

# 基于稳健复线性回归的高速动车组谐波建模方法

赵越<sup>1,2</sup>,王科<sup>1</sup>,李朝阳<sup>1</sup>,唐力<sup>1</sup>,何正友<sup>1</sup>,胡海涛<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 611756;2. 内蒙古电力科学研究院分公司,内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:**精确的高速动车组谐波模型是分析高速铁路牵引供电系统谐波问题的关键之一。结合CRH2A型动车组现场实测的电压、电流数据,分析了6种典型稳态运行工况下动车组的谐波电压、谐波电流的幅频特性、相频特性及其交互特性。在此基础上,建立了非耦合谐波诺顿等效模型,并应用稳健复线性回归方法求解等效谐波电流量和谐波导纳矩阵。仿真结果表明,所建立的谐波模型能准确地表征高速动车组的谐波电流输出特性,可用于精确地评估高速铁路牵引供电系统谐波问题。

**关键词:**高速铁路;动车组;谐波建模;稳健复线性回归;非耦合谐波诺顿等效模型

**中图分类号:**TM 922.3

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202011016

## 0 引言

高速动车组是高速铁路牵引供电系统的主要负荷,具有冲击性、非线性、单相性等特性,造成了牵引供电系统负序、谐波等电能质量问题,影响着牵引供电系统的安全稳定运行<sup>[1-2]</sup>。为了优化牵引供电系统的谐波问题,高速动车组普遍采用基于脉宽调制技术的四象限变流器,以减少谐波电流的发射值<sup>[3]</sup>。然而,采用较高开关频率的变流器向系统注入了一定的高次特征谐波,即偶数倍开关频率附近的奇数次谐波<sup>[4]</sup>。这些高次谐波易与牵引供电系统的阻频参数匹配,诱发高次谐波谐振问题,造成避雷器爆炸、过电压保护跳闸等事故<sup>[5-6]</sup>。

分析解决牵引供电系统谐波问题的关键之一在于建立精确的动车组谐波模型。围绕动车组谐波建模,国内外专家主要开展了仿真分析法<sup>[7-9]</sup>、数学推导法<sup>[10-13]</sup>和数值解析法<sup>[14-16]</sup>这三个方面的研究。其中,仿真分析法基于MATLAB、PSCAD等平台,搭建了相应的仿真分析模型。该方法实现了动车组谐波电压、电流输出特性的动态模拟,能准确地表征动车组谐波电压、电流的频谱特性,可用于牵引供电系统谐波谐振等规律性问题的研究<sup>[7]</sup>。然而,在建模过程中往往对复杂的牵引传动系统进行一定的简化:如文献[8-9]仅考虑了整流器的建模;文献[10]忽略了牵引电机的影响。这些简化在一定程度上弱化了逆变、牵引环节与车载牵引变压器一次侧的谐波耦合作用,从而影响动车组谐波输出特性的精确性。

数学推导法通过分析动车组牵引变流器控制原

理,基于3D几何墙模型,利用双边傅里叶级数和贝塞尔函数特性推导了多重化多电平脉冲整流器谐波电流特性<sup>[11-13]</sup>。使用数学推导法可以揭示动车组谐波产生机理,定性地分析动车组的谐波输出特性。然而,该模型没有考虑运行环境、工况对特征谐波的影响,从而难以精确地定量分析动车组在不同运行工况下谐波的输出含量。

为了准确地评估牵引供电系统的谐波发射情况,文献[16-17]分析了不同稳态工况下的谐波电压、谐波电流频谱分布特性,建立了基于实数域的牵引负荷谐波诺顿等效模型,并应用实数域最小二乘法(LSM)求解了相关参数。该方法可准确地表征单列动车组谐波电流的发射幅值,但其建模过程中忽略了电压、电流相量的复数特性,应用实数域LSM进行求解,影响了计算结果的精度,有待进一步改进。基于实测数据的谐波诺顿等效模型求解的本质是求解复数域下的回归问题,文献[19]研究了稳健复线性回归(RCLR)算法在谐波责任划分方面的应用,该方法具有收敛性好、精度高等优势,可参考借鉴。

因此,本文将基于动车组受电弓处的实测电压、电流数据为基础,分析其在不同运行工况下谐波电压、电流的统计特性。建立动车组非耦合谐波诺顿等效模型,并应用RCLR算法求解相关参数。通过仿真对比分析论证本文所建立模型的精确性。

## 1 动车组谐波特性

动车组的谐波特性主要包括谐波电压和电流的幅频特性、相频特性及谐波电压和电流的交互特性3个方面。动车组的运行过程中存在6种稳态典型运行工况,即100%牵引功率(工况1)、50%牵引功率(工况2)、25%牵引功率(工况3)、100%制动功率(工况4)、50%制动功率(工况5)、25%制动功率(工况6)<sup>[16-17]</sup>。本节将基于CRH2A型动车组车载牵引变压器27.5 kV侧的电压、电流实测数据,分析上

收稿日期:2020-04-02;修回日期:2020-09-15

基金项目:国家自然科学基金青年项目(61603315);四川省科技开发面上项目(2018JY0263)

Project supported by the Youth Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(61603315) and the General Project of Science and Technology Development of Sichuan Province(2018JY0263)

述6种稳态典型运行工况下的谐波电压、电流特性。

### 1.1 谐波幅频特性

工况1—6下CRH2A型动车组各次谐波电压、电流幅值的分布特性见附录图A1。由图可知,电压、电流的谐波频谱与运行工况无关。其中,谐波电压含量较高的谐波主要为45~57次的奇数次谐波,谐波电流含量较高的谐波主要为3~9、45~57、87~99次谐波内的奇数次谐波。此外,牵引/制动功率越大,上述特征谐波的含量越高。

### 1.2 谐波相频特性

工况1—6下CRH2A型动车组各次谐波电压、电流初相位的分布特性见附录图A2。由图可知,谐波电压、电流的初相位整体分布比较分散,具有较强的随机性。其中,3~13、43~49、53~57次谐波内的奇数次谐波电压、谐波电流的初相位分布相对集中。

### 1.3 谐波电压、电流交互特性

CRH2A型动车组3~99次谐波内的奇数次谐波的电压幅值对电流幅值的散点分布图见附录图A3。图中, $h$ 、 $k$ 分别为谐波次数、线性拟合斜率。工况1—6下3~99次谐波内的奇数次谐波电压、电流相位差的统计情况见附录图A4。由图A3以及图A4可知,各次谐波电压与谐波电流幅值之间存在一定的线性关系,尤其是谐波含量较大的频段(即3~9、45~57、87~99次谐波内的奇数次谐波)内其线性相关性明显。而且,这些谐波频段内谐波电压、电流的相位差相对集中,其他频段内的相位差相对分散。

