



·前沿技术与交叉科学·

基于 VMD-OptShrink 的增强型电磁轨道炮炮口电压噪声压制及应用*

闫 杰, 李菊香, 陈 毅, 王 毅, 叶蔚生

(西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099)

摘 要: 利用电磁轨道炮炮口电压测量信号可以计算出发射过程中滑动电枢与铜轨道表面的接触电阻以分析接触特性。由于发射器增强轨道的特殊结构会产生幅值很大的反向感应电动势, 且存在脉冲形成网络的放电时序问题, 导致检测到的炮口电压波形会受到系统噪声的干扰, 难以准确计算出接触电阻。针对此问题, 提出一种基于 VMD-OptShrink 的炮口电压系统噪声压制方法去除炮口电压中的锯齿状噪声, 该方法首先利用变分模态分解 (Variational Mode Decomposition, VMD) 可实现依据频率特性进行信号时域分解的特点, 对炮口电压信号进行时频域的模态分解, 然后在时频分解域内利用 OptShrink 对分解信号进行低秩成分提取, 得到去噪后的炮口电压, 最终解算出接触电阻用于分析轨道炮枢轨接触特性。试验结果表明, 该方法可以很好地压制炮口电压系统噪声, 计算出的枢轨接触电阻波形光滑, 有利于分析枢轨接触特性; 枢轨接触电阻在发射初期变化剧烈, 迅速降低, 之后呈现缓慢波动上升的特点, 直至电枢滑动出炮口接触电阻骤增。该分析方法对工程中电磁轨道炮发射状态监测提供了一种新的可靠参考。

关键词: 增强型电磁轨道炮; 炮口电压; 枢轨接触电阻; 变分模态分解

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220377

Muzzle voltage noise suppression and application for augmented electromagnetic railgun based on VMD-OptShrink

Yan Jie, Li Juxiang, Chen Yi, Wang Yi, Ye Weisheng

(Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an 712099, China)

Abstract: Utilizing the muzzle voltage of the electromagnetic railgun, the contact resistance between the sliding armature and the copper rail surface during the launch process can be calculated to analyze the contact characteristics. However, the muzzle voltage signal contains a large amplitude of reverse induced electromotive force due to the complex augmented rails structure of the launcher. Meanwhile, the firing sequence of the pulse forming network disturb the detected muzzle voltage signal as system noise interference. Therefore, it is difficult to accurately calculate the contact resistance. To solve this problem, a noise suppression method of muzzle voltage system based on VMD-OptShrink is creatively utilized to suppress jagged noise. In this method, variational mode decomposition (VMD) can decompose the muzzle voltage signal in time-frequency domain according to the frequency characteristics. Then OptShrink is used to extract the low-rank components of the decomposed signal to obtain the denoised muzzle voltage. Finally, the contact resistance is calculated to analyze the armature-rail contact characteristics. The test results show that this method can suppress the muzzle voltage system noise well. The calculated armature-rail contact resistance waveform is smooth, which is conducive to the analysis of the armature-rail contact characteristics. The armature-rail contact resistance decreases rapidly at the initial stage of launching, then it fluctuates slowly until the armature slides out of the muzzle and the contact resistance increases sharply. The method proposed in this paper provides a new and reliable reference for the launching performance monitoring of electromagnetic railgun.

Key words: augmented electromagnetic railgun, muzzle voltage, armature-rail contact resistance, variational mode decomposition

* 收稿日期: 2022-12-30; 修订日期: 2023-04-16

联系方式: 闫 杰, jieyan17@mails.jlu.edu.cn;

李菊香, lijielijuxiang@163.com。

电磁发射作为一种新概念武器发射技术已经发展了几十年,为了提高发射性能、降低脉冲电源充电电压与发射电流,通过改进轨道炮发射器的结构形成一种增强型电磁轨道炮^[1]。与传统电磁轨道炮相比,增强型电磁轨道炮具有两副轨道:与电枢接触的主轨和增大电感梯度的增强轨道。由于增强轨道的存在,在发射过程中电枢所处的区域磁感应强度增强,受到的电磁力增大,随之而来的就是加速度的提升,在脉冲形成网络(PFN)充电电压与加速轨道长度一定时,增强型电磁轨道炮能够在出炮口处获得更大的动能,整个轨道所要承受的瞬时强电流也会较小。但是由于增强轨道的存在,炮口电压测试线路与主轨构成回路,电枢滑动初期会产生强度很大的反向磁感应电动势混入炮口电压中,所以利用炮口电压计算枢轨接触电阻变得复杂与困难,不利于分析枢轨接触特性。

