

基于输电线路最大输电能力的输电网合理利用率评估

杨钤, 王建学*, 林帆, 张耀

(西安交通大学电气工程学院(陕西省智能电网重点实验室), 陕西省 西安市 710049)

Rational Utilization Rate Evaluation of the Transmission Network Based on the Transmission Line Total Transfer Capability

YANG Qian, WANG Jianxue*, LIN Fan, ZHANG Yao

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

Abstract: In the context of energy transition, the rapid development of renewable energy brings more uncertainty to the operation of power systems. Evaluating the rationality of the power grid planning scheme under this situation is a major challenge. The transmission line utilization rate is the key index for evaluating the utilization of transmission resources, but the traditional calculation method of transmission line utilization rate usually takes the limit transmission power of the line thermal stability as a reference, neglecting the influence of the grid operation state on transmission capacity. Therefore, it is impossible to analyze the reasons for the limited utilization of transmission resources from the index itself. The total transfer capability (TTC) of the transmission line is generally less than the thermal stability limit power under the system safety constraints. This study researches the calculation method of the transmission line TTC. Specifically, based on the optimal power flow model, the transmission line TTC under the system safety constraints from a single period and multiple periods will be calculated. Simultaneously, the corresponding linearization method was designed to reduce the difficulty of solving the model. Then, based on the transmission line TTC, an improved utilization rate index calculation method that can effectively represent the utilization level of transmission lines is proposed. Finally, transmission line TTC is discussed in the case study, and the rational utilization rate index of the transmission line is evaluated to determine the reasons for the limited utilization of transmission resources, which can verify the rationality and effectiveness of the model and method proposed in this paper.

Keywords: renewable energy; transmission line; total transfer capability; rational utilization rate; system evaluation

摘要: 能源转型背景下新能源的迅猛发展给电力系统带来更多不确定性, 如何评估在此形势下电网规划方案的合理性是一项重大挑战。输电线路利用率是评价输电资源利用的关键指标, 但传统利用率指标通常以热稳定极限功率为参照, 忽略了电网运行状态对线路输电能力的影响, 无法从指标本身分析输电资源利用水平受限的原因。在系统安全约束限制下, 输电线路最大输电能力 (total transfer capability, TTC) 一般小于热稳定极限功率。对输电线路TTC的计算方法进行了研究, 以最优潮流模型为基础, 从单时段和多时段两方面分别计算输电线路在系统安全约束下的TTC, 同时设计线性化方法降低模型求解难度。然后基于输电线路TTC, 提出能够有效表征输电线路资源利用水平的改进利用率计算方法。最后, 算例分析对输电线路TTC进行了讨论, 对输电线路合理利用率做出评估分析, 得出输电资源利用水平受限原因, 验证了所提模型和方法的合理性与有效性。

关键词: 新能源; 输电线路; 最大输电能力; 合理利用率; 系统评估

0 引言

在能源转型背景下, 以风电、光伏为代表的新能源迅猛发展, 高比例新能源接入电力系统, 一方面为电力系统减轻了供电和碳排放的压力, 推动电力系统的能源结构改革; 另一方面导致电网侧的随机性增加, 输电资源利用水平不均和局部过载的问题逐渐突出, 给电网安全运行带来巨大挑战^[1]。同时电网规划建设越来越注重投资效益, 追求资金使用更加高效、输电网资源利用更加充分。在此背景下, 对输电网利用率的有效评估日益重要。

考虑到未来的发展, 输电网规划往往会在输电线

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0902200)。

National Key Research and Development Program of China (2017YFB0902200).

路容量保留一定裕度。在实际运行中，多数输电线路难以达到理论上的最大输送功率，即热稳定极限功率。输电线路实际运行时的最大输电能力还与电源和负荷在电力系统中的分布及其供需状况、电力系统网架结构和预想故障集都有密切联系，很可能是其中某项因素导致输电线路的传输功率受限。输电线路实际运行时的最大输电能力能够反映出在所有可能出现的运行方式下，该线路所能流过的最大功率，通常小于该线路的热稳定极限功率，如果能有效计算出输电线路的最大输电能力，则可以分析输电资源利用水平受限的原因。

基于以上分析，计算线路利用率通常采用不同的计算基准，主要包括两类计算方法。第一类是以热稳定极限功率^[2]为基准进行计算。对于中国电网运行，输电线路负载率存在不均衡的问题，以上述基准计算的利用率大部分偏低^[3]。针对中国实际情况，文献[4-5]采用线路热稳定极限功率和经济输送功率间的最小值作为基准，在一定程度上兼顾了安全性和经济性。文献[6]提到，由于电网规模扩展、新能源并网以及电力市场改革所带来的影响，传统的输电线路利用率没有计及电网安全运行的问题，仅以线路本身的物理特性为参照，难以对电网的利用水平做出有效评估。

第二类则考虑了系统的运行状态对最大输电能力进行修正。文献[7]考虑了多种风险因素，引入各类因素的风险系数对利用率计算公式的分母进行修正。文献[8]通过对不同电压等级下输电线路的特性进行分析，分别制定了不同的输电能力计算方法。随着新能源大规模并网，系统运行的不确定性显著增加，其对线路最大输电能力的影响难以通过简单分析来量化，如何在线路最大输电能力研究中处理新能源随机性以及波动性，亟待进一步深入研究。

在市场环境下，输电能力研究大多关注输电网络的可用输电能力^[9] (available transfer capability, ATC) 以及最大输电能力^[10] (total transfer capability, TTC)。其中最大输电能力是指电力系统在满足安全约束条件下能够输送的最大功率，在考虑市场化输电协议、可靠性裕度以及容量效益裕度的基础上，输电系统中剩余的功率传输容量即可用输电能力。事实上，在一些特定应用场景下，输电线路最大输电能力就是区域间TTC研究^[11-12]的延伸，可以认为是区域间联络线路的最大输电能力。已有的ATC和TTC研究均以整个电力系统为研究对象，最终得出的指标主要对区域之间的传输能力进行分析，未关注单条输电线路的资源利用

