

基于小波降噪的转动惯量测试仪周期 计算改进算法

孙其会^{1,2}, 王兆波², 马骏², 陈亮², 姚国年², 高秀峰¹

(1. 陆军工程大学 石家庄校区装备模拟训练中心, 石家庄 050003; 2. 华阴兵器试验中心, 陕西 华阴 714200)

摘要: 转动惯量是弹药静态特征量的重要参数之一; 在试验中发现, 85 mm 样柱的转动惯量偏差值达到了 0.83%, 无法满足任务需求; 经过对信号检查, 确认为光电传感器采集的信号混有噪声信号所致; 为解决脉冲电压序列信号在截止电压处抖动造成测量周期偏大的问题, 采用小波分析的方法, 利用 sym8 小波进行信号分解、阈值选择算法对信号进行降噪, 使脉冲电压序列曲线得到平滑; 分别对比 haar 小波、db4 小波、coif1 小波系、Bior1.5 小波、sym2 小波、dmey 小波等小波母函数的信号降噪效果, 确认 dmey 小波母函数处理信号信噪比高; 改进了周期提取算法, 提高了测量数据的一致性与精度; 实验结果表明; 文章算法优于原有的算法, 具有精度高、容错能力好等优点, 在转动惯量测量领域具有良好的应用价值。

关键词: 转动惯量; 周期计算; 小波降噪; 改进算法

Improved Algorithm of Periodic Computation for Moment of Inertia Tester Based on Wavelet Noise-reduction

Sun Qihui^{1,2}, Wang Zhaobo², Ma Jun², Chen Liang², Yao Guonian², Gao Xiufeng¹

(1. Equipment Simulation Training Center, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003;
2. Huayin Ordnance Test Center, Huayin 714200, China)

Abstract: The moment of inertia is one of the important parameters of the static characteristic of ammunition. It was found in the test that the deviation value of the rotational inertia of 85mm spline reached 0.83% and the result cannot meet the task requirements. After checking the signal, it is confirmed that the signal collected by the photoelectric sensor is mixed with noise signal. To solve the problem of the voltage pulse sequence signal jittering at the cut-off voltage which cause bigger measured periodic deviation, decomposing signal in sym8 wavelet way and denoising signal by the threshold selection algorithm make the pulse voltage sequence curve more smooth. Denoising effect of haar wavelet, db4 wavelet, coif wavelet, Bior1.5 wavelet, sym2 wavelet, dmey wavelet is compared, and it shows that dmey wavelet is more effective. A new method is adopted to calculate the period, and the consistency and precision of measured data is improved. The result shows that new algorithm is better than existing one, and it has high precision and better fault-tolerant ability. The new algorithm has high application value in measurement for moment of inertia.

Keywords: moment of inertia; periodic calculation; wavelet noise-reduction; improved algorithm

0 引言

转动惯量是弹药的重要静态参数特征量之一。准确测量弹丸的转动惯量能够更好地为弹药试验提供判定数据, 同时也可对弹道分析提供可靠的原始数据^[1]。测量转动惯量的关键在于周期测量, 周期测量的准确性将极大影响最终测试数据的准确性。在试验测试中, 使用某型弹药转动惯量测试仪进行 85mm 样柱校准时, 其测量数据比标准数据偏大 0.83%, 偏差值已经超出设备测试精度, 也不能满足试验要求。经过对设备处理信号的测试, 发现计算机接收到的电压序列包含大量噪声信号。这些噪声信号由数据

采集卡特性以及测量电路、外界光源干扰产生, 导致电压序列局部有剧烈抖动, 引起周期测量出现不稳定现象, 使得测量误差值偏大。

目前, 转动惯量误差分析集中于周期测量、系统阻尼等产生的随机误差作用影响。李彤华等利用弹体转动惯量扭振方程推导出误差公式, 得到空盘转动惯量、标准件转动惯量及被测件转动惯量对误差的影响^[2]。黄德东等同样利用转动惯量扭振方程推导误差公式的方法, 分析了周期测量误差、系统阻尼、空盘周期以及被测件与空盘共振周期对测量精度的影响, 并采用多次测量计算平均值的方法减小周期测量误差^[3]。这些方法对各影响因素的随机误差进行分析, 没有涉及转动惯量测试信号噪声所造成的周期测量系统误差, 因此其方法不能应用于信号噪声所导致偏差问题的解决。

