DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2022.06.014

电力牵引与控制

高速动车组快速过分相控制方法研究

柳　军

（中国铁路沈阳局集团有限公司 大连机车监造项目部，辽宁 大连　116022）

摘　要：针对高速动车组采用传统车载过分相控制方式时存在的主断路器断开时间长、动力损失严重的问题，对高速动车组过分相过程与最佳合主断时机开展了研究，提出了一种基于网压幅值和相位信号融合的过分相控制方法，通过对过分相前后网压幅值与相位的变化判断高速动车组是否已通过分相区。为验证方法的有效性进行了半实物测试，测试数据表明在进入有电区后采用该方法能快速有效地识别出网压幅值与相位的变化，将高速列车过分相后的合主断路器时间有效提前，使得高速动车组过分相时间缩短25%以上。面对国内运力紧张与线路坡道复杂的现状，文章所提出的快速过分相方法可有效减少过分相过程中的动力损失和提升铁路运营效率，缓解客运高峰期的运量压力，具有较好的工程应用前景。

关键词：高速动车组；过分相；自动过分相；网压相位；信息融合；高速列车

中图分类号：U292.91^{+}4　　**文献标识码：**A

文章编号：1000-128X(2022)06-0095-08

Study on control method for fast neutral section passing of high-speed EMUs

LIU Jun

(Dalian Locomotive Construction Supervision Project Department, China Railway Shenyang Group Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116022, China)

Abstract: This paper proposed a method to control neutral section passing based on the signal fusion of catenary voltage amplitude and phase, from a study on the neutral section passing process and optimal closing time for the vacuum circuit breaker on high-speed EMUs, to solve the downsides of the traditional control method for neutral section passing, i.e. a long vacuum circuit breaker disconnection duration and serious power loss. This method focused on the judgment whether a high-speed EMU has passed a neutral section depending on changes in the catenary voltage amplitude and phase. In order to verify the effectiveness of the proposed method, a semi-physical test was performed. Based on the test results, any changes in the catenary voltage amplitude and phase occurring when an EMU enters an electrified section can be quickly and effectively identified using the proposed method, so that the vacuum circuit breaker can be closed effectively ahead of time the EMU passes a neutral section, reducing the neutral section passing duration by more than 25%. Confronting the deficient railway capacity in China and the complicated track conditions, the method proposed in this paper can effectively reduce the power loss in the process of neutral section passing, so as to improve the efficiency of railway operation and relieve the traffic pressure during the peak period of passenger transportation, exhibiting a promising engineering application prospects.

Keywords: high-speed EMU; neutral section passing; neutral section auto-passing; catenary voltage and phase; information fusion; high-speed train

0　引言

高速动车组运行所需能源由牵引供电系统提供，我国牵引供电采用单相工频交流供电方式，同时为保持三相负荷平衡和提高电能利用率，供电接触网采用分段分相供电方式[1]。在电气化铁路设计时，两个供电区之间会设置一段无电区，高速动车组通过

收稿日期：2022-07-11；修回日期：2022-10-11
通信作者：柳　军（1969—），男，高级工程师，主要从事内燃机车、电力机车、高速动车方面的研究；E-mail: reji90@163.com

无电区的过程称之为过分相。为避免不同供电区的相位、电位差引起车载设备受损，高速动车组过分相前需要提前卸载，并断开主断路器，无动力地进入和通过无电区；同时为保障照明、广播、空调等系统的运行，在过分相期间，高速动车组通过微制动发电维持辅助供电，待过分相结束后，再恢复到正常的运行模式。高速动车组以无动力且微制动的方式通过无电区，势必会造成列车速度下降，因此如何减小过分相过程中的动力损失是提升高速铁路运营效率的关键问题之一[2]。

过分相的方式主要有手动过分相、车载自动过分相和地面过分相[3-7]。手动过分相方式是司机人工操纵列车通过无电区[3-4]，但对于高速运行的列车而言司机每隔几分钟就需进行一次过分相操作，如此频繁紧张的作业，极易产生疏忽引发相间短路而损坏设备，因此手动过分相在高速动车组中除紧急情况外少有使用。车载过分相就是为了减轻司机疲劳强度和防止误操纵导致设备损坏而发展起来的一种自动过分相方式[5]，车载过分相主要基于车载控制器感应过分相信号，自动进行“卸载–断主断–合主断–加载”操作，目前已在全路大面积使用[6]。地面过分相则是通过地面辅助装置实现列车不断电自动过分相，其早期是使用机械开关实现，这种方式存在带载通断开关寿命短、过分相区后合主断的电流冲击大且投资巨大等劣势[3-4]，尽管近年来随着电子地面过分相、柔性过分相技术的飞速发展[7]，地面过分相寿命短、电流冲击大的缺陷得到了显著改善，但仍然存在基础设施投资大的问题，目前相关的地面过分相还处于示范运用阶段。综上，目前高速动车组仍普遍采用车载过分相方式，因此对车载过分相策略进行研究优化以减少过分相时的动力损失仍具有显著的工程价值。

