

# 高频恒电位技术在螺旋缝焊管探伤中的应用

刘 云, 闫光辉

(宝鸡钢管资阳钢管厂, 四川 资阳 641304)

**摘 要:** 介绍了工作频率 80 kHz 以上的高频恒电位技术在螺旋缝焊管 X 射线探伤中的应用情况。该技术采用大功率场效应管 (IGBT) 进行交一直一交逆变模式, 产生高频脉冲电压, 通过闭环回路的反馈信号在固定频率下调整脉宽, 实现对高压变压器的高压回路和初级回路的控制, 解决了工频 X 射线探伤存在的一些问题。

**关键词:** 螺旋缝焊管; 无损检测; X 射线; 高频恒电位技术; 成像灵敏度; IGBT 逆变模式

**中图分类号:** TG441.7 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-2311 (2012) 02-0073-04

## Application of HF Constant Potential Technique to NDT Process for Helical Weld Pipe

Liu Yun, Yan Guanghui

(Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Ziyang Branch, Ziyang 641304, China)

**Abstract:** Described in the paper is the application of the HF constant potential technique with operation frequency over 80 kHz to the X-ray detection process for helical weld pipes. With the said technique, the high-power field effect tube (IGBT) is used to produce HF pulse voltage via the AC-DC-AC reverse transformation mode, and the pulse width is adjusted under fixed frequency via the feedback signal from the closed-loop circuit so as to bring about control of the hi-tension circuit and primary circuit of the high-voltage transformer. Thanks to such a technique, certain chronic problems as staying with the power frequency X-ray detection operation.

**Key words:** Helical weld pipe; NDT; X-ray; HF constant potential technique; Imaging sensitivity; IGBT reverse transformation mode

X射线实时成像技术在螺旋缝焊管生产中, 作为重要的无损检测方式被广泛采用。但长期以来一直沿用工频 X 射线技术, 不仅成像灵敏度低 (计算机静态抓拍仅能达到 1.8%~2.5%), 而且体积庞大, 成像监视系统屏闪严重, 易导致操作人员疲劳。宝鸡钢管资阳钢管厂在 2008 年异地搬迁技术改造中, 在螺旋缝焊管生产线上成功应用了高频恒电位技术用于螺旋缝焊管的 X 射线探伤, 使成像灵敏度有了很大提高, 计算机静态抓拍灵敏度达到 1.3%~1.5%, 消除了屏闪问题, 成像效果均满足 API Spec

5L (44 版) 和 GB/T 9711.2—1999 《石油天然气工业输送钢管交货技术条件 第 2 部分 B 级钢管》标准及附加技术条件要求。

### 1 X 射线实时成像原理及灵敏度的影响因素

#### 1.1 X 射线实时成像原理

X 射线实时成像是由 X 射线管发射出 X 射线, 穿透被检测焊缝, 照在图像增强器上, 通过光学镜头被高速工业摄像机 (CCD) 接收, 并将收到的光信号转换成图像信号, 再传输到计算机上进行处理。

#### 1.2 对成像灵敏度的影响因素

对 X 射线成像灵敏度指标的影响因素主要有 X 射线的稳定性、图像增强器、平行光镜头、三可变镜头、CCD 摄像机、图像采集卡、计算机显示器、动态监视器等。其中, 对灵敏度影响最大的是

刘 云 (1965-), 男, 高级工程师, 总工程师, 石油管材专业标准化委员会委员、《焊管》杂志编辑委员会委员、中国金属学会轧钢学会焊管学术委员会委员, 从事焊接钢管制造工艺与装备技术研究工作。

X射线的稳定性。

### 1) X射线的稳定性

在高压电场作用下高能电子轰击靶材后, 99%的能量转化为热量, 1%的能量由于康普顿效应产生 X 射线。要产生稳定的 X 射线必须具备良好的高压稳定性, 从而保证 X 射线波长稳定。工业上使用的 X 射线是波长在 0.01~0.10 nm 范围内的硬射线, 对应的电压范围为 50~500 kV。X 射线波长的稳定性是由 X 射线管上所加的管电压决定的, 不同的高压电压对应不同能量的电子束, 从而产生不同波长的 X 射线。X 射线波谱越单一, 散射线越少, 成像越清晰<sup>[1]</sup>。如果在 X 射线发生时管电压有波动, X 射线的波长就是一个变化值, 就会影响射线穿透力和射线输出效率, 所以, X 射线的稳定性对成像效果影响非常大。计算机图像处理是将抓取的多幅图片叠加后进行滤波和边缘加强, 如果每次抓取的图片质量不同, 叠加后的效果必然会相互影响, 导致图像处理后的效果变差。

