

具有参数不确定性的火炮弹药协调器定位精度优化

高学星¹, 苏哲子², 孙华刚³, 侯保林¹

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 中国兵器科学研究院, 北京 100089;

3. 总装备部 军械技术研究所, 河北 石家庄 050000)

摘要: 基于火炮弹药协调器定位过程中的参数不确定性, 提出一种间接提高定位精度可靠性的优化方法。分析了影响弹药协调定位性能的主要不确定性因素, 对不确定性变量进行空间变换和拉丁超立方采样, 根据空间变换后采样点到均值点的距离计算误差权值; 在 Simulink 中建立协调过程的机电系统模型, 并对各个采样点进行仿真以获取定位误差, 对定位误差进行加权取和作为性能指标, 使用粒子群优化算法对该性能指标进行了最优化设计。优化计算结果表明, 该方法具有显著的优化效果和较高的计算效率。

关键词: 兵器科学与技术; 弹药协调器; Simulink 建模; 参数不确定性; 可靠性; 粒子群优化

中图分类号: TG156 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2014)06-0776-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.06.004

Optimization Design of Positioning Precision for Howitzer Shell Transfer Arm with Parameter Uncertainty

GAO Xue-xing¹, SU Zhe-zi², SUN Hua-gang³, HOU Bao-lin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. Ordnance Science and Research Academy of China, Beijing 100089, China;

3. Institute of Ordnance Technology, Chinese PLA General Armament Department, Shijiazhuang 050000, Hebei, China)

Abstract: An optimization design method is proposed to indirectly improve the reliability of positioning precision for shell transfer arm in ammunition automatic loading system with uncertain parameters. The main uncertain factors that influence the positioning performance are analyzed. Space is transformed, and Latin hypercube sampling is applied for the uncertain variables. The error weights are calculated according to the distances from sampling points to the mean point in the transformed space. An electromechanical model is established with MATLAB/Simulink, and the simulations are run for every sampling point to get the positioning errors. The weighted sum of these errors is calculated as a performance index. This performance index is optimized using particle swarm algorithm. This method has remarkable optimization effect and good computational efficiency.

Key words: ordnance science and technology; shell transfer arm; Simulink modeling; uncertain parameter; reliability; particle swarm optimization

收稿日期: 2013-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51175266/E050604)

作者简介: 高学星(1987—),男,博士研究生。E-mail:hss1737@gmail.com;

苏哲子(1935—),男,中国工程院院士,博士生导师。E-mail:hss1737@163.com

0 引言

现代自行火炮对于火力、射速、机动性、战场生存能力、信息化水平、人机工程等性能有着苛刻的要求,因此系统复杂,存在故障频发的问题。典型故障之一就是弹药自动装填系统协调定位失效。

火炮的弹药自动装填系统旨在取代火炮的弹药选取、放置、传递、管理、输入膛等动作的人工操作并保证火炮高效、可靠射击。

弹药自动装填系统的协调器(见图1)用于接收弹仓内被推弹器所推送出来的弹丸,然后将该弹丸传送到输弹线上由输弹机输入膛后协调器再返回原位。协调器由两个串励式直流电机并联驱动,减速传动部分包括两级直齿轮传动和一级蜗轮蜗杆传动组成,其中蜗轮与耳轴固联。由平衡油缸和蓄能器等组成的小平衡机,用于平衡协调器的重力矩,减小驱动电机的负载,支撑协调器平稳运动。协调器与托架之间有角度传感器,用于提供协调器相对于起落部分的角度信号,使协调器转至正确位置^[1]。

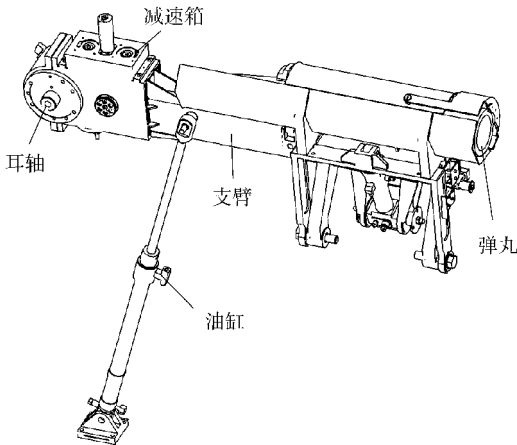


图1 协调器

Fig.1 Shell transfer arm

协调器定位精度是一个受控、高速的机电系统动态过程结果,其可靠性受炮塔扰动、传动摩擦系数、液压系统性能、驱动电压等多个不确定性因素影响。在计算定位精度可靠性时,其极限状态函数是定位误差 $\varepsilon(\mathbf{X}) = \varepsilon_0$, 其中 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是不确定性变量, ε_0 是限定定位失效的某个确定值。 $\varepsilon(\mathbf{X}) = \varepsilon_0$ 的显式表达式是无法直接求解获得的,通常可以使用响应面法^[2]、Kriging 法^[3]、神经网络法^[4]等获得近似的极限状态函数,再进行可靠度或者可靠性参数的求解,最终计算得到的可靠性是有误差的,同时需要一定的计算时间。

