第 37 卷第 3 期 河北科技大学学报 Vol. 37, No. 3
2016 年 6 月 Journal of Hebei University of Science and Technology June 2016

文章编号:1008-1542(2016)03-0275-08 doi:10.7535/hbkd.2016yx03010

基于声音信号的钢材材质检测及试验研究

秦志英[1],齐康花[1],董桂西[2],赵月静[1],刘 尧[1]

(1.河北科技大学机械工程学院,河北石家庄 050018;2.河北省送变电公司线路器材厂,河北石家庄 051130)

摘 要:铁塔加工过程中需要对角钢进行夹紧、冲孔、剪切等操作,不同材质的角钢加工时会发出不同的声音,因此提出利用声音信号检测 Q235 和 Q345 两种常用角钢材质。利用传感器和采集仪搭建试验系统,采集声音信号的连续波形,并提取单个冲孔周期声音信号的波形作为后续判别的依据。针对单个周期的声音信号,提取美尔频率倒谱参数(MFCC)作为特征参数,并利用动态时间规整(DTW)方法计算待测模板与 Q235 和 Q345 两种标准模板之间的距离,距离小者判定为该种角钢材质。试验分别采集了 4 种型号角钢的 2 组样本,验证了上述方法识别材质的有效性。

关键词:应用声学;声音信号;MFCC;DTW;材质检测

中图分类号:TP39 **文献标志码:**A

Steel material detection based on sound signal and the experimental research

QIN Zhiying[1], QI Kanghua[1], DONG Guixi[2], ZHAO Yuejing[1], LIU Yao[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. Hebei Electrical Transmission and Transformation Engineering Company, Shijiazhuang, Hebei 051130, China)

Abstract: In the machining process of iron tower, the angle steel needs to be operated through clamping, punching, shearing, etc, and different material produces different sound, so it is advised to use sound signal to detect steel materials Q235 and Q345. Experiment system is constructed by using the sound sensor and signal acquisition system, so the continuous sound signal is acquired, and the sound wave of single punching cycle is exacted for the follow-up judgement. For the sound signal in one cycle, MFCC(Mel Frequency Cepstrum Coefficient) parameters are extracted as characteristic parameters, and the distances between the being measured template and the two standard templates of Q235 and Q345 are computed by the DTW (Dynamic Time Warping) method. As a result, which distance is smaller determines the template. In the experiment, two sets of samples for four kinds of angle steels are acquired, respectively, which proves the validity of the method for steel material detection.

Keywords: applied acoustics; sound signal; MFCC; DTW; material detection

收稿日期:2015-10-22;修回日期:2015-12-01;责任编辑:冯 民

基金项目:国家自然科学基金(11002046);河北省自然科学基金(A2011208007)

作者简介:秦志英(1976—),女,河北赞皇人,副教授,博士,主要从事机械测试技术与系统动力学方面的研究。

E-mail:qinzhy76@163.com

秦志英,齐康花,董桂西,等.基于声音信号的钢材材质检测及试验研究[J].河北科技大学学报,2016,37(3):275-282.

QIN Zhiying, QI Kanghua, DONG Guixi, et al. Steel material detection based on sound signal and the experimental research[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology,2016,37(3):275-282.

角钢是组成铁塔的必备原料，若不同材质的钢材混用，将对铁塔的使用产生很大的影响。如果发生倒塔断线事故，会造成严重损失[1]。目前，铁塔加工企业对角钢材质的检测项目主要包括力学性能和化学成分，通过取样来检测角钢的性能是否符合要求[2]。但是这些方法效率低、检测周期长，难以适应生产的需要。角钢在冲孔等加工过程中会发出一定的声音，不同材质的钢材发出的声音不同，因此本文提出利用声音信号检测钢材材质。