综上所述,在稳定运行工况下CRH2A型动车组输出的谐波电压、谐波电流适宜采用非耦合谐波诺顿等效模型进行模拟。

## 2 非耦合谐波诺顿等效模型

### 2.1 模型建立

动车组非耦合谐波诺顿等效模型可表示为<sup>[19]</sup>:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_c + \mathbf{YV} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{I}$ 为实测的谐波电流向量; $\mathbf{I}_c$ 为等效的谐波电流源常量向量; $\mathbf{Y}$ 为等效的非耦合导纳矩阵; $\mathbf{V}$ 为实测的谐波电压向量。式(1)可展开为:

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{c2} \\ I_{c3} \\ \vdots \\ I_{ch} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{2,2} & & & \\ & Y_{3,3} & & \\ & & \ddots & \\ & & & Y_{h,h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_h \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $I_h$ 、 $V_h$ 分别为实测的 $h$ 次谐波电流、电压; $I_{ch}$ 为等效的 $h$ 次谐波电流常量; $Y_{h,h}$ 为等效 $h$ 次谐波导纳。

### 2.2 模型求解

求解非耦合谐波诺顿等效模型的关键在于计算谐波电流常量向量和谐波导纳矩阵。然而,式(2)为不定方程式,即待求变量数大于方程数。因此,需要采用多组独立测量结果进行回归求解。一般地, $t$ 组

独立的测量结果可表示为<sup>[19]</sup>:

$$\begin{cases} I_h^1 = I_{ch} + Y_{h,h} V_h^1 \\ I_h^2 = I_{ch} + Y_{h,h} V_h^2 \\ \vdots \\ I_h^t = I_{ch} + Y_{h,h} V_h^t \end{cases} \quad (3)$$

式(3)的矩阵形式可表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{x}\mathbf{A} \quad (4)$$

$$\mathbf{y} = [I_h^1 \ I_h^2 \ \cdots \ I_h^t] \quad (5)$$

$$\mathbf{x} = [I_{ch} \ Y_{h,h}] \quad (6)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ V_h^1 & V_h^2 & \cdots & V_h^t \end{bmatrix} \quad (7)$$

复参数 $\mathbf{x}$ 的估计值应该使得拟合值 $\hat{\mathbf{y}}$ 与实际值 $\mathbf{y}$ 之差的平方和最小,即满足:

$$\min m = \sum_{j=1}^t |y_j - \mathbf{x}\mathbf{A}_j|^2 \quad (8)$$

其中, $m$ 为目标函数; $y_j$ 为 $\mathbf{y}$ 的第 $j$ 列相量的幅值; $\mathbf{A}_j$ 为 $\mathbf{A}$ 的第 $j$ 列元素。复参数 $\mathbf{x}$ 的复最小二乘解为:

$$\begin{cases} \partial m / \partial x_\alpha^{\text{real}} = 0 \\ \partial m / \partial x_\alpha^{\text{imag}} = 0 \end{cases} \quad \alpha = 1, 2, \dots, h \quad (9)$$

其中, $x_\alpha^{\text{real}}$ 、 $x_\alpha^{\text{imag}}$ 分别为 $x_\alpha$ 的实部、虚部, $x_\alpha$ 为 $\mathbf{x}$ 的第 $\alpha$ 行元素。求解式(4)可得复最小二乘估计结果:

$$\mathbf{x}^{(0)} = \mathbf{y}(\bar{\mathbf{A}}^T \mathbf{A})^{-1} \bar{\mathbf{A}}^T \quad (10)$$

式(10)所示结果易受到异常数据的影响。因此,拟采用迭代反复加权的方法增强算法的稳健性,式(8)更新为:

$$\min m = \sum_{j=1}^t \omega_j |y_j - \mathbf{x}\mathbf{A}_j|^2 \quad (11)$$

其中, $\omega_j$ 为权重。本文采用Ramsay's函数来构建权重函数,Ramsay's函数可表示为<sup>[21]</sup>:

$$r(|\varepsilon_j|) = a^{-2} \left[ 1 - \exp(-a|\varepsilon_j|/s) \right] (1 + a|\varepsilon_j|/s) \quad (12)$$

其中, $\varepsilon_j$ 为复残差估计值, $|\varepsilon_j|$ 为 $\varepsilon_j$ 的模值; $a$ 为常数, $a=2$ ;  $s$ 为标准化尺度。 $s$ 的表达式为<sup>[20]</sup>:

$$s = \text{median}(|\varepsilon_j - \text{median}(\varepsilon_j)|) / 0.6745 \quad (13)$$

其中, $\text{median}(\cdot)$ 为中位数函数。则权重可表示为:

$$\omega(|\varepsilon_j|) = \exp(-a|\varepsilon_j|/s) \quad (14)$$

式(11)的解为:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{y}\boldsymbol{\omega}\bar{\mathbf{A}}^T (\bar{\mathbf{A}}^T \boldsymbol{\omega}\mathbf{A})^{-1} \quad (15)$$

其中, $\boldsymbol{\omega}$ 为权重矩阵,其为对角矩阵。

综上,基于RCLR的求解流程如附录图A5所示,详细步骤为:①根据式(10)计算复参数 $\mathbf{x}$ 的估计值 $\mathbf{x}^{(0)}$ ,并计算复残差向量估计值 $\boldsymbol{\varepsilon}$ ;②根据复残差向量估计值 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 和Ramsay's函数计算权重矩阵 $\boldsymbol{\omega}$ ;③根据式(15)更新复参数 $\mathbf{x}'$ ,并与上一次的估计结果进行对比,若满足 $|x_j - x'_j| < 10^{-6}$ ,则计算结束,否则返回

步骤①,直到满足上述条件。

### 2.3 建模流程

附录图 A6 给出了基于实测数据的动车组非耦合谐波诺顿等效模型的建模流程,详细流程如下。

(1)数据采集:同步采集动车组车载变压器 27.5 kV 侧电压、电流数据,采样频率不低于 10 kHz。

(2)数据处理:以电压波形为参考,找到波形过零点,并将其作为起点;接着找到 10 个周期后的过零点,并将其作为终点;然后选取电压、电流波形数据,进行快速傅里叶分析,并保存电压、电流相量分析结果;循环处理余下数据;最后将分析结果随机分成建模组和验证组。

(3)模型求解:结合建模组数据,应用 RCLR 算法求解谐波电流常量和谐波导纳矩阵。

(4)模型验证:根据模型求解结果提供的谐波电流常量和谐波导纳矩阵以及验证组谐波电压数据,计算相应的谐波电流相量,并应用皮尔逊相关系数评价 2 个相量的幅值相关性和相位相关性。

