

「输电线路」

基于加速度传感器的输电线路舞动监测系统研发及应用

文/北京智芯微电子科技有限公司（北京市电力高可靠性集成电路设计工程技术研究中心） 耿亮 王峰 王海宝 李良

输电线路舞动会对输电线路的安全运行构成极大威胁。以加速度传感器为基础设计了输电线路舞动在线监测系统。系统中的舞动监测装置采用与间隔棒一体化的设计方法进行制造，可直接安装于间隔棒上获取导线的舞动状况，并通过无线传输的方式将舞动数据传送到监控中心，利用监控软件进行导线舞动轨迹展示。该系统已在国网辽宁省电力有限公司某220 kV输电线路进行了现场安装应用，验证了系统的有效性及可靠性，提升了一次设备智能化监测水平。

我国高压输电线路分布范围广、线路长，复杂的地形地貌，恶劣的气候条件等因素会对高压输电线路造成不同程度的影响和破坏，国内电力行业每年因上述原因造成的事故时有发生，带来了巨大的经济损失。

在输电线路的各种事故中，偏心覆冰导线在风激励下产生的低频、大振幅自激振动的舞动，会对输电线路的安全运行构成极大威胁，其轻则造成相间闪络、跳闸，重则造成金属夹具损坏，导线断股、断线，杆塔螺栓松动、脱落，甚至倒杆，从而导致重大的电网事故。

对输电线路舞动的监控，传统的采用现场检查的巡视方式必然会消耗大量的人力和物力，而更为重要的是不能及时发现故障或隐患，造成工作的延误，甚至扩大故障范围。

为了能够实现输电线路舞动状况的在线监测和实时信息掌控，本文以加速度传感器为基础设计了输电线路舞动在线监测系统，该系统中的舞动监测装置采用与间隔棒一体化的设计方法，可

直接安装于间隔棒上获取导线的舞动状况。所研发的系统已在国网辽宁省电力有限公司所辖某220 kV输电线路进行了现场安装应用，验证了系统的有效性及可靠性，提升了一次设备智能化监测水平，为输电线路在线监测装置的发展及产品的后续应用推广奠定了基础。

系统构成

本文所研发的输电线路舞动在线监测系统，由安装在间隔棒上的舞动监测装置、安装于输电线路杆塔上的无线数据传输基站和安装于远程应用服务器上的监控软件所构成。系统整体架构如图1所示。

在该系统中，每个间隔棒上安装的舞动监测装置对输电线路的运动状态进行监测，将获取的导线加速度数据经监测装置内置的数据算法软件处理得到线路的舞动位移数据。线路之上安装的多个监测装置形成无线自组网，能实现对复杂线路的自适应分布式测量以及信息的无线接力通信。无线自组网中的数据采用2.4G无线传输的方式传入数据基站后，再经GPRS无线网络上传至网络服务器，监控中心安装的监控软件通过读取网

