

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104161

磁悬浮陀螺转子信号的局部均值分解降噪研究*

刘迪 杨志强 王德娟 李航

(长安大学地质工程与测绘学院 西安 710061)

摘要:磁悬浮陀螺转子电流信号对环境变化高度敏感,信号采样过程中不可避免会引入噪声,针对该问题提出一种基于局部均值分解(local mean decomposition, LMD),融合豪斯多夫(Hausdorff)距离与阈值降噪(threshold denoising, TD)的算法以减弱噪声干扰。首先对原始信号进行局部均值分解,得到若干乘积函数(PF)分量和一个余量,然后根据各PF分量与原始信号间的豪斯多夫距离判定噪声、信号分量,再对噪声分量进行阈值处理,最后将阈值处理后的噪声分量、信号分量及余量进行叠加得到重构信号,实现陀螺仪转子电流信号的降噪。仿真实验结果表明,重构信号的信噪比相对于原始信号平均提高了12.86 dB,均方根误差平均降低了 9.25×10^{-6} A;实测信号降噪结果表明,该降噪算法对四条导线边的滤波增益分别为40.0%、93.5%、30.8%和50.0%。

关键词:磁悬浮陀螺仪;转子电流信号;局部均值分解;信号降噪

中图分类号: P24 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.1

Research on noise reduction of rotor signal of maglev gyroscope based on local mean decomposition

Liu Di Yang Zhiqiang Wang Dejuan Li Hang

(School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: The rotor current signal of maglev gyro is highly sensitive to environmental changes, therefore, noise will inevitably be introduced in the process of signal sampling. To solve this problem, an algorithm based on local mean decomposition (LMD) and fusion of Hausdorff distance and threshold denoising (TD) is proposed to reduce noise interference. Firstly, the original signal is decomposed into several PF components and a margin. Then, the noise and signal components are determined according to the Hausdorff distance between each pf component and the original signal. Then, the noise component is denoised by threshold. Finally, the noise components, signal components and margin after thresholding are superimposed to obtain the reconstructed signal, so as to realize the reconstruction of the gyroscope rotor current signal Noise reduction. The simulation results show that the signal-to-noise ratio of the reconstructed signal is 12.86 db higher than that of the original signal, and the root mean square error is 9.25×10^{-6} A lower than that of the original signal. The de-noising results of measured signals show that the filtering gains of the de-noising algorithm for four wire sides are 40.0%, 93.5%, 30.8% and 50.0% respectively.

Keywords: maglev gyroscope; rotor current signal; local mean decomposition; signal noise reduction

0 引言

以全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)为代表的诸多空间对地观测技术对卫星信号的稳定性要求较高,在卫星受限空间内如室内、地下等

场景难以发挥其自主定向的作用,与之相比,陀螺仪作为惯性定向技术的重要代表,有着不可替代的技术优势。由于陀螺技术的军事敏感性,在高精度陀螺技术方面相关国家对我国实施技术封锁与产品禁运,在此背景下长安大学测绘与空间信息研究所与航天十六所自主研发出我国首台GAT高精度磁悬浮陀螺全站仪,通过磁悬浮支

承技术使得高速旋转的陀螺感应地球自转角动量,并利用光电力矩反馈控制技术对陀螺角动量轴与子午线夹角进行精确测量以确定任意测线真北方位角^[1],广泛应用于隧道、海底沉管、矿山、城市地铁等地下、海下工程等国民生产建设。

磁悬浮陀螺仪观测数据的核心是定、转子电流信号,采样电流信号的质量直接影响陀螺定向精度。对多组采样信号进行时间序列分析的结果表明,固定于陀螺灵敏部壳体内部的力矩器定子系统采集到的定子电流信号对测量环境变化不敏感,从数据分布到数量级都具有明显的一致性,而在测量过程中随陀螺同步悬浮、下落且与陀螺马达房固连的力矩器转子系统采集到的转子电流信号对环境变化具有显著敏感性,具体表现出局部白噪声特征与整体趋势性特征^[2]。鉴于磁悬浮陀螺仪在实际工作时不可避免地会受到风振、温度、磁场、湿度等环境因素的干扰,导致力矩器转子系统采样到的转子电流信号受到“污染”,从而无法保证陀螺定向结果的可靠性,故对磁悬浮陀螺仪转子电流信号进行降噪研究是极其必要的。

目前用于磁悬浮陀螺转子电流信号降噪的方法主要有经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和小波变换(wavelet transform, WT)。文献[3]结合 EMD 和希尔伯特边缘谱分析对转子电流信号进行处理,并在内外符合精度方面对降噪的有效性进行了验证,但 EMD 对信号处理后产生了模态混叠现象,对本征模态函数(IMF)分量直接阈值过滤容易造成噪声去除不彻底。文献[4]结合 EMD 和改进的阈值方法用于工业超声信号降噪,相比于直接过滤噪声分量,该方法提高了降噪信号的信噪比,但无法对 EMD 的模态混叠现象进行削弱。文献[5]采用 EMD 的改进方法集成经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)方法结合空域相关算法用于滚动轴承故障诊断,表明 EEMD 可削弱 EMD 的模态混叠现象,取得有效的噪声抑制效果,但重构误差的出现会对降噪结果产生影响。文献[6]采用 WT 处理磁悬浮陀螺转子电流信号,有效剔除了由外界振动等因素产生的部分噪声影响,但 WT 的降噪效果与小波基、分解层数以及阈值函数的选择紧密相关,在降噪稳定性方面还需进一步研究。文献[7]提出了一种关于 WT 重构最佳层数确定方法,通过变形测量数据处理验证了该方法的有效性。文献[8]针对磁悬浮陀螺转子电流信号噪声处理研究了 WT 分解层数与降噪效果之间的规律,确定了在陀螺转子电流信号降噪时小波分解层数的安全范围,但未实现完全自适应降噪。

