

舰载无人机保障激光末制导炮弹射击阵位配置

朱青松¹, 王新为¹, 谭安胜¹, 汪三九²

(1. 海军大连舰艇学院, 辽宁 大连 116018; 2. 中国人民解放军 92335 部队, 福建 宁德 352103)

摘要: 针对舰炮使用激光末制导炮弹对不同岸上目标进行射击时, 舰载无人机保障阵位的配置问题, 在对岸上目标反射特性分析的基础上, 建立了激光末制导炮弹导引头接收功率模型; 基于导引头视场特性和启控点弹道散布规律、导引头扫描搜索时间, 建立了激光末制导炮弹导引头捕获模型; 在综合考虑作战过程中舰载无人机的性能及飞行安全等因素的基础上, 建立并优化了舰载无人机阵位配置, 为舰艇编队指挥员提供了决策依据。

关键词: 舰载无人机; 激光末制导炮弹; 双向反射分布函数; 捕获域

中图分类号: V279 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)04-0079-04

Shooting Position Configuration of Shipborne UAV Graranteeing Laser Teminal Guidance Projectile

ZHU Qing-song¹, WANG Xin-wei¹, TAN An-sheng¹, WANG San-jiu²

(1. Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China; 2. No. 92335 Unit of PLA, Ningde 352103, China)

Abstract: The problem of the optimal position configuration of shipborne UAV graranteeing laser teminal guidance projectile in shooting at various kinds of targets on the shore is stuided. Based on the analysis of reflection characteristic of targets on shore, a model of received power was established for laser teminal guidance projectile. Combining with the features of field of seeker, the dispersion characteristics of the initial point to control projectile and the length of time in scanning and searching, the capture model of the projectile's seeker was established. Based on the overall consideration of functions and safety of shipborne UAV in process of fight, the space configuration of shipborne UAV was established and optimized, which provides a decision-making basis for formation commander.

Key words: shipborne UAV; laser teminal guidance projectile; bidirectional reflectance distribution function; capture space

0 引言

舰炮对岸火力支援是登陆作战中的重要环节, 舰炮激光末制导炮弹的使用为应召对岸火力支援提供了精准火力, 进而减少了登陆海区应召火力支援舰艇的密度; 舰炮激光末制导炮弹与普通炮弹协同使用, 可以满足登陆作战中对支援火力的多种需求。舰载无人机挂载激光照射载荷可为舰炮使用激光末制导炮弹对岸射击提供有力保障。激光末制导炮弹是根据舰载无人机激光照射载荷对目标的照射回波进行制导的, 不同目标、大气环境、目标背景特性及舰载无人机的阵位配置

对激光末制导炮弹的引导成功率具有重要影响, 激光照射回波功率的大小对舰载无人机的阵位配置具有决定性影响。因此, 站在作战使用的角度, 从岸上目标对激光的反射特性分析入手, 研究保障舰炮使用激光末制导炮弹对岸上目标射击时舰载无人机的阵位配置问题。

1 岸上目标激光反射特性分析

激光末制导炮弹通常用于打击敌岸上固定或移动的点状目标。无论何种目标, 当其受激光照射时一部分被吸收, 其余被反射, 理论上可将目标反射依其表面特性分为镜面反射和漫反射。基于目标表面结构的复杂性, 一般将岸上目标看成是符合朗伯反射的理想漫反射^[1], 即反射光强分布与激光入射角无关, 只与舰载无人机激光照射载荷的视轴俯角有关。实验数据统计分析表明, 上述假设下的计算值与测量值相差较大。

本文采用由 Nicodemus 在 1970 年提出的双向反射分布函数(BRDF)^[2],研究激光照射载荷使用不同视轴俯角时目标表面的各向反射特性。

以激光照射载荷视轴与目标表面的交点 O 为原点,以目标被照射部分平均表面的外法线方向为 z 轴,以舰载无人机在过 O 点与 z 轴垂直的平面上的投影点与 O 点的连线方向为 y 轴,按右手法则建立目标反射坐标系 $Oxyz$,如图 1 所示。