轨道在承受瞬时强电流、高电压、强磁环境和与电枢高速摩擦的情况下,不可避免地会受到损伤,枢轨接触性能降低,影响了发射器状态,所以需要对接触特性进行监测。枢轨接触电阻是对接触特性的一种重要参数表征。文献[2-4]先后研究了电枢与轨道材料、轨道温度分布及温升对于枢轨接触特性的影响,并作出了定性分析^[2-4]。文献[5-6]对接触电阻进行了建模与定量分析,并对接触电阻的影响因素进行了说明,但定量分析只局限在接触电阻估计方面,有待于进一步的工程试验验证^[5-6]。文献[7]对改变枢轨接触特性、轨道电枢烧蚀因素做了具体的分析^[7]。可是在工程试验中,由于增强型电磁轨道炮存在增强轨道结构,发射电流通过增强轨道时,导致电枢与炮口之间存在磁通量,电枢在滑动过程中,使测得的炮口电压不仅包含了枢轨接触电阻和电枢体电阻产生的电压,还包含了因磁通量发生变化产生的反向感应电压,依靠炮口电压计算接触电阻变得复杂,始终难以直接计算得到接触电阻。直到2018年,王振春等人通过理论推导,得到了一种增强型电磁轨道炮接触电阻的计算方式,为分析增强型电磁轨道炮的枢轨接触特性提供了一种有效且较为精确的途径^[1]。

为了减轻瞬时强电流、高电压、电枢的高速摩擦对轨道的损伤、保护轨道炮发射器绝缘结构,对PFN放电模块的放电时序做出了调整,延长发射电流上升沿时间,既保证了轨道炮的发射性能,又一定程度上延长了轨道的使用寿命,但随之而来的是对炮口电压信号带来了系统噪声,使计算接触电阻变得复杂,影响枢轨接触特性分析的准确性^[8-9]。区别于增强型电磁轨道炮炮口电压系统噪声分析,文献[10]对传统电磁轨道炮炮口电压的噪声利用统计学原理进行了分析研究,并推断出噪声的意义^[10]。由于在炮口电压波形中,相对高频率的系统噪声与低频率的炮口电压有效信号在稀疏域中存在分量矩阵秩的差异,信号频率低,稀疏后的分量矩阵秩越小,利用此特点,本文利用了一种VMD-OptShrink算法对增强型电磁轨道炮炮口电压系统噪声进行压制,用于计算枢轨接触电阻以分析枢轨接触特性,并推断分析炮口电压系统噪声的出现原因和意义^[11-12]。试验结果表明,该方法能够有效压制炮口电压系统噪声,去噪后的炮口电压信号计算出的接触电阻能够很好地分析出枢轨接触特性,依据试验数据得到的炮口电压系统噪声推论也具有一定的可靠性。

1 算法及原理

1.1 变分模态分解

变分模态分解(VMD)作为一种新型的自适应模态分解方法,主要是通过求解模态分量的变分问题来确定分量信号的带宽和中心频率,将输入信号分解为一系列具有稀疏特性的分量信号。在构造变分问题时,其基本原理为:对分量信号进行希尔伯特变换、频率混合等信号处理手段,在各阶模态分量之和等于原始信号的前提下,将有关模态分量的变分问题转化为寻求估计带宽之和最小的模态函数。其具体步骤如下^[11-12]:

多分量信号 $x(t)$ 表示为

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) + \dots + x_k(t) \quad (1)$$

式中: $x_k(t)$ 为分量信号, $k = 1, 2, \dots, N$ (N 为分解的模态数目)。首先,对分量信号 $x_k(t)$ 进行希尔伯特变换得到单边频谱,再与 $e^{-j\omega_k t}$ 相乘使得各个分量信号的频谱调整至以预估中心频率 ω_k 为中心的频带,之后计算混合的信号梯度范数的平方以估计频移后分量信号的带宽,得到下述约束优化问题,表示为

$$\begin{cases} \min_{\{x_k, \omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * x_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ s.t. \sum_k x_k(t) = x(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\delta(t)$ 为狄利克雷函数;*为卷积运算; $\{x_k(t)\} = \{x_1(t), \dots, x_k(t)\}$ 为分解后的 k 个分量信号的集合; $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \dots, \omega_k\}$

