

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250360

## 双边牵引供电系统连续潮流计算方法

徐立特<sup>1</sup>, 张乔<sup>1</sup>, 刘志刚<sup>1</sup>, 邓云川<sup>2</sup>, 鲁兵<sup>1</sup>, 单翔宇<sup>1</sup>, 邱海龙<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

**摘要:** 随着双边供电模式的广泛应用, 牵引供电系统运行特性日趋复杂, 对电压稳定性分析提出了更高要求。传统潮流计算在处理异构负荷结构及多变运行条件时, 存在建模处理能力有限、精度与稳定性受制约等问题。因此提出一种适用于双边供电系统的统一建模潮流计算方法。该方法统一了电网侧三相负荷与牵引侧单相负荷的建模框架, 克服了牛顿-拉夫逊法难以获取接触网与钢轨侧负荷功率以及连续线性法精度不足且无法动态更新雅可比矩阵的缺陷。在此基础上构建连续潮流扩展模型, 系统分析不同供电模式、线路结构及短路容量变化对运行特性的影响。仿真结果表明, 该方法能够准确绘制 P-V 曲线并确定电压稳定性临界点, 在模型通用性、计算精度和工程实用性方面具有显著优势。

**关键词:** 牵引供电系统; 双边供电; 潮流计算; 连续潮流计算; 电压稳定性

### Continuation power flow calculation method for bilateral traction power supply system

XU Lite<sup>1</sup>, ZHANG Qiao<sup>1</sup>, LIU Zhigang<sup>1</sup>, DENG Yunchuan<sup>2</sup>, LU Bing<sup>1</sup>, SHAN Xiangyu<sup>1</sup>, QIU Hailong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** With the widespread adoption of bilateral power supply modes, the operational characteristics of traction power systems have become increasingly complex, posing higher demands on voltage stability analysis. Conventional power flow calculation methods exhibit limitations in modeling heterogeneous load structures and handling varying operating conditions, leading to constrained modeling capability as well as compromised accuracy and robustness. To address these challenges, a unified modeling method for power flow calculation suitable for bilateral supply systems is proposed. This approach integrates the modeling frameworks of three-phase grid-side loads and single-phase traction-side loads, thereby overcoming the difficulties of the Newton-Raphson method in obtaining load power on the catenary and rail sides, as well as the limitations of the continuous linear method in terms of insufficient accuracy and inability to dynamically update the Jacobian matrix. On this basis, an extended continuation power flow model is developed to systematically analyze the impact of different supply modes, line structures, and short-circuit capacities on system operational characteristics. Simulation results demonstrate that the proposed method accurately generates P-V curves and identifies critical voltage stability points, offering significant advantages in model universality, computational accuracy, and engineering applicability.

This work is supported by the Major Science and Technology Project of Xizang Autonomous Region (No. XZ02402ZD0003).

**Key words:** traction power supply system; bilateral feeding; power flow calculation; continuation power flow calculation; voltage stability

## 0 引言

在长大坡道和高原高寒地区等复杂环境下, 牵引供电系统的稳定运行面临严峻挑战<sup>[1]</sup>。为提高系

统的适应性和运行保障能力, 引入了双边供电模式。然而, 该模式的应用显著增加了系统工况的复杂性, 对运行控制和稳定性分析提出了更高的要求<sup>[2]</sup>。此外, 新能源接入时的出力波动导致系统短路容量呈现动态变化<sup>[3]</sup>, 进一步加剧了牵引供电系统运行特性的复杂性, 对系统稳定性的分析与优化带来了新

**基金项目:** 西藏自治区科技重大专项项目资助 (XZ02402ZD0003)

的学术与工程难题。

电压稳定性是牵引供电系统安全运行的关键因素，直接关系到电力系统是否能够持续可靠地为高速铁路提供电能支持<sup>[4]</sup>。在牵引供电系统中，大功率冲击负荷的瞬态特性、负荷分布的动态变化以及新能源接入带来的不确定性，都对电压稳定性构成了巨大挑战。一旦电压失稳，不仅可能导致牵引供电中断，影响列车的安全运行，还可能对上级电网造成连锁性冲击，进一步威胁到电力系统的整体安全。因此，深入研究牵引供电系统的电压稳定性，具有重要的工程应用价值，也对保障铁路运输的高效、安全运行具有重要的现实意义<sup>[5]</sup>。

目前，电力系统中的电压稳定性研究已取得较为全面的进展，包括静态分析法和暂态分析法两大类方法<sup>[6-10]</sup>。静态分析法主要包括连续潮流法、特征值分解法和奇异值分解法；暂态分析法则包括时域仿真法和能量函数法等。其中，连续潮流法因其在评估电压稳定极限和系统运行裕度方面的显著优势，已被广泛认为是电压稳定性评估的有效工具之一。例如，文献[11]首次提出了基于极坐标系的三相连续潮流法，该方法能够用于分析三相不平衡电力系统的电压稳定性；文献[12]提出了一种连续配电潮流法，用于跟踪一般不平衡配电系统的稳态行为，并能够应对包括分布式电源高穿透率在内的各种功率注入变化；文献[13]提出了一种专门用于评估分布式能源(distributed energy resources, DER)渗透率高的配电系统电压稳定性的三相不平衡连续潮流算法，该算法考虑 DER 机组的恒功率(PQ)模式和调压(PV)模式，系统地分析了在多种测试场景下，DER 对配电系统电压稳定性的影响；文献[14]针对含不同类型分布式电源的配电网及其三相线路参数和负荷不平衡问题，提出了一种三相配电网连续潮流方法，并采用局部几何参数化策略处理三相不平衡系统中 PV 曲线的斜锐角现象；文献[15]则针对分布式电源和电动汽车等新型电气化负荷中的无功限幅约束问题，提出了一种局部几何参数化连续潮流算法，相较于传统的弧长参数化，该算法具有易于解耦的参数化方程和较高的分岔点计算精度等优点。

以上研究表明，连续潮流法在电压稳定性分析中具有强大的应用潜力，尤其在评估不平衡系统、分布式电源接入以及电动汽车对电压稳定性的影响时，展现出较高的精确度和适用性。

传统的潮流计算方法在牵引供电系统应用中仍存在显著局限。在双边牵引供电系统中，接触网与钢轨侧的负荷具有显著的端口型特性，其注入功率难以直接获取，导致无法用牛拉法进行潮流计算。

因此，连续线性法被提出用于解决端口负荷的潮流计算问题，它通过动车组的端口功率不断迭代端口电压的方式达到收敛效果<sup>[16-18]</sup>。然而，在传统牵引潮流研究中，连续线性法并未引入雅可比矩阵的构建与更新过程，限制了其在复杂牵引系统中的适用性<sup>[19]</sup>，并且无法进行连续潮流计算。然而，传统的三相不平衡潮流计算方法的建模基础多基于三相负荷的注入功率模型，主要关注三相不对称带来的潮流分布问题。该类方法在面对牵引供电系统典型的单相不对称负荷、上下行供电结构、多源交替供电与动态运行边界等复杂工况时<sup>[20]</sup>，存在建模一致性差、结构表达能力弱、工程适应性不足等问题，难以准确描述系统的运行特性。且在边界条件突变或非线性负荷作用下易出现收敛性问题，限制了其在牵引供电系统中的应用范围。

为有效解决上述问题，本文提出了一种面向双边牵引供电系统的统一建模潮流计算方法。首先，通过统一电网侧三相负荷与牵引侧单相负荷的模型构建，增强了系统建模的一致性与通用性，显著提升了异构负荷网络同步求解的适应能力。在此基础上，进一步构建了适用于双边牵引供电系统的连续潮流扩展模型，有效刻画了不同供电方式、上下行线路结构以及短路容量变化条件下供电臂末端的运行特征，并获得了相应的 P-V 曲线与电压稳定性临界点。通过典型双边牵引供电系统的仿真算例，本文验证了所提方法的有效性与准确性。仿真结果表明，在不同供电模式、上下行结构及短路容量变化条件下，本文方法均能准确地描述供电臂和钢轨末端节点的 P-V 曲线及其极限运行工况。与传统方法相比，本文所提方法在模型通用性、数值鲁棒性以及工程实用性方面均体现出显著优势，为牵引供电系统电压稳定性分析与优化调度提供了有力的理论支撑与实践参考。

## 1 双边牵引供电系统

双边牵引供电系统通过两条独立供电路径为牵引网提供电力，通常由两个牵引供电所分别为牵引负荷供电。这种供电方式具有高度的独立性和互为备份的能力，在结构和性能上相比传统单边供电方式具有显著优势<sup>[19,21]</sup>。传统单边供电方式依赖于单一电源方向，通常需要在分区出口处设置电分相以维持电流平衡。这种设计不仅增加了系统的复杂性，同时也提高了运行维护的难度。相比之下，双边牵引供电系统通过双向电源同时供电，完全避免了对电分相的依赖，从而在结构上实现了显著简化，如图 1 所示。