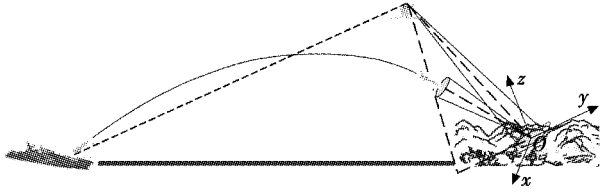


图 1 目标反射坐标系的建立

Fig. 1 Coordinate system of target reflection

如图 2 所示,在坐标系 $Oxyz$ 中,设舰载无人机激光照射载荷发射的激光束照射到 Oxy 平面上的入射角和方位角分别为 θ_i, φ_i ,对应于激光末制导炮弹启控点 Q 处的反射角和方位角分别为 θ_r, φ_r 。则将 Oxy 平面上的面元 dA 在 (θ_r, φ_r) 方向上的反射辐亮度与入射辐照度之比,称为双向反射分布函数^[3],即

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (1)$$

该函数是目标表面激光反射特性的一个描述性函数,是由激光入射角、反射角、波长、目标表面粗糙度、介电常数、偏振等因素决定的。

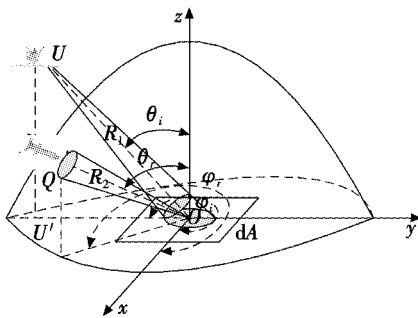


图 2 双向反射分布函数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bidirectional reflectance distribution function

将目标表面看成是由无穷多个微面元 $\sigma_j (j=1, 2, \dots)$ 组成,令激光在 σ_j 上的入射角为 γ , σ_j 的法线方向 n 与 z 轴之间的夹角为 α 。假设 σ_j 的法线方向呈高斯分布,各面元遵循菲涅耳反射定律,则有

$$\begin{cases} \cos \gamma = \sqrt{\frac{1}{2} [\cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\varphi_i - \varphi_r) + 1]} \\ \cos \alpha = \frac{\cos \theta_i + \cos \theta_r}{2 \cos \gamma} \end{cases} \quad (2)$$

通过解析理论和实验数据统计分析,可得出粗糙表面目标的双向反射分布函数模型^[4]为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = k_b \frac{k_r^2 \cos \alpha}{1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha} e^{B(1 - \cos \gamma)^A} \frac{G(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} + \frac{k_d}{\cos \theta_i} \quad (3)$$

式中: k_b, k_d, k_r, A, B 为待定参量,可通过实验数据统计分析得到; $G(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 为遮蔽函数,由各相邻面元反射的遮蔽和掩饰概率决定。

2 激光末制导炮弹导引头接收功率模型

设舰载无人机与 O 点的距离为 R_1 ,舰载无人机激光照射载荷的发射功率为 P_t ,光学系统对激光的透过率为 τ_t ,入射光路上大气对激光的衰减系数为 μ_1 。则在 dt 时间内,距无人机 R_1 处的激光束截面上的辐射能为

$$dQ = P_t \tau_t e^{-\mu_1 R_1} dt \quad (4)$$

令激光束的散角为 θ_i ,则距无人机 R_1 处的激光束截面面积为

$$S = \pi \left(\frac{R_1 \theta_i}{2} \right)^2 \quad (5)$$

距无人机 R_1 处的激光束截面上的辐照度 E' 为

$$E' = \frac{dQ}{S dt} = \frac{4P_t \tau_t e^{-\mu_1 R_1}}{\pi R_1^2 \theta_i^2} \quad (6)$$

由于激光束圆锥截面与面元 dA 的夹角等于入射角 θ_i ,根据朗伯定律,面元 dA 上的辐照度为

$$E_i(\theta_i, \varphi_i; R_1) = E' \cos \theta_i \quad (7)$$

由双向反射分布函数和辐射强度的定义可得,面元 dA 在 (θ_r, φ_r) 方向上产生的光谱辐射强度为

$$dI_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; R_1) = f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) E_i(\theta_i, \varphi_i; R_1) dA \cos \theta_r \quad (8)$$

