

doi: 10.7690/bgzdh.2013.02.005

# 大闭环校射最佳校正量预测模型

程杰

(海军士官学校兵器系, 安徽 蚌埠 233012)

**摘要:** 为降低大闭环校射系统在进行射击误差实时校正时的难度和复杂性, 建立大闭环校射最佳校正量的预测模型。分析大闭环校射的基本原理, 研究导致脱靶量产生的各种误差因素, 提出最佳校正量预测模型, 并利用最佳校正量预测模型对脱靶量进行仿真计算, 以验证模型的可行性。实验结果证明: 该模型能提高小口径舰炮的快速反应能力和作战精度, 有效解决脱靶量检测问题, 增强舰炮武器系统的作战效能。

**关键词:** 大闭环校射; 预测模型; 脱靶量

**中图分类号:** TJ391 **文献标志码:** A

## Foresee Model of Best Rectify Measure on Closed-Loop Spotting

Cheng Jie

(Department of Weaponry Engineering, Naval Scholar Official School, Bengbu 233012, China)

**Abstract:** For lower difficulty and complexity of real time rectifying firing error of closed-loop spotting, establish foresee model of best rectify measure on closed-loop spotting. The basic principle of closed-loop spotting is analyzed, the various error factors which lead to miss distance is studied. The model of best rectify measure is established. Then use foresee model to simulate miss parameter and verify the feasibility of model. Experimental results show that the foresee model of best rectify measure can not only improve fast reaction ability and combat precision of small-bore warship cannon, resolve miss parameter measure effectively, but also enhance the combat effectiveness of warship cannon weapon system.

**Key words:** closed-loop spotting; foresee mode; miss parameter

### 0 引言

在近程反导舰炮武器系统中, 为了提高对来袭目标, 特别是超低空反舰导弹目标的打击效果, 普遍采用了大闭环自动校射技术<sup>[1]</sup>。大闭环校射基于对舰炮射击过程的反馈控制, 对射击误差实时校正, 因而使武器系统的射击精度和命中概率大幅度提高; 但是, 大闭环校射涉及很多高新技术, 使系统的技术难度和复杂性大大增加。特别是在系统设计过程中, 大闭环校射最佳校正量预测模型的建立与仿真, 是伴随系统而产生的一个必须解决的实际问题<sup>[2]</sup>。笔者在某项工程实践中, 借助模拟训练仪, 在不打炮、不射弹的情况下, 采用仿真技术, 成功实现舰炮武器系统大闭环校射最佳校正量预测模型的应用与实践。

### 1 基本原理

大闭环校射是在舰炮对空射击时, 跟踪雷达在跟踪被拦截目标的同时, 跟踪并检测进入弹丸波门的弹丸信息(弹丸坐标或弹丸脱靶量); 指挥仪(火控设备)接收雷达检测的弹丸信息, 经大闭环校射软件实时处理, 求出对待击发弹丸的射击修正量, 修正射击诸元, 实现边射击、边检测、边处理、边修正

的闭环火力控制。某新型小口径舰炮武器系统在对空射击中实施大闭环校射的原理框图如图 1。

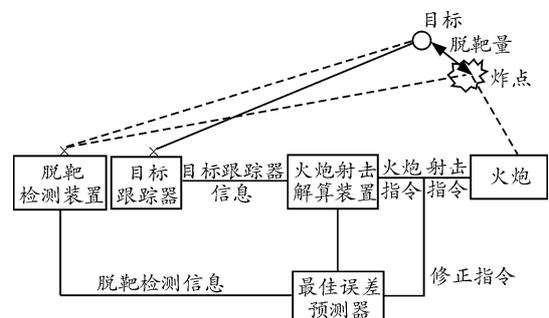


图 1 大闭环校射基本原理

### 2 最佳校正量预测模型

大闭环校射的实现依赖于弹丸脱靶量之间的相关性, 正确的脱靶量模型是对这种相关性的数学描述; 因此, 在建立最佳校正量预测模型时必须先建立脱靶量模型。对于造成脱靶量各误差的可预测性研究, 是建立最佳校正量预测模型的基础, 只有尽可能多地找出可校正误差及其规律, 才有可能建立最佳校正量预测模型<sup>[3]</sup>。

#### 2.1 脱靶量数学模型

建立正确的脱靶量模型的基础是对引起脱靶量

收稿日期: 2012-08-07; 修回日期: 2012-09-16

作者简介: 程杰(1979—), 男, 安徽人, 硕士, 讲师, 从事舰炮武器系统。

的误差源及其在射击控制过程中的误差变化规律的了解。在不考虑实际闭环校射的情况下，舰炮设计控制过程中引起的误差源可归纳为原理方面、设备方面、工作条件方面和人员操作方面等引起的误差。