皮尔逊相关系数  $r$  可定义为:

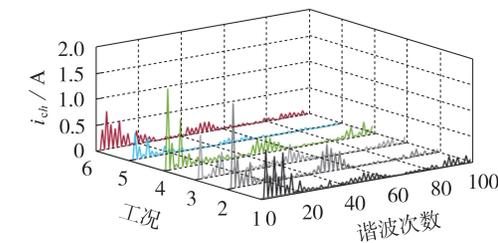
$$r = \text{cov}(I_S, I_M) \sigma_{I_M} / \sigma_{I_S} \quad (16)$$

其中,  $I_S$  和  $I_M$  分别为计算的电流幅值和实测电流幅值;  $\text{cov}(\cdot)$  为协方差求解函数;  $\sigma_{I_M}$  和  $\sigma_{I_S}$  分别为计算的电流幅值和实测电流幅值的标准差求解函数。

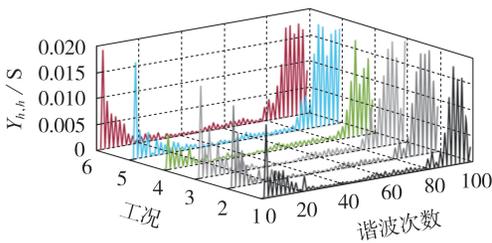
## 3 算例分析

### 3.1 谐波模型及验证

图 1 为基于 RCLR 建模方法计算得到的 6 种工况下非耦合谐波诺顿等效模型的谐波电流常量的有效值和谐波导纳矩阵的有效值。由图可知:谐波电流常量主要集中在谐波电流含量较高的频段,即 3~9、



(a) 谐波源常量



(b) 非耦合导纳矩阵

图 1 建模结果

Fig.1 Results of modeling

45~57、87~99 次谐波内的奇数次谐波;谐波等效纳 3~9、87~99 次谐波内的奇数次谐波幅值较大,这与前文所述谐波电压、电流幅值交互特性相对应。

附录图 A7(a)、(b)分别为动车组运行在工况 1 时,采用实数域 LSM 和 RCLR 这 2 种算法得到的谐波电流相量与实测数据的对比结果。图中,采用 RCLR 算法的计算结果与实测数据的幅值相似度和相位相似度分别为 0.952 和 0.646,优于实数域 LSM 的计算结果所得的幅值相似度(0.848)和相位相似度(0.30)。工况 1—6 下 2 种算法计算结果与实测数据相似度的对比情况见附录图 A7(c)。表 1 为相应的统计结果。结果表明,本文算法在各种工况下均具有更高的精度,验证了本文算法的正确性和精确性。

表 1 相似度统计结果

算法	幅值相似度		相位相似度	
	最大值	平均值	最大值	平均值
实数域 LSM	0.983	0.897	0.870	0.433
RCLR	0.990	0.950	0.951	0.511

### 3.2 讨论

根据图 1、图 A7 和表 1 的对比结果可知,2 种算法在幅值方面均具有较好的精度,但在相位方面精度较低,平均值仅为 0.433 和 0.511。这是因为谐波电压、电流间的相位差分布的随机性较强(如图 A2 所示),尤其是谐波含量较低的非特征谐波,难以用线性回归的方法进行精确表征。

表 2 为不同谐波段的相位相似度统计结果。表中,谐波频段 1 表示谐波含量较高的频段,包括 3~9、45~57、87~99 次谐波内的奇数次谐波;谐波频段 2 表示其他含量较低的谐波频段。谐波频段 1 的幅值相似度和相位相似度平均值均高于谐波频段 2。

表 2 不同频段谐波相似度统计结果

Table 2 Statistical results of harmonic similarity in different frequency bands

谐波频段	幅值相似度		相位相似度	
	最大值	平均值	最大值	平均值
1	0.996	0.981	0.997	0.805
2	0.932	0.742	0.935	0.408

附录图 A8 给出了由 2 组不同精度的谐波电流相量重构得到的时域电流波形与实测波形的对比情况。表 3 为 2 组时域波形的相似度、幅值相似度、相位相似度、不同谐波频段的幅值及相位相似度。由

表 3 相似度统计结果

Table 3 Statistical results of similarity

组号	时域波形相似度	全频段		谐波频段 1		谐波频段 2	
		相位相似度	幅值相似度	相位相似度	幅值相似度	相位相似度	幅值相似度
1	0.99982	0.311	0.958	0.983	0.985	0.086	0.806
2	0.99980	0.606	0.965	0.993	0.980	0.383	0.815

对比结果可知,2组重构的时域波形与实测波形均具有较高的吻合度,论证了本文建模方法的正确性。同时,谐波含量较小的非特征谐波的相位对电流输出特性影响较小,在建模过程中可忽略其偏差。

### 3.3 牵引供电系统谐波评估

本节借鉴文献[5]提出的牵引供电系统谐波评估方法,分别应用RCLR和实数域LSM建立的动车组谐波模型,并结合现场实测数据进一步验证本文算法的正确性。牵引供电系统的供电示意图和相应的电气参数分别如附录图A9和附录表A1所示[5]。

图2(a)为动车组在牵引工况时,分别应用2种建模方法得到的动车组模型计算得到的27.5 kV侧谐波电压与现场实测结果的对比情况。图2(b)为多组现场实测数据与仿真结果在不同谐波频段的相似度分析结果,表4为相应的指标统计结果。上述仿真结果表明,本文算法具有更高的计算精度。

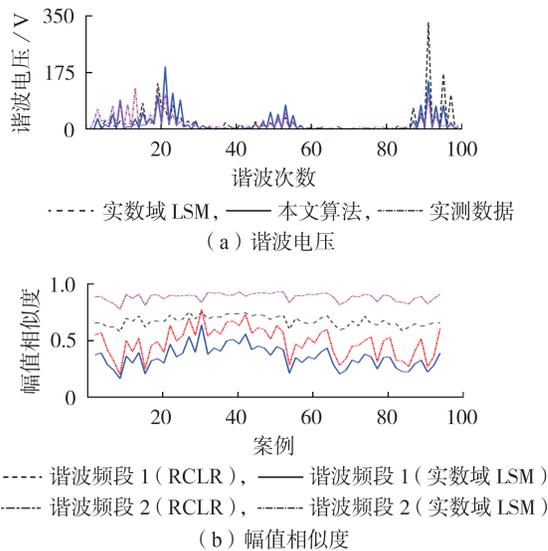


图2 仿真评估结果对比

Fig.2 Comparison of simulative evaluation results

表4 幅值相似度统计结果

Table 4 Statistical results of amplitude similarity

谐波频段	本文算法的幅值相似度		实数域LSM的幅值相似度	
	最大值	平均值	最大值	平均值
1	0.752	0.674	0.639	0.359
2	0.928	0.884	0.772	0.491

