

DOI: 10.7652/xjtub201704023

融合水夹点分析的具有中间水道用水网络设计

梁卓¹, 李英¹, 刘名扬^{1,2}, 张香平³

(1. 大连交通大学环境与化学工程学院, 116028, 辽宁大连; 2. 辽宁出入境检验检疫局
技术中心, 116001, 辽宁大连; 3. 中国科学院过程工程研究所, 100190, 北京)

摘要: 为了快速有效地进行具有中间水道的用水网络设计,提出了基于水夹点分析的用水网络设计方法。水夹点分析基于对用水过程中使用新鲜水或回用水的指导,获得初始中间水道浓度估计值并给出中间水道中水分配的基本规则。首先根据水夹点浓度确定中间水道杂质浓度,并对用水单元进行分组,安排用水单元在用水网络中的位置,然后优化中间水道水流量,确定最优用水网络结构。水夹点分析提供具有中间水道初始用水网络结构,降低数学优化求解的规模和难度,所提夹点设计方法简捷易行。2个实例的计算结果表明,所提出的方法比简单的夹点分析和节水因子方法可分别节水 2.56% 和 7.58%。

关键词: 中间水道;水夹点;用水网络

中图分类号: TQ021.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)04-0149-06

Design of Water-Using Network with Single Internal Water Main Based on Water Pinch Analysis

LIANG Zhuo¹, LI Ying¹, LIU Mingyang^{1,2}, ZHANG Xiangping³

(1. Department of Environmental and Chemical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China;
2. Centre of Technique, Liaoning Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Dalian, Liaoning 116001, China;
3. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A design method based on water pinch analysis is presented to design water-using networks with single internal water main quickly and effectively. The water pinch analysis obtains the concentration of initial internal water main and provides water allocation rules flowing in and out internal water main based on directing water-using units to use fresh water or reused water. The internal water main is formed according to water pinch concentration values, then the water-using units are grouped and arranged at different positions in the water-using network. The final structure of the water network is determined through optimizing the water volume of the internal water main. The water pinch analysis provides an initial structure of a water-using network and reduces the scale and difficulty of mathematical optimization. The presented method is simpler and easier for use. The results obtained from two examples and the comparisons with simple water pinch analysis method and the water saving factor method show that the presented method saves fresh water consumption by 2.56% and 7.58%, respectively.

Keywords: internal water main; water pinch; water-using network

水是工业上最重要的资源之一。由于新鲜水消耗的增加以及更为严格的废水治理环境法规的出台,废水最小化受到了更多的关注。作为一种高效的节水减排技术,水网络设计已成为近年来研究的热点之一。通过再利用,适当地再生回用/回收废水,水网络设计能够明显地减少新鲜水消耗和废水排放。常规用水网络的设计方法主要有水夹点分析法^[1]和数学规划法^[2]。2001年,Feng等提出了一种用水网络的新结构和设计方法^[3],这种新结构运用一个或多个中间水道以简化用水网络,并成功地进行了单杂质用水网络的设计。此后,Wang等又提出了具有一个中间水道的多杂质用水网络的设计方法^[4-5],该方法设计的水网络具有结构简单、易于控制的特点,但新鲜水消耗量比常规目标值要大。在此基础上,Ma等利用启发式规则减少中间水道进水并分配中间水道的用水^[6],但其过程计算繁琐。刘永忠等提出基于博弈分析的具有中间水道水网络的定量分析方法^[7]。河北工业大学刘智勇课题组采用浓度势方法设计初始用水网络^[8-10],并在此基础上初步确定中间水道的结构及水量,然后根据浓度势从小到大的顺序依次由中间水道满足各用水过程。浓度势方法在设计有中间水道用水网络时仍旧需要常规用水网络做初始值,且迭代次数无法控制。

考虑水回用的用水网络可以在很大程度上减少用水系统的新鲜水消耗和废水排放量。对于常规用水网络而言,为了最大程度达到节水减排的效果,各个用水单元之间高度集成,连接繁杂,若其中一个用水单元出现问题,必然影响整个用水网络,而具有中间水道的用水网络,每个用水单元只与中间水道直接连接,彼此之间由中间水道作为缓冲,若其中一个用水单元的水质发生波动,在影响到后续用水单元之前先被中间水道将扰动削弱,只要控制住中间水道的水质,一些用水单元引起的扰动便会被控制,从而使得整个用水网络保持稳定。因此,具有中间水道的用水网络与常规用水网络相比,结构简单,易于控制,也更便于操作。

