小波变换在测力传感器自动校准中的应用

□李泉[1,2]　刘兴华[3]

（1. 中国铁道科学研究院集团有限公司标准计量研究所，北京 100081，中国

2. 北京华横科技有限公司，北京 100081，中国

3. 中国铁路济南局集团有限公司济南铁路物流中心场站业务部，济南 250001，中国）

【摘　要】为保障铁路工程建设信息化中上传的施工数据真实可靠，提出了一种基于小波变换的测力传感器自动校准方法。以铁路桥梁静载试验中的数字测力传感器为研究对象，首先通过对归一化的数字信号进行离散小波变换；然后查找细节分量中的模极大值实现特征点的识别，并利用特征点获取校准参数；最后将校准参数自动加密实现防篡改。试验结果表明，经自动校准后的测力传感器满足0.5% 的精度要求。该自动校准方法，可保证测力传感器在校准周期内输出数据的准确、可靠，为铁路工程建设信息化提供真实数据保障。

【关键词】小波变换；自动校准；模极大值；防篡改

文献标识码：A　　**文章编号**：1003-1870（2025）02-0016-05

Application of Wavelet Transform in Automatic Calibration of Load Cells

Abstract：In order to ensure the authenticity and reliability of the construction data uploaded in the informatization of railway engineering construction, an automatic calibration method for load cells based on wavelet transform is proposed. According to the research on the digital load cell in the static load test of railway bridges, the discrete wavelet transform is performed on the normalized digital signal; then, the feature points are identified by determining the modulus maxima in detail components, and adopted to obtain calibration parameters; finally, the calibration parameters are automatically encrypted to prevent tampering. The test results reveals that the automatically calibrated load cell meets the accuracy requirement of 0.5%. This automatic calibration method can ensure the accuracy and reliability of the output data of the load cell during the calibration period, providing real data guarantee for the informatization of railway engineering construction.

Keywords：wavelet transform; automatic calibration; modulus maxima; tamper-proofing

引言

随着铁路工程建设信息化在铁路工程项目中的广泛应用，铁路工程建设全生命周期的数据得到真实记录。基于铁路设计、施工、运维BIM 技术的铁路工程建设管理，通过对规模庞大、种类繁多、格式多样的数据系统集成和有效组织，实现了铁路工程建设的协同管理，推动了铁路建设智能化的发展[1-2]。施工检测数据作为其中重要一环，它的准确、可靠成为信息

化建设的基本要求。按照铁路工程预制后张法预应力混凝土简支梁梁场信息化要求，接入到预制梁制造信息化管理系统的张拉、压浆、静载等自动化设备应符合铁路行业或国铁集团相关技术标准，确保张拉、压浆、静载等自动化采集的数据及时准确上传[3-4]。

测力传感器作为获取施工检测数据的重要手段，其精度直接影响检测数据的准确性。以铁路桥梁静载试验为例，试验采用测力传感器获取加荷力值。测力传感器在使用前需要经第三方校准机构校准，精度必须满足GB/T 33010–2016《力传感器的检验》国家标准。测力传感器通过周期校准来保证准确度，周期一般为一年，级别不应低于0.5 级[4]。校准过程一般以测力传感器的校准规程作为依据，过程中需要人工记录各校准点的参数[5]。校准时二次仪表需要开放给用户修改校准参数的接口，因此在测力传感器的使用过程中，无法限制施工单位修改校准参数，数据的真实性无法溯源。

防篡改的测力传感器自动校准的研究，一方面是可以减少校准过程中人工读书的误差；另一方面可以防止校准周期内的人为篡改，保证数据的准确、可靠。测力传感器自动校准的关键是自动识别测力传感器输出的力值序列，提取序列中的特征点，实现校准参数的自动获取。与传统的傅里叶变换相比，小波变换能够提供信号在时间和频率上的局部信息，具有多分辨率分析的特点，广泛应用于信号奇异性及奇异性位置和大小的分析[6]。在交流电的故障识别方面，一般先选取适当的小波函数对采集的信号进行分解得到不同的细节特征，进而做后续的研究处理[7-13]。在风电场短期风速组合预测[14]、桥梁动态称重[15]、混凝土压缩损伤模式识别[16]、海上溢油的油样鉴别[17]、基于温度与应变的桥梁健康监测[18]等研究中，采用适当的小波基函数对采集的信号进行分解，得到信号序列的近似分量和细节分量，从而实现特征点的提取。可见小波变换是一种细节特征提取的有效手段，本文将采用该方法对测力传感器的输出序列进行处理分析。

