

文献引用格式: 杜鹏, 姜楠, 宋波. 超声换能器频率特性及匹配研究[J]. 电声技术 2016 40(1): 41–45.

DU Peng, JIANG Nan, SONG Bo. Study on frequency characteristics and matching of ultrasonic transducer[J]. Audio Engineering 2016 40(1): 41–45.

中图分类号: TN929 文献标志码: A DOI: 10.16311/j.audioe.2016.01.09

超声换能器频率特性及匹配研究

杜鹏, 姜楠, 宋波

(电子科技大学 电子科学技术研究院, 四川 成都 611731)

摘要: 超声换能器是一种强非线性时变系统, 在不同的工作频率下其阻抗等特性差别很大。在超声换能器的应用中需要对超声换能器进行频率特性分析及阻抗匹配, 以达到最高的传输效率和最佳的波形效果。详细分析了超声换能器的频率特性及匹配方式, 并对超声换能器参数进行了测试。根据测试参数设计了阻抗匹配电路。理论分析和实验测试表明, 良好的频率及阻抗匹配电路有利于优化超声波发射波形, 提高电声转化效率。

关键词: 超声换能器; 频率特性; 谐振; 匹配电路

Study on frequency characteristics and matching of ultrasonic transducer

DU Peng, JIANG Nan, SONG Bo

(Research institute electronic science and technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: A ultrasonic transducer is a strong nonlinear, time-varying system. When working in different frequency, ultrasonic transducer's impedance and other characteristics vary. In order to obtain maximum transmission efficiency and best wave quality, the analysis and matching of ultrasonic transducer are essential. It is analyzed that the ultrasonic transducer's frequency characteristic and matching method in detail, and ultrasonic transducer's parameters are tested. An impedance matching circuit is designed according the test results. The theoretical analysis and experimental tests show that good frequency and impedance matching circuit is conducive to optimizing the transmitted waveform, improving efficiency.

Key words: ultrasonic transducer; frequency characteristic; resonance; matching circuit

超声波换能器(又称超声波传感器)是一种将电信号与超声信号相互转换的器件, 在非接触式测量、加工等领域应用广泛^[1]。超声波换能器应用很广泛, 许多应用都已经很相对成熟, 但是, 对于某些应用还存在诸多关键理论和关键技术有待突破, 如信号处理、换能器制作以及功率放大等方面的理论与技术。在超声波的发射应用中, 为了增大超声波的发射功率与发射效率, 通常选用放大效率更高的 D 类或 T 类功放^[2]。D 类或 T 类功放相较于 A 类、AB 类功放的放大效率得到了极大的提升, 但是存在着较大的总谐波失真(THD)。减小 D 类、T 类功放的 THD 对超声波发射系统具有及其重要的现实意义。同时, 超声换能器是一种强非线性时变系统, 在不同的工作频率下阻抗等特性差别很大。因此, 在超声波应用中需要对超声换能器进行频率特性分析及阻抗匹配, 以达到最

高的传输效率。

本文详细分析了超声换能器的频率特性及匹配方式, 并对超声换能器参数进行了测试。根据测试参数设计了 D 类功放驱动下超声换能器的阻抗匹配电路。理论分析和实验测试表明, 良好的频率及阻抗匹配电路有利于优化超声波发射波形, 提高电声转化效率。

1 超声换能器电学模型

当超声波换能器以远低于内部固有谐振频率工作时, 换能器的电学特性相当于一个电容器, 称为静态电容 C_0 。 C_0 主要决定于传感器材料的几何尺寸和电极面积, 近似为常数。当超声波换能器在内部固有谐振频率附近工作时, 换能器具有很强的非线性和时变性, 微小的频率改变会导致换能器阻抗特性的较大

的变化。由此可见超声波换能器除了静态电容外还存在一个动态支路。通常压电陶瓷超声波换能器可以等效为一个静态电容 C_0 与动态电阻 R_m 、动态电容 C_m 和动态电感 L_m 串联电路相并联的等效电路模型^[3] 如图 1 所示。

