

基于独立分量分析的谐波检测

季宇, 孙云莲, 李晶

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 长期以来, 谐波治理一直是电能质量控制的重要组成部分, 而准确的检测又是有效治理和分析谐波的前提和基础。将谐波的问题视作盲源分离问题, 并将该领域中广泛使用的独立分量分析法运用到检测算法中。通过构建适当的虚拟观测源, 从观测信号中分离出基波和各次谐波分量。实验结果表明, 该方法在实时性要求不高的情况下可准确检测谐波。

关键词: 谐波检测; 独立分量分析; 盲源分离; 虚拟观测源; 实时性

Harmonic detection based on independent component analysis

Ji Yu, SUN Yun-lian, LI Jing

(School of Electric Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: For a long time, harmonic control has been an important part of power quality control and the accurate detection of harmonic is also the basic condition for the correct analysis. This paper views the problem of harmonic detection as blind source separation(BSS). The independent component analysis(ICA) algorithm is applied in this paper, which is widely used in the filed of BSS. In order to apply ICA algorithm correctly, it is necessary to construct proper number of virtue observed channels. The simulation validates that harmonic can be separated effectively with this method in the circumstances of low demand for the real time.

Key words: harmonic detection; independent component analysis; blind source separation; virtue observe source; real time

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)08-0014-05

0 引言

随着电力系统中非线性负荷的大量投用, 电力系统中的谐波情况也愈发复杂, 不仅存在频率是基频整数次的整数次谐波, 而且存在非整数次谐波成份。这些对电力系统的安全、稳定运行造成了极大的危害。而对谐波间谐波进行有效分析治理的基础便是对其准确的检测。

传统的谐波检测方法大体分为四类。第一类是基于时域坐标变换的瞬时无功法^[1,2], 如 dp0 法、pq 法等。这些方法是将原三相谐波分量转换成新坐标系下的直流量, 再进行检测。这些方法动态响应速度较快, 但拓扑结构复杂。第二类是基于频域下进行谐波分析的 FFT 算法及其改进算法^[3,4]。这类算法一般用于整周期采样, 而对于非整周期采样, 或对非整数次谐波分析则存在频谱泄漏和栅栏效应现象, 影响检测精度。改进算法中应用了加窗及插值的方法, 分别用于克服上述两种现象。此外频率域的检测法还包括小波分析法, 及现代谱估计法^[5-9]。但这些方法需要较复杂的计算, 并且存在频谱混叠、

对噪声敏感的缺点, 因此还要有相关的去混叠及去噪的辅助算法。第三类方法是以数据挖掘技术为基础, 典型的是将神经网络、支持向量机技术^[10-13]应用到谐波检测当中。这类算法多以正交三角函数集作为特征集的基, 将时域信号映射到该域, 并通过训练最终得到谐波的幅值和相位信息。由于这种算法是建立在神经网络或支持向量机的回归算法之上, 故需要大量的训练样本, 计算的实时性较差, 且算法的收敛无法完全保证。第四类是以自适应噪声对消原理为基础的自适应谐波检测法。这类方法目前也已应用到有源滤波器的谐波检测模块中。其优点是滤波器参数自适应, 但其收敛速度和稳定性之间很难平衡, 学习参数也不好确定。

本文将电力系统谐波检测的问题归于盲源分离问题 BSS (Blind Source Separation), 从而将目前该领域广泛使用的独立分量分析法 (ICA) 应用到谐波检测。不同于一般的盲源分离问题, 我们对于谐波干扰的先验知识 (如频率和相位) 是有一定了解, 因此这种盲源分离问题处理起来要简单。实验结果表明, 基于 ICA 的谐波检测法精