为 k 个分量信号的中心频率集合； $\left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * x_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2$ 为分量信号的时间梯度 L_2 范数的平方值，用于估计分量信号的带宽。为求解上式，引入二次罚函数因子 α 与拉格朗日乘子 λ ，最后得到无约束的优化问题，其表达式为

$$L(\{x_k\}, \{w_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * x_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| x(t) - \sum_k x_k(t) \right\|_2^2 + \langle \lambda(t), x(t) - \sum_k x_k(t) \rangle \quad (3)$$

最终，采用交替方向乘子算法根据公式(4)~(6)交替更新 $x_k^{(n+1)}$ 、 $\omega_k^{(n+1)}$ 、 $\lambda^{(n+1)}$ 以求解上述变分问题的解，直至满足收敛条件式(7)。

$$\hat{x}_k^{(n+1)}(\omega) = \frac{\hat{x}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{x}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (4)$$

式中： $\hat{x}(\omega)$ 为输入的多分量信号 $x(t)$ 的功率谱； $\hat{x}_k^{(n+1)}$ 的傅里叶逆变换的实部即为分量信号 $x_k^{(n+1)}$ 。

$$\omega_k^{(n+1)}(\omega) = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{x}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{x}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (5)$$

$$\lambda^{(n+1)}(\omega) = \lambda^n(\omega) + \tau \left(\hat{x}(\omega) - \sum_k x_k^{(n+1)}(\omega) \right) \quad (6)$$

$$\sum_k \frac{\|x_k^{(n+1)} - x_k^n\|_2^2}{\|x_k^n\|_2^2} < \varepsilon \quad (7)$$

式中： ε 为收敛值，本文取 1×10^{-7} 。

1.2 低秩成分提取方法

本文采用的低秩成分提取方法是 OptShrink 算法，它是由 Raj Rao Nadakuditi 于 2014 年提出^[12-13]。该算法的主要思想是信号矩阵的低秩去噪估计与含噪信号矩阵具有相同的奇异值向量，且奇异值具有“收缩”特性，通过不断优化测量矩阵的奇异值向量权重，从含噪信号的测量矩阵中提取出低秩成分。具体步骤如下：

首先，输入信号当中有效信号的秩被估计为 \hat{r} ；

之后，对于第 i 个奇异值向量的最优权重可由式(8)计算得到，其中 $i \in [1, \hat{r}]$ 。

$$\omega_{i,\hat{r}}^{\text{opt}} = \frac{-2\hat{D}(\hat{\sigma}_i; \hat{\Sigma}_{\hat{r}})}{\hat{D}'(\hat{\sigma}_i; \hat{\Sigma}_{\hat{r}})} \quad (8)$$

式中： $\hat{D}(z; \mathbf{X})$ 为 D 变换，具体公式如式(9)表示， $\hat{D}'(z; \mathbf{X})$ 是它的一阶导数

$$\hat{D}(z; \mathbf{X}) = \frac{1}{n} \text{tr} \left[z(z^2 \mathbf{I} - \mathbf{X} \mathbf{X}^H)^{-1} \right] \cdot \frac{1}{m} \text{tr} \left[z(z^2 \mathbf{I} - \mathbf{X}^H \mathbf{X})^{-1} \right] \quad (9)$$

$$\hat{\Sigma}_{\hat{r}} = \text{diag}(\hat{\sigma}_{\hat{r}+1}, \dots, \hat{\sigma}_q) \in \mathbf{R}^{(n-\hat{r}) \times (m-\hat{r})} \quad (10)$$

式中： m 、 n 为含噪信号矩阵的行数与列数； $\hat{\sigma}_i$ 是其奇异值分解后得到的奇异值； H 为共轭转置，奇异值分解公式为

$$\sum_{i=1}^q \hat{\sigma}_i \hat{\mathbf{u}}_i \hat{\mathbf{v}}_i^H \quad (11)$$

最后，通过得到的奇异值最优权重，可以计算得到去噪后的秩为 \hat{r} 的低秩信号矩阵为

$$\hat{\mathbf{S}}_{\text{opt}} = \sum_{i=1}^{\hat{r}} \omega_{i,\hat{r}}^{\text{opt}} \hat{\mathbf{u}}_i \hat{\mathbf{v}}_i^H \quad (12)$$

1.3 炮口电压噪声压制方法

本文利用了一种将 VMD 与 OptShrink 有机结合的增强型电磁轨道炮炮口电压系统噪声压制方法 VMD-OptShrink，算法步骤如下^[12]：

- ① 设炮口电压信号是一个有 m 个元素的列向量或行向量 $\mathbf{x}(t)$ ，将其通过 VMD 分解为 N 个模态；
- ② 将分解好的所有模态重新组合，构成一个 $m \times N$ 阶的信号分量矩阵 $\mathbf{X}(t)$ ；
- ③ 运用 OptShrink 算法对构成的信号分量矩阵进行低秩成分提取；