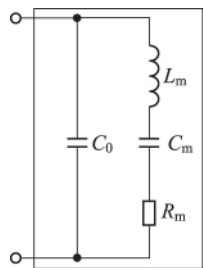


图 1 超声波换能器等效电路

根据图 1 工作频率为 f 时, 超声波换能器等效导纳 $Y(\omega)$ 可以表示为

$$Y(\omega) = j\omega C_0 + \frac{1}{j\omega L_m + \frac{1}{j\omega C_m} + R_m} \quad (1)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 。

计算式 (1), 可得超声波换能器等效阻抗

$$Z(\omega) = \frac{R_m C_m^2}{E\omega^4 + F\omega^2 + D^2} + j \frac{A\omega^4 + B\omega^2 + D}{E\omega^5 + F\omega^3 + D^2\omega} \quad (2)$$

式中: $B = L_m C_m^2 + 2L_m C_0 C_m - C_0 C_m^2 R_m^2$; $A = -L_m^2 C_0 C_m^2$; $D = -(C_m + C_0)$; $E = L_m^2 C_0^2 C_m^2$; $F = C_0^2 C_m^2 R_m^2 - 2L_m C_0 C_m^2 - 2L_m C_0^2 C_m$ 。

由式 (2) 可得超声波换能器等效阻抗

$$X(\omega) = \frac{A\omega^4 + B\omega^2 + D}{E\omega^5 + F\omega^3 + D^2\omega} \quad (3)$$

当 $X(\omega) > 0$ 时, 超声波换能器工作在感性区域;
当 $X(\omega) < 0$ 时, 超声波换能器工作在容性区域; 当 $X(\omega) = 0$ 时, 超声波换能器等效为纯电阻。

令式 (3) 为 0 则有

$$\omega^2 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AD}}{2A} \quad (4)$$

由于 $A < 0$ $D < 0$ 则当 $B > 0$ 时, 存在两个不同的 ω^2 使式 (4) 成立。可见, 超声波换能器存在两个不同的谐振频率, 分别为串联谐振和并联谐振^[4]。

当超声波换能器工作在串联谐振时, 其等效电路相当于静态电容 C_0 与动态电阻 R_m 并联, 如图 2 所示。

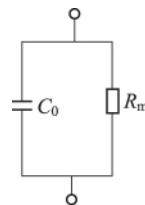


图 2 串联谐振时的等效电路

此时超声波换能器等效阻抗为

$$Z(\omega) = \frac{R_m}{1 + j2\pi f_s R_m C_0} \quad (5)$$

当超声波换能器工作在并联谐振时, 串联电路与静态电容 C_0 构成并联谐振, 谐振频率为

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_m C_m}} \sqrt{1 + \frac{C_m}{C_0}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C_m}{C_0}} \quad (6)$$

假设超声波换能器的驱动电压为 U_i , 则超声波换能器的发射功率为

$$P(\omega) = \frac{U_i^2}{Z(\omega)} \quad (7)$$

取 $C_0 = 1.695 \text{ nF}$ $R_m = 1853.6 \Omega$ $C_m = 0.1 \text{ nF}$ $L_m = 150 \text{ mH}$ $U_i = 10 \text{ V}$, 根据式 (6), 计算得到 $f_s = 41.094 \text{ kHz}$ $f_p = 42.288 \text{ kHz}$ 。将参数值代入式 (2) 和式 (7), 用 Matlab 分别绘制阻抗—频率关系图和功率—频率关系图, 如图 3、图 4 所示。

