

# 电力系统中谐波源的建模方法

郑连清, 吴萍, 李鹏

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400044)

## Modeling Approaches of Harmonic Sources in Power System

ZHENG Lian-qing, WU Ping, LI Kun

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology  
(Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China)

**ABSTRACT:** Due to the widespread use of nonlinear loads in power system, the analysis on harmonics becomes indispensable, in which it is especially important to build proper models to characterize harmonic sources. In this paper, based on related research results, existing models of harmonic sources are reviewed and the modeling approaches are analyzed and compared. Considering good generalization ability of support vector machine (SVM) in the modeling of nonlinear high dimensional data, a low-voltage uncontrolled rectifier used in power electronic devices is used in the simulation by Matlab to obtain training data and it is modeled by least squares support vector machine (LS-SVM). Test results show that the output harmonic current of this model basically conforms to simulation results. The model built by above-mentioned method possesses high accuracy, and it is verified that LS-SVM is an effective modeling approach for harmonic sources.

**KEY WORDS:** harmonic analysis; model of harmonic sources; neural network; least squares support vector machine (LS-SVM)

**摘要:** 电力系统中非线性负载的广泛使用使得谐波分析必不可少, 其中建立适当的模型来表征谐波源特性尤为重要, 结合相关文献综述了现有的各种谐波源模型, 并对其建模方法进行了分析、比较。考虑到支持向量机在高维数据模型构建中良好的泛化能力, 针对一个低压民用电器整流电路进行 Matlab 仿真获取训练数据, 并用最小二乘支持向量机(least squares support vector machine, LS-SVM)建模。结果表明模型输出谐波电流与实际仿真结果基本一致, 使用上述方法建立的模型精度高, 验证了最小二乘支持向量机是一种有效的谐波源建模方法。

**关键词:** 谐波分析; 谐波源模型; 神经网络; 最小二乘支持向量机

## 0 引言

随着电力电子技术的飞速发展, 各种电力电子

装置在电力系统、工业、交通及家庭中的应用日益广泛, 谐波所造成的危害日趋严重。在对谐波的分析 and 治理过程中, 谐波源模型的建立必不可少。用于建立谐波源模型的基本方法主要有 3 种<sup>[1]</sup>: 1) 建立谐波源的运行参数和端电压之间的函数关系式并进行傅里叶变换求解; 2) 对谐波源运行情况建立分析模型并选择适当的迭代方法求解其电流波形; 3) 通过时域仿真求解谐波源的稳态电流波形。现有的谐波源模型主要有恒流源模型、基于交叉频率导纳矩阵的模型、Norton 等效模型、基于最小二乘法的简化模型。随着谐波源种类的增多和拓扑结构复杂度的提高, 又出现了不考虑谐波源内部机理的神经网络建模方法。本文将评析现有的各种谐波源模型, 并利用最小二乘支持向量机对一个低压民用电器整流电路建立模型, 表征此谐波源的电压-电流特性。

## 1 谐波源模型

### 1.1 谐波源分类

电网中的谐波源可以分为稳态性、动态性和突发性 3 种。稳态性谐波源产生的谐波, 只要电网中的负载不变, 其各次谐波及幅值亦稳定不变。这一类谐波源最典型的是整流器。而动态性谐波源产生的高次谐波量的大小、相角都是随机的, 电力机车与电弧炉就是典型的动态性谐波源。突发性谐波源只在特定情况下产生谐波, 如变压器空载合闸的励磁涌流、投入电容器时的暂态过程即是典型的突发性谐波源。谐波源的特性可统一表述为<sup>[2]</sup>

$$\dot{I}_h = F_h(\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{V}_3, \dots, C), \quad h=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中:  $\dot{I}_h$  为负荷吸收的  $h$  次谐波电流相量;  $\dot{V}_1$ 、 $\dot{V}_2$  等为供电电压中的基波和各次谐波电压相量;  $C$  为

