

污水处理厂流量分配计算方法及试验研究

李 佟^{1,2}, 李 军¹

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100124)

摘 要: 针对大部分污水处理厂的工艺单元均由多组系列平行独立组成, 在实际运行中, 受客观条件影响各系列水量分配往往不均衡, 会给污水处理厂运行带来很多不利影响, 在不具备计量条件的情况下需要一种便捷的方法来获取污水处理厂的配水情况的问题, 提出了一种计算污水处理厂配水分布的方法. 该方法基于物料平衡原理, 通过直接或间接监测配水前后的水质指示指标参数波动, 结合数值拟合及动态时间规整算法 (dynamic time warping, DTW) 对数据进行分析对比, 从而计算配水分布情况. 通过该方法在某大型污水处理厂进行了试验, 计算结果表明模拟流量与实际流量的拟合度较好, 其线性相关系数为 0.948, 平均误差为 -2.5%. 试验结果表明该方法对于污水处理厂实际应用具有一定参考意义.

关键词: 流量分配; 污水处理厂; 动态时间规整算法

中图分类号: U 461; TP 308

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2016)05-0782-06

doi: 10.11936/bjtxb2015050050

Assessment Method and Experiment Study of Wastewater Treatment Flow Distribution

LI Tong^{1,2}, LI Jun²

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100124, China)

Abstract: Most of the wastewater treatment plant (WWTP) process units consist of multi parallel series. In applications, under the influence of interference factors the discharge distribution of these series are unbalanced, which will bring lots of adverse effects to the WWTP operation. Therefore, a convenient method is needed to accurately assessment the flow distribution. To solve this problem, a method was proposed to assessment WWTP flow distribution based on material balance principle, by monitoring the fluctuations of indicator values between inlet and outlet flow, numerical fitting and dynamic time warping (DTW) algorithm was associated to assessment the flow distribution. This method was applied to a large WWTP. Result shows good fitting of actual values and predictive values, the linear correlation coefficient is 0.948, and the average error is -2.5%. This method has certain reference for the WWTP operation.

Key words: flow distribution; wastewater treatment plant (WWTP); dynamic time warping

大部分污水处理厂的工艺单元均由多组系列平行独立组成, 这样设计既便于污水厂灵活工艺调控, 也便于不停水情况下进行设备设施检修维护. 为

此, 污水厂设有专门的配水设施 (如配水渠、配水井、配水闸等) 将污水进行分流. 理想状态下, 应将污水均匀分布到各系列的工艺单元进行处理. 然

收稿日期: 2015-05-17

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (2014ZX07201-001)

作者简介: 李 佟 (1982—), 男, 工程师, 主要从事污水深度处理、污水处理模拟技术方面的研究, E-mail: ltong@bdc.cn

而在污水厂实际运行中,水量分配往往是不均衡的^[1],导致流量分配不均的原因有很多,例如配水设施设计误差、高程误差以及弯道的水流扰动等^[2],一般污水处理厂不会在每个系列的每个单元都安装流量计,因此上述流量分配差异很难被发现。

流量分配不均会给污水处理厂运行带来很多不利影响,例如:1) 可能造成各系列污染物负荷及水力停留时间不同,从而进一步导致各系列的处理效果和效率产生差异;2) 可能导致污泥在沉淀单元里的有效沉淀时间不足,随出水外排影响水质;3) 可能导致生物池供气、投药等方面无法精确定量,出现不足或过量的情况。配水计量对于污水处理数学模型应用和工艺运行效果也具有重要意义。国内王伟等曾针对分段进水 A/O 工艺建立了流量分配专家系统,根据负荷平衡计算,通过合理分配进水流量达到优化工艺处理的效果^[3]。在实际应用中,流量分配应首先基于“流量准确可控”这样一个前提,如果流量不可控,则会对运行效果产生影响。此外,当工程师对某污水厂进行数学建模时,一般假设该厂各平行系列的流量是均匀分配的,考虑到常规的流量计量已存在一定的误差^[4],配水不均会进一步地扩大这一误差,从而导致模拟结果的失真^[5]。

