

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201476

## 基于压缩感知的架空线路舞动波形重构方法

龚 彧<sup>1</sup>, 赵 峰<sup>1</sup>, 李冬华<sup>1</sup>, 陈 文<sup>1</sup>, 李祖明<sup>2</sup>, 刘建国<sup>3</sup>

(1. 盐城供电公司, 江苏 盐城 224005; 2. 南京工程学院电力学院, 江苏 南京 210095;  
3. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 针对高压输电线路时常发生的线路舞动灾害, 提出了一种基于压缩感知的架空线路舞动波形重构方法。传统的基于传感器的舞动监测系统需要一定数量的传感器才能确保重构波形的准确度, 而过多监测节点会增加输电线路的载荷, 改变其力学特性。针对这一问题, 将线路舞动数学模型进行稀疏变化, 构建便于传感器布置的测量矩阵, 并运用正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)算法。通过线路中有限几个信息感知节点重构舞动波形, 降低了感知节点布置过多对舞动信息的干扰。在 Matlab 环境下进行仿真演示, 结果表明: 对于不同幅值、档距、频率、半波数的线路舞动波形的重构误差均可控制在 5% 以下。

**关键词:** 无线传感器; 压缩感知; 线路舞动; 正交匹配追踪算法; 输电线路

### Method for reconstructing galloping waveforms of overhead lines based on compressed sensing

GONG Yu<sup>1</sup>, ZHAO Feng<sup>1</sup>, LI Donghua<sup>1</sup>, CHEN Wen<sup>1</sup>, LI Zuming<sup>2</sup>, LIU Jianguo<sup>3</sup>

(1. Yancheng Power Supply Company, Yancheng 224005, China;

2. School of Electric Power, Nanjing University of Engineering, Nanjing 210095, China;

3. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Galloping disasters frequently occur in high-voltage transmission lines. A method for reconstructing the galloping waveforms of overhead lines based on compressed sensing is proposed. Traditional sensor-based galloping monitoring systems need to be deployed in sufficient numbers to ensure the accuracy of the reconstructed waveform. Too many monitoring nodes will increase the load on the transmission line and change its mechanical characteristics. In response to this problem, the mathematical model of line galloping is sparsely changed, a measurement matrix that is convenient for sensor placement is constructed, and an Orthogonal Matching Pursuit (OMP) algorithm is used. The dancing waveform can be reconstructed through a limited number of information sensing nodes in the line. This reduces the interference of too many sensing nodes on the dancing information. A simulation is carried out in the Matlab environment, and the results show that the reconstruction error of the line galloping waveforms of different amplitudes, spans, frequencies, and half-wave numbers can be controlled to below 5%.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51577086) and the Major Scientific Research Projects of Universities and Colleges in Jiangsu Province (No. 19KJA510012).

**Key words:** wireless sensor; compressed sensing; line galloping; orthogonal matching pursuit algorithm; transmission lines

## 0 引言

改革开放以来, 我国经济飞速发展, 对电能的需求也在不断增长<sup>[1]</sup>。由于恶劣气象环境的影响, 部

分区域的电力事故频出, 因此, 很有必要对电力系统运行状态进行监测<sup>[2-3]</sup>。线路舞动就是其中一种长期以来影响我国输电线路安全的常见问题。对输电线路的舞动监测可以及时了解输电线路的摆动情况, 便于预警及抢修, 使其危害达到最低, 同时也可以获得线路舞动数据信息, 以便日后的研究与防范<sup>[4-6]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51577086); 江苏省高校科研重大项目(19KJA510012)

目前的输电线路舞动监测方法主要有下述两种方法。第一类是视频监控法,主要是用一些高像素摄像机对输电线路进行实时拍摄,但是容易受到天气及光线的影响,在阴雨天、夜晚的拍摄效果不佳;且难获得直观的数据进行后续的研究分析<sup>[7-8]</sup>。第二类是无线传感器法。无线传感器在电网监测中应用广泛<sup>[9-11]</sup>。基于无线传感器的线路舞动监测指的是在输电线路上布置一定数量的无线传感器如加速度传感器、倾角传感器等,利用各传感器来获取所需的数据,此类方法结构简单、操作方便、适用性广<sup>[12-14]</sup>。但若监测节点数量过多不仅会增加输电线路的重力载荷,也会使研发的投入和设备的维护成本大大增加,后续处理庞大的数据也是一个棘手的问题<sup>[15]</sup>。

基于以上问题,提出一种基于压缩感知的架空线路舞动波形重构方法。在传统的加速度传感器监测系统的基础上,对传感器的布置进行优化设计,构建适用的测量矩阵,运用正交匹配追踪算法,实现通过少量节点重构线路舞动模型,并通过 Matlab 平台进行重构效果仿真验证。

### 1 舞动的压缩感知模型

压缩感知理论是2004年由E.J.Candes、J.Romberg、T.Tao 和 D.L.Donoho 等人提出的。压缩感知理论框架如图1所示,以远低于奈奎斯特采样速率对信号进行采样,然后再利用非线性的优化算法求解凸优化问题,从少量观测数据中以高精度重构出完整的原始信号<sup>[21]</sup>。