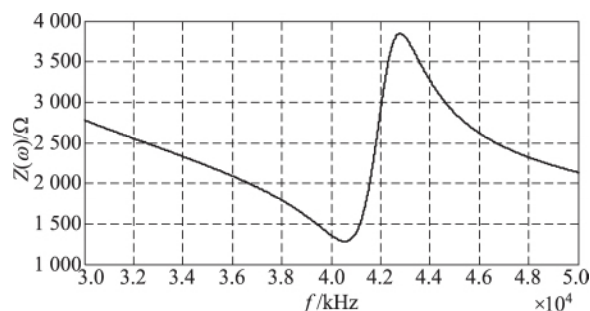


图 3 超声波换能器等效阻抗—频率关系图

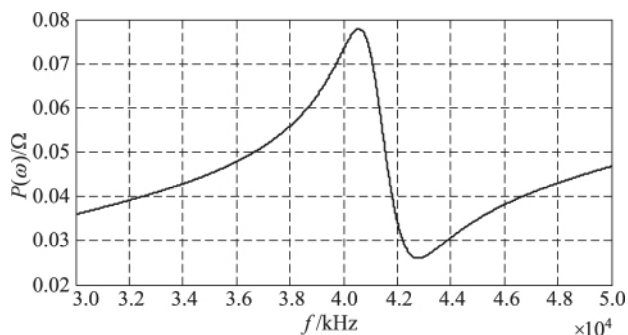


图 4 超声波换能器功率—频率关系图

从图3中可以看到,超声波换能器等效阻抗随着频率的增大经历减小—增大—减小的过程,呈现出明显的非线性特征。当频率在 f_s 与 f_p 之间变化时,超声波换能器等效阻抗随频率变化的特性尤为明显。当频率为 f_s 附近时,等效阻抗最小;当频率为 f_p 时等效阻抗最大。从图4中可以看到,当使用恒定电压驱动超声波换能器时,其功率也随着频率发生非线性变化,尤其是在 f_s 与 f_p 之间非线性变化尤为明显。当频率为 f_s 时,功率最大;当频率为 f_p 时,功率最小。

2 超声波换能器频率特性测试

为了进一步分析超声波换能器的等效电路模型及其频率特性,采用如图5所示的实验对其频率特性进行测试。

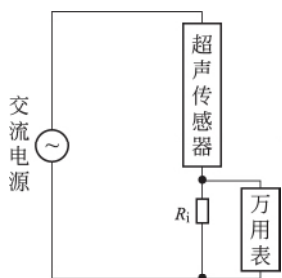


图5 超声波换能器频率测试方法示意图

交流信号源采用 RIGOL 的 DG3101A 函数信号发生器;万用表采用 RIGOL 的 DM3061 六位半数字万用表;测试换能器采用金瓷 NU40A18TR;串联电阻 $R_i = 98.166 \Omega$;测试频率范围为 $30 \sim 47 \text{ kHz}$;测试电压为峰—峰值 5 V 交流信号。测试结果见表1。

表1 测试结果

| 频率/kHz | R_i 电压/mV | 频率/kHz | R_i 电压/mV |
|--------|-------------|--------|-------------|
| 30.0 | 63.034 | 38.0 | 118.069 |
| 31.0 | 65.548 | 38.3 | 127.454 |
| 32.0 | 68.224 | 39.0 | 162.509 |
| 33.0 | 71.505 | 39.3 | 176.025 |
| 34.0 | 75.725 | 40.0 | 82.335 |
| 34.3 | 77.298 | 41.0 | 38.133 |
| 35.3 | 83.377 | 42.0 | 54.788 |
| 36.0 | 88.825 | 44.0 | 73.644 |
| 36.3 | 91.696 | 45.0 | 79.905 |
| 37.3 | 104.059 | 47.0 | 90.144 |

