

引用格式:关欣,张玉虎,凌寒羽.电子扫描雷达信号主干工作模式的提取[J].电光与控制,2018,25(11):84-88. GUAN X, ZHANG Y H, LING H Y. Main pattern extraction of electronic scanning radar[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(11):84-88.

## 电子扫描雷达信号主干工作模式的提取

关欣, 张玉虎, 凌寒羽  
(海军航空大学, 山东烟台 264001)

**摘要:** 为了实现对电子扫描雷达工作状态的识别,分析了电子扫描雷达的工作过程和状态转换,通过得分矩阵动态地对两个截获信号状态转换序列进行公共序列的提取,识别电子扫描雷达的主干工作模式脉冲序列。仿真试验证明截获序列的长度对序列相似度影响不大,而电子扫描雷达的跟踪模式类型的增多和跟踪模式比例的减小能够提高对电子扫描雷达工作模式的识别效果。

**关键词:** 电子扫描雷达; 工作状态识别; 公共序列提取

中图分类号: TN957 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.11.016

## Main Pattern Extraction of Electronic Scanning Radar

GUAN Xin, ZHANG Yu-hu, LING Han-yu  
(Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** In order to recognize the operation mode of electronic scanning radar, analysis is made to the working process and mode transition of the electronic scanning radar. The common sequence of two intercepted signal state transition sequences is extracted dynamically by using the score matrix, and the main pattern of the electronic scanning radar is recognized. The experiments demonstrate that: 1) The length of the intercepted sequence has little effect on the sequence similarity; and 2) The increasing of types of tracking mode and the decreasing of the rate of the tracking mode are beneficial to the extraction of radar pattern.

**Key words:** electronic scanning radar; pattern recognition; common sequence extraction

### 0 引言

随着现代技术的不断发展,各种新体制雷达层出不穷,新体制雷达因其自身区别于传统体制雷达的特性和优势而大量装备部队,并加入新型战舰飞机的装备列表。其中,电子扫描体制雷达以其多波束形成能力、快速扫描能力、波束捷变能力等优势得到了广泛应用。电子扫描雷达最突出的特点和优势是具有搜索加跟踪(TAS)的工作模式,该模式的特点是搜索模式与跟踪模式的相互穿插,在这种情况下,电子扫描雷达的主干工作模式是搜索目标,并能够在扫描的波位变化序列中插入一些优先级更高的跟踪波位和制导波位等,这样在电子扫描雷达完成搜索任务的同时执行一些其他的优先级更高的任务。对于一部电子扫描雷达来说,其对搜索任务空域的搜索过程是由波位控制表来控制的,而且是在进行目标搜索时就已经确定的,

然而在雷达搜索的目标空域中对目标的跟踪和对武器的制导,则是根据目标搜索得到的目标信息以及己方武器平台的发射参数等来决定的,这都是随机变化的。因此,电子扫描雷达工作时的状态变化方式和其中的不变性是对电子扫描雷达进行识别的一个突破口。

专家学者们对基于电子扫描雷达工作状态的变化过程来识别电子扫描雷达的方法所进行的科学研究还是相对较少,取得的成果也屈指可数。文献[1]通过句法模式识别对雷达序列脉冲参数进行了训练识别,但是未对雷达的工作模式进行识别;文献[2]借鉴了生物学中的信息分析比对技术,提出了通过对两个不同时间侦察得到的序列比对,获得其中的相似部分,并进行电子扫描雷达的识别。文中先通过对两个信号进行时间上的对准,然后采用经典的 Needleman-Wunsch 算法提取两个序列的不变子序列,最后回溯得到最终的识别结果;但是其假设是我方电子侦察设备截获了敌方雷达一个完整的搜索跟踪的序列,而在现实中这是不可能的。