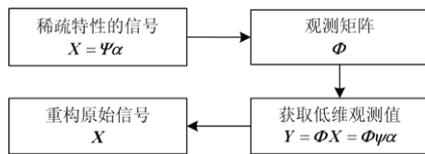


图1 压缩感知理论框架

Fig. 1 Compressed sensing theory framework

压缩感知技术基于信号的稀疏特性,用稀疏度  $K$  表示信号在当前域下值不为 0 的点的个数。对于舞动波形信号,可将其数据拓展成一个  $N$  维的列向量  $X$ ,若信号的稀疏度  $K = n(n \ll N)$ ,则可用  $M \times N(M < N)$  的观测矩阵  $\Phi$  采样后得到  $M$  维观测值  $Y$ ,若过程中选取的观测矩阵性能较好,则可认为观测值  $Y$  中包含了原始舞动波形信息  $X$  中的绝大部分主要信息,后续信号的还原也可通过对观测信号  $Y$  的计算实现<sup>[22]</sup>,即

$$Y = \Phi X \quad (1)$$

但是实际舞动波形是连续且复杂的,其线路中大部分的波形数值均不为 0,故其稀疏度  $K$  不是有限的。为了让舞动波形信号符合信号稀疏的特性,

可以通过稀疏变换的方式将连续的时域信号变成在某一稀疏域中的稀疏信号(即  $K$  为有限值)。若信号在稀疏空间  $\Psi$  下面的系数是向量  $\alpha$ ,向量  $X$  为原始舞动波形信号,则稀疏处理可由式(2)表示。

$$X = \Psi \alpha \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  和  $X$  都是  $N$  维列向量;  $\Psi$  为  $N$  维稀疏矩阵。由式(2)可知稀疏系数  $\alpha = \Psi^{-1} X$ ,虽然  $\alpha$  中数值为 0 的点比较多,但其维度与原始舞动信号  $X$  是相同的,属于高维信号,不利于后续处理。故根据式(1),设计一个维度较低的测量矩阵以获得稀疏信号的观测值,舞动波形信息的特征信息均包含在这个低维的观测值中,对其求解凸优化问题即可得到原始舞动波形信号  $X$ 。

设计一个大小为  $M \times N(K \ll M < N)$  的采样矩阵  $\Phi$ ,它由  $M$  个  $N$  维的列向量  $i(i = 1, 2, \dots, N)$  构成,将在稀疏基  $\Psi$  下稀疏度为  $K$  的舞动波形信号  $X$  投影到这个采样矩阵上,即与之作内积则可得  $M$  维测量值  $Y$ ,这个测量值可代替原始舞动波形信息进行存储或传输,实现数据的压缩。该稀疏采样过程的数学表达式为

$$Y = \Phi X = \Phi \Psi \alpha = A \alpha \quad (3)$$

式中:向量  $Y$  为舞动波形信号  $X$  的观测值;  $A$  为传感矩阵,由采样矩阵和稀疏基组成,采样矩阵和稀疏矩阵要求相互独立,即二者的行和列不能相互表示。稀疏基采用过完备的傅里叶基,设计采样矩阵为服从高斯分布的  $M \times N$  阶矩阵,二者相互独立性较好,且采样矩阵满足矩阵的受限等距性质(RIP),可保证信号重构的要求。

舞动波形信号的重构可通过如下优化问题解算:

$$\begin{cases} \alpha^{(0)} = \arg \min_{\alpha \in R^N} \|\alpha\|_0 \\ Y = \Phi X = A \alpha \end{cases} \quad (4)$$

其中  $A = \Phi \Psi$ ,这是一个非凸的组合优化问题,是 NP 难题,为了求解非凸的组合优化问题,一般是利用松弛技术采用凸问题对其进行逼近<sup>[11]</sup>,即求解:

$$\begin{cases} \alpha^{(1)} = \arg \min_{\alpha \in R^N} \|\alpha\|_1 \\ Y = \Phi X = A \alpha \end{cases} \quad (5)$$

## 2 舞动信息重构

### 2.1 舞动模型选择及其稀疏表示

当横向风载荷作用于输电线路时,导线会进行上下的加速度运动,从而受到空气动力矩的影响而发生扭转,当扭转频率达到一定条件时就会产生舞动。输电线路发生舞动并达到稳定时,水平方向与垂直方向振动波形近似为简谐波,两个方向的振动频率相一致,但水平方向的振幅较小,以垂直方向

