

静态安全约束下考虑风险的可用传输容量计算

刘文娟, 王磊, 万秋兰

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 电网可用传输容量(ATC)是电力市场化以来研究的重要课题之一。提出电力市场环境计及风险的可用传输容量计算方法。首先建立基于最优潮流的区域可用传输能力模型, 将跟踪中心轨迹内点法用于最优模型计算, 并对预想事故进行合理选择, 求解各个故障下可用传输容量的大小。其次, 引入风险的概念, 提出了可用传输容量风险的计算方法, 再根据风险大小发布对应的可用传输容量。最后, 采用 IEEE-30 节点系统对提出的方法进行了仿真计算, 计算结果表明, 计及风险的可用传输容量能更多地反映电力市场环境系统运行的不确定性。

关键词: 可用传输容量; 最优潮流; 风险; 故障集; 电力市场

ATC calculation considering risk and static security constraints

LIU Wen-juan, WANG Lei, WAN Qiu-lan

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The calculation of Available Transfer Capability(ATC) has become one of the most important research subject since the opening of power market. ATC calculation considering risk is proposed. Firstly, the OPF based ATC calculation model is established and a tracking center path interior-point algorithm is applied. Different ATC is calculated under different contingency. Secondly, the concept of risk is introduced to ATC calculation. The risk of the corresponding ATC is calculated and issued. Lastly, IEEE-30 bus system is used for testing the proposed method. The uncertainty of ATC under power market environment is indicated by using the proposed algorithm.

This project is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China(No.2002CB312102).

Key words: ATC(Available Transfer Capability); OPF(Optimal Power Flow); risk; contingency; power market

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)12-0044-05

0 引言

随着电力工业的发展和电力市场的开展, 电网可用传输容量(Available Transfer Capability)越来越成为研究者们重视的课题。北美电力可靠性委员会 NERC 将可用传输容量定义为: ATC 是在已有协议的基础上, 在实际输电网络中可以进一步用于商业活动的富余输电能力^[1]。其数学定义为极限传输容量(TTC)减去现有合同(ETC)再减去容量效益裕度(CBM)和传输可靠性裕度(TRM)。可以看出, 可用传输容量是在电力市场条件下衡量电网传输能力, 反映系统安全性的一种指标^[2]。

根据定义可以看出 ATC 的计算包括两个方面, 其一是运行断面功率传输极限的求取, 其二是考虑

电力市场的特征, 取决于市场交易量的大小、交易地点及交易合同的持续时间等。

目前, 计算 ATC 的方法有很多, 可分为确定性算法和不确定性算法两大类。确定性算法有: 直流灵敏度分析法, 重复潮流法, 连续潮流法, 最优潮流法, 交流灵敏度分析法等^[4-6]。不确定性算法有: 随机规划法, 枚举法, 蒙特卡洛模拟法等^[7, 8]。

已有算法大部分都只是从物理角度计算了运行断面的功率传输极限, 而忽略了电力市场的作用。确定性算法计算速度较快, 但不能很好地反映 ATC 与系统运行状态的关系, 计算结果不够精确。概率 ATC 计算结果虽然可以一定程度上反映 ATC 与电网运行的关系, 但是电力市场环境下电网中客观存在不确定因素还包括市场因素。考虑 N-1 静态约束计算得到的可用传输容量往往只发布其中的最小值^[9], 这种发布

方式过于保守, 电网资源不能得到合理运用。

本文从电力系统故障发生的概率及其带来的经济损失角度出发, 提出了根据风险大小发布可用传输容量的方法。该方法发布的可用传输容量考虑了电力市场这一因素, 反映了市场环境下电网可用传输容量的不确定性。