本文通过分析电子扫描雷达的工作模式序列的生成和不同时间的序列的特点,结合 Needleman-Wunsch 算

收稿日期:2017-10-31 修回日期:2017-12-08

作者简介:关欣(1978—),女,辽宁锦州人,博士,教授,博导,研究方向为多源信息融合、智能信息处理。

法的思想,对两个电子扫描雷达工作模式序列提取公共特征,两个序列的相同子序列表示的是电子扫描雷达的主干工作模式的序列,而不同的序列则表示高优先级的序列,比如跟踪模式或者制导模式的信号序列。仿真实验结果表明了本文算法的有效性和实用性。

### 1 电子扫描雷达的工作模式转换

电子扫描雷达在对某一个目标搜索空域进行搜索时,雷达天线的馈电系统会通过天线控制器将目标搜索空域划分为几个不同的区域,并对其采用不同的数据率进行搜索。在每个搜索空域中,电子扫描雷达以正弦空间坐标系来对目标空域进行划分,如图 1 所示。

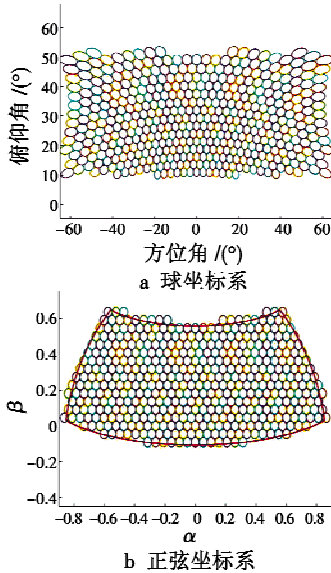


图 1 不同坐标系下的天线波位排布  
Fig.1 Beam position arrangement under different coordinates

在对目标空域进行目标搜索时,电子侦察设备截获的电子扫描雷达辐射源信号的工作模式的序列是一个固定信号序列的循环,因为电子扫描雷达对目标空域的搜索顺序是固定的,在每次搜索目标空域时电子侦察设备截获的信号序列就会重复一遍。因此,这也就是后面的公共序列提取的基础。

但是,电子扫描雷达不可能只对目标空域进行搜索,在搜索到目标后,电子扫描雷达会根据一定的需求执行一些高优先级的任务,包括对目标的跟踪任务和我方武器的制导任务。因此,一旦出现这类任务,电子扫描雷达需要先进行目标跟踪或者武器制导,从电子侦察设备的截获信号序列来看,就会在辐射源的搜索序列中的任何时刻都有可能出现任意数量的跟踪任务脉冲或者制导任务脉冲。因此,在不同时刻截获的电子扫描雷达信号脉冲序列的模式相同点就在于搜索模式序列的提取上,提取了电子扫描雷达的搜索模

式之后就可以对电子扫描雷达的工作模式进行识别。

### 2 工作模式转换理论模型

电子扫描雷达是一种多功能雷达,能够同时完成不同类型的任务,其中最典型的就是跟踪加搜索 TAS 模式<sup>[3]</sup>。不同类型的任务要求电子扫描雷达工作在不同的模式下,不同的工作模式也就决定了雷达信号脉冲参数之间存在着差异。电子扫描雷达的工作模式可以说是任务导向的,其工作流程如图 2 所示。

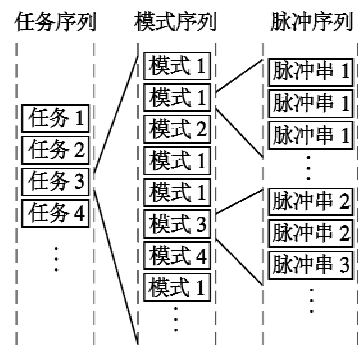


图 2 电子扫描雷达工作流程图  
Fig.2 Operational flow chart of AESA

电子扫描雷达的任务决定了采用的工作模式,工作模式又决定了天线辐射的脉冲序列。电子扫描雷达处于搜索状态时,在不同的搜索空域中采用的是不同的数据率<sup>[4]</sup>,因此搜索状态之间是存在不同的;同样地,对不同状态和不同威胁程度的跟踪目标,以及我方发射的、处于不同阶段的打击武器,雷达产生的跟踪信号序列和制导信号序列也不一样。由于跟踪信号序列与制导信号序列都是随机变化的,均与搜索信号序列不同,因此本文只考虑搜索信号序列中加入跟踪信号序列的模型。