根据感应过分相信号方式的不同，目前高速动车组主流的车载自动过分相方式可分为磁钢过分相和列车运行保护过分相[8-11]。磁钢过分相方式主要通过感应地面磁钢装置以确定高速动车组与分相区间的相对位置[8-10]，进而发出过分相信号，自动完成牵引卸载和断开主断路器；待感应到出分相区信号后，自动完成闭合主断路器、牵引加载等操作。列车运行保护过分相则是在列车信号系统的参与下，通过车载列车自动防护装置（Automatic Train Protection, ATP）进行自动过分相，车载 ATP 利用地面应答器或无线闭塞中心信号识别分相区间位置，进而给列车控制系统输出过分相信号与出分相信号[11]。但在既有的铁路线上，出于运行安全考虑，地面磁钢与 ATP 信号的设置保留了很大的余量，这会导致过分相时间比实际通过无电区的时间要长，影响运营效率。

针对上述车载自动过分相控制方式的不足，为使高速动车组过分相时间尽可能地逼近其通过无电区的时间，本文对过分相过程耗时进行了详细分析，在此基础上提出了一种基于网压幅值和相位信号融合的过分相控制方法，该方法可在保障过分相安全的基础上，有效缩短过分相时间。

1 过分相过程建模

过分相是高速动车组运行过程中与供电所、弓网间相互配合的协同控制过程，不论是采用地面磁钢过分相还是采用 ATP 过分相方式，其控制步骤基本都是相同的，均是在接收到过分相信号后向列车网络控制系统（TCMS）发出指令，并由 TCMS 完成“卸载–断主断–合主断–加载”操作。本文将在分析列车过分相过程的基础上构建运动学分析模型。

1.1 过分相过程分析

车载自动过分相过程可分为 3 个阶段，第 1 阶段是在进入分相区之前提前识别并做好过分相前的卸载断闸准备，第 2 阶段是通过分相区，第 3 阶段是识别过分相已完成后合主断加载完成过分相。具体如图 1 所示，在高速动车组从牵引变电所 A 运行到牵引变电所 B 的过程中，在地点 a 处接收到断开主断路器指令，为保障设备和弓网安全高速动车组开始卸载，卸载完成后再断开主断路器封锁牵引；运行距离 L_1 到达 b 处后进入中性区段；运行距离为 L_2 的中性区段后到达 c 处；通过 c 处后运行距离 L_3，在 d 处接收地面磁钢或者 ATP 的合主断路器指令，结束过分相。

1.2 过分相过程模型

因本文研究的核心目标是减少高速动车组过分相时间，因此在建模时重点关注过分相时高速列车的运动学模型。如图 2 所示，高速列车在行驶时，列车速度与牵引力、运行阻力间的运动学关系为

$$M\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=F_{\mathrm{T}}-F_{\mathrm{r}}(v,i,l_{\mathrm{r}},l_{\mathrm{t}}) \tag{1}$$

式中：M 为列车质量；v 为列车速度；F_{T} 为列车牵引力；F_{r} 为列车行驶阻力；l_{r} 为曲线长度；l_{t} 为列车长度。

考虑到高速列车在过分相时，总质量维持不变，且牵引动力已提前卸载，因此列车速度仅与运行阻力有关，即

$$M\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=-F_{\mathrm{r}}(v,i,l_{\mathrm{r}},l_{\mathrm{t}}) \tag{2}$$

因列车过分相是在运动过程中，因此不存在列车启动阻力，根据《列车牵引计算规程》可知列车行驶阻力为[12]

$$F_{\mathrm{r}}=M\cdot\left[\omega_0(v)+\omega_i(i)+\omega_{\mathrm{r}}\left(R,l_{\mathrm{r}},l_{\mathrm{t}}\right)\right] \tag{3}$$