度较好, 同时也可应用到间谐波的检测中。

1 独立分量分析法

1.1 独立分量分析原理

ICA 是一种新的盲源分离技术, 其定义是: 在对源信号未知的情况下, 将多个观测信号按照统计独立原则通过优化算法分解为若干独立分量, 以获得对源信号的估计。ICA 算法可描述为: X_1, X_2, \dots, X_n 为 n 个观测信号, 由 m 个未知原信号 S_1, S_2, \dots, S_m 线性组合而成 ($n \geq m$), 用矩阵形式表示为 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$, $\mathbf{S} = [s_1, s_2, s_3, \dots, s_m]$, \mathbf{A} 为 $n \times m$ 的混合矩阵^[14], 即:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} \quad (1)$$

图 1 显示了 \mathbf{X} 与 \mathbf{S} 的线性组合关系

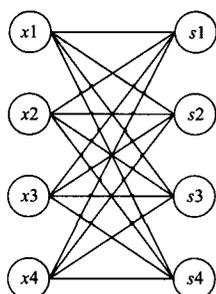


图 1 ICA 线性组合模型

Fig.1 Linear model of ICA

ICA 的任务是 \mathbf{S} 及混合矩阵 \mathbf{A} 未知的条件下, 从观测信号 \mathbf{X} 中恢复出原信号 \mathbf{S} 。一般 ICA 的约束条件是各个原信号 S_i 相互独立, 且最多只有一个服从高斯分布。令分离矩阵为 $m \times n$ 的矩阵 \mathbf{W} , 则原信号 \mathbf{S} 的估计 \mathbf{Y} 由式(2)得出:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{B}\mathbf{Z} \quad (2)$$

式中: \mathbf{B} 为球形化阵; \mathbf{U} 为正交系统; 白化使得 $E\{\mathbf{z}(t)\mathbf{z}^T(t)\} = \mathbf{I}_N$, 即要求 $\mathbf{z}(t)$ 中的各分量正交归一。

1.2 FastICA 算法处理步骤

独立分量分析的关键问题是建立一个能够读两分离结果独立性的目标函数及其相应的分离算法。本文采用由芬兰学者 Hyvarinen 等提出的基于固定点算法的 FastICA 方法, 该方法采用牛顿迭代法, 使得收敛更有保证, 且收敛速度较快。其框图如图 2。

本文中采用 FastICA 算法时的迭代公式为:

$$u_i(k+1) = E\{z[u_i^T(k)z]\} - E\{f[u_i^T(k)z]u_i(k)\} \quad (3)$$

式中令 $f(x) = \tan(a_1 x)$, $1 \leq a_1 \leq 2$, 处理步骤为^[15]

- (1) 把原始数据 x 去均值, 再球形化, 得 z ;
- (2) 设 m 为待提取独立分量的数目, 令 $p=1$;

- (3) 任意取 $u_p(0)$, 但要求 $\|u_p(0)\|_2 = 1$;

- (4) 迭代:

$$u_p(k+1) = E\{z[u_p^T(k)z]\} - E\{f[u_p^T(k)z]u_p(k)\};$$

- (5) 正交化: $u_p(k+1) - \sum_{j=1}^{p-1} u_p(k+1)u_j^T u_j \rightarrow u_p(k+1)$;

- (6) 归一化: $\frac{u_p(k+1)}{\|u_p(k+1)\|_2} \rightarrow u_p(k+1)$;

- (7) 如 u_p 未收敛, 回到步骤 (4);

- (8) 令 p 加 1, 如 $p \leq m$, 则回到步骤 (3), 否则计算结束。

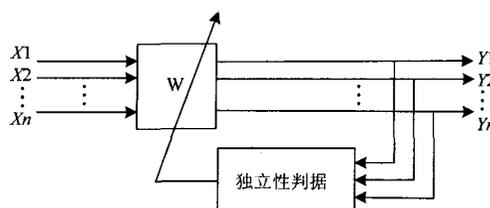


图 2 FastICA 算法框图

Fig.2 Scheme of the FastICA algorithm

1.3 ICA 在谐波检测中的具体应用

在 ICA 算法模型中要求观测通道数 m 不少于独立源的个数 n , 而谐波检测时只有一路观测通道 (三相电流或电压观测量相关, 故只能取一路)。因此, 要应用 ICA 方法还需要构造至少 $n-1$ 路虚拟观测信号 $x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$ 。这样可得到如下 $n-1$ 个扩充的方程。

$$\begin{cases} x_2 = a_{21}s_1 + a_{22}s_2 + \dots + a_{2n}s_n \\ x_3 = a_{31}s_1 + a_{32}s_2 + \dots + a_{3n}s_n \\ x_4 = a_{41}s_1 + a_{42}s_2 + \dots + a_{4n}s_n \\ \vdots \\ x_n = a_{n1}s_1 + a_{n2}s_2 + \dots + a_{nm}s_n \end{cases} \quad (4)$$