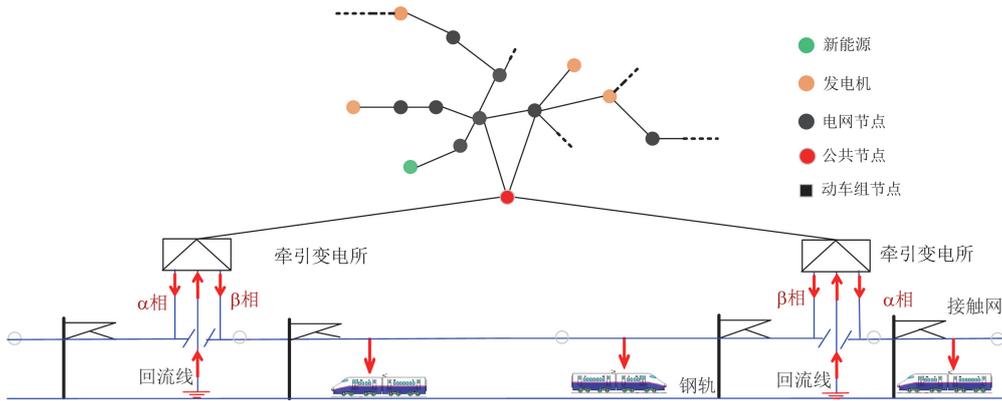


图1 双边牵引供电系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a double-sided traction power supply system

双边供电模式在提升动车组供电的可靠性和稳定性方面表现尤为突出。该模式能够确保系统在大多数情况下实现持续平稳运行，尤其是在长大坡道等复杂运行场景下，双边供电技术有效解决了动车组连续供电的问题<sup>[22]</sup>。然而，随着供电臂内动车组数量的持续增加，其运行工况愈加复杂，供电系统的动态性能也面临更高的要求。同时，电压稳定性问题日益凸显，这进一步增加了系统运行的不确定性。因此，评估双边牵引供电系统的动态特性已成为当前保障系统可靠性和稳定性的关键。

## 2 双边牵引供电系统不对称潮流方程构建

在电力系统中，通常采用三相传输方式，而牵引供电系统的传输相数则会因供电方式的不同而有所变化。在直接供电模式下，系统实际上属于单相传输模式，其中接触线(T)作为电力传输相，钢轨(R)作为回流线，因此可以视为一种“两相传输”形式。此外，牵引网左右供电臂接触线的相位通常存在差异，这一差异主要由牵引变压器的类型和配置决定。整个系统的拓扑结构如图2所示。

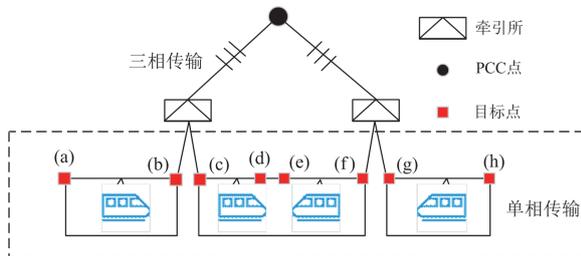


图2 双边牵引供电系统拓扑结构图

Fig. 2 Topological diagram of double-sided traction power supply system

### 2.1 双边牵引供电系统节点导纳矩阵构建

在双边牵引供电系统中，依据三相输电线路模

型进行电网侧节点导纳矩阵构建，而牵引侧与电网侧具有明显不同，首先需要建立电网侧相序(A、B、C)与牵引网侧相序(T、R)之间的精确对应关系。该对应关系的确定遵循变压器绕组同名端对应原则，确保电网与牵引网之间的相序匹配与准确性。图3展示了V/v牵引变压器在此对应关系中的具体表现，直观地体现了电网侧与牵引网侧相序的转换与耦合特性。

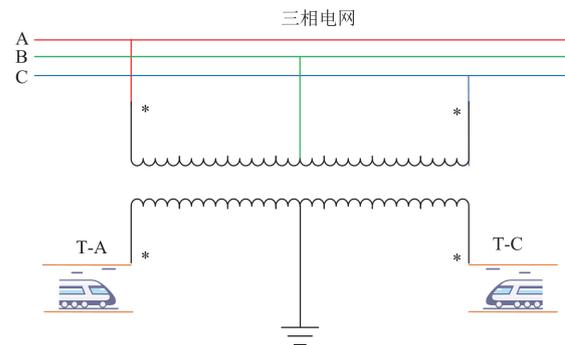


图3 V/v牵引变压器牵引侧与电网侧对应关系

Fig. 3 Correspondence between traction side and grid side of V/v traction transformer

V/v变压器 $\alpha$ 侧的节点导纳矩阵由式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \\ \dot{I}_T \\ \dot{I}_R \\ \dot{I}_F \end{bmatrix} = y_T \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & -k & k & 0 \\ -1 & 1 & 0 & k & -k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k & k & 0 & k^2 & -k^2 & 0 \\ k & -k & 0 & -k^2 & k^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \\ \dot{U}_T \\ \dot{U}_R \\ \dot{U}_F \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $\dot{I}_A$ 、 $\dot{I}_B$ 、 $\dot{I}_C$ 分别表示三相电网侧A、B、C相的电流， $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 分别表示其对应电压； $\dot{I}_T$ 表示牵引侧接触网(或牵引母线)的注入电流； $\dot{I}_R$ 表示

牵引侧钢轨(或回流网络)的电流;  $\dot{I}_F$  表示牵引侧正馈线的注入电流,  $\dot{U}_T$ 、 $\dot{U}_R$ 、 $\dot{U}_F$  分别表示其对应电压;  $y_T$  为 V/v 牵引变压器的等效短路导纳。

而牵引网可看作是多导体传输体系结构, 路基段牵引网一般采用 Carson 理论<sup>[16]</sup>计算其单位长度串联阻抗矩阵  $\mathbf{Z}_1$ , 其元素由式(2)所示。

$$\mathbf{Z}_1 = \begin{cases} z_{ii} = r_i + r_c + j0.1466 \lg \left( \frac{D_g}{R_{ei}} \right) \\ z_{ij} = r_c + j0.1466 \lg \left( \frac{D_g}{D_{ij}} \right) \\ D_g = \frac{2.085}{\sqrt{f\sigma \times 10^{-3}}} \\ R_{ei} = R_i e^{-\frac{\mu}{4}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $z_{ii}$  表示导体的自阻抗(单位长度);  $z_{ij}$  表示导体间的互阻抗(单位长度);  $D_g$  为大地的等值深度(m);  $\sigma$  为土壤电导率, 一般可取  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ;  $f$  为电流频率;  $r_i$  为导线电阻( $\Omega/\text{km}$ );  $r_c$  表示大地电阻, 取  $0.0493 \Omega/\text{km}$ ;  $R_{ei}$  为各导线的等效半径(m);  $R_i$  为各导线的计算半径(m);  $\mu$  为导线材料相对磁导率;  $D_{ij}$  为导体  $i$ 、 $j$  之间的空间距离(m)。对于贯通地线, 由于其埋于地下, 忽略其与其他导线之间的互阻抗。

牵引网单位长度串联导纳矩阵由式(3)所示。

$$\mathbf{Y}_s = \mathbf{Z}_1^{-1} \quad (3)$$

## 2.2 双边牵引供电系统潮流方程构建

由于牵引网的结构具有特殊性, 机车负荷实际上表现为端口型负荷, 如图4所示, 而电网负荷通常为节点型负荷, 两者在负荷类型上存在本质差异。因接触网和钢轨的注入功率难以获取(如图4中  $P_a$  和  $P_b$ ), 传统的潮流计算方法无法有效应用于端口型负荷的牵引供电系统, 故不适用于同时包含端口型负荷的牵引供电系统。因此, 需要探索新的计算方法, 以统一两种负荷类型, 从而确保计算结果的准确性。为解决这一问题, 以下将介绍一种可行的解

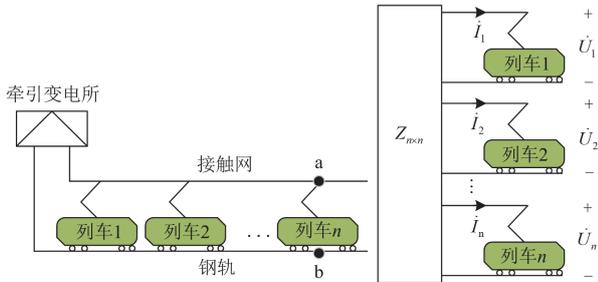


图4 V/x 动车组端口负荷示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the V/x EMU port load