1 基于 OPF 的 ATC 计算模型

1.1 ATC 数学模型

ATC 计算的优化模型包括目标函数、等式约束和不等式约束, 具体模型如下:

$$\begin{aligned} & \text{Max } \sum_{i \in A} (P_{Gi}) \\ \text{s.t. } & P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ & Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \\ & P_{Gi}^{\text{base}} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\text{max}} \quad i \in A \\ & Q_{Gi}^{\text{base}} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\text{max}} \quad i \in A \\ & P_{Di}^{\text{base}} \leq P_{Di} \leq P_{Di}^{\text{max}} \quad i \in B \\ & V_i^{\text{min}} \leq V_i \leq V_i^{\text{max}} \quad i \in A \cup B \\ & |P_{ij}| \leq P_{ij}^{\text{max}} \quad i \in A, j \in B \end{aligned} \quad (1)$$

式中: P_{Gi} 、 Q_{Gi} 为节点 i 的发电机有功、无功出力; P_{Di} 、 Q_{Di} 为节点 i 的负荷有功、无功需求; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为导纳矩阵元素的实部、虚部; θ_{ij} 为节点 i 与节点 j 的相角差; V 为节点电压; P_{ij} 为线路 ij 的有功潮流; A 代表送电区域, B 代表受电区域。上标 base 代表基态情况, 上标 max 代表上限, min 代表下限。式中等式约束为潮流等式约束, 不等式约束分别为发电机有功、无功出力、负荷有功需求、电压上下限、线路容量约束。目标函数为发电区域总发电出力最大。

1.2 跟踪中心轨迹内点算法

跟踪中心轨迹内点法^[10]对可行初始点选取的要求不是很高, 只要求在寻优过程中松弛变量和拉格朗日乘子满足简单的大于零或小于零的条件, 即可代替原来必须在可行域内求解的需求。

将优化模型 (1) 写成一般形式为:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(x) \\ \text{s.t. } & g(x) = 0 \\ & h_1 \leq h(x) \leq h_2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $f(x)$ 为目标函数, $g(x)$ 为所有等式约束, $h(x)$ 为所有不等式约束。

引入松弛变量 s , $l > 0$, 将 (2) 中的不等式约束变为 $h(x) + s = h_1, h(x) - l = h_2$ 。同时引入障碍常数 $\mu > 0$, 将目标函数改造成障碍函数后可以得到以下的拉格

朗日函数:

$$\begin{aligned} L = & f(x) - y^T g(x) - z^T (h(x) - l - h) - \\ & w^T (h(x) + s - h_1) - \mu \sum_{j=1}^r \log(s_j) - \mu \sum_{j=1}^r \log(l_j) \end{aligned} \quad (3)$$

其中: r 为不等式约束的个数。根据最优化理论中求解等式约束问题最优解的 KKT 条件可知该问题极小值存在的必要条件是拉格朗日函数对所有变量及乘子的偏导数为 0, 对式 (3) 求偏导

$$\begin{cases} L_x \equiv \nabla_x f(x) - \nabla_x g(x)y - \nabla_x h(x)(z+w) = 0 \\ L_y \equiv g(x) = 0 \\ L_z \equiv h(x) - l - h = 0 \\ L_w \equiv h(x) + s - h_1 = 0 \\ L_l \equiv z - \mu L^{-1} e = 0 \\ L_u \equiv -w - \mu S^{-1} e = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \text{且 } L = \text{diag}(l_1, \dots, l_r), S = \text{diag}(s_1, \dots, s_r), \\ & Z = \text{diag}(z_1, \dots, z_r), W = \text{diag}(w_1, \dots, w_r) \end{aligned}$$

可以解得 $\mu = -\text{Gap} / 2r$, $\text{Gap} = -s^T w$, 为了使收敛性更好, 引入中心参数 $0 < \sigma < 1$, 一般取 $\sigma = 0.1$ 。

$$\mu = \sigma \frac{\text{Gap}}{2r} \quad (5)$$

对方程组 (4) 线性化后写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} H & \nabla_x g(x) & \nabla_x h(x) & \nabla_x h(x) & 0 & 0 \\ \nabla_x^T g(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nabla_x^T h(x) & 0 & 0 & 0 & -I & 0 \\ \nabla_x^T h(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & L & 0 & Z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & U & 0 & W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta w \\ \Delta l \\ \Delta u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_x \\ -L_y \\ -L_z \\ -L_w \\ -L_l^{\mu} \\ -L_u^{\mu} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: $H = -[\nabla_x^2 f(x) - \nabla_x^2 g(x) - \nabla_x^2 h(x)(z+w)]$