式中：ω_0 为列车行驶时的基本阻力，具体见式(4)；ω_i 为列车行驶时的坡道阻力，具体见式(5)；ω_{r} 为列车行

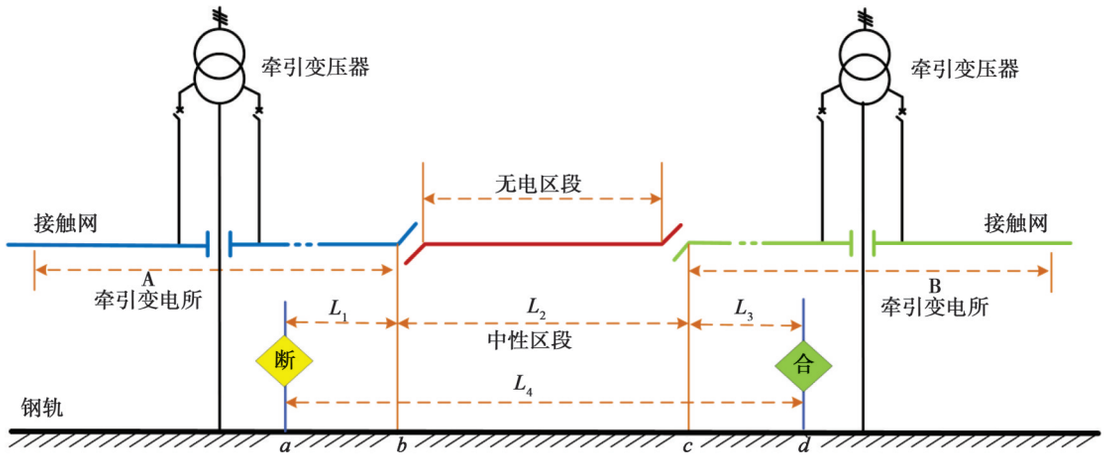


图1　过分相过程示意

Fig. 1　Schematic diagram of neutral section passing process

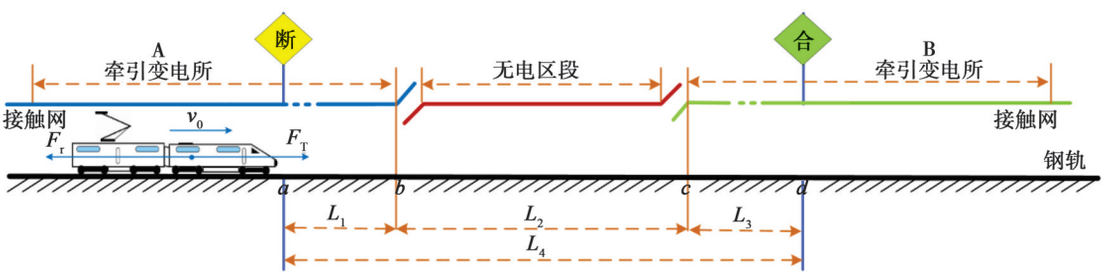


图2　过分相模型示意图

Fig. 2　Schematic diagram of neutral section passing model

驶时的曲线附加阻力，具体见式(6)；R为曲线半径。

$$\omega_0(v)=a+bv+cv^2 \tag{4}$$

$$\omega_i(i)=i \tag{5}$$

$$\omega_r(R,l_r,l_t)=\begin{cases}\dfrac{600}{R}, & l_t<l_r\\ \dfrac{600}{R}\dfrac{l_r}{l_t}, & l_t\geqslant l_r\end{cases} \tag{6}$$

式中：a, b, c为列车基本阻力系数，可根据列车动力学试验数据拟合得到；i为列车行驶时的线路坡道，上坡取正值，下坡取负值。

假定列车到达a点的速度为v_0，即开始过分相的初始速度为v_0，则列车从接收断开主断路器信号到进入无电区所需的时间t_1与列车初始速度以及列车阻力间的量化关系为：

$$\left.\begin{aligned}v(t)&=v_0-\int_0^t\left[\omega_0(v)+\omega_i(i)+\omega_r(R,l_r,l_t)\right]\mathrm{d}t\\ L_1&=\int_0^{t_1}v\mathrm{d}t\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

列车通过无电区的时间t_2满足式(8)。

$$\left.\begin{aligned}v(t)&=v(t_1)-\int_{t_1}^t\left[\omega_0(v)+\omega_i(i)+\omega_r(R,l_r,l_t)\right]\mathrm{d}t\\ L_2&=\int_{t_1}^{t_1+t_2}v\mathrm{d}t\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

从列车驶出无电区时刻到接收合主断信号时刻所需时间t_3满足式(9)。

$$\left.\begin{aligned}v(t)&=v(t_1+t_2)-\int_{t_1+t_2}^t\left[\omega_0(v)+\omega_i(i)+\omega_r(R,l_r,l_t)\right]\mathrm{d}t\\ L_3&=\int_{t_1+t_2}^{t_1+t_2+t_3}v\mathrm{d}t\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

基于式(7) ~ 式(9)可知，高速列车在过分相期间的动能损失ΔE为

$$\Delta E=\frac{1}{2}v_0^2-\frac{1}{2}\left\{v_0-\int_0^{t_{all}}\left[\omega_0(v)+\omega_i(i)+\omega_r(R,l_r,l_t)\right]\mathrm{d}t\right\}^2 \tag{10}$$

式中：t_{all}为过分相的总耗时，$t_{all}=t_1+t_2+t_3$。

2　过分相过程分析及优化策略

因高速列车过分相只受阻力作用，根据过分相过程模型的动能损失评估公式(10)可知，列车过分相的耗时越长，动能损失越大，因此对于相同初始速度和线路条件下的过分相效率可以直接使用总耗时进行对比。本文通过对过分相过程时间占比的详细统计分析，提出快速过分相优化方案。