目前，对于声音信号识别的研究主要包括对齿轮箱或轴承故障的检测、说话人声音检测等。文献[3]提出了一种列车轴承的声音监测故障诊断方法，该方法首先对传感器采集到的轴承声音信号进行时域多普勒校正，然后利用 EEMD 方法提取蕴含轴承故障特征信息的本征模态信号，并计算其包络谱来判断轴承是否存在故障；文献[4]利用声音信号对齿轮箱的故障进行了识别与检测，将阶次分析和倒谱分析相结合提出了阶次倒谱分析，实现了瞬态过程中利用声音信号对齿轮箱进行故障诊断的方法；文献[5]从模式识别角度对含噪声机械故障分类方法进行优化；文献[6—8]利用声音信号对说话人的声音进行识别，建立了普通话语音特性数据库，先提取了美尔频率倒谱参数(MFCC)参数，利用支持向量机(SVM)及矢量量化(VQ)方法进行比对，从而检测出声音类型；文献[9—13]用能量检测方法检测背景噪声环境下的有用声音信号，对检测到的信号提取 MFCC 特征，使用向量机对提取的特征向量训练分类模型，完成对含有噪声的生态环境声音的识别；文献[14—19]介绍了利用 DTW 算法对提取的声音信号进行距离匹配，从而判断其类别的方法；文献[20—22]介绍了利用Matlab软件编程，实现对语音信号的端点检测的方法。

本文先介绍了声音识别的原理，然后利用声音传感器和采集仪等设备，采集了不同型号两种材质角钢的冲孔声音信号，经过预处理，分别提取了声音信号的 MFCC 参数，采用 DTW 算法进行识别，初步验证了用声音检测钢材材质的可行性。

1 声音信号识别原理

在对声音信号进行识别时，先对声音信号进行预处理，设定声音的参数，并保存标准信号。当输入被测信号时，将信号的特征参数与经过处理的声音信号特征参数进行比较，若误差在允许范围内则表示声音匹配，否则表示声音不匹配[12]。

1.1 预处理

声音信号的预处理主要是为了使信号便于后续处理，常用的预处理过程如下[7-11]：

1)滤波　利用 Mel 滤波器对声音信号进行滤波。

2)归一化处理　归一化处理的目的是去除不同声音样本之间的数量级差异。

3)预加重　预加重通常使用具有 6 dB/倍频程的一阶数字滤波器来实现，

$$H(z)=1-\mu z^{-1}, \tag{1}$$

式中 μ 为常数，通常取 0.97；

4)对声音信号进行加窗和分帧　声音信号虽然是非线性时变信号，但它具有短时平稳的特点，对其进行分帧可以提取其短时特性。通常取帧长为 10～30 ms，若采样率为 10 000 Hz，则取每 1 帧 N 为 256 点，帧移 M 为 128 点。

1.2 MFCC 特征提取

MFCC 作为典型的声音特征参数，能够准确反映声音信号的听觉特征。Mel 标度描述了人耳对频率感知的非线性特性，它与频率的关系可用式(2)近似表示：

$$\mathrm{Mel}(f)=2\,595\times\lg(1+f/700)。 \tag{2}$$

对于预处理后的信号，提取 MFCC 的具体步骤[12-13]如下：

1)对每一帧分别进行离散傅里叶变换(discrete fourier transform，DFT)，以获得频谱分布信息；

2)求频谱幅度的平方，得到能量谱；

3)将能量谱通过 1 组 Mel 尺度的三角形滤波器组输出 $m(l)$，$l=1,2,\cdots,L$，本文 L 取 24；

4)对所有的滤波器输出做对数运算，再进一步做离散余弦变换(discrete cosine transformation, DCT)即可得到 1 组 MFCC 参数。本文取前 12 个系数作为 MFCC 参数。

$$\mathrm{mfcc}(i)=\sum_{i=1}^{L}\ln m(l)\cos\left[(l-0.5)\frac{i\pi}{L}\right],\quad 0\leqslant i\leqslant L。 \tag{3}$$

1.3　DTW 距离匹配

目前声音识别比较常用的识别方法主要是模板匹配法，以动态时间规整（dynamic time wrapping，DTW）方法为代表，是把时间规整和距离测度计算结合起来的一种非线性规整技术。将待测模板和参考模板分别用 T 和 R 表示，为了比较它们之间的相似度，可以计算它们之间的距离 $D[\mathrm{T},\mathrm{R}]$，距离越小则相似度越高。为了计算这一失真距离，应从 T 和 R 中各个对应帧之间的距离算起[14-19]。

如图 1 所示，将待测模板的各个帧号 $n=1\sim N$ 在一个二维直角坐标系中的横轴上标出，把参考模板的各帧号 $m=1\sim M$ 在纵轴上标出，网格中的每一个交叉点 (n,m) 表示这两帧特征矢量之间的距离 $d[\mathrm{T}(n),\mathrm{R}(m)]$。DTW 算法可以归结为寻找一条通过此网格中若干格点的路径，由于任何一种声音发音的先后次序不变，所选的路径必定是从左下角出发，在右上角结束。