求解方程 (6) 得到第 k 次迭代的修正量, 于是最优解的一个新的近似解为

$$\begin{aligned} x^{k+1} &= x^k + \alpha_p \Delta x \\ l^{k+1} &= l^k + \alpha_p \Delta l \\ u^{k+1} &= u^k + \alpha_p \Delta u \\ y^{k+1} &= y^k + \alpha_d \Delta y \\ z^{k+1} &= z^k + \alpha_d \Delta z \\ w^{k+1} &= w^k + \alpha_d \Delta w \end{aligned} \quad (7)$$

式中步长 α_p , α_d 满足:

$$\begin{aligned} \alpha_p &= 0.9995 \min \left\{ \min_i \left(\frac{-l_i}{\Delta l_i}, \Delta l_i < 0; \frac{-s_i}{\Delta s_i}, \Delta s_i < 0 \right), 1 \right\} \\ \alpha_d &= 0.9995 \min \left\{ \min_i \left(\frac{-z_i}{\Delta z_i}, \Delta z_i < 0; \frac{-w_i}{\Delta w_i}, \Delta w_i < 0 \right), 1 \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

$i = 1, 2, \dots, r$

2 N-1 静态安全约束下的 ATC 计算

2.1 电网中存在的不确定性因素

电网中存在庞大的不确定性因素,其中之一就是系统元件的故障。为了使可用传输容量的计算值更为准确,必须考虑这些元件发生故障的情况。本文只考虑线路故障和发电机故障。电力系统中的故障分为严重性和一般性故障,根据网络的运行状况,一般性故障不影响系统的安全运行,因此,对每一种预想事故都进行精确的分析是不必要的且会花费过多的时间。预想事故的合理选择可以大大节省计算时间且不影响计算结果^[11]。本文的预想事故选择采用模态分析法^[12],选取那些对系统安全性影响较大的故障,在保证系统安全的前提下,可采用本文提到的优化模型(1)及跟踪中心轨迹内点算法进行可用传输容量的计算。

考虑 N-1 静态安全约束的可用传输容量一般发布计算结果中的最小值。

$$ATC = \text{Min}\{ATC_1, ATC_2, \dots, ATC_p\} \quad (9)$$

p 为故障集个数。如果 ATC 为 ATC_i , 但第 i 个故障发生的概率非常小, 这样若以 ATC_i 作为最终的 ATC 值发布过于保守, 电网资源不能得到充分利用。

2.2 概率 ATC 的求取

假设系统故障的发生具有独立性, 根据概率论的有关原理, 可以得到以下几个量:

ATC 的期望值:

$$E(ATC) = \sum_i \bar{P}_i \times ATC_i \quad i \in \Omega_{\text{all}} \quad (10)$$

\bar{P}_i 是各个故障发生的相对概率, ATC_i 是状态 i 下对应的 ATC 值。 Ω_{all} 为系统所有故障的集合。

第 i 种运行状态的相对概率为:

$$\bar{P}_i = \frac{P_i}{\sum_j P_j} \quad i, j \in \Omega_{\text{all}} \quad (11)$$

其中: P_i 为第 i 种故障发生的绝对概率, $\sum_j P_j$ 为所选故障集各个故障发生绝对概率的累加。

发布 ATC 的期望值能在一定程度上反映系统故障对可用传输容量的影响, 但是仅仅考虑了系统的物理约束, 没有考虑电力市场因素对可用传输容量的影响。

3 考虑风险的可用传输容量

3.1 风险的定义和计算

IEEE 标准 100-1992 将风险定义为: 对不期望发生的结果的概率和严重性的度量, 通常采用概率和结果乘积的表达形式。将系统故障看成是电力系统的一种风险, 线路故障的后果最终体现在由于负荷的损失而带来的经济损失上。