2.1　过分相过程时间分布分析

随机抽取我国高速铁路100个分相区距离进行统计分析如图3~图5所示，图中数据显示无电区段长度L_2在60~100 m之间的占比为92%，驶出无电区段时刻

到接收合主断信号时刻所行驶的距离 L_3 大于 300 m 的占比为98%，过分相时“断主断–合主断”之间的距离 L_4 在 1 100~1 400 m 之间的占比为83%。基于以上统计可知目前高速铁路从驶出无电区时刻行至接收合主断信号时刻的距离 L_3 留有较大余量，从相对占比来看 L_3 相当于“断主断–合主断”所需总距离 L_4 的30%~50%。

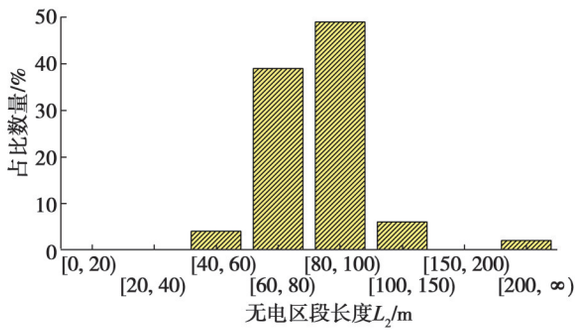


图3 L_2距离占比统计

Fig. 3 Proportional statistics of L_2 distance

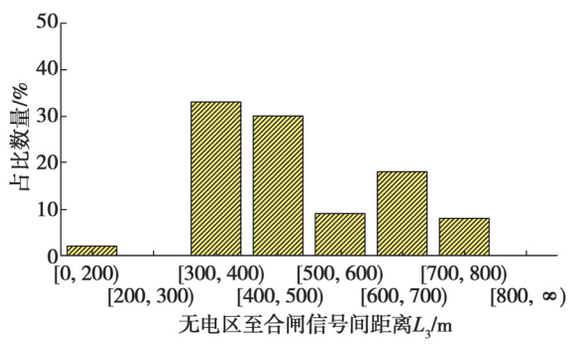


图4 L_3距离占比统计

Fig. 4 Proportional statistics of L_3 distance

进一步统计分析高速列车过分相通过各区间的时间占比情况如表1所示。表1数据显示高速动车组通过 L_3 的时间占通过 L_4 的时间的百分比达30%以上，且过分相初始速度越低，通过 L_3 的时间越长。

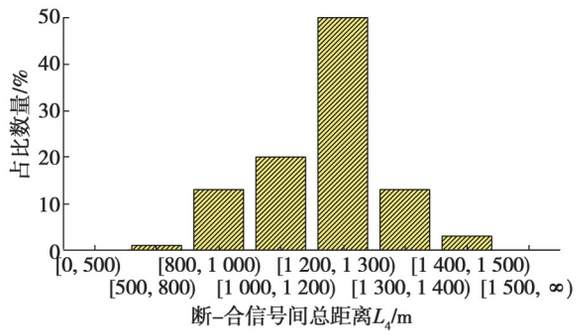


图5 L_4距离占比统计

Fig. 5 Proportional statistics of L_4 distance

2.2 过分相时间优化策略

在高速动车组过分相过程中，从接收断主断指令信号开始到驶入无电区段所行驶的距离 L_1 因指令感应点设置的位置不同而不同，因此无法基于车载设备精确预测与无电区的距离，为了设备和弓网安全，必须根据断主断信号的要求保证主断路器处于断开状态。而高速列车在无电区段 L_2 区间内，接触网处于无电状态，此阶段只能依靠列车本身惯性通过，通过时间取决于进入无电区的初始速度与无电区线路情况。从驶出无电区段时刻到接收合主断指令信号时刻所行驶的区间内，电网处于有电状态，因此可以通过车载设备识别是否已通过无电区，可在接收合主断指令信号前完成过分相，进入正常行驶状态。

基于上述分析，在车载自动过分相的3个阶段中，“出无电区–合主断”区间 L_3 的耗时可以优化。同时，根据高速列车在过分相期间耗时占比，过分相过程中 L_3 区间耗时占了较大比例，优化车载过分相耗时的关键也在于缩短 L_3 的距离。最理想的情况下，当 L_3 为0 m时，即主断路器在 c 处闭合，可以最大限度地缩短过分相时间，根据统计选择 c 处为合主断点，可以节省30%以上的过分相时间，因此，实现快速车载过分相的核心要点在于快速识别高速列车驶出无电区

表1 过分相时间统计

Table 1 Statistics of neutral section passing durations

过分相初始速度/(km·h^{-1})	L_4/m	L_2/m	L_3/m	通过L_4的时间/s	通过L_2的时间/s	通过L_3的时间/s
114	732	92	488	36.0	4.4	25.4
124	881	83	578	30.6	2.8	21.4
195	1 135	87	691	28.0	2.2	18.8
215	903	83	367	19.5	1.6	9.2
229	1 182	88	413	21.6	1.6	8.8
240	1 195	74	399	19.7	1.2	7.1
253	928	69	371	13.7	1.0	5.6
277	1 351	76	557	19.2	1.0	8.4
280	1 218	77	630	15.8	1.0	8.2
297	1 227	65	618	16.0	0.8	7.8
306	1 228	67	401	15.6	0.8	5.0