式中: s_n 的基本表达式为

$$s_n = A_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (5)$$

一般情况下, 谐波的频率可以通过简单的谱分析获得, 但幅值和相位通常是未知的。如果有同步测量的谐波干扰源信号, 那么相位幅值估计问题就

相对比较简单, 否则就比较复杂。为此我们将源 S_n 的表达式作如下变换:

$$s_n = A_n \sin(nwt + \theta_n) = A_n \sin(nwt) \cos(\theta_n) + A_n \cos(nwt) \sin(\theta_n) = B_n \sin(nwt) + C_n \cos(nwt) = S_{n1} + S_{n2} \quad (6)$$

其中: $\theta_n = \arctan(C_n / B_n)$, $A_n = \sqrt{B_n^2 + C_n^2}$, 这样就将原来的相位和幅值估计转化为对 S_{n1} 和 S_{n2} 的估计。但与此同时, 也增加了 $n-1$ 个独立源, 这样就必须再构造 $n-1$ 个观测源以满足 ICA 运算前提。当存在随机噪声时需加入噪声虚拟信号, 这样可将噪声信号单独分离出来。

2 模拟仿真

2.1 无噪声环境下的谐波检测

通过 Matlab 模拟一个含有 3, 5 次谐波的待检测信号及 4 路虚拟通道信号:

$$\begin{aligned} x_1 &= \sin wt + 0.6\sin(3wt + \pi/3) + 0.4\sin(5wt + \pi/6) = \\ & \sin wt + 0.3\sin 3wt + 0.52\cos 3wt + 0.35\sin 5wt + \\ & 0.2\cos 5wt \\ x_2 &= \sin 3wt \\ x_3 &= \cos 3wt \\ x_4 &= \sin 5wt \\ x_5 &= \cos 5wt \end{aligned} \quad (7)$$

进行 ICA 分析, 得到混合矩阵 A 和解混矩阵 W 如下:

$$A = \begin{pmatrix} -0.3301 & -0.5005 & -0.2864 & -0.9809 & -0.2100 \\ 0.0024 & -0.0033 & -0.9743 & 0.0039 & -0.0015 \\ 0.0050 & -0.9674 & 0.0099 & 0.0030 & -0.0002 \\ -0.9775 & -0.0025 & 0.0026 & 0.0021 & -0.0100 \\ 0.0025 & -0.0024 & 0.0025 & 0.0032 & -1.0000 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$W = \begin{pmatrix} -0.0022 & -0.0020 & 0.0038 & -1.0222 & 0.0107 \\ -0.0032 & -0.0095 & -1.0320 & -0.0042 & 0.0009 \\ -0.0040 & -1.0251 & 0.0056 & -0.0012 & 0.0024 \\ -1.0153 & 0.3052 & 0.5228 & 0.3468 & 0.2092 \\ -0.0032 & -0.0015 & 0.0042 & -0.0014 & -0.9993 \end{pmatrix} \quad (9)$$

混合信号波形如下:

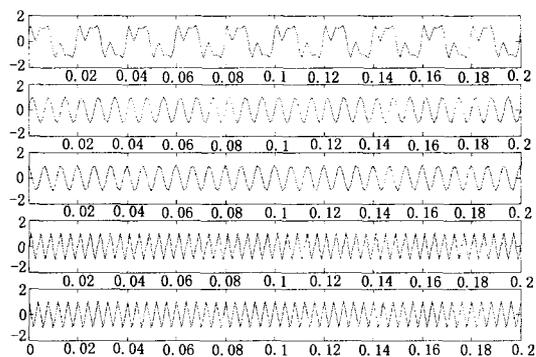


图3 5路观测信号 (含4路虚拟信号)
Fig.3 Five observed signals

将混合信号进行去均值及球化处理, 最后用 FastICA 算法对球化信号进行分离。由于 ICA 分解的不确定性故需对分解信号作误差分析, 这可通过将分离信号还原成混合信号, 并与实际观测信号作比较, 当误差较大时重复进行 ICA 处理, 直至符合误差要求。实验中得到的最终分离信号如图 4 所示。

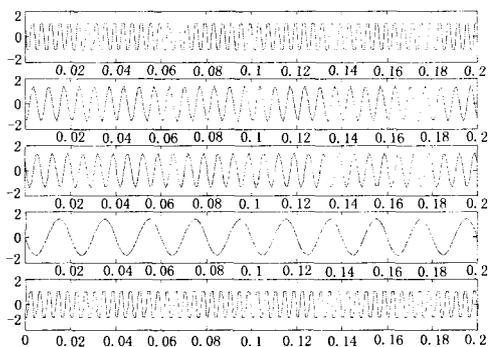


图4 分离信号

Fig.4 Final separated signals

2.2 噪声环境下的谐波检测

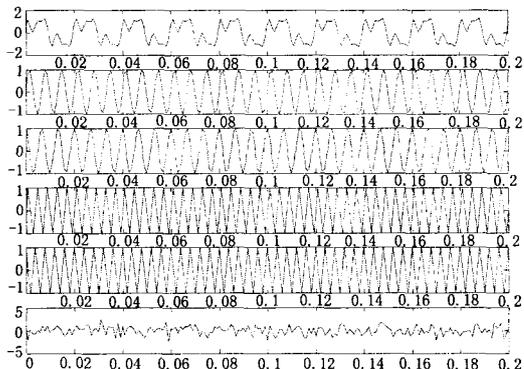


图5 含噪谐波信号

Fig.5 Harmonic signals with noise

为分析 ICA 算法的抗噪性能, 在原观测信号的

基础上加入随机噪声, 并相应构造一个噪声独立源以便将噪声信号分离出来。(原始观测信号的信噪比为 15 dB)

加入噪声后的混合信号波形如图 5。

经 FastICA 算法分离得到的独立源信号波形如图 6。

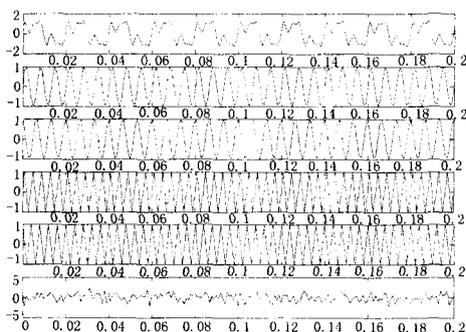


图 6 含噪分离信号

Fig.6 Final separated signals

2.3 间谐波的检测测试

间谐波是频率为基波非整数倍的谐波, 主要是由电力系统中的各种波动负荷 (如电弧炉) 和电力电子变频装置产生。现构造一路含间谐波及高斯噪声的观测信号及 4 路虚拟观测信号如下 (信噪比 15 dB):