基金项目：国网信息通信产业集团综合研究开发项目（52680016005X）。

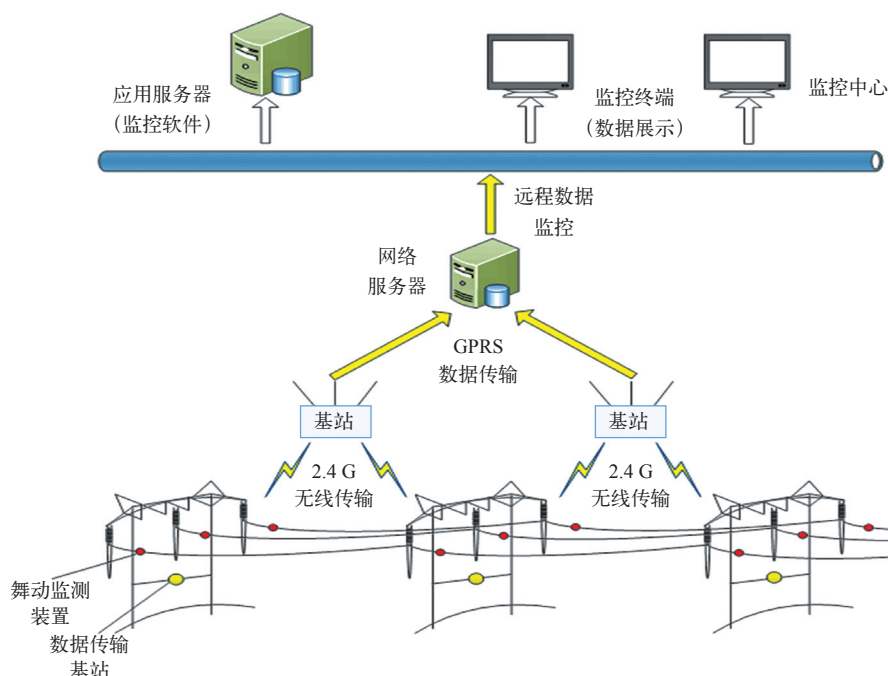


图1 输电线路舞动在线监测系统架构

络服务器中的数据并在监控终端上进行展示，可使运维人员实时掌握线路的舞动状况。

舞动监测装置内部核心部分为加速度传感器和导线舞动算法软件，原理框图如图2所示。加速度传感器用于直接获取导线舞动的加速度信息，算法软件通过对加速度数据的处理，将其转化为导线舞动的位移数据。监测装置内安装的北斗导航芯片可以提供监测装置的位置信息；短距通信芯片可实现传感器与数据传输基站的数据通讯；电源管理模块实现对备用电池的管理。

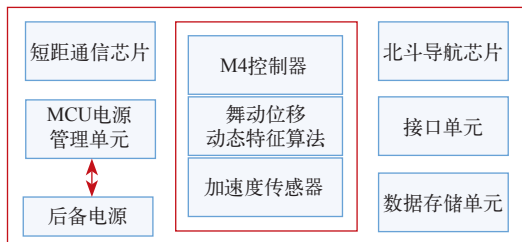


图2 舞动监测装置原理框图

加速度传感器测量导线舞动原理

由于导线是悬挂于两个铁塔之间，因此进行的舞动是一个渐进的、受限的运动。初始状态导线在平衡位置附近做小振幅的摆动，随着风能的积累和空气负阻尼的影响，水平振幅逐渐缩小，垂直振幅逐渐增大，形成不断变大的椭圆运动轨

迹，最终在阻尼的影响下趋于稳定。

采用加速度传感器监测导线舞动的基本原理是：通过对加速度数据求解一次积分，得到导线舞动的速度值；对此速度值再积分一次，得到导线舞动的位移值。

导线在发生舞动时，主要表现为水平方向和垂直方向的运动，因此对导线水平和垂直2个方向的运动做重点分析。

设导线水平运动方向为 x ，垂直运动方向为 y ，则根据运动中加速度 a ，速度 v 和位移 s 之间的关系，可以得到：

x 方向加速度、速度、位移间的关系有

$$v_x(t) = v_{x0} + \int_0^t a_x(t) dt \quad (1)$$

$$s_x(t) = s_{x0} + \int_0^t (v_{x0} + \int_0^t a_x(t) dt) dt \quad (2)$$

y 方向加速度、速度、位移间的关系有

$$v_y(t) = v_{y0} + \int_0^t a_y(t) dt \quad (3)$$

$$s_y(t) = s_{y0} + \int_0^t (v_{y0} + \int_0^t a_y(t) dt) dt \quad (4)$$

在式(1)到式(4)中， $a(t)$ 、 $v(t)$ 和 $s(t)$ 均为连续时域波形。但经过加速度传感器的采样，连续的模拟量转化为离散的数字量，每2个采样的加速度数值之间存在很小的时间间隔，因此需对采样数据进行逐次累加的近似计算。

以水平方向为例，设采样的时间间隔为 Δt ，水平初始加速度为 a_{x0} ，水平初始速度为 v_{x0} ，水

平初始位移为 s_{x0} ；设采样的第 n 时刻的加速度为 $a_x(n)$ ，速度为 $v_x(n)$ ，位移为 $s_x(n)$ ；采样的第 $n-1$ 时刻到第 n 时刻的平均加速度为 $\overline{a_x(n)}$ ，平均速度为 $\overline{v_x(n)}$ ，则在第 n 时刻，水平方向的速度和位移可分别表示为

$$v_x(n) = v_x(n-1) + \overline{a_x(n)} \cdot \Delta t = v_{x0} + \sum_{i=1}^n \overline{a_x(i)} \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$s_x(n) = s_x(n-1) + \overline{v_x(n)} \cdot \Delta t = s_{x0} + \sum_{i=1}^n \overline{v_x(i)} \cdot \Delta t \quad (6)$$