的时刻。

3　基于网压幅值和相位信号融合的过分相控制方法

高速动车组在过分相过程中，网压会经历“正常→跌落→正常”的一个变化过程，同时电相位也会因为供电臂的不同而不同。基于上述规律，通常可使用网压幅值变化或网压相位变化情况识别列车是否已驶出无电区。但在异物侵入导致弓网导接不良、弓网接触力大幅变化或供电所供电能力与负载不匹配等工况下，容易出现短暂网压幅值跳变的情况，且锁相的相位差判定阈值过大容易导致漏判、过小容易导致误判，因此不管是基于网压幅值还是基于相位差的过分相控制策略，均不能完全准确地识别出列车是否已驶出无电区，因此，本文提出了一种基于网压幅值和相位信号融合的过分相控制方法。

3.1　总体方案

本文提出的基于网压幅值与相位信号融合的快速过分相方法原理框图如图6所示，该方法的核心在于通过对网压幅值与相位的信号融合识别出列车是否已驶出无电区。首先通过基于傅里叶级数的锁相环算法（Fourier-Based Phase Locked Loop, FB-PLL）提取网压信号的幅值与相位，再通过幅值变化识别模块与相位变化识别模块判断是否已驶出无电区，当两者条件均满足时将输出“出分相信号”给TCMS，其后由TCMS执行合主断与加载操作。

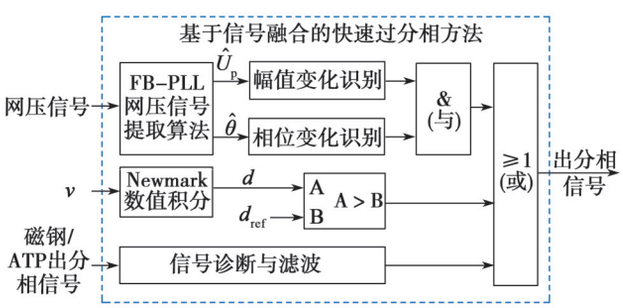


图6　基于网压幅值与相位融合的快速过分相方法原理框图

Fig. 6　Schematic diagram of fast neutral section passing method based on fusion of catenary voltage amplitude and phase

通过网压幅值和相位信号融合，可大幅提升准确率，但列车全天候运行工况复杂，仍会存在小概率漏判。此外，尽管我国目前广泛使用分相分段式接触网供电，但存在小部分分段同相供电的区段[13]。因此，在本文提出的网压幅值与相位信号融合判断的基础上，结合了磁钢/ATP过分相信号判断模块与列车分相区累计运行距离判定模块，以保障本文方法的有效性。其中采用磁钢/ATP过分相信号判断模块即为传统车载自动过分相策略。列车分相区累计运行距离判定模块采用Newmark数值积分算法计算列车在分相区运行距离，公式为：

$$\left.\begin{aligned} &d(0)=0\\ &d(k)=d(k-1)+T_0\left[(1-\alpha)v(k-1)+\alpha v(k)\right] \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

式中：$d(k)$为列车从接收断主断指令到kT_0时刻累计运行距离；T_0为控制周期；α为Newmark数值积分常数。

当列车分相区累计运行距离$d(k)>d_{ref}$时，即判断列车已通过无电区，根据前文的数据统计，L_4长度一般小于1.5 km，因此将d_{ref}设为2 km。

3.2　网压信号提取及出分相信号识别

3.2.1　网压信号提取算法

本文的网压信号提取算法采用基于傅里叶级数的锁相环算法[14]，其原理框图如图7所示。

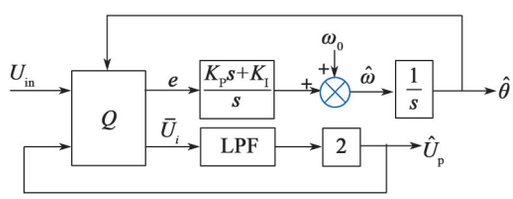


图7　FB-PLL算法原理框图

Fig. 7　Block diagram of the FB-PLL algorithm

该算法利用傅里叶变换获取交流信号的幅值与相位信息。首先设网压信号的幅值为U_p，相位为$\theta=\omega t+\varphi$，则输入电压为

$$U_{in}(t)=U_p\cos(\omega t+\varphi) \tag{12}$$

算法的鉴相器采用比例积分（PI）控制器，该控制器使用估计信号与实际信号之间的误差来计算基频（如图7所示），锁相环的误差可以表示为

$$e=\frac{\hat{U}_p}{2}\times\sin(2\hat{\theta})-U_{in}(t)\times\sin(\hat{\theta})=\frac{\hat{U}_p}{2}\times\sin(2\hat{\theta})-U_p\times\cos(\theta)\times\sin(\hat{\theta}) \tag{13}$$