精确地定位中间水道的位置可以最大限度地节约新鲜水并减少废水的排放,本文只考虑水回用并融合水夹点分析方法设计用水网络,定位一级中间水道的位置,在此基础上初步确定用水网络结构及水量,再进行优化,得到最终用水网络。该方法只需简单计算即可实现具有一级中间水道的用水网络的设计。

本文采用融合水夹点分析的方法建立具有一级

中间水道的用水网络结构。水夹点分析通过对用水过程使用新鲜水或回用水的指导,获得初始中间水道浓度并给出中间水道设计的基本规则。在此基础上建立排入中间水道用水过程和回用中间水道用水过程与中间水道匹配方案的用水网络结构,既避免了水夹点分析设计用水网络的过程操作复杂,又在一定程度上降低了数学优化的维数和求解难度。

1 问题的提出

水夹点对于用水网络的设计具有重要的指导意义。若水夹点上方用水单元的极限进口浓度高于夹点浓度,不应使用新鲜水,而应使用其他单元排出的废水;若水夹点下方用水单元的极限出口浓度低于水夹点浓度,不应排放废水,而应将排出的废水用于其他用水单元。

在用水网络中分析的杂质是指在操作单元中需要移除的杂质。在常规用水网络中,水夹点技术虽然有明确的物理意义,能够给出有益的指导,但只能用于简单的单杂质系统,而大多数用水网络都包含不止一种杂质。对多杂质用水网络来说,并不是每个单元的主要控制杂质(以下简称主控杂质)都是同一种杂质,这样会使分析过程变得非常复杂,水夹点的指导意义对于多杂质用水网络系统就变得非常局限。

然而,具有中间水道的用水网络相对于常规用水网络来说,每个用水单元只与中水水道连接,用水网络的集成变得简单易于控制,水夹点的指导意义对于具有中间水道的多杂质用水网络变得可行。

水夹点技术对于单杂质水网络来说只考虑一种杂质,能够精确定位中间水道的位置,对于多杂质水网络来说,需要满足所有杂质的条件进行粗略定位,并进行优化调整。

2 设计与优化

2.1 设计要求

本文基于用水网络的水最大回用的原则,且只考虑水回用问题,不考虑工艺问题。假定用水单元不存在物料损失和测量数据随机波动,用水单元没有水损失和生成,用水单元操作温度不变,本文建立了具有一级中间水道的用水网络,简化了用水网络结构,使得用水量接近常规用水网络的最小用水量。

设计用水网络需要提供的数据有:①用水单元的极限入口浓度;②用水单元的极限出口浓度;③用水单元的杂质负荷;④用水单元的极限流量。

2.2 设计步骤

(1)根据所提供的用水单元数据计算出每种杂质 j 所对应的水夹点处质量浓度 C_j^p 。

(2)以所确定的夹点质量浓度 C_j^p 为中间水道浓度的目标值。对于单元 i ,如果每一种杂质 j 的极限出口浓度 $C_{i,j}^{out,max}$ 都小于夹点质量浓度 C_j^p ,此单元归为第 1 组 G1;对于单元 i ,如果每一种杂质的极限进口质量浓度 $C_{i,j}^{in,max}$ 都大于夹点质量浓度 C_j^p ,此单元归于第 2 组 G2,这组单元全部回用中间水道的水;其他的单元均归为第 3 组 G3,这组单元既使用新鲜水又回用中水道的水。

(3)根据分组确定各用水单元在用水网络的位置。

(4)计算第 1 组单元需要的新鲜水流量 F_i ,计算公式如下

$$F_i = \max \frac{M_{i,j}}{C_{i,j}^{out,max}}; \quad C_{i,j}^{out} = \frac{M_{i,j}}{F_i}$$

$i \in G1$ (1)

式中: $M_{i,j}$ 是杂质 j 在单元 i 中的负荷; $C_{i,j}^{out}$ 是第一组单元 i 中 j 杂质的真实出口质量浓度。

(5)计算中间水道杂质质量浓度 $C_{main,j}$,即

$$C_{main,j} = \frac{\sum_{i \in G1} M_{i,j}}{\sum_{i \in G1} F_i}$$
(2)

(6)计算第 2 组单元回用中间水道的流量 $F_{i,main}$,即

$$F_{i,main} = \max \frac{M_{i,j}}{C_{i,j}^{out,max} - C_{main,j}}, \quad i \in G2$$
(3)