在监测系统中，采样信号的频率远高于导线舞动的频率，因此可以得到如下的近似公式

$$\overline{a_x(n)} \approx \frac{a_x(n-1) + a_x(n)}{2} \quad (7)$$

$$\overline{v_x(n)} \approx \frac{v_x(n-1) + v_x(n)}{2} \quad (8)$$

因此，在第 n 时刻水平方向上的速度和位移可近似表示为

$$v_x(n) = v_{x0} + \sum_{i=1}^n \overline{a_x(i)} \cdot \Delta t \approx v_{x0} + \sum_{i=1}^n \frac{a_x(i-1) + a_x(i)}{2} \cdot \Delta t \quad (9)$$

$$s_x(n) = s_{x0} + \sum_{i=1}^n \overline{v_x(i)} \cdot \Delta t \approx s_{x0} + \sum_{i=1}^n \frac{v_x(i-1) + v_x(i)}{2} \cdot \Delta t \quad (10)$$

同理，在第 n 时刻垂直方向上的速度和位移可近似表示为

$$v_y(n) = v_{y0} + \sum_{i=1}^n \overline{a_y(i)} \cdot \Delta t \approx v_{y0} + \sum_{i=1}^n \frac{a_y(i-1) + a_y(i)}{2} \cdot \Delta t \quad (11)$$

$$s_y(n) = s_{y0} + \sum_{i=1}^n \overline{v_y(i)} \cdot \Delta t \approx s_{y0} + \sum_{i=1}^n \frac{v_y(i-1) + v_y(i)}{2} \cdot \Delta t \quad (12)$$

当导线在正常运行未发生舞动时，处于静止状态。输电线路舞动在线监测装置在监测导线从正常运行状态到舞动状态的过程中，可认为导线在初始时刻的加速度 a 、速度 v 和位移 s 均为零，由此可进一步将上式（9）到（12）化简为

$$v_x(n) = \sum_{i=1}^n \overline{a_x(i)} \cdot \Delta t \approx \sum_{i=1}^n \frac{a_x(i-1) + a_x(i)}{2} \cdot \Delta t \quad (13)$$

$$s_x(n) = \sum_{i=1}^n \overline{v_x(i)} \cdot \Delta t \approx \sum_{i=1}^n \frac{v_x(i-1) + v_x(i)}{2} \cdot \Delta t \quad (14)$$

$$v_y(n) = \sum_{i=1}^n \overline{a_y(i)} \cdot \Delta t \approx \sum_{i=1}^n \frac{a_y(i-1) + a_y(i)}{2} \cdot \Delta t \quad (15)$$

$$s_y(n) = \sum_{i=1}^n \overline{v_y(i)} \cdot \Delta t \approx \sum_{i=1}^n \frac{v_y(i-1) + v_y(i)}{2} \cdot \Delta t \quad (16)$$

舞动监测装置设计

舞动监测装置由传感器模块、电源模块和感应取电单元构成。为了使装置具备良好的安装便捷性，以二分裂导线间隔棒的结构为基础，将监测装置的传感器模块、电源模块与间隔棒进行一体化设计，采用前后扣合的方式固定在间隔棒横臂上，感应取电单元则通过抱箍固定在导线上进行感应取能。设计完成的舞动监测装置整体重量与间隔棒重量之比约为1:5，不会对导线及间隔棒的工作带来严重影响。舞动监测装置安装示意图及产品照片如下图3所示。

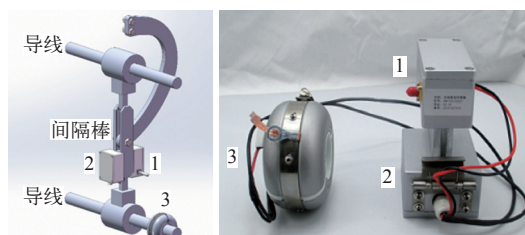


图3 舞动监测装置安装示意图及产品照片

上图3中1为传感器模块，内部安装有一块PCB电路板，监测装置工作所需的加速度传感器、控制器、通信芯片、导航芯片等均集成于此电路板上，从而有效降低了模块整体的尺寸及重量。

传感器模块内的核心器件加速度传感器，选用亚德诺半导体公司MEMS三轴加速度传感器芯片ADIS16240，该芯片可获取 $\pm 19g$ 的加速度数据和最高达4096S/s的数字控制采样率，从而确保了产品运行的稳定性和模块采样的准确性。