### 2) 工频 X 射线纹波

工频 X 射线设备是指高压发生器的工作频率小于 400 Hz 的 X 射线设备。工频设备将 50 Hz 的工频电源升高压整流后有 100 Hz 的正弦纹波, 经滤波后仍有 10% 以上的纹波。X 射线的纹波对成像效果产生的影响决定了工频技术设备成像灵敏度只能达到 1.8%。工频 X 射线的纹波在 10%~20% 之间, 意味着加载到 X 射线管上的高压有 5~20 kV 的纹波波动 (根据实际加载的高压), 由于采集图像是高速连续的, 每次采集的图片会因纹波电压波动而变化。比如采集 32 幅图片叠加, 可能在纹波最高端采集的图片只有几张, 其他图片均是最高端以下采集到的, 那么最高端采集的图片最好, 其他的图片不好, 这样叠加的图片再进行处理, 必然不会出现最好的效果。实践表明, 将图像调整到最佳状态时,  $\pm 1$  kV 的波动都会对图像灵敏度产生影响。

因此, 由于工频 X 射线的纹波作用造成 X 射线波谱复杂, 相同时间内特征频率 X 射线量少, 杂散射线多, 成像模糊, 每次抓取的图片质量也不同, 叠加后的效果必然会相互影响, 导致图像处理后的效果变差。

## 2 高频恒电位技术的特点

### 2.1 高频恒电位 X 射线的特点

高频恒电位 X 射线设备是指高压发生器的工

作频率大于 20 kHz 的 X 射线设备。高频恒电位技术采用了脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 技术和大功率场效应管 (IGBT) 器件, 利用高频技术提高工作频率, 高压整流后的电压基本上是恒定的直流, 纹波可小于 0.1%<sup>[2]</sup>。当 X 射线管管电压平稳恒定时, X 射线波长可看作是恒定值, 所以高频 X 射线波谱单纯, 射线性能稳定, 杂散射线成分较少, 因而成像清晰, 成像效率也高, 高频 X 射线输出波形如图 1 所示。而工频 X 射线高压发生器输出电压是脉动直流波形, 对成像没有任何帮助的杂散射线成分较多, 工频 X 射线输出波形如图 2 所示。

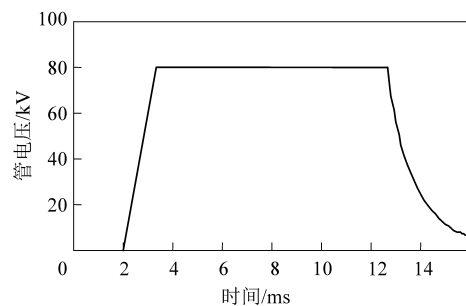
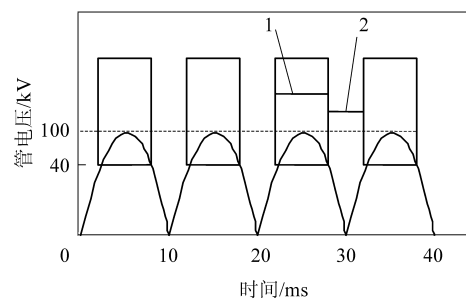


图 1 高频 X 射线输出波形示意



1 — 不稳定的 X 射线 2 — 软 X 射线

图 2 工频 X 射线输出波形示意

### 2.2 高压发生器管电压和管电流的控制特点

工频 X 射线发生器大多以管电压预示补偿来确定曝光时的管电压值。管电压预示即是在 X 射线管未知负载时, 先测量高压初级电压, 再根据高压变压器的变化计算出初级电压, 预先将本次 X 射线管可能加载的实际管电压指示出来。管电压的控制没有闭环反馈, 这时由电源电压波动或其他因素造成的输出高压变化便无法补偿, 使实际管电压值与所要求的管电压设定值有偏差。工频 X 射线

发生器的管电流调节电路需要设置稳压电源，同时由于空间电荷效应的影响，灯丝电路还要对空间电荷进行补偿，管电流实际值与设定值有较大误差。

高频恒电位高压发生器的管电压和管电流都使用闭环控制，采用管电压和灯丝的测量电路，由比较电路把测定的值与管电压和灯丝电流的设定值相比较，如有差异，控制电路会对控制参数进行快速调整，直到管电压和灯丝电流的设定值与测量值一致，从而使管电压和管电流的控制精度大大提高。