Smith^[9]于 2005 年提出局部均值分解(local mean decomposition, LMD)并应用于脑电信号分析,文献[10]将 LMD 方法与 EMD 方法做了对比,结果表明 LMD 方法

在抑制端点效应、减少迭代次数和保留信号的完整性等方面优于 EMD。LMD 对于处理非线性非平稳信号具有较好的适应性,在信号分解、冗余消除方面表现出了较强的优越性,已经被广泛应用于变形监测数据处理^[11]、图像拼接监测^[12]、模拟电路诊断^[13]等方面。

本文将 LMD 用于复杂环境下磁悬浮陀螺转子电流信号的自适应分解,提出一种基于局部均值分解,融合豪斯多夫(Hausdorff)距离及阈值降噪(threshold denoising, TD)的新算法 LMD-HD-TD,有效减弱了复杂环境对转子电流信号的干扰,提高了磁悬浮陀螺仪定向结果的可靠性。

1 原理与方法

1.1 局部均值分解

LMD 方法可以自适应地将一个复杂的非平稳信号分解为若干个瞬时频率具有物理意义的乘积函数(product function, PF)之和,从而获得原始信号完整的时频分布^[14]。如式(1)所示任意信号经 LMD 分解可得到。

$$x(t) = \sum_{p=1}^k PF_p(t) + R_k(t) \quad (1)$$

式中: $PF_p(t)$ 为 $x(t)$ 经 LMD 分解后得到的第 P 个 PF 分量, $R_k(t)$ 为余量。

1.2 Hausdorff 距离

原始信号经 LMD 分解后得到一系列 PF 分量,通过计算各 PF 分量与原始信号之间的 Hausdorff 距离来判定 PF 分量中的噪声与信号,实现对 PF 分量中噪声的准确定位。德国数学家 Felix Hausdorff 提出的 Hausdorff 距离顾及了空间目标的形状差异和相对位置差异,可作为空间目标整体形状的距离度量,被广泛应用于衡量两个集合之间的整体差别^[15]。

Hausdorff 距离可作为描述两个点集之间相似程度的一种度量,假设有两组点集 $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots\}$, $B = \{b_1, b_2, b_3, \dots\}$, 则这两个点集之间的 Hausdorff 距离定义为:

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) \quad (2)$$

式中: $h(A, B)$ 和 $h(B, A)$ 为单向 Hausdorff 距离。

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (3)$$

$$h(B, A) = \max_{b \in B} \min_{a \in A} \|b - a\| \quad (4)$$

式中: $\| \cdot \|$ 表示点集 A 和点集 B 之间的距离范数。

单向 Hausdorff 距离 $h(A, B)$ 表示对于集合 A 中的每一个点 a_i , 求出其到集合 B 的最小距离, 将所有最小距离进行排序后得到的最大值。同理 $h(B, A)$ 表示对于集合 B 中的每一个点 b_i , 求出其到集合 A 的最小距离, 将所有最小距离进行排序后得到的最大值。单向 Hausdorff 距离 $h(A, B)$ 和 $h(B, A)$ 中的较大者为双向 Hausdorff 距离

$H(A, B)$, 双向 Hausdorff 距离 $H(A, B)$ 是 Hausdorff 距离的最基本形式^[16]。本文通过 Hausdorff 距离判定 PF 分量中噪声、信号分量, PF 分量与原始信号之间的 Hausdorff 距离序列中第 1 个极大值对应的 PF 分量与原始信号具有最大不匹配度, 将该分量作为噪声与信号的分界点。

1.3 阈值降噪

利用 Hausdorff 距离筛选出 PF 分量中的噪声分量后, 采用小波阈值降噪方法对噪声分量进行处理。

小波阈值降噪需要确定阈值函数、小波基以及阈值。经典小波阈值函数包括式(5)确定的软阈值函数和式(6)确定的硬阈值函数^[17]。软阈值函数具有良好的连续性和平滑性, 但容易将阈值估计产生的误差扩展到所有系数上, 导致重构信号有偏^[18]。硬阈值函数对小于阈值的部分进行处理, 对大于阈值的部分保留, 重构信号会出现局部震荡但结果无偏。虽然硬阈值相比软阈值会产生局部抖动, 但考虑到磁悬浮陀螺转子电流信号直接参与方位角推算, 为使重构信号更加逼近真实信号, 故本文中选择不硬阈值函数作为阈值函数。

$$\widehat{PF}_p(i) = \begin{cases} \text{sign}(PF_p(i)) | PF_p(i) - \lambda |, & | PF_p(i) | \geq \lambda \\ 0, & | PF_p(i) | < \lambda \end{cases} \quad (5)$$

$$\widehat{PF}_p(i) = \begin{cases} PF_p(i), & | PF_p(i) | \geq \lambda \\ 0, & | PF_p(i) | < \lambda \end{cases} \quad (6)$$

在目前信号降噪领域中, 选择小波基没有固定的理论标准, 常见小波基包括 Coif、Sym 和 Db。考虑到 Sym 小波基良好的对称性和连续性^[19], 更适用于磁悬浮陀螺转子电流信号在复杂环境下不可预测和突发跳变的特点, 故本文中采用 Sym 小波基。

根据 3 倍中误差准则, 本文中选择不阈值 λ 为 3σ , 由于噪声方差一般是未知的, 可取 PF 分量在各分解阶数下绝对值的中值, 再除以 0.674 5 作为噪声方差的估计值 $\hat{\sigma}$ 。

针对复杂环境下采样得到的磁悬浮陀螺转子电流信号, 本文提出的融合局部均值分解、豪斯多夫距离以及阈值降噪算法的处理流程如下:

1) 对磁悬浮陀螺转子电流信号进行 LMD 自适应分解, 得到一系列 PF 分量和一个余量 R;