情况。因此本文将已有TTC的理论基础应用到新的研究对象中，定义输电线路TTC为在负荷水平、电源配置和电网拓扑结构不变的前提下，指定的输电线路在系统安全运行中所能传输的最大功率。对于某一时间段的分析，新能源的时序波动特征构成了一个整体场景，加上系统时序耦合约束的限制，单纯计算研究时段内的线路最大功率会对TTC产生过高的估计，因此TTC需对应输电线路所能传输的最大电量。针对输电能力的研究，比较常用的方法为最优潮流法^[13-16]，它能够有效地处理诸多约束和系统的不确定性，适合输电线路TTC的计算。

基于上述分析，为适应当前大规模新能源接入和优化电网投资的实际要求，本文给出了一套理论方法，在给电源配置、负荷水平和网架结构条件下，对输电线路TTC及改进的利用率指标进行评估分析。该方法的主要特点在于：①将已有电力系统TTC理论应用到新的研究对象，定义输电线路TTC，并考虑新能源和负荷的时序波动特征，建立最优潮流模型对输电线路TTC进行计算；②设计线性化方法，使原问题转变为标准的混合整数线性规划 (MILP) 问题，从而降低模型的求解难度；③基于所提的输电线路TTC，提出能够有效表征输电线路利用水平的改进利用率指标，并通过算例验证本文所提方法的合理性与有效性。

1 输电线路单时段TTC模型

本模型在已有系统负荷水平、电源配置以及电网拓扑结构的条件下，重点关注某条输电线路在单个时间断面的最大输电功率。在系统安全约束条件下，线路TTC主要受到系统运行的不确定性因素影响。其中，不确定性因素按以下方式处理：对于输电线路的预想故障，考虑N-1准则，要求在最多1条输电线路故障的情况下系统仍能安全运行；对于新能源出力和节点负荷的不确定性，该模型基于鲁棒优化^[17]的思想，允许新能源和节点负荷功率分别取装机容量和负荷水平范围内的任何值，即考虑了系统所有可能的正常运行情况。

由于研究重点为系统稳态运行情况下的输电线路TTC计算，本文采用以下简化条件^[18]：

1) 忽略无功功率和电压的影响，系统潮流采用直流潮流形式进行描述；

2) 系统安全约束中仅考虑静态安全约束，不计

及暂态稳定性的影响;

3) 忽略自然环境(比如温度)对输电线路热稳定极限功率的影响,认为输电线路自身热稳定极限功率为定值。

1.1 目标函数

对于待分析的输电线路 m ,直接构建该线路在多重安全约束下传输功率最大为目标函数。具体表达式为

$$\max |P_m^L| \quad (1)$$

式中: P_m^L 为输电线路 m 在单个时间断面下的传输功率,若与线路功率参考方向相同则取正值,否则取负值。

在对大规模实际系统进行分析时,由于每条线路的模型是独立的,因此可实现并行计算。正因为模型本身的独立性,在实际应用中可以根据具体需求对系统中重点关注的线路进行单独计算。

1.2 约束条件

1) 输电线路预想故障状态约束:

$$\sum_{l \in \Omega_L} z_l \leq 1, z_l \in \{0, 1\} \quad (2)$$

式中: Ω_L 为系统输电线路集合; z_l 为线路 l 的运行状态变量,0表示线路处于正常运行状态,1表示线路处于故障状态。式(2)考虑 $N-1$ 准则,保证所有输电线路中最多允许1条线路发生故障。

2) 输电线路传输容量约束:

$$-(1-z_l)\bar{P}_l^L \leq P_l^L \leq (1-z_l)\bar{P}_l^L, \forall l \in \Omega_L \quad (3)$$

式中: \bar{P}_l^L 为输电线路 l 的热稳定极限功率。当 $z_l=1$ 时,线路 l 断开,式(3)将线路功率限制为0;当 $z_l=0$ 时,式(3)即表示线路正常运行情况下的传输容量约束。

3) 输电线路直流潮流约束^[19]:

$$-\pi z_l \leq \theta_{i,i} - \theta_{i,j} - x_l P_l^L \leq \pi z_l, \forall l \in \Omega_L \quad (4)$$

式中: $\theta_{i,i}$ 与 $\theta_{i,j}$ 分别为输电线路 l 首、末端节点的相角, i 和 j 分别为线路 l 的首、末端节点; x_l 为输电线路 l 的电抗值。当 $z_l=1$ 时,线路 l 断开,式(4)的不等式两端恒成立,该约束不再起作用;当 $z_l=0$ 时,式(4)为正常运行时的直流潮流约束。

4) 节点功率平衡约束:

$$P_i^G + P_i^R = P_i^D + \sum_{l \in \Omega_{L,i}} P_l^L, \forall i \in \Omega_N \quad (5)$$

式中: Ω_N 为系统节点集合; $\Omega_{L,i}$ 为端点包含节点 i 的输电线路集合; P_i^G 、 P_i^R 、 P_i^D 分别为节点 i 处的常规机组、新能源机组、负荷功率。为了表达方便,后续约束不再用节点处的各功率变量表示,改用各类型元件功率

变量表示。

5) 负荷功率约束:

$$P_g^D \leq P_g^D \leq \bar{P}_g^D, \forall g \in \Omega_D \quad (6)$$

式中: Ω_D 为系统负荷节点集合; \bar{P}_g^D 、 P_g^D 为第 g 个负荷节点的功率上、下限。单时段模型基于鲁棒优化的思想,允许负荷功率取系统当前负荷水平范围内的任何值,全面考虑了系统的负荷特性。

6) 常规机组出力约束:

$$u_g P_g^G \leq P_g^G \leq u_g \bar{P}_g^G, \forall g \in \Omega_G, u_g \in \{0, 1\} \quad (7)$$

式中: Ω_G 为系统常规机组集合; u_g 为第 g 台常规机组的开停机状态,0代表关机,1代表开机; \bar{P}_g^G 、 P_g^G 为第 g 台常规机组的有功出力上、下限。

7) 新能源机组出力约束:

$$0 \leq P_g^R \leq \bar{P}_g^R, \forall g \in \Omega_R \quad (8)$$

式中: Ω_R 为系统新能源机组集合; \bar{P}_g^R 为第 g 台新能源机组装机容量。

8) 系统备用约束:

$$\sum_{g \in \Omega_G} (u_g \bar{P}_g^G - P_g^G) \geq \alpha \sum_{g \in \Omega_D} P_g^D \quad (9)$$