设目标与激光末制导炮弹启控点的距离为 R_2 ,反射光路与导引头光学轴线的夹角为 ε ,由面元 dA 反射到激光末制导炮弹导引头光敏面的区域 dA' ,则所形成的立体角为

$$d\Omega = \frac{dA' \cos \varepsilon}{R_2^2} \quad (9)$$

则 dA' 上的辐照度为

$$dE_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; R_1, R_2) = \frac{4P_t \tau_t e^{-\mu_1 R_1}}{\pi R_1^2 R_2^2 \theta_i^2} f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_i \cos \theta_r \cos \varepsilon dA \quad (10)$$

比较目标平均表面面积 A_s 与 Oxy 平面上的光斑面积 $\pi(R_1 \theta_i)^2 / 4 \cos \theta_i$ 的大小,将目标平均表面面积小于光斑面积的目标称为小目标,反之则称为大目标。对式(10)中的 dA 进行积分,得到由目标反射到激光末制导炮弹导引头上的辐照度为

$$E_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; R_1, R_2) = \iint dE_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; R_1, R_2) = \begin{cases} \frac{4P_r \tau_r A_s e^{-\mu_2 R_1}}{\pi R_1^2 R_2^2 \theta_i^2} f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_i \cos \theta_r \cos \varepsilon & \text{小目标} \\ \frac{P_r \tau_r e^{-\mu_2 R_1}}{R_2^2} f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_i \cos \varepsilon & \text{大目标} \end{cases} \quad (11)$$

设激光末制导炮弹导引头光敏面面积为 A_r , 对激光的透过率为 τ_r , 从目标到导引头的反射光路上大气对激光的衰减系数为 μ_2 , 则激光末制导炮弹导引头的接收功率为

$$P_Q(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; R_1, R_2) = E_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; R_1, R_2) A_r \tau_r e^{-\mu_2 R_2} \quad (12)$$

对于具体型号的舰载无人机和激光末制导炮弹来说, $P_r, \tau_r, \mu_2, \theta_r, A_r$ 是确定的, A_s 可通过舰载无人机在预先搜索侦察时由终端计算机解得, μ_1, μ_2 可根据当时的气象条件查表获得, 由于激光末制导炮弹导引头视场有限, 能测量的 ε 都不大, 一般取 $\cos \varepsilon$ 的最小值, 为 0.95。

当激光末制导炮弹能被有效制导时, 其导引头的实际接收功率至少不小于导引头的最小可测信号功率 P_{\min} 。

3 激光末制导炮弹捕获域与捕获条件

舰载无人机、激光末制导炮弹启控点与目标三者之间的相对空间位置, 决定了激光末制导炮弹导向目标的成功率。对激光末制导炮弹的捕获域与捕获条件的研究, 是确定舰载无人机阵位配置的关键。

3.1 激光末制导炮弹捕获域模型

导引头能够感知目标的“视野”范围, 称为导引头的视场, 它是以光敏元件的中心线(光轴)为轴的一个圆锥空域, 所对应的立体圆锥角称为视场角, 视场角与其有效作用距离所决定的空域为捕获域。

设导引头的有效作用距离为 D_i , 视场角为 $2\varphi_i$, 俯仰角为 θ , 启控点高度为 H_q 。以激光末制导炮弹在启控点处的弹道散布中心在水平面上的投影点为原点, 铅垂向上为 z 轴, 启控点与目标连线在水平面上的投影为 x 轴, 按右手法则建立启控坐标系, 则在启控坐标系下, 导引头的捕获域 Q 为

$$Q = \left\{ (x, y, z) \left| \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0, x^2 + y^2 + z^2 \leq D_i^2, z \leq H_q \right. \right\} \quad (13)$$

式中: $a = \cos^2 \theta (1 + \tan^2 \varphi_i) - 1$; $b = [(1 + \tan^2 \varphi_i) \sin^2 \theta - 1] H_q^2$; $c = \sin 2\theta (1 + \tan^2 \varphi_i) H_q$ 。

3.2 激光末制导炮弹捕获条件

为保证激光末制导炮弹能够以较高的概率检测目

标, 必须考虑目标特性及各种扰动因素对捕获域和检测概率的影响。激光末制导炮弹出炮口后, 遵循外弹道学原理, 通过对激光末制导炮弹在发射段的弹道散布特性分析, 可求得在启控点弹道散布状态的集合。设 S 为散布域, 则

$$S = \left\{ (x_q, y_q, z_q) \left| \frac{(x_q - \sigma_x)^2}{m^2} + \frac{(y_q - \sigma_y)^2}{n^2} + \frac{(z_q - H_q - \sigma_z)^2}{p^2} \leq 1 \right. \right\} \quad (14)$$