电子扫描雷达在天线波束的搜索过程中,天线的波束宽度是会随波束指向角的变化而发生改变的,在电子扫描列天线的法线方向上,天线的波束宽度是最窄的,对目标的搜索也是最准确的;而等到天线波束扫描到天线阵面法线的大角度时,天线的波束宽度会展宽,等到天线扫描的最大角度 60°时,天线的波束宽度能够展宽到法线方向的两倍,此时雷达的角度分辨力和精度会下降,使得对目标的搜索性能下降,同时不同的波束高度角、天线的波束宽度也是不同的。为了达到最优的搜索效果,电子扫描雷达通过改变数据率等方式对这些区域进行搜索,提高在该区域的性能。

设电子扫描雷达的搜索序列信号脉冲参数  $S$  有  $M$  种,跟踪序列信号脉冲参数  $T$  有  $N$  种,则两种序列可以表示为

$$\begin{cases} S = \{P_{S1}, P_{S2}, P_{S3}, \dots, P_{SM}\} \\ T = \{P_{T1}, P_{T2}, P_{T3}, \dots, P_{TN}\} \end{cases} \quad (1)$$

那么,电子扫描雷达的全部序列信号脉冲参数  $P_{\text{Pulse}}$  表示为

$$P_{\text{Pulse}} = S \cup T \quad (2)$$

定义运算  $\text{insert}(x, A)$  为在序列  $x$  中随机位置插入一个符号  $A$ , 那么运算  $\text{insert}(x, y)$  表示将序列  $y$  中的元素依次随机插入序列  $x$  中。

并设电子扫描雷达的主干工作模式序列为

$$s_0 = P_{s1} P_{s2} \cdots P_{sM} \quad (3)$$

则电子扫描雷达的任何任务脉冲均为主干工作模式脉冲序列  $s_0$  中随机插入任意的跟踪脉冲序列  $T$  的组合。设获得的两个序列分别为  $e_1$  和  $e_2$ , 数学表达式为

$$e_1 = \text{insert}(s_1, t_1) \quad (4)$$

$$e_2 = \text{insert}(s_1, t_2) \quad (5)$$

式中:  $s_1$  为前文中的主干工作模式序列  $s_0$  的任意次的重复, 而且不一定是序列  $s_0$  的整数次重复;  $t_1$  和  $t_2$  为电子扫描雷达跟踪序列  $T$  中任意数量的参数的组合。

$$e_1 \cap e_2 \approx s_0 \quad (6)$$

两个序列提取的相同的序列是序列  $s_0$  的某个循环移位, 也是电子扫描雷达的主干工作模式。

### 3 电子扫描雷达信号主干工作模式提取方法

对于来自同一部雷达的两个信号脉冲序列来说, 采用的是同一种主干工作模式脉冲序列, 这是相同序列提取的基础; 而且在不同时间段中雷达跟踪目标的脉冲序列的时刻和跟踪时间长度也不相同, 甚至, 在未能提取出搜索模式的前提下, 哪一种搜索脉冲序列信号, 哪一种跟踪脉冲序列信号都是未知的。

文献[2-3]都对两个序列进行了时间对准和顺序调整, 但在实际应用中, 比对的两个序列中的搜索序列不一定是式(3)的整数倍的重复, 序列的对准难以实现, 不仅占用计算资源和计算时间, 而且意义不大。

#### 3.1 序列搜索模式提取

对两个序列进行搜索序列的提取就是对公共序列进行提取, 即在两个序列间寻找最大数量的相同序列。Needleman-Wunsch 算法是一种全局比对的动态规划算法, 本文采用该算法对公共序列进行提取。