决方案, 用于弥补现有计算方法的不足, 并为系统的稳态分析提供更加合理的工具。

其中  $\dot{I}_{np}$ 、 $\dot{U}_{np}$  和  $\mathbf{Z}_{nk}^{abc}$  如式(4)所示。

$$\dot{I}_{np} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{na} \\ \dot{I}_{nb} \\ \dot{I}_{nc} \end{bmatrix}, \dot{U}_{np} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{na} \\ \dot{U}_{nb} \\ \dot{U}_{nc} \end{bmatrix}, \mathbf{Z}_{nk}^{abc} = \begin{bmatrix} Z_{nkaa} & Z_{nkab} & Z_{nkac} \\ Z_{nkab} & Z_{nkbb} & Z_{nkbc} \\ Z_{nkac} & Z_{nkbc} & Z_{nkcc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $\dot{I}_{np}$  和  $\dot{U}_{np}$  分别表示节点  $n$  中  $p$  相的电流和电压。

假设第  $k$  个节点为动车组所在的节点, 则动车组注入系统电流为式(5)所示。

$$\begin{cases} -\dot{I}_{ka} = \dot{I}_{kc} = \dot{I}_t \\ \dot{U}_{ka} - \dot{U}_{kc} = \dot{U}_t \\ \dot{S}_t = \dot{U}_t \cdot \dot{I}_t^* \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\dot{U}_{ka}$  表示第  $k$  个节点中  $a$  相的电压;  $\dot{I}_{ka}$  表示第  $k$  个节点中  $a$  相的电流;  $\dot{U}_t$  表示动车组电压;  $\dot{S}_t$  表示其复功率。

$$\begin{aligned} \dot{U}_t = & (Z_{k1aa} - Z_{k1ac})\dot{I}_{1a} + (Z_{k1ab} - Z_{k1bc})\dot{I}_{1b} + \\ & (Z_{k1ac} - Z_{k1cc})\dot{I}_{1c} + \dots + (-Z_{kkaa} - Z_{kkac}) + \\ & (Z_{kkab} - Z_{kkbc})\dot{I}_{1L} + (Z_{kkac} - Z_{kkcc})\dot{I}_{1c} + \dots + \\ & (Z_{knaa} - Z_{knac})\dot{I}_{na} + (Z_{knab} - Z_{knbc})\dot{I}_{nb} + \\ & (Z_{knac} - Z_{kncc})\dot{I}_{nc} \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $Z_{k1ab}$  表示系统节点  $k$  的  $a$  相与节点 1 的  $b$  相之间的互阻抗。

通过上述公式, 可以推导出动车组端口电压与各注入电流之间的关系。由此可见, 经过转化后, 动车组端口的负荷等效为一个节点负荷, 可直接代入系统方程计算, 即式(6)所示。

对于直接供电系统而言, 由于不存在正馈线  $F$ , 故牵引侧只存在两相, 那么可以假设虚拟正馈线电压为零, 不参与方程的迭代求解过程, 即

$$\dot{U}_{FX} = 0 \quad (7)$$

从系统整体角度研究电网侧与牵引网侧之间的潮流耦合特性时, 需要将上级电网进行等效, 同时考虑一个综合的耦合潮流方程, 该方程不仅能够体现电网与牵引网之间的相互作用, 还能够揭示牵引侧的独特特点。因此, 根据电网侧和牵引侧相序对应关系, 可以列写耦合系统的注入功率方程, 并将方程分为两部分, 即式(8)和式(9)所示。

$$P_{ia} = U_{ia} \left( \sum_{j=1}^{N_{PS}} \sum_{m \in \Omega_{PS}} U_{jm} (G_{ijam} \cos \theta_{iajm} + B_{ijam} \sin \theta_{iajm}) + \sum_{j=N_{PS}+1}^N \sum_{n \in \Omega_{TPS}} U_{jn} (G_{ijan} \cos \theta_{iajn} + B_{ijan} \sin \theta_{iajn}) \right) \quad (8)$$

$$Q_{ia} = U_{ia} \left( \sum_{j=1}^{N_{ps}} \sum_{m \in \Omega_{ps}} U_{jm} (G_{ijam} \sin \theta_{iajm} - B_{ijam} \cos \theta_{iajm}) + \sum_{j=N_{ps}+1}^N \sum_{n \in \Omega_{TPS}} U_{jn} \cdot (G_{ijan} \sin \theta_{iajn} - B_{ijan} \cos \theta_{iajn}) \right) \quad (9)$$

$$G_{ijxy} = \begin{cases} -g_{ijxy}, j \neq i \\ \sum_{k=1, k \neq i}^n (g_{ikxy} + g_{ikxyo}) = g_{ixy} + \sum_{k=1, k \neq i}^n g_{ikxy}, j = i \end{cases} \quad (10)$$

$$B_{ijxy} = \begin{cases} -b_{ijxy}, j \neq i \\ \sum_{k=1, k \neq i}^n (b_{ikxy} + b_{ikxyo}) = b_{ixy} + \sum_{k=1, k \neq i}^n b_{ikxy}, j = i \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $P_{ia}$  和  $Q_{ia}$  分别为第  $i$  条母线的  $a$  相注入有功和无功功率;  $U_{ia}$  表示第  $i$  个节点第  $a$  相的电压;  $U_{jm}$  表示第  $j$  个节点第  $m$  相的电压,  $m \in \Omega_{ps} = \{a, b, c\}$ , 表示电网侧传输相的集合;  $N_{ps}$  表示电网侧节点数量;  $N$  表示节点总数;  $n \in \Omega_{TPS} = \{T, R\}$ , 表示牵引网采用直接供电方式下的牵引侧传输相的集合;  $G_{ijxy}$  和  $B_{ijxy}$  分别为节点导纳矩阵中第  $i$  条母线  $x$  相与第  $j$  条母线  $y$  相之间的电导和电纳元素。

### 2.3 待求变量分块处理

首先, 依据短路容量、空载电压以及戴维南定理, 将上级电网等效为只含有平衡节点和 PQ 节点的形式, 不含有 PV 节点。对于牵引侧, 根据供电方式的不同, 对其需要更新的电压幅值和相角进行删除。故在双边牵引供电系统的潮流计算中, 对各类节点处理后, 设整个系统网络中有 1 个平衡节点,  $n$  个电网侧 PQ 节点,  $m$  个牵引侧 PQ 节点, 系统中共有  $n+m+1$  个节点。用  $R$  表示平衡节点。  $L$  表示电网侧 PQ 节点集合,  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_{n1}\}$ 。  $\Gamma$  表示牵引侧 PQ 节点集合,  $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{n2}\}$ 。

$$\begin{cases} \mathbf{P}_R = [P_{Ra} & P_{Rb} & P_{Rc}]^T \\ \mathbf{Q}_R = [Q_{Ra} & Q_{Rb} & Q_{Rc}]^T \\ \mathbf{P}_L = [P_{l_1a} & P_{l_1b} & P_{l_1c} & \dots & P_{l_{n1}a} & P_{l_{n1}b} & P_{l_{n1}c}]^T \\ \mathbf{Q}_L = [Q_{l_1a} & Q_{l_1b} & Q_{l_1c} & \dots & Q_{l_{n1}a} & Q_{l_{n1}b} & Q_{l_{n1}c}]^T \\ \mathbf{P}_\Gamma = [P_{\gamma_1a} & P_{\gamma_1b} & P_{\gamma_1c} & \dots & P_{\gamma_{n2}a} & P_{\gamma_{n2}b} & P_{\gamma_{n2}c}]^T \\ \mathbf{Q}_\Gamma = [Q_{\gamma_1a} & Q_{\gamma_1b} & Q_{\gamma_1c} & \dots & Q_{\gamma_{n2}a} & Q_{\gamma_{n2}b} & Q_{\gamma_{n2}c}]^T \end{cases} \quad (12)$$

$$U_p = \begin{bmatrix} U_{Rp}^T \\ U_{Xp}^T \\ U_{Lp}^T \\ U_{\Gamma'p}^T \end{bmatrix}, \theta_p = \begin{bmatrix} \theta_{Rp}^T \\ \theta_{Xp}^T \\ \theta_{Lp}^T \\ \theta_{\Gamma'p}^T \end{bmatrix}, p = a, b, c \quad (13)$$

