

单稳系统的脉冲响应研究

冷永刚 赵跃

Pulse response of a monostable system

Leng Yong-Gang Zhao Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 210503 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.210503

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.210503>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电感电流伪连续导电模式下 Buck 变换器的动力学建模与分析

Dynamical modeling and analysis of buck converter operating in pseudo-continuous conduction mode

物理学报.2015, 64(18): 180501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.180501>

基于有源广义忆阻的无感混沌电路研究

Inductorless chaotic circuit based on active generalized memristors

物理学报.2015, 64(17): 170503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.170503>

混沌信号的压缩感知去噪

Chaotic signal denoising in a compressed sensing perspective

物理学报.2015, 64(16): 160502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.160502>

基于数模混合的混沌映射实现

Chaotic map implementation based on digital-analog hybrid method

物理学报.2015, 64(16): 160501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.160501>

基于对偶数理论的资料同化新方法

A new data assimilation method based on dual-number theory

物理学报.2015, 64(13): 130502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.130502>

单稳系统的脉冲响应研究*

冷永刚¹⁾²⁾ 赵跃^{1)†}

1) (天津大学机械工程学院, 天津 300072)

2) (天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室, 天津 300072)

(2015年4月10日收到; 2015年6月11日收到修改稿)

针对单稳系统检测脉冲信号参数调节方法很难达到理想随机共振效果的难点, 本文提出了脉冲序列整体平移的方法. 该方法不采用系统参数调节, 而是通过偏移量的设置来实现并达到增强单稳随机共振的目的. 为了减小单稳脉冲响应波形的失真, 探讨了该方法减小脉冲响应失真的机理. 在噪声存在的情况下, 揭示了该平移方法调节噪声使噪声产生积极作用从而改善单稳随机共振的机理, 表明所提方法有利于含噪脉冲信号的检测.

关键词: 单稳系统, 脉冲信号, 噪声

PACS: 05.45.-a, 05.40.-a, 02.60.Cb

DOI: 10.7498/aps.64.210503

1 引言

自从 Benzi 等^[1] 在研究古气象冰川问题提出随机共振理论以来, 随机共振技术在信号处理方面的研究受到了广泛的关注. 随机共振信号分析与处理中的主要特征是噪声的积极作用. 随机共振发生时, 一部分噪声能量转移到信号身上, 使原本微弱的信号大大增强, 并产生类似力学中人们熟知的共振输出, 从而达到识别弱信号的目的^[2-5].

随机共振常用的非线性系统是双稳(态)非线性系统, 双稳随机共振的特征信号的增强检测包括周期信号和非周期信号的检测^[6-13]. 在针对工程上存在的周期性冲击或脉冲这类信号的双稳随机共振检测方面, 张莹等^[14] 研究了双稳随机共振信号恢复的金属切削脉冲信号的检测方法, 给出了双稳随机共振检测工程脉冲信号的一个实例. Lopes 等^[15] 利用随机共振加上模块化结构增强了神经元响应的正弦信号和脉冲信号的检测效果. Duan 等^[16] 对比分析了双稳系统与线性匹配滤波器对脉冲信号的检测效果, 认为双稳系统的脉冲信号检测

效率更高, 稳健性更好. 胡芑庆^[17] 研究了双稳系统的结构参数对冲击信号检测的影响, 并提出了微弱周期信号的检测算法. 谭继勇等^[18] 以加权峭度指标为评价标准, 为冲击信号的有效检测提供了一种方法.

上述这些关于脉冲信号的双稳随机共振检测研究, 实际上只是利用了双稳特性中的单阱振荡特性, 即利用单稳随机共振^[19,20] 现象来实现脉冲信号的检测. 单稳随机共振与双稳随机共振具有不同的特性, 双稳随机共振模型存在一个势垒和两个稳定点势阱, 粒子在系统中要实现脉冲信号的共振检测, 则需要选择势垒两边势阱中的一个进行单阱振荡. 而单稳随机共振模型不存在势垒, 且仅有唯一稳定点的单一势阱, 粒子在系统中只能进行单阱振荡. 虽然双稳随机共振和单稳随机共振的脉冲信号检测都在单一势阱中进行, 但由于势函数的不同, 其检测效果必然存在差异, 单稳系统的随机共振脉冲信号检测更值得研究. 针对单稳随机共振的脉冲信号检测, 李继猛等^[21] 在文献^[18] 基础上, 研究了单稳系统随机共振的冲击信号检测, 利用粒子群算法对单稳系统中的参数进行优化, 以期实现冲击信

* 国家自然科学基金(批准号: 51275336)和天津市应用基础与前沿技术研究计划(批准号: 15JCZDJC32200)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: carrot2000@tju.edu.cn

号的自适应检测. Yao等^[22]研究了加性与乘性噪声共同作用下,单稳系统对方波信号检测的随机共振现象.方秀宁等^[23]利用参数较小的单稳系统具有积分放大特征,提高了单稳系统对周期脉冲信号的检测性能.

上述单稳随机共振脉冲信号的研究,主要集中在研究调节单稳系统结构参数并使其达到随机共振状态实现脉冲信号增强检测.然而这种参数调节的随机共振实现方法存在参数增减方向不易判断和参数范围很难确定的问题.如果这一问题能够解决,系统参数开始就能够沿着正确的方向以及在一个确定的范围内进行调节,那么单稳脉冲信号检测更有利于工程应用.

本文以单稳(态)系统为研究对象,针对其存在共振参数难以选择的问题,提出脉冲序列整体平移的方法来实现和增强单稳随机共振,从而有效地检测脉冲信号.该方法在不改变系统参数条件下,即不考虑系统参数的调节,就能够通过偏移量小范围的调节来实现单稳随机共振.本文重点研究了脉冲序列整体平移方法减小单稳脉冲响应波形失真的机理,并阐述了该方法增强单稳随机共振以及提高含噪脉冲信号检测效果的机理.