式中: α 为系统负荷备用率。式(9)保证了常规机组备用容量不小于总负荷的一定比例。

9) 新能源消纳约束^[20]:

$$\sum_{g \in \Omega_R} P_g^R \geq \eta_R \sum_{g \in \Omega_D} P_g^D \quad (10)$$

式中: η_R 为新能源消纳参数。对于含高比例新能源的电力系统,需要设置新能源消纳约束以确保新能源消纳量不少于负荷总需求量的一定比例。

1.3 求解方法

由于该模型的目标函数存在绝对值,因此在模型求解时需转换为如下形式:

$$\max \left\{ \max P_m^L, \max (-P_m^L) \right\} \quad (11)$$

即原问题转换为求解2个子问题后,取目标函数的较大值作为原问题最优解,子问题均为标准的MILP问题。

2 输电线路多时段TTC模型

单时段模型以功率为核心,偏重于在某时间断面对输电线路的分析,得到的TTC结果较为理想;而多时段模型以电量为核心,偏重于在某一段时间范围内对输电线路的分析,其考虑了系统时序负荷特性和新能源出力特性的影响^[21],得到的输电线路TTC更能适

用于系统的实际运行状况。

本模型假设系统负荷水平、电源配置以及电网拓扑结构已知, 重点关注某条输电线路在一段时间的最大传输电量。其中, 系统运行的不确定性因素按以下方式处理: 对于输电线路的预想故障, 与单时段模型相同, 同样考虑 $N-1$ 准则; 对于新能源和负荷功率不确定性的刻画, 利用新能源和负荷功率的历史数据生成系统典型运行场景集, 从中选取多个典型运行场景进行分析, 分别计算待分析线路在这些典型运行场景下所能传输的最大电量值, 并且取其中的最大值作为该线路在一段时间内的TTC。

为降低多时段模型的求解难度, 在第1章简化条件基础上, 做出以下假设:

1) 在考虑 $N-1$ 准则时, 认为输电线路的运行状态不随时间 t 变化而变化, 即认为每个典型运行场景下, 线路的运行状态是固定的;

2) 认为常规机组运行状态由日前调度给出, 以保证模型结果更加符合系统实际运行情况。

2.1 目标函数

对于待分析输电线路 m , 选取某典型运行场景 s , 构建目标函数:

$$\max \sum_{t=1}^{T_0} |P_{m,s}^L(t)| \Delta t \quad (12)$$

式中: T_0 为典型运行场景所包含的时段数; Δt 为典型运行场景的时段步长; $P_{m,s}^L(t)$ 为线路 m 在典型运行场景 s 下 t 时刻的传输功率。

2.2 约束条件

对比单时段模型, 多时段模型中的变量需要修正为关于时刻 t 的函数。

1) 输电线路预想故障状态约束:

$$\sum_{l \in \Omega_L} z_{l,s} \leq 1, \quad z_l \in \{0, 1\} \quad (13)$$

2) 输电线路传输容量约束:

$$-(1-z_{l,s})\bar{P}_l^L \leq P_{l,s}^L(t) \leq (1-z_{l,s})\bar{P}_l^L, \quad \forall l \in \Omega_L, \quad t=1, 2, \dots, T_0 \quad (14)$$

3) 输电线路直流潮流约束:

$$-\pi z_{l,s} \leq \theta_{l,s,i}(t) - \theta_{l,s,j}(t) - x_l P_{l,s}^L(t) \leq \pi z_{l,s}, \quad \forall l \in \Omega_L, \quad t=1, 2, \dots, T_0 \quad (15)$$

4) 节点功率平衡约束:

$$P_{i,s}^G(t) + P_{i,s}^R(t) = P_{i,s}^D(t) + \sum_{l \in \Omega_{L,i}} P_{l,s}^L(t), \quad \forall i \in \Omega_N, \quad t=1, 2, \dots, T_0 \quad (16)$$

5) 常规机组出力约束:

$$u_{g,s}(t) \underline{P}_g^G \leq P_{g,s}^G(t) \leq u_{g,s}(t) \bar{P}_g^G, \quad \forall g \in \Omega_G, \quad t=1, 2, \dots, T_0 \quad (17)$$

式中: $u_{g,s}(t)$ 为已知量, 由日前调度给出。

6) 常规机组爬坡约束:

$$-R_{d,g} \leq P_{g,s}^G(t) - P_{g,s}^G(t-1) \leq R_{u,g}, \quad \forall g \in \Omega_G, \quad t=2, 3, \dots, T_0 \quad (18)$$

式中: $R_{u,g}$ 、 $R_{d,g}$ 分别为常规机组 g 的向上、向下爬坡速率上限。对比单时段模型, 多时段模型中常规机组需要额外考虑爬坡约束。

7) 新能源机组出力约束:

$$0 \leq P_{g,s}^R(t) \leq \hat{P}_{g,s}^R(t), \quad \forall g \in \Omega_R, \quad t=1, 2, \dots, T_0 \quad (19)$$

式中: $\hat{P}_{g,s}^R(t)$ 为新能源机组 g 在 s 场景中 t 时刻的功率预测值。

8) 系统备用约束:

$$\sum_{g \in \Omega_G} (u_{g,s}(t) \bar{P}_{g,s}^G - P_{g,s}^G(t)) \geq \alpha \sum_{g \in \Omega_D} P_{g,s}^D(t), \quad t=1, 2, \dots, T_0 \quad (20)$$

9) 新能源消纳约束:

$$\sum_{t=1}^{T_0} \sum_{g \in \Omega_R} P_{g,s}^R(t) \geq \eta_R \sum_{t=1}^{T_0} \sum_{g \in \Omega_D} P_{g,s}^D(t) \quad (21)$$

2.3 求解方法

多时段模型的目标函数为多个绝对值求和后的极大值问题, 该优化问题无法使用常规的绝对值线性化方法。为了有效求解多时段模型, 本文采用了一种线性化方法, 可将原问题转换为标准的MILP问题。