$$x_1 = \sin \omega t + 0.6 \sin(0.5 \omega t + \pi/3) +$$

$$0.4 \sin(1.3 \omega t + \pi/5) + e(t)$$

$$x_2 = \sin(0.5 \omega t)$$

$$x_3 = \cos(0.5 \omega t)$$

$$x_4 = \sin(1.3 \omega t)$$

$$x_5 = \cos(1.3 \omega t)$$

$$x_6 = e(t)$$

混合信号及用 FastICA 方法得到的各个独立信号波形如图 7、8。

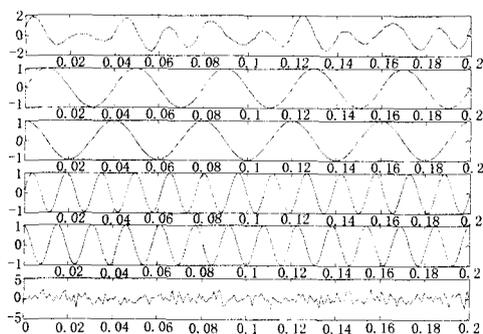


图 7 含噪间谐波信号

Fig.7 Interharmonic signals with noise

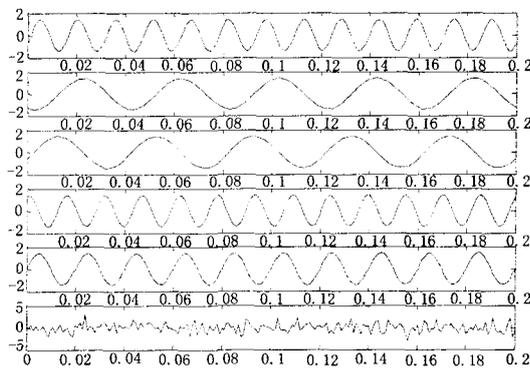


图 8 间谐波分离信号

Fig.8 Separated interharmonic signals

2.4 讨论

在 ICA 算法中, 分离出的估计信号与源信号没有固定的对应关系, 因此还需要结合波形及混合矩阵 A 进行识别。表 1 为三个测试实验中的具体对应关系。

表 1 独立源信号与分离信号的对应关系

Tab.1 The relation between source and separated signals

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	Y4	Y3	Y2	Y1	Y5	-
2	Y5	Y3	Y1	Y4	Y2	Y6
3	Y5	Y3	Y2	Y1	Y4	Y6

混合矩阵 A 的部分元素为负表明对应的波形反相, 这可从 ICA 分离出的各独立源估计量波形中看出。

对三组实验分离出的信号作误差分析, 结果见表 2。

表 2 谐波检测误差分析

Tab.2 Error analysis of harmonic detection

SNR	谐波次数	幅值	幅值误差	相位	相位误差
-	3	0.576 6	3.9%	1.105 1	5.53%
-	5	0.391 2	2.2%	0.566 6	8.21%
15 dB	3	0.554 7	7.6%	1.625 2	55.2%
15 dB	5	0.383 5	4.1%	0.732 6	40%
15 dB	0.5	0.553 5	7.8%	1.523 4	45%
15 dB	1.3	0.395 3	1.2%	0.853 2	36%

通过表 2 可以看出, 在混有高斯噪声的条件下本算法对幅值的估计仍有较高精度但相位估计存在较大误差。同时实验 3 的结果也说明独立分量法对间谐波的检测同样有效。

由于虚拟观测量的建立是以先验知识为基础的, 因此准确构建虚拟观测量 (建立适当的个数) 是能否使用 ICA 方法分析谐波的前提。本文中为讨论方便仅模拟了含有 3 次及 5 次谐波的情况, 实际

的谐波要复杂的多。为此,可以使用 FFT 方法从频域上大致的估出主要谐波的个数,再据此构建虚拟观测测量。实际上文献中在神经元个数的确定也是跟据这种方式确定的。

3 结束语

本文将谐波检测问题视作盲源分离问题,并运用目前该领域流行的独立分量分析法进行分析。但由于谐波分析中的观测源只有一路,故需构建虚拟观测测量,以满足 ICA 运算条件。通过实验表明该算法可以较准确地对所含谐波的幅值和频率进行估计。在混有高斯噪声的条件下也有较好的抗噪效果。同时,本算法可以用于目前被广泛关注的间谐波的检测。但应该指出的是 ICA 算法本身属于迭代算法,其计算延时不能满足实时性要求,因此一般可用于谐波分析,而不适于谐波的实时检测。