2 单稳系统

单稳系统可通过调节双稳系统的结构参数而得到.双稳系统通常由一个对称性双稳势函数 $U(x) = -\frac{a}{2}x^2 + \frac{b}{4}x^4$ 表示,其中 a 和 b 是大于零的实系数,称为系统结构参数.该系统存在两个稳定平衡点 ($x = \pm\sqrt{a/b}$) 和一个不稳定平衡点 ($x = 0$),从而形成被中部势垒分隔开的两势阱,中间势垒高度 $\Delta U = a^2/(4b)$,如图1所示.若减小双稳系统结构参数 a 值,则双稳系统的势垒降低.当 $a = 0$ 时,势垒完全消失,系统转化为单稳系统,相应的双稳势函数转化为单稳势函数

$$P(x) = \frac{1}{4}bx^4. \tag{1}$$

在外界激励作用驱动下,单稳系统的动力学方程可表示为

$$\frac{dx}{dt} = -bx^3 + s(t) + n(t), \tag{2}$$

其中 $s(t)$ 表示驱动信号, $n(t)$ 表示噪声,且满足 $E[n(t)] = 0$, $E[n(t)n(t + \tau)] = 0$. 当外界驱动为零时,由定态方程 $\frac{dx}{dt} = 0$ 可以得到单稳系统只

有一个定态解 $x = 0$,该定态解是稳定解,表明单稳系统只有一个吸引域,粒子在单稳系统中的振荡被限制在一个势阱中来回运动.

由图1单稳势函数曲线 ($a = 0$) 特征容易看出,在 $x = 0$ 的吸引域附近,函数曲线非常平坦,其变化率非常小.为便于分析,不失一般性,本文仅研究 $b = 1$ 的情况,即不考虑系统参数改变的情况.当 $|x| \leq 0.2$ 时,单稳系统势函数 $P(x)$ 的斜率 $|k_{P(x)}| \leq 0.008$,单稳势函数斜率 $k_{P(x)}$ 达到 10^{-3} 数量级,因此可近似有 $k_{P(x)} \approx 0$. 这表明,单稳系统定态解 $x = 0$ 的附近几乎是一条长距离的平行于 x 轴的水平线,当粒子在这一定态解附近振荡时,由于定态解 $x = 0$ 的附近曲线几乎是水平线,因此粒子并不易被定态解 $x = 0$ 点很快吸引,而是处于一种慢速的长距离“滑行”状态.这一点与双稳系统两个稳定解吸引粒子的振荡情况不完全相同,双稳系统由于势垒的存在,其两个吸引域附近很难形成像单稳系统势阱那样长距离缓变的水平线,粒子在双稳势阱内的运动速度要相对快一些.

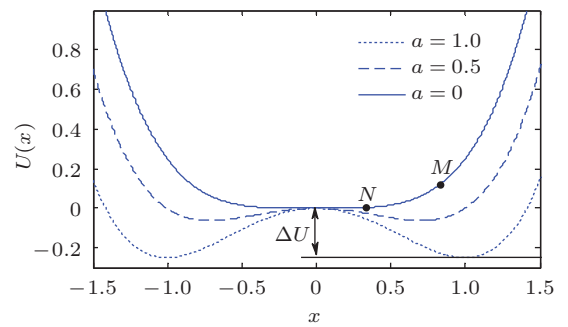


图1 双稳系统转化为单稳系统的势函数变化, $b = 1$
Fig. 1. The change of potential function that bistable system converts to mono-stable system. System parameter $b = 1$.

3 单稳系统的脉冲响应

3.1 脉冲信号模型

设单个高斯脉冲信号 $w(t)$ 表示为

$$w(t) = A e^{-\frac{3(t-t_0)^2}{\tau^2}}, \tag{3}$$

其中 A 为信号的峰值高度, τ 为信号的半峰宽(即信号高度在 $A/2$ 时,信号的宽度), t_0 表示信号的峰值时间.取一组参数: $A = 0.6$, $\tau = 1$, $t_0 = 5$,这组参数所形成的单个脉冲信号如图2所示.信号关于 $t = t_0$ 对称,当 $t \rightarrow \infty$ 时其值趋于零,定义 $t \rightarrow \infty$ 的脉冲信号位置为脉冲信号的平衡位置.取这样的脉

冲信号构成一串间隔周期为 $T = 200$ 的周期脉冲串序列, 如图 3 所示, 图中幅值函数 $s(t)$ 表示周期脉冲串信号, 其零值为信号的平衡位置.

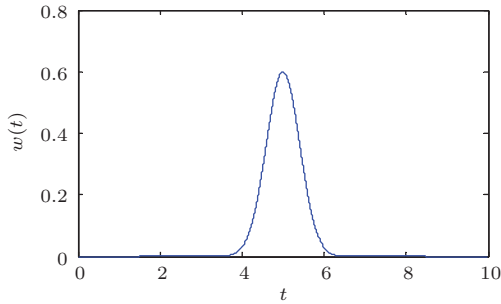


图 2 单个脉冲信号波形

Fig. 2. Waveform of a single pulse signal.

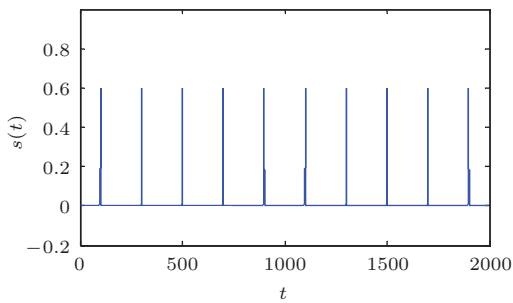


图 3 周期 $T = 200$ 的高斯脉冲序列

Fig. 3. Periodic Gaussian pulse series with cycle $T = 200$.

3.2 脉冲信号的单稳响应特征

当图 3 所示的高斯脉冲序列通过单稳系统 ($b = 1$) 后, 系统的输出响应如图 4 所示. 可以看到, 每个脉冲信号的输出响应是首先瞬时达到响应的最大值, 然后从最大值迅速下降到某一幅度值, 接着响应值的下降速度随时间的增长而变小, 直至响应值缓慢下降至一个周期末达到 0.0501 左右, 系统便开始下一个周期的脉冲响应过程. 显然, 系统响应不同于输入而出现波形失真. 其原因正是由于定态解 $x = 0$ 附近平缓的水平线使振荡粒子不能被快速吸引至 0 点, 所以输出信号达到最大值后并不能在很短 (至少小于一个脉冲周期间隔) 的时间内下降至信号的平衡位置, 结果粒子的运动轨迹不再严格遵循输入信号的时间历程, 表现为输出波形产生失真.