1) 引入功率方向变量对目标函数进行重构:

$$\max \sum_{t=1}^{T_0} (2\tau_{m,s}(t) - 1) P_{m,s}^L(t) \Delta t \quad (22)$$

式中: $\tau_{m,s}(t)$ 为线路 m 在 s 场景下 t 时刻的功率流向。 $\tau_{m,s}(t)=1$ 代表正向, $\tau_{m,s}(t)=0$ 代表负向。此时需要添加线路功率方向约束:

$$(\tau_{m,s}(t) - 1) \bar{P}_m^L \leq P_{m,s}^L(t) \leq \tau_{m,s}(t) \bar{P}_m^L, \quad t=1, 2, \dots, T_0 \quad (23)$$

当 $\tau_{m,s}(t)=1$ 时, 式(23)变为 $0 \leq P_{m,s}^L(t) \leq \bar{P}_m^L$, 限制线路功率方向为正向; 当 $\tau_{m,s}(t)=0$ 时, 式(23)变为 $-\bar{P}_m^L \leq P_{m,s}^L(t) \leq 0$, 限制线路功率方向为负向。

可以看出, 当线路功率为正向时, 有 $2\tau_{m,s,t} - 1 = 1$ 和 $P_{m,s}^L(t) > 0$, 可得 $(2\tau_{m,s}(t) - 1) P_{m,s}^L(t) = |P_{m,s}^L(t)|$; 当线路功率为负向时, 有 $2\tau_{m,s}(t) - 1 = -1$ 和 $P_{m,s}^L(t) < 0$, 同样可得 $(2\tau_{m,s}(t) - 1) P_{m,s}^L(t) = |P_{m,s}^L(t)|$, 因此在式(23)的约束下, 式(22)与式(12)等价。应用该重构方法后, 目标函数中仍然存在非线性项 $(2\tau_{m,s}(t) - 1) P_{m,s}^L(t)$, 因此进一步线性化。

2) 设置辅助变量 $\tilde{P}_{m,s}^L(t)$ 用于表示非线性项

$(2\tau_{m,s}(t)-1)P_{m,s}^L(t)$, 得到线性化目标函数:

$$\max \sum_{t=1}^{T_0} \tilde{P}_{m,s}^L(t) \Delta t \quad (24)$$

采用Big-M法^[22]增加新的约束:

$$-M\tau_{m,s}(t) \leq \tilde{P}_{m,s}^L(t) + P_{m,s}^L(t) \leq M\tau_{m,s}(t), \quad t=1,2,\dots,T_0 \quad (25)$$

$$-M(1-\tau_{m,s}(t)) \leq \tilde{P}_{m,s}^L(t) - P_{m,s}^L(t) \leq M(1-\tau_{m,s}(t)), \quad t=1,2,\dots,T_0 \quad (26)$$

式中: M 为足够大的正数。可以看出, $\tau_{m,s}(t)=1$ 时, 式(25)的约束无作用, 式(26)变为 $\tilde{P}_{m,s}^L(t)=P_{m,s}^L(t)$; $\tau_{m,s}(t)=0$ 时, 式(26)的约束无作用, 式(25)变为 $\tilde{P}_{m,s}^L(t)=-P_{m,s}^L(t)$ 。因此在这2个约束的限制下, 能够严格保证等式 $\tilde{P}_{m,s}^L(t)=(2\tau_{m,s}(t)-1)P_{m,s}^L(t)$ 成立。

综上, 经过2步处理后, 共计增加 $2T_0$ 个辅助变量和 $3T_0$ 个约束, 即可将目标函数线性化, 且模型规模复杂度增加很小, 该问题变为标准的MILP问题。

2.4 目标函数修正

新能源消纳是目前电网发展的一个重点问题, 在新能源大发期间, 本模型可能为了增大某条线路的传输电量而导致大规模弃新能源电量, 因此仅满足新能源消纳约束是不够的。为此对模型加以改善, 对新能源弃电进行惩罚, 可将目标函数修正为

$$\max \left(\sum_{t=1}^{T_0} \tilde{P}_{m,s}^L(t) \Delta t - \lambda \sum_{g \in \Omega_R} E_{g,s}^R \right) \quad (27)$$

式中: λ 为新能源弃电量惩罚系数; $E_{g,s}^R$ 为新能源机组 g 在场景 s 中的弃电量之和, 具体表示为

$$E_{g,s}^R = \sum_{t=1}^{T_0} (\hat{P}_{g,s}^R(t) - P_{g,s}^R(t)) \Delta t \quad (28)$$

3 改进的输电线路利用率指标

针对上述提出的输电线路TTC模型, 本研究提出一种有效表征输电线路利用率的指标:

$$\gamma_m = \frac{P_m^L}{\hat{P}_m^L} \quad (29)$$

式中: γ_m 为改进后的输电线路 m 利用率; P_m^L 为输电线路 m 的实际传输功率; \hat{P}_m^L 为输电线路 m 的最大输电功率。

对于单时段模型, 可直接应用公式(29)计算; 对于多时段模型, 由于得到的优化结果是电量形式, 考虑到实际评估的运行时段数可能与典型场景包含的时段数不同, 因此公式(29)中的 P_m^L 和 \hat{P}_m^L 应取平均

功率。其中 P_m^L 表达形式如式(30)所示:

$$P_m^L = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |P_m^L(t)| \Delta t \quad (30)$$

式中: T 为输电线路 m 的实际运行时段数; $P_m^L(t)$ 为输电线路 m 在 t 时刻的实际传输功率。关于 T_0 和 T 的取值, 考虑到模型求解复杂度, 以及以日为单位的系统运行具有周期性特点, 一般 T_0 可取24 h; 对于待评估的实际运行时段 T , 可根据不同需求进行选择, 可取1日、1月或更长时段。