根据实验数据,分别计算、绘制出超声波换能器电压 V_s 、阻抗 Z_s 以及功率 P_s 随频率 f 的变化关系图,

分别如图6~8所示。

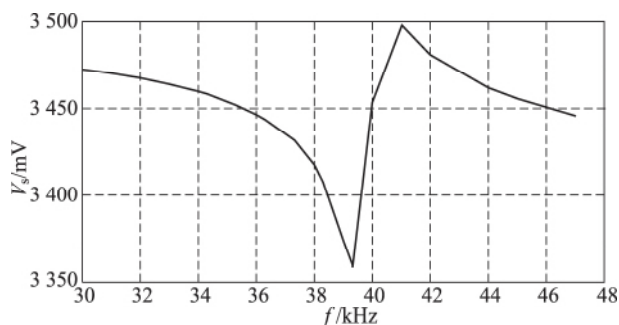


图6 超声波换能器电压随频率变化关系图

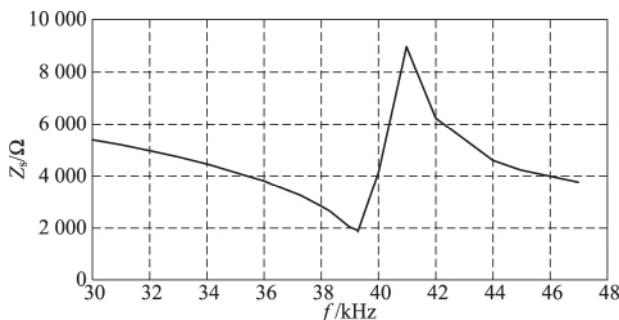


图7 超声波换能器阻抗随频率变化关系图

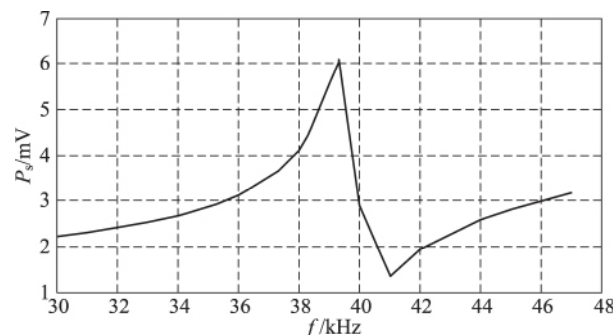


图8 超声波换能器功率随频率变化关系图

从图6和图7可以看出,随着频率 f 的增加,超声波换能器的电压 V_s 和超声波换能器的阻抗 Z_s 都经历减小—增大—减小的过程。当 f 为 39.3 kHz 时, Z_s 最小,此时超声波换能器发生串联谐振;当 f 为 41 kHz 时, Z_s 最大,此时超声波换能器发生并联谐振。从图6和图7中还可以得到,当超声波换能器工作在谐振频率附近,尤其当频率在串联谐振频率 f_s 和并联频率 f_p 之间时,小范围的频率变化将引起超声波换能器阻抗的较大改变,不同的工作频率下,阻抗特性差别很大。图8与图4相似,超声波功率也随着频率发生非线性变化,尤其是在 f_s 与 f_p 之间非线性变化尤为明显。当超声波换能器工作在串联谐振频率时,功率最

大;当工作在并联谐振频率时,功率最小。因此,在使用这种压电式超声波换能器时尽量使工作频率在串联谐振附近。为了避免频率的小范围变化引起等效阻抗较大的变化,最好使其工作频带在串联谐振频率之前。

3 超声波换能器阻抗匹配

当超声波换能器工作在谐振频率附近时,频率的小范围的变化将引起超声波换能器阻抗的较大的改变,不同的工作频率下,阻抗特性差别很大。在超声波系统中,如果超声波换能器的工作频率在一定的频带范围内变化,由于选用的超声波换能器的频率特性,必然会引入额外的谐波失真^[5]。因此,为了保证超声波系统具有较好的电声转换效果,需要对超声波换能器进行阻抗匹配。

压电振子在振动过程中,常使用机电耦合系数来表征机械能和电能相互转化的程度^[6],即

$$K_{eff}^2 = \frac{f_p^2 - f_s^2}{f_p^2} \quad (8)$$

通常,对超声波换能器的匹配主要是增大其并联谐振频率 f_p 与串联谐振频率 f_s 间的频率差,即增大有效机电耦合系数 K_{eff} 。常用的超声波换能器匹配方式主要有:1) 串联电容匹配;2) 并联电容匹配;3) 串联电感匹配;4) 并联电感匹配等^[7]。

串联电容主要对超声波换能器的串联谐振频率 f_s 产生影响, f_s 变大,而并联谐振频率 f_p 基本不变,所以经过串联电容匹配后 f_p 与 f_s 间频率差变小,效机电耦合系数 K_{eff} 变小。使用并联电容匹配时 f_s 基本不变, f_p 变小,因此匹配后 f_p 与 f_s 间频率差变小,效机电耦合系数 K_{eff} 变小。串联电感会使得超声波换能器的串联谐振频率 f_s 变小,从而增大 f_p 与 f_s 间频率差,使得有效机电耦合系数 K_{eff} 变大。使用并联电感匹配时,并联谐振频率 f_p 增大, f_p 与 f_s 间频率差增大, K_{eff} 增大。无论是串联还是并联电感匹配,有效机电耦合系数 K_{eff} 都增大,因此在超声波换能器阻抗匹配中,采用串联或者并联电感匹配是一个不错的选择。

根据以上的分析,选用串联电感匹配的方式将超声波换能器在串联谐振频率出进行匹配,匹配电路如图9(c)所示,匹配后的等效阻抗为

$$Z(\omega) = \frac{R_m}{1 + j\omega R_m C_0} + j\omega L \quad (9)$$

整理式(9),得到:

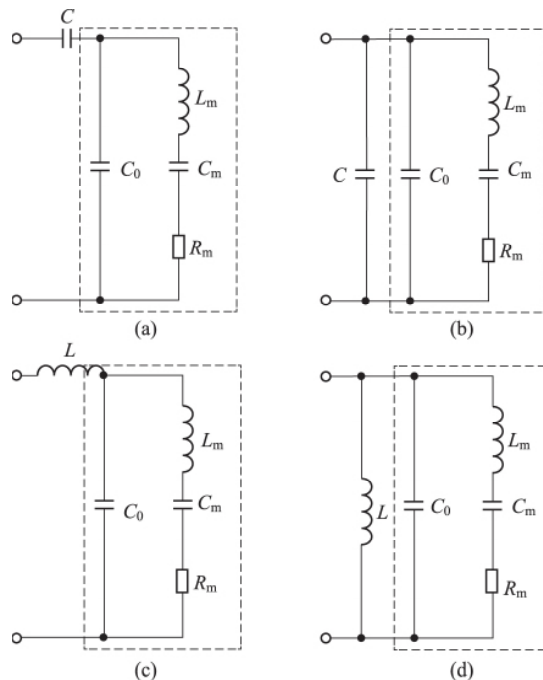


图9 常用的超声波换能器匹配方式

$$Z(\omega) = \frac{R_m}{1 + (\omega R_m C_0)^2} + j\left(\omega L - \frac{\omega R_m^2 C_0}{1 + (\omega R_m C_0)^2}\right) \quad (10)$$

因此,等效电抗为

$$X(\omega) = \omega L - \frac{\omega R_m^2 C_0}{1 + (\omega R_m C_0)^2} \quad (11)$$

可以计算匹配电感为

$$L = \frac{R_m^2 C_0}{1 + (\omega R_m C_0)^2} \quad (12)$$

计算式(12),将得到的匹配电感值代入式(10),使用 Matlab 绘制串联电感匹配后等效阻抗随频率变化关系图,如图10所示。从图中可以看出,串联电感匹配后,串联谐振频率点变小,串联谐振时,等效阻抗也减小很多。

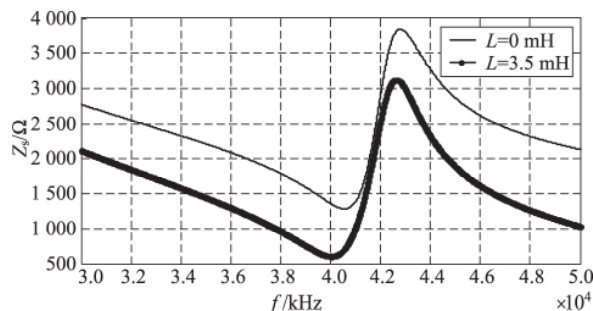


图10 串联电感匹配等效阻抗随频率变化图

4 阻抗匹配实验验证

为了进一步分析验证超声波换能器阻抗匹配

特性,本文对阻抗匹配进行了实验验证。实验所采用的换能器与前面频率特性测试中使用的换能器型号相同,使用D类功放接变压器驱动,为了验证匹配效果,驱动变压器选择功率较小的中周变压器。用示波器分别观察在串联谐振频率处超声波换能器匹配前后的波形,分别如图11和图12所示。

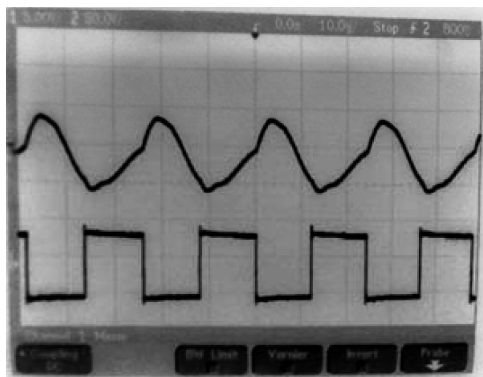


图11 未接匹配时超声波换能器两端波形(截图)