的振动为主<sup>[23]</sup>。

为方便仿真, 仅考虑垂直方向上的振动。用  $\mathbf{X}$  表示导线上各点垂直方向的振幅值  $X_i$  组成的向量, 当舞动达到稳定时  $X_i$  与最大振幅  $A_0$ 、档距  $L$ 、舞动半波数  $n(n=1,2,3)$ 、导线上的舞动位置  $i$ 、舞动频率  $f$ 、时间  $t$  的关系可用式(6)表示。

$$X_i = A_0 \sin\left(\frac{n\pi}{L}i\right)\sin(2\pi ft) \quad (6)$$

以湖北省 500 kV 中山口大跨越工程与昌吉—吉泉特高压输电线路的舞动事故为例。据记录, 1988 年湖北省 500 kV 中山口大跨越输电线路档距为 1 055 m, 最大舞动振幅为 5 m, 舞动频率为 0.267 Hz<sup>[23]</sup>; 2018 年昌吉—吉泉 1 100 kV 特高压直流输电线路 N7789-N7790 段发生明显舞动, 档距为 488 m, 最大舞动振幅可达 3 m, 舞动频率约为 0.6 Hz<sup>[24]</sup>。由上述数据可得式(7)、式(8)。

$$X_{1i} = 5\sin\left(\frac{3\pi}{1055}i\right)\sin(1.67t) \quad (7)$$

$$X_{2i} = 3\sin\left(\frac{3\pi}{488}i\right)\sin(3.768t) \quad (8)$$

实际舞动发生时, 可能有各种因素干扰, 使得舞动波形更加复杂。因此, 如表 1 所示, 基于  $\mathbf{X}_1$  表示的波形的基础上, 增加若干三角函数  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$  做干扰因子, 得到  $\mathbf{X}_3$ 。对于信号  $\mathbf{X}_1$ 、 $\mathbf{X}_2$ 、 $\mathbf{X}_3$ , 统一取信号长度为 1024(即有 1024 个数据点)。取时间  $t=1s$ , 可得到  $\mathbf{X}_1$ 、 $\mathbf{X}_2$ 、 $\mathbf{X}_3$  的舞动波形如图 2 所示。

表 1 干扰函数表

Table 1 Interference function table

干扰函数表达式	干扰区间
$x_1 = 0.5\cos\left(\frac{2\pi i}{100}\right)\sin(1.67t)$	$1 < i < 75$
$x_2 = 0.8\cos\left(\frac{2\pi i}{256}\right)\sin(1.67t)$	$192 < i < 320$
$x_3 = -0.5\cos\left(\frac{2\pi i}{192}\right)\sin(1.67t)$	$384 < i < 480$
$x_4 = 0.5\cos\left(\frac{2\pi i}{148}\right)\sin(1.67t)$	$778 < i < 850$
$x_5 = 0.75\sin\left(\frac{2\pi i}{178}\right)\sin(1.67t)$	$890 < i < 980$

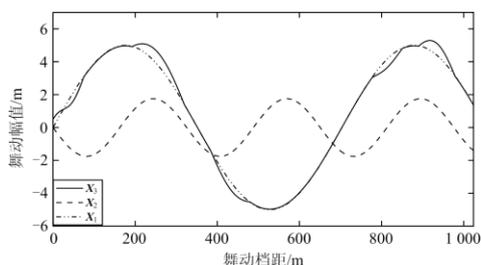


图 2  $t=1s$  时刻  $\mathbf{X}_1$ 、 $\mathbf{X}_2$ 、 $\mathbf{X}_3$  的舞动波形图

Fig. 2 Galloping waveform of  $\mathbf{X}_1$ 、 $\mathbf{X}_2$ 、 $\mathbf{X}_3$  at  $t=1s$

## 2.2 测量矩阵的构造

压缩感知理论的核心是测量矩阵的构建。目前由于高斯随机矩阵、贝努利测量矩阵、部分哈达玛矩阵等测量矩阵具有良好的重构效果, 在压缩感知领域中有广泛的应用。然而上述几种矩阵不易通过硬件实现, 完成传感器的安装布置十分困难<sup>[25]</sup>。

为了解决矩阵硬件的可实现性, 采用了一种传感器压缩感知技术中的高效布置方法<sup>[26]</sup>。将导线分成  $N$  个节点, 在  $N$  个节点里面选用  $M$  个传感器采样数据。设计一个测量矩阵  $\Phi(M \times N)$ 。矩阵  $\Phi$  的行与传感器一一对应, 每一行只有一个非零元素 1, 非零元素 1 的列索引则是该行对应的节点在导线上的位置。根据构造的测量矩阵  $\Phi$  在导线上布置传感器, 传感器上电采集数据就可以得到观测值  $\mathbf{Y}$ 。

图 3 中导线上设置了 12 个节点, 在 2、6、8、11 这四个位置布置传感器, 那么对应的测量矩阵  $\Phi(4 \times 12)$  为

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

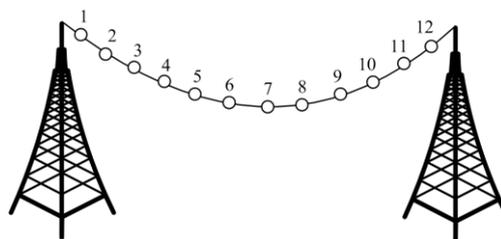


图 3 传感器布置示意图

Fig. 3 Sensor layout diagram

## 2.3 基于压缩感知算法的系统设计

在基于压缩感知理论的舞动波形重构方法中, 选用离散傅里叶变化基对原始信号进行稀疏变化, 并通过测量矩阵  $\Phi$  得到观测值  $\mathbf{Y}$  后, 最终通过最优化问题来重构原始信号  $\mathbf{X}$ 。对于求解稀疏系数  $\alpha$ , 则采用 OMP 算法进行求解。

