分 4 个阶段运行工作,前两个阶段是常规的全桥互补工作,之后接下来是并联上去的全桥互补工作,在公共负载上获得的交流电压及电流的频率加倍,也就是说负载上的交流频率是每个全桥逆变器开关频率的 2 倍。

这种倍频式电路拓扑结构,可以充分发挥 IGBT 功率器件的优越性,虽然 IGBT 性能参数规范中规定的使用工作频率指标没有改变,但是使用该种倍频逆变器电路拓扑技术,使 IGBT 的应用频率间接扩展了 2 倍。

### 3. 感应加热电源的智能化

感应加热电源智能化是感应加热电源的发展趋势,也是衡量感应加热电源性能先进性的重要标志;同时感应加热电源智能化也是提高加热处理自动化程度和电源可靠性的要求,使电源趋向集成化、模块化,对缩短生产周期,提高可使用性和可维修性均有重要意义。

感应加热电源实现智能化,应着重解决以下问题。

(1) 选用智能半导体模块是实现智能化的基础。构成感应加热逆变器的电力半导体功率器件模块智能化,是加热电源智能化的基础。为此应选用集驱动控制、保护、智能于一体的智能模块 IPM,如 600A/2000V 的 IPM 智能 IGBT 模块已成为商品。20 世纪 90 年代末美国研制出以大功率 IGBT 模块为有源器件的电力电子积木 PEBB (Power Electronics Buildings Block),其采用先进的表面贴装技术将功率器件的触发器、有源器件、主电源控制板集成在一起。还有一种已不是一般意义的电力半导体模块概念的集成电力电子模块 IPEM (Integrated Power Electronics Mitules),其采用先进工艺、三维立体组装,可实现源电压至负载之间的电路功能。

IPM、PEBB、IPEM 这些低电感、多功能、高集成的电力半导体模块,不仅减小了体积、质量,提高了逆变器在高频工作下的效率和可靠性,而且为采用微处理接口,实现智能化控制奠定了基础。

(2) 运用数字处理技术是实现智能化的核心。感应加热电源的控制技术是

否先进合理,是决定加热电源智能化程度的关键。早期感应加热电源的控制电路采用模拟电路,难以实现智能化,而且模拟电路受温度影响和抗干扰性差,导致参数不稳定和可靠性变差。运用单片机控制,使感应加热电源向智能化方向迈进了一大步。现在应用数字信号处理器(DSP),信息容量更大,处理能力更强、更灵活,整个控制电路可用一片DSP完成,实现自动化智能控制。

采用以DSP为核心的控制芯片,可以使感应加热电源实现:①PWM驱动控制信号生成;②频率数字锁相环跟踪;③功率闭环控制;④过电压、欠电压、缺相、过电流、过热保护;⑤故障自诊断与报警;⑥参数显示;⑦远程遥控、遥测及人机界面等多种功能。感应加热的工作状况相对复杂,运用智能控制可使感应加热对象(工件形状、材料)、加热过程中被加热电源的功率、频率参数,使加热工件的处理性能与质量,满足规范中设置的工艺参数要求。这一切均可运用数字信号处理器芯片及计算机来完成,不仅提升了感应加热电源的品质,而且对感应加热生产实现自动化具有重要意义。

#### 4. 数字化频率跟踪与负载阻抗自动匹配

频率自动跟踪及阻抗自动匹配是当代感应加热电源重点解决的关键技术。随着感应加热电源的大容量化、高频化,金属熔炼及金属表面处理对感应加热电源的需求越来越广泛,要求越来越高,尤其是对电源的可靠性要求更为苛刻。

感应加热电源的频率跟踪和阻抗匹配是保证加热电源获得最大功率输出,提高电源效率,安全稳定工作的重要控制特性。感应加热逆变器的主回路中通常是一个谐振网路,它由电感 $L$ 、电容 $C$ 及等效电阻 $R$ 组成,无论是串联谐振还是并联谐振,谐振回路的固有频率 $f_0$ 由参数 $L$ 、 $C$ 决定,即 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 。在加热过程中,因温度变化引起加热物体的物理特性参数及等效阻抗变化,使负载回路的固有频率 $f_0$ 发生变化,而且是一个非线性系统。如果此时逆变器的工作频率 $f_s$ 不及时跟踪 $f_0$ ,开关频率将偏离谐振频率,逆变器将会工作在硬开关状态,在高频、大功率情况下,功率器件承受很高的电应力,损耗增加,造成逆变器的安全性和可靠性下降;同时,因为电压和电流不同相,功率因数低,达不到最大功率输出,电源的效率和容量利用率降低。为此,必须采用频率跟踪控制技术,使逆变器的工作频率 $f_s$ 在谐振回路固有频率 $f_0$ 附近,即 $f_s = f_0$ ,此时电压与电流同相,功率因数近似为1,获得最大功率输出,开关器件也工作在ZVS、ZCS换流状态,损耗降低,简化了开关



器件附加吸收电路，有利于高频感应加热电源的高频化、大容量化。

最早的频率跟踪电路采用模拟锁相环、专用集成锁相环芯片 CD4046，由于其跟踪速度及稳定性较差，无法满足高精度和宽范围跟踪要求。在高频化感应加热电源中目前采用高频专用锁相环芯片及数字信号处理器芯片，尤其是采用数字信号处理器 DSP 实现锁相和频率跟踪是 21 世纪感应加热电源发展的方向。

根据电工学原理，当电源的输出阻抗与负载达到匹配时，在负载上可以获得最大功率输出。感应加热电源在加热过程中，负载阻抗因温度变化而变化，折射到初级的等效阻抗也变化。同时，特定的加热电源，加热不同的负载（工件物体），负载折射到初级的等效阻抗也是有很大差异的。由于上述两种情况，使谐振网路的谐振频率发生变化，等效负载发生变化，如果不及时调节，使感应加热电源与负载匹配，电源就不能在负载上输出最大功率，导致工作效率降低，电源的安全性也会下降，这一现象与频率是否跟踪相类似。负载阻抗匹配最常见的办法是在电源与负载之间加入变压器，通过改变耦合变压器的电压比，实现负载阻抗匹配，即

$$Z_1 = n^2 Z_2$$

式中  $n$ ——变压器一次、二次匝数比；

$Z_1$ 、 $Z_2$ ——一次、二次的阻抗。

采用变压器抽头改变匝数比实现感应加热电源的负载匹配有其应用上的局限性，即：①比较粗放、不精细，达不到匹配精度要求；②抽头转换时，需要一定容量的转换器，如控制接触器。采用电子技术实现自动负载匹配，是现代感应加热电源发展的必由之路。相对于变压器匹配负载，电路结构简单，质量和体积小，匹配可用数字处理器来完成，实现数字化、高精度匹配。电子自动负载匹配可以通过调节感应加热逆变电源的驱动控制脉冲的密度（PDM）和调节逆变桥开关功率器件驱动控制脉冲的相移（PSM）等办法，达到自动匹配。

#### 第四节 感应加热电源中使用的开关功率器件

感应加热电源所用电力半导体器件较多，本节简述几种功率开关半导体器件的特性及应用。

感应加热逆变电源无论是何种拓扑结构，作为电子开关的功率开关管是不