## 4 结论

结合CRH2A型动车组实测的电压、电流数据,本文分析了其谐波幅值特性、相位特性及交互特性,建立了非耦合谐波诺顿等效模型,应用RCLR算法求解相关参数,并通过算例分析验证了建模方法的精确性。主要得到如下结论:

(1)CRH2A型动车组谐波电压和谐波电流的有效值具有一定的线性关系,谐波相位差在谐波含量

较高的特征谐波频段相对恒定,适宜用非耦合诺顿等效模型进行等效;

(2)在各种运行工况下采用RCLR求解得到的非耦合诺顿等效模型均比实数域LSM精度高;

(3)谐波含量较小的非特征谐波的相位分布随机性较强,在一定程度上影响了非耦合谐波诺顿等效模型的精确性,但由于其含量小,对牵引供电系统总谐波畸变率等评估指标精确性的影响可忽略;

(4)采用本文算法的动车组谐波模型,结合牵引供电系统谐波潮流计算方法,可精确地评估牵引供电系统的谐波含量。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

### 参考文献:

- [1] HE Z Y, HU H T, ZHANG Y F, et al. Harmonic resonance assessment to traction power-supply system considering train model in China high-speed railway[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1735-1743.
- [2] 许加柱, 柏滋艺. 磁集成式LCL滤波器在牵引网高次谐波抑制中的应用[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 207-212, 218. XU Jiazhu, BAI Ziyi. Application of magnetic integrated LCL filter in high-order harmonic suppression for traction network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 207-212, 218.
- [3] 王科, 胡海涛, 魏文婧, 等. 基于列车运行图的高速铁路动态牵引负荷建模方法[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(1): 102-110. WANG Ke, HU Haitao, WEI Wenjing, et al. Modelling method for dynamic traction load of high speed railway based on train working diagram[J]. China Railway Science, 2017, 38(1): 102-110.
- [4] CHU X, LIN F, YANG Z P. The analysis of time-varying resonances in the power supply line of high speed trains [C]//International Power Electronics Conference. Hiroshima, Japan: IEEE, 2014: 1322-1327.
- [5] 崔恒斌, 冯晓云, 林轩, 等. 车网耦合下高速铁路牵引网谐波谐振特性研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 54-64. CUI Hengbin, FENG Xiaoyun, LIN Xuan, et al. Research on harmonic resonance characteristic of high-speed railway traction net considering coupling of trains and traction nets[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 54-64.
- [6] 王科, 陈丽华, 胡海涛, 等. 一种考虑行车运行图的高速铁路牵引供电系统谐波评估方法[J]. 铁道学报, 2017, 39(4): 32-41. WANG Ke, CHEN Lihua, HU Haitao, et al. A novel method to assess harmonic of high-speed railway traction power supply system considering train time table[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(4): 32-41.
- [7] 何正友, 胡海涛, 方雷, 等. 高速铁路牵引供电系统谐波及其传输特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 55-62. HE Zhengyou, HU Haitao, FANG Lei, et al. Research on the harmonic in high-speed railway traction power supply system and its transmission characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 55-62.
- [8] 张民, 何正友, 胡海涛, 等. 高速动车组再生制动下网侧电流谐波特性分析[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 257-261. ZHANG Min, HE Zhengyou, HU Haitao, et al. Analysis on harmonic characteristics of grid-side current during regenerative braking of high speed train[J]. Power System Technolo-

- gy, 2012, 36(9):257-261.
- [9] 刘玉洁, 盛彩飞, 林飞, 等. 高速动车组网侧电流谐波特性的研究[J]. 电气传动, 2010, 40(1):33-37, 50.  
LIU Yujie, SHENG Caifei, LIN Fei, et al. Harmonic analysis of power grid-side for high speed train[J]. Electric Drive, 2010, 40(1):33-37, 50.
- [10] 熊进飞, 周福林, 陈志远, 等. 车网耦合作用下励磁涌流对机车变流器电流频谱的影响[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1):177-183.  
XIONG Jinfei, ZHOU Fulin, CHEN Zhiyuan, et al. Effect of inrush current on locomotive converter output current spectrum under coupling of train and network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1):177-183.
- [11] SHEN J, TAUFIQ J A, MANSELL A D. Analytical solution to harmonic characteristics of traction PWM converters[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1997, 144 (2):158-168.
- [12] SHEN J, BUTTERWORTH N. Analysis and design of a three-level PWM converter system for railway-traction applications [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1997, 144 (5):357-371.
- [13] CHANG G W, LIN H W, CHEN S K. Modeling characteristics of harmonic currents generated by high-speed railway traction drive converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2):766-773.
- [14] 解绍锋, 李群湛, 赵丽平. 电气化铁道牵引负载谐波分布特征与概率模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16):79-83.  
XIE Shaofeng, LI Qunzhan, ZHAO Liping. Study on harmonic distribution characteristic and probability model of the traction load of electrified railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16):79-83.
- [15] 陈民武, 刘洋, 韩旭东, 等. 高速铁路牵引负荷谐波分布的非参数估计模型与预测评估[J]. 电网技术, 2017, 41(8):2598-2603.  
CHEN Minwu, LIU Yang, HAN Xudong, et al. Harmonic distribution modeling based on non-parametric estimation and harmonic prediction evaluation for high speed railway traction load[J]. Power System Technology, 2017, 41(8):2598-2603.
- [16] 李欣, 杨健维, 戎骏, 等. 基于实测数据的CRH380A型高速动车组特征谐波建模[J]. 铁道学报, 2017, 39(9):32-39.  
LI Xin, YANG Jianwei, RONG Jun, et al. Characteristic harmonic modeling for CRH380A high-speed EMU based on field data[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39 (9):32-39.
- [17] 李欣, 马晓兰, 杨健维, 等. CRH380A型高速动车组谐波电流特性分析及动态建模研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(6):28-37.  
LI Xin, MA Xiaolan, YANG Jianwei, et al. Analysis of harmonic current characteristics and dynamic modeling for CRH380A high-speed EMU[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(6):28-37.
- [18] 贾秀芳, 董立峰. 基于复数域稳健回归的多谐波源污染责任量化方法[J]. 太阳能学报, 2019, 40(5):1309-1315.  
JIA Xiufang, DONG Lifeng. Quantifying harmonic pollution responsibilities of multiple harmonic sources based on robust regression in complex domain[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(5):1309-1315.
- [19] NASSIF A B, YONG J, XU W. Measurement-based approach for constructing harmonic models of electronic home appliances[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(3):363-375.
- [20] LAWSON C, KEATS J B, MONTGOMERY D C. Comparison of robust and least-squares regression in computer-generated probability plots[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1997, 46(1):108-115.