④将得到的低秩的低频有效信号成分矩阵进行原来 N 个模态的叠加,得到去噪结果,最终和炮口电压信号作差即是高频的系统噪声。

从上述步骤可以看出,整个去噪过程是由低秩成分提取完成的,VMD只是实现了信号的分解和稀疏,这样就会避免VMD直接去噪带来的频谱混叠的影响。对于炮口电压信号来说,高频率系统噪声的存在使得矩阵秩的复杂性提升,而对于具有低频特性的炮口电压信号,其模态分解后的分量矩阵秩要低于高频系统噪声,因此估计有效秩在该算法中起着重要的作用。

1.4 枢轨接触电阻

增强型电磁轨道炮发射原理与轨道结构示意图如图1所示,根据所示的增强型电磁轨道炮结构示意图,由于炮口电压测量需要使用高压差分探头,高压差分探头的高输入阻抗使得 CD 端的电压约等于 AB 端的电压,电枢与炮口间的主轨上几乎没有电流流过,那么炮口电压 $U(t)$ 主要由三部分

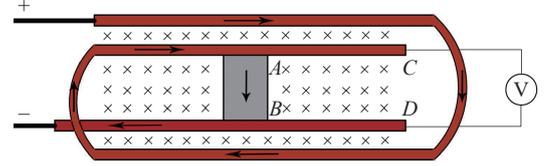


Fig. 1 Structure diagram of augmented electromagnetic railgun
图1 增强型电磁轨道炮结构示意图

$$U(t) = U_c(t) + U_b(t) + U_r(t) \quad (13)$$

式中: $U_c(t)$ 为枢轨接触电阻 $R_c(t)$ 产生的电压; $U_b(t)$ 为电枢 AB 端与 CD 端炮口电压测试设备与线缆构成的回路在电枢滑动过程中产生的反向感应电压; $U_r(t)$ 为电枢体电阻 $R_r(t)$ 产生的电压。当轨道炮发射时的电流为 $I(t)$ 时,由欧姆定律可得

$$U(t) = I(t)R_c(t) + U_b(t) + I(t)R_r(t) \quad (14)$$

假设主副轨的电感梯度为 M ,那么电枢、主轨、炮口电压测试线缆构成的回路磁通量为^[1]

$$\phi = M(l-x)I(t) \quad (15)$$

此时,式(14)中的 $U_b(t)$ 为

$$U_b(t) = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d[M(l-x)I(t)]}{dt} = M(l-x) \frac{dI(t)}{dt} - MI(t) \frac{dx}{dt} \quad (16)$$

式中: l 为电枢在轨道炮膛内的总加速长度,即电枢至炮口的长度; x 表示运动电枢的位移。将式(16)代入到式(14)中可以得到枢轨接触电阻 $R_c(t)$ 为

$$R_c(t) = \frac{U(t)}{I(t)} - \frac{M(l-x)}{I(t)} \frac{dI(t)}{dt} + Mv - R_r(t) \quad (17)$$

从式(17)可以看出,枢轨接触电阻受炮口电压、发射电流、电枢位移及速度、导轨对的互感梯度等特征参数的影响,并且具有随时间动态变化的特点。电枢体电阻在整个发射过程中不会随时间的变化而产生较大的波动,所以可看作是随时间线性变化,不会影响分析枢轨接触特性的准确性。而在工程试验中,炮口电压与电流可直接测得,位移与速度曲线可以通过电磁轨道炮B点环磁探针测试结果拟合得到,进而计算出枢轨接触电阻^[14-15]。

2 试验数据分析及应用

本文通过对一小型小口径、短身管的增强型电磁轨道炮模拟发射器进行试验验证,具体参数如表1所示。其中轨道发射电流使用罗果夫斯基线圈进行测量;炮口电压信号采用差分探头连接上下主轨,再经过光电隔离后接入数采进行采集测量,值得注意的是,由于发射器口径较小,铝质电枢的质量也在10g左右,所以整个发射器的发射能量相对偏低,炮口电压的幅值比较小,在试验采集过程中,受噪声干扰的影响也会更大,采集到的炮口电压信号需要经过噪声压制处理;位移使用9路B点环磁探针进行测量,整个测量系统严格隔离地线,测试结果如图2所示,图2(a)为炮口电压波形,可以看到炮口电压是由反向电压逐步变为正向电压,这正是由于发射前期,电枢运动产生的反向感应电动势要大于正向电压,随着电流变化率的降低,反向感应电动势减小,使得炮口电压又呈现出正