(7)计算第 3 组单元回用中间水道的水量和新鲜水量

$$F_{i,main} = \min \frac{M_{i,j} C_{i,j}^{in,max}}{(C_{i,j}^{out,max} - C_{i,j}^{in,max}) C_{main,j}}, \quad i \in G3$$
(4)

$$F_i = \frac{M_{i,j}}{C_{i,j}^{out} - C_{i,j}^{in,max}} - F_{i,main}, \quad i \in G3$$
(5)

(8)当第 1 组单元进入中间水道水量大于第 2 组和第 3 组单元从中间水道回用的水量,可以适当减少某个单元排放到中间水道的水量。根据第 3 组单元主控杂质的种类,减少水量的单元必须是这些杂质真实出口质量浓度 $C_{i,j}^{out}$ 最高,而且高于中间水道杂质质量浓度 $C_{main,j}$ 。中间水道减少水量 F_{reduce} 计算如下

$$F_{reduce} = (\sum_{i \in G1} F_i - \sum_{i \in G2+G3} F_{i,main}) / \max \frac{C_{i,j}^{out}}{C_{main,j}}$$
(6)

3 实例研究

例 1 该实例数据来自文献[3],它由 6 个用水单元组成,只有一种杂质,数据见表 1。常规无中间水道的用水网络最小新鲜水使用量目标值为 157.1 t/h。文献[3]采用具有一级中间水道的水网络设计得到的用水网络如图 1 所示,求解得到新鲜水用量为 162.1 t/h。

表 1 实例 1 的极限水数据

单元	$C_{i,j}^{in,max} / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$C_{i,j}^{out,max} / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$M_{i,j} / \text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
1	25	80	2
2	25	100	5
3	25	200	4
4	50	100	5
5	50	800	30
6	400	800	4

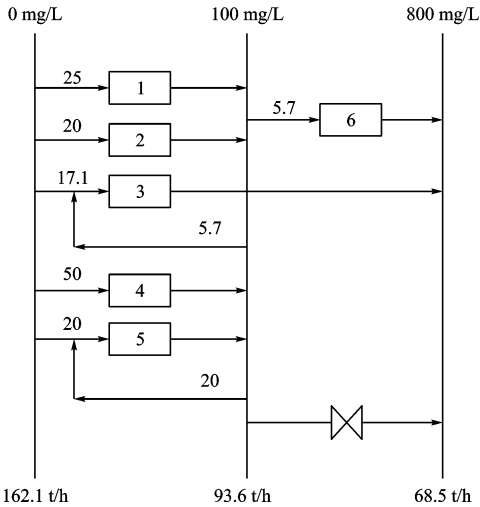


图 1 例 1 中文献[3]设计的用水网络结构图

文献[3]中给出夹点质量浓度为 100 mg/L。以夹点浓度作为中间水道浓度的目标值,将单元进行初步分组:第 1 组(用水单元 1、2、4);第 2 组(用水单元 6);第 3 组(用水单元 3、5)。此时中间水道质量浓度为 96 mg/L。根据式(3)计算得出,单元 6 在中间水道取水 5.69 t/h;根据式(4)、式(5)计算得出单元 3、单元 5 分别回用中间水道水 5.95 和 20.83 t/h,使用新鲜水量分别为 16.91 和 19.17 t/h。到此,求解的用水网络结构如图 2 所示,该用水网络的新鲜水用量为 161.08 t/h,比文献[3]所给出的新鲜水用量节约了 3.98 t/h,节水率为 2.46%。此结果比文献[3]中的用水网络使用新鲜水少,但中间水道中还剩余大量水,达到 92.53 t/h。重新设计进入中

