

人工神经网络对爆炸物太赫兹光谱的识别

李微微 冯瑞姝 周庆莉 张存林

(首都师范大学物理系北京市太赫兹波谱与成像重点实验室省部共建太赫兹光电子重点实验室, 北京 100048)

摘要 为了研究爆炸物在太赫兹波段的光谱特性,进而对爆炸物进行检测和识别,利用太赫兹时域光谱系统 (THz-TDS),对 RDX, HMX, DNT, PETN, TNPG 五种纯品炸药以及以 RDX 为基底的混合炸药 (8701, PW0, R791, R852, 塑性炸药 (SU-1)) 和以 HMX 为基底的混合炸药 (8702) 的太赫兹吸收光谱在真空条件下进行了测量。然后用两种人工神经网络 (ANNs)—自组织 (SOM) 神经网络和多层感知器 (MLP) 神经网络—对爆炸物吸收光谱进行了识别,经过不断地学习和训练,取得了较好的鉴别结果,正确率高于 95%。实验结果表明,用两种神经网络可以实现对纯品炸药和混合炸药的识别,为太赫兹光谱技术用于爆炸物的检测和识别提供了一种有效的方法。

关键词 光谱学; 太赫兹光谱; 爆炸物识别; 自组织神经网络; 多层感知器

中图分类号 O433.4; O235 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200929s1.0266

Identification of Terahertz Absorption Spectra of Explosives by Artificial Neural Networks

Li Weiwei Feng Ruishu Zhou Qingli Zhang Cunlin

(*Department of Physics, Capital Normal University, Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing 10048, China*)

Abstract In order to study the spectroscopic characters of explosives in the terahertz region and realize the identification of explosives, the terahertz absorption spectra of explosives have been measured by using terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) system. These samples which include pure explosives RDX, HMX, DNT, PETN, TNPG and mixed explosives 8701, PW0, R791, R852, SU-1, 8702 were then identified by two types of artificial neural networks (ANNs)—self-organized mapping (SOM) and multi-layer perceptron (MLP)—through repetitive modeling and adequate training. High positive identification rate (above 95%) and low false alarm rates have been gained. The results indicate that it is feasible to apply these two ANNs on the identification of different types of explosives, and it also provides an effective method in the inspection and identification for explosives using THz-TDS.

Key words spectroscopy; terahertz spectra; identification of explosives; self-organized mapping; multi-layer perceptron

1 引言

由于国际恐怖主义日益猖獗,对爆炸物和相关化合物的探测对国家安全和防御也越来越重要。而且多种爆炸物分子的转动和振动谱位于太赫兹频段 (100 GHz~10 THz),近年来已经利用太赫兹时域光谱技术 (THz-TDS) 对爆炸物进行探测和鉴别^[1~3]。THz-TDS 可以对爆炸物进行无损的、非电离的和高灵敏度的光谱测量。爆炸物吸收谱的测量是太赫兹光谱研究的重要组成部分,也是用人工神

经网络对爆炸物、毒品等非法物质进行检测和识别的重要依据^[4,5]。采用神经网络软件 (NueralSight) 对几种爆炸物的吸收光谱进行了训练和识别,取得了比较好的结果。

2 爆炸物太赫兹吸收谱的测量方法

对 5 种单质爆炸物和 6 种混合爆炸物的吸收谱进行了测量,其中包括 (1) RDX-环三次甲基三硝胺 (俗称黑索今), (2) HMX-环四次甲基四硝胺 (俗称

基金项目: 国家 973 计划 (2007CB310408) 资助课题。

作者简介: 李微微 (1981—), 女, 硕士研究生, 主要从事太赫兹光谱检测方面的研究。E-mail: lw2001427@tom.com

导师简介: 张存林 (1961—), 男, 教授, 博士, 主要从事太赫兹及红外波谱与成像方面的研究。

奥克托金), (3)DNT-2,4-二硝基甲苯, (4)PETN-季戊四醇四硝酸酯, (5)TNPG-2,4,6-三硝基-1,3,5-三羟基苯纯品炸药以及以RDX为基底的混合炸药[8701, PW0, R791, R852, 塑性炸药(SU-1)]和以HMX为基底的混合炸药(8702)。炸药样品均混以聚乙烯粉末, 混合比例为2:1, 总重150 mg, 混合后研磨, 用压片机以5 T的重量压片, 样品片的厚度约为1 mm。实验装置为太赫兹时域光谱系统^[6]。