通常来说,可以采用便携式流量计来校核各系列单元的流量,然而液体流量计受现场条件和水力条件的影响非常大^[6]。国外曾有人用流量计对 18 座污水处理厂进行水量平衡测算^[7],发现平均误差高达 -8.6%。另一种方法是通过在进水端投加示踪剂,通过监测出水来判断水流在各单元的停留时间^[8]。在实际应用中,示踪剂法费用高昂且需要大量密集的人工化验检测,并且在流态复杂多变的情况下,需要充分的混合时间以及浓度,因此很难作为定量研究的依据。因此,在不具备计量条件的情况下,需要一种更加便捷、低成本的方法来获取污水处理厂的配水情况。

针对以上问题,作者提出了一种新的判断污水处理厂配水分布的方法。该方法基于物料平衡原理,通过直接或间接监测配水前后的水质指示指标参数波动,结合数值拟合及动态时间规整算法(dynamic time warping, DTW)对数据进行分析对比,从而计算推断配水分布情况。作者利用该方法对北京某大型污水处理厂进行了实际应用。

1 流量分配原理及动态时间规整算法

1.1 流量分配理论模型

假设某污水处理厂由 N 个完全相同的平行系

列组成,并通过配水将总进水 $Q_{tot}(t)$ 平均分配成 N 份。则 i 系列分配到的流量可表示为

$$Q_i(t) = \frac{1 + \xi_i}{N} Q_{tot}(t) \quad (1)$$

式中: $Q_i(t)$ 为 t 时刻 i 系列的流量; $Q_{tot}(t)$ 为 t 时刻的总进水流量; ξ_i 为 Q_i 实际值与理论值的相对误差。

Q_i 为时间 t 的函数; ξ_i 为关键参数,主要用于量化实际分流与平均分流的相对偏差,可知

$$\xi_i = \frac{NQ_i - Q_{tot}}{Q_{tot}} \quad (2)$$

根据物料平衡法则

$$Q_{tot} = \sum_{i=1}^N Q_i \quad (\text{即 } \sum \xi_i = 0)$$

假设 Q_a 为理想状态下均匀分配到每个系列的流量,那么对于每个系列的 ξ_i 均为 0 则

$$Q_a(t) = \frac{1}{N} Q_{tot}(t) \quad (3)$$

本文目的就是通过计算分析得到实际的 ξ_i 。

为简化验算,本文只分析具有 A、B 两组平行系列的模型(即 $N=2$),如图 1 所示。 Q 表示每个分支的流量; C 表示每个分支中指示参数的质量浓度值; V 表示反应器的有效容积。

在该情况下,式(2)可表示为

$$\xi_A = -\xi_B = \frac{Q_A - Q_B}{Q_A + Q_B} = \frac{\theta_B - \theta_A}{\theta_B + \theta_A} \quad (4)$$

式中 θ_A 和 θ_B 分别表示水流在 A、B 系列的停留时间(假设每个系列的有效容积相等)。

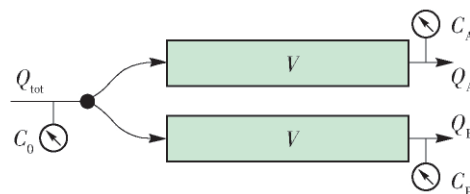


图 1 2 组平行系列的配水

Fig. 1 Water distribution schematic of two parallel series

1.2 停留时间计算模型

从式(4)可知,求解流量分配的问题被转化为如何获得准确的 θ_A 和 θ_B 。

图 2 示意了在典型推流反应器里某一监测点随着水流的迁移情况:假设 t_0 时刻在进水端放入“监测包 I”,并于 $2\Delta t$ 时在出水端监测到 I,则可估算出该“监测包”在反应器内的停留时间 $\hat{\theta}_A$ 为 $2\Delta t$ 。以此类推,“监测包 II”的停留时间亦为 $2\Delta t$,“监测包 III”的停留时间为 $3\Delta t$,“监测包 IV”的停留时间为