式中: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为启控点处的弹道散布均方差; m, n, p 为散布椭圆半轴。

为使激光末制导炮弹在启控点处能接收到反射激光, 必须保证启控点的弹道散布域落在捕获域内, 即

$$S \subset Q \quad (15)$$

由于导引头固定视场角较小, 为保证导引头检测过程中不丢失目标, 提高捕获概率, 导引头通常以一定扫描速度在一定动态视场范围内进行扫描。为此, 需考虑激光末制导炮弹的运动速度、目标运动速度、导引头的结构参数和扫描速度等因素对捕获条件的影响。

假设导引头的扫描为等速扫描, 将其分解为纵向扫描、横向扫描, 速度分别为 v_{dx}, v_{dy} , 在启控点处弹丸运动速度的纵向、横向分量分别为 v_{ex}, v_{ey} , 目标的速度为 $v_m(v_{mx}, v_{my}, v_{mz})$, 则纵向扫描、横向扫描的相对时间分别为

$$\begin{cases} t_x = \frac{\sqrt{D_i^2 - z_q^2} + \frac{b}{2a} + \sqrt{b^2 - 4a(c - 9\sigma_y^2)} - 3\sigma_x}{v_{ex} + v_{mx} + v_{dx}} \\ t_y = \frac{\sqrt{D_i^2 - z_q^2} \tan \varphi_i - 3\sigma_y}{v_{ey} \sin \varphi_i + v_{my} + v_{dy}} \end{cases} \quad (16)$$

设导引头扫描周期为 T , 目标在捕获域内的逗留时间为 T_B , 则纵向扫描、横向扫描相对时间应满足

$$\min(t_x, t_y) \geq T + T_B \quad (17)$$

将式(15)、(17)联合解算, 即可得到在启控坐标系下满足捕获条件启控点 $Q(x_q, y_q, z_q)$ 的空间范围。设目标位置为 (x_m, y_m, z_m) , 则满足捕获条件时目标与启控点之间的距离 R_2 为

$$R_2 = \sqrt{(x_q - x_m)^2 + (y_q - y_m)^2 + (z_q - z_m)^2} \quad (18)$$

4 舰载无人机最优阵位配置

在舰载无人机保障舰炮激光末制导炮弹射击时, 不仅要考虑激光末制导炮弹导引头实际接收功率、导引头空间姿态、启控点弹道散布和目标在捕获域内的逗留时间的影响, 还需考虑舰载无人机的有效通信距离、对目标的探测距离以及安全飞行空间等因素的影响^[5], 如图3所示。

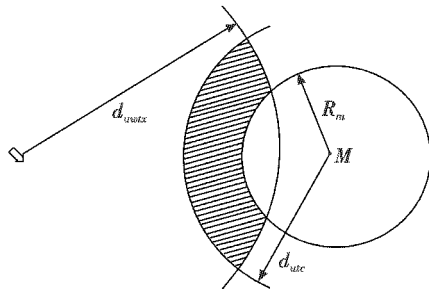


图 3 舰载无人机阵位配置示意图

Fig. 3 Space configuration of shipborne UAV

为保证对舰载无人机引导的及时可靠,舰载无人机与载舰的距离 d_{uw} 应在两者可靠通信的最大距离 d_{uwtx} 之内,即

$$d_{uw} \leq d_{uwtx} \quad (19)$$

为保证舰载无人机的安全,应尽可能将其部署在敌对空防御武器杀伤半径 R_m 之外,同时应在舰载无人机探测设备的最大有效探测距离 d_{utc} 之内,即

$$R_1 \in (R_m, d_{utc}] \quad (20)$$

设舰载无人机的最小安全飞行高度为 h_{\min} ,最大高度升限为 h_{\max} ,则舰载无人机引导飞行高度 H_u 应满足

$$H_u \in [h_{\min}, h_{\max}] \quad (21)$$

考虑到载舰舰炮弹道散布对舰载无人机安全的影响,舰载无人机阵位配置必须避开舰炮射击时所形成的弹道散布管道。理论和实践证明,舰炮弹道散布误差的最大范围可取为 ± 4 倍概率误差。考虑到舰载无人机自身的定位精度,其与炮目线所在垂直面的水平距离应增至 5 倍方向散布概率误差,即