本文从弹药转动惯量测量原理进行研究, 分析周期信号获取过程中的误差来源, 探索出一种改进的减小误差的

收稿日期: 2018-05-08; 修回日期: 2018-06-11。

作者简介: 孙其会(1984-), 男, 山东枣庄人, 工程师, 主要从事弹药试验技术方向的研究。

高秀峰(1973-), 男, 河北藁城人, 副教授, 主要从事网络安全技术方向的研究。

新方法, 并对该方法进行实验验证, 获得了较好的效果。

1 转动惯量及转动周期测量原理

转动惯量是刚体内各指点到旋转轴的距离平方与质点质量乘积的总和。弹丸转动惯量是弹丸结构特征量, 对弹丸的初始扰动、飞行稳定性以及射击散步等有较大影响, 也是进行弹道计算的关键参数之一。

弹丸转动惯量测量包括复摆法、三线摆法和扭摆法等, 其中扭摆法的测试精度高, 误差一般小于 1%, 是应用较为普遍的测量方式。扭摆法的测量原理如图 1 所示, 当转动台偏离平衡位置一定角度后再释放时, 根据刚体定轴转动定律有:

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = 0 \quad (1)$$

其中: J 为转动台绕转轴的转动惯量, θ 为转动平台偏离平衡位置的角度, $\alpha = c/J$ 为空气阻力系数, k 为扭杆的扭度系数。

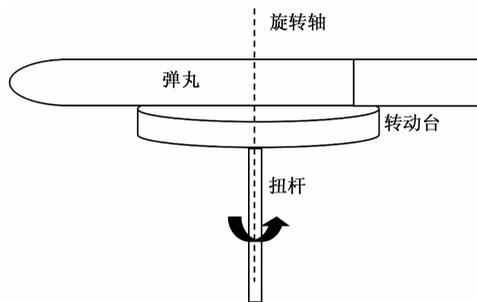


图 1 转动惯量测试仪结构示意图

在实际测量中, 由于转动周期较短, 一般可以忽略空气阻力, 在此前提下求解式 (1) 的微分方程, 得: $\theta = c \sin$

$\sqrt{\frac{k}{J}}t$, 可以看出转动台作简谐振动, 振动周期为 $T = 2\pi / \sqrt{\frac{k}{J}}$, 变换后得:

$$J = \frac{k}{4\pi^2} T^2 \quad (2)$$

由式 (2) 可以看出, 转动惯量和转动周期平方成正比, 因此可以通过测量转动周期来计算转动惯量。由于扭杆扭度系数不易测量且会随着使用时间发生变化, 因此一般使用转动惯量已知的标准样柱来消去该系数。分别测量空盘、标准样柱加空盘以及弹丸加空盘的转动周期数值, 并代入式 (2), 可以计算弹丸的转动惯量, 公式为:

$$J_d = \frac{T_d^2 - T_0^2}{T_b^2 - T_0^2} J_b \quad (3)$$

其中: T_0 为空盘的转动周期, T_b 为标准样柱加空盘的转动周期, T_d 为弹丸加空盘的转动周期, J_b 为标准样柱的转动惯量。由式 (3) 可知, 转动周期的测量精度将直接影响到转动惯量的测量精度。