#### 作者简介:



赵 越

赵 越(1994—),女,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,主要研究方向为牵引供电系统谐波特性(**E-mail**: 1518275142@qq.com);

何正友(1970—),男,四川自贡人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为信号处理和信息理论在电力系统中的应用、配电网综合自动化等(**E-mail**: hezy@home.swjtu.edu.cn);

胡海涛(1987—),男,安徽阜阳人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为牵引供电系统节能降耗与稳定性(**E-mail**: hht@swjtu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

## Harmonic modeling method of high-speed EMUs based on robust complex linear regression

ZHAO Yue<sup>1,2</sup>, WANG Ke<sup>1</sup>, LI Zhaoyang<sup>1</sup>, TANG Li<sup>1</sup>, HE Zhengyou<sup>1</sup>, HU Haitao<sup>1</sup>

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

2. Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Hohhot 010020, China)

**Abstract:** Accurate harmonic model of high-speed EMUs (Electric Multiple Units) is one of the keys to analyze the harmonic issues in the traction power supply system of high-speed railway. The amplitude-frequency, phase-frequency and interaction characteristics of the harmonic voltages and currents of EMUs under six kinds of typical steady-state operation conditions are analyzed combined with the field measured voltage and current data of CRH2A EMUs. On this basis, a decoupled harmonic Norton equivalent model is built. Moreover, the robust complex linear regression method is applied to calculate equivalent harmonic current constant and harmonic admittance matrix. The simulative results show that the proposed harmonic model can characterize the harmonic current emission behaviors of the EMUs accurately, and it can be used to evaluate the harmonic issues in the traction power supply system of high-speed railway.

**Key words:** high-speed railway; EMUs; harmonic modeling; robust complex linear regression; decoupled harmonic Norton equivalent model

## 附录

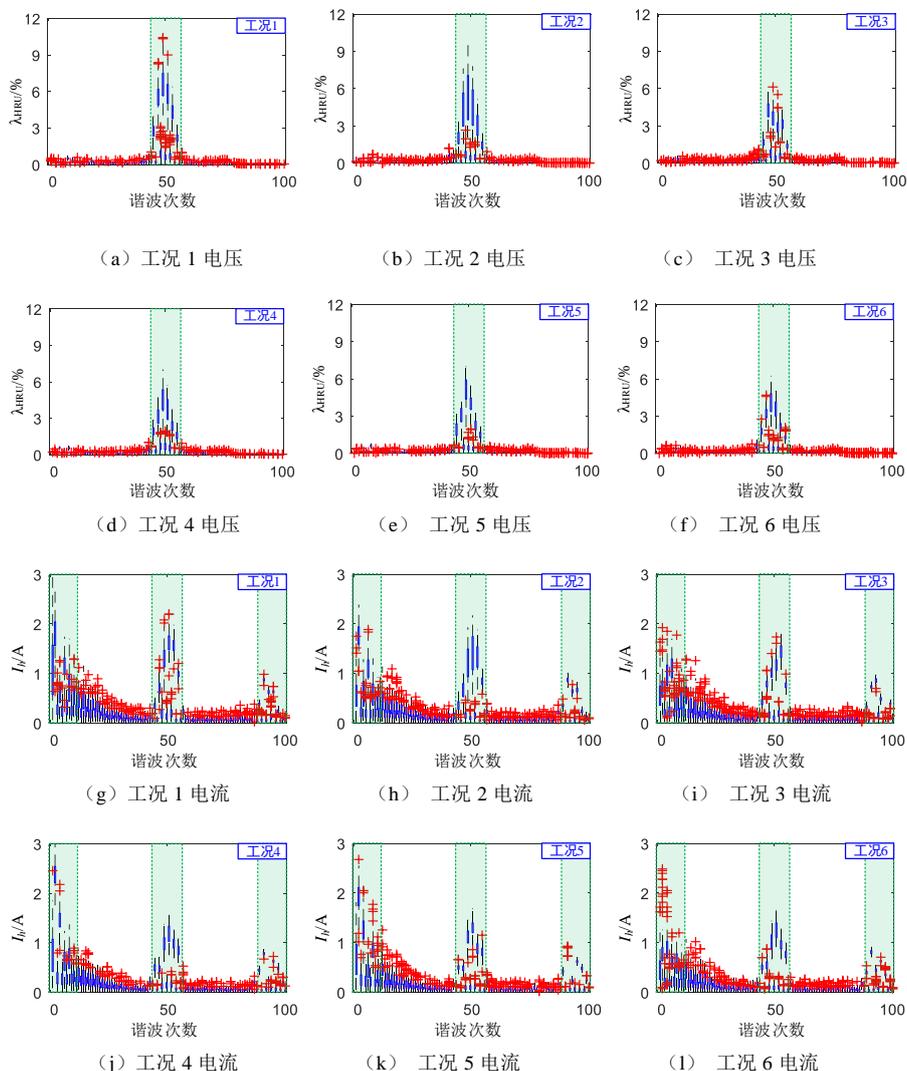
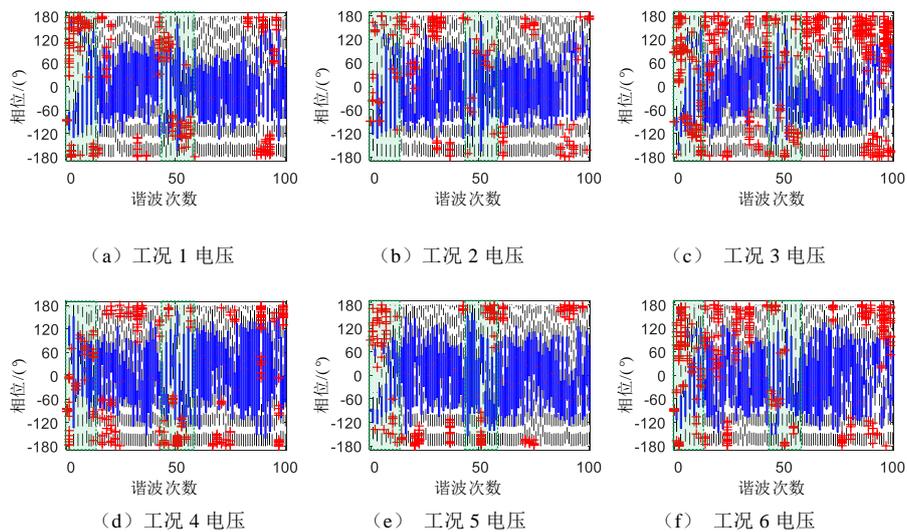