如果改变脉冲信号半峰宽, 如增大 τ 取 $\tau = 5$, 其他参数与图 3 的相同, 则得到图 5 的响应结果. 由图 5 看出, 提高了半峰宽 τ 后, 除了单稳系统响应信号的峰值增大外, 信号的响应特征同样是先瞬时

达到输出最大值, 然后从最大值迅速衰减至某一幅度值, 接着响应衰减速度变缓, 直至响应值衰减到 0.0516 左右完成一个周期的输出, 系统开始重复下一个脉冲响应, 输出波形同样产生失真. 如果减小半峰宽, 如取 $\tau = 0.5$, 其他参数同样与图 3 的相同, 则得到图 6 响应结果. 减小半峰宽 τ 后, 除了单稳系统响应信号的峰值减小外, 信号的响应特征仍然与图 4 和图 5 的特征相同, 响应值衰减到 0.0495 左右完成一个周期的输出, 系统便重复下一个脉冲响应, 输出波形同样产生失真. 由此可知, 相同高度 A 的脉冲信号, 若半峰宽 τ 越大, 则系统输出信号的峰值越大, 反之系统响应峰值越小. 这一结果不难

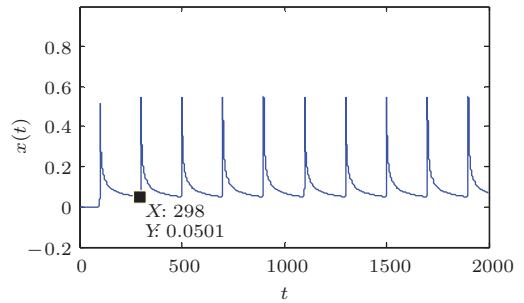


图 4 $\tau = 1$ 脉冲序列的单稳系统输出响应

Fig. 4. The response of pulse series via mono-stable system for half-peak width $\tau = 1$.

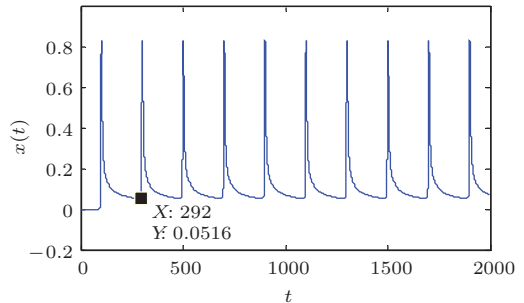


图 5 $\tau = 5$ 脉冲序列的单稳系统输出响应

Fig. 5. The response of pulse series via mono-stable system for $\tau = 5$.

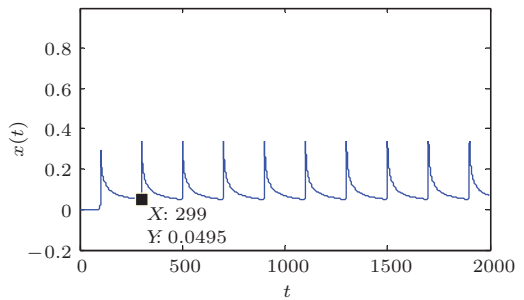


图 6 $\tau = 0.5$ 脉冲序列的单稳系统输出响应

Fig. 6. The response of pulse series via mono-stable system for $\tau = 0.5$.

理解, 因为对于相同高度 A 的脉冲信号, τ 越大, 脉冲信号越宽, 脉冲信号所具有的能量就越大, 于是这种大能量脉冲粒子在单稳系统中的运动响应距离 x 就越长, 如图 1 中的 M 点, 反之, 越小半峰宽 τ 的小能量脉冲粒子的响应距离 x 就越短, 如图 1 中的 N 点.

3.3 改善单稳脉冲响应的脉冲序列整体平移方法

从上面的分析可知, 单稳脉冲响应波形的失真必然影响脉冲信号的单稳检测效果, 特别是当信号受到噪声干扰时, 其单稳脉冲信号的检测结果会变的更差, 因此为得到高质量的单稳脉冲响应信号波形, 必须解决响应信号的失真问题. 由上节单稳脉冲响应各图看出, 其波形失真的原因是由于响应幅度达到峰值后很难在很短的时间(至少一个周期)内完全下降到平衡位置点. 为了使脉冲响应信号尽快回到平衡位置以减小响应波形的失真, 本文提出脉冲序列整体平移的方法来解决这一问题, 即先将输入脉冲序列整体位置上或下平移, 然后再通过单稳系统得到输出响应信号. 对 $\tau = 1$ 的图 3(正向)脉冲序列整体位置下移 0.1, 即输入脉冲序列的平衡位置从 0 整体下移至 -0.1 , 则系统的脉冲响应如图 7 所示. 由图 7 知, 平移后脉冲响应波形的平衡位置从 0 下降至的 -0.464 , 更重要的是响应信号经过最大值后, 其幅值在极短的时间内快速下降到平衡位置 -0.464 , 大大减小了脉冲响应波形的失真.

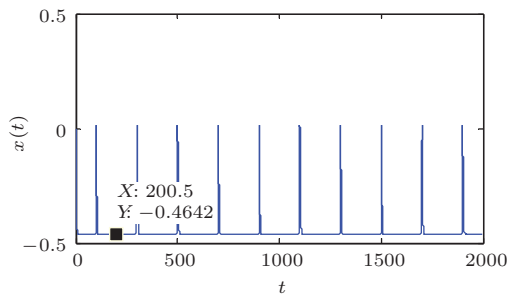


图 7 脉冲信号平移后的单稳系统响应

Fig. 7. The mono-stable response of moving pulse series.