2) 计算各 PF 分量与原始信号之间的 Hausdorff 距离, 判定 Hausdorff 距离序列中第 1 个极大值点对应的 PF 分量为噪声与信号的分界点, 将分界点(包含分界点)之前的 PF 分量认定为噪声分量;

3) 对噪声分量进行阈值降噪处理, 同时保持信号分量和余量不变;

4) 对信号分量、余量和完成降噪处理后的噪声分量

进行叠加处理, 实现降噪信号的重构;

5) 对重构信号的降噪效果进行评价。

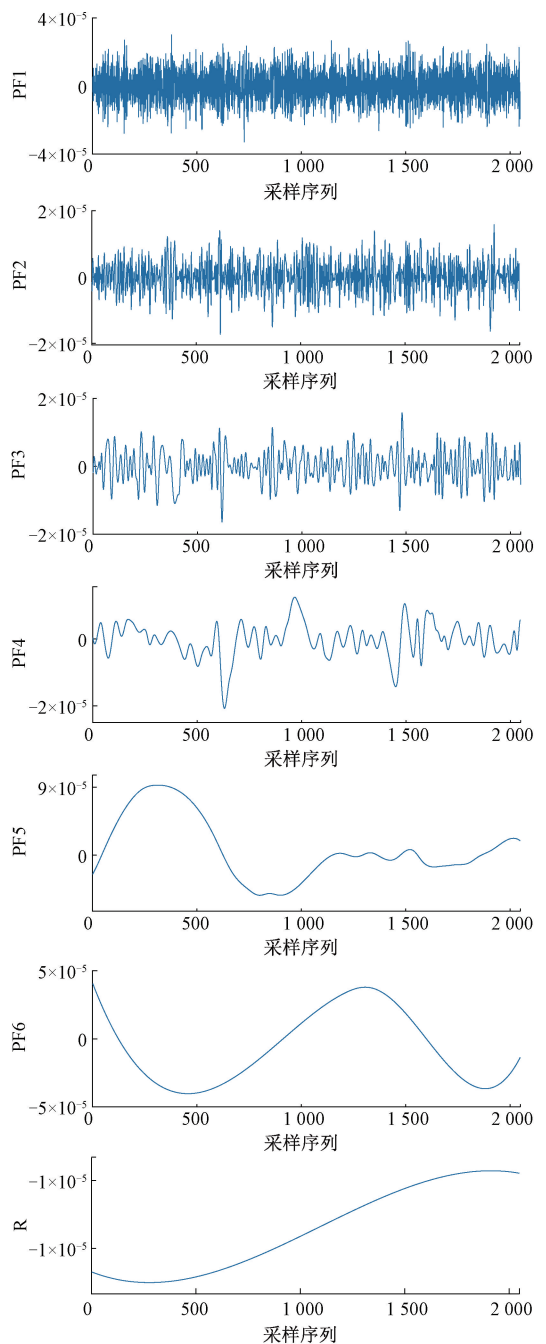


图 1 仿真信号的 LMD 分解结果

Fig. 1 LMD decomposition result of simulation signal

2 仿真信号降噪有效性分析

为了验证本文提出的 LMD-HD-TD 降噪方法的有效性, 选择典型测试信号 Heavy sine 信号进行仿真实验, 根据磁悬浮陀螺转子电流信号的特点, 设置仿真信号的采

样频率为 300 Hz, 幅度为 $-8 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-5}$ A, 采样周期为 3.33×10^{-3} s, 带宽为 150 Hz, 并且对 Heavy sine 信号分别附加标准差为 1.5、2、2.5、3、3.5、4 的高斯白噪声得到不同噪声水平下的含噪信号, 采样点数为 2 048。分别采用 WT 和本文 LMD-HD-TD 降噪方法对含噪仿真信号进行处理, 并比较两种方法的降噪效果。在此以标准差为 3 的含噪 Heavy sine 信号的降噪处理为例进行对比。

采用 LMD-HD-TD 方法对信号进行降噪处理时, 对含噪 Heavy sine 信号进行 LMD 分解的结果如图 1 所示, 得到 6 阶 PF 分量和 1 阶余量。由表 1 所示的 Hausdorff 距离结果可知, Hausdorff 距离第一个极大值点为 8.7026×10^{-5} , 故 PF3 为噪声与信号的分界点, 即 PF1~PF3 为噪声分量, PF4~PF5 为信号分量。对 PF1~PF3 进行阈值处理后, 将降噪后的噪声分量、信号分量及余量叠加得到重构仿真信号。采用 WT 方法对含噪仿真信号进行降噪处理时, 小波基选择 Sym10, 根据文献[20]提出的利用复合评价指标确定最佳小波分解层数的方法可知该仿真实验中小波分解层数为 4 时, WT 方法可取得较好的降噪效果。LMD-HD-TD 和 WT 两种方法的降噪结果如图 2 所示。

表 1 仿真信号与各 PF 分量的 Hausdorff 距离

Table 1 Hausdorff distance between simulation signal and each PF component

PF 分量	HD/($\times 10^{-5}$)
PF1	6.638 6
PF2	8.042 0
PF3	8.702 6
PF4	8.278 5
PF5	4.920 4
PF6	6.300 7

表 2 WT 与 LMD-HD-TD 降噪结果的指标对比 (仿真信号)

Table 2 Comparison of noise reduction results between WT and LMD-HD-TD (simulation signal)