以铁路桥梁静载试验中的数字测力传感器为研究对象，以JJG391–2009 力传感器检定规程为校准依据，通过小波变换的数据处理方法实现测力传感器的自动校准，通过文件自动加密实现校准参数的防篡改。本文提出的测力传感器的自动校准方法，是为保证测力传感器在校准周期内输出数据的准确，从而保障铁路工程信息化中上传的施工数据真实可靠。

1 基本原理

1.1 小波变换原理

当连续函数$\psi(t)$在$L^2(\mathbf{R})$的平方可积的实数空间中满足$\psi(t)\in L^2(\mathbf{R})$，同时满足下列条件时：

$$\int_{-\infty}^{+\infty}\psi(t)\mathrm{d}t=0 \tag{1}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty}|\psi(t)|^2\,\mathrm{d}t=0 \tag{2}$$

则称函数$\psi(t)$为小波或母小波函数。母小波$\psi(t)$经过尺度伸缩和时间平移后可得小波序列：

$$\psi_{a,b}(t)=\frac{1}{\sqrt{a}}\psi(\frac{t-b}{a}) \tag{3}$$

(3) 式中a，b分别为尺度参数和为平移参数，且满足a、$b\in\mathbf{R},a\neq 0$。则对于任意信号$f(t)\in L^2(\mathbf{R})$，连续小波变换为：

$$\begin{aligned}W_f(a,b)&=f(x)*\psi_{a,b}(x)\\&=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{+\infty}f(t)\overline{\psi}(\frac{x-b}{a})\mathrm{d}x\end{aligned} \tag{4}$$

(4) 式中$\overline{\psi}$为ψ的共轭，取a_0>1，b_0>0，$a=a_0^j$，$b=ka_0^jb_0$，$j\in\mathbf{AE}$, $k\in\mathbf{Z}$则对应的离散小波序列：

$$\psi_{j,k}(t)=\frac{1}{\sqrt{a_0^j}}\psi(\frac{t-ka_0^jb_0}{a_0^j}) \tag{5}$$

在实际计算中，通常采用尺度参数和平移参数二进制离散的方式，即$a_0=2$，$b_0=1$，得到的小波为二进小波，离散小波序列表示为：

$$\psi_{j,k}(t)=\frac{1}{\sqrt{2^j}}\psi(\frac{t-k2^j}{2^j}) \tag{6}$$

于是得到离散小波变换为：

$$\begin{aligned}W(j,k)&=\int_{-\infty}^{+\infty}f(t)\frac{1}{\sqrt{2^j}}\overline{\psi}(\frac{t-k2^j}{2^j})\,\mathrm{d}t\\&=\sum_{\mathbf{R}}f(n)\frac{1}{\sqrt{2^j}}\psi_{j,k}(n)\\&=<f,\psi_{j,k}>\end{aligned} \tag{7}$$

由于内积运算太复杂，通常对信号$f(n)$的j层（$j\in\mathbf{Z}$）离散小波变换采用如下计算方式：

$$\begin{cases}A_{2^j}(n)=\sum_k h_kA_{2^{j-1}}(n-2^{j-1}k)\\W_{2^j}(n)=\sum_k g_kA_{2^{j-1}}(n-2^{j-1}k)\end{cases} \tag{8}$$

(8) 式中，A_{2^j} 与 W_{2^j} 为在2j 尺度下$f(n)$ 的近似分量和细节分量；系数$\{h_k\}(k\in\mathbf{Z})$ 与$\{g_k\}(k\in\mathbf{Z})$ 是由不同的小波函数确定的系数。

1.2　信号突变点检测

假设低通光滑函数$\theta(x)$的导数为带通函数$\psi(x)$，$\psi(x)$满足式（1）、式（2）条件。将$\psi(x)$作为小波变换的母小波，经伸缩后可得尺度函数$\psi_a(x)$。则连续信号$f(x)$在伸缩尺度a上对$\psi(x)$的小波变换为：

$$\begin{aligned} W_f(a,x) &= f(x)*\psi_a(x) \\ &= f(x)*[a\frac{\mathrm{d}\theta_a(x)}{\mathrm{d}x}] \\ &= a\frac{\mathrm{d}[f(x)*\theta_a(x)]}{\mathrm{d}x} \end{aligned} \tag{9}$$

在尺度a下，信号$f(x)$的小波变换为经过带通函数$\theta_a(x)$平滑后、滤波后的一阶导数。尺度a下$W_f(a,x)$中的模极大值点即为局部突变点。