脉冲序列整体平移方法能够减小输出波形失真的机理在于, 当脉冲序列的平衡位置不在 0 值原点时, 单个高斯脉冲信号 $w(t)$ 可表示为

$$w(t) = A e^{-\frac{3(t-t_0)^2}{\tau^2}} + c, \quad (4)$$

其中 c 为常数. 显然常数 c 表示脉冲信号平衡位置偏离 0 值原点的偏移量. 于是, 单稳系统动力学方程 (2) 变为

$$\frac{dx}{dt} = -bx^3 + s(t) + c + n(t). \quad (5a)$$

上式 $s(t)$ 仍然表示 0 值平衡位置的脉冲序列驱动信号. 在无外界脉冲和无噪声存在时, 即 $s(t) = 0$ 和 $n(t) = 0$, 而只有偏移量 c 存在情况下, 由定态方程 $\frac{dx}{dt} = 0$, 即 $-bx^3 + c = 0$ 可以得到单稳系统的定态解为 $x_{\min} = \sqrt[3]{c/b}$. 显然, 与方程 (2) 无偏移量 c 的定态解 $x = 0$ 相比, 偏移量 c 的存在使系统的稳定点从 $x = 0$ 偏移至 x_{\min} . 对于图 7 输入脉冲序列平衡位置的偏移量 $c = -0.1$, 在 $b = 1$ 时, 其系统的稳定点为 $x_{\min} = \sqrt[3]{-0.1/1} \approx -0.464$, 正好是图 7 系统响应的平衡位置.

脉冲序列整体平移方法的机理, 可以更形象具体的从单稳系统势函数的变化来进一步理解. 由于平衡位置存在非零的偏移量 c , 根据方程 (5a) 可以有

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -bx^3 + s(t) + c + n(t) \\ &= -\frac{dP'(x)}{dx} + s(t) + n(t), \end{aligned} \quad (5b)$$

其中

$$P'(x) = \frac{1}{4}bx^4 - cx. \quad (6)$$

$P'(x)$ 是一个具有外部势场 cx 的单稳系统势函数, 外势场力参数 c (即偏移量)使单稳系统势函数具有了非对称性, 使得单稳系统的输入具有直流偏置性, 因此可以称方程 (5a) 为直流偏置的单稳系统动力学方程. 图 8(a) 给出了 $c = -0.1$ 时非对称势函数 $P'(x)$ 的图像, 为了比较, 图 8(b) 重绘制了 (1) 式对称单稳势函数 $P(x)$ 的图像. 可以看出, 由于非零偏移量 c 的存在, 致使图 8(b) 对称势函数 $P(x)$ 发生势阱偏斜和稳定点的偏移, 形成了图 8(a) 非对称的势函数 $P'(x)$, 稳定点从 0 变为 $x_{\min} = \sqrt[3]{c/b}$. 与图 8(b) 稳定点附近“长距离”的水平线相比, 图 8(a) 稳定点附近几乎没有很长的水平线, 粒子很易于被稳定点快速吸引.

图 8(d) 和 (c) 分别是图 3 脉冲序列整体平移前和后, 粒子通过单稳系统的运动响应轨迹 $x(t)$ 示意图. 图 8(d) 是 $c = 0$ 脉冲序列整体平移前, 由于粒子不易被稳定点 $x = 0$ 很快吸引, 所以在图 8(b) 势函数 $x = 0$ 附近处于一种慢速的“滑行”状态, 粒

子在下一个脉冲产生之前不能回到平衡位置0值原点. 而图8(c)当 $c \neq 0$ 输入脉冲序列整体平移后, 由于图8(a)非对称势函数的势阱倾斜, 稳定点偏离0值原点, 且稳定点附近几乎不存在一条长距离的平行于 x 轴的水平线, 因此粒子快速达到响应

的最大值后迅速衰减, 衰减过程一路下滑, 快速越过平移前的稳定点 $x = 0$, 并在下一个脉冲周期到来之前, 迅速达到倾斜势阱的稳定点位置 $x_{\min} = \sqrt[3]{c/b}$, 从而避免了脉冲响应波形在平衡位置的失真.

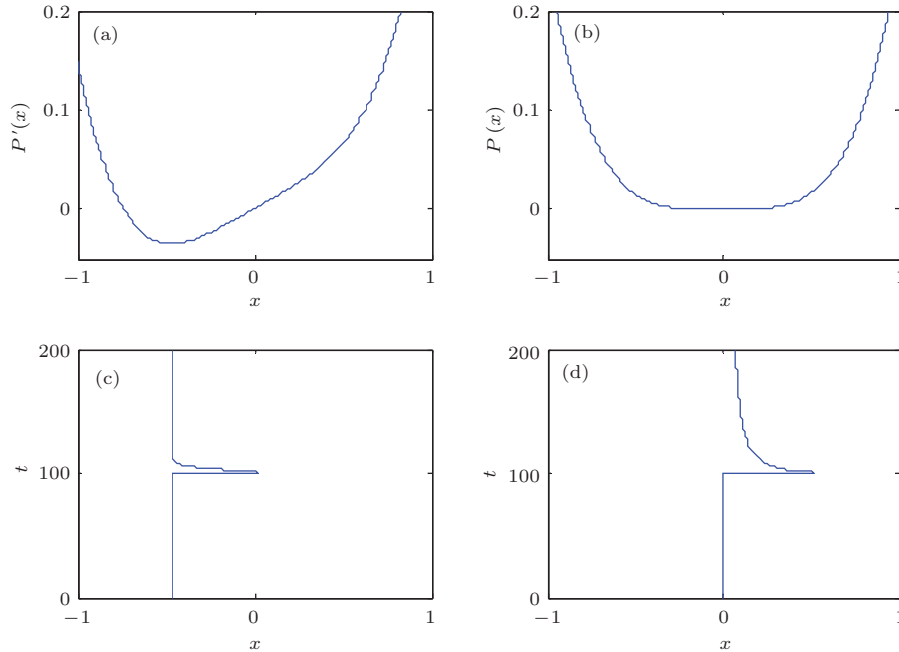


图8 脉冲序列平移前后的单稳系统势函数和粒子运动响应 (a), (c) $c = -0.1$; (b), (d) $c = 0$

Fig. 8. Mono-stable potential functions and responses of pre- and post-moving pulse series with offsets $c = -0.1$ ((a), (c)) and $c = 0$ ((b), (d)), respectively.