式中：$\hat{U}_p$为观测网压幅值；$\hat{\theta}$为观测网压相位。

通过PI控制器闭环调节将误差e控制至0，即可使锁相环快速跟踪输入网压信号的相位。当完成$\hat{\theta}$观测后，将其余弦信号$\cos(\hat{\theta})$与输入信号相乘可得

$$U_i=U_{in}(t)\cos(\hat{\theta})=\frac{U_p}{2}+\frac{U_p}{2}\cos(2\hat{\theta})=\bar{U}_i+\tilde{U}_i \tag{14}$$

由式(14)可知，U_i由直流分量$\bar{U}_i$与交流分量$\tilde{U}_i$组成。

U_i经过低通滤波器滤波（Low Pass Filter，LPF）后可获取其直流分量，进而可观测出网压信号的幅值。基于以上原理，可得图7中的$\boldsymbol{Q}$矩阵为：

$$\begin{bmatrix} e\\ \bar{U}_i \end{bmatrix}=\boldsymbol{Q}\begin{bmatrix} U_{in}\\ \hat{U}_p \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -\sin\hat{\theta} & \dfrac{\sin(2\hat{\theta})}{2}\\ \cos\hat{\theta} & -\dfrac{\cos(2\hat{\theta})}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} U_{in}\\ \hat{U}_p \end{bmatrix} \tag{15}$$

3.2.2　出分相信号识别算法

在高速列车运行过程中，受电弓和电网处于运动

接触状态，可能存在短暂网压跳变的情况。为避免因网压跳变引发幅值信号误判断，在过分相前主断路器断开时，幅值变化识别模块首先对网压中断时间进行累加，具体为

$$t_{\text{stop}}=T_0\sum\left[0.5\ \text{sgn}\left(U_{\text{p_down}}-\hat{U}_{\text{p}}\right)+0.5\right] \tag{16}$$

式中：t_{stop}为网压中断累计时间；T_0为控制周期；[·]为高斯函数，即取整函数；sgn(·)为符号函数；$U_{\text{p_down}}$为网压中断幅值判定阈值。

当t_{stop}累计时间超过预设值$t_{\text{stop_ref}}$后，即判定列车已进入无电区域，此时开始累计网压恢复时间，具体为

$$t_{\text{rec}}=T_0\sum\left[0.5\ \text{sgn}\left(\hat{U}_{\text{p}}-U_{\text{p_up}}\right)+0.5\right] \tag{17}$$

式中：t_{rec}为网压恢复累计时间；$U_{\text{p_up}}$为网压恢复幅值判定阈值。

当t_{rec}累计时间超过预设值$t_{\text{rec_ref}}$后，即判定列车已驶出无电区域。

此外，中性段无电区存在感应电压，基于目前现场实测数据可知绝大多数场景的感应电压均在18 kV以内，以文献[15]石太客专线抽测的感应电压数据为例（如图8所示），中性区感应电压主要集中在7.5～10.6 kV和14～16.3 kV两个区段，且分别占总样本数量的72.1%和27.9%，感应电压与正常25 kV网压波动区间存在较为明显的分界线，因此设置网压幅值判断阈值$U_{\text{p_down}}$和$U_{\text{p_up}}$时应充分考虑现场中性段感应电压情况。

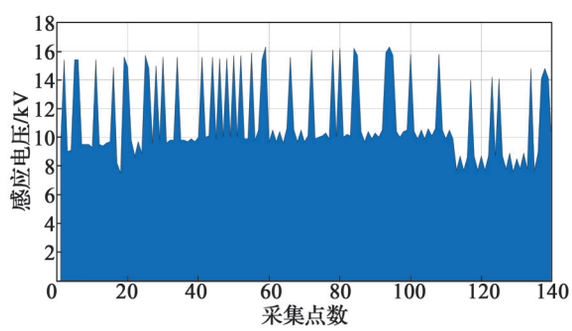


图8　中性段感应电压分布实测数据

Fig. 8　Measured data of the induced voltage distribution in a neutral section

相位识别模块则主要基于相位差识别是否已驶出分相区，在过分相主断路器断开后即锁存过分相前的相位信号：

$$\theta_{\text{prev}}=\hat{\theta}\left(t_0\right) \tag{18}$$

式中：θ_{prev}为过分相前的相位锁存信号；t_0为接收“断主断”信号的时刻。

确认相位信号后基于锁存的相位信号实时计算相位差，具体为

$$\Delta\theta=\begin{cases}0, & \hat{U}_{\text{p}}(t)<U_{\text{p_up}}\\ \hat{\theta}(t)-\theta_{\text{prev}}, & \hat{U}_{\text{p}}(t)\geqslant U_{\text{p_up}}\end{cases} \tag{19}$$