$4\Delta t$. 由于反应器的进水流量是不断变化的,使 $Q = (Q_0, Q_1, \dots, Q_k, \dots, Q_L)$ 为时间 $t = (t_0, t_1, \dots, t_k, \dots, t_L)$ 时刻的流量,则可建立方程

$$\begin{aligned} V &= \Delta t Q_0 + \Delta t Q_1 \\ V &= \Delta t Q_1 + \Delta t Q_2 \\ V &= \Delta t Q_2 + \Delta t Q_3 + \Delta t Q_4 \\ V &= \Delta t Q_3 + \Delta t Q_4 + \Delta t Q_5 + \Delta t Q_6 \\ V &= \dots \end{aligned} \quad (5)$$

理论上当有足够多的监测数据,该式(5)可计算出任意未知时刻的流量 Q . 如果监测包的迁移时间相对于进水流量的变化而言很短的话,则可设

$$Q_k = \frac{V}{\theta_k}, \text{ 同样地设 } \theta_k = \hat{\theta}_k.$$

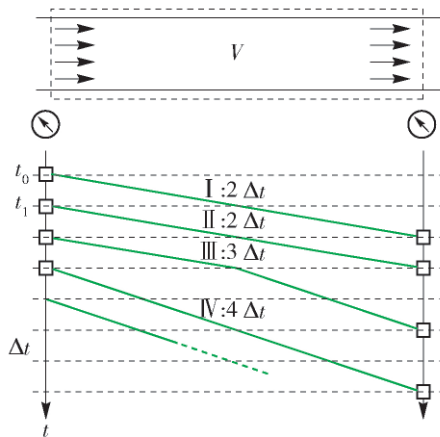


图2 理想推流反应器里水流迁移

Fig. 2 Illustration of the time required through an ideal plug-flow reactor

从以上计算可以得出,在理想推流反应器中,可以通过监测某一指示指标的停留时间来计算该反应器的进水流量.

为了得到停留时间,虽然前文提到的示踪剂法是选择之一,但对于一个数十万吨的大型污水厂,向大量原水中投加示踪剂是不经济的.事实上,污水本身含有多种化合物,这些物质有些随处理工艺被去除,有些则是不变的.在配水单元,由于只发生了物理混合,大部分化合物的总量是不变的,因此,可以通过监测配水前后某物质的质量浓度 C_0 和 C_i ($i = n$) 来达到示踪剂的效果.

1.3 动态时间规整算法

当整个配水系统的流量长时间不变时,通过上述方法即可拟合求出各流量分配情况.但在实际生产中,污水厂的进水流量是随上游管网实时波动的,为了更精确地计算流量,就必须考虑示踪剂流经

反应器期间因进水流量变化而导致的停留时间波动.为此,作者引入动态时间规整算法来解决该问题.

动态规整算法(dynamic time warping)是一种衡量2个时间序列之间的相似度的方法^[9],最早DTW技术被应用于语音识别^[10],但近年来也被广泛应用于其他领域.它主要用于优化2个非线性时间序列之间的最短距离,其原理是通过把时间序列进行延伸和缩短,来计算2个时间序列性之间的相似性.动态时间规整可以解决时间点不对齐,形态之间伸缩、扩展的问题,具有良好的匹配效果.

图3为2个时间序列的弯曲示意图,上下2条实线代表2个时间序列,时间序列之间的虚线代表2个时间序列之间的相似的点.DTW使用所有这些相似点之间的距离的和,称之为归整路径距离(warp path distance)来衡量2个时间序列之间的相似性.

