

# 水下焊接超声波测距研究

叶建雄,张晨曙,赵国岭  
(南昌工程学院,江西 南昌 330099)

**摘要** 提出将高频水下专用超声波传感器用于湿法焊接,进行焊缝偏差识别的想法。设计了一种收发一体的超声波电路,通过 AVR 单片机实现了声波信号的同步采样,在硬件带通滤波的基础上引入数字带通滤波器,并对原始信号进行处理,利用相关系数法得到了稳定的距离检测结果,为下一步的焊接母材形貌分析和焊缝跟踪提供了研究基础。

**关键词** 超声波传感器;水下湿法焊接;距离检测

**中图分类号** TG456.5

**文献标识码** A

**文章编号** 1001-2303(2012)09-0012-05

## Research on distance detection with ultrasonic sensor in underwater welding

YE Jian-xiong, ZHANG Chen-shu, ZHAO Guo-ling

(Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

**Abstract:** The idea is put forward that the high frequency underwater ultrasonic sensor is introduced into wet-welding for seam tracking. A kind of transmitter and receiver integrated circuit design method is introduced at first, the acoustic signal synchronous sampling is realized by help of AVR single-chip micro-processor, the original signals are processed with digital filter on the basis of hardware band-pass filter, and then the correlation coefficient method is used and steady distance detection results are obtained, all the above work provide a good research foundation for later work such as morphology analysis and seam tracking.

**Key words:** ultrasonic sensor; underwater welding; distance detection

## 0 前言

伴随着人类对海洋的开发,海底管道、海洋平台、跨海大桥等大量涌现,它们的建造、维修以及安全可靠性与水下焊接技术密切相关。大量的海洋工程施工对水下焊接技术提出了新的要求,使得水下焊接技术进入了新一轮的发展期。目前水下焊接呈现出的两个特点:第一,基于社会经济发展的需求,大量简单、经济的水下焊接技术得到发展,主要表现在湿法水下焊接技术和局部干法水下焊接技术的大量使用;第二是信息融合技术<sup>[1-2]</sup>、传感技术和人工智能技术的发展,对焊接过程监测和控制提出了要求,使水下焊接自动化、智能化系统的研发

成为热点。

虽然在水下焊接的多个领域如焊接材料、焊接工艺、焊接工装等方面取得了不少成果,但到目前为止,水下焊接基本上还是依靠潜水员进行,由于受人类生理极限的限制,利用饱和气体潜水的最大深度也只有 650 m,因而水下焊接相关领域的研究依然任重道远<sup>[3]</sup>。

水下焊接的特殊性决定了所用传感器的特殊性,目前水下焊接中主要研究和使用的是图像传感器(CCD)和旋转电弧传感器。正在开发的水下焊接传感器还有水下声发射检测、水下涡流检测(UWET)、水下超声成像、磁强记录仪、涡流电流法(ECL)、交流应力检测(ACSM)、光测法(Photogrametry)、磁膜探伤(Magfoils)等,由于超声波传感器对焊接中的强光以及电场、磁场等不敏感,与红外、激光传感器相比不易受到气泡、水中悬浮物和焊接弧光的干扰,因而越来越受到研究人员的重视。

利用超声波传感器实现焊缝跟踪,首先必须确

收稿日期:2012-07-10

基金项目:中国博士后科学基金(20080441085);江西省自然科学基金项目(2010GZC0144);江西省教育厅科技项目(GJJ12627);南昌工程学院大学生科研训练计划资助项目(20111212)

作者简介:叶建雄(1969—),男,江西乐平人,博士,副教授,主要从事焊接自动化及控制工程的研究工作。

定传感器的特性、驱动和采样电路 ;其次是实现水下高精度测距 ,通过分析焊枪在各点距焊接母材的距离得到母材的表面形状 进而获得焊缝所在位置 ,实现焊缝偏差的实时检测。