当相位差$\Delta\theta$大于相位差预设阈值θ_{th}时，即判定列车已驶出无电区域。

4　半实物试验验证

为验证算法的有效性，采用半实物仿真平台进行试验。半实物测试台整体架构如图9所示，主要由实时仿真单元、被试机箱、信号调理系统3个部分组成。实时仿真单元基于半实物仿真硬件模块构建，用于运行牵引系统及过分相过程的模型；而本文算法则运行在被试机箱中；实时仿真单元与被试机箱的输入和输出端连接，通过信号调理设备进行接口信号转换。

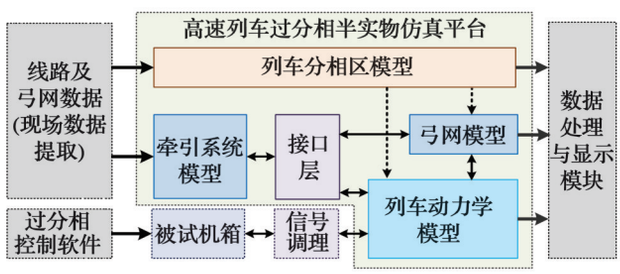


图9　半实物测试台示意图

Fig. 9　Schematic diagram of the semi-physical test bench

4.1　融合识别算法验证

首先采用半实物测试台对算法的有效性进行验证。测试时，设定前一供电臂（供电臂A）网压为25 kV/50 Hz，初始相位为0°；后一供电臂（供电臂B）网压为25 kV/50 Hz，初始相位为30°；列车通过无电区所需的时间为400 ms。半实物测试结果如图10所示，从结果可以看出算法能在网压恢复后准确识别出2个供电臂相位差(峰值为32°)，并在驶出无电区后快速地输出合主断信号，测试结果符合预期。

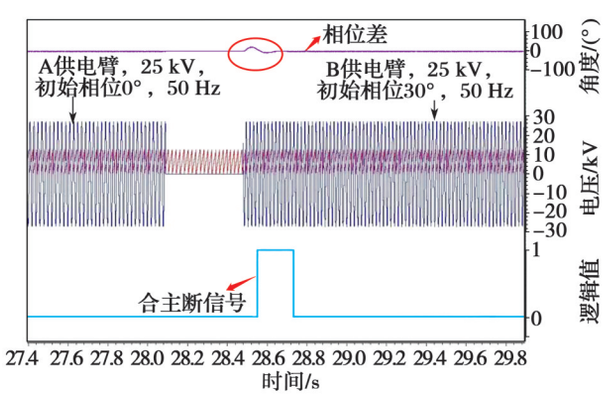


图10　网压幅值与相位信号识别测试结果

Fig. 10　Test results of catenary voltage amplitude and phase signal identification

4.2　过分相时间测试对比

为进一步测试本文过分相算法的快速性，优化过分相控制逻辑后，按照表1中统计的过分相数据将网压变化情况与线路情况导入到半实物测试台中进行测试，

表2　过分相时间对比

Table 2　Comparison in neutral section passing durations

过分相初始速度/(km·h^{-1})	L_4/m	L_2/m	L_3/m	优化前过分相时间/s	优化后过分相时间/s	时间节省百分比/%
114	732	92	488	36.0	11.6	67.80
124	881	83	578	30.6	10.2	66.70
195	1 135	87	691	28.0	10.2	63.60
215	903	83	367	19.5	11.3	42.10
229	1 182	88	413	21.6	13.8	36.10
240	1 195	74	399	19.7	13.6	31.00
253	928	69	371	13.7	9.1	33.60
277	1 351	76	557	19.2	11.8	38.50
280	1 218	77	630	15.8	8.6	45.60
297	1 227	65	618	16.0	9.2	42.50
306	1 228	67	401	15.6	11.6	25.60

结果如表2所示。从测试结果可以看出，采用本文算法可以节省不低于25%的过分相时间，且高速列车速度越低，“出无电区–合主断”距离越长，算法优化效果越明显。

5　结语

本文以减少高速动车组过分相期间的动能损失为核心目标，对列车过分相过程进行了详细建模与分析，提出了一种基于网压幅值和相位信号融合的过分相控制方法，并对该方法的有效性进行了半实物仿真验证，通过本文研究得到如下结论：①高速列车过分相过程只受阻力作用，因此在相同的工况与线路条件下，列车过分相期间“断主断–合主断”之间的耗时越长，则动能损失越大。②根据列车过分相数据的耗时占比统计，过分相过程中“出无电区–合主断”区间耗时占较大比例，通过优化过分相策略减少通过该区间耗时，理论上可节省30%以上的过分相耗时。③基于半实物仿真实测结果，采用本文提出的快速过分相控制方法在驶出无电区后能快速准确地输出“合主断”指令，将过分相过程耗时缩短25%以上，可有效减少高速列车在现有基础设施下的过分相动力损失。

参考文献：

[1] 许万涛, 唐兆祥, 陈争, 等. 短编组动车组重联过分相控制方法研究[J]. 机车电传动, 2021(4): 20-25.
XU Wantao, TANG Zhaoxiang, CHEN Zheng, et al. Research on control of short EMU reconnection passing neutral section[J]. Electric Drive for Locomotives, 2021(4): 20-25.