相应地, 总的功率不平衡方程如式(14)和式(15)所示。

$$\Delta P_{ip} = P_{ip}^s - P_{ip} = P_{ip}^s - U_{ip} \left( \sum_{j=1}^{N_{ps}} \sum_{m \in \Omega_{ps}} U_{jm} (G_{ijpm} \cos \theta_{ijpm} + B_{ijpm} \sin \theta_{ijpm}) + \sum_{j=N_{ps}+1}^N \sum_{n \in \Omega_{TPS}} U_{jn} \cdot (G_{ijpn} \cos \theta_{ijpn} + B_{ijpn} \sin \theta_{ijpn}) \right) \quad (14)$$

$$\Delta Q_{ip} = Q_{ip}^s - Q_{ip} = Q_{ip}^s - U_{ip} \left( \sum_{j=1}^{N_{ps}} \sum_{m \in \Omega_{ps}} U_{jm} (G_{ijpm} \sin \theta_{ijpm} - B_{ijpm} \cos \theta_{ijpm}) + \sum_{j=N_{ps}+1}^N \sum_{n \in \Omega_{TPS}} U_{jn} \cdot (G_{ijpn} \sin \theta_{ijpn} - B_{ijpn} \cos \theta_{ijpn}) \right) \quad (15)$$

式中:  $p = a, b, c$ ;  $P_{ip}^s$  和  $Q_{ip}^s$  分别表示第  $i$  条母线第  $p$  相有功功率和无功功率的给定值。

同时, 迭代方程可以表示为式(16)。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_p \\ \Delta Q_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_p & \mathbf{O}_p \\ \mathbf{N}_p & \mathbf{H}_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_p \\ \Delta U_p \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta \theta_p \\ \Delta U_p \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中:  $\mathbf{M}_p$ 、 $\mathbf{O}_p$ 、 $\mathbf{N}_p$ 、 $\mathbf{H}_p$  分别表示对应的偏微分方程。

$$\begin{cases} \mathbf{M}_p = \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta}, \mathbf{O}_p = \frac{\partial \Delta P}{\partial U} \\ \mathbf{N}_p = \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta}, \mathbf{H}_p = \frac{\partial \Delta Q}{\partial U} \end{cases} \quad (17)$$

$$\mathbf{M}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{RR} & \mathbf{M}_{RL} & \mathbf{M}_{R\Gamma'} \\ \mathbf{M}_{LR} & \mathbf{M}_{LL} & \mathbf{M}_{L\Gamma'} \\ \mathbf{M}_{\Gamma'R} & \mathbf{M}_{\Gamma'L} & \mathbf{M}_{\Gamma'\Gamma'} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{O}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{RR} & \mathbf{O}_{RL} & \mathbf{O}_{R\Gamma'} \\ \mathbf{O}_{LR} & \mathbf{O}_{LL} & \mathbf{O}_{L\Gamma'} \\ \mathbf{O}_{\Gamma'R} & \mathbf{O}_{\Gamma'L} & \mathbf{O}_{\Gamma'\Gamma'} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{N}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_{RR} & \mathbf{N}_{RL} & \mathbf{N}_{R\Gamma'} \\ \mathbf{N}_{LR} & \mathbf{N}_{LL} & \mathbf{N}_{L\Gamma'} \\ \mathbf{N}_{\Gamma'R} & \mathbf{N}_{\Gamma'L} & \mathbf{N}_{\Gamma'\Gamma'} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{H}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{RR} & \mathbf{H}_{RL} & \mathbf{H}_{R\Gamma'} \\ \mathbf{H}_{LR} & \mathbf{H}_{LL} & \mathbf{H}_{L\Gamma'} \\ \mathbf{H}_{\Gamma'R} & \mathbf{H}_{\Gamma'L} & \mathbf{H}_{\Gamma'\Gamma'} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中： $\Gamma'$ 表示剔除牵引侧不参与迭代求解的变量后的元素。

### 2.4 算法对比

为验证所提方法的有效性与优势，本文将其与牵引供电系统中常用的连续线性法进行对比分析。在相同的系统结构与初始功率条件下，分别采用两

种方法进行潮流计算。结果表明，本文方法在双边牵引供电系统中的稳定性和适应性均优于传统连续线性法。在节点电压的计算精度方面，如表1所示，两者所得结果之间的相对误差均控制在5.1%以内，具体分别为0.645%、1.180%、2.939%与5.073%。这一结果充分验证了本文方法在保持较高数值精度的同时，能够更有效地适应复杂供电结构下的潮流分布特性。

表1 算法对比

Table 1 Algorithm comparison

方法	初始功率/MW	迭代次数	迭代时间/s	供电方式	电压/kV	相对误差/%	是否收敛
连续线性法	10	4	0.010 129 00	双边	27.1985	0.645	是
本文方法	10	4	0.142 320 90	双边	27.0242		是
连续线性法	30	6	0.015 302 00	双边	26.3054	1.180	是
本文方法	30	4	0.112 739 10	双边	25.9985		是
连续线性法	60	9	0.015 617 00	双边	23.8272	2.939	是
本文方法	60	5	0.104 821 80	双边	23.1467		是
连续线性法	70	11	0.016 336 00	双边	22.2494	5.037	是
本文方法	70	6	0.173 050 80	双边	21.1750		是
连续线性法	75	—	—	双边	—	—	否
本文方法	75	8	0.138 028 90	双边	19.096		是

此外，本文方法在多组仿真中显示出更低的迭代次数与可接受的计算时间，说明其在收敛效率和计算资源利用上更具优势。尤其在初始功率较高的场景(如70 MW、75 MW)下，传统连续线性法出现无法收敛或停止计算的现象，而本文方法仍能保持稳定收敛并输出有效结果，表明其在应对高负载、强非线性工况下具备更强的鲁棒性与极限求解能力。

综上，本文方法不仅提升了牵引潮流计算的适用范围与数值稳定性，也为处理复杂工况下的牵引系统运行分析提供了更为可靠的数值工具与理论支撑。

### 3 牵引供电系统连续潮流计算

连续潮流法是一种基于电压稳定机理的静态电压稳定分析工具<sup>[23-25]</sup>，主要用于电力系统的潮流计算和电压稳定性研究，并未广泛应用于牵引供电系统。该方法通过建立负荷与关键母线电压之间的关系，形象直观地展示了随着负荷逐步增加，系统电压逐渐下降直至崩溃的过程。在分析过程中， $P$ 可以表示某一区域的总负荷，也可以表示传输断面或区域联络线上的传输功率，而 $U$ 则表示关键母线的电压。该方法不仅计算系统各节点的P-V曲线，还能得出两个重要参数：负荷点的临界电压和极限功率。这些参数对于评估系统的电压稳定裕度以及各负荷点维持电压稳定的能力具有重要参考价值，为牵引供电

系统的电压稳定分析和安全运行提供了重要依据。

#### 3.1 动车组接入方式及定义

牵引供电系统的负载具有显著的动态特性，特别是在列车运行过程中，负荷会随着列车位置的变化而不断波动。为更准确地预测和评估系统在不同运行工况下的动态响应能力，本文选取供电臂末端节点作为负荷增加的分析节点，从而考察系统在下一时刻可接入列车的数量及其对应的功率需求。

则目标节点的注入功率方程可以表示为式(22)和式(23)。

$$P_{ip}^s = P_{d ip} = P_{d0 ip} (1 + \lambda^* K_{P_{d ip}}) \quad (22)$$

$$Q_{ip}^s = Q_{d ip} = Q_{d0 ip} (1 + \lambda^* K_{Q_{d ip}}) \quad (23)$$

式中： $P_{d ip}$ 和 $Q_{d ip}$ 分别为母线上各相的基准情况下的有功和无功功率，比值 $K_{P_{d ip}}/K_{Q_{d ip}}$ 是恒定的，母线上各相的基准情况下功以保持恒定的功率因数。

非线性方程组式(14)和式(15)通过增加一个额外变量 $\lambda$ ，得到扩展的潮流方程(24)。

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \lambda) = 0 \quad (24)$$

式中： $\mathbf{x} = (\theta_a, \theta_b, \theta_c, V_a, V_b, V_c)^T$ 。

则扩展的潮流方程 $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \lambda) = 0$ 可以表示为式(25)和式(26)。

$$-P_{ip}^s - U_{ip} \left[ \sum_{j=1}^{N_{ps}} \sum_{m \in \Omega_{ps}} U_{jm} (G_{ijpm} \cos \theta_{ipjm} + B_{ijpm} \sin \theta_{ipjm}) + \sum_{j=N_{ps}+1}^N \sum_{n \in \Omega_{tps}} U_{jn} (G_{ijpn} \cos \theta_{ipjn} + B_{ijpn} \sin \theta_{ipjn}) \right] = 0 \quad (25)$$

$$-Q_{ip}^s - U_{ip} \left[ \sum_{j=1}^{N_{ps}} \sum_{m \in \Omega_{ps}} U_{jm} (G_{ijpm} \sin \theta_{ipjm} - B_{ijpm} \cos \theta_{ipjm}) + \sum_{j=N_{ps}+1}^N \sum_{n \in \Omega_{tps}} U_{jn} (G_{ijpn} \sin \theta_{ipjn} - B_{ijpn} \cos \theta_{ipjn}) \right] = 0 \quad (26)$$