本文将从系统故障发生的概率和产生的影响两个方面入手, 分析系统故障对 ATC 的影响。

3.2 可用传输容量与风险的关系

故障情况下可用传输容量的经济成本包括可用传输容量减少带来的收益损失和必要时中断负荷的赔偿损失。ATC 发布值越小, 可能中断负荷的赔偿成本越小, 但是售出电量的收益也会减少; 反之, ATC 发布值越大, 售电量会增加, 但是可能中断负荷的赔偿也会增加。

首先采用模型(1)及跟踪中心轨迹内点算法算出故障集下 ATC 的值 $ATC_1, ATC_2, \dots, ATC_p$, p 为故障集个数。若取 ATC_k (k 故障时的 ATC 值) 为系统 ATC 发布值, 则当系统发生故障 m (ATC 值为 ATC_m) 时, 经济成本 $Cost_m^k$ 可定义为:

$$Cost_m^k = \begin{cases} -R_0(ATC_k - ATC_m) + R_1(ATC_k - ATC_m) & ATC_k > ATC_m \\ R_0(ATC_k - ATC_m) - R_1(ATC_k - ATC_m) & ATC_k < ATC_m \end{cases} \quad m=1, 2, \dots, p, m \neq k \quad (12)$$

式中: R_0 为购电与售电的价格差, R_1 为赔偿价格。根据风险的定义, 若系统 ATC 发布值为 ATC_k , 发生故障 m 的风险 $Risk_m^k$ 可定义为:

$$Risk_m^k = Cost_m^k \times \bar{P}_m \quad m=1, 2, \dots, p, m \neq k \quad (13)$$

其中: \bar{P}_m 为故障 m 发生的相对概率。根据式(12)、

(13) 可以求得发布值 ATC_k 对其它 $p-1$ 个故障的经济成本及其风险。取其中风险的最大值作为发布值 ATC_k 的风险 $Risk^k$, 即:

$$Risk^k = \max\{Risk_1^k, Risk_2^k, \dots, Risk_i^k, \dots, Risk_p^k\} \quad \text{其中 } i \neq k \quad (14)$$

依此, 可以得到在已知故障集下, 每个可用传输容量发布值的风险。

计及风险的可用传输容量计算主要包括以下几个方面: 故障集的选取; 单一故障下 ATC 的求取; 每个故障对应的可用传输容量发布的风险值的求取。具体的计算步骤如图 1。

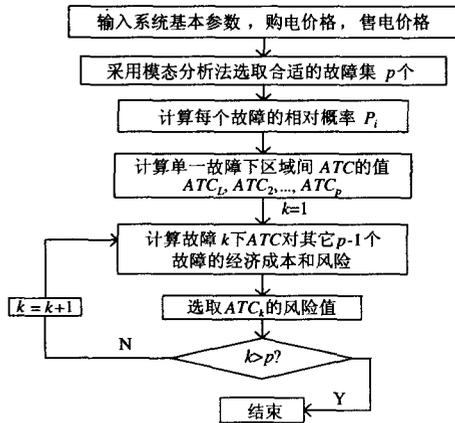


图 1 ATC 风险值计算流程图

Fig.1 Flow chart of ATC risk calculation

4 算例分析

本文对 IEEE-30 节点系统进行了仿真计算。IEEE-30 节点系统如图 1 所示,该系统有 30 个节点,其中发电节点 6 个,负荷节点(包括发电机-负荷节点) 20 个,线路 41 条。将该系统划分为三个区,划分方式如图 2 所示。