对于离散信号$f(n)$，在2j 尺度下的离散小波变换的细节分量为$W_{2^j}(n)$，则2j 尺度下的局部突变点为序列$W_{2^j}(n)$中的模极大值点。所以，测力传感器的输出力值序列$f(n)$中的突变点检测可通过在$f(n)$不同尺度下离散小波变换的细节分量中查找模极大值来实现。

2　自动校准方法

2.1　自动校准中的局部突变点

本文以铁路桥梁静载试验中的数字测力传感器为研究对象，它内部安装数字测力模块，可直接将模拟信号放大、滤波、A/D 采样后输出数字信号，输出频率为10 Hz。该测力传感器的精度等级为0.1, 额定负载为2 000 kN。

将测力传感器放置到力标准机上，力标准机通过加荷、持荷实现校准的过程如下：首先预加荷至少3 次额定负载；然后选择均匀分布的校准点，按负荷递增顺序逐点校准，在每级负荷加到后需保持载荷一定时间（通常为30 s），记录读数值，直至加荷到额定负载，回退至0 负载。重复上一步骤3 次，取其平均值即为该测力传感器的校准参数。一次加荷过程的测力传感器理论输出曲线如图1 所示。

图1 中仅展示2 个校准点的校准过程，实际校准时一般不少于8 点。在图1 中，0 时刻到t1 为第1 校准点的加荷过程，测力传感器负载值从0 开始按匀速加荷直至到达第1 额定负荷1 000 kN。t1 到t2 为第1 校准点的负载保持过程，保持时间为30 s，在t2 时刻前需记录测力传感器的输出。t2 到t4 为第2 校准点的加荷、保持过程。t4 已完成额定负荷的校准点校准，t4 到t5 为匀速卸荷过程，直至负载为0 kN，再保持30 s 后方可进行下一个校准过程。

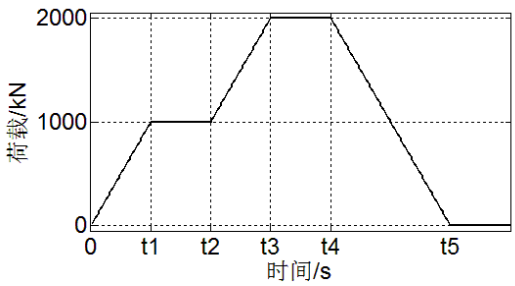


图1　测力传感器输出曲线

自动校准的核心问题就是将0~t5 时刻这些局部突变点自动识别出来。通过选取最优的小波基进行的小波变换方法，可以提高这类间断点的细节辨识度。Daubechies 小波具有正交性及紧支撑性的特点，常用于信号奇异性检测中。通过dbN 小波进行信号处理后的比较，发现采用db4 小波处理后信号细节特征差异性更明显，本文中均采用db4 小波进行信号处理。

2.2　自动校准

基于小波变换自动校准方法，首先对测力传感器输出进行归一化处理，然后通过小波变换识别局部突变点，自动记录校准参数，具体步骤如下：

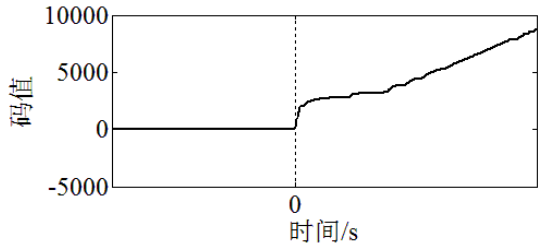
步骤1：测力传感器输出归一化处理。测力传感器输出为数字信号，本文所选测力传感器码值输出范围为[0，180 000]。考虑到数字测力传感器输出的多种形式，首先对接收的数字信号归一化处理，统一归一化到[0，240 000] 的范围，i 时刻测力传感器输出的归一化公式如下：

$$f(i)=\frac{x(i)-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\max}}\cdot 240\,000\,,\ i>0 \tag{10}$$

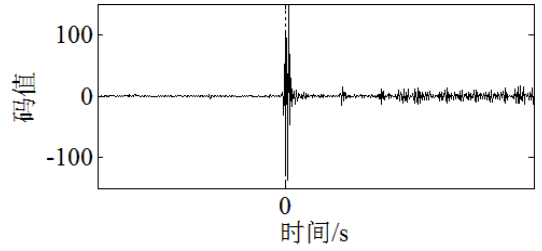
上式中，$x(i)$ 表示当前测力传感器的输出值，$x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 表示测力传感器的额定负载输出和0 负载输出，归一化后得到序列$f(n)$。