表1 发射器参数

Table 1 Parameters of launcher

armature displacement length/mm	inductance gradient/($\mu\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)	caliber of launcher/mm	charging voltage of PFN/kV	current peak value/kA	armature muzzle velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1600	0.7	10	3.3	246.4	1672.3

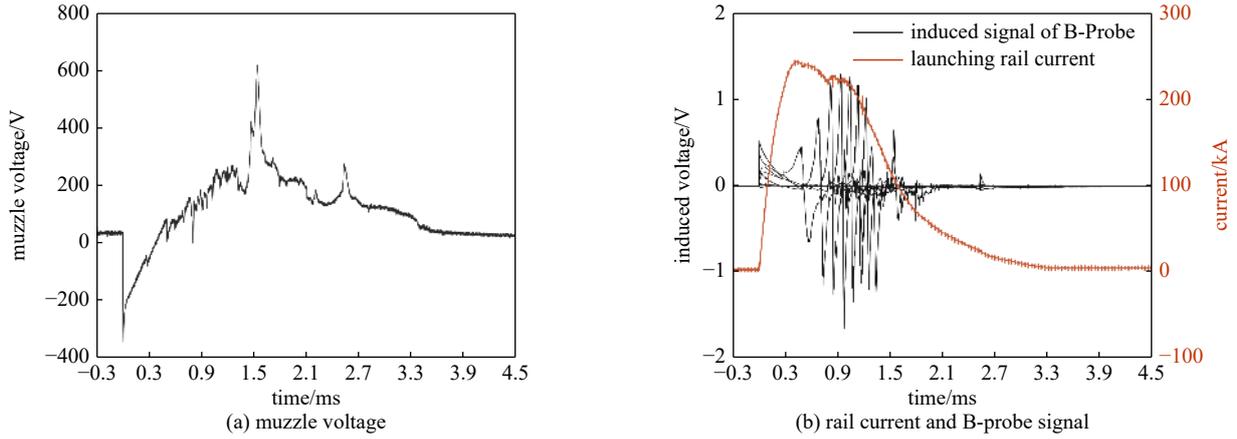


Fig. 2 Launch test results of augmented electromagnetic railgun

图2 增强型电磁轨道炮发射测试结果

向的特征。图 2(b)为电流波形与 B 点环磁探针的实测波形,通过对 B 点环磁探针信号的零点读取,可以拟合出电枢在发射器膛内运动的位移-时间曲线并计算得到电枢的速度-时间曲线,两条曲线的拟合结果如图 3 所示。

利用 VMD-OptShrink 算法对图 2(a)所示的炮口电压波形进行系统噪声压制。在 VMD-OptShrink 算法中两个重要参数: VMD 的分解模态数 N 的确定和 OptShrink 秩值 r 的选取。VMD 分解模态数过大,算法时间成本会显著增加,而且会出现过分解现象;模态数选择过小,则会出现分解不彻底的问题。对 OptShrink 秩值选择,则直接关系到噪声的压制效果。通过噪声压制效果比较,本文中 VMD 分解模态数 N 取 6, OptShrink 秩 r 取 1。炮口电压噪声压制结果如图 4 所示,通过图 2(a)所示信号与图 4 所示结果作差即得到去除的噪声成分,结果如图 5 所示,经过噪声压制,在炮口电压波形中,由数据采集产生的高频振荡噪声与 PFN 模块时序放电所产生的锯齿状系统噪声都去除得较为彻底,在噪声成分中,也可以看到明显的尖峰状冲击噪声,此噪声即是炮口电压中锯齿状噪声被 VMD-OptShrink 噪声压制后提取出来的波形。