设计完成的传感器模块内部器件布置情况如下图4所示。



图4 传感器模块内部器件布置

上图3中2为电源模块，内部装有备用电池和电源管理单元。备用电池可以在导线无电流的情况下继续为传感器模块供电一段时间，延长了传

感器模块的有效工作时长；电源管理单元除实现对后备电源的管理外，其上设计有功率限制与保护电路，确保不会因感应取电的功率过大而造成传感器模块出现过压损坏。

上图3中3为感应取电单元，由两个半圆的磁环组成，外圈用抱箍扎紧，套在导线上。磁环本质上为一个小型的CT装置。感应取电单元工作原理图如下图5所示。

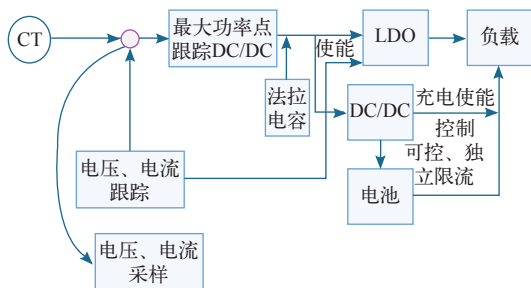


图5 感应取电工作原理框图

感应取电单元中，取电线圈的匝数决定了其能否输出足够的电压为传感器模块供电。此次所研发的传感器模块，最小启动电压为10 V，元器件保护电压为60 V，因此，对取电线圈采用不同匝数时的输出性能进行了3次测试，结果如下表1所示。

表1 相同电流不同匝数下取电线圈输出电压值

输入电流 输出电压 序号	100匝			
	10	30	50	100
1	7	12	21	33
2	6	11	20	31
3	6	11	19	31

输入电流 输出电压 序号	200匝			
	10	30	50	100
1	12	14	16	21
2	13	15	17	21
3	12	15	16	22

输入电流 输出电压 序号	300匝			
	10	30	50	100
1	18	21	45	87
2	19	22	46	90
3	18	22	46	92

输入电流 输出电压 序号	400匝			
	10	30	50	100
1	20	45	89	120
2	21	45	91	118
3	21	46	92	121

表1测试数据显示，将取电线圈的匝数设计为200匝时，感应取电单元的最小输出电压（12 V）和最大输出电压（22 V）均符合要求，而其他匝数的情况下，输出电压均有部分不符合要求。因此将取电线圈的匝数确定为200匝。

为确定取电线圈的线径，选取了4种线径参数进行了500 A大电流下线圈温度随时间变化的测试，结果如下图6所示。

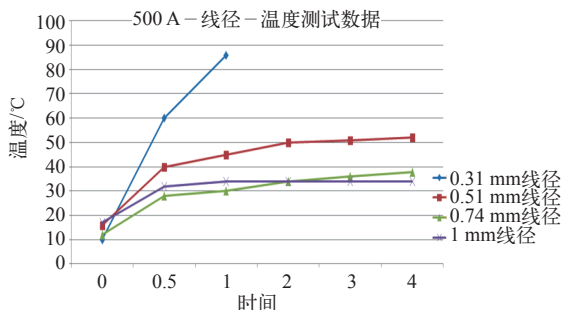


图6 线圈温度随时间变化测试

图6所示测试数据显示，选用1 mm线径的漆包线，经4 h的测试后其最大发热量基本在34 ℃，符合安全要求，因此最终选择的漆包线的线径为1 mm。

对设计完成的舞动监测装置进行了性能测试，导线舞动测量指标如下：

舞动幅值测量量程：0 ~ ±10 m。

舞动频率测量量程：0 ~ 5 Hz。

舞动监测精度：综合误差 < 10%。

现场应用

输电线路舞动在线监测系统在国网辽宁省电力有限公司某220 kV输电线路进行了现场安装应用：在输电线路安装舞动监测装置9套，在邻近杆塔上安装数据传输基站2台及太阳能板（含蓄电池）4块。所安装主要设备的照片如图7所示。