OMP 算法是贪婪迭代算法的一种, 基本思想是以贪婪迭代的方法来选取观测矩阵的列, 让每次迭代所选取的列与当前的冗余向量达到最大相关程度, 之后在观测向量中排除相关部分并反复迭代, 当满足迭代终止条件时, 强制迭代停止<sup>[27]</sup>。

OMP 算法的输入为观测向量  $\mathbf{Y}$ (等价于初始化的冗余向量)、测量矩阵以及信号的稀疏度  $K$ 。OMP 算法的输出为信号的稀疏系数  $\alpha$ 。

建立基于 OMP 算法的舞动波形重构系统, 图 4

为舞动波形重构系统流程图。为了降低观测值之间的相关度，减小重构波形与原波形之间的误差，同时方便传感单元的布置。将原信号分成64小块，每个小块有16个点。提前在每个小块中随机取3个点组合成一个 $192 \times 1$ 的向量 $M_0$ ， $M_0$ 是192个候选采样点的矩阵，占总数据点的18.75%。每次采集所用的 $M$ 个观测点在向量 $M_0$ 内随机获取。

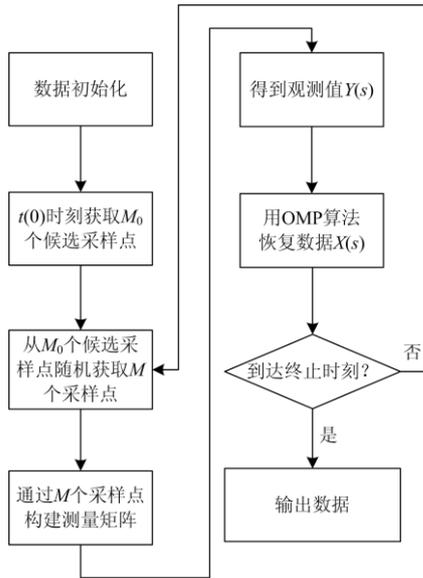


图4 基于OMP算法的舞动波形重构系统流程图

Fig. 4 Flow chart of dance curve reconstruction system based on OMP algorithm

### 3 方法验证

#### 3.1 不同档距的舞动波形重构

为了验证基于压缩感知理论的舞动波形重构方法的适用性与可靠性，观测数目 $M$ 取32、48、64、80、96、112、128、144，时间 $t$ 取0.5 s、1 s、1.5 s、2 s，待重构信号选 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ ，依次进行数据仿真模拟，每次仿真50次。

待重构信号为 $X_3$ ， $t$ 取1 s，观测数目为32、64、96、128时，四种情况下的 $X_3$ 信号某次仿真重构效果如图5所示，幅值差值 $\Delta X$ 由式(9)得出。

$$\Delta X = \tilde{X} - X \quad (9)$$

图中二范数误差 $\sigma$ 用式(10)计算得出。

$$\sigma = \frac{\| \tilde{X} - X \|_2}{\| X \|_2} \quad (10)$$

式中： $\tilde{X}$ 与 $X$ 分别代表信号的重构值与原始值； $\| \tilde{X} - X \|_2$ 表示重构值与原始值差值向量的二范数，用二者的比值来表示信号重构的逼近误差。仿真结果的数据如图6、表2所示，其中表2中重构误差是50次仿真得到的误差平均值。