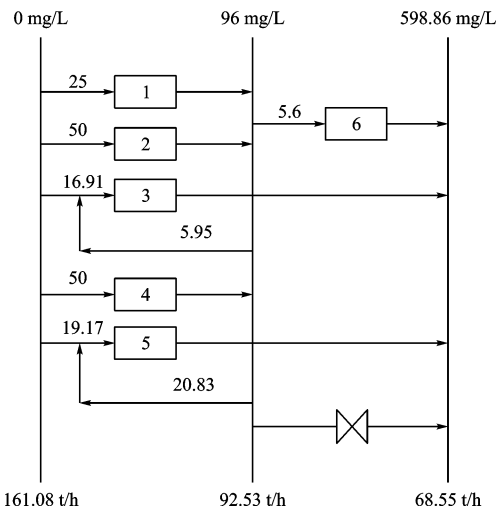


图 2 例 1 中本文设计的初步用水网络结构图

间水道的水量,将单元 2 中的水直接排放到废水道,同时将单元 4 中 39.45 t/h 的水直接排放到废水道,此时中间水道的水质量浓度为 85.94 mg/L,用水单元 6 回用中间水道水量为 5.64 t/h,用水单元 3、5 分别回用中间水道水量为 6.64 和 23.27 t/h,使用新鲜水量为 16.22 t/h、16.73 t/h。整个用水网络使用新鲜水量为 157.95 t/h,比文献[3]节水 4.15 t/h,节水率为 2.56%,仅比最小新鲜水目标值大 0.85 t/h。优化后的用水网络结构如图 3 所示。

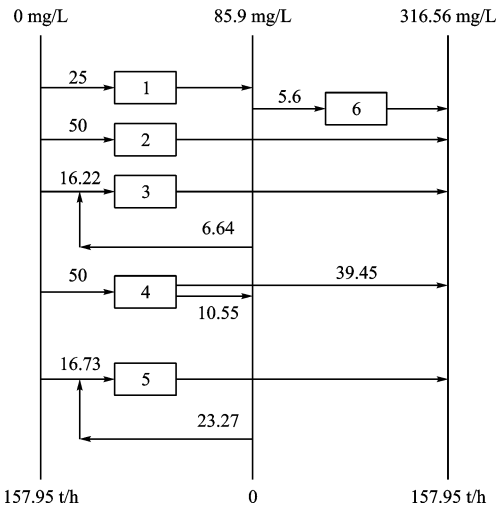


图 3 例 1 中本文优化设计后的用水网络结构图

例 2 该实例来自文献[4],由 8 个用水单元、3 种杂质组成,各单元的极限用水数据见表 2。该系统作为常规用水网络设计时,最小用新鲜水量是 177.1 t/h。文献[4]设计的用水网络如图 4 所示,该用水网络的新鲜水用量为 198.4 t/h。

根据表 2 数据分别计算出每种杂质对应的夹点

表 2 实例 2 的极限水数据

单 杂 元 质	$C_{i,j}^{\text{in,max}} /$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$C_{i,j}^{\text{out,max}} /$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$M_{i,j} /$ $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$
1	0	100	3 000
1 2	0	90	2 700
3	0	50	1 500
1	0	50	800
2 2	0	70	1 120
3	0	70	1 120
1	40	150	8 250
3 2	60	80	1 500
3	20	70	3 750
1	30	160	2 730
4 2	40	100	1 260
3	70	90	420
1	110	210	2 900
5 2	135	200	1 885
3	60	120	1 740
1	200	350	6 000
6 2	170	400	9 200
3	150	210	2 400
1	100	300	12 200
7 2	75	290	13 115
3	20	170	9 150
1	90	210	6 840
8 2	50	170	6 840
3	34	100	3 762

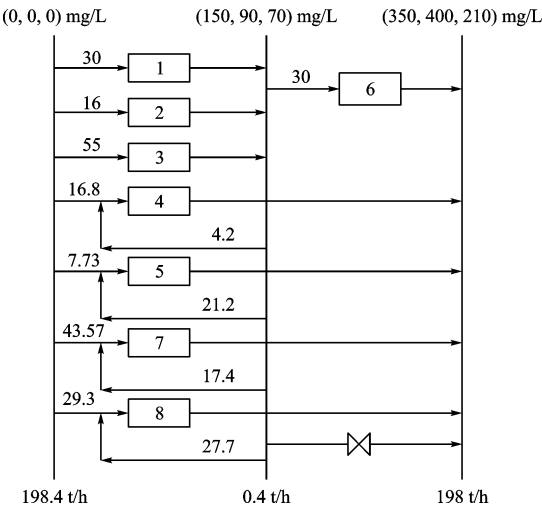


图 4 例 2 中文献[4]设计的用水网络结构图

杂质质量浓度为 210、200、90 mg/L。以夹点质量浓度作为中间水道浓度的目标值,将单元进行初步分

组:第1组(用水单元1、2、3、4);第2组(用水单元6);第3组(用水单元5、7、8)。确定中间水道的杂质质量浓度为125.18、55.73、57.51 mg/L。根据式(3)计算得出,用水单元6在中间水道取水量为26.73 t/h;根据式(4)、式(5)计算得出用水单元5、7、8分别回用中间水道水量为25.48、21.21、23.69 t/h,使用新鲜水量为3.52、39.79、23.36 t/h。本文设计的用水网络如图5所示,该用水网络的新鲜水用量为184.69 t/h,比文献[4]的结果可节约新鲜水13.71 t/h,节约率为6.91%。