$$|R_2 \sin \theta_r \cos(\varphi_i - \varphi_r)| \geq 5E_x \quad (22)$$

式中, E_x 为舰炮弹道方向散布概率误差。

综上所述,在保障舰炮激光末制导炮弹对岸射击时,舰载无人机的空间配置需满足以下约束条件,即

$$\begin{cases} P_Q \geq P_{\min} \\ S \subset Q \\ \min(t_x, t_y) \geq T + T_B \\ d_{uw} \leq d_{uwtx} \\ R_1 \in (R_m, d_{utc}] \\ H_u \in [h_{\min}, h_{\max}] \\ |R_2 \sin \theta_r \cos(\varphi_i - \varphi_r)| \geq 5E_x \end{cases} \quad (23)$$

通过上述模型可计算出在目标反射坐标系下舰载无人机的坐标范围,该范围所确定的空域即为舰载无人机的最优配置空间。

当敌对空防御武器杀伤半径过大, $(R_m, d_{utc}]$ 可能为空集,舰载无人机将“淹没”在敌杀伤范围内,通过上述约束条件将无法得到舰载无人机的阵位配置。此

时,如果任务紧迫,在确保舰载无人机能够保障激光末制导炮弹对岸射击的情况下,力争安全系数最大,即舰载无人机阵位配置的目标函数为

$$\max(R_1 - R_m) \quad (24)$$

约束条件调整为

$$\begin{cases} P_Q \geq P_{\min} \\ S \subset Q \\ \min(t_x, t_y) \geq T + T_B \\ d_{uw} \leq d_{uwtx} \\ R_1 \leq d_{utc} \\ H_u \in [h_{\min}, h_{\max}] \\ |R_2 \sin \theta_r \cos(\varphi_i - \varphi_r)| \geq 5E_x \end{cases} \quad (25)$$

该优化模型可计算出在敌对空防御武器杀伤半径过大时,舰载无人机的最优阵位配置。

5 结束语

本文以作战使用的角度,从岸上目标的激光反射特性分析入手,采用双向反射分布函数对岸上目标入射与反射之间的关系进行了研究,给出了激光末制导炮弹导引头接收功率模型。根据激光末制导炮弹导引头视场特性,建立了激光末制导炮弹捕获域模型。通过对激光末制导炮弹道散布特性和扫描搜索时间的分析,给出了舰炮末制导炮弹的捕获条件。综合考虑舰载无人机的有效通信距离、对目标的探测距离以及安全飞行空间等因素的影响,针对不同的岸上目标,通过大量仿真计算,给出了舰载无人机最优射击阵位配置,并列出表格供部队作战与训练中查用。由于武器装备参数的敏感性,本文略去仿真结果。

参考文献

- [1] 邢立新,高善清,吴新明. 无人机保障激光末制导炮弹武器系统射击分析[J]. 弹箭与制导学报,2007(1): 132-134. (XING L X, GAO S Q, WU X M. Weapon system analyses of laser terminal guidance shell supported by UAV[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007(1):132-134.)
- [2] NICODEMUS F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity[J]. Applied Optics, 1970(6): 1474-1475.
- [3] 谢鸣,徐辉,邹勇,等. 花岗岩表面双向反射分布函数实验研究[J]. 工程热物理学报,2005,26(4):683-685. (XIE M, XU H, ZOU Y, et al. Experimental methodology of moorstone's surface BRDF[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(4):683-685.)