负荷特征参数的集合。理论上一旦给定供电电压波形和负荷特征参数，即可以精确计算出谐波源吸收的各次谐波电流，但在实际工程中由于负荷种类繁多、计算复杂，该模型的使用受到很大限制。因此国内外学者对谐波源的建模方法进行了大量研究，以求建立更精确、简化的模型，达到对谐波状况评估准确、快速的目的。

## 1.2 恒流源模型

电力系统中谐波源产生的谐波电流基本上只决定于它们的工作条件和外加电压，与外电路的阻抗关系不大。因此将这些谐波源看作是内阻抗无穷大的谐波恒电流源，其谐波电流的幅值和相角取决于谐波源设备的典型频谱<sup>[2]</sup>

$$I_n = I_1 \frac{I_{n\text{-spectrum}}}{I_{1\text{-spectrum}}} \quad (2)$$

$$\theta_n = \theta_{n\text{-spectrum}} + n(\theta_1 - \theta_{1\text{-spectrum}}) \quad (3)$$

式中： $I_n$ 、 $\theta_n$ 为  $n$  次谐波电流幅值和相角； $I_{n\text{-spectrum}}$ 、 $\theta_{n\text{-spectrum}}$  为  $n$  次谐波电流典型频谱的幅值和相角，可以通过相关的参考<sup>[3]</sup>或者设备出厂说明书得到。典型频谱的使用使得模型简单方便，但模型计算的谐波电流、相角仅仅是谐波源在典型运行条件下产生的，而没有考虑系统不平衡、变负载、谐波电压畸变等非典型运行情况，这就降低了模型的精度和使用范围。

## 1.3 基于交叉频率导纳矩阵的简化模型

考虑到不同次的谐波电压、电流之间的相互影响，1997年 M.Fauri 提出了基于交叉频率导纳矩阵的谐波源模型<sup>[4]</sup>，假设谐波源的特性在某一运行点处线性化为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \vdots \\ \dot{I}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} & \dot{Y}_{13} & \cdots & \dot{Y}_{1N} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} & \dot{Y}_{23} & \cdots & \dot{Y}_{2N} \\ \dot{Y}_{31} & \dot{Y}_{32} & \dot{Y}_{33} & \cdots & \dot{Y}_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{Y}_{M1} & \dot{Y}_{M2} & \dot{Y}_{M3} & \cdots & \dot{Y}_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_3 \\ \vdots \\ \dot{V}_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： $\dot{I}_M$  为  $M$  次谐波电流相量； $\dot{V}_N$  为  $N$  次谐波电压相量； $\|\mathbf{Y}\|$  即为交叉导纳矩阵。谐波源模型的建立通过 2 步完成，首先将一个纯正弦的电压加在非线性的负荷上，测得负荷的  $k$  次谐波电流  $\dot{I}_k$ ，由式(5)计算得  $\dot{Y}_{k1}$ ，在基波电压不变的基础上，叠加一谐波电压  $\dot{V}_j$ ，经测量得负荷的  $k$  次谐波电流  $\dot{I}'_k$ ，由式(6)可得  $\dot{Y}_{kj}$ 。

$$\dot{Y}_{k1} = \frac{\dot{I}_k}{\dot{V}_1} \quad (5)$$

$$\dot{Y}_{kj} = \frac{\dot{I}'_k - \dot{Y}_{k1}\dot{V}_1}{\dot{V}_j} \quad (6)$$

此模型较多地考虑了谐波源产生谐波的机理，但它是建立在谐波源特性线性化成式(4)的基础上的，而能否线性化在理论上并没有证明；其次在实际工程中往往难以做到仅对负荷施加某次谐波电压且保持恒定不变；最后这个模型的建立仅仅对应于一组特定的谐波电压，交叉导纳矩阵  $\|\mathbf{Y}\|$  并不是一个常数。因此该模型只能在稳态负载并由常数基频电压供电的情况下适用。