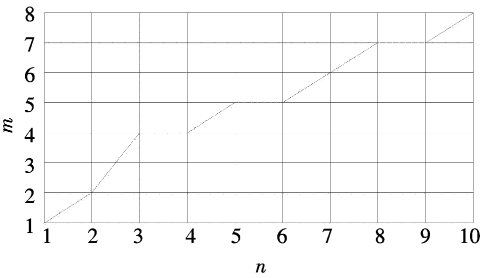


图 1　DTW 算法搜索路径

Fig. 1　DTW algorithm search path

为了找到这条路径，假设路径通过的所有格点依次为 $(n(1),m(1)),\cdots,(n(i),m(i)),\cdots,(n(N),m(M))$。为了使路径不至于过分倾斜，约束斜率在 0.5～2 的范围内。如果路径已经通过了格点 $(n(i-1),m(i-1))$，那么下一个格点 $(n(i),m(i))$ 只可能是 3 种情况之一：

$$(n(i),m(i))=(n(i-1)+1,m(i-1)+2);$$
$$(n(i),m(i))=(n(i-1)+1,m(i-1)+1);$$
$$(n(i),m(i))=(n(i-1)+1,m(i-1))。$$

在满足上述约束条件时，比较此时格点所对应的帧号距离，并使得沿路径的累积距离达到最小值，则此时路径的累积距离为

$$D[n(i),m(i)]=d[\mathrm{T}(n(i)),\mathrm{R}(m(i))]+D[n(i-1),m(i-1)],\tag{4}$$

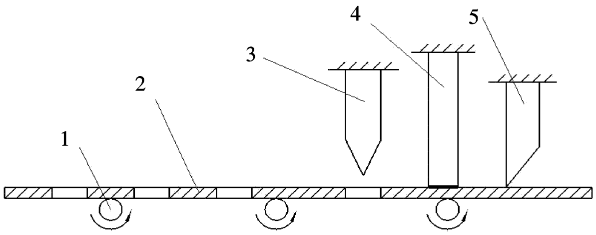
式中 $D[n(i-1),m(i-1)]$ 由式(5)决定：

$$D[n(i-1),m(i-1)]=\min\{D[n(i-1),m(i)],D[n(i-1),m(i)-1],D[n(i-1),m(i)-2]\}。\tag{5}$$

DTW 算法按照上面的描述，建立一个 $N\times M$ 的矩阵，得到帧累积匹配距离矩阵 $\boldsymbol{d}$，其 $d(i,j)$ 值为测试模板第 i 帧与参考模板第 j 帧的距离，搜索最佳路径得出匹配距离 D。

2　试验系统搭建

在铁塔加工企业中通常采用数控型钢联合生产线，是一种对角钢进行夹紧、冲孔、剪切等加工的全自动生产专用设备。图 2 所示为角钢加工示意图，滚轮实现角钢的自动输送，一系列冲孔位置和大小由数控加工程序自动控制，指定长度的角钢加工开始前先进行剪切，加工结束后进行剪切和打码。每次冲孔之前，需要夹紧角钢，冲孔之后再松开角钢，因此每一个冲孔周期同时包括夹紧、冲孔、松开动作发出的声音，这些声音之间的间隔时间很短。而两孔之间存在一定距离的输送，因此两次冲孔之间的时间间隔较长。

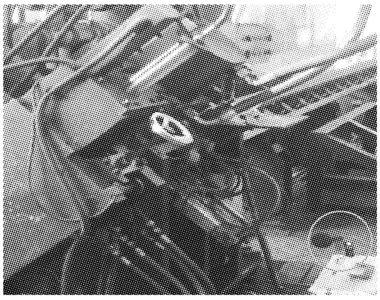


1—输送滚轮；2—角钢；3—冲头；4—夹紧装置；5—剪切装置。

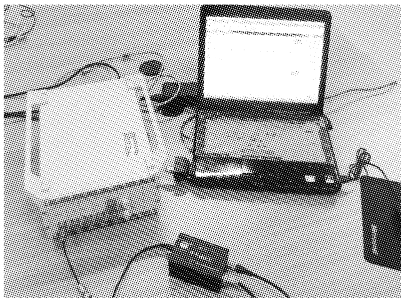
图 2　角钢加工示意图

Fig. 2　Schematic drawing angle steel processing

由于一系列冲孔动作是连续进行的，利用现成的采集仪只能进行连续采集。如果需要进一步区分不同动作产生的声音信号，可以采样后用软件实现，或者在试验系统中增加行程开关自行开发采集系统。基于实验室现有设备搭建的试验系统如图 3 所示，主要由声音传感器和信号采集仪 2 部分组成。



a)



b)