仿真信号标准差		1.5	2	2.5	3	3.5	4	均值
未降噪信号	SNR/db	4.216 4	6.715 1	8.653 3	10.237 0	11.575 9	12.765 7	9.027 2
	RMSE/($\times 10^{-6}$ A)	11.988 2	11.988 2	11.988 2	11.988 2	11.988 2	11.988 2	11.988 2
WT 降噪	SNR/db	16.362 1	18.763 9	20.580 5	22.020 06	23.194 6	24.172 3	20.848 9
	RMSE/($\times 10^{-6}$ A)	2.961 2	2.994 5	3.036 7	3.087 5	3.146 4	3.213 1	3.073 2
LMD-HD-TD 降噪	SNR/db	18.356 7	20.426 8	21.794 4	22.763 9	23.639 0	24.350 1	21.888 5
	RMSE/($\times 10^{-6}$ A)	2.353 6	2.472 7	2.640 6	2.834 0	2.989 5	3.148 0	2.739 7

由表 2 可知, 对不同噪声水平下的仿真信号进行降噪处理后, WT 方法和 LMD-HD-TD 方法都可实现有效降噪, 仿真试验结果表明经 LMD-HD-TD 降噪得到的重构信号相较于 WT, 平均 SNR 提高了 1.04db, 平均 RMSE 降低了 0.33×10^{-6} A, 本文 LMD-HD-TD 方法表现出的降噪效果优于传统 WT 方法。

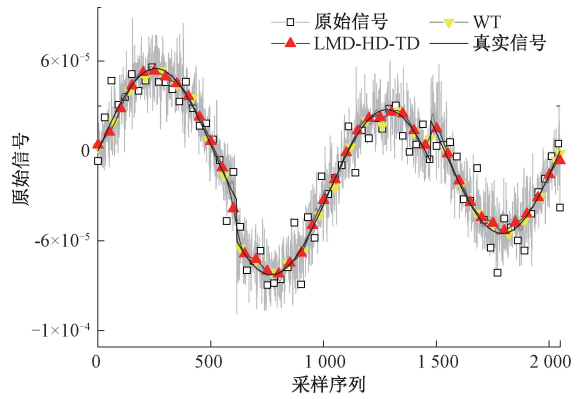


图 2 WT 与 LMD-HD-TD 降噪效果对比 (仿真信号)

Fig. 2 Comparison of noise reduction effect between WT and LMD-HD-TD (simulation signal)

由图 2 可知, 采用 LMD-HD-TD 方法和 WT 方法对含噪 Heavy sine 信号都可实现较好的降噪效果, 两种方法都在很大程度上减弱了信号的噪声, 但经 LMD-HD-TD 进行降噪得到的重构信号与 WT 的降噪结果相比, 具有更好的平滑性, 去除噪声的程度以及与真实信号的吻合度更好。

信号处理领域常用的评价指标为式(7)所示的信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 和式(8)所示的均方根误差 (root mean squared error, RMSE), 本文选择 SNR 和 RMSE 对两种方法的降噪效果进行评价, 结果如表 2 所示。

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^n f(i)^2}{\sum_{i=1}^n (f(i) - F(i))^2} \right) \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f(i) - F(i))^2}{n}} \quad (8)$$

式中: $f(i)$ 与 $F(i)$ 分别代表原始信号与降噪后的重构信号。

3 实测信号降噪有效性验证

随着隧道内导线测量距离不断增加, 角度观测误差也会不断累积, 进一步影响到超长隧道的精准贯通, 故本文以某次贯通工程测量导线网中进行陀螺检核的 4 条导

线边 T1~T4 作为实验对象,进一步验证 LMD-HD-TD 方法在实际应用中的降噪有效性。T1 边的陀螺架设点为强制对中装置,且进行观测时无风无车辆,附近环境干扰较小,采样序列平稳;T2、T4 边陀螺架设点观测条件类似,定向测量过程中持续受到风的扰动,采样序列表现出不断抖动的特点;T3 边陀螺架设点位于隧道中某交叉路口附近,主要环境干扰为车辆偶尔经过引发的振动,采样

序列表现出间歇的抖动现象。在 T1~T4 导线边上分别进行陀螺定向测量,陀螺力矩器对转子电流信号进行实时采集与记录,采样周期为 3.33×10^{-3} s,通过读取对应的 DAT 文件,文件号分别为 60、65、70 和 89,可得到的采样转子电流信号如图 3 所示。以 T1 导线边采样信号为例,分别采用本文 LMD-HD-TD 和传统 WT 方法对转子电流信号进行降噪处理,并对比两种方法的降噪效果。