爆炸物在太赫兹波段的特征吸收光谱如图1、图2和图3所示。图1显示了在0.2~2.5 THz波段内, 五种纯品炸药(RDX, HMX, DNT, PETN, TNPG)存在不同的特征吸收, 这是由于爆炸物分子结构不同导致的; 由图2和图3可知, 混合炸药的吸收峰与其对应的基底炸药有相同的特征峰。这些爆炸物的指纹谱, 充分体现了爆炸物在太赫兹波段的吸收特性, 也为确定爆炸物的类型和种类提供了依据。因此通过一定的识别算法就能够方便有效的对爆炸物进行探测和无损检测。

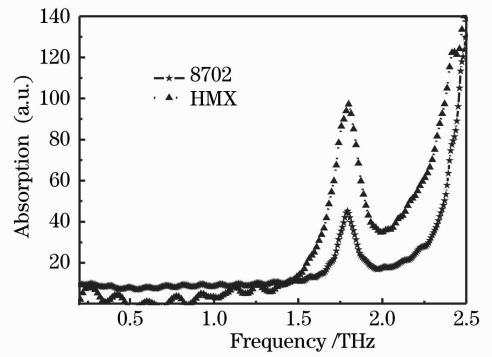


图3 HMX和8702的吸收光谱

Fig. 3 Absorption spectra of 8702 and HMX respectively

3 神经网络对爆炸物的识别

3.1 自组织和多层感知器两种神经网络的介绍

自组织神经网络模拟大脑神经系统自组织特征映射的功能, 是一种竞争式学习网络, 在学习中能无监督地进行自组织学习, 通过自身训练, 自动对输入模式进行聚类。自组织映射的主要目的是将任意维数的输入信号模式转变为一维或二维的离散映射, 并且以拓扑有序的方式自适应实现这个变换。SOM网络中, 某个输出结点能对某一类模式做出特别的反应以代表该模式类, 输出层上相邻的结点能对实际模式分布中相近的模式类做出特别的反应, 当某类数据模式输入时, 对某一输出结点产生最大刺激(获胜结点), 同时对获胜结点周围的一些结点产生较大刺激。在训练的过程中, 不断对获胜结点的连接权值作调整, 同时对获胜结点的邻域结点的连接权值作调整。随着训练的进行, 这个邻域范围不断缩小, 直到最后, 只对获胜结点进行细微的连接权值调整^[7]。

多层感知器神经网络的信息是逐层向前传播的, 下层的各单元与上一层的每个单元相连。输入单元按照输入/输出关系式逐层进行操作, 每层之间的连接权值可以通过学习规则进行调整。MLP在网络结构上通常采用典型的三层网络结构, 即由输入层、隐含层和输出层组成。若输出层未得到期望的输出结果, 则进行误差的反向传播, 误差信号沿原连接路径返回。网络则根据反向传播的误差信号修改各层的连接权值, 使误差达到最小。它主要应用于模式识别、函数逼近及逻辑功能运算等方法^[8]。

鉴于识别数据类型和识别目的的需要, 只采取NueralSight软件中的两种建模方法对样品进行识别: 自组织映射和分类建模方法。这两种方法是分别基于SOM和MLP开发的。

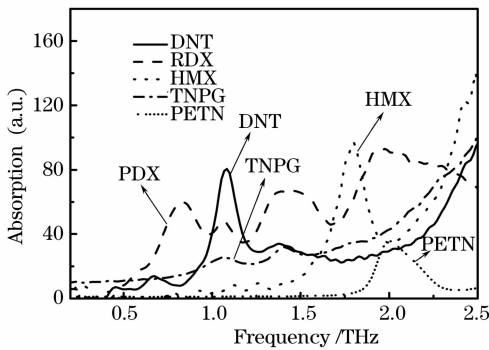


图1 RDX, HMX, DNT, PETN, TNPG 纯品炸药的吸收光谱

Fig. 1 Absorption spectra of pure explosives (RDX, HMX, DNT, PETN, TNPG)

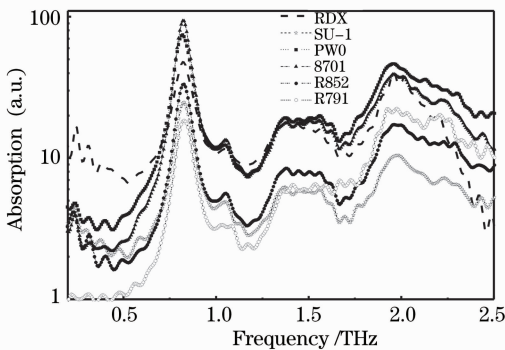


图2 RDX以及以其为基底的混合爆炸物的吸收光谱 8701, PW0, R791, R852, 塑性炸药(SU-1)和纯RDX的吸收光谱
Fig. 2 Absorption spectra of 8701, PW0, R791, R852, plastic explosive (SU-1) and pure RDX respectively