## 1.4 Norton 等效模型

传统谐波分析都是把复杂的配电网络当做一个谐波电流源，但当供电系统的运行状态改变时，由配电网络注入系统的谐波电流也可能随之改变，用恒流源模型进行谐波分析可能会产生一定误差，因此 E.Thunberg 于 1999 年建立了 Norton 等效模型<sup>[5]</sup>，其结构如图 1 所示。

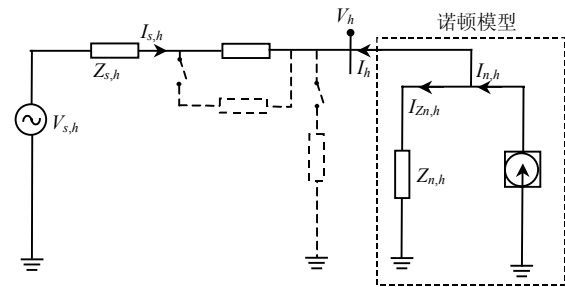


图 1 诺顿等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of Norton

图 1 中  $Z_{n,h}$  是诺顿等效电阻，通过开关的开闭改变供电端运行情况分别测得返回到供电系统的  $h$  次谐波电压  $V_{h1}$ 、 $V_{h2}$  和  $h$  次谐波电流  $I_{h1}$ 、 $I_{h2}$ 。

$$Z_{n,h} = \frac{V_{h1} - V_{h2}}{I_{h2} - I_{h1}} \quad (7)$$

$$I_{n,h} = I_{h1} + \frac{V_{h1}}{Z_{n,h}} \quad (8)$$

利用式(7)(8)即可算得负载产生的  $h$  次谐波电流  $I_{n,h}$ 。此模型通过对供电端运行情况改变前后谐波电流、谐波电压的测量来计算非线性负载产生的谐波电流，并通过在仿真软件 EMTDC 上的测试，证明诺顿等效法比传统的恒流源更加精确。Norton 等效模型不是从谐波源内部机理出发建立的，特别适用于一个对配电网络谐波源具体构成不完全清楚的系统进行建模分析。

## 1.5 简化的谐波源模型

在假设谐波源的特征参数保持不变、供电电压及其吸收的电流均是三相对称的周期函数的情况

下推导出<sup>[6]</sup>: 谐波源的全部特性可由其在供电侧基波电压相角恒定为零, 而基波电压幅值和各次谐波电压幅值、相角变化时的特性所确定。在此基础上利用最小二乘逼近多项式近似表示谐波电流实部和虚部, 最后得到谐波源一般简化模型为

$$\mathbf{I}_h = \mathbf{A}_h \mathbf{C}_h \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{D}_V \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{A}_h = \begin{bmatrix} \cos(h\theta_{u1}) & -\sin(h\theta_{u1}) \\ \sin(h\theta_{u1}) & \cos(h\theta_{u1}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $\theta_{u1}$  为基波电压相角;  $\mathbf{D}_V$  为谐波电压实部和虚部组成的矩阵;  $\mathbf{C}_h$  是由谐波电流最小二乘逼近多项式系数组成的矩阵。对于一个实际的谐波源, 通过测得多组供电电压及其对应的谐波电流, 利用最小二乘法求解矩阵  $\mathbf{C}_h$ , 从而利用式(9)建立模型。通过对几类典型谐波源仿真计算验证所建模型精度较高, 但谐波次数越高, 谐波电流误差越大。

### 1.6 神经网络模型

谐波源模型在谐波分析中起着重要的作用。为了弥补模型的不足、提高谐波分析精度, 一些学者提出了高斯迭代法<sup>[7]</sup>、牛顿迭代法<sup>[8]</sup>, 将前次谐波计算的结果作为后次计算的初值, 循环迭代, 直至满足一定的收敛条件。这些方法的基础是要知道谐波源产生谐波的解析表达式, 而一些解析式的求解很困难。