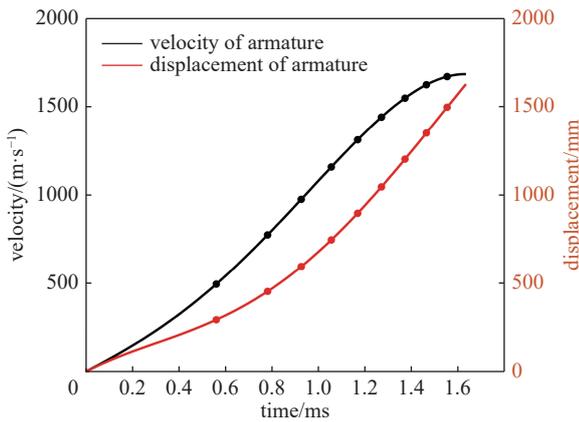


Fig. 3 Displacement-time curve and velocity-time curve

图3 位移-时间曲线及速度-时间曲线

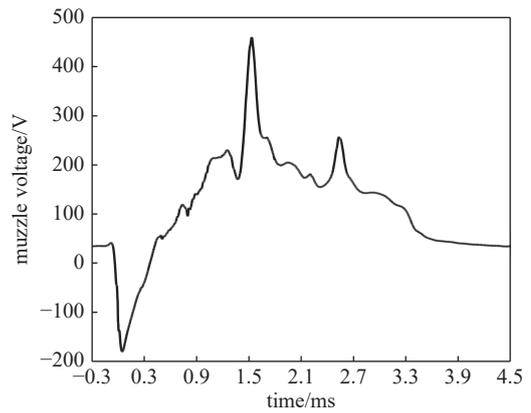


Fig. 4 Muzzle voltage noise suppression result

图4 炮口电压噪声压制结果

接下来,利用图 2(b)中的发射电流信号、图 3 所示的位移-时间及速度-时间曲线、图 2(a)和图 4 所示的炮口电压信号分别依据前文所述的枢轨接触电阻计算方法计算电阻曲线,由于电枢在发射器膛内运动时间在 $0 \sim 1.6$ ms 之间,1.6 ms 之后,电枢出炮口与上下主轨形成电弧接触,枢轨接触电阻骤增,本文主要分析电枢与主轨的接触状态,接触电阻计算集中在 $0 \sim 1.6$ ms 之间,计算结果如图 6 所示。从结算结果可以得到,利用噪声压制过后的炮口电压信号计算出的枢轨接触电阻曲线更光滑,消除了炮口电压中锯齿状噪声对于接触电阻曲线的影响。从接触电阻曲线中可以看到,枢轨接触状态变化主要包含两部分:在 $0 \sim 0.4$ ms 之间,枢轨接触电阻呈现骤降的特征,这部分对应着电枢与主轨的接触状态由固定电接触向滑动电接触变化,这个阶段枢轨接触状态变化恶劣,轨道易在此阶段发生烧蚀,从而降低了轨道的使用寿命;0.4 ms 至电枢出炮口这段时间,枢轨接触电阻呈现一种缓慢的波动上升趋势,在此阶段,枢轨之间是较为稳定的滑动电接触阶段,随着电流的降低,能量逐渐降低,一部分转化为电枢动

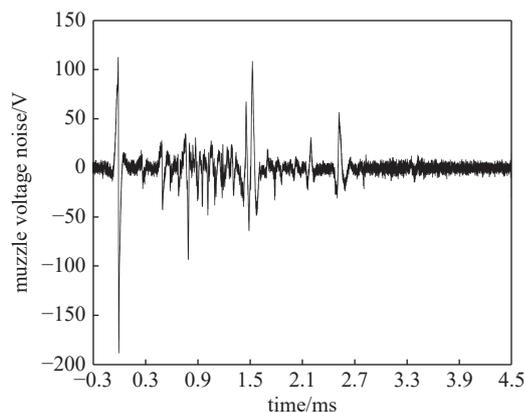


Fig. 5 System noise in the muzzle voltage

图5 炮口电压系统噪声

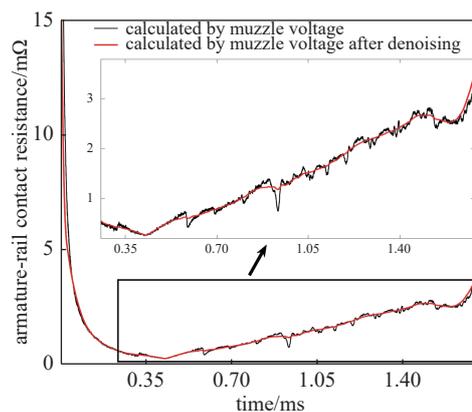


Fig. 6 Calculation results of armature-rail contact resistance

图6 枢轨接触电阻计算结果

能,另一部分多以热的形式释放,此时,电枢与轨道接触面的温度很高,但是由于枢轨接触状态较为稳定,对于轨道的损伤相较于前一段会小一些;之后电枢出炮口,多余的能量以电弧的形式释放完毕,这时,接触电阻会骤增。可见,枢轨接触电阻曲线能够完整地体现出枢轨接触状态变化,而且光滑的接触电阻包含更多的细节处信息,例如可以较为准确地获取波形阶跃处的电阻、观测电阻波形的微小波动特征等。