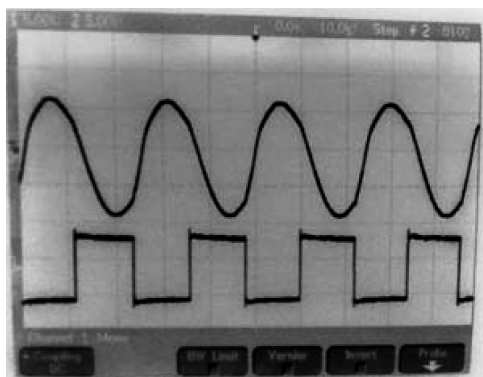


图12 接入匹配电感时超声波换能器两端波形(截图)

由图11可以看出,当未接入匹配电感时,由于超声波换能器的静态电容的存在,当驱动能力较弱时,驱动波形会出现严重的失真现象,这样增加了系统的总谐波失真。当接入匹配电感时,如图12所示,驱动波形得到了很好地优化,近似为正弦波。

按照前面频率特性测试方法对匹配后的超声波换能器进行测试,绘制接入匹配电感后的等效阻抗随着频率的变化关系图,如图13所示。从图中可以看出,匹配后,串联谐振频率点相对于原谐振点减小了,在串联谐振频率处的阻抗也小很多。

5 结束语

本文超声波换能器的驱动匹配电路入手,详细分析了超声波换能器的频率特性及匹配方式,并对超声换能器参数进行了测试,根据测试参数设计

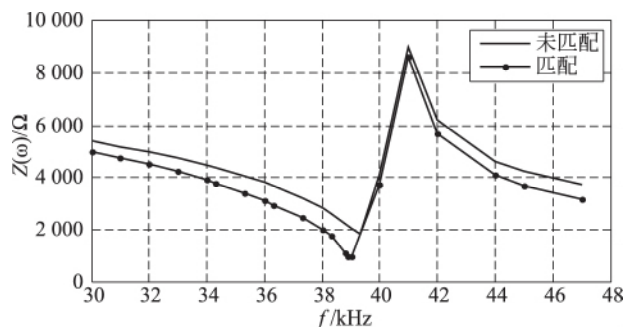


图13 匹配前后等效阻抗随频率变化图

了阻抗匹配电路。理论分析和实验测试表明,良好的频率及阻抗匹配电路有利于优化超声波发射波形,提高转换效率。如果超声波系统工作在单一的固定频率点,则工作频率为串联谐振频率时可以得到最佳的功率与转换效率。如果超声波系统的工作频率为具有一定带宽的多个频率,为了减小THD,应将工作频带移至串联谐振频率之前。

根据本文的理论分析及实验测试可知,匹配电路对于优化发射驱动波形、增大发射功率、减小THD等方面都有显著效果,但是对于陶瓷压电式超声波换能器,不管是匹配前还是匹配后,频率变化时换能器的阻抗非线性特性都非常显著,尤其是当频率在串联谐振频率和并联谐振频率之间时,阻抗的非线性特性尤为明显。由此可见,陶瓷压电式超声波换能器仅适合用于单一频率工作,而对于具有一定工作频带的多频率超声波应用则不太适合,这种情况下需要寻找一种新型材料的超声波换能器。

参考文献:

- [1] 童敏明,唐守峰,董海波. 传感器原理与应用技术[M]. 北京:清华大学出版社,2012.
- [2] ROJAS-GONZALEZ M A, SANCHEZ-SINENCIO E. Low-power high-efficiency class D audio power amplifiers[J]. Journal of Analog Integrated Circuits and Power Electronics, 2009(12): 3272-3284.
- [3] WU L, CHURE M C, CHEN Y C, et al. Electrode size and dimensional ratio effect on the resonant characteristics of piezoelectric ceramic disk[J].
- [4] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 上海:科学出版社,2004.
- [5] 姜丽峰,徐利梅,李学生,等. 声频定向系统阻抗匹配网络Q值对THD的影响[J]. 压电与声光, 2012, 34(5): 797-800.
- [6] 方俊鑫,陆栋. 固体物理学[M]. 上海:科学技术出版社,1981.
- [7] 林书玉. 匹配电路对压电陶瓷超声换能器振动性能的影响[J]. 压电与声光, 1995, 17(3): 27-30.

责任编辑:李薇

收稿日期:2015-07-13