在此围绕超声波的激励、接收及基于渡越时间进行精确测距几个方面 ,从电路的设计、信号的采集和处理等方面展开论述。

### 1 测距系统

超声波是一种振动频率高于声波的机械波 ,通常由压电体产生。压电体又称换能器 ,具有正压电效应和逆压电效应 ,是超声波传感器的核心部件 ,通过压电体的逆压电效应可以获得超声波 利用正压电效应可由超声波得到相应的脉动电压 ,从而实现声能与电能的相互转换。按工作方式可将传感器分为发射型、接收型、收发一体型三种形式 ,超声波传感器具有成本低、安装方便的优点 ,被广泛应用于物位及压力测量、无损检测、薄板焊接等领域<sup>[4-5]</sup> ;其方向性好、抗干扰能力强 ,适合工作在重污染、高危险及人类难以进入的地区 根据查新报告 利用超声波传感器作为水下焊接用传感器的报道 始见于日本的 Y. Suga、A. Machida 等人于 1994 年在海岸工程国际会议上发表的相关论文<sup>[6-8]</sup>。

水下超声波传感器的特性与其在陆地上有明显区别。首先为了减小声波损失 ,传感器需要置入水中 ,水中声速约为空气中的 3~4 倍 ,这样不但增大了检测盲区 ,而且增加了损耗 ,因而需要加大传感器的输出功率。

试验中利用渡越时间法进行水下精确测距 ,其关键是回波到达时刻的判定。超声波的频率越高 ,其波长越短、方向性好、抗干扰能力强 ,测距精度更高 ,但频率越高声波损耗更大 ,对采样频率和定时精度的要求也更高 ;另外 ,超声波的指向性还用锐度角来评价 ,锐度角越小说明声波指向性越强 ,锐度角近似与传感器的半径成反比 ,半径越大则锐度角越小 ,传感器的空间分辨率越高。

经综合比较 ,确定使用工作频率为 2 MHz 的高频水下超声波传感器 ,经过处理后其外部不需要加装阻抗匹配层 ,使结构更加紧凑 ,所用传感器的具体参数如表 1 所示。

#### 1.1 硬件电路设计

传感器采用收发一体的方式。硬件电路包含功能上相互独立的接收/发送回路 ,两个回路在控制

表 1 超声波传感器参数表

名称	性能指标
型号	DYA-2M-01E
量程	0.10~2.00 m
盲区	0.01 m
频率	2 MHz±30 kHz
工作电压	峰值电压小于 400 VPP
工作温度	-20 ℃~+80 ℃
压力	≤8 kg 或者 0.8 MPa
角度	半功率角 3° 锐度角 .7°(2 MHz)
耐腐蚀性	在弱酸/碱环境下可用
尺寸	外径 28.6 mm

器的指挥下协调工作 :初始时由控制器发出激励脉冲 ,通过功率放大后推动传感器发出声波 ,然后开始采集接收到的回波信号 ,完成之后再开始下一个激励周期。硬件的主要功能模块包括 :电源变换单元、脉冲生成单元、功率放大单元、波形接收及调理单元、波形放大和 AD 采样单元 ,如图 1 所示。

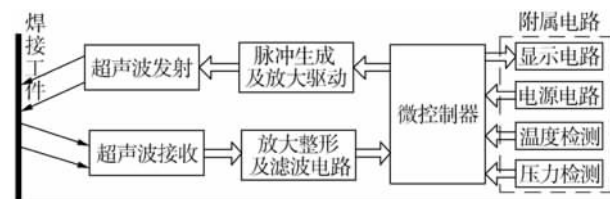


图 1 硬件电路组成方框图

其中功率放大单元和回波接收整形是整个电路的核心 ,特别是回波接收整形部分 ,由于初始回波幅值很小且含有噪声 ,所以回波接收部分在信号引入、电路设计、元件选取、走线布局等方面要仔细考虑。

功率放大是利用 MOS 管驱动高频变压器一次侧 ,通过二次侧 80 V 的高压脉冲实现超声换能器的激励 ,所接收的回波信号首先通过屏蔽线进入接收回路 ,经三极管 9013 放大后 ,利用运算放大器 MC33078 和 R、C 元件构造有源带通滤波器。与无源滤波器相比 ,它具有体积小、效率高且频率特性好的特点 ,由于集成运放的增益和输入阻抗很高且输出阻抗低 ,故有源滤波器还有放大和缓冲作用。