3 讨论

在本文介绍的VMD-OptShrink算法中,最重要的事项是VMD的模态分解数目和OptShrink秩的选取。对于分解模态数和秩值这两个参数的选取缺少理论支持,需要凭借经验,逐一尝试,直至选择出最合适的参数。当分解模态数选择过小时,炮口电压中的有效信号和噪声难以分开,在低秩成分提取的过程中也难以实现信噪分离,去噪效果会受到限制;当分解模态数选择过大时,不但会出现过分解现象,各个模态之间频谱混叠现象严重,噪声压制效果变差,而且计算时间成本较高,所以本文选取不同分解模态数,比较使用炮口电压去噪结果计算出的枢轨接触电阻曲线确定最合适的参数。分解模态数 N 分别取3、4、5、6、7,OptShrink的秩统一取1,它们的计算结果如图7所示。计算结果表明,随着分解模态数的增多,接触电阻曲线变得越来越连续光滑,但是当分解模态数为7时,接触电阻曲线几乎和分解模态数为6的计算结果重合,所以考虑到算法的时间成本,本文VMD分解模态数确定为6。

在确定了VMD分解模态数为6的前提下,通过改变OptShrink秩的选取,来选择出最优的秩值。由于炮口电压分解为6个模态,那么组成的分量矩阵的秩的范围就是1~6,而炮口电压有效信号作为低频信号,其秩要小于6,所以本文分别取1、2、3进行低秩成分提取,进而实现噪声压制,通过比较计算出的接触电阻曲线确定最优的秩值,计算结果如图8所示。结果显示,只有当秩为1时,具有低秩特征的炮口电压有效信号被提取出来,实现了系统噪声压制,计算出的接触电阻曲线光滑连续,所以秩值确定为1。

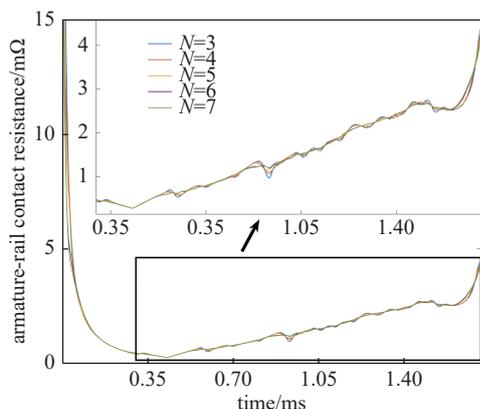


Fig. 7 Selection of VMD decomposition mode number

图7 VMD分解模态数的选取

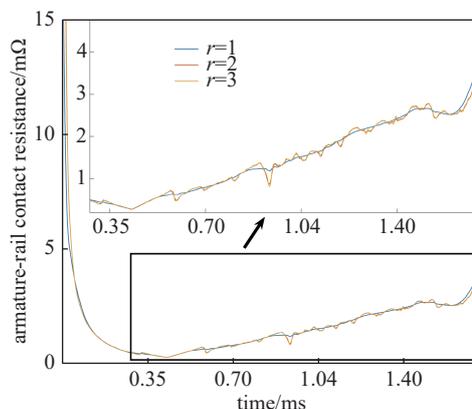


Fig. 8 Selection of OptShrink rank value

图8 OptShrink秩值的选取

最后,值得一提的是本文介绍的炮口电压系统噪声压制方法仅局限于枢轨接触电阻的计算,去噪结果不用于发射器发射状态的监测,图2(a)所示的炮口电压波形中包含着诸多信息,是一项发射器发射性能参考的重要测量

指标,例如图 5 所示波形中的脉冲信号与 PFN 的放电时序有着密切的关系,其余信息的分析还有待进一步的研究和明确。

4 结 论

增强型电磁轨道炮炮口电压包含丰富的发射器发射状态信息,利用炮口电压可以计算枢轨接触电阻以分析枢轨接触特性。但是,由于增强型电磁轨道炮在 PFN 的放电驱动下测得的炮口电压含有锯齿状系统噪声,且包含了反向的感应电压,使得接触电阻不易计算。本文针对此问题,提出一种基于 VMD-OptShrink 的炮口电压系统噪声压制方法,在 VMD 时频分解域内进行 OptShrink 低秩成分提取,得到频率较低的炮口电压有效信号,然后利用公式推导出了增强型电磁轨道炮枢轨接触电阻。经过试验结果的分析,可以得到以下结论:

(1) VMD-OptShrink 作为一种在时频分解域内通过低秩分解的方法实现噪声压制。VMD 可以有效地分解炮口电压波形,通过低秩分解算法 OptShrink 能够在时频分解域内将系统噪声和炮口电压有效信号分离彻底,噪声压制效果优良,利用炮口电压去噪结果计算出的枢轨接触电阻曲线光滑,利于分析枢轨接触特性;

(2) 枢轨接触电阻曲线整体呈现先快速下降、后平缓波动上升的趋势,大致可以分为两个阶段,对应膛内电枢与导轨电接触特性的状态转变,包括起始阶段的枢轨固定电接触变为滑动电接触、平稳阶段的枢轨滑动电接触,直至电枢出炮口后与主轨形成电弧接触状态。

参考文献:

- [1] 王振春, 鲍志勇, 曹海要, 等. 增强型电磁轨道炮电枢轨道接触特性研究[J]. *兵工学报*, 2018, 39(3): 451-456. (Wang Zhenchun, Bao Zhiyong, Cao Haiyao, et al. Research on contact characteristics of armature and rail in augmented electromagnetic railgun[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(3): 451-456)
- [2] 陈允, 徐伟东, 袁伟群, 等. 电磁发射中铝电枢与不同材料导轨间的滑动电接触特性[J]. *高电压技术*, 2013, 39(4): 937-942. (Chen Yun, Xu Weidong, Yuan Weiqun, et al. Sliding electrical contacts between aluminum armature and different material rails in railgun[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(4): 937-942)
- [3] Xu Weidong, Yuan Weiqun, Sun Yaohong, et al. Research on the sliding electrical contact of the rapid fire railgun[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41(5): 1542-1546.
- [4] 李鹤, 雷彬, 李治源, 等. 电磁轨道炮试验过程中枢轨界面的接触电阻特性[J]. *高电压技术*, 2013, 39(4): 911-915. (Li He, Lei Bin, Li Zhiyuan, et al. Contact resistance characteristics of the interface between armature and rail in electromagnetic railgun launching tests[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(4): 911-915)
- [5] 巩飞, 翁春生. 电磁轨道炮固体电枢熔化波烧蚀过程的三维数值模拟研究[J]. *高电压技术*, 2014, 40(7): 2245-2250. (Gong Fei, Weng Chunsheng. 3-D numerical study of melt-wave erosion in solid armature railgun[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(7): 2245-2250)
- [6] 何勇, 宋盛义, 关永超, 等. 电磁轨道炮高速滑动接触电阻的定量表征[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 045007. (He Yong, Song Shengyi, Guan Yongchao, et al. Quantitative expression of sliding contact resistance between armature and rail in railgun[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 045007)
- [7] Chen Lixue, He Junjia, Xiao Zheng, et al. Experimental study of armature melt wear in solid armature railgun[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(5): 1142-1146.
- [8] 刘旭堃, 于歆杰, 刘秀成. 电容储能型脉冲电源时分分段触发策略自动计算方法[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(11): 186-193. (Liu Xukun, Yu Xinjie, Liu Xiucheng. An automatic calculation method for the triggering strategy of the capacitive pulsed-power supply[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(11): 186-193)
- [9] 常馨月, 于歆杰, 刘旭堃. 一种实现电枢出膛速度控制的电磁轨道炮脉冲电源触发策略[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(10): 2261-2267. (Chang Xinyue, Yu Xinjie, Liu Xukun. A velocity-controlling triggering strategy of capacitive pulsed power supply electromagnetic railgun system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(10): 2261-2267)
- [10] Rada N M, Engel T G. A railgun test bench and standardized methodology for muzzle voltage noise analysis[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(5): 1634-1641.
- [11] Dragomiretskiy K, Zosso D. Variational mode decomposition[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(3): 531-544.
- [12] Ma Haitao, Yan Jie, Li Yue. Low-frequency noise suppression of desert seismic data based on variational mode decomposition and low-rank component extraction[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(2): 337-341.
- [13] Nadakuditi R R. OptShrink: an algorithm for improved low-rank signal matrix denoising by optimal, data-driven singular value shrinkage[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2014, 60(5): 3002-3018.
- [14] Li Juxiang, Cao Bin, Fan Zhiguo, et al. Judging the abnormal rail-armature contact states with waveforms of B-dot probes[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(7): 1274-1280.
- [15] 李菊香, 曹斌, 范志国, 等. B探针测速及基于激光方法的精度研究[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(s2): 327-332. (Li Juxiang, Cao Bin, Fan Zhiguo, et al. Research on speed measurement by B-probe and precision based on laser method[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(s2): 327-332)