图 A1 谐波幅频特性

Fig.A1 Amplitude-frequency characteristics of harmonics



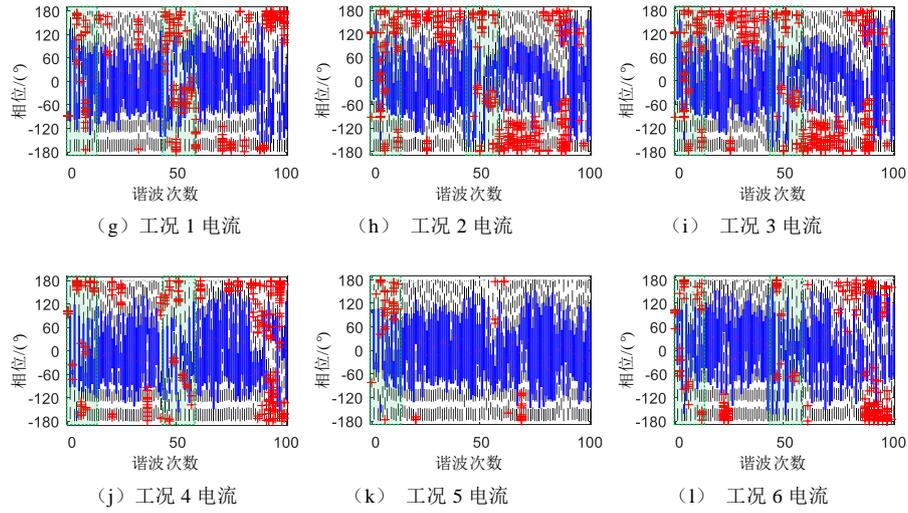
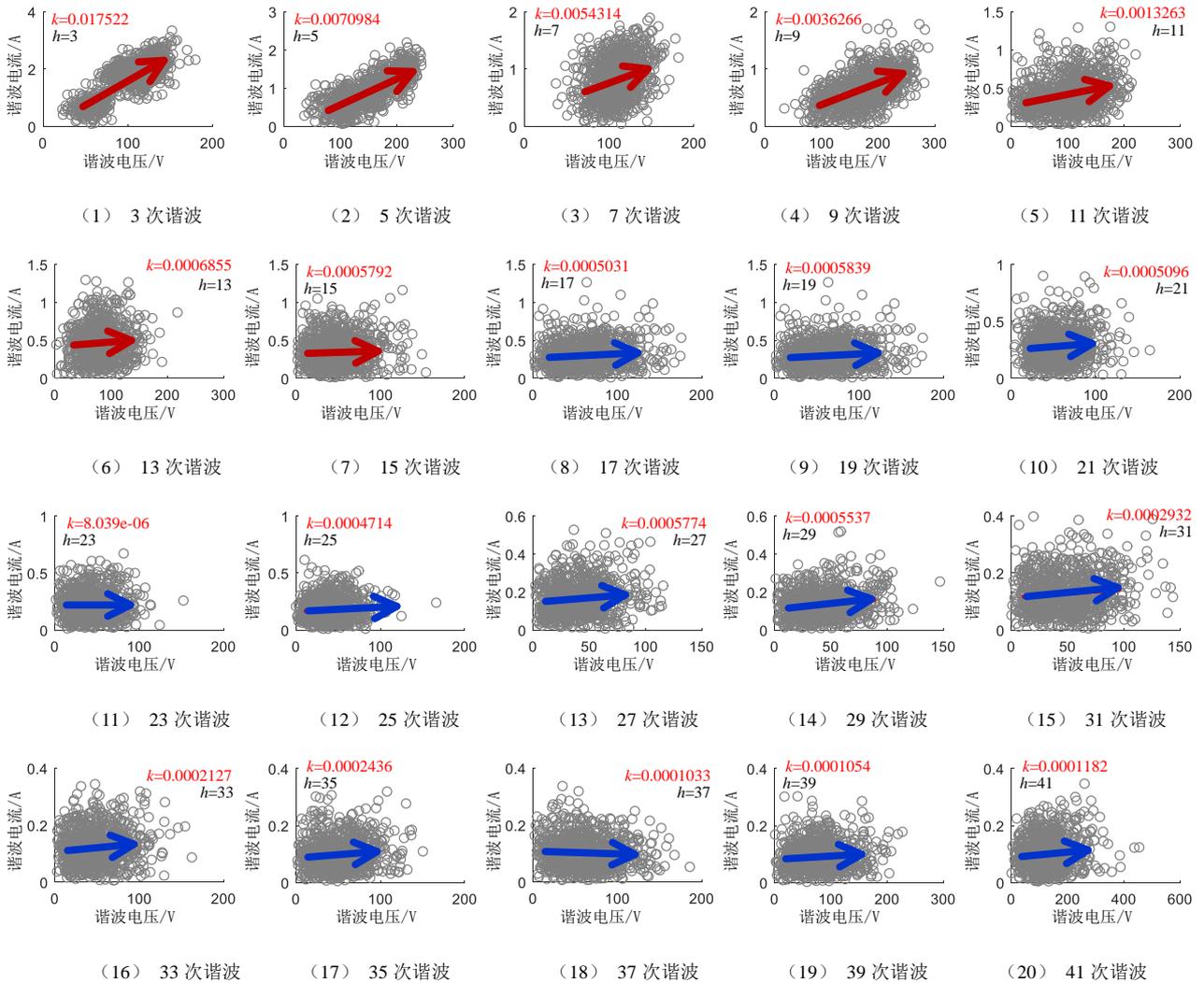