### 2.3 高压发生器和控制系统的体小量轻

根据变压器原理，电压/ (频率×线圈匝数×铁芯截面积)=常数，由此可知，要得到同样大小的高压，若电源频率增大，则可减小变压器线圈匝数与铁芯截面积，这就使得高频恒电位高压变压器和灯丝变压器可以做得很小。在控制系统中，工频 X 射线高压发生器是通过自耦变压器调节管电压的，而高频恒电位高压发生器是通过改变频率来改变电压，可满足管电压在宽广范围的调节，从而省去笨重的自耦变压器。

### 2.4 高压发生器纹波小

工频 X 射线高压发生器为单相变压 2 倍压整流电路，有效值与峰值之差为 1.414 倍，因而呈现出较大的纹波，经过倍压后也依然存在，无法消除。高频恒电位高压发生器的工作频率提高到 25 kHz 以后，只要使用小容量的高压电容就可以有效抑制高压波形中的脉动量，频率越高纹波越小。

## 3 高频恒电位成像系统及应用

### 3.1 系统构成

高频恒电位 X 射线成像系统由逆变控制器和高压恒电位高压发生器两大部分组成，如图 3 所示。

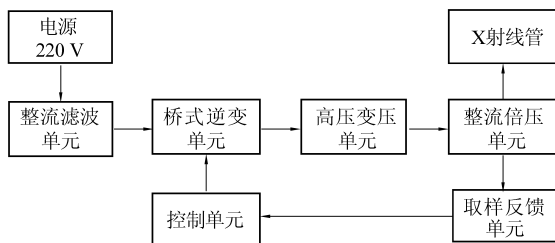


图 3 高频恒电位 X 射线成像系统结构示意图

#### 1) 逆变电源控制

逆变控制是用于驱动和控制 X 射线管高压部

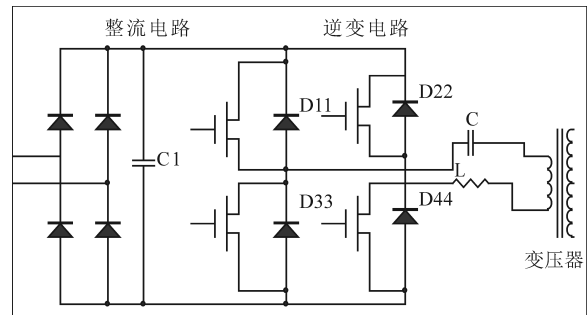
分的电路，通过闭环回路的反馈信号控制高压回路和初级回路。高压回路的控制是依据提取高压部分的反馈信号，在 80 kHz 的固定频率下调整脉宽实现的。脉宽的占空比大，则输出的高压就高；反之，脉宽的占空比小，则输出的高压就低。

#### 2) 逆变滤波单元

整流电路的作用是将交流电压变换为单向脉动的直流电压，滤波电路用来滤除整流后单向脉动电压中的交流成分，使之成为平滑的直流电压。

#### 3) 串联谐振桥式逆变电路

RLC (电阻、电感、电容) 串联谐振的桥式逆变器逆变电路如图 4 所示。逆变桥由 4 个臂构成，每个臂由 1 个场效应管和 1 个连续二极管并联组成。串联逆变技术要求输入为恒电源，采用大电容的滤波，谐振开关技术，可以使功率器件两端的电压或流过的电流呈正弦规律，而且电压电流波形错开，以实现功率器件零电流开关或零电压开关，使开关损耗理论上降为零。谐振电路吸收了高频变压器漏抗、电路中的寄生电感和功率器件的寄生电容，消除了高频时产生的电压尖峰和涌浪电流，消除了电磁干扰和电源噪声<sup>[1]</sup>。