转动周期的测量, 一般使用发光管与光敏器件配合, 随着连接在转动台上的档杆周期性地遮挡发光管, 测量电路将获得周期性的电压信号, 测量原理如图 2 所示。

PCI 数据采集卡每隔 $10 \mu s$ 采集一次测量电路电压并实时传输到计算机, 计算机软件对获取到的脉冲电压序列进行分析计算出转动周期值。

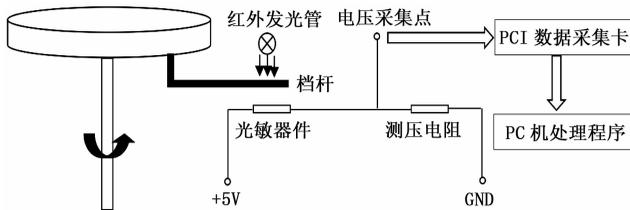


图 2 转动惯量测试仪工作原理图

2 脉冲电压序列特性分析

使用测量设备进行实际测量, 分别测量档杆完全挡住光敏器件时、档杆完全移开时以及空盘作周期摆动时计算机收到的脉冲电压序列, 绘制图像如图 3 所示。

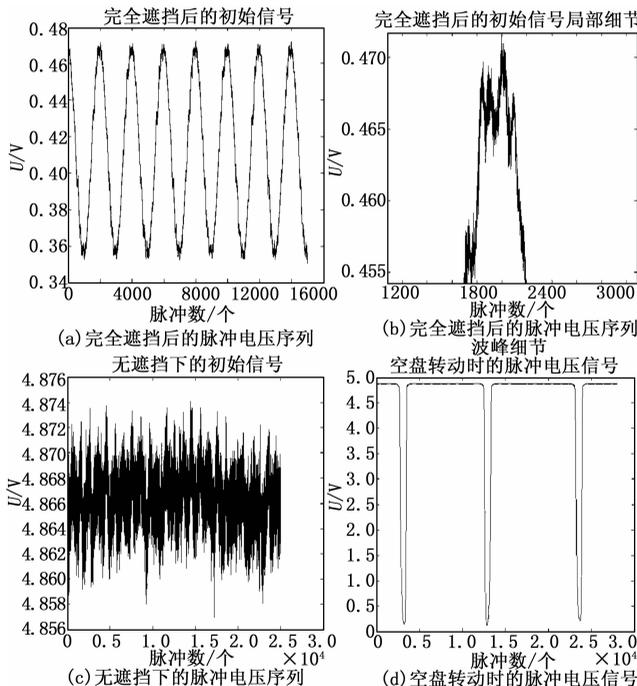


图 3 脉冲电压序列图

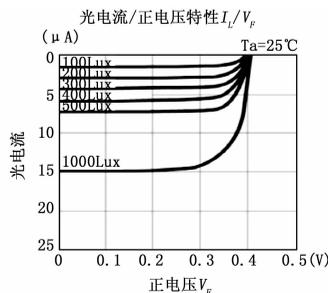


图 4 光电二极管的光电流—正电压特性曲线

由图 3, 可以得出以下结论:

1) 由图 4 可知, 在无光源照射的情况下 (档杆完全遮挡光敏器件), 数据采集卡采集到的电压脉冲序列应为接近 0 的直线; 而图 3 (a) 表明, 在实际情况下得到的电压脉冲

序列为周期约 20 ms (2000 个脉冲)、上下限位约为 0.47 V、0.35 V 的正弦波信号; 这是由数据采集卡的自身特性决定的;

2) 图 3 (b) 表明, 脉冲序列不平滑, 局部有剧烈抖动;

3) 图 3 (c) 表明, 得到的脉冲序列包含大量噪声信号。

因此, 计算周期的源数据—脉冲电压序列本身包含了数据采集卡自身特性以及测量电路、外界光源干扰带来的噪声信号。当噪声信号出现在周期计算截止电压处时, 将导致测量得到的周期数值小于实际周期值, 从而影响转动惯量的测量精度。

3 现有设备的周期计算方法分析

脉冲电压序列的波谷点代表档杆经过发光器件时遮挡程度最大的时刻, 因此应计算相隔 1 个波谷的两个波谷点 (相邻波谷代表档杆从相反方向经过发光器件) 的脉冲个数, 乘以采样间隔 ($10 \mu\text{s}$) 便可得到最精确的转动周期; 而现有设备的周期计算方法里并未抑制脉冲电压信号中的噪声信号, 因此脉冲电压序列局部存在剧烈抖动, 很难准确找到波谷点, 在此约束下, 现有设备采用如图 5 所示的周期计算方法:

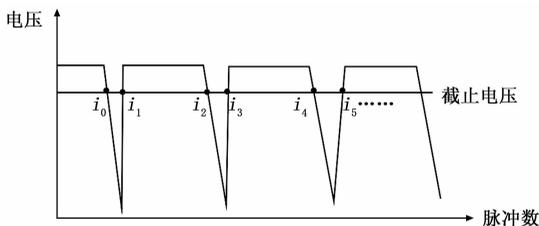


图 5 现有设备的周期计算方法示意图

具体过程如下:

算法: 现有设备周期计算方法

step 1: 在脉冲电压序列里从大于截止电压处开始查找, 直到找到连续 N 个 (现有设备里 N 取 5) 小于截止电压 (下降沿) 的脉冲点, 记录其序号 i_0 ;

step 2: 按照 step 1 的方法依次找到上升沿、下降沿交替的靠近截止电压的脉冲点 i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 、 i_5 …… i_8 等 (则 $i_1 \sim i_4$ 之间为一个周期)。

step 3: 获取 2 个周期值取平均数进行输出: $(i_8 - i_0) / 2 \times 10 \mu\text{s}$ 。

如图 6 所示, 当噪声信号叠加在正常信号上, 且位于算法规定的截止电压处, 则该方法记录的脉冲点序号小于实际序号, 处理的得到的周期数值也小于实际周期, 从而导致转动惯量计算出现较大误差。

4 采用降噪处理的改进周期计算方法

4.1 新方法的提出

以图 3 (d) 的空盘脉冲电压序列为例, 对其进行傅里叶变换, 得到的图像如图 7 所示。

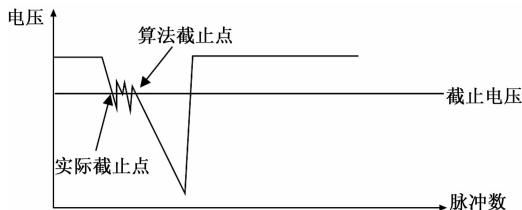


图 6 可能造成较大误差的脉冲电压序列示意图

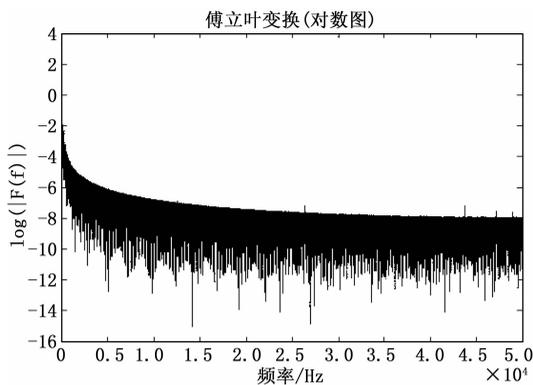


图 7 空盘脉冲电压序列傅立叶变换对数图

由图 7 可以看出, 脉冲电压序列信号包含高频噪声。去除信号中噪声常用的办法是将含噪声信号变换到频域后, 然后设计相应的滤波器如低通、高通或者带通滤波器进行滤波处理。当干扰信号与有效信号频率相同或相近时, 这一方法不能适用。从空盘脉冲电压序列傅立叶变换图可知, 信号与噪声频率相近, 不能采用滤波器进行滤波降噪。

小波分析是空间频率的局部化分析, 通过对坐标轴的平移和伸缩, 克服了窗口大小不随频率变换、缺乏离散正交基等缺点, 达到了高频处时间细分、低频处频率细分, 实现了对信号的精细分析^[4]。由于具有多分辨率分析的特点, 并可以聚焦到信号的任意细节进行多分辨的时频分析, 小波分析被誉为“数学显微镜”。

小波降噪的方法包括模最大值检测法、屏蔽降噪法、阈值降噪法等。模极大值法去噪主要适用于信号中混有白噪声, 且信号中含有较多奇异点的情况。1995 年, Donoho 等创造性地提出利用小波阈值降噪^[5], 此后小波阈值降噪就成为对一维信号进行处理分析的重要方法。目前, 阈值降噪方法是应用最多的降噪方法, 而软阈值法是其中一种降噪方法。用软阈值法降噪得到的纯净信号是原始信号的最优估计, 该估计信号的光滑性至少和原信号一样, 而且不会产生附加振荡。乔玉坤等结合地磁数据规律以及匹配导航特点定小波分解层数方法, 采用小波域软阈值降噪方法, 有效降低了地磁数据中的噪声^[6]。刘军、陈光曦对声发射信号进行三层小波分解, 对比选用软阈值降噪方法, 显著提高了信号处理质量, 保持了信号弱特征^[7]。针对特定信号, 采取改进阈值函数或自适应阈值函数等方法能够获得良好的降噪效果^[8-11]。小波阈值降噪原理如下:

一个含有噪声的离散序列可以表示为如下形式,

$$d_i = f(t_i) + \sigma \cdot z_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

其中： $f(t_i)$ 为真实序列； $t_i = \frac{i}{n}$ ； z_i 为噪声； σ 为噪声级别。

对序列 d_i 进行降噪，就是要消除其中的噪声部分 z_i ，获得 $f(t_i)$ 的估计值 $\hat{f}(t_i)$ ，使其均方误差 MSE 最小，达到去除噪声的目的^[12]。

$$MSE(\hat{f}) = n^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{f}(t_i) - f(t_i))^2 \quad (5)$$

对 d_i 进行离散小波变换，可得

$$Y_i = Y_i(d) = Y_i(f) + Y_i(z) \quad (6)$$

其中： $Y_i(f)$ 和 $Y_i(z)$ 分别为真实序列和噪声的小波变换系数 \hat{Y} 。

随后，利用阈值函数对小波变换系数进行运算，来获得新的小波变换系数 \hat{Y} 。该方法分为软阈值和硬阈值两类。

软阈值函数的表达式为：

$$\eta_r(Y_i) = \text{sgn}(Y_i) \max(|Y_i| - T, 0) \quad (7)$$

其含义是将小波系数 Y_i 的绝对值和阈值 T 进行比较，小于或等于阈值的系数变为 0，大于阈值的系数变为其与阈值的差值，并保持符号不变。

硬阈值的表达式为：

$$\Psi_r(\hat{Y}_i) = \begin{cases} Y_i \cdot 1, & |Y_i| \geq T \\ 0, & |Y_i| < T \end{cases} \quad (8)$$

即当 Y_i 小于给定阈 T 时，将其置零；当 Y_i 大于给定阈值 T 时，将之保留。

然后，用新的小波变换系数 \hat{Y}_i 进行小波重构，得到真实序列的估计值 $\hat{f}(t_i)$ ：

$$\hat{f}(t_i) = \omega^{-1} \hat{Y}_i \quad (9)$$

其中： ω^{-1} 为小波逆变换算子。

使用 Matlab 工具对信号进行小波降噪。仍以图 3 (d) 的空盘脉冲电压序列为例，利用 sym8 小波对信号分解，在分解的第 5 层上，分别利用启发式 SURE 阈值选择算法、软 SURE 阈值选择算法、固定阈值选择算法对信号降噪，降噪后的结果如图 8、图 9 所示。

由图 8、图 9 可以看出，上述几种小波降噪方法都使得脉冲电压序列得到了平滑；对比图 7、图 10 可以看出，小波降噪滤去了部分高频噪声。那么，根据第 3 节的分析，可以通过波谷脉冲点来计算转动周期。本文算法利用相邻两个波谷之间脉冲个数不会小于 1000 个（空盘 1/2 周期约为 10000 个）这一特点，设计周期计算算法如图 11 所示。

具体过程如下：

算法：采用降噪处理的改进周期计算方法

step 1: 对脉冲电压序列进行小波降噪；

step2: 遍历脉冲电压序列，记录历史电压最大值，若当前脉冲点电压小于截止电压，则开始不断更新历史电压最小值，同时记录最小值对应的脉冲序号，直到当前脉冲点大于截止电压，清空最大值、最小值，记此过程中查找到的脉冲序号为 i_0 ；