##### 3.1.1 建立打分矩阵

打分矩阵是下一步对序列进行匹配打分的标准, 作为对称矩阵, 打分矩阵的行和列对应于两个序列中的模式和一个空位, 矩阵中的每个元素表示该位置的对应行状态与对应列状态配对的得分情况。假定得到的两个雷达信号序列为

$$\begin{cases} e_1 = ECDAEBCF \\ e_2 = FBCDEABC \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可见, 共有 6 种不同的雷达工作状态, 则

建立打分矩阵  $W_{7 \times 7}$ , 即

$$W_{7 \times 7} = \begin{matrix} & - & A & B & C & D & E & F \\ \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & - & A & B & C & D & E & F \end{matrix} \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 工作状态相同时得 1 分, 不同时得 0 分, “-”表示空位, 任何与“-”匹配的均得 0 分, 而空位与空位匹配没有意义, 因此也为 0 分。

##### 3.1.2 计算匹配得分矩阵

以一条序列  $e_1$  作为得分矩阵的行, 另一条序列  $e_2$  作为得分矩阵的列, 建立得分矩阵, 并在矩阵的第一行和第一列对应位置添加一行和一列空位的得分, 得分矩阵可以表示为

$$S_{\text{Score}} = (s_{ij})_{m_1 \times m_2} \quad (9)$$

式中:  $s_{ij}$  为序列  $e_1$  的前  $i$  项与序列  $e_2$  的前  $j$  项的匹配得分, 计算方法为

$$s_{ij} = \max \{ s_{(i-1)(j-1)} + w(e_1(i), e_2(j)), s_{(i-1)j} + w(e_1(i), -), s_{i(j-1)} + w(-, e_2(j)) \} \quad (10)$$

式中:  $w(A, B)$  表示在打分矩阵  $W$  中, 行为  $A$ , 列为  $B$  的元素的值。通过计算得分矩阵  $S_{\text{Score}}$  得到了两个序列之间在不同的空位插入方式中的得分。

通过上述步骤的计算, 得到序列  $e_1$  和序列  $e_2$  的得分矩阵为

$$S_{\text{Score}} = \begin{matrix} & - & F & B & C & D & E & A & B & C \\ \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 2 & 3 & 3 & 4 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 4 & 5 & 5 \\ 0 & 1 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 4 & 5 & 5 \end{pmatrix} & - & E & C & D & A & E & B & E & B & C \end{matrix} \quad (11)$$

##### 3.1.3 提取公共序列

通过计算得到的得分矩阵表示两个序列在给定打分标准下、不同空位插入时的匹配得分。如式(11)中, 最优得分为矩阵中的最大值 5, 因此, 以最右下角的 5 为起始点, 开始确定两个序列的空位插入情况。

在确定两个序列时, 遵循以下的原则:

- 1) 以最右下角的最大值点为起始点;

2) 每次选择该点的左侧、上侧、左上侧 3 个点中的最大值点作为下一个点；

3) 一直跳跃到矩阵的最左上角；

4) 矩阵中每次横向跳跃表示在左侧序列中对应位置后加入一个空位,同理每次竖向跳跃表示在上侧序列对应位置后加入一个空位。

确定完两个序列后对应位相同的就是两个序列的公共序列,如图 3 所示。

|   | F | B | C | D | E | A | B | C |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |   |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | E |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | C |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | D |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | A |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | E |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | B |
| 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | C |
| 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | F |