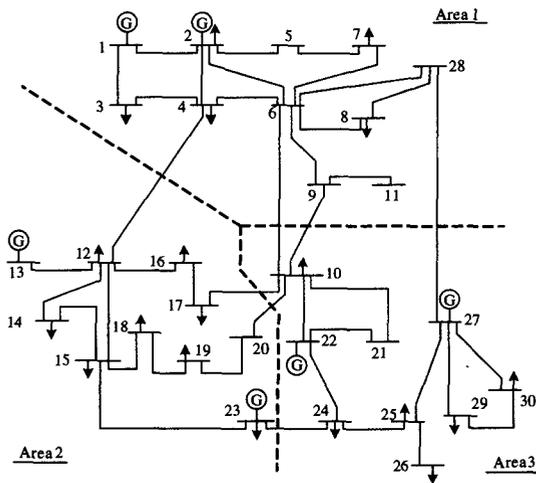


图 2 IEEE-30 节点系统图

Fig.2 IEEE-30 bus system

4.1 故障情况下 ATC 计算

本文选取的故障集包括 14 个线路故障, 6 个发电机故障。首先用模态分析法按故障对系统安全性影响的大小进行线路故障选择; 由于发电机故障会对系统产生较大的影响, 因此本文计算了每个发电机故障下的可用传输容量。确定系统故障集后(包括无故障情况), 由前文提出的优化模型(1)及跟踪中心轨迹内点算法计算各个故障情况下的可用传输容量。以区域 1 到区域 3 的可用传输容量计算为

例, 计算结果如表 1 所示。

4.2 各个故障情况下 ATC 风险分析

故障集下计算得到的 ATC 有 21 个(包括无故障情况), 根据式(12)、(13)、(14)计算得到每个 ATC 发布的风险值,见表 1。设电力市场模式为 POOL 模式, 电网公司统一购电再向用户售出。假设购电价格为 0.48, 售电价格为 0.5, 赔偿价格为 0.52, 单位元/度。

可以看到,该故障集下 ATC 最小值为 39.75 MW, 风险值为 36.193 万元; ATC 最大值为 78.48 MW, 但是风险值也最大, 为 93.994 万元。而风险值最小时对应的 ATC 为 56.32 MW。

计算结果说明电力市场环境, 可用传输容量不是发布的越小越好。可用传输容量的发布不能仅仅考虑物理因素, 还要考虑到市场因素对决策的影响。如果发布的 ATC 值过小, 电网还能利用的容量没有充分利用到, 因为 ATC 值最小情况的故障发生概率通常是最低的, 这不仅是资源的浪费, 同时也是一种经济损失; 如果发布的 ATC 值过大, 那么发生更严重的故障时, 赔偿的损失也越大。

表 1 区域 1 到区域 3 的 ATC 计算结果

Tab.1 Computation result of ATC from area 1 to area 3

故障排序	相对故障率	ATC/MW	风险/万元
6-10	0.05973	57.38	34.234
12-16	0.04624	73.56	77.228
1-2	0.04624	56.95	22.813
2-4	0.04624	<u>56.32</u>	<u>20.730</u>
14-12	0.04817	77.90	92.077
12-15	0.07515	70.67	68.173
10-22	0.04239	68.21	60.04
18-19	0.04432	73.41	77.232
2-5	0.04624	61.36	37.393
4-6	0.06358	50.05	36.568
10-21	0.05202	77.38	90.357
22-24	0.06358	74.66	81.365
27-29	0.06936	74.87	82.059
8-28	0.06358	78.36	93.597
G1	0.0077	<u>39.75</u>	<u>36.193</u>
G2	0.0077	43.80	32.28
G13	0.0077	46.79	29.614
G22	0.0077	55.80	21.194
G23	0.0077	52.32	24.447
G27	0.0077	48.62	27.904
无故障	0.1869	<u>78.48</u>	<u>93.994</u>

因此, 可用根据人们对风险的癖好发布一个合理的 ATC 值, 使人们在市场交易中做出更合理的决策。若希望风险越小越好, 那么发布风险最小时 20.73 万元对应的 56.32 MW 较为合理。若不规避风险, 可以结合式(10)取期望值, 根据各个状态的