step 3: 重复 step2，依次找到波谷脉冲点 i_0 、 i_1 、 i_2 、

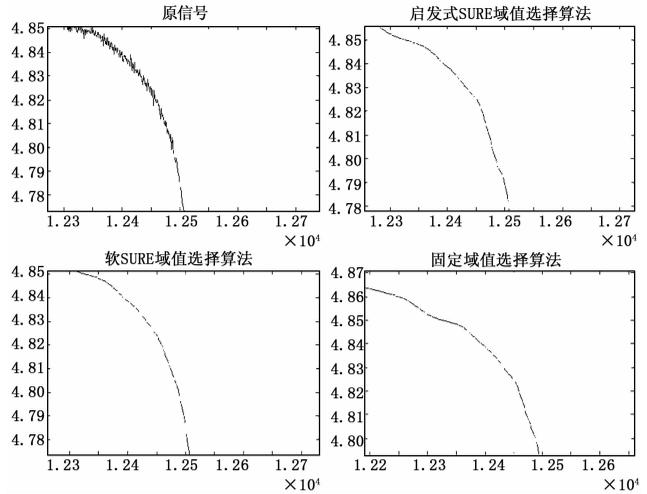


图 8 不同小波降噪算法下的空盘脉冲电压序列细节比较 (下降沿)

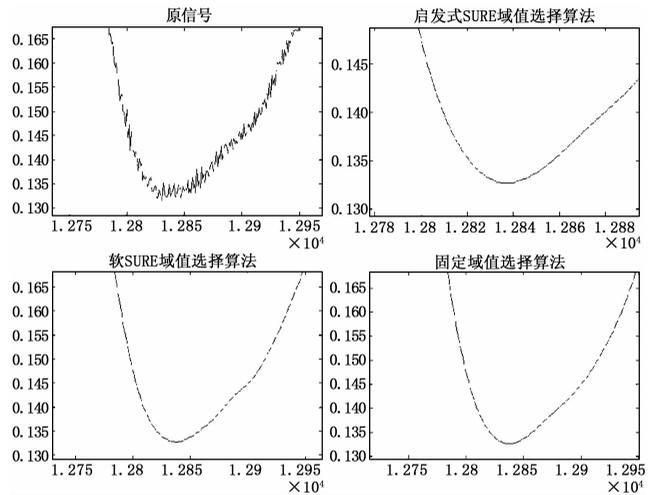


图 9 不同小波降噪算法下的空盘脉冲电压序列细节比较 (波谷)

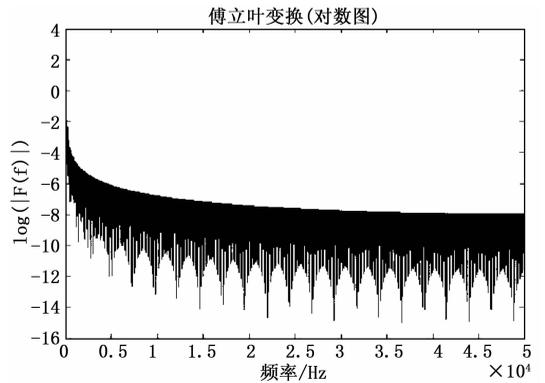


图 10 小波降噪后 (启发式 SURE 域值选择算法) 的空盘脉冲电压序列频谱对数图

i_3 、 i_4 等 (则 $i_0 \sim i_2$ 之间为一个周期)。

step 4: 获取 2 个周期值取平均数进行输出： $(i_4 - i_0) / 2 \times 10 \mu s$ 。

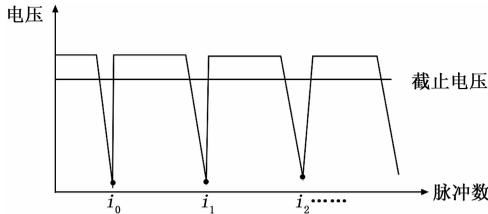


图 11 采用降噪处理的改进周期计算示意图

4.2 小波母函数的选取

在进行小波分析时, 选择不同的小波母函数对同一个问题, 也会产生不同的结果。小波母函数是多样化的, 而且不同的小波母函数具有不同的对称性、消失矩等性质, 因此其表达信号在时域和频域上局部特点的能力也不同。表达信号特点的能力越强, 越有利于信号奇异点的检测。因此, 小波母函数的选择非常重要。

除了比较小波函数本身的正交性、对称性等, 还要注意具体应用环境的制约。MATLAB 中提供 7 种离散小波系: haar 小波系、db 小波系、sym 小波系、coif 小波系、Bior 小波系、rbio 小波系、dmey 小波系共 50 余种。为了寻求最优的小波母函数以便于更好地降噪, 本文对实际试验获取的周期数据采用这 50 余种小波母函数进行降噪处理, 并按式 (10) 计算降噪后的信噪比 SNR。