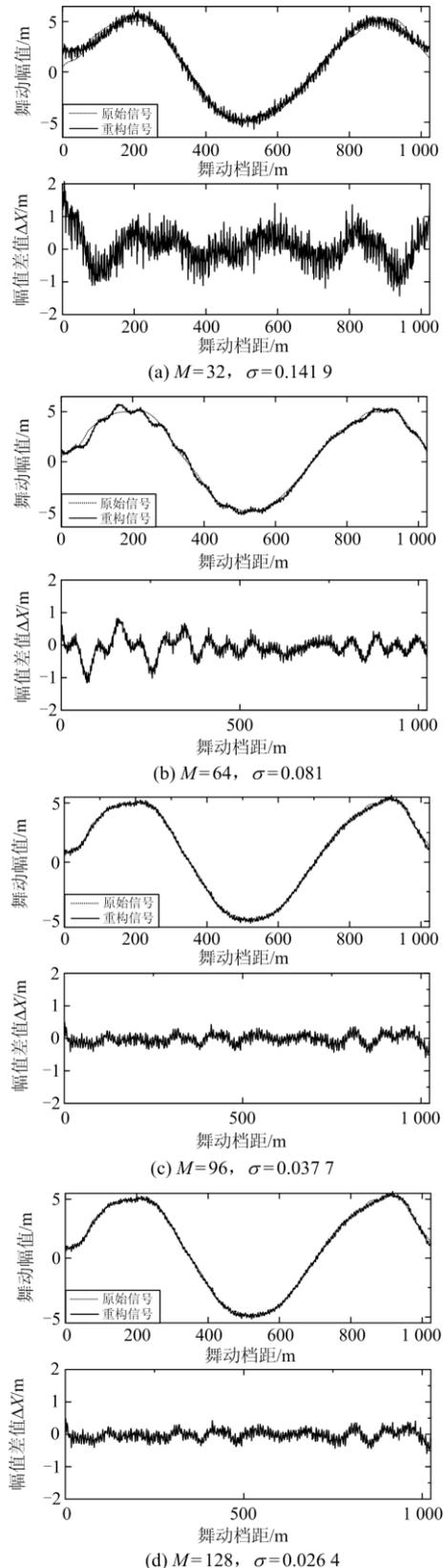


图5  $t=1$  s,  $X_3$ 在不同观测数下的重构效果

Fig. 5 Reconstruction effect of  $X_3$  under different observations at  $t=1$  s

表 2 仿真结果表

Table 2 Simulation result table

观测数 ( $M$ )	观测率 ( $\frac{M}{N}$ )	上电率 ( $\frac{M_0}{M}$ )	$X_1$ 重构二范数误差			
			$t=0.5$ s	$t=1$ s	$t=1.5$ s	$t=2$ s
32	3.13%	16.7%	0.112 5	0.098 2	0.093 7	0.104 5
48	4.69%	25%	0.060 8	0.066 0	0.062 7	0.067 1
64	6.25%	33.3%	0.045 2	0.044 3	0.045 6	0.044 9
80	7.81%	41.7%	0.031 8	0.034 4	0.035 8	0.036 6
96	9.38%	50%	0.027 7	0.026 8	0.030 8	0.030 3
112	10.94%	58.3%	0.025 7	0.026 2	0.026 5	0.027 1
128	12.50%	66.7%	0.025 3	0.025 0	0.025 1	0.024 7
144	14.06%	75%	0.024 4	0.024 5	0.024 2	0.024 3
观测数 ( $M$ )	观测率 ( $\frac{M}{N}$ )	上电率 ( $\frac{M_0}{M}$ )	$X_2$ 重构二范数误差			
			$t=0.5$ s	$t=1$ s	$t=1.5$ s	$t=2$ s
32	3.13%	16.7%	0.080 1	0.095 6	0.092	0.087 6
48	4.69%	25%	0.067 9	0.070 7	0.071 9	0.071 1
64	6.25%	33.3%	0.061 3	0.059 4	0.061 6	0.064 9
80	7.81%	41.7%	0.047 0	0.049 7	0.056	0.056 9
96	9.38%	50%	0.039 3	0.037 1	0.048 1	0.050 6
112	10.94%	58.3%	0.035 5	0.031 2	0.043 0	0.044
128	12.50%	66.7%	0.032 5	0.029 8	0.040 1	0.040 3
144	14.06%	75%	0.032 3	0.028 8	0.034 4	0.032 6
观测数 ( $M$ )	观测率 ( $\frac{M}{N}$ )	上电率 ( $\frac{M_0}{M}$ )	$X_3$ 重构二范数误差			
			$t=0.5$ s	$t=1$ s	$t=1.5$ s	$t=2$ s
32	3.13%	16.7%	0.145 7	0.139 7	0.154 2	0.140 2
48	4.69%	25%	0.087 2	0.078 8	0.088 7	0.083 8
64	6.25%	33.3%	0.047 2	0.050 7	0.049 3	0.055 8
80	7.81%	41.7%	0.031 4	0.032 7	0.033 7	0.036 9
96	9.38%	50%	0.021 4	0.028 8	0.032 5	0.034 5
112	10.94%	58.3%	0.020 3	0.025 4	0.019 6	0.021 8
128	12.50%	66.7%	0.021 9	0.022 2	0.017 9	0.019 0
144	14.06%	75%	0.018 7	0.016 3	0.017 2	0.016 9

由图 5 可知, OMP 算法重构之后的信号, 端点位置的幅值差值一直较其他位置偏大。在线路发生舞动时, 由于端点处与塔杆相连, 不会发生大幅度的舞动, 因此, 端点误差对线路舞动监测的实际影响较小。

由图 6 及表 2 可知, 重构误差  $\sigma$  会随着观测值数目的增加而减小, 其中对于信号  $X_1$ 、 $X_2$  而言, 即使在观测值数目较低时, 重构效果也较为可观,  $\sigma$  一直稳定保持在 10% 左右, 当观测值大于 80 以后,  $\sigma$  可稳定保持在 5% 以下。对于稍复杂的信号  $X_3$ , 在观测值较低的时候  $\sigma$  较大, 而当观测值大于 80 之后,  $\sigma$  也可以稳定保持在 5% 以下。