图 3 公共序列提取

Fig. 3 Common sequence extraction

由图 3 可知,序列  $e_1$  转换为

$$e_1' = -ECD - AEBCF \quad (12)$$

序列  $e_2$  转换为

$$e_2' = FBCDEA - BC - \quad (13)$$

公共序列为对应位相同的序列  $e_3 = CDABC$ 。

### 3.2 识别算法性能评价

本文识别算法的基础为两个待比对序列具有相同的搜索模式序列,而评价标准也就是识别出来的搜索模式序列与原搜索模式序列的相似程度。待比对序列中还会含有随机的跟踪序列,这是两个序列的不同之处,同时也会使得算法识别出的搜索模式序列存在一些错误。因此本文以搜索序列相似度  $P_m$  和误识别率  $P_f$  两个标准衡量算法的识别效果,即

$$P_m = M/L \quad (14)$$

$$P_f = \frac{N - M}{N} \quad (15)$$

式中: $M$  表示对算法识别出的搜索模式序列循环移位,得到的与原搜索模式序列相同个数的最大值; $N$  表示算法识别出的搜索模式序列的个数, $L$  表示原搜索模式序列的个数。因为算法识别出的序列的起始位置与原序列的起始位置不一定一致,因此在计算  $M$  时需要对其进行循环移位。

搜索序列相似度  $P_m$  描述了算法对搜索序列的识别能力;误识别率  $P_f$  则描述了算法识别的准确度。

## 4 仿真分析

仿真实验研究电子扫描雷达搜索序列类型固定,跟踪模式数变化的识别效果。

实验选定序列的搜索模式有 8 个,分别对 5 种跟踪模式情况进行对比实验,这 5 种情况包括:跟踪模式类型数为 4,6,8,10,12。计算搜索序列相似度  $P_m$  和误识别率  $P_f$ ,得到的仿真实验结果如图 4、图 5 所示。

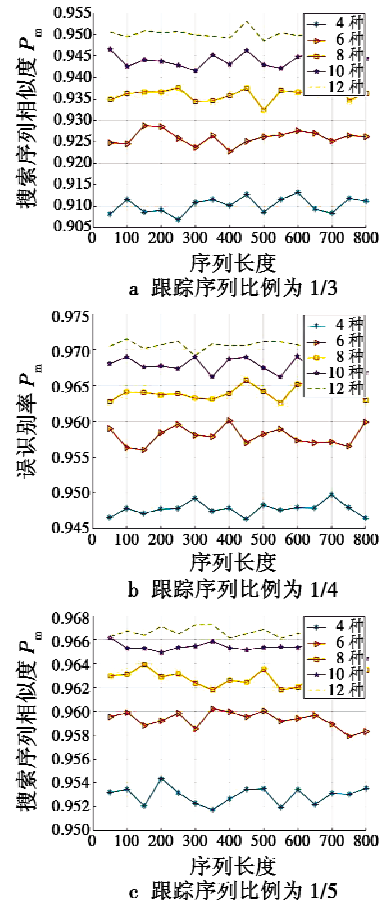
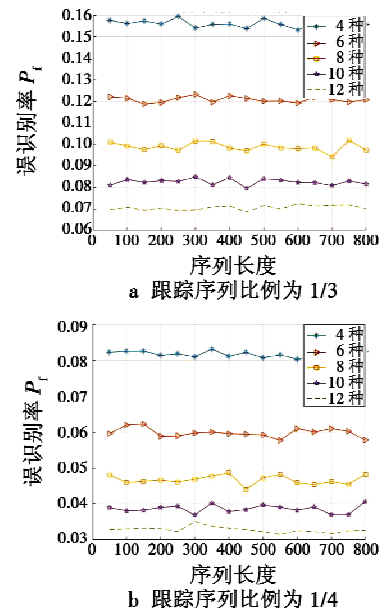


图 4 不同跟踪序列比例下的搜索序列相似度

Fig. 4 Sequence similarity under different rates of tracking sequence



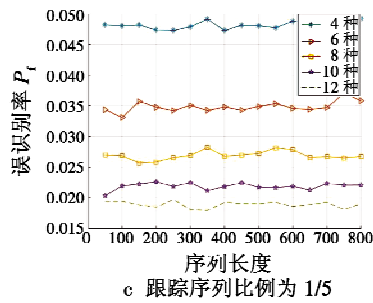


图5 不同跟踪序列比例下的误识别率  
Fig.5 False recognition rate under different rates of tracking sequence