步骤2：记录力标准机未加荷时的零点码值。如图2–(a) 所示，0 时刻前力标准机未加荷，取0 时刻前5s 内码值的均值作为零点校准参数Cal_{10}。

步骤3：识别第1 校准点的开始加荷时刻。通过db4 小波对真实测力传感器输出序列一层分解，得到高频小波系数d1 如图2–(b) 所示。通过简单的阈值分析来查找模极大值，从而将信号的突变点识别出来，得到对应图1 中的0 时刻。



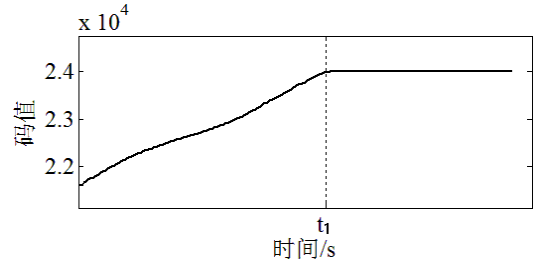
(a) 原始图像



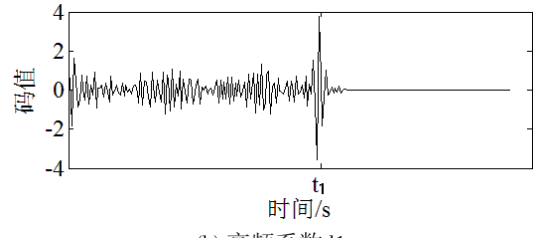
(b) 高频系数d1

图2　零点的识别

步骤4：识别第1 校准点的开始持荷时刻。通过db4 小波分解后得到高频小波系数d1 如图3–(b) 所示。通过阈值判断，即可得到第1 校准点的负荷保持时刻，对应图1 中的t_1 时刻。自t_1 开始计时，第25 s 时自动记录下第1 点的校准参数Cal_{11}。



(a) 原始图像



(b) 高频系数d1

图3　t1点识别

步骤5：重复步骤3 和4，直至获取第N 点所有校准点的校准参数Cal_{1N}。

步骤6：未完成3 次校准前，重复步骤2、3、4、5，获得第2 次校准参数Cal_{20}~Cal_{2N} 和第3 次校准参数Cal_{30}~Cal_{3N}。将3 次各点的校准值取平均，即可作为测力传感器的校准参数。其中，第1 次和第2 次校准卸荷后，仍需记录零点校准参数。需要说明的是，此时不需要卸荷完成再进行步骤2，在第N 点的校准完成后的tN 时刻即可按步骤2 获取零点校准参数。主要原因是每次校准卸荷至0 负载后，需要至少30 s 的保持时间，而步骤2 中一直在更新最近5 s 内的数值，所以无需获取卸荷完成的时刻。

3　防篡改自动校准装置

防篡改自动校准装置作为二次仪表，需要具有数据实时处理能力，同时兼具数据通信、数据加密、图形化界面显示等功能。可采用WinCE 触控屏进行开发，它处理速度快，有丰富的串口（RS232、RS485）、网口进行数据通信，并且支持图形界面开发。所选用的数字测力传感器为RS485 串口通信方式，波特率为9600bps。测力传感器与触控屏通过串口传输线连接，实现二者之间的数据收发。

当测力传感器完成3 次额定负载的预压后，用户选择测力传感器输出的上下限和校准点数，即可进入自动校准过程。最终得到测力传感器的校准参数后，将数据自动加密后保存到文件中。可使用成熟的加密算法，也可自定义加密算法，这里不做展开。

二次仪表工作时，解密校准参数，并按每两校准点建立一次校准方程，将测力传感器发送的原始码值归一化后通过校准方程进行映射，即可显示测力传感器校准后的力值。文中采用测力传感器线性良好，因此采用了一次校准方程。根据测力传感器的不同输出特性，也可用最小二乘法等方式求解N 次多项式校准方程。

4　试验结果与分析

随机选取3 只铁路桥梁静载试验中所用的数字测力传感器进行自动校准试验，编号分别为193990，193995，193998。

采用防篡改自动校准装置作为二次仪表，试验前只需人工输入各校准点及测力传感器输出的上下限，校准过程中无需再人工记录和录入校准参数，

完全由自动校准装置完成。每只测力传感器采用8 点校准，校准后的测力传感器力值输出如表1 所示。

表1　校准后测力传感器力值输出

力标准机负荷	测力传感器193990负荷	测力传感器193995负荷	测力传感器193998负荷
0	0.00	0.00	0.00
200	200.3	200.2	200.5
400	400.1	400.1	400.3
600	600.1	599.9	600.1
800	800.0	799.8	800.2
1 000	999.6	999.6	1 000.1
1 200	1 200.0	1 199.5	1 200.1
1 600	1 599.6	1 599.7	1 600.1
2 000	1 999.8	1 999.2	1 999.6