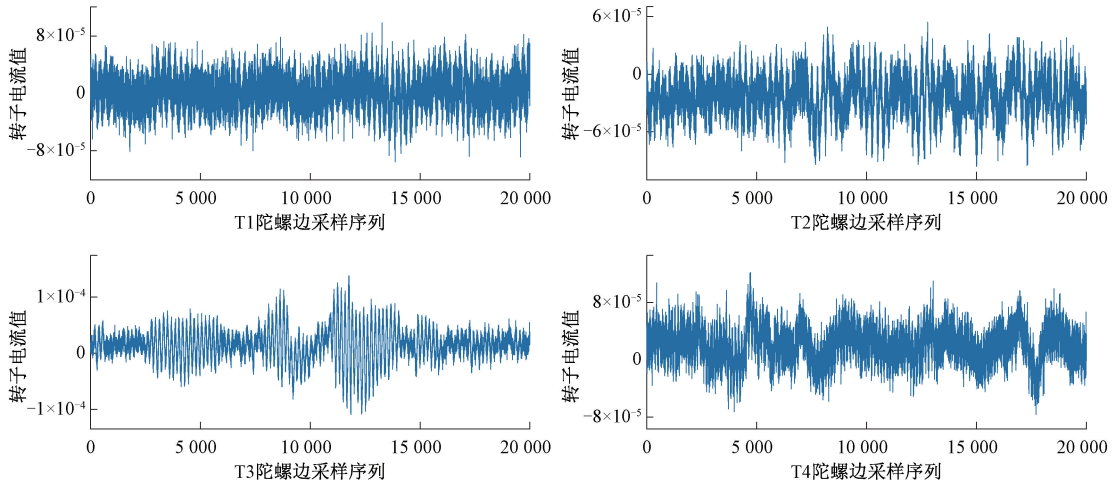


图 3 实测陀螺边采样转子电流信号

Fig. 3 Sampling rotor current signal on the side of experimental gyro

采用 LMD-HD-TD 方法对转子电流信号降噪时,原始信号经 LMD 分解,得到 10 阶 PF 分量和 1 阶余量 R,根据表 3 所示的 Hausdorff 距离计算结果筛选出 PF1~PF3 为噪声分量,并对前 3 阶 PF 分量进行阈值处理,将信号分量、余量以及经过降噪处理的噪声分量叠加,得到重构转子电流信号。采用 WT 方法对转子电流信号降噪时,小波基选择 sym10,为充分发挥 WT 方法的有效性,依次在小波分解层数 6~10 层的水平下对原始信号进行降噪处理。原始信号经 WT 和本文 LMD-HD-TD 方法降噪处理得到的重构信号如图 4 所示。

表 3 实测信号与各 PF 分量的 Hausdorff 距离

Table 3 Hausdorff distance between measured signal and each PF component

PF 分量	HD/($\times 10^{-5}$)
PF1	4.521 0
PF2	7.000 8
PF3	7.999 3
PF4	5.788 5
PF5	81.352
PF6	8.889 3
PF7	9.058 5
PF8	9.874 2
PF9	9.903 5
PF10	10.121 6

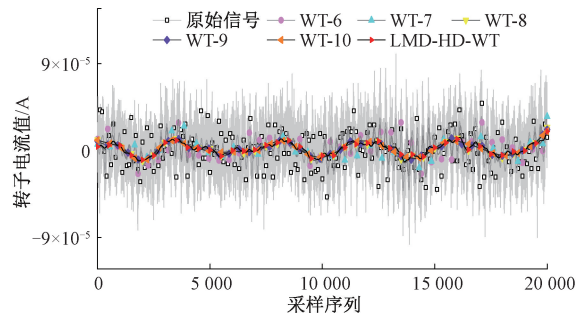


图 4 不同分解层数的 WT 与 LMD-HD-TD 降噪结果对比(以 T1 导线边为例)

Fig. 4 Comparison of noise reduction results between WY with different decomposition layers and LMD-HD-TD (take the T1 wire side as an example)

通过对原始信号进行 LMD 分解,结合 HD 判定噪声分量与信号分量及阈值处理噪声分量,可以实现信号自适应降噪,而 WT 方法由于不能在降噪前确定最优分解层数,需要依次修改小波分解层数以实现不同水平的降噪。由图 4 可看出,相对于采用分解层数为 6~8 的 WT 降噪方法,经 LMD-HD-TD 方法实现降噪后的信号具有更好的平滑性,对原始信号中的异常波动去除更加彻底;当小波分解层数达为 9 时,WT 方法和 LMD-HD-TD 方法

表现出的降噪效果相当,且降噪后得到重构信号的整体波动性类似,相互验证了两种降噪方法的准确性;进一步提高小波分解层数至 10,经 WT 方法处理后的转子电流信号在平滑性方面表现更好,但相对于低阶小波分解层数,分解层数较高时转子电流信号中的有用信号被过滤的风险也将被加大。

由于对转子电流信号进行降噪处理的最终目的是提高磁悬浮陀螺仪的定向精度,而利用 SNR、RMSE 等传统指标对降噪效果进行评价时未考虑到外符合精度,所以存在一定的片面性,且本实验中无法获取转子电流信号真实数据波形图,无法计算 SNR 与 RMSE。考虑到 T1~T4 导线边所在的导线网测量精度高并经过多次复测,而且在隧道贯通后对导线网进行了重新平差,导线网的测量结果可靠,可将通过导线测量得到的 T1~T4 导线边坐标方位角作为真值。故本文通过计算由降噪后的转子电流信号推算出的导线边坐标方位角滤波值与对应导线边的坐标方位角真值之间的差值,如表 4 所示,将该差值用于衡量 WT 与 LMD-HD-TD 两种方法的降噪效果。

表 4 实测转子电流信号降噪结果对比

Table 4 Comparison of noise reduction results of measured rotor current signal

导线边	原始差值(°)	WT		LMD-HD-TD 差值/(°)
		分解层数	差值(°)	
T1	-2.5	6	-2.5	-1.5
		7	-2.5	
		8	-2.5	
		9	-1.5	
		10	-1.5	
T2	2.14	6	2.14	0.14
		7	2.14	
		8	2.14	
		9	1.14	
		10	1.14	
T3	-6.5	6	-4.5	-4.5
		7	-4.5	
		8	-4.5	
		9	-5.5	
		10	-5.5	
T4	10	6	6	5
		7	6	
		8	6	
		9	6	
		10	6	

由表 4 可知,对于 T1 导线边,小波分解层数在 6~8 时,使用 WT 方法降噪处理的转子电流数据推算得到的坐标方位角与未降噪坐标方位角相比无变化,即没有产生实质降噪效果,而 WT 方法在小波分解层数到达 9~10

时与本文 LMD-HD-TD 方法有同样的滤波增益,与坐标方位角真值的误差相对减小了 40%。对于 T2 导线边,WT 方法对转子电流信号降噪表现出的规律与 T1 导线边类似,随着分解层数的提高,WT 降噪增益逐步提高,最高可达到 46.7% 的滤波增益,而 LMD-HD-TD 的增益效果为 93.5%。对于 T3 导线边,小波分解层数为 6~8 时,WT 方法与 LMD-HD-TD 方法具有同样的滤波增益,使得坐标方位角的误差相对减小了 30.8%。而当进一步提高 WT 分解水平至 9~10 时,相对于低阶分解层数,WT 因过度滤波出现了负增益。对于 T4 导线边,小波分解层数为 6~10 时,WT 方法滤波增益均为 40%,LMD-HD-TD 降噪表现优于 WT,可达到 50% 滤波增益。