对于 \hat{P}_m^L , 根据本文对时段内输电线路TTC的定义, 应取所有典型场景下的最大平均功率, 如公式(31)所示:

$$\hat{P}_m^L = \frac{1}{T_0} \max_{\forall s} \hat{E}_{m,s}^L \quad (31)$$

式中: $\hat{E}_{m,s}^L$ 为输电线路 m 在场景 s 下的最大输电电量, 即多时段模型的优化结果, 具体表示为

$$\hat{E}_{m,s}^L = \max \sum_{t=1}^{T_0} |P_{m,s}^L(t)| \Delta t \quad (32)$$

区别于传统的输电线路利用率计算方法, 本文所提利用率指标计算公式中, 分母部分采用了输电线路TTC, 而非热稳定极限功率。传统的利用率计算方式没有计及电力系统运行状态, 表示为输电线路功率占其固有输电能力的比例, 反映的是线路自身的安全运行情况。本文所提的新型利用率计算方式, 将输电线路与电力系统运行状态紧密联系, 考虑了电源和负荷在电力系统中的分布及其供需状况、电力系统网架结构以及预想故障集对输电线路TTC的影响, 可以反映出输电线路针对其在系统因素限制下最大可用资源的利用情况, 从而结合实际运行情况可分析输电线路传输功率受限的原因。

实际运行过程中输电线路的合理利用率会受到不同方面的影响。从传输容量来看, 一方面, 为了应对严重突发事件, 应该为线路可用资源保留一定裕度; 另一方面, 如果线路传输容量过低, 则会导致线路可用资源的浪费。从发展阶段来看, 新投建线路应该比投建多年的线路保持更高的裕度, 以适应未来的负荷增长。因此线路的合理利用率应该结合系统实际运行情况和线路投建阶段, 设定在一定范围之内。

4 算例分析

4.1 算例设计

本文选取IEEE RTS24测试系统^[23], 用于验证所提优化模型的合理性和有效性。测试系统中节点1~10为

低压侧，节点11~24为高压侧，低压侧和高压侧输电线路的热稳定极限功率分别为175 MW和500 MW，变压器所在支路的热稳定极限功率为400 MW。

针对所提输电线路TTC计算模型，对测试系统进行调整，在节点17和节点20处接入装机容量300 MW的新能源机组。改装后的测试系统最大负荷为2850 MW，常规机组装机容量为3405 MW，新能源机组装机容量为600 MW。对于多时段模型，设置场景参数 $T_0=24$ h以及 $\Delta T=1$ h，选取一年的历史数据作为基础场景集（共365个场景），采用文献[24]中所提聚类方法生成表征新能源和负荷不确定性的典型场景集（包含36个典型场景）；针对典型场景集，分别将新能源出力水平和负荷水平按照高、中、低3档进行划分，并按照新能源和负荷之间功率水平的组合，从中选出9个典型场景，此时选取的场景可以基本涵盖新能源-负荷可能出现的运行状态，而且降低了模型的计算量。

4.2 输电线路TTC结果分析

4.2.1 单时段与多时段模型下结果对比

分别基于单时段和多时段模型进行计算，并展示新能源并网后测试系统全部输电线路TTC。其中多时段模型的整个时段最大输电电量已折合为平均输电功率。定义 β 为本文所提方法计算得到的线路TTC与热稳定极限功率之比，表1给出了单时段模型与多时段模型下， β 值处于不同区间输电线路数。可以看出，单时段模型计算结果中绝大多数线路TTC都能达到热稳定极限功率的80%以上，而多时段模型结果中大多数线路TTC可以达到热稳定极限功率的60%以上。由于单时段模型仅评估一个时间断面下的线路TTC，赋予系统元件的灵活性很大，得到的是一个理想结果；而多时段模型考虑了新能源和负荷的时序波动性，得到的结果更适合评估系统运行一段时间内输电线路的TTC，更具有应用价值，因此后续将针对多时段模型展开进一步讨论。

表 1 单/多时段模型不同 β 值区间包含输电线路数
Table 1 The number of transmission lines in different β value intervals of single-/multi-period model

β	0.0~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
单时段模型	0	2	2	34
多时段模型	0	5	13	20

4.2.2 不同地理位置输电线路TTC计算结果对比

图1给出了多时段模型结果下测试系统所有线路的TTC分布情况，箭头标明了线路功率达到TTC时的潮流方向。可以看出，TTC处于较高状态的线路主要集中于两个区域，一个是节点16附近的高压侧电源密集区，另一个是与节点10相连的高压侧电源输送通道和低压侧负荷区域，说明输电线路TTC的大小与电源及负荷分布密切相关。此外，线路TTC还与 $N-1$ 断线位置有直接关系。接下来选取2条关键线路进行具体分析，图2展示了关键线路在达到最大输电能力时对应的 $N-1$ 断线位置。

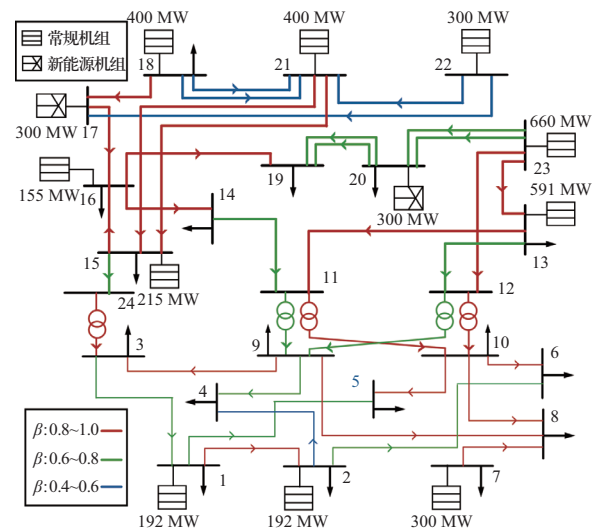


图 1 多时段模型下的输电线路TTC

Fig. 1 TTC of transmission line under multi-period model

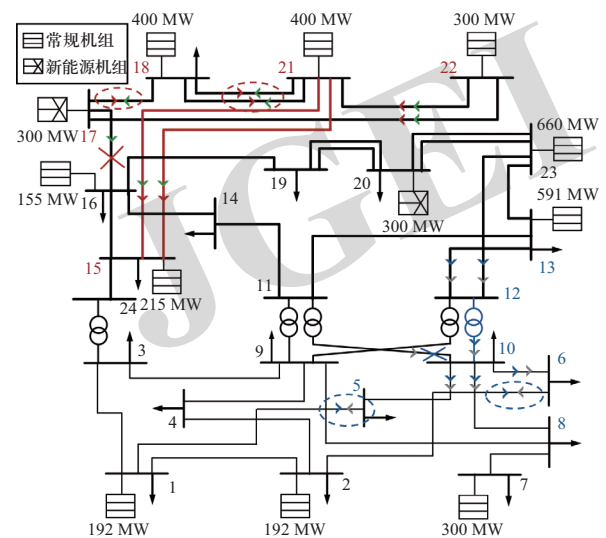


图 2 关键线路达到最大输电能力时对应的 $N-1$ 断线位置

Fig. 2 Corresponding $N-1$ disconnection position when critical line reaches total transfer capability