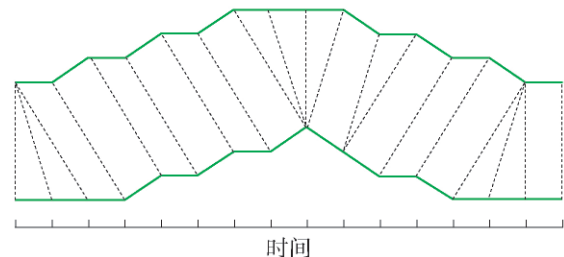


图3 2个时间序列之前的弯曲

Fig. 3 Warping between two time series

其计算方法为:令要计算相似度的2个时间序列为 X 和 Y ,长度分别为 $|X|$ 和 $|Y|$. 归整路径的形式为 $W = w_1, w_2, \dots, w_k$,其中 $\text{Max}(|X|, |Y|) \leq K \leq (|X| + |Y|)$. w_k 的形式为 (i, j) ,其中 i 表示 X 中的 i 坐标, j 表示的是 Y 中的 j 坐标. 归整路径 W 必须从 $w_1 = (1, 1)$ 开始,到 $w_k = (|X|, |Y|)$ 结束,以保证 X 和 Y 中的每个坐标都在 W 中出现.另外, W 中 $w(i, j)$ 的 i 和 j 必须单调增加,以保证图3中的虚线不会相交.最后通过动态规划算法求得的归整路径距离为 $D(|X|, |Y|)$,如图4所示.

在本研究中,应用DTW计算出的规整路径 W 就代表监测包从质量浓度为 C_0 的时刻 t_i 到质量浓度变为 C_A 的时刻 t_j 的映射,优化过程即通过对比 C_0 和 C_A 来搜索 $\hat{\theta}_A$,由此可知,不同的 $t_j - t_i$ 值便代表不同监测包的实际停留时间.当然,如果 $t_j - t_i$ 值同 Q 的变化时间相比很短的话,那么 $\hat{\theta}_A \approx t_j - t_i$. 因此,可以根据式(5)建立一个线性方程求解.同样,也可以根据 C_0 和 C_B 来求 B 系列的停留时间 $\hat{\theta}_B$.

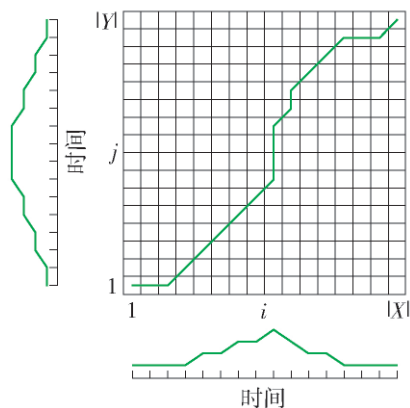


图 4 代价矩阵 D 下的规整路径

Fig. 4 Cost matrix with the minimum-distance warp path traced

目前, 通过以上模型已经建立了 2 个新的时间序列 $\hat{\theta}_A(t)$ 和 $\hat{\theta}_B(t)$, 分别是 A、B 系列的近似停留时间. 为了获得流量, 还需要计算 ξ_A 和 ξ_B , 可以代入

$$Q_{tot}(t) \approx \frac{V}{\hat{\theta}_A(t)} + \frac{V}{\hat{\theta}_B(t)} \quad (6)$$

求解. 为了得到平滑的函数 $\hat{\xi}(Q_{tot})$, 可拟合一个 Z 阶多项式

$$\hat{\xi}_A(Q_{tot}) = -\hat{\xi}_B(Q_{tot}) = c_0 + c_1 Q_{tot} + c_2 Q_{tot}^2 + \dots + c_Z Q_{tot}^Z \quad (7)$$

2 污水处理厂流量分配模拟预测

2.1 试验条件及方法

某污水厂设计处理规模 $100 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 由 I ~ IV 4 组系列平行组成, 每个系列又由 4 组完全相同且平行的工艺单元构成. 根据原设计, 在 4 个系列的出水端分别装有巴氏计量槽, 可对出水流量进行单独计量, 但对每个系列内的 4 组平行工艺单元则没有单独计量, 且现场也不具备安装流量计的条件. 随着水厂处理工艺和精细化水平的不断提高, 需要对每组工艺单元分别进行投药控制和曝气量调节, 需要精确了解每组工艺单元的实际流量分配情况.