图3　试验系统图

Fig. 3　Test system diagram

1) 传感器的选择　选用四川瞭望公司TZ-2KA型声音传感器。该声音传感器具有宽声频范围、高声强动态范围等特点，将声音信号以50 mV/Pa转化为电压信号输出，可测量声音频率为20 Hz～20 kHz。该传感器自带信号调理盒，实现传感器的供电及电压转换。

2) 信号采集仪的选择　选用江苏东华公司DHDAS型信号采集仪。该信号采集仪将信号进行A/D转换，能够实现信号的实时显示、存储，也可进行频谱分析、统计参数计算。该采集仪采集得到的信号可导出为Matlab可识别的数据文件，从而做进一步分析和处理。

根据声音的相关特性可知，距离声源越近，辐射声波的能量越大。为了避免其他噪声信号对所需声音信号产生的影响，综合考虑加工现场的环境，将声音传感器放置于距冲头50 cm处，如图3 a)所示，图3 b)所示为信号采集仪。

3　试验信号采集

在加工过程中，角钢的型号有4种，宽度(mm，下同)×厚度(mm，下同)分别为63×5，80×6，100×7，90×8。在角钢的加工过程中，利用声音传感器和信号采集仪采集角钢冲孔时的声音信号。通过试验观察，加工角钢时声音信号的最高频率约为3 000 Hz，因此本文设置对声音信号的采样频率为10 kHz。利用DHDAS采集仪采集到的连续声音信号的时域波形如图4所示，包括一系列冲孔动作发出的声音。

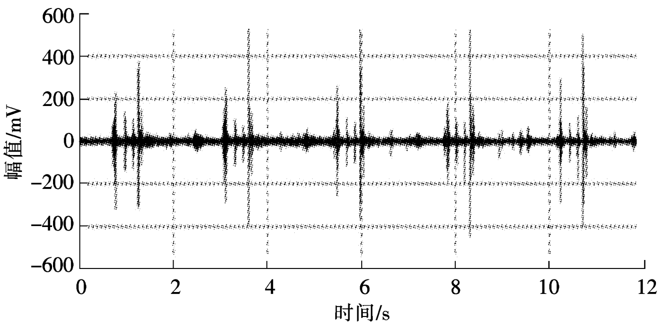


图4　声音信号时域波形

Fig. 4　Time-domain waveform of sound signal

为了对一系列冲孔动作进行区分，可利用Matlab软件从连续波形中去掉开始和结束时的声音，并截取单个冲孔周期的声音信号[20-22]。针对4种型号的Q235和Q345两种材质的角钢，一个冲孔周期的声音信号如图5和图6所示，时长大约为1.2 s，包括夹紧、冲孔和松开动作发出的声音。通过观察每个冲孔周期内声音信号的时域波形，不能看出明显的区别，因此需要对信号做进一步处理和分析。

4　试验信号处理与材质检测

为了进一步识别不同型号的两种角钢材质的声音信号，对采集到的单周期声音信号提取MFCC特征参数，利用DTW识别算法进行材质检测，流程图如图7所示。首先读入待测声音信号，然后利用Matlab软件对声音信号进行预处理操作，并提取声音信号的MFCC参数。将待测模板中的MFCC特征序列分别与Q235和Q345标准模板中的MFCC特征序列进行比较，利用DTW方法计算匹配距离，每一个待测声音信号将获得2个匹配距离，匹配距离最小者为待测声音信号的识别结果。