对于目标节点展开可以得到:

$$P_R - P_{d0ip} (1 + \lambda^* K_{P_{dip}}) - U_{ip} \left[ \sum_{j=1}^{N_{ps}} \sum_{m \in \Omega_{ps}} [U_{jm} (G_{ijpm} \cos \theta_{ipjm} + B_{ijpm} \sin \theta_{ipjm}) + U_{jm} (G_{ijpm} \cos \theta_{ipjm} + B_{ijpm} \sin \theta_{ipjm})] + \sum_{j=N_{ps}+1}^N \sum_{n \in \Omega_{tps}} U_{jn} (G_{ijpn} \cos \theta_{ipjn} + B_{ijpn} \sin \theta_{ipjn}) \right] = 0 \quad (27)$$

$$Q_R - Q_{d0ip} (1 + \lambda^* K_{Q_{dip}}) - U_{ip} \left[ \sum_{j=1}^{N_{ps}} \sum_{m \in \Omega_{ps}} U_{jm} (G_{ijpm} \sin \theta_{ipjm} - B_{ijpm} \cos \theta_{ipjm}) + \sum_{j=N_{ps}+1}^N \sum_{n \in \Omega_{tps}} U_{jn} (G_{ijpn} \sin \theta_{ipjn} - B_{ijpn} \cos \theta_{ipjn}) \right] = 0 \quad (28)$$

### 3.2 预测-校正

预测过程是为了找到下一个解的近似点。预测器所得的预测解与真实解的“距离”显著影响校正器为获得精确解所需的迭代次数, 若预测解与真实解的偏差过大, 可能会导致迭代无法收敛, 所以一个更好的近似点产生更少的迭代次数<sup>[20]</sup>。本文采用切线预测法  $e_k$  为行向量, 其中第  $k$  个元素等于 1, 其他元素都等于 0; “ $\pm 1$ ” 中的正负号取决于  $D_\lambda$  的正负:  $D_\lambda$  为正, 取 +1;  $D_\lambda$  为负, 则取 -1。

根据式(29)求取切向量。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \theta^p} & \frac{\partial f}{\partial V^p} & \frac{\partial f}{\partial \lambda} \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{\theta^p} \\ D_{V^p} \\ D_\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

解出切向量之后, 可以得到预测点。

$$\begin{bmatrix} \tilde{\theta}_p \\ \tilde{V}_p \\ \tilde{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{0p} \\ V_{0p} \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} D_{\theta_p} \\ D_{V_p} \\ D_\lambda \end{bmatrix} \quad (30)$$

在计算的初始阶段, 以  $\lambda$  作为连续参数, 计算若干个点; 之后连续参数通常选择电压跌落最严重的相的电压, 可表示为式(28)。

$$D_{V_{kp}} = \max \left\{ \max_{p=a,b,c} D_{V_{1p}}, \dots, \max_{p=a,b,c} D_{V_{np}} \right\} \quad (31)$$

校正器使用 CPF 预测器预测的估计解来求解增广潮流方程, 方程如式(32)所示。

$$\begin{bmatrix} f(x, \lambda) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

校正解通常通过牛顿法迭代求解, 迭代公式如式(33)所示。

$$\begin{bmatrix} f_x & f_\lambda \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f(x, \lambda) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} \quad (33)$$

式中:  $\eta$  是所选连续参数  $x_k$  的估计值。延续参数的选择将取决于最后两个工作点之间状态变量的最大变化。最初选择  $\lambda$  作为延续参数, 但随着 P-V 曲线鼻尖点的逼近, 选择变化最显著的母线电压作为延续参数。

### 3.3 步长控制

步长控制是影响延拓方法计算效率的关键因素。在任何延拓方法中, 选择一个恒定且较小的步长虽然可行, 但往往会导致计算效率低下, 特别是在计算 P-V 曲线的“平坦”部分时, 可能会出现计算次数过多的情况<sup>[26-27]</sup>。另一方面, 步长过小可能导致预测点远离真实解, 从而使得校正器需要更多的迭代才能收敛, 甚至在极端情况下可能会偏离真实解。为了提高计算效率并避免这种低效计算, 步长控制显得尤为重要。在短时间内, 步长控制有助于 CPF 算法快速定位鼻点。步长可以选择恒定值或自适应值, 其中自适应步长因其较大的灵活性, 能够有效避免系统负载极限附近的收敛问题。为了实现更快的自适应步长, 初始时可选较大的步长, 而随着解的逐步逼近最大加载点, 步长应逐渐减小。在 P-V 曲线的平坦部分, 步长保持恒定, 而在靠近鼻部区域时, 步长逐渐减小, 以确保 P-V 曲线具有更好的收敛特性和追踪能力。

在 P-V 曲线计算的初始阶段, 功率注入较小, 迭代容易收敛, 故采用较大步长, 即

$$\sigma = 0.5 \quad (34)$$

当功率增加至临近极限点时, 需要逐步减小步长以便计算出精确的临界点, 此时步长选择如式(35)所示。

$$\sigma_{n+1} = 0.9\sigma_n \quad (35)$$

### 3.4 算法流程

本文使用预测-校正延拓方法来跟踪解曲线。

下面总结了使用算法的步骤，如图 5 所示。

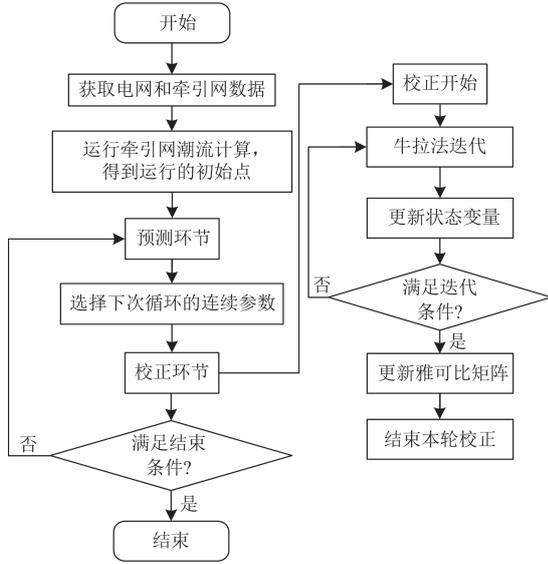


图 5 算法流程图

Fig. 5 Algorithm flowchart

Step1: 输入数据。输入牵引供电系统数据，包括电网数据、负荷数据和牵引所和动车组数据等。

Step2: 初始化数据。运行牵引供电系统三相潮流计算，得到连续潮流运行的初始点。

Step3: 预测步骤。通过解式(26)得到切向量。

Step4: 选择连续参数。根据式(28)来判断下次

预测-校正步骤的连续参数。

Step5: 校正。根据所选择的连续参数形成增广矩阵，并求解方程(29)，更新牛顿解并继续迭代，判断是否满足收敛条件，若满足，返回 Step3.; 若不满足则进入 Step6。

Step6: 作出 P-V 曲线。

### 4 案例分析

在对上级电网进行等效建模后，考虑了上下行并联、单边供电和双边供电的不同运行方式，研究两个牵引供电所 8 个供电臂末端的 P-V 曲线，同时得到了对应节点钢轨侧的 P-V 曲线，并设置了不同 PCC 点不同的短路容量。电压基准值设定为 27.5 kV，功率基准值设定为 100 MW。