图 A2 谐波相频特性

Fig.A2 Phase-frequency characteristics of harmonics



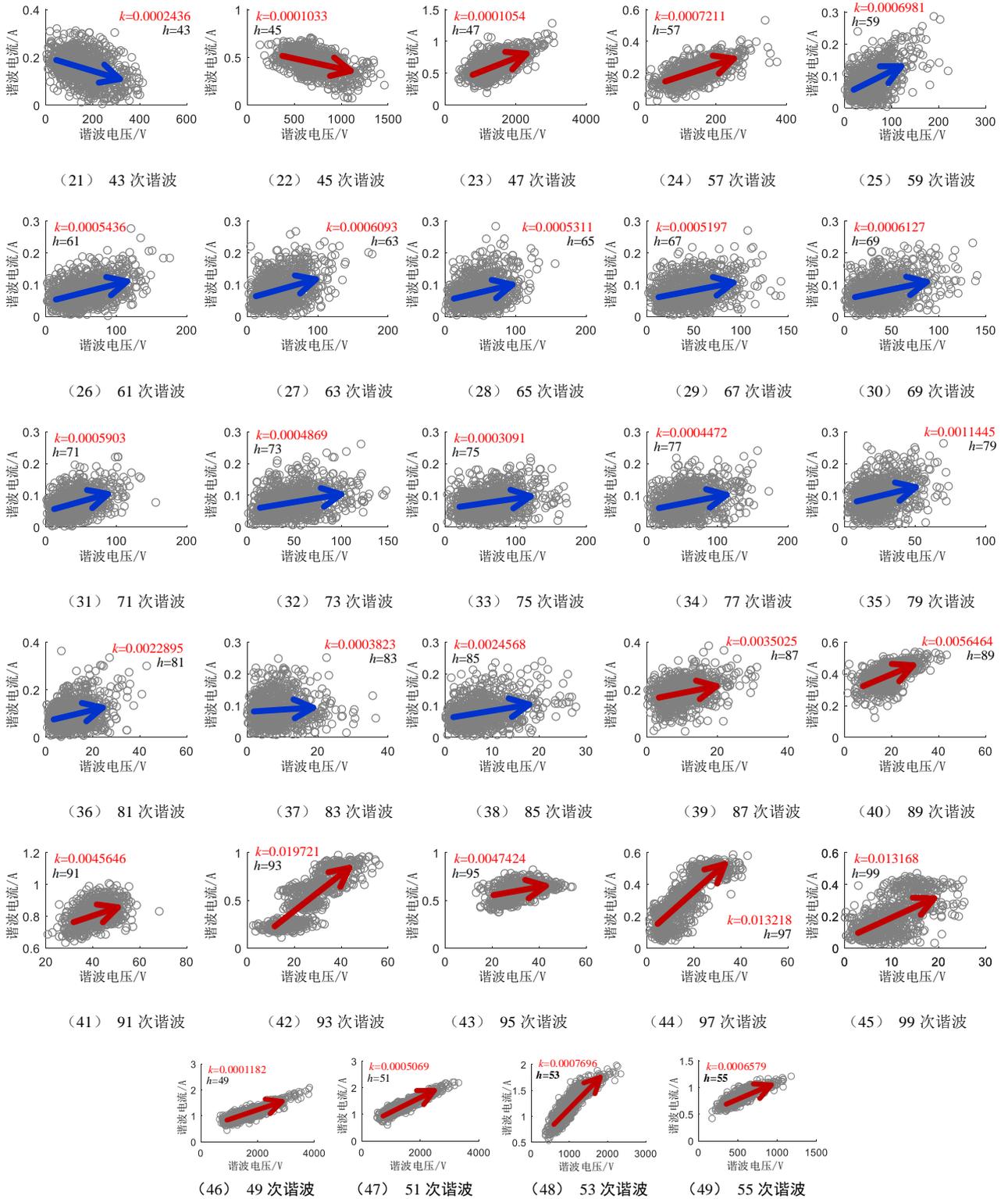


图 A3 谐波电压、谐波电流幅值交互特性

Fig.A3 Amplitude interaction characteristics of harmonic voltage and harmonic current