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^n S_i^2}{\sum_{i=1}^n (S'_i - S_i)^2} \quad (10)$$

其中: S' 为含噪信号; S 为纯净信号。

小波降噪后的信噪比越高, 说明降噪效果越好。以 85、100、105 样柱作为被测物为例, 表 1 给出了几种小波母函数处理被测物转动周期时的信噪比。本文选取并列出了 7 种小波母函数进行计算, 结果如表 1 所示。

表 1 多种小波母函数的信噪比对比

被测样柱 \ 小波母函数	85 样柱	100 样柱	105 样柱
haar	66.72	66.96	67.25
db4	71.13	70.85	70.36
bior1.5	66.78	66.93	67.23
coif1	71.05	70.47	70.92
sym2	71.05	70.46	70.91
rbio4.4	71.20	70.53	71.02
dmey	71.22	70.53	71.04
.....			

由表 1 可以看出, 选择 dmey 小波母函数时的信噪比较高, 说明其降噪效果较好, 同时进行周期计算时也更为可靠。

4.3 新旧算法对比实验

使用多个不同样柱对新、旧两种周期计算方法进行对比, 采用 dmey 小波母函数, 对比结果如表 2、表 3 所示。

由表 2、表 3 可以看出, 使用 dmey 小波母函数对测试信号进行处理, 得到的周期方差值变小, 测量数据结果一

致性较好; 从相对误差来看, 使用新算法的相对误差减小, 85 mm 样柱相对误差由 0.83% 降至 0.45%, 122 mm 样柱、152 mm 样柱分别降低 0.17%、0.16%, 其他样柱误差下降幅度更大, 因此通过小波降噪后计算得到的转动惯量计算精度也较原有算法高。

表 2 新、旧周期计算算法下的测量周期数据一致性对比

被测样柱	测量周期方差 ($10^{-8} s^2$)	
	旧	新
75 样柱	6.89	4.13
85 样柱	1.21	0.15
92 样柱	5.41	5.08
100 样柱	2.06	0.72
105 样柱	9.06	0.39
122 样柱	8.64	8.08
130 样柱	7.82	6.17
152 样柱	7.61	6.55

表 3 新、旧周期计算算法下的转动惯量误差对比

被测样柱	转动惯量 J_a (赤道) / ($kg \cdot m^2$)		相对误差 / %		
	理论值	计算值		旧	新
		旧	新		
75 样柱	0.01778	0.01770	0.01777	0.45	0.06
85 样柱	0.04160	0.04195	0.04179	0.83	0.45
92 样柱	0.004237	0.004250	0.004238	0.31	0.02
100 样柱	0.09281	0.09302	0.09282	0.23	0.01
105 样柱	0.09681	0.09691	0.09678	0.10	0.03
122 样柱	0.1217	0.1221	0.1219	0.33	0.16
130 样柱	0.3301	0.3228	0.3299	0.39	0.06
152 样柱	0.4316	0.4332	0.4307	0.37	0.21

5 结论

本文对转动惯量测量原理进行了分析, 发现转动周期的测量会直接影响转动惯量测量的精度, 而测量仪器在获取转动周期值时采用的原始脉冲电压序列数据包含了大量噪声信号, 从而造成测量误差; 通过小波降噪可以降低脉冲电压序列中的噪声信号, 在此基础上提出了一种先降噪再采用波谷计数法的周期计算方法; 通过实验确定了降噪效果最好的小波母函数, 并对新、旧算法进行对比。实验结果表明, 本文提出的采用降噪处理的改进周期计算方法, 其数据一致性及精度均优于旧算法, 可良好地应用于转动惯量测量领域。

参考文献:

- [1] 中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑委员会. 弹药准备与测量技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [2] 李彤华, 朱占刚, 尚春民, 等. 扭振法测弹体转动惯量的误差分析 [J]. 长春理工大学学报, 2007, 30 (3): 64-65.
- [3] 黄德东, 吴斌, 刘建平. 扭摆法测量导弹转动惯量的误差分析 [J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29 (5): 77-78.