对于大带宽的带通滤波器 ,最常见的方法是低通(LPF)和高通(HPF)结合 ,当 LPF 的通带截止频率高于 HPF 的通带截止频率时就形成了带通滤波器。窄带带通滤波器常用 Sallen-Key 结构或多级反馈(MFB)的结构形式<sup>[9]</sup> ,在此选用了 MFB 形式 ,其基本结构形式如图 2 所示 ,图 3 的电路板中采用了二

级级联的方式。

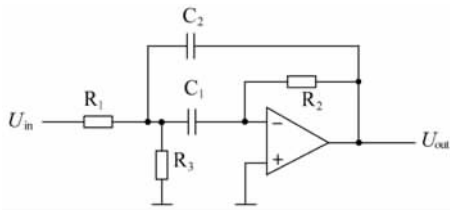


图 2 超声波接收电路

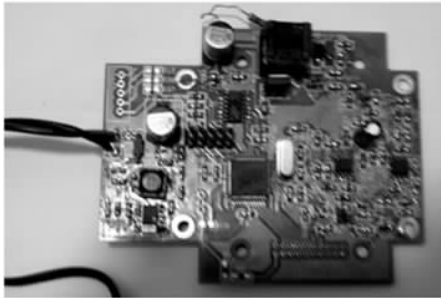


图 3 传感器接收/激励电路板

MFB 的优点是滤波器相关参数调节方便,可以互不影响地调节品质因素  $Q$ 、通带增益  $A_m$  和中心频率  $f_m$ ,图 2 中通带宽度  $B$  与  $A_m$  不依赖于  $R_3$ ,所以  $R_3$  能专门用来调节带宽  $B$  滤波器的主要性能指标和电路元件参数之间的关系表示为

系统传递函数

$$A(s) = \frac{-\frac{R_2 R_3}{R_1 + R_3} C \omega_m \cdot s}{1 + \frac{2R_1 R_3}{R_1 + R_3} C \omega_m \cdot s + \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 + R_3} C^2 \omega_m^2 \cdot s^2}$$

系统中心频率

$$f_m = \frac{1}{2\pi C} \sqrt{\frac{R_1 + R_3}{R_1 R_2 R_3}}$$

系统品质因素

$$Q = \pi f_m R_2 C$$

系统带宽

$$B = \frac{1}{\pi R_2 C}$$

因为所用传感器的工作频率达 2 MHz,电路板中线间电容必须考虑,需要对滤波器参数的理论计算进行修正,多次试验后确定  $R_1=R_3=7.5\text{ k}\Omega$   $R_2=470\text{ k}\Omega$   $C_1=C_2=50\text{ pF}$  电容值明显小于计算值。经滤波后的信号通过电容耦合到下一线后再经运放 AD8310 处理;AD8310 是一种高速电压输出型对数放大器,可对 DC 到 440 MHz 的频率范围进行解调,其内部包含六个串联的放大器/限幅器,每个放大器/限幅器的小信号增益均为 14.3 dB,在 900 MHz 时带宽为 -3 dB,共使用了 9 个检测器,检波范围从

-91~+4 dBV 即电压幅值范围为  $\pm 40\text{ }\mu\text{V} \sim \pm 2.2\text{ V}$ ,即通过 AD8310 的高速电压转换后进行波形包络提取,信号峰值 2 V 以上,供 ATMEGA1284P 进行采样分析。

### 1.2 声波采样

利用 LDI320VSE 高速双通道采集卡进行采样,由香农定理可确定最低采样频率,通过控制板上的 ATMEGA1284P 单片机使采集卡和传感器同步工作。具体实现方法是单片机采用 8 MHz 的外部晶振,每发出六个频率为 2 MHz 的激励脉冲后,立即送出一个 TTL 电平的外部触发信号,通过九针接口送入采集卡作为采样的外部触发信号,采样方式设为定长方式。为了确定回波到达时刻,必须首先根据声波在水中的传播速度及最大工作距离确定渡越时间的长短  $t=2 \cdot L$ (单位 m)/1400(单位 m/s)=200×L/14(单位  $\mu\text{s}$ ) 然后根据采样速率确定采样数据的数目,采样个数为采样频率乘以时间,为保证足够的数据长度,每一采样周期可以适当多采集 100 个  $n=rate \cdot t+100$ 。为使程序设计统一,结合焊枪的最大高度,将每一周期的采样数定为 6 500,距离、渡越时间和采样数据量的关系如表 2 所示。