综合分析 WT 和 LMD-HD-TD 两种方法在实际工程测量中的降噪结果可知,本文 LMD-HD-TD 方法在磁悬浮陀螺仪转子电流信号降噪方面所表现出的稳定性、有效性和自适应性优于传统 WT 方法。

4 结 论

磁悬浮陀螺仪在转子电流信号采样过程中不可避免会受到环境突变引起的干扰,导致陀螺定向结果可靠性降低,从而影响到超长隧道的精准贯通。针对这一问题本文提出一种融合 LMD-HD-TD 的磁悬浮陀螺转子电流信号降噪算法,通过仿真分析和实测案例验证了本文算法可以自适应地减弱采样转子电流信号中的噪声影响,避免了采用传统 WT 方法时因难以准确选择分解层数易引起降噪不足或过度的问题,表现出稳定的滤波增益,有效提高了磁悬浮陀螺仪的定向精度,为今后信号降噪处理提供了一种新思路。

参 考 文 献

- [1] 杨志强,石震,杨建华. 磁悬浮陀螺寻北原理与测量应用[M]. 北京:测绘出版社,2017.
YANG ZH Q, SHI ZH, YANG J H. North Seeking Principle and Measurement Application of Magnetically Suspended Gyroscope [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2017.
- [2] 马骥. 复杂环境下超长隧道磁悬浮陀螺定向测量关键技术研究[D]. 西安:长安大学,2019.
MA J. Research on key technology of maglev gyroscope orientation measurement for super long tunnel under complex environment [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [3] 张学伟. 基于频域分析与多元滤波的磁悬浮陀螺数据处理研究[D]. 西安:长安大学,2019.
ZHANG X W. Research on data processing of maglev gyroscope based on frequency domain analysis and

- multivariate filtering [D]. Xi' an: Chang' an University, 2019.
- [4] 张坤硕, 齐华, 任安虎, 等. 超声信号的改进 EMD 阈值方法降噪研究 [J]. 国外电子测量技术, 2017, 36 (11): 15-20.
ZHANG K SH, QI H, REN AN H, et al. Study on noise reduction of ultrasonic by improved EMD threshold method [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36 (11): 15-20.
- [5] 田晶, 王英杰, 王志, 等. 基于 EEMD 与空域相关降噪的滚动轴承故障诊断方法 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39 (7): 144-151.
TIAN J, WANG Y J, WANG ZH, et al. Fault diagnosis for rolling bearing based on EEMD and spatial correlation denoising [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39 (7): 144-151.
- [6] 周志易, 杨志强, 高飞, 等. 基于小波变换理论的精密磁悬浮陀螺全站仪定向系统中噪声剔除方法研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33 (5): 154-156.
ZHOU ZH Y, YANG ZH Q, GAO F, et al. Study on method for reducing noises in maglev gyro total station directional system based on wavelet transform theory [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33 (5): 154-156.
- [7] 李宗春, 邓勇, 张冠宇, 等. 变形测量异常数据处理中小波变换最佳级数的确定 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2011, 36 (3): 285-288.
LI Z CH, DENG Y, ZHANG G Y, et al. Determination of the best series of wavelet transform in abnormal data processing of deformation measurement [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36 (3): 285-288.
- [8] MA J, YANG ZH Q, SHI ZH, et al. Application and optimization of wavelet transform filter for north-seeking gyroscope sensor exposed to vibration [J]. Sensors, 2019, 19 (16): 3624.
- [9] SMITH J S. The local mean decomposition and its application to EEG perception data [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2005, 2 (5): 443-454.
- [10] 程军圣, 张亢, 杨宇, 等. 局部均值分解与经验模式分解的对比研究 [J]. 振动与冲击, 2009, 28 (5): 13-16+201.
CHENG J SH, ZHANG K, YANG Y, et al. A comparative study of local mean decomposition and empirical model decomposition [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28 (5): 13-16, 201.
- [11] 王奉伟. 改进的局部均值分解和高斯过程在变形监测数据处理中的应用研究 [D]. 南昌: 东华理工大
学, 2016.
WANG F W. On studying the application of local mean decomposition and gaussian process in extraction signal analysis and forecasting research of deformation signal [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2016.
- [12] 黄经纬, 周大可, 杨欣, 等. 基于局部均值分解和矩特征的图像拼接检测 [J]. 电子测量技术, 2017, 40 (4): 146-151.
HUANG J W, ZHOU D K, YANG X, et al. Image splicing detection based on local mean decomposition and moment features [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40 (4): 146-151.
- [13] 刘美容, 曾黎, 何怡刚, 等. 基于 LMD 多尺度熵和极限学习机的模拟电路故障诊断 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31 (4): 530-536.
LIU M R, ZENG L, HE Y G, et al. Analog circuit fault diagnosis based on LMD multi-scale entropy and extreme learning machine [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31 (4): 530-536.
- [14] 程军圣, 杨宇, 于德介. 一种新的时频分析方法—局部均值分解方法 [C]. 2008 年全国振动工程及应用学术会议暨第十一届全国设备故障诊断学术会议, 2008: 136-138.
CHENG J SH, YANG Y, YU D J. A new time frequency analysis method: The local mean decomposition method [C]. 2008 National Conference on Vibration Engineering and application and the 11th National Conference on Equipment Fault Diagnosis, 2008: 136-138.
- [15] 聂斌, 孙会东, 李佩, 等. 基于改进豪斯多夫距离的非参数轮廓变点识别 [J]. 中国机械工程, 2015, 26 (8): 1029-1034.
NIE B, SUN H D, LI P, et al. A change point detection based on modified hausdorff distance in nonparametric profiles [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26 (8): 1029-1034.
- [16] 曹京京. Hausdorff 距离的计算原理及其在二维匹配中的应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
CAO J J. The calculation theory of Hausdorff distance and its application to the matching of 2D geometrical objects [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [17] ZHOU Y, LAI S, LIU L. An improved approach to threshold function de-noising of mobile image in CL2 multi-wavelet transform domain [C]. International Conference on Mobile Technology, IEEE, 2009.
- [18] 曹健, 杨志强, 刘晨晨. 基于 Hausdorff 距离的光纤陀螺阈值滤波算法 [J]. 金属矿山, 2020 (4): 171-177.
CAO J, YANG ZH Q, LIU CH CH. Threshold filtering

algorithm of FOG based on Hausdorff distance[J]. Metal Mine, 2020(4):171-177.