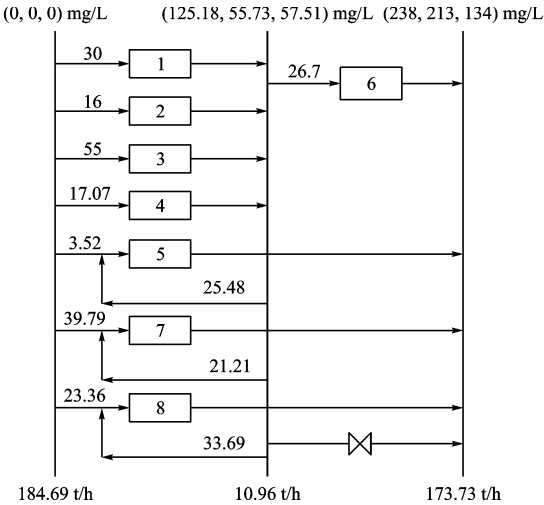


图5 例2中本文设计的初步水网络结构图

虽然此结果比文献[4]中使用的新鲜水量少,但是中间水道还剩余10.96 t/h的水量,可以进一步优化。根据上述结果可以发现:第2组用水单元回用中间水道水时,关键杂质为杂质1或杂质3,所以可以减少一部分水源排入到中间水道;经过筛选,用水单元3的杂质1和杂质3的出口浓度都高于夹点浓度,并且是综合两种杂质来看最适合的单元。根据式(6)可计算出用水单元3需要减少9.15 t/h的废水排入中间水道,直接排入废水道,此时中间水道的杂质质量浓度为123.10、58.13、56.62 mg/L,进行水分配后发现中间水道仍然剩余0.33 t/h的水,整个用水网络的新鲜水用量为183.4 t/h,相比没有优化的结果节水1.29 t/h。所以,要多次使用式(6)进行优化,直至满足实际要求为止。通过多次优化,得出用水单元3要将9.43 t/h的废水直接排入废水道,这时中间水道的杂质质量浓度为123.03、58.20、56.59 mg/L。经过水的分配,中间水道剩余水量为0.1 t/h。该剩余水量可直接经过用水单元6排放到废水道,此时用水单元6使用中间水道水量为26.92 t/h。用水单元5、7、8分别回用中间水

道水量为25.92、21.55、34.24 t/h,新鲜水使用量为3.08、39.45、22.76 t/h。整个用水网络新鲜水使用量为183.36 t/h,相比文献[4]的结果可节水15.04 t/h,节水率为7.58%。本文所得用水网络结构如图6所示。

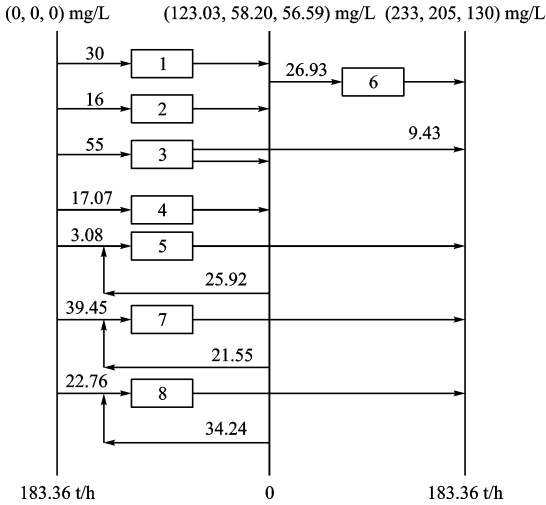


图6 例2中本文优化设计后的水网络结构图

4 结束语

本文将夹点设计优化方法推广到具有中间水道的多杂质用水网络设计,给出了一种简单以中间水道水减量目标的优化方法。本文所提水夹点分析具有一级中间水道初始用水网络结构,降低了数学优化求解的规模和难度,简捷易行。2个实例的计算结果表明,本文所提出的方法比2种文献方法可分别节水2.56%和7.58%。

参考文献:

[1] WAND Y P, SMITH R. Wastewater minimization [J]. Chemical Engineering Science, 1994, 49(7): 981-1006.

[2] BAGAJEWICZ M J, RIVAS M, SAVELSKI M J. A robust method to obtain optimal and sub-optimal design and retrofit solutions of water utilization systems with multiple contaminants in process plants [J]. Computers & Chemical Engineering, 2000, 24(2): 1461-1466.