3.4 偏移量的影响

上节研究了改善单稳脉冲响应质量的脉冲序列整体偏移方法, 本节探讨偏移量取不同符号和大小量值, 系统脉冲响应的变化规律. 取正值偏移量 $c = 0.1$, 分别得到图9(a)非对称的单稳系统势函数和图9(c)粒子通过该系统的运动响应轨迹 $x(t)$. 与图8(a)和(c)相比, 虽然粒子同样在下一个脉冲周期到来之前可以迅速达到倾斜势阱的稳定点位置 x_{\min} , 并减小响应波形在平衡位置处的失真, 但是比较图8(c)和图9(c)可以发现, 偏移量从 -0.1 变为 $+0.1$ 导致系统响应的脉冲幅度变小, 这表明脉冲信号的平移方向会影响系统响应(或粒子行程)的幅度变化. 这一原因在于, 正脉冲信号使粒子向 x 的 $+\infty$ 方向运动, 由于图8(a)势阱稳定点 x_{\min} 的右侧吸收壁斜率小于图9(a)稳定点 x_{\min} 的右侧吸收壁的斜率, 因此具有正向脉冲运动的粒子容易在图8(a)较小斜率的 x_{\min} 右侧吸收壁上产生更长的行程, 从而可以得到更大的脉冲响应幅

度. 对于图3正向脉冲序列, 为了得到更大的信号幅度, 显然负向偏移量 $c = -0.1$ 要好于正向偏移量 $c = 0.1$. 至于负脉冲信号, 其响应幅度的情况不难分析理解, 这里不再赘述.

如果图3脉冲序列偏移程度不够, 例如取偏移量 $c = -0.01$, 则得到图9(b)非对称单稳系统势函数 $P'(x)$ 和图9(d)粒子通过该单稳系统的运动响应轨迹 $x(t)$. 由图9(b)可知, 过小的平移量 $|c|$ 使得单稳系统势函数的非对称性弱化并趋于对称, 系统稳定点 $x_{\min} = \sqrt[3]{c/b} = -0.2154$ 的右侧吸收壁斜率进一步变小, 几乎在 x_{\min} 附近出现水平线. 虽然在下一个脉冲周期到来之前粒子仍然可以到达稳定点位置 x_{\min} , 不会产生平衡位置的响应失真, 如图9(d), 但是由于粒子被延缓吸引至稳定点 x_{\min} , 因此造成响应脉冲波形下降沿的形状失真. 可以预见, 当偏移量 c 进一步趋于0, 那么总会存在一个值使得粒子在下一个脉冲周期到来之前不能到达稳定点, 从而造成类似图4响应波形的下降沿形状和平衡位置的同时失真.

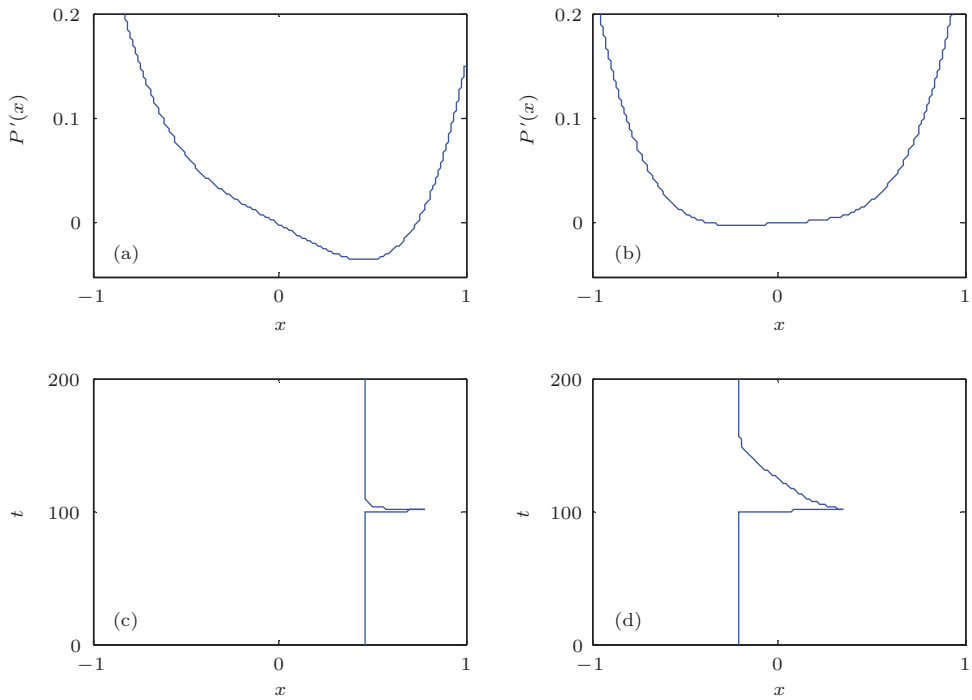


图9 不同脉冲序列平移值的单稳系统势函数和粒子运动响应 (a), (c) $c = 0.1$; (b), (d) $c = -0.01$
 Fig. 9. Mono-stable potential functions and responses for different offsets of pulse series: (a), (c) $c = 0.1$;
 (b), (d) $c = -0.01$.

为进一步理解脉冲序列平移偏移量与单稳脉冲响应的关系, 图10给出了图3正向脉冲序列的系统响应脉冲幅度 h 随偏移量 c 的变化曲线, 图中取偏移量的计算间隔步长是0.01. 可以看出, $|c|$ 相同时, $c < 0$ 的响应脉冲幅度均大于 $c > 0$ 的响应幅度, 且 $|c|$ 越小输出脉冲幅度就越大, 在 $c = -0.01$ 时系统响应幅度最大. 此时根据图9的分析, $c = -0.01$ 时响应波形不存在稳定点平衡位置的失真, 但存在下降沿波形的形状失真. 为了尽量保证响应脉冲波形不失真, 一般取偏移量 c 适当远离0值点, 如对图3正向脉冲序列, 可取 $c = -0.1$, 这样即可以保证平衡位置不失真, 也可以减小下降沿波形失真, 还能够保持足够的脉冲幅度.