分析线路10-12为变压器支路,如图2所示,其中蓝色和灰色箭头标明了它周围的线路在线路10-11断开前后的潮流方向。可以看出,当线路10-11断开时,节点10处只能接受节点12传输的功率,为保障节点10附近区域的负荷需求,线路10-12承担的输电任务增大,使其功率最大化。线路10-11断开前后,周围高压侧线路潮流不会发生变化,但低压侧线路潮流会发生反向;尽管线路10-12的传输功率增加,但节点10接受的高压侧供电量仍比断线前减少,为满足节点5和6的负荷需求,节点1和2的常规机组增发电量,导致线路1-5和2-6潮流发生变化。

对于线路15-21,其为双回线,图2红色和绿色箭头标明了它周围的线路在线路10-11断开前后的潮流方向。可以看出,线路15-21承担着将上方电源功率向下输送的任务,当线路16-17断开时,原本由传输通道21-18-17汇集到节点17的电源功率无法向系统中下部传输,进而使得17-18-21潮流反向。节点17、18和22处的电源功率均只能经由节点21传输,使得线路15-21的传输功率大幅上升。

经过对处于不同地理位置的线路进行分析可以看出,输电线路TTC与其附近的网架结构、电源及负荷分布均有密不可分的关系,同时验证了模型计算结果的合理性。

4.3 基于输电线路TTC的利用率指标计算

4.3.1 输电线路合理利用率分布情况

基于多时段模型计算的输电线路TTC,给出其在改进利用率指标评估方面的应用。选取高可再生能源出力水平、高负荷水平的典型场景,采用以运行成本最低为目标函数的机组组合模型进行计算,用以仿真测试系统在该典型运行场景下的实际运行状况,即实际评估的运行时段数也为24 h。图3给出了系统内输电线路改进利用率 γ 的分布情况,箭头标明了线路的潮流方向。

针对本算例,设定线路合理利用率分布在40%~80%时,可以使得输电线路在保留安全裕度的情况下,较为充分地利用其在系统中的实际可用资源,受新能源和负荷随机性的影响,该区间为极端运行场景保留了一定的浮动范围。可以看出在本测试系统中,多数线路的利用率处于该合理利用区间。剩余线路中,只有极少部分在正常运行情况下合理利用率处于80%以上,存在一定的安全风险,需要后续规划重点关注;然而,合理利用率处于20%以下的线路数量比较多,

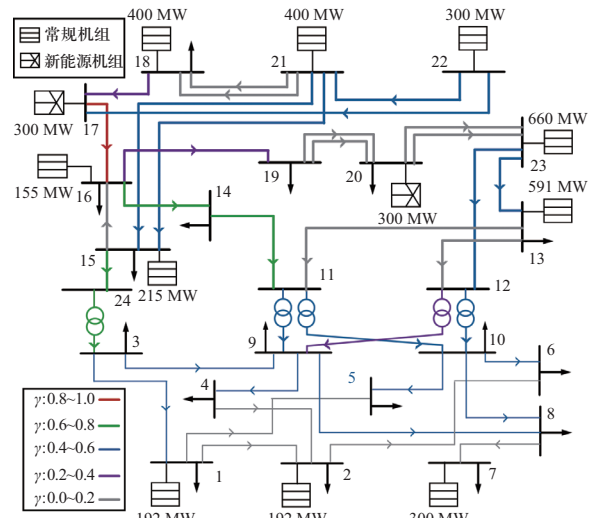


图3 正常运行时系统输电线路改进利用率

Fig. 3 Improved utilization rate of transmission line in normal operation

资源利用水平很低,是导致该系统资源利用分布不均的重要因素。

除此之外,线路TTC决定了其在系统中的实际可用资源。因此,为了找出线路输电利用水平受限的原因,还需结合线路TTC进行定量分析,从而采取合适措施提高系统整体输电资源的利用水平。

4.3.2 改进利用率计算结果对比和应对措施分析

表2选取4条处于不同地理位置的输电线路,定量给出了改进利用率与传统利用率的对比结果。本文所提改进利用率克服了传统利用率的不足,结合输电线路TTC,并对分析改进利用率与传统利用率之间的差异,可以找出输电线路资源利用水平受限的原因,显示出改进利用率分析更加有效。这里对表2中的输电线路利用率结果进行具体分析。

表2 改进利用率与传统利用率结果对比

Table 2 Comparison between the results of rational utilization rate and traditional utilization rate

输电线路	热稳定极限功率/MW	TTC /MW	实际运行平均功率/MW	传统利用率	改进利用率
15-24	500	367	230	46.0%	62.7%
17-22	500	300	132	26.4%	44.0%
20-23	500	393	63	12.6%	16.0%
16-17	500	478	409	81.8%	85.6%