相对概率及其对应的 ATC 值和风险值,可以算出可用传输容量的期望值为 69.86 MW, 风险的期望值为 66.4057 万元。

5 结论

本文从经济角度考虑了可用传输容量发布的问题,用风险分析的方法给出了可用传输容量的发布方法,从计算仿真结果可以看出,用本文提出的方法发布的可用传输容量值更多地反应了市场信息,具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] Transmission Transfer Capability Task Force . Available Transfer Capability Definition and Determination[R]. New Jersey : North American Electric Reliability Council,1996.
- [2] Ilic M D,Yoon Y T Zobian A. Available Transmission Capability(ATC) and Its Value Under Open Access[J]. IEEE Trans on Power Systems,1997,12(2): 636-645.
- [3] 王成山,王兴刚,魏炜. 输电系统可用输电能力研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 42-46. WANG Cheng-shan, WANG Xing-gang, WEI Wei. Study on Available Transfer Capability of Power System[J]. Proceeding of Electric Power System and Automation, 2005, 17(5): 42-46.
- [4] 刘皓明,倪以信,吴军基,等. 计算电网可用传输能力的方法述评[J]. 继电器,2003,31(10): 45-49. LIU Hao-ming, NI Yi-xin, WU Jun-ji, et al. Review of Available Transfer Capability Calculation in Electricity Market[J]. Relay, 2003,31(10): 45-49.
- [5] Hamound G.Assessment of Available Transfer Capability of Transmission Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems,2000,15(4): 27-32.
- [6] Ou Yan, Singh Chanan. Assessment of Available Transfer Capability and Margins[J]. IEEE Trans on Power Systems,2002,17(2):463-466.
- [7] 崔雅莉,别朝红,王锡凡. 输电系统可用输电能力的概率模型及计算[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 36-40. CUI Ya-li, BIE Chao-hong, WANG Xi-fan. Study on Probabilistic Models and Algorithms of Available Transfer Capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(14): 36-40.
- [8] Kulyos A,Akihiko A. Consideration of an Appropriate TTC by Probabilistic Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems,2004,19(1):375-383.
- [9] 刘皓明,李卫星,倪以信,等. 计及静态安全约束的跨区域双边交易最大交易量实用计算方法[J]. 电网技术, 2003, 27 (9): 1-5. LIU Hao-ming, LI Wei-xing, NI Yi-xin, et al. A Practical Method for Calculating Maximum Transaction Volume of Bilateral Transaction in Multiregional Electricity Market Considering Static Security Constraints[J]. Power System Technology, 2003, 27 (9): 1-5.
- [10] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [11] Flueck A J, Gonella T. A New Power Sensitivity Method of Ranking Branch Outage Contingencies for Voltage Collapse[J].IEEE Trans on Power Systems,2002, 17(2): 265-269.
- [12] 潘雄,徐国禹. 基于最优潮流并计及静态电压稳定性约束的区域间可用传输能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2004,24(12): 87-91. PAN Xiong, XU Guo-yu. OPF Based ATC Calculation with Static Voltage Stability Constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(12): 87-91.

收稿日期: 2007-10-19

作者简介:

刘文娟(1983-),女,硕士研究生,研究方向为电力市场;E-mail:lilacsara@163.com

王磊(1963-),女,副教授,研究方向为信息技术在电力系统中的应用,电力市场。

万秋兰(1950-),女,教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行及控制,电力市场。

《电力系统保护与控制》(原刊名《继电器》)杂志社网站全新改版升级

《电力系统保护与控制》杂志社网站于 2008 年全新改版全新升级,建立远程稿件采编系统,是集读者、作者、审稿专家和编辑于一体的网络化期刊工作平台。

本刊原则上不受理电子邮件投稿,所有稿件均需作者登录我们的网站 <http://www.dlbn.net> 注册,取得用户名和设定密码后,由“作者登录”处进入投稿,并可由此随时查询稿件处理状态和处理意见;审稿专家也凭编辑部提供的用户名和密码由“审稿登录”处进入在线审稿;编辑的稿件处理工作全部在网上进行,在收到初稿、提交审稿意见时,将通过电子邮件通知注册作者。

有任何问题,请随时与本编辑部联系。联系电话: 0374-3212254, 0374-3212234。