3.2 识别结果

用 THz-TDS 进行多次实验,获得在氮气下(湿度低于 4%)爆炸物的光谱,经处理后得到吸收光谱,在处理过程我们采取了归一化,主成份提取等方法,使识别正确率提高,缩短了训练和识别时间。

3.2.1 用自组织映射建模方法对爆炸物的识别结果

输入的训练数据为五种纯品炸药的吸收谱,RDX,HMX,DNT,PETN 和 TNPG 分别有 50,50,50,50,40 个光谱数据。该 SOM 网络有 40 个神经元,特征映射图为 8×5 的二维拓扑结构。学习速度为 0.6,收敛阈值为 0.01,训练次数为 1000 次。如图 4 所示,每一个被黑线分割开的区域代表一种爆炸物,同种类爆炸物基本被聚类在同一区域,只有 RDX 和 HMX 有小部分交叉,说明此模式聚类结果很好,故用其对未知爆炸物数据进行聚类和识别。

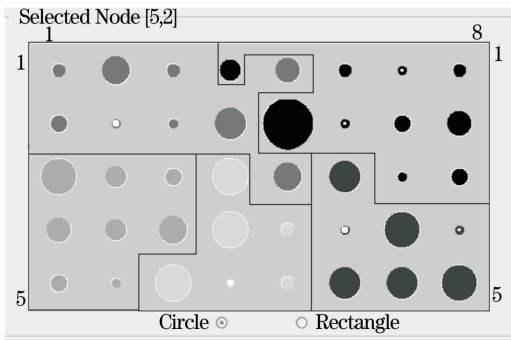


图 4 自组织映射建模方法对 5 种爆炸物的聚类结果

Fig. 4 The cluster results of the 5 types of explosives based on the SOM model

图 5 中,被识别的爆炸物为 HMX,共 20 个光谱数据,被网络映射到 6 个节点中,与图 4 对比可知,六个节点全部映射到 HMX 所在区域,因此全部正确识别。(其他 8 种爆炸物映射图的节点坐标及识别正确率见表 1)。

从表 1 中可见,HMX,RDX 和 PETN 都能被正确地识别出来。8701, R791, R852, PW0, SU-1,8702 都被识别成了它们相应的基底炸药-RDX

表 2 分类建模方法对 5 种爆炸物的训练结果

Table 2 Training result of 5 types of explosives based on classification model

Class	Accuracy	RDX	DNT	HMX	Pent	TNPG	Total
RDX	1.000	50	0	0	0	0	50
DNT	1.000	0	50	0	0	0	50
HMX	1.000	0	0	50	0	0	50
Petn	1.000	0	0	0	50	0	50
TNPG	1.000	0	0	0	0	40	40
Total	1.000	50	50	50	50	50	240

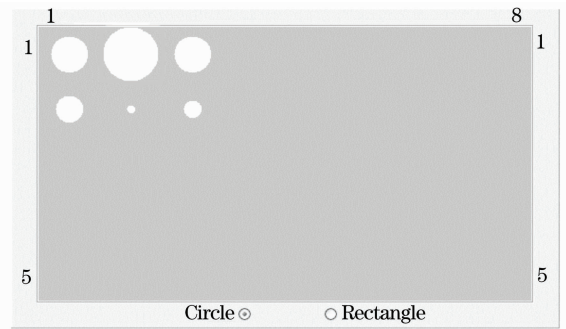


图 5 自组织映射建模方法对 HMX 的识别结果

Fig. 5 The identification result of HMX based on SOM model

和 HMX。原因是这 6 种混合炸药的吸收光谱与其基底炸药的吸收谱极其相似^[5],神经网络虽然无法识别出它们分别属于哪种混合炸药,但实现了混合炸药基底成份的初步识别,这对爆炸物的识别与光谱研究也是有重要意义的。

表 1 自组织映射对 9 种爆炸物的识别结果

Table 1 The identification results of 9 types of explosives based on SOM

Class	Coordinate	Accuracy
HMX(20)	(1,1),(2,1),(3,1), (1,2),(2,2),(3,2)	100%
RDX(20)	(4,1),(5,2)	100%
PETN(20)	(1,4),(2,5),(3,4),(3,3)	100%
8701(8)	(8,3),(6,1)	100%
R791(8)	(7,1),(7,2),(8,1)	100%
R852(8)	(6,1),(8,1),(7,2)	100%
PW0(8)	(6,1),(7,2),(8,2),(7,3)	100%
SU-1(8)	(6,1),(7,2)	100%
8702(8)	(5,1),(4,2),(5,3)	100%