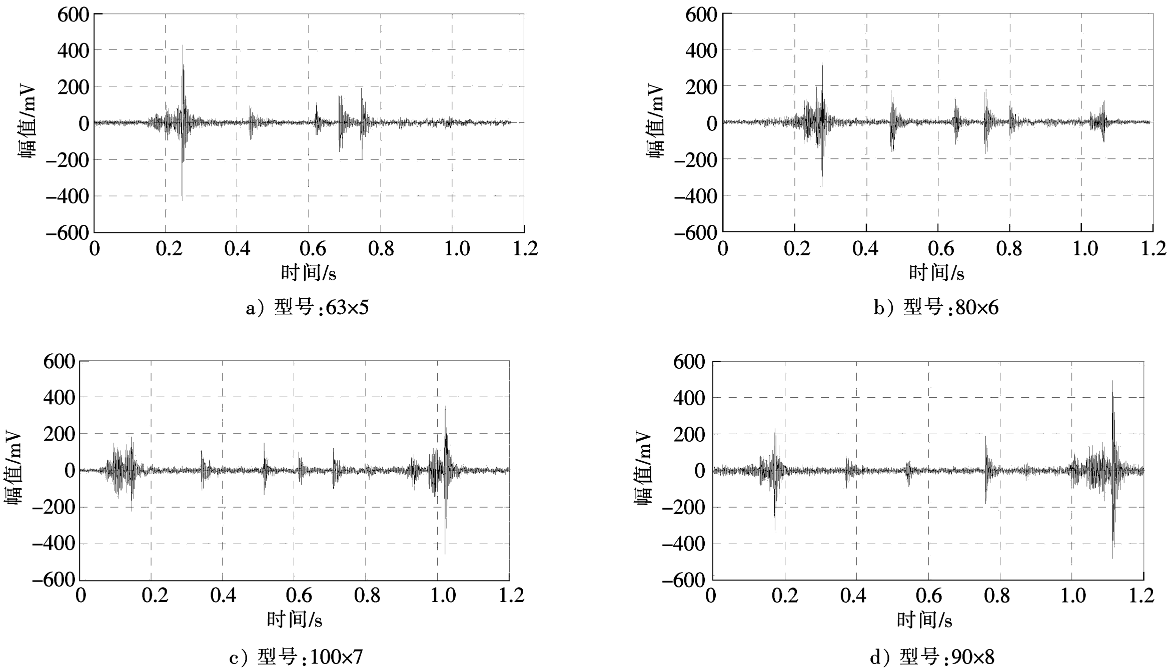


图 5　Q235 声音信号单周期时域波形

Fig. 5　Single cycle time-domain waveform of Q235' s sound signal

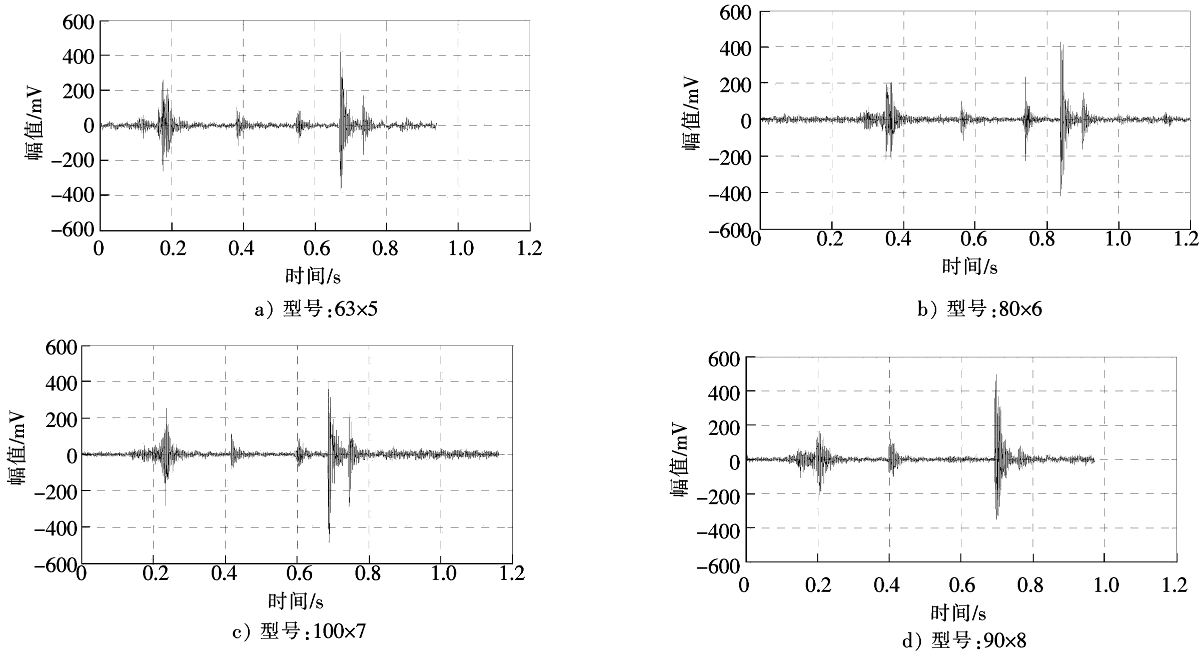


图 6　Q345 声音信号单周期时域波形

Fig. 6　Single cycle time-domain waveform of Q345's sound signal

针对宽度×厚度为 63×5，80×6，100×7，90×8 型号的角钢，分别取 10 个样本，其中 5 个样本为 Q235 材质角钢，5 个样本为 Q345 材质角钢。试验时需要首先确定对应型号 Q235 材质和 Q345 材质的声音信号作为两个标准模板，各个样本作为待测模板。

计算所得匹配距离如表 1— 表 4 所示，比较两个匹配距离，匹配距离小的就是该标准模板对应的材质。样本的检测结果均正确，说明该方法能有效识别 Q235 和 Q345 两种材质。但在试验过程中也发现，当采用不同样本作标准模板时，表 1 所示样本 5 * 会出现识别结果错误，即将 Q235 的样本误认为 Q345，而将 Q345 的样本误认为 Q235。这可能是因为 63×5 的角钢厚度较小，冲孔时声音信号较小，周围环境的噪声影响相应的

比较大。在今后的研究中，拟引入改进算法，提高识别的抗噪性；另外，拟引入神经网络等算法，以降低检测对于单一标准模板的依赖性，进一步提高检测的准确率。

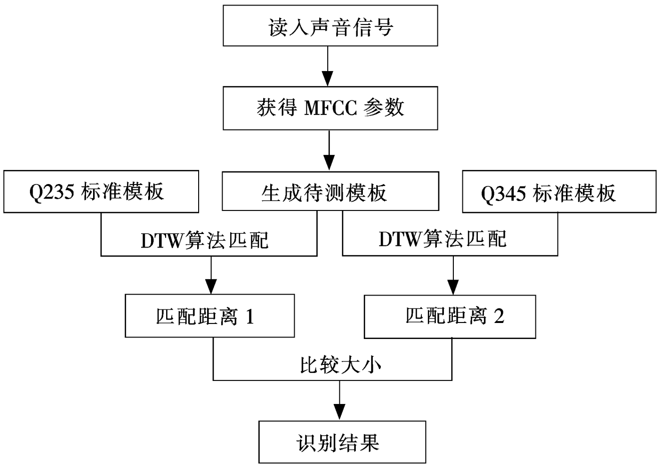


图 7　DTW 识别算法的流程图

Fig. 7　Flow chart of DTW recognition algorithm

表 1　型号 63×5 的测试信号与标准模板 DTW 匹配距离（$\times 10^3/mV^2$）比对结果

Tab. 1　Matching on test signal and standard template based on DTW distance of model 63×5

模板	Q235				Q345	Q345				Q235
	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5*	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5*
Q235 标准模板	6.36	6.12	5.61	6.60	5.78	6.14	6.08	6.98	7.43	7.32
Q345 标准模板	7.58	7.91	6.67	7.44	7.37	4.58	5.61	6.02	6.17	6.38
识别结果	Q235					Q345				

表 2　型号 80×6 的测试信号与标准模板 DTW 匹配距离（$\times 10^3/mV^2$）比对结果

Tab. 2　Matching on test signal and standard template of based on DTW distance model 80×6

模板	Q235					Q345				
	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5
Q235 标准模板	7.33	7.17	7.74	6.77	6.99	8.02	8.70	7.75	8.06	8.56
Q345 标准模板	8.69	8.76	8.23	8.33	8.03	7.74	7.85	2.85	6.89	7.77
识别结果	Q235					Q345				