表 2 距离、渡越时间和采样数据量关系

距离 $d/\text{mm}$	时间 $t/\mu\text{s}$	采样个数/个
200	285.714 285 7	3 857
210	300	4 000
250	357.142 857 1	4 571
260	371.428 571 4	4 714
270	385.714 285 7	4 857
300	428.571 428 6	5 285
310	442.857 142 9	5 428
320	457.142 857 1	5 571
330	471.428 571 4	5 714
340	485.714 285 7	5 857
350	500	6 000

在上述分析的基础上,利用 VC6.0 编写了控制程序,通过外部库函数调用方法实现与 LDI320VSE 采集卡的通信,采集过程由硬件自动完成,并由程序将结果读入到内存的数组中。由于采用可视化编程方法,不但能够显示超声波波形,而且可以进行实时的数字信号处理,如计算并在显示界面上显示出当前所采数据的最大值、最小值、均值、方差、功率谱以及相关系数的求解结果,将原始声波信号存储到硬盘,可供离线分析使用。

## 2 声波信号处理和分析

对采集的声波信号进行功率谱密度分析,结果表明信号的功率主要分布在 1.93~2.2 MHz 之间,但功率谱图中有大量毛刺,其原因一方面是由于所发出的超声波频率有一定的波动,另一方面是声波在传播过程中会受到外界的干扰。所以在进行测距工作之前,有必要对原始信号进行处理,即设计一个带通滤波器以滤除不希望包含的频段信号,常用的频域指标有通带起伏  $R_p$ (单位: dB)、阻带衰减  $R_s$ (单位: dB)和过渡带带宽  $W_s-W_p$ (单位: Hz)。在此利用 Chebyshev Type IIR 算法设计了一个带通滤波器<sup>[10]</sup>,通带频率为 1.8~2.2 MHz,阻带上下边沿频率分别为 1.65 MHz 和 2.35 MHz,阻带最小衰减为 30 dB,通带最大起伏为 0.01 dB 的带通滤波器,对处理前后的数据进行功率谱密度分布和波形状态的比较,由图 4、图 5 可知,滤波后的功率分布更加集中且时域图更加平滑。

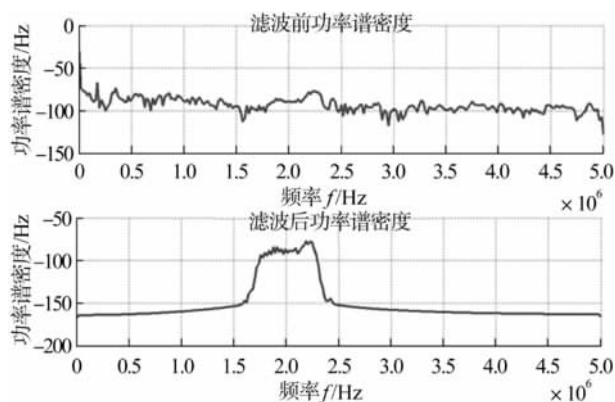


图 4 滤波前后信号功率谱分布

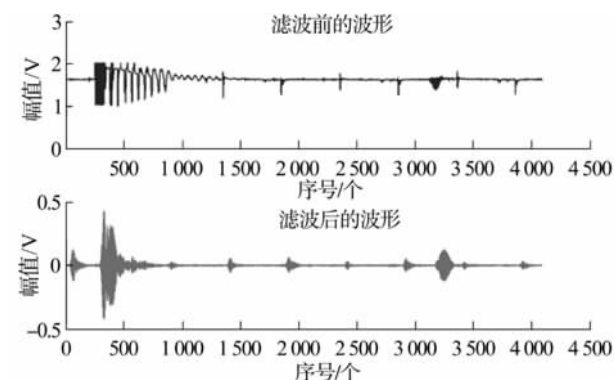


图 5 滤波前后信号时域波形

信号处理的目的是用来进行测距,并进一步得到当前焊枪距焊缝中心的偏差,而测距准确与否的关键是回波到达时刻的判断,常见方法有可变门限、双门限、前沿线性前推、零交叉点检测、峰值检