[2] 王坚, 赵东飞, 何海兴, 等. 两种过分相形式下CRH380AL型动车组京沪线运行仿真研究[J]. 机车电传动, 2016(4): 29-32.
WANG Jian, ZHAO Dongfei, HE Haixing, et al. Research on movement simulation of EMUs CRH380AL in Beijing—Shanghai railway under two ways of passing neutral section [J]. Electric Drive for Locomotives, 2016(4): 29-32.

[3] 严云升. 电力机车自动过分相方案的探讨[J]. 机车电传动, 1999(6): 1-3.
YAN Yunsheng. Approach into the auto-passing scheme of neutral section for electric locomotive[J]. Electric Drive for Locomotives, 1999(6): 1-3.

[4] 严云升. 电力机车和电动车组自动过分相方案的发展方向[J]. 机车电传动, 2004(6): 7-10.
YAN Yunsheng. Development trend of the scheme of auto-passing phase separations for electric locomotive and EMUs [J]. Electric Drive for Locomotives, 2004(6): 7-10.

[5] 沈迪, 田永洙, 常振臣. CRH380CL型高速列车车载自动过分相控制策略[J]. 大连交通大学学报, 2013, 34(1): 76-79.
SHEN Di, TIAN Yongzhu, CHANG Zhenchen. Control strategies and applications of GFX-3A system for CRH380CL high-speed train[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2013, 34(1): 76-79.

[6] 胡家喜, 周方圆. 电气化铁路列车过分相技术现状及发展[J]. 机车电传动, 2019(3): 1-5.
HU Jiaxi, ZHOU Fangyuan. Status and development of neutral section passing technology for electrified railway trains [J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(3): 1-5.

[7] 罗文广, 何平, 张志学, 等. 交流传动列车地面自动过分相控制策略[J]. 机车电传动, 2019(5): 10-14.
LUO Wenguang, HE Ping, ZHANG Zhixue, et al. Control strategy of ground automatic neutral section passing for AC drive train[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(5): 10-14.

[8] 刘文进, 付上源, 摄靖凯. 神朔线电力机车自动过分相现状分析及提升措施[J]. 技术与市场, 2021, 28(11): 34-36.
LIU Wenjin, FU Shangyuan, SHE Jingkai. Analysis and countermeasures of automatic over-phase control mode for electric locomotive on Shenshuo railway[J]. Technology and Market, 2021, 28(11): 34-36.

[9] 王雨, 李鹏, 颜罡, 等. HXD1C 电力机车自动过分相控制[J]. 机车电传动, 2015(4): 42-44.
WANG Yu, LI Peng, YAN Gang, et al. Automatic neutral-section passing control for HXD1C electric locomotive[J]. Electric Drive for Locomotives, 2015(4): 42-44.

[10] 李晓刚, 吕文龙, 贾庆东. 面向全自动运行系统的 ATP 自动过分相关键技术研究[J]. 自动化仪表, 2021, 42(7): 98-102.
LI Xiaogang, LYU Wenlong, JIA Qingdong. Research on key technology of ATP automatic passing neutral zone for fully automatic operation system[J]. Process Automation Instrumentation, 2021, 42(7): 98-102.

[11] 赵志鹏, 欧为军, 王猛. ATP 车载设备自动过分相问题分析[J]. 铁道通信信号, 2022, 58(3): 11-14.
ZHAO Zhipeng, OU Weijun, WANG Meng. Problem analysis of automatic passing neutral zone of on-board ATP equipment[J]. Railway Signalling & Communication, 2022, 58(3): 11-14.

[12] 中国铁道科学研究院标准计量研究所. 列车牵引计算 第1部分: 机车牵引式列车: TB/T 1407.1—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
Institute of Standards and Metrology, China Academy of Railway Sciences. Railway train traction calculation — Part 1: Trains with locomotives: TB/T 1407.1—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.

[13] 周娟. 分段式同相供电系统机车自动过分相研究[J]. 科技创新与应用, 2020(17): 85-88.
ZHOU Juan. Research on automatic passing phase of locomotive in piecewise in-phase power supply system[J]. Technology Innovation and Application, 2020(17): 85-88.

[14] SANTOS C H G, SILVA S M, CARDOSO FILHO B J. A Fourier-based PLL for single-phase grid connected systems [C]//IEEE. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta: IEEE, 2010: 2626-2632.

[15] 杨志鹏, 李向东, 张文轩, 等. 三断口分相中性区感应电压分析[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(5): 49-53.
YANG Zhipeng, LI Xiangdong, ZHANG Wenxuan, et al. Analysis induced voltage of the three fracture insulated overlap anchor section[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(5): 49-53.