表 3　型号 100×7 的测试信号与标准模板 DTW 匹配距离（$\times 10^3/mV^2$）比对结果

Tab. 3　Matching on test signal and standard template of based on DTW distance model 100×7

模板	Q235					Q345				
	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5
Q235 标准模板	8.81	6.91	8.02	7.45	7.53	7.98	7.20	7.46	8.56	7.84
Q345 标准模板	10.6	8.84	9.93	7.99	8.97	6.03	3.72	4.87	5.94	5.32
识别结果	Q235					Q345				

表 4　型号 90×8 的测试信号与标准模板 DTW 匹配距离（$\times 10^3/\mathrm{mV}^2$）比对结果

Tab. 4　Matching on test signal and standard template based on DTW distance of model 90×8

模板	Q235					Q345				
	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5
Q235 标准模板	8.03	5.37	7.91	9.95	8.57	8.63	8.60	8.01	8.54	8.27
Q345 标准模板	10.1	10.3	11.0	10.6	10.8	7.18	6.90	7.15	7.52	7.33
识别结果	Q235					Q345				

5　结　语

本文针对铁塔加工过程中的实际问题，利用在角钢加工过程中产生的声音信号，提取每个周期信号的 MFCC 参数，利用 DTW 算法，可以准确检测不同型号的 Q235 和 Q345 两种材质角钢。在采集信号过程中，声音传感器应放置在距冲孔区较近位置，以避免噪声对信号的干扰；同时，在利用 DTW 方法进行识别时，取样的时间不能相差过大，否则会导致帧数差别过大，造成结果不稳定。在加工生产中，该方法能够方便地对每一根角钢进行识别，且成本低、效率高，从而有效避免了在铁塔加工过程中因钢材材质问题对铁塔的安全性造成影响。

参考文献/References：

[1]　何敏娟，梁峰，马人乐. 大型超高钢结构电视塔模拟地震振动台试验研究[J]. 振动与冲击，2010，29(1)：77-80.
HE Minjuan，LIANG Feng，MA Renle. Shaking table test for a super high steel TV tower[J]. Journal of Vibration and Shock，2010，29(1)：77-80.

[2]　肖汉光，何为. 基于 MFCC 和 SVM 的说话人性别识别[J]. 重庆大学学报，2009，32(7)：770-774.
XIAO Hanguang，HE Wei. Gender recognition of speakers based on MFCC and SVM[J]. Chinese Journal of Chongqing University，2009，32(7)：770-774.

[3]　田昊，唐力伟，陈红，等. 基于瞬态声与阶次倒谱的齿轮箱故障诊断[J]. 振动、测试与诊断，2009，29(2)：137-140.
TIAN Hao，TANG Liwei，CHEN Hong，et al. Fault diagnosis of gearbox by using transient acoustic signal and order cepstrum[J]. Journal of Vibration，Measurement & Diagnosis，2009，29(2)：137-140.

[4]　樊彬彬，陈红冬，刘纯. 500 kV 输电线路铁塔横担变形材质检测及失效分析[J]. 湖南电力，2009，29(4)：18-22.
FAN Binbin，CHEN Hongdong，LIU Chun. Material test of cross arm of 500 kV transmission line tower[J]. Hunan Electric Power，2009，29(4)：18-22.

[5]　刘方，沈长青，何清波，等. 基于时域多普勒校正和 EEMD 的列车轴承道旁声音监测故障诊断方法研究[J]. 振动与冲击，2013，32(24)：104-109.
LIU Fang，SHEN Changqing，HE Qingbo，et al. Wayside acoustic fault diagnosis for locomotive bearings based on doppler effect correction and EEMD method in time domain[J]. Journal of Vibration and Shock，2013，32(24)：104-109.

[6]　王宪忠，吴凤林，张东浩，等. 基于 SVM 后端校正的含噪声机械故障分类方法[J]. 机械强度，2014，36(2)：179-182.
WANG Xianzhong，WU Fenglin，ZHANG Donghao，et al. Noisy fault classification of mechanical based on SVM back-end correction[J]. Mechanical Strength，2014，36(2)：179-182.

[7]　王伟，邓辉文. 基于 MFCC 参数和 VQ 的说话人识别系统[J]. 仪器仪表学报，2006，27(6)：2253-2255.
WANG Wei，DENG Huiwen. Speaker recognition system using MFCC features and vector quantization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2006，27(6)：2253-2255.