线路15-24处于高压侧电源密集区向低压侧送电的传输路径上,但只能通过变压器支路3-24(容量上限为400 MW)输送电能,尽管将节点3的负荷增加到

足够大, 在现有拓扑基础上, 线路15-24的TTC最高不会超过400 MW, 因此周围网架结构的薄弱限制了线路15-24的资源利用, 在系统高负荷水平期间, 使其TTC达到了367 MW, 本文所提利用率更加准确表征了实际运行功率占TTC的比例。线路17-22处于高压侧电源的送出通道上, 由于节点22的电源装机容量(300 MW)较低, 当线路21-22断开时, 电源功率可全部由线路17-22送出, 但最多只有300 MW, 因此周围的电源装机情况限制了线路17-22的资源利用, 此时实际传输容量比例已经超过40%。线路20-23处于既有负荷又有新能源的特殊区域, 其TTC水平较高, 但改进利用率的结果很低, 因为它受新能源和负荷水平的影响较大, 在高新能源出力、高负荷水平的场景下, 新能源功率基本就地消纳, 仅剩126 MW功率由节点20送出, 平均到单条线路仅能流过63 MW功率, 因此特殊的运行场景限制了线路20-23的资源利用。线路16-17处于大规模电源送出功率的通道上, 其TTC非常接近热稳定极限功率, 而且在此运行场景下, 由于新能源和负荷功率都处于高水平, 该线路利用率达到了80%以上, 相比其他线路, 该线路资源利用未受到限制, 随着系统负荷水平的上升, 可能存在输电资源不足的风险, 需要对该输电通道进行扩容。

经过以上分析, 改进利用率克服了传统利用率的不足, 可以确定处于不同位置的输电线路其资源利用受限的原因, 避免制定不合理的规划方案而造成不必要的损失。原因主要可分为: ①周围网架结构的限制; ②周围电源装机容量的限制; ③特殊运行场景的影响。

针对不同的受限原因, 可以为规划方案的优化提出建议。对于前2种情况, 是由于系统自身的源网不协调发展导致输电线路TTC偏低造成的, 应调整系统结构, 加强输电网薄弱环节, 并在合理位置投建电源, 比如为提高线路15-24的资源利用水平, 应对与其相连的线路3-24进行扩容; 在节点22处进行电源投建可在满足负荷增长需求下进一步开发利用线路17-22的已有资源。对于第3种情况, 由于线路本身TTC水平较高, 主要受特殊运行场景的限制, 可考虑投建灵活性资源以降低特殊运行场景对输电线路的影响, 比如应在节点20处投建储能以使流过线路20-23的功率更加平稳, 从而可进一步提高线路的资源利用率。除此之外, 对于输电资源未受限, 且存在输电资源不足风险的线路, 应对其及时扩容, 以提高网架的可靠性。

4.4 灵敏度分析

以上分析均基于已有网络拓扑和电源装机展开, 本节针对网络拓扑以及电源装机变化进行灵敏度分析。

基于4.3.2节的分析, 建议对线路16-17进行扩容, 因此本节以线路16-17为目标线路设计以下2种案例, 与基准案例(案例1)进行对比分析。

- 1) 案例2: 线路16-17扩容为双回线;
- 2) 案例3: 将节点20新能源装机扩大2倍。

基于以上案例, 分析线路16-17的TTC变化以及其在高可再生资源出力水平、高负荷水平典型场景下的改进利用率变化, 结果如表3所示。

表3 系统变化对线路16-17的影响

Table 3 The influence of system change on line 16-17

案例	热稳定 极限功 率/MW	TTC /MW	TTC 断线	实际运行 平均功率 /MW	传统 利用率	改进 利用率
案例1	500	478	15-21	409	81.8%	85.6%
案例2	500	443	16-17	240	48.0%	54.2%
案例3	500	465	15-21	370	74.0%	79.6%

对比案例1与案例2, 通过对线路16-17增投一条线路, 线路TTC有所降低, 在正常运行情况下, 双回线的改进利用率达到合理范围, 虽然对于单回线而言传输功率降低, 但双回线的总传输功率相比基准拓扑环境下要更高。分析其达到TTC时的断线情况, 对于基准拓扑, 线路15-21断开时会使线路16-17传输能力最大化, 因为这2条线路均是送出电源功率的关键通道, 有一路断开将会使另一路传输任务增大; 而对于扩容后的拓扑结构, 线路16-17有双回线的支撑, 线路15-21断开造成的影响没有自身另一回线断开的影响大。因此网络拓扑结构的变化不仅会使改进利用率指标变化, 而且也会影响线路TTC以及对应的断线位置。

对比案例1与案例3, 节点20与线路16-17之间相隔了2条输电线路, 处于不同的传输通道, 距离较远。当节点20的新能源装机扩大2倍时, 线路16-17达到TTC时的断线位置未发生变化, 但是TTC和改进利用率均有所降低, 这是由于节点20发电功率增大, 流过通道16-19-20的功率降低, 致使线路16-17传输功率降低, 但由于功率变化的节点距离线路较远, 因此影响并不显著。

5 结论

本文首先提出了一种考虑系统因素限制的输电线路TTC计算方法,包括单时段模型和多时段模型,然后基于由本方法计算得到的输电线路TTC,提出能够有效表征输电线路利用水平的改进利用率指标。算例对输电线路TTC与改进利用率进行了分析,验证了本文模型和方法的合理性以及有效性,主要结论如下。

1) 对于输电线路TTC模型,单时段模型仅评估一个时间断面下的线路TTC,计算结果整体偏高;多时段模型考虑了新能源和负荷的时序波动性,得到的结果更适合评估系统运行一段时间内的输电线路TTC。

2) 输电线路TTC与其附近的网架结构、电源及负荷分布均有密不可分的关系。在考虑 $N-1$ 准则时,线路附近网架的其他线路断线会使该线路达到最大输电能力;处于电源区到负荷区传输通道上的线路TTC水平较高,其承担着较重的功率传输任务。

3) 基于输电线路TTC的分析结果,算例进一步对输电线路利用率进行评估,结果表明改进利用率克服了传统利用率的不足,能够判断出输电线路资源利用水平受限的原因,包括周围网架限制、电源装机容量限制和特殊运行场景的影响。针对不同原因,可分别对指定位置进行网架扩容、电源扩容以及储能设备投建,验证了改进利用率指标对规划方案的改进具有指导意义。

4) 基于灵敏度分析结果,算例进一步验证了目标线路附近网络拓扑变化会使TTC和改进利用率发生较大变化,甚至对断线情况产生影响;当距离目标线路较远的节点功率发生变化时,同样会对TTC和改进利用率产生影响,但影响程度相对较小。