电力电子装置是目前主要的谐波源, 文献[1, 9-11]针对现在常用电力电子装置的拓扑电路结构建立了基于时间的谐波电流表达式模型, 通过傅里叶分析就可以得到其在交流侧产生的各次谐波电流幅值和相角, 模型精度高但计算时间长, 仅仅对某一特定的拓扑适用, 没有普遍适用性。

本文前面所提模型建立的前提是假设谐波源特征参数  $\mathbf{C}$  保持不变, 当特征参数改变(如负载大小、结构参数发生变化)时, 就必须重新分析建模。

神经网络因其强大的非线性映射能力、自学习等优点成为非线性建模的主要方法之一。它通过对简单非线性函数的复合来完成映射, 在网络受训练时, 不断将网络的输出数据与理想的输出相比较, 并按照学习规则改变权重, 直至网络的输出数据与理想的输出数据之差达到要求的误差范围之内。

基于神经网络的这一特性, 国外学者 M.A.Moreno 和 J.Usaola 做了相关研究, 文献[12]分别将多层感知器反向传播神经网络(multilayer perception with back-propagation, MLP-BP)和径向基

(radial basis function, RBF)神经网络用于脉宽调制电压源逆变(pulse-width modulation voltage-source inverter, VSI-PWM)调速传动系统电路建模中。经过仿真与模型数据对比, 发现 RBF 建立的模型比 MLP-BP 建立的模型精度高、训练步长短, 但 2 个模型的不足之处在于仅适用于平衡系统、供电电压无畸变的运行状态。在此基础上文献[13]考虑整流电路的换流影响以及供电基波电压畸变, 利用 RBF 建立相同谐波源的模型, 并用于谐波潮流计算, 初步估计谐波源在系统中产生的谐波电压畸变; 文献[14]利用 RBF 建立的模型计算非线性负载相应电压值的有功、无功灵敏度, 引入到基波潮流计算的雅可比矩阵中, 显著提高潮流计算的收敛速度; 文献[15]利用广义生长-剪枝径向基函数神经网络(generalized growing and pruning radial basis function, GGAP-RBF)对相同的谐波源建立模型, 尝试更进一步提高模型精度。

神经网络通过对谐波源实际测量或仿真的训练数据建立模型, 可对一些拓扑结构复杂、运行条件变化的谐波源进行分析, 具有训练时间少、精度高、可动态建模等优点, 是谐波源建模的有效方法。

## 2 利用最小二乘支持向量机建模

从现有谐波源建模方法中可以看出, 神经网络具有自适应性, 可以动态建模、精度高。它通过选择适当的隐单元和网络层次, 就能以任意精度逼近非线性函数, 但其优化目标是基于经验的风险最小化, 不能保证网络的泛化能力, 并且网络结构和层数的设计只能依靠经验和先验知识。而支持向量机具有严格的数学基础, 其基于结构风险最小化原则, 保证学习机器具有良好的泛化能力, 可以克服神经网络难以避免的问题, 能有效地解决有限样本条件下的高维数据模型构建问题, 有泛化能力强、收敛到全局最优等优点, 具有很好的应用前景<sup>[16]</sup>。

基于以上原因, 本文利用最小二乘支持向量机对低压民用负荷中常用的电容滤波二极管桥式整流单相负荷<sup>[17]</sup>进行 Matlab 仿真, 获取训练数据从而建立模型。

电路模型如图 2 所示, 当其直流侧接  $20\ \Omega$  的电阻时, 该负荷满载运行, 其缓冲电路由电阻和电容串联组成与二极管平行连接,  $R_1=33\ \Omega$ ,  $C_1=1\ \mu\text{F}$ ,  $R_2=1\ \Omega$ ,  $C=1\ 000\ \mu\text{F}$ 。在满载、供电端电压为  $220\ \text{V}$ 、频率为  $50\ \text{Hz}$  时, 该负荷产生的脉冲电流以及各次谐波含量如图 3 所示, 电流谐波总畸变率(total