经校准后的3 只测力传感器，输出负荷误差均在0.5% 以内，满足铁路桥梁静载试验0.5 级的精度要求，如表2 所示。同时由于校准参数已做自动加密，无法修改校准参数，保证了测力传感器校准周期内输出数据的准确、可靠。

表2　测力传感器精度

力标准机负荷(kN)	测力传感器193990误差(%)	测力传感器193995误差(%)	测力传感器193998误差(%)
0	0.000	0.000	0.000
200	0.150	0.100	0.250
400	0.025	0.025	0.075
600	0.017	–0.017	0.017
800	0.000	–0.025	0.025
1 000	–0.040	–0.040	0.010
1 200	0.000	–0.042	0.008
1 600	–0.025	–0.019	0.006
2 000	–0.010	–0.040	–0.020

5　结语

提出一种基于小波变换的测力传感器的自动校准方法，并通过随机选取的3 只铁路桥梁静载试验所用的测力传感器进行了试验验证，得出以下结论。

（1）校准过程以测力传感器的校准规程作为依据，利用db4 小波对归一化数字信号进行小波变换，通过细节分量来提取校准过程中的特征点，并利用特征点来记录校准参数。试验结果表明，所提方法可有效提取特征点，并记录校准参数。整个过程无需人工干预，均由二次仪表自动完成。校准后的测力传感器精度均满足0.5 级的要求。

（2）将获取的校准参数自动加密保存，可有效防在测力传感器的校准周期内人为修改校准参数，实现校准参数防篡改。

（3）防篡改的自动校准装置可保证输出数据的准确、可靠，保证了施工过程数据的真实性，为铁路工程建设信息化提供数据保障。

参考文献

[1] 王同军. 基于BIM 技术的铁路工程建设管理创新与实践[J]. 铁道学报, 2019, 41(01): 1−9.

[2] 刘为群. BIM 技术应用于数字铁路建设的实践与思考[J]. 铁道学报, 2019, 41(03): 97−101.

[3] 中国国家铁路集团有限公司.Q/CR 708−2019 铁路简支梁静载弯曲试验自动控制系统 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.

[4] 国家铁路局. TB/T 2092−2018 简支梁试验方法 预应力混凝土梁静载弯曲试验 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.

[5] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 144−2007 标准测力仪检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.

[6] 刘明才. 小波分析及其应用（第2 版）[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 153−155.

[7] Lidula N W A, Rajapakse A D. Fast and reliable detection of power islands using transient signals[C]// Fourth International Conference on Industrial and Information Systems. Sri Lanka: ICIIS, 2009: 1−6.

[8] Lidula N, Perera A D, Rajapakse.Investigation of a fastislanding detection methodology using transientsignals[C]//Power & Energy Society General Meeting2009. Calgary: IEEE, 2009: 1−6.

[9] 谢东, 张兴, 曹仁贤. 基于小波变换与神经网络的孤岛检测技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(04): 537−544.

[10] 张士文, 张峰, 王子骏等. 一种基于小波变换能量与神经网络结合的串联型故障电弧辨识方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(06): 290−295+302.

[11] 关维国, 姚清志, 高阳, 鲁宝春. 基于db4 小波的配电网暂态电能质量扰动的检测与定位[J]. 电力系

统保护与控制,2015,43(08):102−106.

[12] 任子晖, 刘昊岳, 徐进霞. 基于小波变换和改进Prony 方法的电能质量扰动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(09): 122−128.

[13] 崔杨, 曲钰, 王铮等. 基于Daubechies6 离散小波的风电集群功率汇聚效应的时频特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(03): 664−674+946.

[14] 田中大, 李树江, 王艳红等. 基于小波变换的风电场短期风速组合预测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(09): 112−120.

[15] 赵华, 谭承君, 张龙威等. 基于小波变换的桥梁动态称重系统车轴高精度识别研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(07): 111−119.

[16] 王宗炼, 任会兰, 宁建国. 基于小波变换的混凝土压缩损伤模式识别[J]. 兵工学报, 2017, 38(09): 1745−1753.

[17] 刘晓星, 魏其功, 王思童等. 用离散小波变换建立的Fisher 判别法对海上溢油的鉴别[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(11): 3479−3484.

[18] 刘泽佳, 陈溢涛, 周立成等. 桥梁长期健康监测大数据温度与应变特征及关联性分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(35): 72−79.

作者简介

李泉（1989—），男，汉族，山东莱州人，硕士，工程师。现主要从事计量技术与设备相关工作。