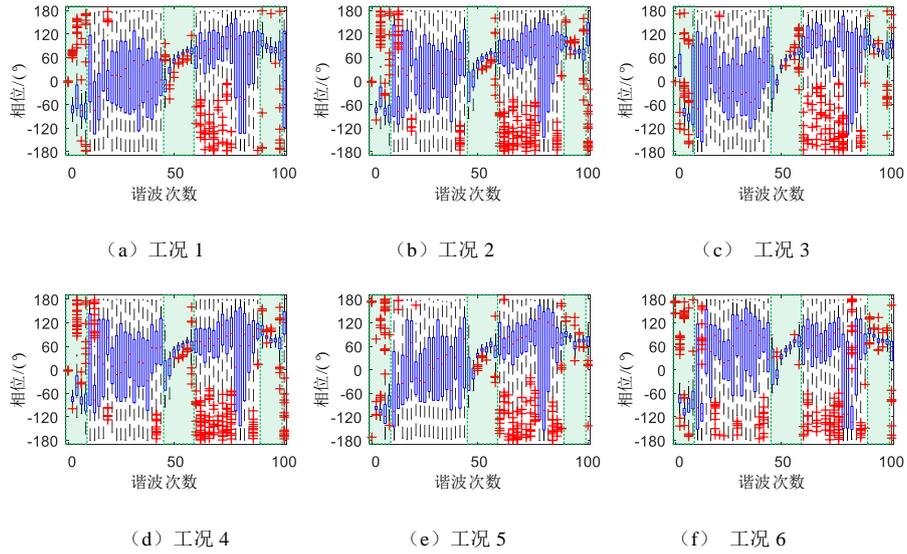


图 A4 谐波电压电流相位交互特性

Fig.A4 Phase interaction characteristics of harmonic voltage and current

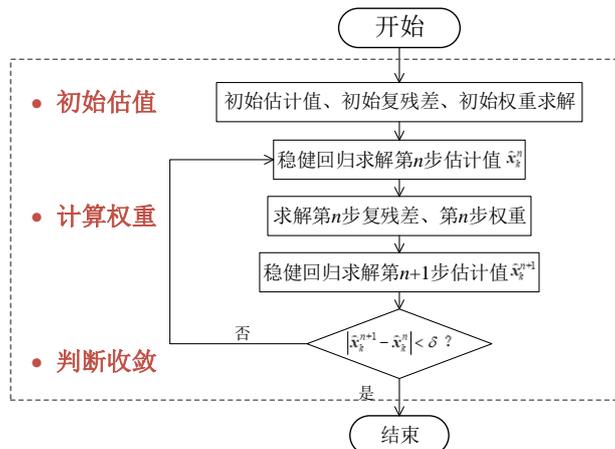


图 A5 模型求解计算流程图

Fig.A5 Flowchart of model solving calculation

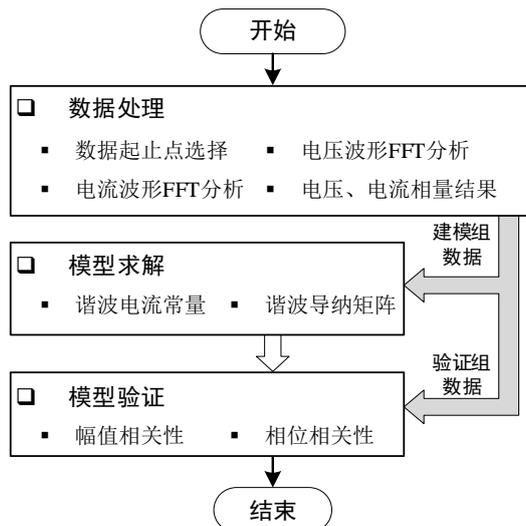
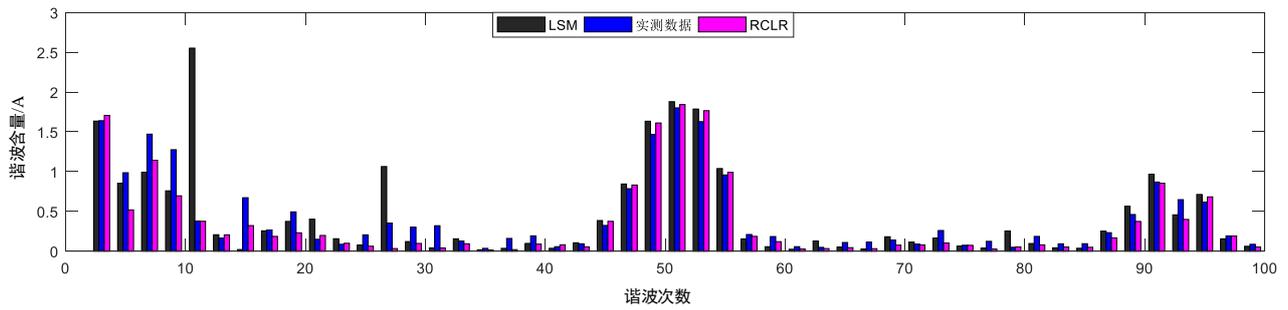
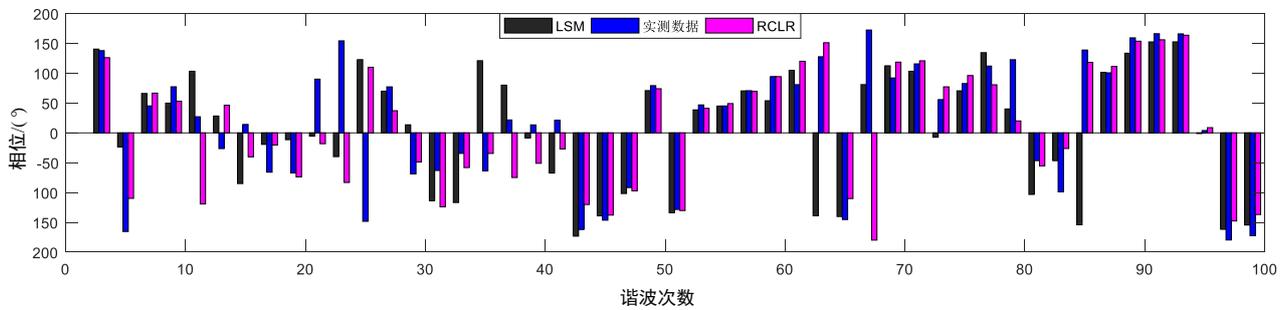


图 A6 谐波建模流程

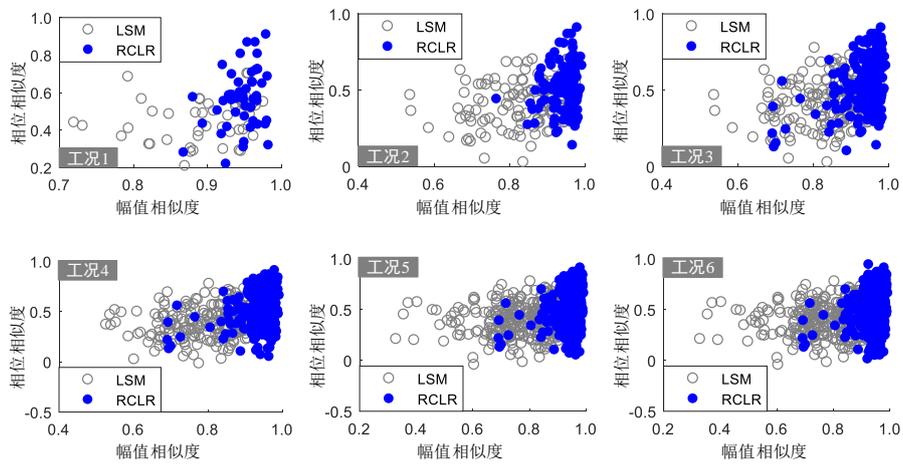
Fig.A6 Flowchart of harmonic modeling



(a) 幅值



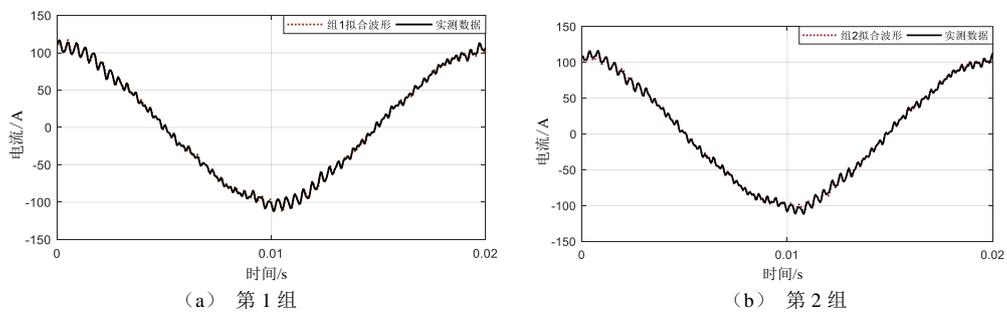
(b) 相位



(c) 相似度分布情况

图 A7 仿真结果对比

Fig.A7 Comparison of simulative results



(a) 第1组

(b) 第2组

图 A8 时域波形对比

Fig.A8 Comparison of timing waveforms

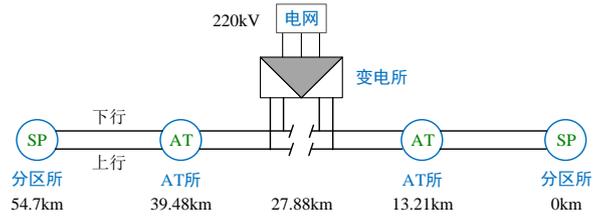


图 A9 牵引供电系统示意图

Fig.A9 Schematic diagram of traction power supply system

表 A1 牵引供电系统电气参数

Table A1 Electrical parameters of traction power supply system

变电所	参数	数值
牵引变电所	电源短路容量/ (GV·A)	7
	牵引变压器额定容量/ (MV·A)	(31.5+31.5) / (20+20) / (20+20)
	额定电压/kV	220/2×27.5-2×27.5
	T 座和 M 座短路电压/%	9.83/10
	T 座和 M 座短路损耗/kW	138.2/83.8
AT 所/分区所	AT 变压器容量/ (MV·A)	16/10
	漏阻抗/Ω	0.1+j0.45