上述误差源产生的误差导致了脱靶量；因此，脱靶量包含上述的各种误差，根据误差的性质，误差可以分为系统误差和随机误差，而随机误差按时间的相关性可分为强相关误差、弱相关误差和不相关误差。对闭环校射而言，不相关误差是不可预测和校正的，而强相关误差和弱相关误差，只要掌握了他们的统计特性和特征参数，在一定的预测时间内也是可以预测和校正到不相关误差中，而将存在的可预测和校正的部分统称为相关误差。这样，脱靶量模型就由系统误差、相关误差和不相关误差和随机误差 3 部分组成<sup>[4]</sup>。

$$x_{ok} = f_k + \alpha_k + \beta_k \tag{1}$$

式中： $x_{ok}$  为开环脱靶量； $f_k$  为开环脱靶量的系统误差，通常由常值误差  $c$  和随距离变化的确定性误差组成，可写成  $f_k = c + d \cdot g_k$ ，其中  $c$ 、 $d$  为常数， $g_k$  为已知的距离确定性函数； $\alpha_k$  为开环脱靶量的相关随机误差，通常假设  $\alpha_k$  为宽平稳一阶马尔可夫过程，即：

$$\alpha_k = \rho \alpha_{k-1} + \sqrt{1 - \rho^2} \theta_k \tag{2}$$

式中： $\rho$  为相关系数； $\theta_k$  为均值为零、方差为  $\delta_\theta^2$  的白噪声过程； $\beta_k$  为开环脱靶量中不相关随机误差。

用式 (1) 来描述开环脱靶量，在形式上具有一定的普遍意义，但公式中的系统误差、相关随机误差究竟由哪些误差组成，它们的统计规律是怎样的，常常因工程实践的需要和理论分析的差别而不同。从理论上讲误差分得越细、越能符合实际，闭环校射的效果越好；但是，结合工程实际，从可行性上考虑并非如此。脱靶量的 2 个分量方位角脱靶量和高低角脱靶量可假设为：

$$\begin{cases} \Delta B_t = \xi_1 + \xi_2 f_B(D_t) + V_{Bt} \\ \Delta \varepsilon_t = \eta_1 + \eta_2 f_\varepsilon(D_t) + V_{\varepsilon t} \end{cases} \tag{3}$$

式中： $D_t$  为目标位置矢量； $\xi_1$ 、 $\xi_2$ 、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$  为待识别系数； $V_{Bt}$ 、 $V_{\varepsilon t}$  为随机干扰（即不相关误差）， $f_B(D_t)$ 、 $f_\varepsilon(D_t)$  为目标位置矢量的确定函数。

### 2.2 最佳校正量预测模型

在逐发测得脱靶量的前提下，根据脱靶量模型，

应用最优估计理论可求出可校正误差的最佳预测估计，该估计值的负值即为最佳校正量。采用式 (1) 的脱靶量模型，应用卡尔曼滤波求取最佳校正量预测模型。

当前观测到的脱靶量  $Z_{(k)}$ ，可能是射击初期尚未进行闭环校正的开环脱靶量，也可能是经过闭环校正后的闭环脱靶量。式 (1) 是开环脱靶量的模型，因此需要将闭环脱靶量转换成开环脱靶量。其方法为：当获得闭环脱靶量  $Z_c(i)$  的同时，由弹序去查询校正量序列，得出该发弹的校正量  $u_o(i)$ ，那么该发弹的开环脱靶量  $z_o(i)$  为

$$z_o(i) = z_c(i) - u_o(i) \tag{4}$$

现在假设第  $K$  发弹的开环脱靶量真值为  $x_{ok}$ ，测量误差为  $v_k$ ，那么第  $K$  发弹的量测方程为：

$$z_{ok} = x_{ok} + v_k \tag{5}$$

式中， $v_k$  为均值为零、方差为  $\sigma_v^2$  的白噪声。

根据脱靶量模型可将系统状态方程表示为  $K$  时刻状态向量  $A_k$ ：

$$A_k = \begin{bmatrix} \alpha_k \\ c \\ d \end{bmatrix} \tag{6}$$

状态方程为：

$$A_k = \Phi A_{k-1} + \Gamma \theta_k \tag{7}$$

其中：

$$\Phi = \begin{bmatrix} \rho & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_{k-1} = \begin{bmatrix} \alpha_{k-1} \\ c \\ d \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} \sqrt{1 - \rho^2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

开环脱靶量  $x_{ok}$  与状态向量  $A_k$  之间的关系为

$$x_{ok} = G_k^T A_k + \beta_k \tag{8}$$

其中： $G_k^T = [1 \ 1 \ g_k]$ 。

综合以上各式可得系统方程为：

$$\begin{cases} A_k = \Phi A_{k-1} + \Gamma \theta_k \\ z_{ok} = x_{ok} + v_k = G_k^T A_k + \beta_k + v_k \end{cases} \tag{9}$$

令  $\eta_k = \beta_k + v_k$ ，则式 (9) 可写成：

$$\begin{cases} A_k = \Phi A_{k-1} + \Gamma \theta_k \\ z_{ok} = G_k^T A_k + \eta_k \end{cases} \tag{10}$$

应用卡尔曼滤波结论可得如下结果：