测、相关函数计算等<sup>[11-14]</sup>。峰值检测和门限阈值法的缺点在于固定的阈值难以确定,即使采取动态阈值的方法,仍不能从根本上解决问题,而相关系数法能反映数字序列内在和本质的关联特性,可以揭示回波与激励波之间的关系,所以在反复比较的基础上,采用了相关系数法进行回波到达时刻的判断。

相关系数可用于判断信号之间的相似程度,将回波信号与激励信号进行相关处理,可以有效鉴别出回波信号的真实到达时刻。试验中激励脉冲的个数为 6,所占时间为  $3 \mu s$ ,当激励脉冲发出后立即启动 AD 采样,以最前面的 30 个数据为模板,与后续的采样信号进行相关系数的计算,以其最大值所对应的时刻作为回波到达时刻。具体程序见文献[15]中的附录 D,处理后的信号在求取最大相关系数时非常稳定,如图 6 中相关系数的最大值序号为 3 636,当设水中声速为 1 400 m/s,考虑提前采样的 250 个数时,可计算出距离值为

$$\frac{(3\ 636-250) \times 0.1}{1\ 000\ 000} \times 1\ 400 \times \frac{1\ 000}{2} = 237.02 \text{ mm}$$

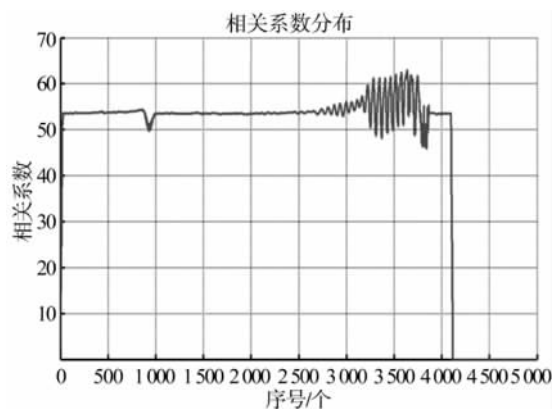


图 6 相关系数波形

为检测出 0.5 mm 的距离变化,在 10 MHz 采样频率下,最大相关系数的位置要变化四个采样点,为此进行了传感器的灵敏度试验。大量试验表明,本测距系统检测盲区最小可达到 70 mm,最大到达 500 mm,在同一次检测中可以测出纵向 0.5 mm 的距离变化,并且结果稳定,计算结果如图 7 所示。

## 3 结论

开展了将超声波传感器应用于水下湿法焊接的研究,设计了超声波信号的产生和接收电路,利用 AVR 单片机实现了超声波信号的同步采集,设计了带通滤波器并对采集的信号进行数字信号处理,对比滤波前后信号的功率谱密度分布,证实了

现在是第 1 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 61.329822
现在是第 2 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 60.917005
现在是第 3 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 61.672237
现在是第 4 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 61.126859
现在是第 5 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 61.291591
现在是第 6 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 61.037809
现在是第 7 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 61.712660
现在是第 8 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 61.479332
现在是第 9 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 60.806849
现在是第 10 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 60.781807
现在是第 11 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 60.741579
现在是第 12 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 60.631724
现在是第 13 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 60.927990
现在是第 14 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 60.982818
现在是第 15 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 60.938780
现在是第 16 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 60.752419
现在是第 17 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 61.098560
现在是第 18 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 61.960231
现在是第 19 组, 序号是 3635, 最大相关系数是 61.287099
现在是第 20 组, 序号是 3635, 最大相关系数是 61.574969
现在是第 21 组, 序号是 3635, 最大相关系数是 61.182224
现在是第 22 组, 序号是 3635, 最大相关系数是 61.210221
现在是第 23 组, 序号是 3636, 最大相关系数是 61.624658