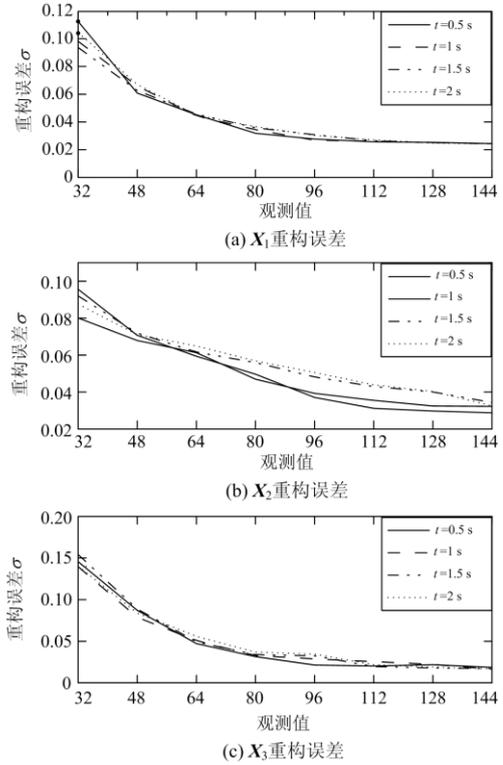

 图 6  $t=1$  s,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  重构误差图

 Fig. 6 Reconstruction error graph of  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  at  $t=1$  s

在应用中, 确保一定数目的观测值, 可使舞动监测的准确性得到保证。此外, 当  $M$  不变时, 不同时刻的波形重构的  $\sigma$  相差不大, 可知系统具有一定的可靠性。

### 3.2 不同半波数的舞动波形重构

在档距已知的情况下, 舞动半波数对舞动波形的影响是最为突出的。可能监测数目一致, 因半波数不同, 重构出的舞动波形幅值不尽相同。

为了验证基于压缩感知理论的舞动波形重构方法对不同半波数的信号的重构效果, 在  $X_1$  的基础上, 通过更改半波数  $n$ , 得到半波数为 1 和 2 的信号  $X_4$  和  $X_5$ 。

$$X_{4i} = 5\sin\left(\frac{1\pi}{1055}i\right)\sin(1.67t) \quad (11)$$

$$X_{5i} = 5\sin\left(\frac{2\pi}{1055}i\right)\sin(1.67t) \quad (12)$$

在  $X_4$  和  $X_5$  所表示的波形的局部位置增加若干三角函数  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$  做干扰因子时, 得到  $X_6$  和  $X_7$ 。 $X_6$  的半波数是 2,  $X_7$  的半波数是 3。 $t=1$  s 时,  $X_3$ 、 $X_6$ 、 $X_7$  的波形如图 7 所示。

观测数目  $M$  取 32、48、64、80、96、112、128、144, 时间  $t$  取 1s, 待重构信号选  $X_3$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ , 依次进行数据仿真模拟, 每次仿真 50 次, 得到表 3。

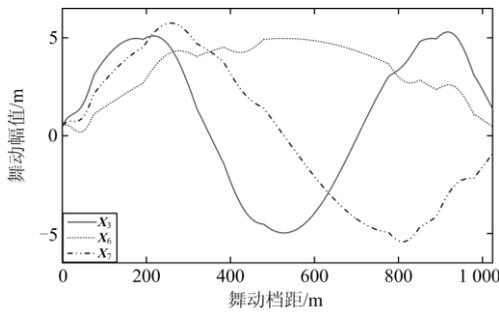


图 7  $t=1$  s 时刻  $X_3$ 、 $X_6$ 、 $X_7$  波形图  
Fig. 7 Original waveform of  $X_3$ ,  $X_6$ ,  $X_7$  at  $t=1$  s

表 3  $t=1$  s,  $X_3$ 、 $X_6$ 、 $X_7$  重构误差表  
Table 3 Reconstruction error table of  $X_3$ ,  $X_6$ ,  $X_7$  at  $t=1$  s

观测数( $M$ )	观测率( $\frac{M}{N}$ )	上电率( $\frac{M_0}{M}$ )	重构误差		
			$X_3$	$X_6$	$X_7$
32	3.13%	16.7%	0.139 7	0.081 6	0.109 4
48	4.69%	25%	0.078 8	0.059 7	0.095 7
64	6.25%	33.3%	0.050 7	0.048 7	0.080 5
80	7.81%	41.7%	0.032 7	0.038 2	0.051 9
96	9.38%	50%	0.028 8	0.031 7	0.045 5
112	10.94%	58.3%	0.025 4	0.026 2	0.036 0
128	12.50%	66.7%	0.022 2	0.025 4	0.029 8
144	14.06%	75%	0.016 3	0.021 2	0.027 5

由图 7 可知,在档距、舞动频率和最大幅值等因素一致的情况下,舞动半波数对输电线路舞动波形的影响是巨大的。

分析表 3 的误差数据可知,基于压缩感知理论的舞动波形重构方法,在观测数目  $M$  为 32 和 48 时,不同舞动半波数的波形重构效果略有差距。但随着观测数目的增加,波形之间的重构误差  $\sigma$  的差距开始缩小,对三种波形均有良好的重构效果。