参考文献

- [1] YUAN X M. Overview of problems in large-scale wind integrations[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2013, 1(1): 22-25.
- [2] TAM K S. Assessment and enhancement of the utilization of electric power transmission lines[C]//*Proceedings of SOUTHEASTCON 96*. April 11-14, 1996, Tampa, FL, USA. IEEE, 1996: 618-625.
- [3] 高赐威, 吴茜, 陈曦寒. 国内外输电网利用率比较分析[J]. *华东电力*, 2013, 41(6): 1180-1187.
GAO Ciwei, WU Xi, CHEN Xihan. Comparative analysis of the power grid utilization rate between China and abroad[J]. *East China Electric Power*, 2013, 41(6): 1180-1187(in Chinese).
- [4] 彭冬, 高艺, 王智冬, 等. 输电网利用效率评价研究[J]. *电气应用*, 2012, 31(13): 24-27.
PENG Dong, GAO Yi, WANG Zhidong, et al. Evaluation study on transmission network efficiency[J]. *Electrotechnical Application*, 2012, 31(13): 24-27(in Chinese).
- [5] 彭冬, 王斌, 龙望成, 等. 基于灰色生成技术的输电网利用效率评价指标合理取值研究[J]. *电气应用*, 2014, 33(7): 18-23.
PENG Dong, WANG Xiao, LONG Wangcheng, et al. Study on reasonable values of transmission network efficiency indices based on grey generating technology[J]. *Electrotechnical Application*, 2014, 33(7): 18-23(in Chinese).
- [6] 孙亚, 肖晋宇, 彭冬, 等. 考虑安全约束的未来输电网利用率评估[J]. *电网技术*, 2016, 40(12): 3818-3824.
SUN Ya, XIAO Jinyu, PENG Dong, et al. Future transmission network utilization evaluation considering operational security constraints[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(12): 3818-3824(in Chinese).
- [7] 雷光宇. 考虑风险因素的电网利用率评价方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
LEI Guangyu. Study on the evaluation method of power grid utilization considering the risk factor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014(in Chinese).
- [8] 韩柳, 庄博, 王智冬, 等. 电网利用效率指标研究[J]. *华东电力*, 2011, 39(6): 850-854.
HAN Liu, ZHUANG Bo, WANG Zhidong, et al. Study on power grid efficiency indices[J]. *East China Electric Power*, 2011, 39(6): 850-854(in Chinese).
- [9] NERC. Available transfer capability definitions and determination[R]. North American Electric Reliability Council, 1996.
- [10] NERC. Transmission transfer capability: a reference document for calculating and reporting the electric power transfer capability of interconnected electric systems[R]. North American Electric Reliability Council, 1995.
- [11] 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输电能力计算[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(12): 86-91.
PAN Xiong, XU Guoyu. OPF based ATC calculation with static voltage stability constraints[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(12): 86-91(in Chinese).
- [12] RAMEZANI M, SINGH C, HAGHIFAM M R. Role of clustering in the probabilistic evaluation of TTC in power systems including wind power generation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(2): 849-858.
- [13] EJEBE G C, TONG J, WRIGHT J G, et al. Available transfer capability calculations[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1998, 13(4): 1521-1527.
- [14] LUO X, PATTON A D, SINGH C. Real power transfer capability calculations using multi-layer feed-forward neural

- networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 903-908.
- [15] 汪峰, 白晓民. 基于最优潮流方法的传输容量计算研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 35-40.
WANG Feng, BAI Xiaomin. OPF based transfer capability calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 35-40(in Chinese).
- [16] 罗明亮, 黄宇保, 王建全. 基于最优潮流法含暂态稳定约束的最大传输容量计算[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 22-26.
LUO Mingliang, HUANG Yubao, WANG Jianquan. Calculation of transient stability-constrained TTC based on OPF method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 22-26(in Chinese).
- [17] 刘盾盾, 程浩忠, 刘佳, 等. 输电网鲁棒规划研究综述与展望[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 135-143.
LIU Dundun, CHENG Haozhong, LIU Jia, et al. Review and prospects of robust transmission expansion planning[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 135-143(in Chinese).
- [18] 陈金富, 孙鑫, 段献忠, 等. 基于机会约束规划的含风电场电力系统可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6804-6814.
CHEN Jinfu, SUN Xin, DUAN Xianzhong, et al. A chance-constrained approach for available transfer capability evaluation for power systems with wind farm integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6804-6814(in Chinese).
- [19] DING T, BO R, LI F X, et al. Optimal power flow with the consideration of flexible transmission line impedance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1655-1656.
- [20] 李昀昊, 王建学, 曹晓宇, 等. 面向风电场-储能-输电网联合规划的机会约束IGDT模型[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3715-3724.
LI Yunhao, WANG Jianxue, CAO Xiaoyu, et al. A chance-constrained IGDT model for joint planning of wind farm, energy storage and transmission[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3715-3724(in Chinese).
- [21] LIU Y B, ZHAO J B, XU L X, et al. Online TTC estimation using nonparametric analytics considering wind power integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 494-505.
- [22] 刘健辰, 刘山林. 基于二阶锥松弛和Big-M法的配电网分布式电源优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2604-2611.
LIU Jianchen, LIU Shanlin. Optimal distributed generation allocation in distribution network based on second order conic relaxation and big-M method[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2604-2611(in Chinese).
- [23] Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee. IEEE reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, PAS-98(6): 2047-2054.
- [24] LI Y H, WANG J X, DING T. Clustering-based chance-constrained transmission expansion planning using an improved benders decomposition algorithm[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(4): 935-946.

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-05-18。

作者简介:



杨铃

杨铃(1996), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统规划与运行, E-mail: yangqian4071@stu.xjtu.edu.cn。

王建学(1976), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划与运行, 电力市场与用能侧运营, 储能智能电网的应用等。通信作者,

E-mail: jxwang@mail.xjtu.edu.cn。

林帆(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源预测及并网消纳, E-mail: lf1206@stu.xjtu.edu.cn。

张耀(1988), 男, 副教授, 博士生导师, 研究方向为可再生能源预测及并网消纳, 电力系统规划, 电力市场等, E-mail: yaozhang_ee@xjtu.edu.cn。

(责任编辑 李锡)