图 5 表示单系列从沉淀单元到出水的流量分配示意图, 该系列由 4 组沉淀单元组成. 其日均总排水流量 Q_{tot} 约为 $62\,500 \text{ m}^3/\text{d}$, 其中高峰时流量可达 $3\,385 \text{ m}^3/\text{h}$, 低谷时约为 $1\,300 \text{ m}^3/\text{h}$. Q_{tot} 由前端的 4 组 Q_i 经沉淀单元后汇流而成. 每个沉淀池的停留时间约为 $1.5 \sim 2.5 \text{ h}$, 假设该单元为理想推流反应器, 且该过程中不发生生物反应, 则氨氮质量浓度也不

发生改变. 目前已知总出流量 Q_{tot} , 同时可在各监测点处取样检测氨氮质量浓度, 将氨氮作为指示剂, 由此可知 C_i 以及 C_{tot} 值, 通过数据拟合计算, 即可求出 Q_i 的实际分布.

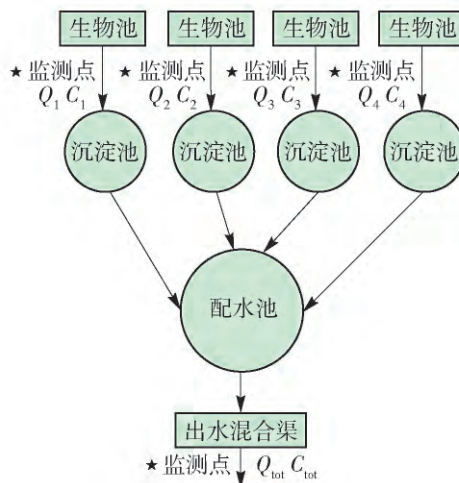


图 5 单一系列流量分配

Fig. 5 Flow distribution of a single lane

为了取得好的模拟效果, 取样间隔应尽可能短 (至少应小于总流量变化时间), 取样周期应尽可能长. 根据现有条件, 采样时间间隔设为 $2 \text{ h}/\text{次}$, 监测周期为 5 d , 氨氮检测采用纳氏试剂比色法, 数据分析处理采用 Matlab 工具.

2.2 模拟结果及分析

经过 5 d 的连续监测, 取得了大量配水前后的化验数据, 仅以 24 h 为周期, 展现期间总流量及各单元指示浓度变化情况如图 6 所示.

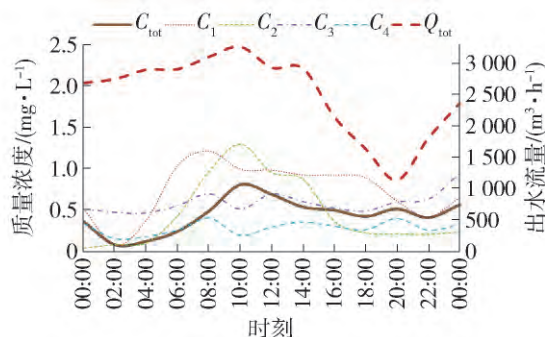


图 6 各配水氨氮质量浓度变化

Fig. 6 Ammonia concentration of each distribution flow

可以看出, 在 24 h 期间 4 组沉淀池出水的氨氮质量浓度差异较大, 总出水的氨氮质量浓度波动范围也比较大, 这主要是受前端处理工艺的负荷变化影响所致. 从图中可以观察到, A、B 组沉淀池的质量浓度波动较 C、D 池更为剧烈, 在 $6:00 \sim 12:00$ 期

间, A、B池出水氨氮质量浓度有较为明显的升高, 而总出水氨氮质量浓度也随之受到影响产生波动. 从总流量 Q_{tot} 曲线可以看出, 水量随时间变化非常大, 全天最高瞬时流量达 $3\,200\text{ m}^3/\text{h}$, 最低 $1\,130\text{ m}^3/\text{h}$, 时变化系数高达 2.2. 需要说明的是, 这是为了节约能耗, 在上游水量较低时, 厂里适当关停了部分进水泵, 减少抽升所致, 而实际生活污水产生量的时变化系数相对要小一些.