### 3.3 优化设计

探讨了在监测数目减少到多少数目时,可以用压缩感知算法对舞动波形进行重构。希望尽可能减少所需的传感监测单元,同时保障监测的准确性。

将候选采样点的数目  $M_0$  减小至 80,仅为总数据点的 7.81%。以  $X_3$  为原始信号,在  $t=2$  s 时,观测值  $M$  由低到高,每个不同的观测值仿真演算 50 次,仿真结果如表 4 所示。

由表 4 可知,重构误差随着监测数目的增加而减小。当观测数目较小时,重构效果很不理想,当观测数目大于 38 后,重构效果显著增强,重构误差保持低于 10%。若  $\sigma=8\%$  是在误差允许的范围,则在候选采样点仅为 80,控制监测单元数在 50 左右,观测率仅占总数据点的 5% 时,重构的舞动波形即可满足要求。

表 4  $t=2$  s,  $X_3$  重构误差表

Table 4 Reconstruction error table of  $X_3$  at  $t=2$  s

观测数( $M$ )	观测率( $\frac{M}{N}$ )	上电率( $\frac{M_0}{M}$ )	重构平均误差 $\sigma$
26	2.54%	32.5%	1.341 4
28	2.73%	35%	0.578 2
30	2.93%	37.5%	0.338 3
32	3.13%	40%	0.140 2
34	3.32%	42.5%	0.121 7
36	3.51%	45%	0.117 9
38	3.71%	47.5%	0.101 1
40	3.91%	50%	0.097 9
42	4.10%	52.5%	0.091 0
44	4.30%	55%	0.087 6
46	4.50%	57.5%	0.095 9
50	4.89%	62.5%	0.078 1
55	5.38%	68.75%	0.059 9
60	5.86%	75%	0.055 2
65	6.35%	81.25%	0.048 7

在保证误差满足监测精度的前提下,通过合理地设置候选采样点与观测点的数目,既可以确保重构信号的可靠性与准确性,也可以大大地简化系统。

## 4 结论

针对传感器舞动监测系统要求布置大量的传感器监测单元来预测舞动信息,提出了一种基于压缩感知的架空线路舞动波形重构方法。构造随机测量矩阵获得舞动数据的观测值,并构建了过完备的傅里叶稀疏信号,对数量较少的舞动信号的观测值重构解算获得舞动波形。文章基于 Matlab 软件平台,对档距、舞动频率、舞动半波数、时间等因素各不相同的波形做了大量的数据仿真演示,仿真结果表明,舞动波形重构误差可达到 5%,检验了方法的可靠性与准确性。

文章的创新点在于将压缩感知运用于输电线路舞动监测上,详细地介绍了一种既可以简化传感器的布置也可保障重构波形准确性的测量矩阵的设计思路等。

文章所提的方法在保证重构波形准确有效的前提下可减少舞动监测单元数目,为简化舞动监测系统并推动进一步的应用奠定了理论基础。

## 参考文献

[1] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems,2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.