参考文献

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 王兆安, 李民, 卓放. 三相电路瞬时无功理论的研究[J]. 电工技术学报, 1992, (3): 55-59.
WANG Zhao-an, LI Min, ZHUO Fang. A Study on the Theory of Instantaneous Reactive Power of Three-Phase Circuits[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1992, (3): 55-59(in Chinese).
- [3] 薛惠, 杨仁刚. 基于 FFT 的高精度谐波检测算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 106-110.
XUE Hui, YANG Ren-gang. Precise Algorithms for Harmonic Analysis based on FFT Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 106-110(in Chinese).
- [4] 张伏生, 耿中行, 葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 63-66.
ZHANG Fu-sheng, GENG Zhong-xing, GE Yao-zhong. FFT Algorithm with High Accuracy for Harmonic Analysis in Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 63-66(in Chinese).
- [5] 马秉伟, 周莉, 刁均伟. 基于现代谱估计的间谐波的检测[J]. 继电器, 2005, 2(3): 25-27.
- [6] 薛惠, 杨仁刚. 利用 Morlet 连续小波变换实现非整数次谐波的检测[J]. 电网技术, 2002, 12(12): 41-44.
XUE Hui, YANG Ren-gang. Morlet Wavelet based Detection of Non-integer Harmonics[J]. Power System Technology, 2002, 12(12): 41-44.
- [7] 薛惠, 杨仁刚. 基于连续小波变换的非整数次谐波测量方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(5): 49-53.
XUE Hui, YANG Ren-gang. A Novel Method for Non-integer Harmonics Measurement using Continuous Wavelet Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(5): 49-53.
- [8] 王波, 杨洪耕. 基于 AR 谱估计和插值 FFT 的间谐波检测方法[J]. 继电器, 2006, 34(4): 49-52.
WANG Bo, YANG Hong-geng. A Method for Interharmonic Measurement based on AR Model Spectral Estimation and Interpolation FFT algorithm[J]. Relay, 2006, 34(4): 49-52(in Chinese).
- [9] 石敏, 吴国正, 伊为民. 基于多信号分类法和普罗尼法的间谐波参数估计[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 81-84.
SHI Min, WU Guo-zheng, YI Wei-min. Inter-harmonic Parameter Estimation based on Multi-signal Classification and Prony Method[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 81-84(in Chinese).
- [10] 向东阳, 王公宝. 基于 FFT 和神经网络的非整数次谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 35-39.
XIANG Dong-yang, WANG Gong-bao, MA Wei-ming, et al. A New Method for Non-integer Harmonics Measurement based on FFT Algorithm and Neural Network[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 35-39(in Chinese).
- [11] 柴旭崢, 文习山, 关根志, 等. 一种高精度的电力系统谐波分析算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 67-70.
CHAI Xu-zheng, WEN Xi-shan, GUAN Gen-zhi, et al. An Algorithm with High Accuracy for Analysis of Power System Harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 67-70(in Chinese).
- [12] 危初勇, 李志勇. 基于人工神经网络的电力系统谐波测量方法[J]. 电网技术, 1999, 23(12): 20-23.
WEI Ren-yong, LI Zhi-yong. Measurement of Harmonics in Power System based on Artificial Neural Network[J]. Power System Technology, 1999, 23(12): 20-23(in Chinese).
- [13] 占勇, 丁屹峰. 电力系统谐波分析的稳健支持向量机方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 43-47.
ZHAN Yong, DING Yi-feng. A Robust Support Vector Algorithm for Harmonics Analysis of Electric Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 43-47(in Chinese).
- [14] Hyvarinen A. Fast and Robust Fixed-point Algorithms for Independent Component Analysis[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1999, 10(3): 626-634.
- [15] 杨福生. 独立分量分析的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

收稿日期: 2008-05-30; 修回日期: 2008-08-01

作者简介:

李 宇 (1982-), 男, 博士, 研究方向为现代信号处理技术在电力系统中的应用; E-mail: anxiso@sina.com

孙云莲 (1963-), 女, 教授, 博导, 研究方向为现代信号处理及其工程应用;

李 晶 (1980-), 女, 硕士, 助理工程师, 从事电气设计工作。