(a) 舞动监测装置安装 (b) 数据基站及太阳能板安装

图7 舞动在线监测系统安装现场照片

图8为输电线路现场所安装的一只舞动监测装置监测到的输电线路加速度原始数据截图。其中加速度传感器的采样速率为100 Hz等间隔采样。

导线运动轨迹数据,微摆动			
时间	X轴(水平方向加速度)	Y轴(垂直方向加速度)	
15:33:20:010	0.0044	-0.0001	
15:33:20:020	0.0086	-0.0002	
15:33:20:030	0.0129	-0.0003	
15:33:20:040	0.017	-0.0004	
15:33:20:050	0.0211	-0.0006	
15:33:20:060	0.0251	-0.0007	
15:33:20:070	0.0289	-0.0008	
15:33:20:080	0.0327	-0.0009	
15:33:20:090	0.0363	-0.001	
15:33:20:100	0.0399	-0.0011	
15:33:20:110	0.0434	-0.0012	
15:33:20:120	0.0468	-0.0013	
15:33:20:130	0.0501	-0.0015	
15:33:20:140	0.0534	-0.0016	
15:33:20:150	0.0565	-0.0017	
15:33:20:160	0.0596	-0.0018	
15:33:20:170	0.0626	-0.0019	
15:33:20:180	0.0655	-0.0021	
15:33:20:190	0.0683	-0.0022	
15:33:20:200	0.071	-0.0023	
15:33:20:210	0.0736	-0.0025	
15:33:20:220	0.0762	-0.0026	
15:33:20:230	0.0787	-0.0028	
15:33:20:240	0.0811	-0.0029	

图8 输电线路加速度原始数据(部分)

加速度传感器在进行采样时,导线在初始时刻一般并非处于绝对的静止状态,对这样的采样数据进行积分后,将在速度中产生一个水平分量,在位移中产生一个线性趋势项。

为去除此趋势项,在算法中对积分后的数值采用最小二乘法进行了插值修正,以消除此趋势项对最终位移结果的影响。

图9为经Matlab处理的输电线路x方向的加速度采样数值。

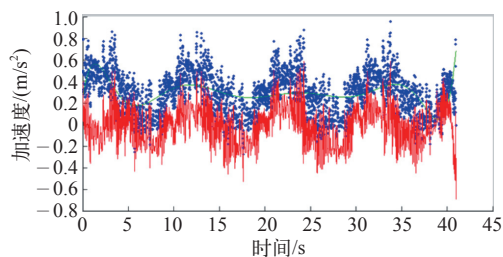


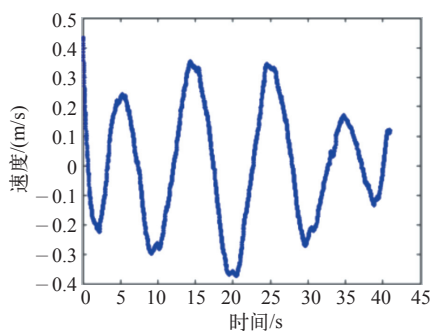
图9 输电线路x方向舞动加速度数据

图9中上部点状数据代表加速度原始采样数据,下部分线状数据代表滤除加速度传感器噪声后的采样数据。

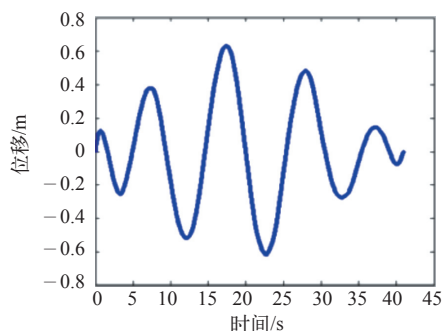
对以上的加速度数值进行积分,并对积分后的数值通过最小二乘法进行修正后,得到的速度波形和位移波形如下图10所示。

通过修正后的位移波形,可以看出位移在零点附近收敛,并显示出导线从开始舞动到舞动停止的过渡过程。

最终计算得到的导线水平方向和垂直方向的位移曲线,通过监控软件进行展示,可直观的显示导线的运动轨迹,为导线舞动的监测提



(a) 速度波形



(b) 位移波形

图10 通过最小二乘法修正后的速度及位移波形

供依据。监控软件显示的导线运动轨迹如下图11所示。

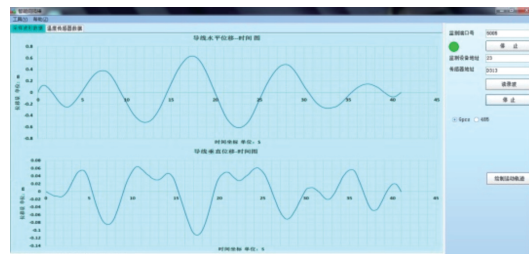


图11 监控软件显示导线运动轨迹

结束语

本文设计的以加速度传感器为基础的输电线路舞动在线监测系统,监测装置可方便的安装于间隔棒上以获得导线的加速度数据,经内置算法软件转化为舞动位移数据后,结合无线通信技术将导线的舞动位移数据传送给监控终端,从而实现了输电线路舞动状况的有效监测。通过现场的实际应用,证明了该系统的有效性,可大力推广应用,对提升输电线路舞动监测的实时性具有重要意义。EA

(收稿日期:2017.11.30)

(编辑:白文亭)