D11、D22、D33、D44 — 绝缘栅双极型晶体管  
C、C1 — 电容 L — 电感器

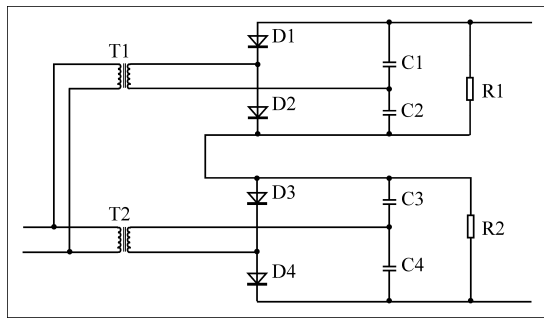
图 4 RLC 串联谐振桥式逆变电路示意

因场效应管或晶闸管开关频繁，现场工作应用中使用了 2 套串联谐振电路以减小逆变电路的损耗。

#### 4) 高压回路

高压回路由高压变压器倍压整流电路、高压取样反馈电路等组成，如图 5 所示。

由图 5 可以看出，高压变压器将逆变电源产生的 80 kHz 方波提升到约 8 kV (两路输出) 的高压，经高压硅堆 D1~D4 和高压电容 C1~C4 组成的倍压整流电路形成直流高压。该直流高压加载到 X 射



T1、T2 — 变压器 R1、R2 — 电阻

图5 高压回路示意

线管形成 X 射线的高压电场，用于加速灯丝阴极的热电子撞击阳极靶面，产生 X 射线。

### 3.2 应用效果

宝鸡钢管资阳钢管厂于 2008 年在改造的螺旋缝焊管生产线上应用了高频恒电位 X 射线技术。为检验其效果，以  $\Phi 711 \text{ mm} \times 11.9 \text{ mm}$  螺旋缝埋弧焊管为例，分别采用高频恒电位和工频 X 射线技术进行检测。

焊管内外焊缝余高均为 4 mm；X 射线管为考麦特 MXR225/21，图像增强器为东芝牌 (152.4 mm)，加载管电压 120 kV (高频恒电位)/140 kV (工频)，管电流均为 5 mA，均采用 3 号像质计。在采用高频恒电位 X 射线技术时，实际观测清晰可见第 13 号像质计金属丝，实测灵敏度为 1.25%；在采用工频 X 射线技术时，实际观测可见第 11 号像质计金属丝，实测灵敏度为 2.0%。

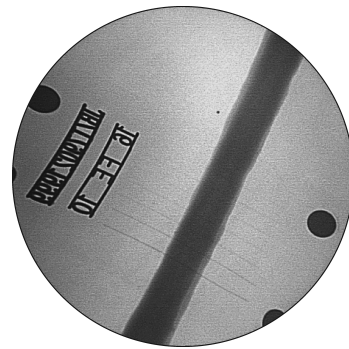
高频恒电位技术和工频技术在焊管产品探伤中的应用效果对比如图 6 所示。

## 4 结论

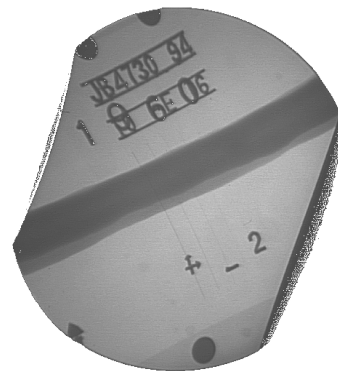
(1) 高频恒电位 X 射线纹波系数小。现场系统高压输出波形几乎为一水平直线，相比传统的 50 Hz 工频 X 射线系统的正弦波全波整流后的波形来看，纹波系数非常小，可以达到 0.1%~0.2%，高压上升时间可以控制在 1~2 ms，极大地减少了散射线的产生。

(2) 高压控制的精度更准确，成像的稳定性、重复性也有极大提高，图像亮度稳定，精度也有明显上升。

(3) 与同功率的工频机相比，高压变压器的体



a) 高频恒电位技术



b) 工频技术

图6 两种无损检测技术在焊管产品探伤中的应用效果对比

积减小 1/3，重量减少 1/4，绕组匝数大约减少 1/5。由于高压变压器体积的大幅度减小，油箱的尺寸也相应减少，变压器油的使用量也大大节省。

(4) 由于高频恒电位 X 射线技术从根本上改变了工频 X 射线技术的传统结构模式，具有图像清晰、灵敏度高等特点，为 X 射线工业电视数字化、智能化创造了条件。随着我国电子技术、计算机技术等学科快速发展，未来 X 射线工业电视将会大量采用高频恒电位 X 射线技术设备。

## 5 参考文献

- [1] 余长江, 王吉先, 郑西振. 射线探伤装置 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994: 29.
- [2] 袁寿财. IGBT 场效应半导体功率器件导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 226.

(收稿日期: 2011-09-06)