(下转第 104 页)

- 直径测量系统[J]. 传感器与微系统, 2014(1): 120-122, 129. (YU Z J, LIU Y L, ZHUGE J C. High precision double linear array CCD non-contact diameter measurement system[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014(1): 120-122, 129.)
- [5] 周建勇, 陈红兵, 袁世顺, 等. 一种 CCD 驱动时序参量化设计方法[J]. 半导体光电, 2013(6): 1055-1059, 1081. (ZHOU J Y, CHEN H B, YUAN S S, et al. Design of parametric CCD drive timing pulses[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013(6): 1055-1059, 1081.)
- [6] 唐亚军, 郭喜庆, 杨敬娴, 等. 基于 51 单片机的线阵 CCD 驱动设计[J]. 微型机与应用, 2013(12): 73-76. (TANG Y J, GUO X Q, YANG J X, et al. Design of linear CCD drive based on 51 single-chip processor[J]. Microcomputer & Its Applications, 2013(12): 73-76.)
- [7] SAN H L, FEI J. Design of linear CCD driving circuit based on SCM[J]. Procedia Engineering, 2012, 29: 165-169.
- [8] 陈骥, 王鑫, 曹久大, 等. 高速 CCD 激光位移传感器[J]. 光学精密工程, 2008(4): 611-616. (CHEN J, WANG X, CAO J D, et al. Development of high-speed CCD laser displacement sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2008(4): 611-616.)
- [9] 余方玉, 赵美蓉, 林玉池, 等. 步进电机矩角关系连续测试方法的研究[J]. 中国机械工程, 2014(3): 333-336. (YU F Y, ZHAO M R, LIN Y C, et al. Study on continuous test method of stepper motor torque-angle relationship[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2014(3): 333-336.)
- [10] 孙孔政, 徐抒岩, 曹小涛, 等. 基于矩频曲线的步进电机加减速控制[J]. 微电机, 2014, 47(1): 81-85. (SUN K Z, XU S Y, CAO X T, et al. Speed control of step motor based on torque curve[J]. Micromotors, 2014, 47(1): 81-85.)
-
- (上接第 82 页)
- [4] 吴振森, 谢东辉, 谢品华, 等. 粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法[J]. 光学学报, 2002, 22(8): 897-901. (WU Z S, XIE D H, XIE P H, et al. Genetic algorithm of statistical modeling about roughened surface laser scattering[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(8): 897-901.)
- [5] 谭安胜. 水面舰艇编队作战运筹分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. (TAN A S. Operations analysis of surface warship formation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.)
-
- (上接第 94 页)
- [3] 李晓惠. 动态测量误差分解及溯源研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006. (LI X H. Research on error separating and tracing of dynamic measurement[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.)
- [4] 李晓惠, 陈晓怀, 卫兵. 基于神经网络的动态测量误差分解研究[J]. 工业计量, 2005(6): 6-9. (LI X H, CHEN X H, WEI B. Research on error decomposition of dynamic measurement based on neural network method[J]. Industrial Measurement, 2005(6): 6-9.)
- [5] 李世平, 付宇, 张进. 一种基于 EMD 的系统误差分离方法[J]. 中国测试, 2011, 37(3): 9-13, 36. (LI S P, FU Y, ZHANG J. Systematic error separation method based on EMD[J]. China Measurement and Test, 2011, 37(3): 9-13, 36.)
- [6] 张俊玲. 减小测量误差的测量方法研究[J]. 大学物理实验, 2010, 23(1): 71-73. (ZHANG J L. Measurement method of reduce the measurement error[J]. Physical Experiment of College, 2010, 23(1): 71-73.)
- [7] 马强, 许桢英. 动态测量误差溯源方法研究[J]. 安徽机电学院学报, 2001, 16(4): 22-25. (MA Q, XU Z Y. The tracing of dynamic measurement errors [J]. Journal of Anhui Institute of Mechanical and Electrical Engineering, 2001, 16(4): 22-25.)
- [8] 黄迪山. 经验模态分解中虚假模态分量消除法[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(3): 381-384. (HUANG D S. Effect of sampling on empirical mode decomposition and correction[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2011, 31(3): 381-384.)
- [9] 陈茉莉, 李舜酩, 饶新阳. 基于时域特征识别微频差信号[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1234-1239. (CHEN M L, LI S M, RAO X Y. Micro frequency difference signal identification based on time domain characteristics [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(6): 1234-1239.)
- [10] 谢永成, 贺芳君, 李光升, 等. 基于改进型小波神经网络的灭火系统故障诊断[J]. 电子测量技术, 2012, 35(4): 128-131. (XIE Y C, HE F J, LI G S, et al. Fire-extinguishing system fault diagnosis based on improved wavelet neural network [J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(4): 128-131.)