[8]　贺玲玲，周元. 基于改进 MFCC 的异常声音识别算法[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版)，2012，29(2)：52-57.
HE Lingling，ZHOU Yuan. Abnormal audio recognition algorithm based on improved MFCC[J]. J Chongqing Technol Business Univ (Nat Sci Ed)，2012，29(2)：52-57.

[9]　惠博. 语音识别特征提取算法的研究及实现[D]. 西安：西北大学，2008.
HUI Bo. The Research of Feature Extraction Algorithm for Speech Recognition and the Realization[D]. Xi'an：Northwestern University，2008.

[10]　陈勇，屈志毅，刘莹，等. 语音特征参数 MFCC 的提取及其应用[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版)，2009，35(1)：106-107.
CHEN Yong，QU Zhiyi，LIU Ying，et al. The extraction and application of phonetic characteristic parameter MFCC[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)，2009，35(1)：106-107.

[11] 颜鑫，李应. 利用抗噪幂归一化倒谱系数的鸟类声音识别[J]. 电子学报，2013，41(2)：295-300.
YAN Xin，LI Ying. Anti-noise power normalized cepstral coefficients in bird sounds recognition[J]. Acta Electronica Sinica，2013，41(2)：295-300.

[12] COWING M，SITTER R. Comparison of techniques for environmental sound recognition[J]. Pattern Recognition Letters，2003，22(15)：2895-2907.

[13] 姚晓欣. 环境异常状况声音特征研究[D]. 北京：北方工业大学，2014.
YAO Xiaoxin. Research on Sound Characteristics of Environmental Abnormalities[D]. Beijing：North China University，2014.

[14] 刘长明，任一峰. 语音识别中 DTW 特征匹配的改进算法研究[J]. 中北大学学报(自然科学版)，2006，27(1)：37-40.
LIU Changming，REN Yifeng. A research on improving the algorithm for DTW feature -matching in speech recognition[J]. Journal of North University of China (Natural Science)，2006，27(1)：37-40.

[15] 陈立万. 基于语音识别系统中 DTW 算法改进技术研究[J]. 微计算机信息，2006，22(2)：267-269.
CHEN Liwan. Discussion of DTW programming improved way on speech recognition[J]. Microcomputer Information，2006，22(2)：267-269.

[16] 万春. 基于 DTW 的语音识别应用系统研究与实现[J]. 集美大学学报(自然科学版)，2002，7(2)：104-108.
WAN Chun. Research and application of DTW-based speech recognition[J]. Journal of Jimei University (Natural Science)，2002，7(2)：104-108.

[17] 文翰，黄国顺. 语音识别中 DTW 算法改进研究[J]. 微计算机信息，2010，26(7)：195-197.
WEN Han，HUANG Guoshun. A research on improving DTW in speech recognition[J]. Microcomputer Information，2010，26(7)：195-197.

[18] 郭利刚，赵凡. 声音匹配识别算法的研究与实践[J]. 中国传媒大学学报(自然科学版)，2007，14(1)：20-25.
GUO Ligang，ZHAO Fan. Research and practice of sound match recognition algorithm[J]. Journal of Communication University of China (Science and Technology)，2007，14(1)：20-25.

[19] 张震宇. 基于 Matlab 的语音端点检测实验研究[J]. 浙江科技学院学报，2007，19(3)：197-201.
ZHANG Zhenyu. Experimental study on speech endpoint detection based on Matlab[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology，2007，19(3)：197-201.

[20] 李振国，宋吉江，李月然. 基于虚拟仪器的声音识别系统设计[J]. 山东理工大学学报(自然科学版)，2011，25(1)：101-103.
LI Zhenguo，SONG Jijiang，LI Yueran. Design of audio-recognition system based on virtual instrument[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)，2011，25(1)：101-103.

[21] 韩琪. 基于虚拟仪器的数据采集与分析系统研究与设计[D]. 北京：北京交通大学，2012.
HAN Qi. The Research and Design of Date Acquisition and Analysis System[D]. Beijing：Beijing Jiaotong University，2012.

[22] 刘羽. 语音端点检测及其在 Matlab 中的实现[J]. 计算机时代，2005(8)：25-26.
LIU Yu. Voice activity detection and its implementation in Matlab[J]. Computer Age，2005(8)：25-26.