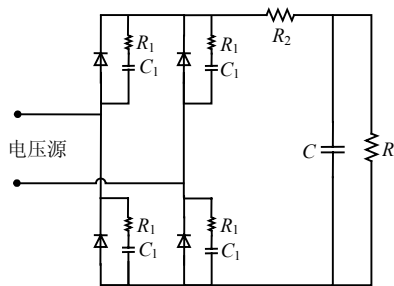
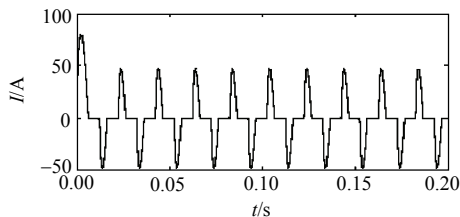
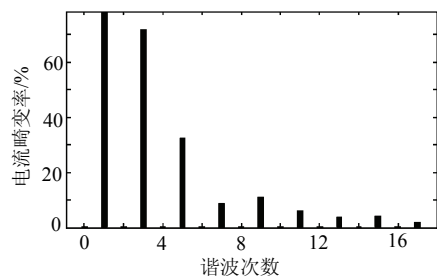


图2 整流电路

Fig. 2 Circuit of rectifier current



(a) 线电流的波形



(b) 频谱分析

图3 满载条件下线电流的波形及频谱分析  
Fig. 3 Waveform and spectrum analysis of current under full load condition

harmonic distortion, THD)达到 79.97%。

在仿真中根据实际情况设定取值范围：供电基波电压  $0.95 < U < 1.1$ 、电容  $0.5 < C < 2$ 、负载  $0.1 < R < 1$ ，模型输入为  $[U \ C \ R]^T$ ，输出为特征谐波电流幅值  $[I_1 \ I_3 \ I_5 \ I_7 \ I_9 \ I_{11} \ I_{13}]^T$ ，在此范围内随机获取 500 组训练数据和 50 组测试数据。支持向量机核函数选用高斯径向基核函数，参数寻优选网格搜索法，在 Matlab 环境下进行训练和测试，训练时间短、模型精度与径向基函数参数和惩罚系数的取值关系很大。表 1 为分别在  $U=1.037$ 、 $C=0.855$ 、 $R=0.355$

表 1 仿真电流与模型电流在 2 种不同运行情况下的对比  
Tab. 1 Comparison of the modeling currents and simulation current in two different conditions

谐波次数	运行条件 1		运行条件 2	
	仿真电流/A	模型电流/A	仿真电流/A	模型电流/A
基波	52.371	52.334 5	24.623	24.580 8
3	23.092	23.022 3	17.681	17.6672
5	5.736	5.691 8	8.072	8.069 3
7	4.692	4.795 6	1.698	1.740 2
9	2.723	2.580 1	2.439	2.395 7
11	1.567	1.708 7	1.379	1.371 1
13	1.474	1.547 1	0.723	0.723 3

和  $U=0.963$ 、 $C=1.325$ 、 $R=0.935 2$  种运行条件下的谐波电流。

由表 1 可以看出，用最小二乘支持向量机建立的谐波源模型测试误差小、精度高。最小二乘支持向量机是一种有效的谐波源建模方法。

### 3 结论

本文综述了现有的谐波源模型，并研究了基于最小二乘支持向量机进行谐波源建模的问题。在该模型中，各次谐波电流的幅值与供电侧基波电压以及负荷特征参数的关系通过最小二乘支持向量机进行非线性映射。通过对低压民用负荷中的电容滤波二极管桥式整流单相负荷电路的谐波源建模研究，验证了最小二乘支持向量机是谐波源建模的一种有效方法。建立的谐波源模型可以有效用于评估电力系统谐波、准确计算系统谐波潮流<sup>[18]</sup>、设计谐波源滤波器<sup>[19]</sup>、分离公共连接点谐波注入电流<sup>[20]</sup>等研究中。考虑到支持向量机的特点，本文下一步工作是将遗传算法引用到参数的自动寻优中，进一步提高模型精度和自适应性。