#### 4.1 双边供电

考虑以下工况：

Case1: 1000 MVA 短路容量，上下行不并联。

Case2: 2000 MVA 短路容量，上下行不并联。

Case3: 3000 MVA 短路容量，上下行不并联。

Case4: 1000 MVA 短路容量，上下行并联。

Case5: 2000 MVA 短路容量，上下行并联。

Case6: 3000 MVA 短路容量，上下行并联。

#### 4.2 双边供电模式结果分析

图 6、图 7 和表 2 展示了不同情况下的结果。

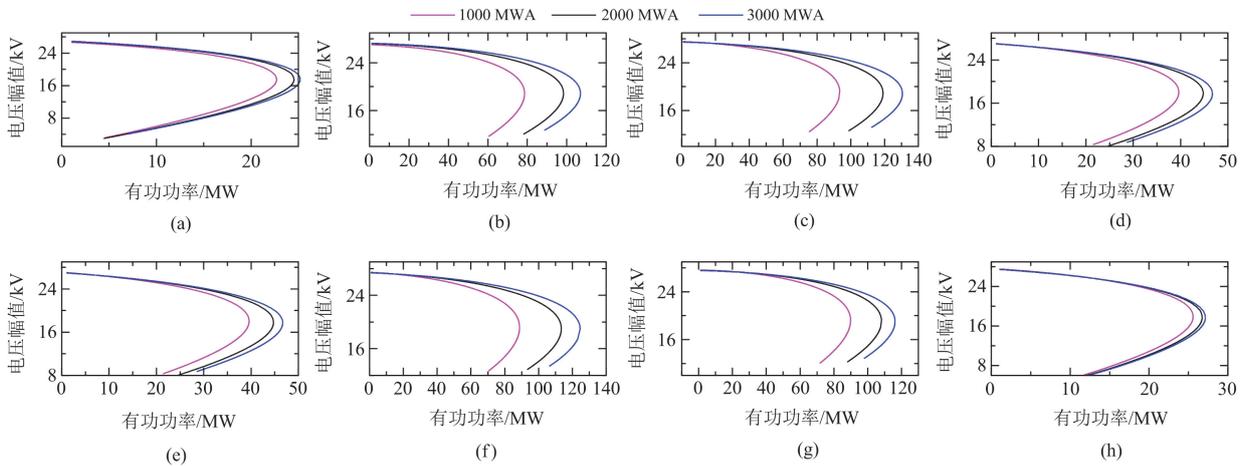
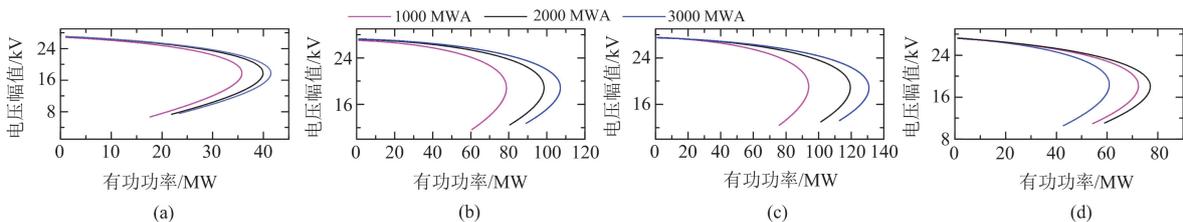


图 6 双边供电、上下行不并联的 P-V 曲线

Fig. 6 P-V curve for double-sided power supply with non-parallel upward and downward tracks



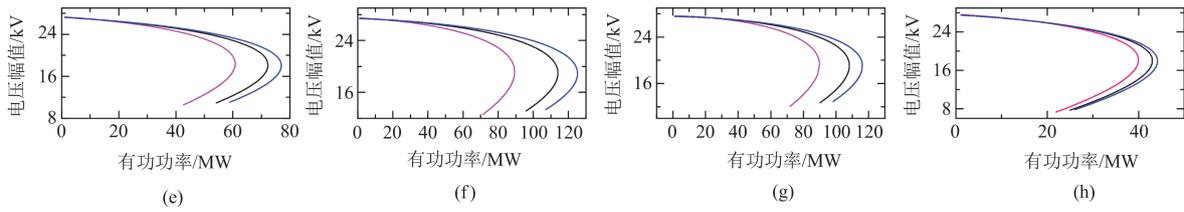


图7 双边供电、上下行并联的 P-V 曲线

Fig. 7 P-V curves for double-sided power supply with parallel upward and downward tracks

表2 双边供电

Table 2 Double-sided power supply

位置	短路容量/ MVA	极限电压/ kV	极限功率/ MW	供电 方式	上下行 结构
d	1000	18.3526	39.6004	双边	不并联
d	2000	18.0056	44.7723	双边	不并联
d	3000	17.5266	46.7175	双边	不并联
d	1000	18.4135	60.8733	双边	并联
e	1000	18.0541	39.5839	双边	不并联
e	2000	17.7115	44.7363	双边	不并联
e	3000	17.7437	46.6891	双边	不并联
e	1000	18.1660	60.8055	双边	并联

## 1) 短路容量对 P-V 曲线的影响

新能源出力波动导致上级电网短路容量也出现波动, 从而对牵引供电系统的电压稳定性产生显著影响, 特别是在短路容量不足的情况下, 电压不稳定的风险会更加突出。因此, 本文设置了 PCC 点不同的短路容量, 旨在研究短路容量对供电臂末端 P-V 曲线的影响。

由图 8 和表 3 可以看出, 以位置 a 为例, 在相同供电方式和系统结构的情况下, 增大短路容量, P-V 曲线会出现一定差异。

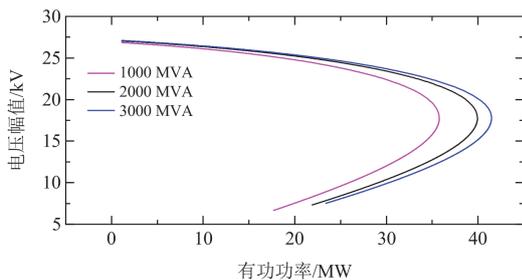


图8 不同短路容量下的 P-V 曲线

Fig. 8 P-V curves under different short-circuit capacities

表3 短路容量对极限点的影响

Table 3 Impact of short-circuit capacity on limit points

位置	短路容量/ MVA	极限电压/ kV	极限功率/ MW	供电 方式	上下行 结构
a	1000	17.7785	35.7755	单边	并联
a	2000	17.6015	39.9541	单边	并联
a	3000	17.7641	41.4723	单边	并联

由图 6 和图 7 可以看出: 在不同短路容量条件下, 系统的 P-V 曲线表现出一定差异。从图 8 可以看出, 短路容量越大, 系统的电压支撑能力越强, P-V 曲线的极限点向右上方移动, 表现为极限电压和极限功率的显著提升。当短路容量为 1000 MW 时, P-V 曲线的极限点最早出现, 系统的电压稳定裕度较低; 而在短路容量增至 2000 MW 和 3000 MW 时, 极限点逐渐后移, 系统的电压稳定性得到增强。当短路容量较小时, 系统更容易受到负荷增加或新能源波动的影响, 导致电压大幅下降并提前达到极限点, 可能引发电压失稳; 而当短路容量较大时, 系统能够有效吸收负荷波动和电压变化, 维持更高的稳定裕度。

## 2) 上下行结构对 P-V 曲线的影响

在牵引供电系统中, 上下行供电系统的拓扑结构对电压稳定性具有显著影响, 结果如图 9 和表 4 所示。

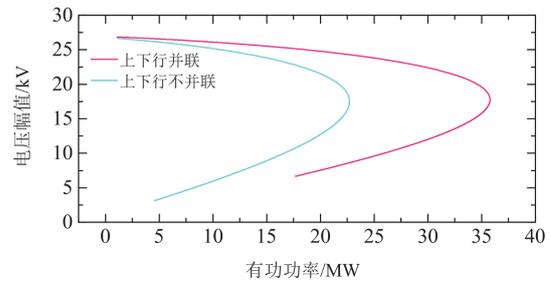


图9 不同上下行结构的 P-V 曲线

Fig. 9 P-V curves for different upward and downward track configurations

表4 系统结构对极限点的影响

Table 4 Impact of system structure on limit points

位置	短路容量/ MVA	极限电压/ kV	极限功率/ MW	供电 方式	上下行 结构
a	1000	17.7785	35.7755	单边	并联
a	1000	17.6015	22.6763	单边	不并联

由图 9 可以看出: 采用上下行并联结构时, 供电臂之间能够共享负荷, 电力系统的电压支撑能力更强, 能够有效应对新能源输出波动带来的电

网不稳定问题。如表 4 所示：并联结构的极限电压(17.7785 kV)和极限功率(35.7755 MW)均高于不并联结构，表明并联结构能够显著提高系统的供电极限和稳定性。

而在上下行不并联结构的情况下，各供电臂独立运行，电力系统的短路电流能力较弱，局部电力分布不均，尤其是在新能源出力波动的影响下，供电臂末端电压容易出现大幅波动，从而导致电压稳定性下降。表格中显示，不并联结构的极限电压

(17.6015 kV)和极限功率(22.6763 MW)显著低于并联结构，表明其抗扰动能力较弱，系统容易因电压偏离而失稳。

3) 对比研究

由图 10 中可以看出：针对位置 d 和 e 两个位置，由于供电臂长度的不同，供电方式与上下行结构对 P-V 曲线的影响并不绝对；对于位置 e，供电方式对 P-V 曲线的影响较大；而对于位置 d，两者的影响几乎持平。

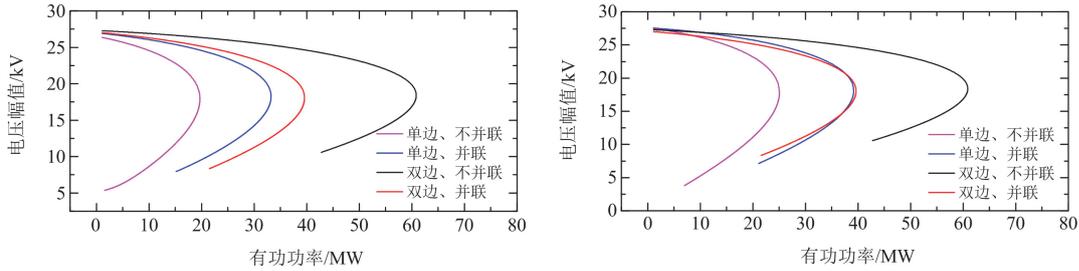


图 10 位置 d(左)和 e(右)不同情况 P-V 曲线

Fig. 10 P-V curves for different conditions at position d (left) and position e (right)