3.2.2 分类建模方法对爆炸物的识别结果

此种方法的训练与识别数据与 SOM 建模方法所用数据相同。此 MLP 网络为 3 层网络结构,输入层、隐含层和输出层的神经元个数分别为 40,2,5。学习规则采用的是适应性梯度法。分类结果如表 2 所示,五种炸药全部正确分类,分类准确率达到 100%。

如表 3 所示,实验结果表明,分类建模方法对 3 种纯品炸药,6 种混合炸药的识别结果较好,正确率接近 100%。

表 3 分类建模方法对 9 种爆炸物的识别结果

Table 3 Identification results of 9 types of explosives based on classification model

输入炸药	输出结果	识别次数	输出正确结果次数	正确识别率
RDX	RDX	20	20	100%
HMX	HMX	20	19	95%
PETN	PETN	20	20	100%
8701	RDX	8	8	100%
R791	RDX	8	8	100%
R852	RDX	8	8	100%
PW0	RDX	8	8	100%
SU-1	RDX	8	8	100%
8702	HMX	8	8	100%

4 讨 论

自组织映射建模方法和分类建模方法对炸药的识别结果都比较好,原因是太赫兹时域光谱系统很稳定,不同时间获得的相同爆炸物的吸收谱基本一致,这就使得神经网络对其识别的正确率很高。在训练和识别过程中发现,对数据的预处理,包括归一化,主成分分析等方法对提高训练速度和识别正确率是非常必要的^[9,10]。由于时间等条件的限制,实验获得数据量较少,将在今后的工作中,获得更多的爆炸物在不同环境条件的吸收谱,作为训练数据,丰富样品库,以达到更好的识别结果。

5 结 论

用 THz-TDS 系统对 5 种单质爆炸物和 6 种混合爆炸物的吸收光谱进行测量,并利用了 SOM 和 MLP 两种神经网络对纯品炸药的光谱数据进行

了训练和识别,并且获得了高于 95% 的识别正确率。实验结果表明,神经网络可对爆炸物及相关化合物的太赫兹指纹谱进行识别,并且可以鉴别出混合炸药的基底成份。因此利用神经网络对爆炸物的分类和识别,为太赫兹光谱技术用于爆炸物的检测提供了一种有效的方法,且可推动太赫兹时域光谱技术在安全检查等方面的实际应用。

参 考 文 献

- 1 John F Federici, Brian Schulkin, Feng Huang *et al.*. THz imaging and sensing for security applications-explosives, weapons and drugs [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, **20**: 266~280
- 2 Michael J. Fitch, Dunja Schauki, Caroline Dodson *et al.*. THz spectroscopy of explosives and related compounds [C]. *SPIE*, 2004, **541**: 84~91
- 3 F. Oliveira, R. Barat, B. Schulkin *et al.*. Analysis of terahertz spectral images of explosives and bio-agents using trained Neural networks[C]. *SPIE*, 2004, 5411
- 4 Aparajita Bandyopadhyay, Amartya Sengupta, *et al.*. Artificial neural network analysis in interferometric thz imaging for detection of lethal agents [J]. *Int. J. Infrared Milli. Waves*, 2006, **27**: 1145~1158
- 5 Zhou Qingli, Zhang Cunlin, Li Weiwei *et al.*. Studies on the detection and identification of the explosives in the terahertz range, [C]. *SPIE*, 2007, 143
- 6 Y. Hu, P. Huang, L. Guoa, *et al.*. Terahertz spectroscopic investigations of explosives [J]. *Phys. Lett. A*, 2006, 359, 728
- 7 T. Kohonen, E. Oja, O. Simula *et al.*. Engineering applications of the self-organizing map [J]. *Proc. IEEE*, 1996, **84**: 1358~1384
- 8 Wang Zhicang, Deng Wei. Research on multilayer perceptron learning algorithm [J]. *J. Qinghai Normal University (Natural Science)*, 2007, **1**: 37~39
王之仓, 邓伟. 多层感知器学习算法研究 [J]. 青海师范大学学报(自然科学版)2007, **1**: 37~39
- 9 Bian Zhaoqi, Zhang Xuegong *et al.*. Pattern Recognition [M]. 2nd ed., Beijing: Tsinghua University Press, 2007. 212~226
边肇祺, 张学工等. 模式识别 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 212~226
- 10 Hua Zhong, Albert Redo-Sanchez, X. C. Zhang, Identification and classification of chemicals using terahertz reflective spectroscopic focalplane imaging system [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**: 9130