- [19] 官月,贾瑞生,卢新明,等. 利用经验模态分解及小波变换压制微震信号中的随机噪声[J]. 煤炭学报, 2018,43(11):3247-3256.

GONG Y, JIA R SH, LU X Y, et al. To suppress the random noise in microseismic signal by using empirical mode decomposition and wavelet transform[J]. Journal of China Coal Society, 2018,43(11):3247-3256.

- [20] 朱建军,章浙涛,匡翠林,等. 一种可靠的小波去噪质量评价指标[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(5):688-694.

ZHU J J, ZHANG ZH T, KUANG C L, et al. A reliable evaluation indicator of wavelet de-noising[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(5):688-694.

作者简介



刘迪,2018 年于太原理工大学获得学士学位,现为长安大学博士研究生,主要研究方向为精密工程测量与陀螺仪信号处理。

E-mail:di.liu@chd.edu.cn

Liu Di received his B. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 2018. Now he is a Ph. D. candidate of Chang' an University. His main research interests include precision engineering measurement and gyro signal processing.



杨志强(通信作者),2003 年于中国科学院大学获得博士学位,现为长安大学地质工程与测绘学院教授,主要研究方向为高精度陀螺仪研制与受限空间内测量应用。

E-mail:yang_gps@chd.edu.cn

Yang Zhiqiang (Corresponding author)

received his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2003. Now he is a professor of Chang' an University. His main research interests include the development of high-precision gyroscope and the measurement application in confined space.



王德娟,2021 年于长安大学获得硕士学位,主要研究方向为精密仪器信号处理与降噪算法研究。

E-mail:1525998859@qq.com

Wang Dejuan received her M. Sc.

degree from Chang' an University in 2021. Her main research interests include precision instrument signal processing and noise reduction algorithm.



李航,2018 年于长安大学获得学士学位,现为长安大学硕士研究生,主要研究方向为惯性仪器测试与数据分析。

E-mail:lihng9604@163.com

Li Hang received his B. Sc. degree from

Chang' an University in 2018. Now he is a M. Sc. candidate of Chang' an University. His main research interests include inertial instrument testing and data analysis.

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104650

径向高温超导磁悬浮轴承的端部效应分析*

艾立旺¹ 苗森¹ 许孝卓¹ 封海潮¹ 李娜²

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000; 2. 国网焦作供电公司 焦作 454000)

摘要:针对径向高温超导磁悬浮轴承轴向尺寸有限引起的端部效应会影响其轴向悬浮特性,提出一种基于H公式的二维有限元建模方法,对径向高温超导磁悬浮轴承的端部效应进行分析。首先,通过实验测试验证提出的有限元建模方法;然后,分别建立具有不同尺寸定、转子的径向高温超导磁悬浮轴承有限元模型;最后,得到不同尺寸的超导定子与不同极数的永磁转子下轴向悬浮力与位移的关系。结果表明,由于端部效应,随着超导定子分块数量的增加,轴向悬浮特性不断恶化;随着永磁转子极数的增加,轴向悬浮力最大值先提高后降低,最终趋于永磁转子无限长时的轴向悬浮力最大值。

关键词: 径向高温超导磁悬浮轴承; 悬浮力; 端部效应; 有限元

中图分类号: TM153.3; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Analysis on end-effect of radial HTS magnetic levitation bearing

Ai Liwang¹ Miao Sen¹ Xu Xiaozhuo¹ Feng Haichao¹ Li Na²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. State Grid Jiaozuo Electric Power Supply Company, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The end-effect of which is caused by the limited axial size of radial HTS magnetic bearing will affect axial levitation behavior of radial HTS magnetic bearing. A 2-D finite element modeling method based on H-formulation is proposed to analyze the end-effect of radial HTS magnetic bearing. Firstly, the proposed finite element modeling method is verified by experimental tests. Then, the finite element models of radial HTS magnetic bearings with different sizes of stator and rotor are established respectively. Finally, it is obtained that the relationship between axial levitation force and displacement of superconducting stator of different size and permanent magnet rotor with different number of poles. The results show that due to the end effect, the axial levitation behavior deteriorates with the increase of the number of superconducting stator bulks. Moreover, with the increase of the number of permanent magnet rotor poles, the maximum axial levitation force shows a trend from rise to decline and it eventually approaches the maximum axial levitation force of permanent magnet rotor for infinite length.