图 7 相关系数检测结果

处理的有效性,通过分析静水条件下的测距结果,认为相关系数法能够克服阈值法的固有缺点,是一种较为稳定可靠的方法。

下一步还要在母材形貌分析、焊缝偏差分析上展开研究工作,整合小波分析<sup>[6]</sup>、支持向量回归机<sup>[17]</sup>等信号分析算法的优点,进一步提高水下测距的准确性和稳定性,分析普通 V 型坡口、对焊坡口下声测信号的特点,为焊缝偏差的准确判断提供依据。

参考文献:

[1] 谭一炯,周方明,王江超,等.焊接机器人技术现状与发展趋势[J].电焊机,2006,36(3):6-10.  
 [2] 常云龙,薛家祥,黄石生.机器人点焊多信息融合及控制[J].焊接学报,2000,21(2):85-89.  
 [3] 叶建雄,尹懿,张晨曙.湿法水下焊接及水下焊接机器人技术进展[J].焊接技术,2009,38(6):1-4.  
 [4] Athi N, Wylie S R, Cullen J D et al. An online real time ultrasonic NDT system for the quality control of spot welding

in the automotive industry[J].Journal of Physics Conference Series, 2009,178(012013):1-6.  
 [5] Sony Baby T, Balasubramanian R, J. Pardikar. Ultrasonic study for detection of inner diameter cracking in pipeline girth welds using creeping waves[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2003(80):139-146.  
 [6] Yasuo Suga, Akira Machida. Application of ultrasonic sensing method to automatic seam tracking in underwater wet welding[C]. 日本机械学会论文集 C 编, 1995(61):151-154.  
 [7] Suga Y, Machida A. Detection of weld line and automatic seam tracking by ultrasonic sensing robot for underwater wet welding[C]. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, Los Angeles: Int Soc of Offshore and Polar Engineer, 1994(4):86-91.  
 [8] Suga Y, Machida A. Detection and tracking of weld line by a welding robot with ultrasonic sensing system in underwater wet welding[C]. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, Los Angeles: Int Soc of Offshore and Polar Engineer, 1996(4):128-132.  
 [9] Ron Mancini. Op Amps For Everyone, Design Reference[M]. Texas Instruments, 2002.  
 [10] 王宏. MATLAB6.5 及其在信号处理中的应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.  
 [11] 彭翠云, 赵广耀, 戎海龙. 汽车倒车系统中超声波测距模块的设计[J]. 压电与声光, 2008, 30(2):251-254.  
 [12] 虞朝永, 王纪婵, 卜英勇. 基于 PC 平台的水下超声波测距系统研究[J]. 仪表技术与传感器, 2008(4):91-93.  
 [13] 贾莉娜. 超声物位检测系统中的误差来源及补偿方法[J]. 仪器仪表用户, 2005, 12(1):91-92.  
 [14] 程岩. 超声波传感器焊缝跟踪系统的研究[J]. 仪器仪表用户, 2005, 12(6):11-12.  
 [15] 叶建雄. 水下超声焊缝跟踪相关技术研究[R]. 南昌:南昌大学, 2011.  
 [16] 叶建雄. 旋转电弧传感器及其信号处理[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(10):4639-4642.  
 [17] 杜健辉, 石永华, 王国荣, 等. 基于旋转电弧传感器的水下电弧焊信号处理[J]. 电焊机, 2009, 39(12):63-66.

欢迎订阅 2012 年《电焊机》杂志

《电焊机》杂志是全国中文核心期刊、中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)、《中文核心期刊数据库》收录期刊、“英国《科学文摘》(INSPEC)来源期刊”“俄罗斯《文摘杂志》收录期刊”“美国《剑桥科学文摘》(CSA)收录期刊”“波兰《哥白尼索引》(IC)”收录期刊等。欢迎大家踊跃订阅! 欢迎各位专家积极投稿! 各地邮局均可订阅, 邮发代号:62-81, 订价:10 元/月, 120 元/年。

联系电话 028-83267908

联系人 黄秀艳

E-mail bj@toweld.com