4.3 单边供电

在牵引供电系统中，单边供电是指牵引供电所通过一条馈线为整个牵引网提供电力，而不依赖于另一条供电路径。在单边供电模式下，电力从牵引供电所的母线经过变压器、开关设备，最终输送到

牵引负荷。

同样地，在单边供电方式下分析了两个供电所供电臂末端 8 个节点(a—h)电压相量和功率变化行为，研究了在不同短路容量和不同上下行结构时的 P-V 曲线，如图 11 和图 12 所示。

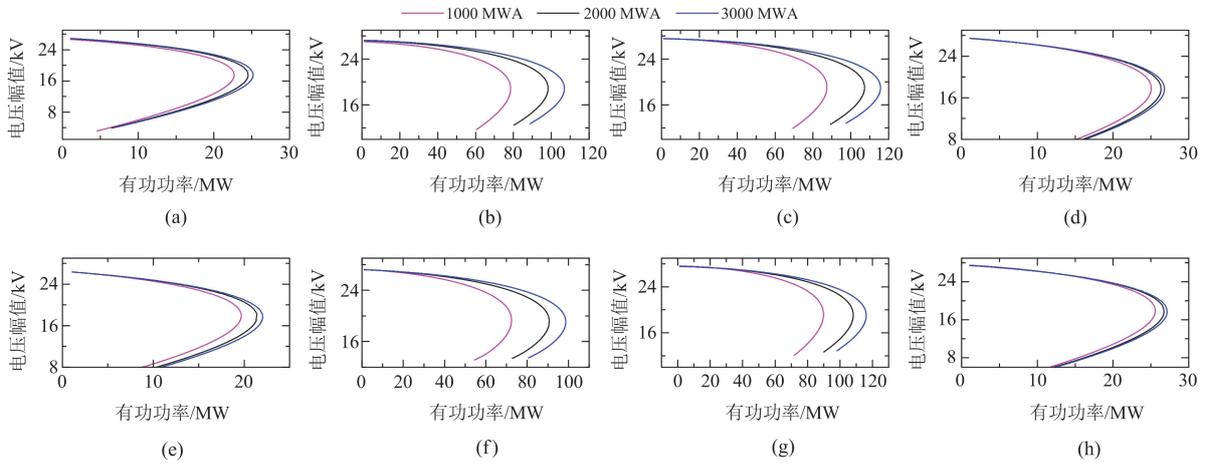
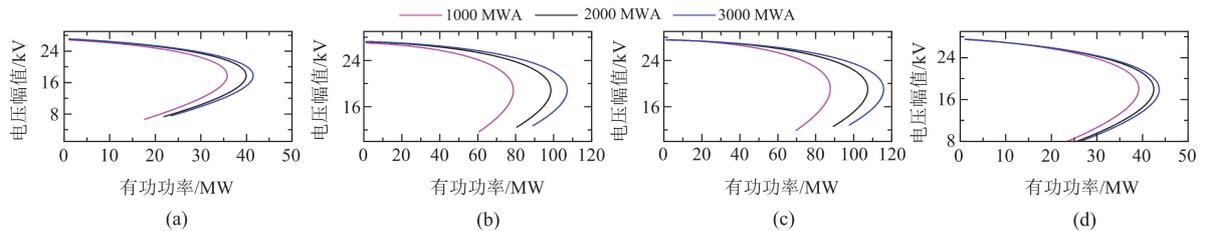


图 11 单边供电、上下行不并联的 P-V 曲线

Fig. 11 P-V curve for single-sided power supply with non-parallel upward and downward tracks



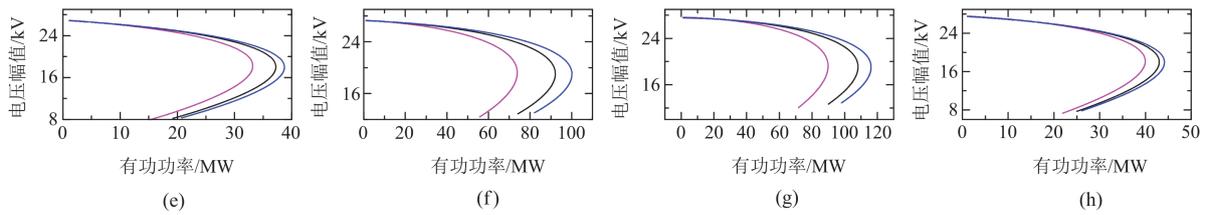


图 12 单边供电、上下行并联的 P-V 曲线

Fig. 12 P-V curve for single-sided power supply with parallel upward and downward tracks

#### 4.4 单边供电模式结果分析

在牵引供电系统中, 供电方式对电压稳定性和 P-V 曲线的极限点有显著影响。如图 13 和表 5 所示。

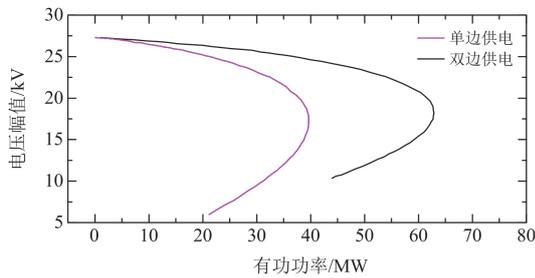


图 13 不同供电方式的 P-V 曲线

Fig. 13 P-V curves for different power supply methods

表 5 单边供电

Table 5 Single-sided power supply

位置	短路容量/ MVA	极限电压/ kV	极限功率/ MW	供电 方式	上下行 结构
a	1000	17.7335	22.6687	单边	不并联
a	2000	17.2474	24.5176	单边	不并联
a	1000	17.9537	35.7688	单边	并联
d	1000	17.8385	25.0518	单边	不并联
d	2000	17.6982	26.3477	单边	不并联
d	1000	18.1030	39.1795	单边	并联
e	1000	17.9175	19.6809	单边	不并联
e	2000	18.0824	21.4001	单边	不并联
e	1000	17.8377	37.2216	单边	并联
h	1000	17.9175	25.5778	单边	不并联
h	2000	17.5491	26.7264	单边	不并联
h	1000	18.1852	39.9645	单边	并联

由图 13 可以看出: 在相同短路容量和上下行结构的单边供电模式下, 电力仅通过一侧供电臂向负荷供电, 导致系统电压支撑能力较弱。尤其是在长距离供电时, 供电臂末端的电压会随着负荷的增加迅速下降, P-V 曲线的极限点提前出现, 电压稳定裕度显著降低。如表 5 所示: 单边供电模式下极限电压为 18.1030 kV, 极限功率为 39.1795 MW, 均

低于双边供电模式。

而在双边供电模式下, 电力通过两侧供电臂或上下行供电臂共同供电, 负荷分布更加均匀, 电压支撑能力显著增强。供电臂末端的电压下降得到了有效缓解, P-V 曲线的极限点向后推移, 系统的电压稳定裕度和负荷极限均有所提升。从表 6 可见, 双边供电模式的极限电压为 18.4135 kV, 极限功率为 60.8733 MW, 显著优于单边供电。

表 6 不同供电方式对极限点的影响

Table 6 Impact of different power supply methods on limit points

位置	短路容量/ MVA	极限电压/ kV	极限功率/ MW	供电 方式	上下行 结构
d	1000	18.4135	60.8733	双边	并联
d	1000	18.1031	39.1795	单边	并联

#### 4.5 钢轨侧 P-V 曲线研究

本文在对牵引侧的节点进行处理后, 在得到供电臂末端的 P-V 曲线的同时, 也得到了钢轨侧的 P-V 曲线, 以位置 e 为例, 由图 14 所示。

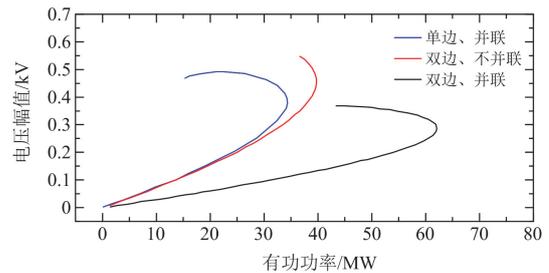


图 14 钢轨侧 P-V 曲线

Fig. 14 P-V curve for the rail side

由图 14 可以看出: 钢轨侧的 P-V 曲线有着明显不同, 与供电臂末端的 P-V 曲线方向相反。

## 5 结论

本文针对双边牵引供电系统在复杂工况下的潮流计算需求, 提出了一种统一建模的潮流计算方法, 能够适应三相电网与单相牵引负荷共存的系统结

构, 并有效提高了不同运行条件下潮流解算的准确性与适应性。在此基础上, 进一步构建了适用于双边牵引系统的连续潮流扩展模型, 系统刻画了不同供电方式、上级电网短路容量以及拓扑结构对供电臂末端 P-V 特性与电压极限状态的影响。