[2] 刘翌,季剑,施建华,等.高安全性电网在线运行数据

- 自动监测系统[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(11): 106-110, 117.
- LIU Yi, JI Jian, SHI Jianhua, et al. Design of the on-line data automatic monitoring system for high security power grids[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(11): 106-110, 117.
- [3] 刘军, 杨治田, 李旭, 等. 基于稳态特征的输电设备全维度状态监测系统[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(7): 24-29.
- LIU Jun, YANG Zhitian, LI Xu, et al. A full-dimensional status monitoring system for transmission equipment based on steady-state characteristics[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(7): 24-29.
- [4] 严旭. 输电线路舞动在线监测及防舞动技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- YAN Xu. Research on galloping online monitoring and anti-galloping technology of transmission line[J]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [5] 任鹏亮, 谢凯, 陈钊, 等. 输电线路舞动监测技术综述[J]. 河南科技, 2015(16): 129-132.
- REN Pengliang, XIE Kai, CHEN Zhao, et al. Review on galloping monitoring technology for transmission line[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2015(16): 129-132.
- [6] 陈金熠, 范春菊, 胡天强, 等. 考虑架空输电线路状态的线路覆冰监测系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 93-98.
- CHEN Jinyi, FAN Chunju, HU Tianqiang, et al. Study on monitoring system of transmission line icing considering the state of overhead transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 93-98.
- [7] 尹晖, 张晓鸣, 李小祥, 等. 基于视频监控的输电线路舞动信息提取与频谱分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 2889-2895.
- YIN Hui, ZHANG Xiaoming, LI Xiaoxiang, et al. Galloping information extraction and spectral analysis for transmission lines based on video monitoring[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 2889-2895.
- [8] 周伟才, 谭卫成. 高压架空输电线路视频在线监测系统研究[J]. 广东电力, 2011, 24(7): 41-44.
- ZHOU Weicai, TAN Weicheng. Research on on-line video surveillance system of overhead HV transmission lines[J]. Guangdong Electric Power, 2011, 24(7): 41-44.
- [9] 艾精文, 党晓婧, 吕启深, 等. 基于物联网的具有全景功能的全维度设备状态监测系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 122-128.
- AI Jingwen, DANG Xiaojing, LÜ Qishen, et al. Research on full dimension equipment status monitoring system with panoramic function[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 122-128.
- [10] 徐乔笙, 谢维成, 江山, 等. 一种监测母线槽温升信号的无线传感器动态采样策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 106-112.
- XU Qiaosheng, XIE Weicheng, JIANG Shan, et al. A wireless sensor dynamic sampling strategy for monitoring temperature rise signals of busway[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 106-112.
- [11] 滕志军, 张力, 宋锐, 等. 基于无线传感器网络的智能用电在线监控系统[J]. 电子器件, 2017, 40(6): 1567-1570.
- TENG Zhijun, ZHANG Li, SONG Rui, et al. Intelligent power on-line monitoring system based on wireless sensor network[J]. Electron Devices, 2017, 40(6): 1567-1570.
- [12] 王泉智. 基于 RFID 传感器标签的导线舞动在线监测技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- WANG Quanzhi. Online monitoring technology of transmission galloping based on RFID acceleration sensor tags[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [13] 任欢. 基于加速度传感器的输电线路舞动轨迹仿真及监测系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- REN Huan. Research on galloping track simulation and monitoring system of transmission line based on acceleration sensor[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [14] 殷蔚翎, 黄良. 基于倾角传感器及不同杆塔类型的输电线路覆冰监测研究[J]. 电力大数据, 2020, 23(1): 14-20.
- YIN Yuling, HUANG Liang. Researches on transmission line icing monitoring based on motion angle sensors and different types of power tower[J]. Power System and Big Data, 2020, 23(1): 14-20.
- [15] 曹思扬, 戴朝华, 朱云芳, 等. 一种新的电能质量扰动信号压缩感知识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 7-12.
- CAO Siyang, DAI Chaohua, ZHU Yunfang, et al. A new compressed sensing-based recognition method for power quality disturbance signals[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 7-12.
- [16] 郝方舟, 孙奇珍, 沈超, 等. 基于高维随机矩阵的配电网用户侧用电行为分析[J]. 广东电力, 2019, 32(11): 111-119.
- HAO Fangzhou, SUN Qizhen, SHEN Chao, et al. User's electricity consumption behavior analysis in distribution network based on high dimensional random matrix[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(11): 111-119.

- [17] 刘东升, 代盛国, 商学斌, 等. 基于压缩感知理论的缺失数据集下线损预测模型[J]. 广东电力, 2019, 32(2): 80-86.  
LIU Dongshen, DAI Shengguo, SHANG Xuebin, et al. Line loss prediction model under missing data set based on compressed sensing theory[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(02): 80-86.
- [18] 权磊. 压缩感知矩阵设计及其在无线传感器网络中的应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.  
QUAN Lei. Design of structured sensing matrix and the application compressive sensing in wireless sensor networks[D]. Xi'an: Xidian University, 2016.
- [19] 刘豫, 刘佳鑫, 贾云飞, 等. 基于 OMP 算法的舞动监测系统[J]. 测试技术学报, 2019, 33(6): 69-73.  
LIU Yu, LIU Jiaxin, JIA Yunfei, et al. Research on galloping monitoring system based on OMP algorithms[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2019, 33(6): 69-73.
- [20] 易茂. 基于压缩感知的架空输电线路舞动曲线重建研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.  
YI Mao. Transmission line galloping curve reconstruction based on compressed sensing[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [21] 单玥. 基于压缩感知的多传感器信息感知方法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.  
SHAN Yue. Research on multi-sensor information sensing method based on compressed sensing[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [22] 尹立敏, 齐敏, 雷钢, 等. 基于超完备字典的压缩感知电能质量数据重构[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 88-94.  
YIN Limin, QI Min, LEI Gang, et al. Reconstruction of compressed sensing power quality data based on overcomplete dictionary[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 88-94.
- [23] 郭应龙. 输电线路舞动[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 1-21.
- [24] 高彬, 刘林芳, 冯衡, 等.  $\pm 1100$  kV 特高压直流输电线路舞动理论计算研究[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(1): 50-54.  
GAO Bin, LIU Linfang, FENG Heng, et al. Theoretical calculation on galloping of  $\pm 1100$  kV UHVDC transmission line[J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(1): 50-54.
- [25] 赵磊, 俞阿龙, 徐冬平, 等. 压缩感知在传感器节点信息采集中的应用[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(8): 141-143, 147.  
ZHAO Lei, YU Along, XU Dongping, et al. Application of compressed sensing in sensor node information collection[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(8): 141-143, 147.
- [26] 中国人民解放军理工大学. 压缩感知定位技术中的传感器高效部署方法: 中国, 201410758232.3[P]. 2015-03-25.

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2021-03-08

作者简介:

龚 颢(1973—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统自动化技术; E-mail: 18862002046@139.com

赵 峰(1979—), 男, 硕士, 副高级工程师, 研究方向为输电线路可靠性技术; E-mail: 13485289732@139.com

刘建国(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为输电线路监测技术。E-mail: 871951630@qq.com

(编辑 魏小丽)