Keywords: radial HTS magnetic levitation bearing; levitation force; end-effect; FEM

0 引言

高温超导磁悬浮轴承因其自稳定悬浮、低摩擦损失、真空兼容运行等优点,广泛应用于飞轮储能系统、低温液体泵^[1]等领域中。衡量高温超导磁悬浮轴承的首要性能参数是悬浮力特性。由于径向高温超导磁悬浮轴承轴向

长度有限且结构类似于圆筒直线电机,类比圆筒直线电机的端部效应对推力的影响^[2-5]。径向高温超导磁悬浮轴承的端部效应对悬浮力特性的影响规律同样值得研究。

为简化超导磁悬浮系统的建模与仿真计算,通常会采用理想化的假设,认为超导体和永磁轨道无限长而忽略端部效应,研究系统结构参数对导向力特性的影响^[6]。

收稿日期: 2021-08-17 Received Date: 2021-08-17

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52177039)、河南省科技攻关项目、河南省高校基本科研业务费专项项目(NSFRF210316)、河南理工大学博士基金(B2020-20)项目资助

在对高温超导-永磁磁悬浮列车悬浮力和磁场分布进行解析计算时,通常忽略永磁轨道的端部效应^[7]。但超导-永磁悬浮系统的端部效应对悬浮力特性有较大影响,在采用二维仿真代替三维仿真直线超导磁悬浮轴承时,需考虑端部效应适当减小超导块轴向长度使得悬浮力的二维仿真同三维仿真结果保持一致^[8]。在研究径向高温超导磁悬浮轴承径向刚度的测量和计算方法时,理论上超导块间相互作用可以忽略,所有块材的径向刚度之和等于整个轴承的径向刚度。但是有时需要考虑永磁体两个端部磁场弱于中间磁场,即两个端部的刚度要低于中间部分刚度,因此整个径向高温超导磁悬浮轴承的刚度需要考虑端部效应并做相应的修正^[9]。此外,在分析由若干小尺寸块材代替大尺寸超导块材对悬浮力和导向力的影响时,其中包含着超导体分块带来的电流密度不连续性,即端部效应影响^[10]。在转子磁体或超导体非无限长时,二者相互作用受到边缘和几何效应的强烈影响,但并未针对该影响开展深入的探讨^[11]。类似的,径向高温超导磁悬浮轴承应当存在端部效应,但径向高温超导磁悬浮轴承的端部效应对悬浮力特性的影响规律并未得到详细分析。

为探索高温超导磁悬浮轴承的端部效应对悬浮力特性的影响规律,本文首先对超导-永磁系统的端部效应进行介绍。然后,基于磁场强度 H 公式,利用耦合边界法在 COMSOL 中建立径向高温超导磁悬浮轴承悬浮力计算的 2-D 轴对称模型。通过实验验证 2-D 有限元模型得到分析高温超导磁悬浮轴承悬浮力特性的理论工具。进而建立具有不同转、转子结构的径向高温超导磁悬浮轴承有限元模型,仿真分析超导定子分块引起的端部效应对超导体内电流密度分布和径向高温超导磁悬浮轴承轴向悬浮特性的影响;以及永磁转子长度(极数)有限引起的端部效应对气隙磁场分布及径向高温超导磁悬浮轴承轴向悬浮特性的影响。

1 超导-永磁系统的端部效应

在一个超导块多面作用的悬浮系统中,利用径向高温超导磁悬浮轴承超导定子的 3 个表面,即内表面、上表面和下表面,分别与永磁体作用可获得更大的悬浮力^[12]。实际上,只有内侧的永磁体作用时,超导体上、下两个表面也会与外场作用而产生感应电流分布,这种电流分布于上下两个端面一定的透入深度层内,如图 1(a) 所示。超导体轴向无限长时感应电流主要分布于内表面一定透入深度层内,如图 1(b) 所示。将轴向几何尺寸有限的超导体引起的超导体电流密度分布和电磁力等物理量的变化,称之为端部效应。

图 2 所示为超导体二维轴对称模型端部效应示意

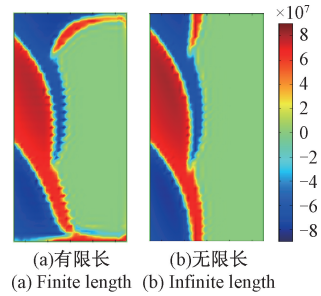


图 1 2-D 超导块相同区域内电流密度分布
Fig. 1 Current density distribution in the same area of 2-D superconducting bulk

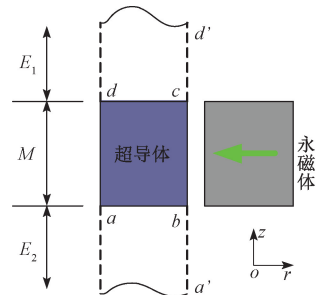


图 2 超导体 2-D 轴对称模型端部效应示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the end-effect of the superconductor 2-D axisymmetric model

图。根据上述超导体轴向长度有限长会引起端部效应,当只有内侧永磁体作用时,由于超导体对外磁场的屏蔽作用,使得表面 da 处于近零磁场区域且无感应电流分布。另外 3 个表面 ab 、 bc 、 cd 均受外场作用而产生感应电流分布,并产生端部效应影响下的悬浮力 F ,该悬浮力为中心区域作用力(主要为 bc 面)和端部区域作用力(主要为 ab 和 cd)之和:

$$F = F_m + F_e \quad (1)$$

式中: F_m 为中心区域作用力; F_e 为端部区域作用力。

当超导体轴向无限长时,可认为磁场作用区域和电流分布区域主要为表面 $a'd'$,即表面 $a'b$ 、 bc 、 cd' 。超导体无限长时的表面 $a'b$ 和 cd' 处的磁场与轴向有限长时端面 ab 和 cd 处的磁场不同,所以轴向两个端部区域产生的悬浮力 F_e' 与 F_e 大小应不同。故超导体轴向无限长即无端部效应时悬浮力 F' :

$$F' = F_m + F_e' \neq F \quad (2)$$

因此,超导体尺寸有限长引起的端部效应会使悬浮特性发生变化。类似于超导体轴向长度有限引起的端部效应,轴向长度(极数)有限的永磁体会引起径向高温超导磁悬浮轴承气隙磁场分布及轴向悬浮特性的变化,也可称为端部效应。

鉴于径向高温超导磁悬浮轴承呈二维轴对称结构,