在不考虑水量波动的前提下, 通过式 (5) 拟合计算的各沉淀池出流量以及实际出流量情况如图 7 所示.

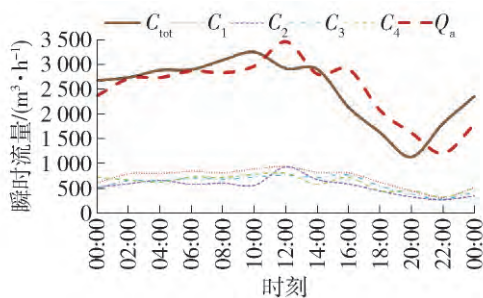


图 7 总流量实际值与模拟值(未采用 DTW 校核)

Fig. 7 Total discharge and estimated value (before DTW fitting)

在图 7 中, Q_a 为 4 组沉淀池计算流量的加和值, 可以看出, Q_1 与 Q_{tot} 在 0:00—10:00——即总流量相对平稳时的拟合情况较好, 当总流量发生较大波动时, Q_1 与 Q_{tot} 出现较大误差. 分析原因是由于水量波动造成水流在各组沉淀池的停留时间发生变化, 由此总出水与各进水质量浓度的对应关系发生紊乱所致.

采用 DTW 模型对进出水的质量浓度进行重新规整, 通过动态规划算法求得各出水与进水相吻合的相关特性及最优规整路径, 各单元计算流量如图 8 所示.

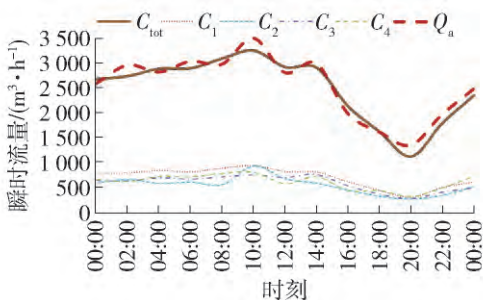


图 8 总流量实际值与模拟值(采用 DTW 校核)

Fig. 8 Total discharge and estimated value (after DTW fitting)

从图 8 可以看出, 经过了动态时间规整后, 模拟流量与实际流量的拟合度较好, 其线性相关系数为 0.948, 平均误差为 -2.5% . 以此为依据, 统计 4 组沉淀池的日均流量分别为: 711 、 550 、 601 、 $625\text{ m}^3/\text{h}$. 可以看出, 第 2 组沉淀池的计算流量较其他组池明显偏低, 应通过调整闸门予以适当调整.

3 结论

1) 研究了一种通过数学模拟计算来评估污水处理厂流量分配的方法, 该方法无需对污水厂设施进行改造或安装流量计, 只需连续检测流量分配前后某一特征参数的变化情况, 对于实际生产具有一定实用性.

2) 针对污水处理厂流量变化波动大的特点, 该方法引入了动态时间规整算法来对入流和出流的检测指标进行优化匹配. 通过优化, 可以消除因停留时间不同而造成的误差, 从而取得更好的拟合效果.

3) 氨氮作为污水处理厂常规检测指标之一, 可作为示踪剂应用于流量分配的模型计算. 除此以外, 可以结合实际工艺情况, 考虑采用温度、总磷、硝酸盐氮等其他指标代替.

4) 通过在某大型污水厂的试验表明, 该方法具有很好的拟合效果, 在进水流量波动剧烈的情况下, 模拟流量与实际流量的拟合度较好, 其线性相关系数为 0.948, 平均误差为 -2.5% .