仿真结果表明: 适当提高上级电网短路容量可显著提升目标节点的极限功率水平; 采用上下行并联供电结构可增强功率传输能力; 与单边供电相比, 双边供电模式在供电能力与负荷承载范围上均表现出更优性能。本文所提方法不仅提升了对牵引供电系统电压稳定性的评估精度, 也为工程中供电能力分析 & 优化控制策略提供了理论支撑与实用工具。

### 参考文献

- [1] 刘志刚, 孟祥宇, 张乔, 等. 高海拔山区铁路牵引供电系统——问题、挑战与对策思考[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 2039-2054.  
LIU Zhigang, MENG Xiangyu, ZHANG Qiao, et al. Issues, challenges and countermeasures in traction power supply system of high-altitude mountain railway[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 2039-2054.
- [2] ZHANG Liyan, LI Xin, LIANG Shiwen, et al. Research on the influence of electric railway bilateral power supply on power system and countermeasures[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 137.
- [3] 张华志, 黄军, 湛博, 等. 牵引供电系统与牵引传动系统稳定性机理分析[J]. 机车电传动, 2021(2): 134-139.  
ZHANG Huazhi, HUANG Jun, ZHAN Bo, et al. Stability mechanism analysis of traction power system and traction drive system[J]. Locomotive Electric Drive, 2021(2): 134-139.
- [4] 陈永涛. 铁路电力供电系统关键技术研究[J]. 中国设备工程, 2023(2): 182-184.  
CHEN Yongtao. Research on key technologies of railway electric power supply system[J]. China Equipment Engineering, 2023(2): 182-184.
- [5] HU Haitao, LIU Yunjiang, LI Yong, et al. Traction power systems for electrified railways: evolution, state of the art, and future trends[J]. Railway Engineering Science, 2024, 32(1): 1-19.
- [6] 徐艳春, 王霖, 张涛, 等. 含 DG 的交直流不平衡配电系统暂态电压稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(1): 33-41.  
XU Yanchun, WANG Lin, ZHANG Tao, et al. Transient voltage stability analysis of AC-DC unbalanced distribution system with DG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(1): 33-41.
- [7] 马晓阳, 梁锦文, 汪颖, 等. 考虑吸引域边界危机的电压稳定域划分方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(12): 45-56.  
MA Xiaoyang, LIANG Jinwen, WANG Ying, et al. Voltage stability region partitioning method considering boundary crises of the region of attraction[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(12): 45-56.
- [8] 邹世豪, 曹永吉, 刘志文, 等. 计及多时间尺度电压失稳模式的电网薄弱环节辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(21): 35-49.  
ZOU Shihao, CAO Yongji, LIU Zhiwen, et al. Identification of grid weak link considering voltage instability patterns at multiple time scales[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(21): 35-49.
- [9] 徐衍会, 任晋, 田鑫, 等. 综合提升新能源高占比受端电网小干扰和暂态电压稳定性的 SVG 优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 119-130.  
XU Yanhui, REN Jin, TIAN Xin, et al. An SVG optimal configuration method for enhancing small disturbance and transient voltage stability in a receiving-end power grid with a high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 119-130.
- [10] 李东东, 吴祥文, 孙梦显, 等. 基于广义瞬时能量函数数法的大规模直驱风电场并入弱交流电网的短期电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(1): 24-36.  
LI Dongdong, WU Xiangwen, SUN Mengxian, et al. Analysis of short-term voltage stability of a large-scale direct-drive wind farm integrated into a weak AC grid based on the generalized instantaneous energy function method[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(1): 24-36.
- [11] ZHANG Xiaoping, JU Ping, HANDSCHIN E. Continuation three-phase power flow: a tool for voltage stability analysis of unbalanced three-phase power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1320-1329.
- [12] HAO Sheng, CHIANG H D. CDFLOW: a practical tool for tracing stationary behaviors of general distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 29(3): 1365-1371.
- [13] NIRBHAVANE P S, CORSON L, RIZVI S M H, et al. TPCPF: three-phase continuation power flow tool for voltage stability assessment of distribution networks with distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(5): 5425-5436.
- [14] 赵晋泉, 范晓龙, 高宗和, 等. 含分布式电源的三相不平衡配电网连续潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 48-53.  
ZHAO Jinqun, FAN Xiaolong, GAO Zonghe, et al.

- Continuous power flow calculation of three-phase unbalanced distribution network with distributed generation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(9): 48-53.
- [15] 巨云涛, 李嘉伟, 陈浩, 等. 基于局部几何参数化和 JFNG 算法的微电网群分布式连续潮流计算[J]. *电力自动化*, 2023, 43(6): 71-77, 136.
- JU Yuntao, LI Jiawei, CHEN Hao, et al. Distributed continuous power flow calculation of microgrid clusters based on local geometric parameterization and JFNG algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(6): 71-77, 136.
- [16] 刘芸江, 胡海涛, 杨孝伟, 等. 24 kV 柔性直流牵引供电系统潮流计算方法与供电特性分析[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(9): 2323-2334.
- LIU Yunjiang, HU Haitao, YANG Xiaowei, et al. Power Flow calculation method and power supply characteristics analysis of 24 kV flexible DC traction power supply system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(9): 2323-2334.
- [17] 席嫣娜, 王方敏, 李占赫, 等. 计及系统级控制的柔性直流牵引供电系统潮流计算方法[J]. *电工电能新技术*, 2021, 40(2): 9-14.
- XI Yanna, WANG Fangmin, LI Zhanhe, et al. Power flow calculation method for flexible DC traction power supply system considering system-level control[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2021, 40(2): 9-14.
- [18] 王辉, 刘炜, 李群湛, 等. 基于源网荷统一链式电路的交流电气化铁路动态潮流计算[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(11): 3936-3952.
- WANG Hui, LIU Wei, LI Qunzhan, et al. Dynamic power flow calculation for AC electrified railway based on unified source-grid-load chain circuit model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(11): 3936-3952.
- [19] WANG Fang, WU Mingli, ZHANG Shanshan. Research on bilateral power supply technology of electrified railway[C]// 2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), May 29-31, 2020, Chengdu, China: 311-317.
- [20] PANDE N, OHNISHI W, KOSEKI T. Analysis of voltage unbalance and mitigation of circulating power in bilateral co-phase traction system[J]. *Electric Power Systems Research*, 2024, 228.
- [21] WANG Yunling, LIU Jiawei, GOU Jing, et al. Optimization method of power supply mode and connected to external power grid of CZ railway traction station[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 1201-1210.
- [22] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压稳定分析的改进连续潮流法[J]. *电力系统自动化*, 1999, 23(14): 13-16.
- GUO Ruipeng, HAN Zhenxiang. Improved continuation power flow method for voltage stability analysis[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1999, 23(14): 13-16.
- [23] 刘权, 谢东. 连续潮流计算的算法改进研究[J]. *唐山学院报*, 2019, 32(6): 34-38.
- LIU Quan, XIE Dong. Research on algorithm improvement of continuation power flow calculation[J]. *Tangshan College Journal*, 2019, 32(6): 34-38.
- [24] 赵晋泉, 周超, 陈刚. 节点类型扩展连续潮流及其应用[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(12): 38-43.
- ZHAO Jinquan, ZHOU Chao, CHEN Gang. Node type extended continuation power flow and its application[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(12): 38-43.
- [25] CHIANG H D, FLUECK A J, SHAH K S, et al. CPFLOW: a practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1995, 10(2): 623-634.
- [26] 赵晋泉, 张伯明. 改进连续潮流计算鲁棒性的策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(22): 7-11.
- ZHAO Jinquan, ZHANG Boming. A study on the strategy for improving robustness of continuation power flow computation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(22): 7-11.

收稿日期: 2025-04-07; 修回日期: 2025-06-12

作者简介:

徐立特(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为双边牵引供电系统电压稳定性评估; E-mail: 1147170373@qq.com

张乔(1994—), 男, 博士研究生, 研究方向为可再生能源并网与高铁接入下的电力系统优化调度; E-mail: zhangqiao\_jq@163.com

刘志刚(1975—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高速铁路动车组牵引网电气关系与弓网状态检测评估. E-mail: liuzg\_cd@126.com

(编辑 石晋美)