由以上仿真实验结果可以看出,搜索序列相似度  $P_m$  均在90%以上,而误识别率  $P_f$  控制在了16%以下。

由图4和图5对比可知:在待对比序列的搜索模式序列类型一定时,序列长度对搜索序列相似度  $P_m$  和误识别率  $P_f$  几乎没有影响;而在跟踪模式比例一定时,跟踪模式的类型数越多,识别的序列相似度  $P_m$  越高,误识别率  $P_f$  越低;在跟踪模式的类型数一定时,跟踪模式比例越低,识别的序列相似度  $P_m$  越高,误识别率  $P_f$  越低。这是由于同样跟踪模式比例下,跟踪模式类型数越多,跟踪模式相同的机率就越低,从而使得序列相似度  $P_m$  越高,误识别率  $P_f$  越低;而跟踪模式类型

数相同时,跟踪模式比例越高,跟踪模式相同的机率就越高,使得序列相似度  $P_m$  越低,误识别率  $P_f$  越高。

## 5 结束语

本文分析了电子扫描雷达的工作过程和状态转换,通过对两个来自同一个雷达辐射源的状态转换序列进行公共序列提取,识别电子扫描雷达的主干工作模式序列,实现对电子扫描雷达工作模式的识别,并通过仿真分析研究了影响序列相似度  $P_m$  和误识别率  $P_f$  的因素。

## 参考文献

- [1] 陈艺廷,李鸿,李莹.基于句法模式识别的雷达识别方法研究[J].现代电子技术,2014,37(5):25-28.
- [2] 马爽,王莹桂,柳征,等.基于序列比对的多功能雷达搜索规律识别方法[J].电子学报,2012,40(7):1434-1439.
- [3] 李辉,郑坤,金炜东,等.基于多层次建模的机载相控阵雷达工作模式识别[J].电子对抗技术,2016,31(4):1-5,42.
- [4] 冀琛,潘谊春,郁春来,等.对相控阵雷达工作模式的资源调度研究[J].现代防御技术,2014,42(3):20-24.
- [5] DONOHO D L, JOHNSTONE J M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(3):425-455.
- [6] 张义昕,张海,吴平.改进的二阶互差分测量噪声方差估计算法[J].电光与控制,2016,23(8):13-17,38.
- [7] WU G, LUO S. Adaptive fixed-point iterative shrinkage/thresholding algorithm for MR imaging reconstruction using compressed sensing[J]. Magnetic Resonance Imaging, 2014, 32(4):372-378.
- [8] RAJWADE A, RANGARAJAN A, BANERJEE A. Image denoising using the higher order singular value decomposition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2013, 35(4):849-862.
- [9] 刘刚,周珩,王忠勇,等.空域-小波域联合滤波的红外复杂背景抑制[J].电光与控制,2015,22(5):37-40,45.
- [10] 徐联微,杨晓梅.基于迭代张量高阶奇异值分解的运动目标检测[J].计算机应用研究,2016,33(9):2856-2861.
- [11] XU Y Y. Fast algorithms for higher-order singular value decomposition from incomplete data[J]. Journal of Computational Mathematics, 2017, 35(4):397-422.
- [12] ZHANG X J, JAVIDI B, NG M K, et al. Automatic regularization parameter selection by generalized cross-validation for total variational poisson noise removal[J]. Applied Optics, 2017, 56(9):47-56.
- [13] XU Y B, PEI Y, DONG F. An extended L-curve method for choosing a regularization parameter in electrical resistance tomography[J]. Measurement Science & Technology, 2016, 27(9):63-74.
- [14] 姚智颖,刘冬,刘光斌.具有新目标函数的改进型变分贝叶斯[J].电光与控制,2011,18(8):45-46,55.
- [15] FERMIN S, VIIOCHE B. Simple and efficient determination of the Tikhonov regularization parameter chosen by the generalized discrepancy principle for discrete ill-posed problems[J]. Journal of Scientific Computing, 2015, 63(1):163-184.

(上接第83页)