参考文献:

- [1] PATEL T, O'LUANAIGH N, GILL L. The efficiency of gravity distribution devices for on-site wastewater treatment systems [J]. *Water Science & Technology*, 2008, 58 (2): 459.
- [2] DUTTA S, CATANO Y, LIU X, et al. Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling of flow into the aerated grit chamber of the MWRD's north side water reclamation plant [C]//World Environment Water Resource Congress. Illinois: Water Environment Federation, 2010: 1239-1249.
- [3] 王伟, 王淑莹, 孙亚男, 等. 分段进水 A/O 工艺流程分配专家系统的建立与应用 [J]. *化工学报*, 2008(10): 2608-2615.
WANG W, WANG S Y, SUN Y N, et al. Establishment and application of influent flow distribution expert system in step-feed A/O process [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2008(10): 2608-2615. (in Chinese)
- [4] HARREMOES P, CAPODAGLIO A, HELLSTROM B, et

- al. Wastewater treatment plants under transient loading-performance, modelling and control [J]. *Water Science and Technology*, 1993, 27(12): 71-115.
- [5] ORHON D, SOYBAY S, ARTAN N. The effect of reactor hydraulics on the performance of activated-sludge systems [J]. *Water Research*, 1989, 23(12): 1511-1518.
- [6] QUEVAUVILLER P, THOMAS O, van der BEKEN A. Wastewater quality monitoring and treatment [M]. Chichester: Wiley, 2006: 135-136.
- [7] PORT E. Anforderungen an die Eigenüberwachung bei kommunalen Kläranlagen [M]. Darmstadt: WAR, 1994: 12-15.
- [8] GUJER W. Systems analysis for water technology [M]. Berlin: Springer, 2008: 25-27.
- [9] BELLMAN R. Dynamic programming [M]. Princeton: Princeton Univ, 1957: 78-84.
- [10] SAKOE H. Dynamic-programming algorithm optimization for spoken word recognition [J]. *Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing*, 1978, 26(1): 43-49.

(责任编辑 杨开英)

(上接第 696 页)

- [7] 王雪松,徐振海,代大海,等. 干扰环境中部分极化信号的最佳滤波[J]. *电子与信息学报*, 2004, 26(4): 593-597.
WANG X S, XU Z H, DAI D H, et al. Optimal filtering of partially polarized signal in the interference background [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2004, 26(4): 593-597. (in Chinese)
- [8] 王雪松,邓泳,李永祯,等. 部分极化波瞬态极化投影的统计特性[J]. *应用科学学报*, 2005, 23(1): 20-25.
WANG X S, DENG Y, LI Y Z, et al. The statistical characteristics of the instantaneous polarization projection of partially polarized waves [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2005, 23(1): 20-25. (in Chinese)
- [9] 宋广,徐振海. 部分极化干扰条件下极化阵列性能分析[J]. *火控雷达技术*, 2008, 37(3): 22-24.
SONG G, XU Z H. Analysis of performance of polarized array under partially polarized interference [J]. *Fire Control Radar Technology*, 2008, 37(3): 22-24. (in Chinese)
- [10] 任博,施龙飞,王洪军,等. 抑制雷达主波束内 GSM 干扰的极化滤波方法研究[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(2): 459-464.
REN B, SHI L F, WANG H J, et al. Investigation on polarization filtering scheme to suppress GSM interference in radar main beam [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(2): 459-464. (in Chinese)
- [11] OSTROVSKY A S, RODRIGUEZ-ZURITA G, MENESES-FABIAN C, et al. Experimental generating the partially coherent and partially polarized electromagnetic source [J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 12864-12871.
- [12] OSTROVSKY A S, RODRIGUEZ-ZURITA G, MENESES-FABIAN C, et al. Simple technique for generating the partially coherent and partially polarized electromagnetic source [J]. *Journal of Physics*, 2011, 274(1): 121-133.
- [13] JIN H, AHMAD M O, SWAMY M N S. Near-field localization of partially polarized sources with a cross-dipole array [J]. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 2013, 49(2): 857-870.
- [14] 田静. 极化敏感阵列干扰抑制算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
TIAN J. Research on interference suppression algorithms for polarization sensitive array [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2014. (in Chinese)

(责任编辑 杨开英)