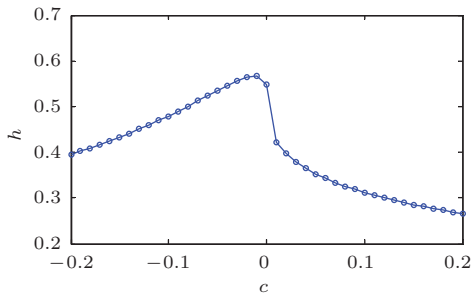


图10 输出脉冲幅度 h 随偏移量 c 的变化曲线
 Fig. 10. Curve of output pulse height h on offset c .

4 单稳随机共振及含噪脉冲信号的检测

如果输入脉冲序列信号中含有噪声, 例如向 $\tau = 1$ 的图3输入脉冲序列中加入噪声强度 $D = 3$ 的高斯白噪声, 那么得到含噪输入脉冲序列信号如图11所示, 脉冲序列完全淹没在噪声中不可识别. 将含噪脉冲序列输入单稳系统, 得到输出响应如图12所示. 由图12可知, 由于脉冲信号、噪声和非线性单稳系统三者没有达到很好的协同作用, 噪声的积极作用没有充分体现, 因此单稳系统的输出响应无法达到理想的随机共振效果, 输出响应中存在较大的残余噪声影响以及响应信号本身存在平衡位置和下降沿波形的失真, 导致脉冲序列不能清晰地识别出来.

当该含噪脉冲序列整体平移, 平移量分别 $c = -0.1$ 和 $c = 0.1$ 时, 其单稳系统的响应分别为图13和图14的结果. 比较图12和图13不难知道, 当存在偏移量 $c = -0.1$ 时, 响应脉冲序列变的清晰可见, 这一方面是因为响应脉冲信号没有平衡位置失真和很微小的下降沿失真, 另一方面是因为平移方法促进了脉冲信号、噪声和非线性单稳系统

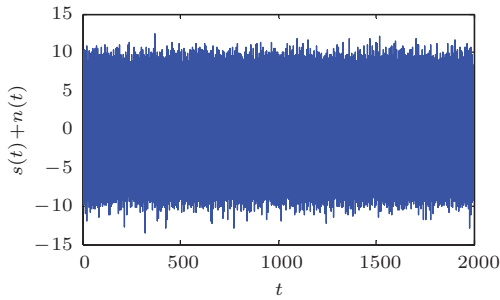


图 11 含噪输入脉冲信号, $D = 3$

Fig. 11. Input signal masked by noise ($D = 3$).

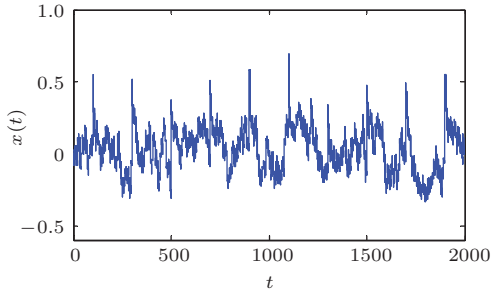


图 12 无平移脉冲信号的单稳系统输出

Fig. 12. Output of no-moving pulse series via mono-stable system.

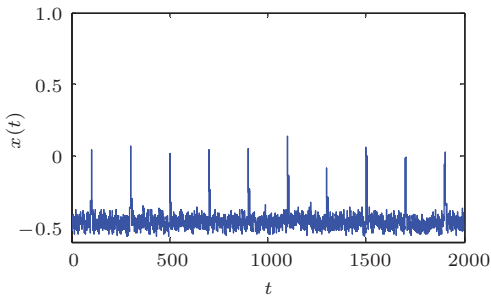


图 13 平移量 $c = -0.1$ 的单稳系统输出

Fig. 13. Output of moving pulse series via mono-stable system with offset $c = -0.1$.

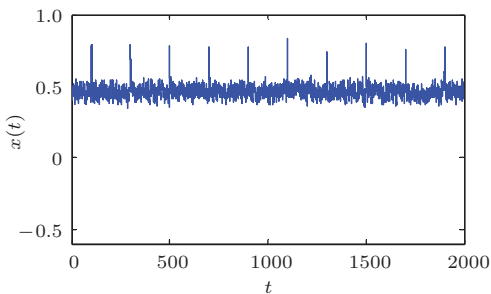


图 14 平移量 $c = 0.1$ 的单稳系统输出

Fig. 14. Output of moving pulse series via mono-stable system with offset $c = 0.1$.

三者的协同作用, 提高了噪声在其中的积极作用, 使更多的噪声能量转移到信号上, 减少了响应中的残余噪声量, 因此增强了单稳随机共振响应的

效果, 进而获得了比较理想的脉冲序列特征. 至于图 14 正偏移量 $c = 0.1$ 的含噪脉冲序列响应, 不难理解其响应脉冲效果显然不如图 13 负偏移量的效果. 因此, 对于含噪正(负)脉冲信号, 其负(正)向整体平移可以有效利用随机共振来减小噪声的影响, 以改善单稳系统检测脉冲信号的效果.

脉冲序列整体平移方法之所以能够改善单稳随机共振特征而有效降低噪声的影响, 可以从方程 (5a) 加以解释.

令方程 (5a) 中的 $s(t) = 0$, 即仅向单稳系统输入噪声且考虑偏移量的作用. 方程 (5a) 中任意给定一强度为 $D = 3$ 的高斯白噪声, 当 c 分别取值 0(无偏移量) 和 -0.1 (有偏移量) 时, 分别得到单稳系统的响应频谱 $X_1(f)$ 与 $X_2(f)$, 如图 15 和图 16. 比较两个谱图不难发现, 两响应谱图都具有洛伦兹分布特征, 谱能量都是向低频区域集中, 但无偏移量谱图 15 的低频区域谱能量集中特征更加突出明显. 这表明, 由于无偏移量频谱有太多大幅值的噪声集中在低频区域, 因此反映在其相应的时域波形中低频噪声波动影响很大, 如图 12. 而有偏移量频谱由于噪声能量几乎均摊扩展分布在整个频域, 低频谱能量相对很少幅度很低, 因此其对应的时域波形中主要呈现的是小幅度的宽频噪声, 如图 13. 这也说明了图 13 脉冲信号检测效果要优于图 12 的原因. 为进一步看清偏移量对噪声谱的影响, 取图 15 和图 16 中间的一个偏移量 $c = -0.03$, 得到相应的频谱图 17. 由图 15, 图 17, 图 16 频谱图顺序可知, 偏移量 c 对噪声具有调节作用, 对正向脉冲序列, c 取负值越小, 噪声谱能量越向高频扩展, 低频噪声谱能量越小. 这一特性表明, 为了实现理想的单稳随机共振, 偏移量 c 可以调节出合适的噪声量, 使信号、噪声和非线性单稳系统三者达到协调统一. 由于偏移量对噪声的调节作用, 因此脉冲序列整体平移方法有利于含噪脉冲序列信号检测.