[3] FENG X, SEIDER W D. A new structure and design methodology for water networks [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2001, 40(26): 6140-6146.

[4] WANG B, FENG X, ZHANG Z X. A design methodology for multiple-contaminant water networks with

- single internal water main [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2003, 27(7): 903-911.
- [5] ZHENG X S, FENG X, SHEN R J, et al. Design of optimal water-using networks with internal water mains [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2006, 45(25): 8413-8420.
- [6] MA H, FENG X, CAO K. A rule-based design methodology for water networks with internal water mains [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2007, 85(4): 431-444.
- [7] 刘永忠, 段海涛, 冯霄. 水系统集成优化方案的博弈分析与评价方法 [J]. *化工学报*, 2009, 60(4): 94-951.
LIU Yongzhong, DUAN Haitao, FENG Xiao. Approach to evaluation of optimal schemes for water networks based on game theory [J]. *CIESC Journal*, 2009, 60(4): 94-951.
- [8] 何海娜, 万林战, 刘智勇. 具有中间水道的多杂质用水网络简化设计方法 [J]. *化工学报*, 2010, 61(5): 1176-1182.
HE Haina, WAN Linzhan, LIU Zhiyang. A simple design method for water network with multi-contaminant internal water mains [J]. *CIESC Journal*, 2010, 61(5): 1176-1182.
- [9] SU W N, LI Q H, LIU Z Y, et al. A new design method for water-using network of multiple contaminants with single internal water main [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 29/30(S): 38-45.
- [10] ZHAO H P, SU W N, LIU Z Y. Design of water-using networks of multiple contaminants with two internal water mains [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 67(6): 37-44.

(编辑 刘杨 葛赵青)

(上接第 127 页)

- [7] JIN Y F. The mean first-passage time for an asymmetric bistable systems driven by multiplicative and additive noise [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 56(1): 25-29.
- [8] 顾仁才, 许勇. 非高斯 Lévy 噪声驱动下的非对称双稳系统的相转移和平均首次穿越时间 [J]. *物理学报*, 2011, 60(11): 1-7.
GU Rencai, XU Yong. Phase transition and the mean first passage time of an asymmetric bistable system with non-Gaussian Lévy noise [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(11): 110514-110514.
- [9] 宁丽娟, 徐伟, 杨晓丽. 色关联噪声驱动的非对称双稳系统中平均首次穿越时间的研究 [J]. *物理学报*, 2007, 56(1): 25-29.
NING Lijuan, XU Wei, YANG Xiaoli. The time first-passage time for an asymmetric bistable system driven by multiplicative and additive noise with colored correlations [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(1): 25-29.
- [10] 王浩宇, 吴勇军. 1:1 内共振对随机振动系统可靠性的影响 [J]. *力学学报*, 2015, 47(5): 807-813.
WANG Haoyu, WU Yongjun. The influence of one-to-one internal resonance on reliability of random vibration system [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(5): 807-813.
- [11] 徐伟, 李伟, 靳艳飞, 等. 耦合 Duffing-van der Pol 系统的首次穿越问题 [J]. *力学学报*, 2005, 37(5): 620-626.
XU Wei, LI Wei, JIN Yanfei, et al. First-passage problem for coupled Duffing-van der Pol system [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2005, 37(5): 620-626.
- [12] WU J, SILBEY R J, CAO J. Generic mechanism of optimal energy transfer efficiency: a scaling theory of the mean first-passage time in exciton systems [J]. *Physical Review Letter*, 2013, 110(20): 2624-2628.
- [13] PILLAY S, WARD M J, PEIRCE A, et al. An asymptotic analysis of the mean first passage time for narrow escape problems: part I Two-dimensional domains [J]. *Siam Journal of Multiscale & Simulation*, 2010, 8(3): 803-835.
- [14] 严惠云, 师义民, 苏剑, 等. 色噪声激励下非线性随机经济周期模型及其稳定性分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(3): 141-145.
YAN Huiyun, SHI Yimin, SU Jian, et al. The stability of a business cycle model with a Gauss colored noise excitation [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(3): 141-145.
- [15] 朱位秋. 非线性随机动力学与控制-Hamiltonian 理论体系框架 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 349-350.
- [16] FELLER W. Diffusion process in one dimension [J]. *Transactions of American Mathematical Society*, 1954, 77(77): 1-31.

(编辑 苗凌)