### 参考文献

- [1] IEEE PES Harmonic Working Group. Characteristics and modeling of harmonic sources-power electronic devices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 791-800.
- [2] Task Force on Harmonic Modeling and Simulation. Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks part1: concepts, models, and simulation techniques[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(1): 452-465.
- [3] IEEE Std 519-1993 IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems[S].
- [4] Fauri M. Harmonic modelling of non-linear load by means of crossed frequency admittance matrix[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(4): 1632-1638.
- [5] Thunberg E, Soder L. A Norton approach to distribution network modeling for harmonic studies[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(1): 272-277.
- [6] 赵勇, 张涛, 李建华, 等. 一种新的谐波源简化模型[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 46-51.  
Zhao Yong, Zhang Tao, Li Jianhua, et al. A new simplified harmonic source model for harmonic analysis and mitigation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 46-51(in Chinese).
- [7] Xu W, Drakos J E, Mansour Y, et al. A three-phase converter model for harmonic analysis of HVDC systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(3): 1724-1731.
- [8] Lima L T G, Semlyen A, Irvani M R. Harmonic domain periodic steady state modeling of power electronics apparatus: SVC and TCSC[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(3): 960-967.
- [9] Carpinelli G, Gagliardi F. Generalized convertor models for iterative harmonic analysis in power systems[J]. IEE Proceeding of Generation

- Transmission Distribution, 141(5): 1994.
- [10] Xu W, Drakos J E, Mansour Y. A three-phase converter model for harmonic analysis of HVDC system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 9(3): 1994.
- [11] Rosa F D, Langella R, Sollazzo A. Waveform distortion caused by high power adjustable speed drives, part I: high computational efficiency models[J]. ETEP, 2003, 13(6): 347-354.
- [12] Moreno M A, Usaola J. Frequency domain methods for analysis of VSI-PWM converters, using neural networks[C]. Proceedings of 8th International Conference Harmon Quality Power, Athens, Greece, 1998.
- [13] Moreno M A, Usaola J. Electronic converter models implemented with radial basis function networks[C]. Proceedings of 10th International Conference Harmon Quality Power, Rio De Janeiro, Brazil, 2002.
- [14] Moreno M A, Usaola J. A new balanced harmonic load flow including nonlinear loads modeled with RBF networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 686-693.
- [15] 占勇, 程浩忠. 基于广义生长-剪枝径向基函数神经网络的谐波源建模[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 42-46.  
Zhan Yong, Cheng Haozhong. Generalized growing and pruning RBF neural network based harmonic source modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 42-46(in Chinese).
- [16] Cristianini N, Shawer-Taylor J. 支持向量机导论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 82-105.
- [17] 李建超. 配电网谐波调查及谐波网损计算[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [18] Sun Y Y, Zhang G B, Xu W, et al. A non-iterative harmonic power flow method for accurate harmonic calculations[C]. Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, Wollongong, Australia, 2008.
- [19] 王群, 姚为正, 刘进军. 谐波源与有源电力滤波器的补偿特性[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 16-20.  
Wang Qun, Yao Weizheng, Liu Jinjun. Harmonic source and compensation characteristics of active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 16-20(in Chinese).
- [20] 赵勇, 沈红, 李建华. 谐波源的识别及其用于非谐波源的分离方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 84-87.  
Zhao Yong, Shen Hong, Li Jianhua. Approach of identification and separation of harmonic sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 84-87(in Chinese).



郑连清

收稿日期: 2009-11-05。

作者简介:

郑连清(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用, E-mail: lqzheng64@tom.com;

吴萍(1984—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用、电力系统谐波分析, E-mail: wupingxiao@163.com。

(责任编辑 王晔)