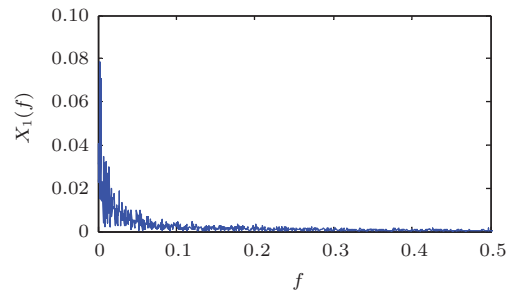


图 15 $c = 0$ 时, 单稳系统响应频谱

Fig. 15. Frequency spectrum of the mono-stable response with offset $c = 0$.

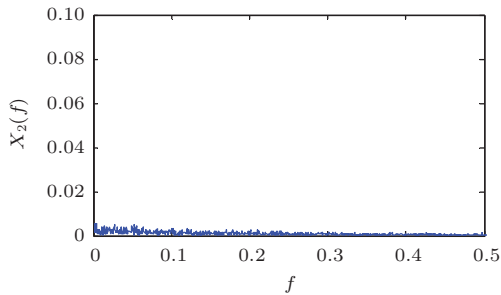


图 16 $c = -0.1$ 时, 单稳系统响应频谱

Fig. 16. Frequency spectrum of the mono-stable response with offset $c = -0.1$.

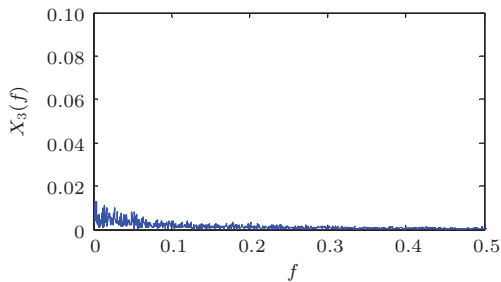


图 17 $c = -0.03$ 时, 单稳系统响应频谱

Fig. 17. Frequency spectrum of the mono-stable response with offset $c = -0.03$.

5 实验验证

为了检验本文提出的脉冲序列整体平移方法对脉冲信号检测的有效性, 我们设计了以下实验: 实验在一台 CAK6136P CNC 数控车床上进行. 压电加速度传感器安装在刀杆切削部位上, 加速度计的电荷信号经电荷放大器的放大后输入便携式数据采集器中进行信号采集记录. 选一根直径 40 mm 的经过调质处理的 45 钢实心棒料为加工试件, 硬度为 HB235, 在其上打一个直径 4 mm 深 6 mm 的小盲孔, 并将一根经过调质处理、硬度为 HB281 的 40Cr 圆柱销楔入该小盲孔. 经过这样的处理后, 当刀具切削到设定的硬点时, 将产生周期性的脉冲振动, 由于材料硬度差别不太大, 因此能表现出弱周期冲击的效果. 显然, 这一脉冲振动频率是机床主轴的转速频率. 实验过程的切削参数如下: 主轴名义转速 775 r/min, 进给量 0.1 mm/r, 背吃刀量 0.5 mm. 实验数据采集参数如下: 采样频率 $8 \times 2.56 = 20.48$ kHz (分析频率为 5 kHz), 采样点数取为 32768 个点.

原始采集信号的时域波形如图 18 所示, 图中在切削加工噪声的干扰下不能发现刀具切削硬

点时产生的弱周期冲击信号. 采用本文的研究方法并作为比较, 分别将偏移量 $c = 0$ (未平移) 和 $c = -0.1$ (有平移) 的原始采集信号通过 (1) 式单稳系统, 并利用变尺度随机共振 [24] 进行信号处理, 这里取变尺度系数 $R = 350$, 分别得到单稳系统的响应如图 19 和图 20. 对比图 19 与图 20 可以看出, 在不调节系统参数的条件下, 有偏移量 $c = -0.1$ 的单稳系统响应效果明显好于没有偏移量的系统响应效果, 这就验证了本文方法的可行性和应用性.

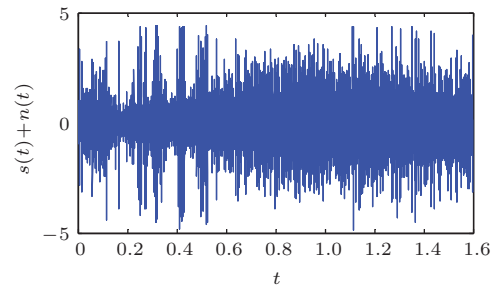


图 18 原始实验采集信号时域波形

Fig. 18. The time domain waveform of the experiment acquisition signal.

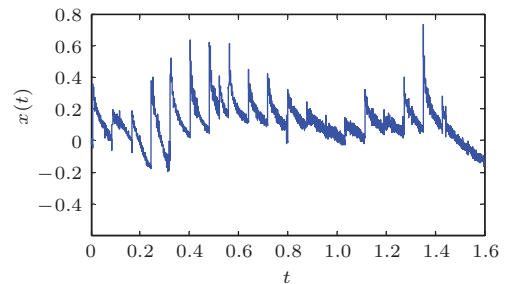


图 19 无偏移量的实验信号单稳响应, 变尺度系数 $R = 350$

Fig. 19. The response of experiment signal via mono-stable system without offset. Re-scaling frequency coefficient $R = 350$.

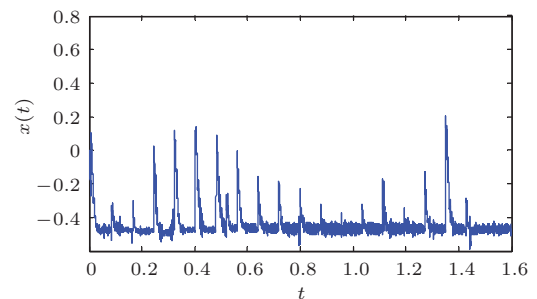


图 20 偏移量 $c = -0.1$ 的实验信号单稳响应, 变尺度系数 $R = 350$

Fig. 20. The response of experiment signal via mono-stable system with offset $c = -0.1$. Re-scaling frequency coefficient $R = 350$.

6 结 论

为了解决参数调节单稳随机共振实现的难点,提高单稳脉冲响应效果,本文提出了输入脉冲序列信号整体平移的方法,该方法不考虑系统参数调节,而是通过偏移量的设置来实现脉冲信号的单稳随机共振. 所提方法不仅避免了系统参数不易选择调节的困难,而且还减小了脉冲响应波形的失真. 在噪声存在的条件下,该方法可以有效提高含噪脉冲信号的随机共振检测效果,有利于工程实际的应用.

参考文献

- [1] Benzi R, Sutera A, VulPiani A 1981 *J. Phys.A* **14** L453
- [2] Gammaitoni L, Hanggi P, Jung P, Marchesoni F 1998 *Rev. Mod. Phys.* **70** 223
- [3] Dylov D V, Fleischer J W 2010 *Nat. Photonics* **4** 323
- [4] Xu B H, Zeng L Z, Li J L 2007 *J. Sound Vib.* **303** 255
- [5] He Q, Wang J 2012 *Digit. Signal Process.* **22** 614
- [6] Yang D X, Hu Z, Yang Y M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 080501 (in Chinese) [杨定新, 胡政, 杨拥民 2012 物理学报 **61** 080501]
- [7] Li J, Chen X, Du Z, Fang Z, He Z 2013 *Renew. Energy.* **60** 7
- [8] Wei Y G, Zeng C H, Wang H, Li K Z, Hu J H 2013 *Chin. Phys.B* **22** 060503
- [9] Fan J, Zhao W L, Zhang M L, Tan R H, Wang W Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 110506 (in Chinese) [范剑, 赵文礼, 张明路, 檀润华, 王万强 2014 物理学报 **63** 110506]
- [10] Li J L, Zhou H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 110502
- [11] Lu K, Wang F Z, Zhang G L, Fu W H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 120202
- [12] Du L C, Mei D C 2011 *PhysicaA* **390** 3262
- [13] Leng Y G, Lai Z H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 020502 (in Chinese) [冷永刚, 赖志慧 2014 物理学报 **63** 020502]
- [14] Zhang Y, Wang T Y, Leng Y G, Deng H 2009 *Chin. J. Mech. Eng.* **22** 542
- [15] Lopes M A, Lee K E, Goltsev A V, Mendes J F F 2014 *Phys. Rev.E* **90** 052709
- [16] Duan F, Abbott D, Gao Q 2005 *Fluct. Noise Lett.* **5** L127
- [17] Hu N Q 2012 *Stochastic Resonance Weak Characteristic Signal Detection Theory and Methods* (Beijing: National Defend Industry Press) pp97–117 (in Chinese) [胡萑庆 2012 随机共振微弱特征信号检测理论与方法(北京:国防工业出版社) 第97—117页]
- [18] Tan J Y, Chen X F, He Z J 2010 *Chin. J. Mech. Eng.* **46** 61 (in Chinese) [谭继勇, 陈雪峰, 何正嘉 2010 机械工程学报 **46** 61]
- [19] Li J, Pan X 2007 *Mech. Syst. Signal Pr.* **21** 1223
- [20] Shi P, Leng Y G, Fan S B, Li X L 2012 *J. Vib. and Shock* **31** 150 (in Chinese) [石鹏, 冷永刚, 范胜波, 李小龙 2012 振动与冲击 **31** 150]
- [21] Li J M, Chen X F, He Z J 2011 *Chin. J. Mech. Eng.* **47** 58 (in Chinese) [李继猛, 陈雪峰, 何正嘉 2011 机械工程学报 **47** 58]
- [22] Yao M L, Xu W, Ning L J 2012 *Nonlinear Dynam.* **67** 329
- [23] Fang X N, Li J, Xiang L, Ni Q 2011 *J. Sichuan Univ Sci & Eng.(Nat. Sci. Ed.)* **24** 459 (in Chinese) [方秀宁, 李健, 向林, 倪强 2011 四川理工学院学报(自然科学版) **24** 459]
- [24] Leng Y G, Wang T Y, Guo Y, Xu Y G, Fang S B 2007 *Mech. Syst. Sign. Proces.* **21** 138

Pulse response of a monostable system*

Leng Yong-Gang¹⁾²⁾ Zhao Yue^{1)†}

1) (School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

2) (Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 10 April 2015; revised manuscript received 11 June 2015)

Abstract

The potential function of a mono-stable system is studied in this paper. The response of pulse series with different half-peak width via the mono-stable system is analysed. Our conclusion is that the larger the half-peak width of the input pulse series, the higher the height of the output pulse series. Distortion of the pulse response wave appears. This is the reason that the potential function of the mono-stable system is similar to the horizontal line around zero point.

In view of the difficulties of adjusting parameter of the mono-stable system to reach stochastic resonance, a method of moving pulse series is put forward. Adjusting the system parameter is not considered but the stochastic resonance of the pulse signal is realized by setting an offset in the method. To reduce the response pulse wave distortion, a mechanism for the proposed method to reduce the distortion is discussed in detail. When noise exists, the mechanism reveals that the moving pulse series method can adjust the distribution of the noise power spectrum and improve the mono-stable stochastic resonance. Therefore, the method proposed in this paper is helpful to detect pulse signal masked by noise.

Keywords: monostable system, pulse signal, noise

PACS: 05.45.-a, 05.40.-a, 02.60.Cb

DOI: [10.7498/aps.64.210503](https://doi.org/10.7498/aps.64.210503)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51275336), and the Tianjin Research Program of Application Foundation and Advanced Technology, China (Grant No. 15JCZDJC32200).

† Corresponding author. E-mail: carrot2000@tju.edu.cn