如果进行基于可靠性的优化设计,每次改变设计变量时都需要重新计算可靠性,迭代过程中的反复计算可靠性,会造成令人难以接受的计算时间花费^[5]。实际上,优化过程中的具体可靠性数值并不完全可信,只要保证优化的趋势是正确的,同样可以实现提高可靠性的目的。

本文避开优化过程中的可靠性计算,对不确定性变量进行空间转换,根据标准空间中采样点到均值点的距离来计算误差权值,在 Simulink 中建立动力学和控制模型并对采样点进行仿真以获得定位误差,将定位误差的加权和作为优化过程的性能参数,并采用粒子群优化算法对该性能参数进行优化。

1 协调器建模

1.1 动力学建模

协调器支臂的受力分析如图2所示。

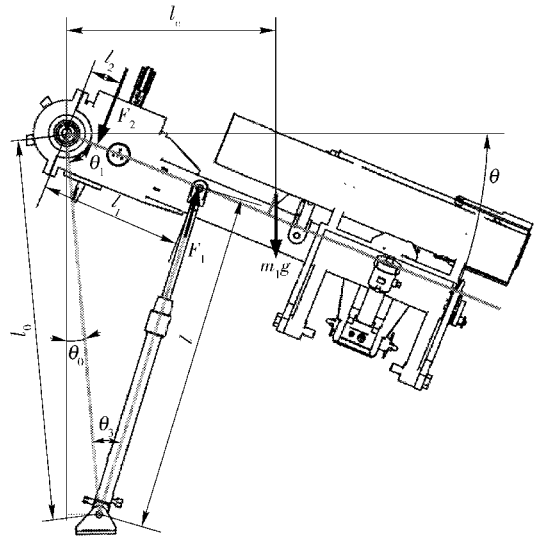


图2 支臂受力分析

Fig.2 Dynamic analysis of arm

影响协调器支臂转动的主要力有支臂自身重力 $m_1 g$, 炮塔垂直方向振动等效为支臂惯性力变化 $\beta m_1 g$, 小平衡机的支撑力 F_1 , 蜗杆对支臂的沿蜗杆轴向作用力 F_2 。由刚体定轴转动动力学:

$$(1 + \beta) m_1 g l_c + F_2 l_2 - F_1 l_0 \sin \theta_3 = J_{10} \ddot{\theta}, \quad (1)$$

式中: $F_1 = p_0 \left(\frac{V_0}{V_0 - \Delta S \Delta l} \right)^{n_a} \Delta S$, p_0 、 V_0 分别为蓄能器初压和气体腔初始容积, ΔS 为油缸活塞两侧面积差, Δl 为活塞杆和液压缸的相对位移, n_a 为气体状态方程中的多变指数; J_{10} 为支臂相对于转轴的转动惯量; $\beta = R \beta_u$, β_u 为根据实验数据获得的时变函数, 为 β 变化的上界, R 是扰动幅值加成系数。

对蜗杆进行受力分析(见图 3),在其轴向方向有

$$F_a - F_{fa} - F_2 + m_2 g \cos \theta - m_2 \ddot{\theta} l_2 = 0. \quad (2)$$

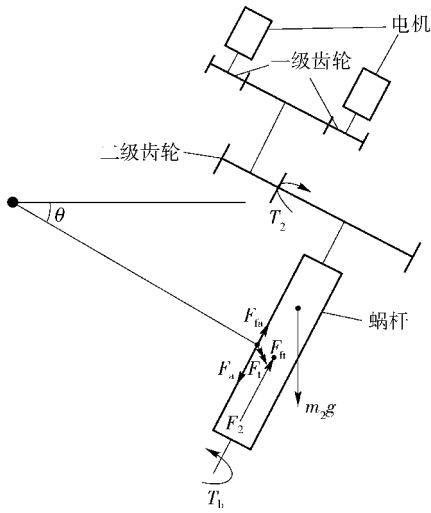


图 3 蜗杆受力分析示意图

Fig. 3 Dynamic analysis of worm

旋转运动方程:

$$T_2 - T_b - (F_t + F_{ft}) r_2 = J_2 \dot{\omega}_2, \quad (3)$$

(2)式和(3)式中: m_2 为蜗杆质量; l_2 为蜗杆轴线到耳轴的距离(见图 1); F_a 、 F_t 、 F_{fa} 、 F_{ft} 分别为接触压力的轴向分力、周向分力,摩擦力的轴向分力、周向分力; $F_a = F_n \cos \alpha_n \cos \gamma$, $F_t = F_n \cos \alpha_n \sin \gamma$, $F_{fa} = F_f \cos \gamma = \mu F_n \cos \gamma$, $F_{ft} = F_f \sin \gamma = \mu F_n \sin \gamma$, α_n 为压力角, γ 为导程角, F_n 为蜗轮蜗杆啮合正压力, μ 为摩擦系数; T_b 为电磁制动器输出力矩; r_2 为蜗杆分度圆半径;

$$T_2 = 2n_1 n_2 T - T_f - 2n_1 n_2 J_{w1} \dot{\omega}_{w1} - n_2 J_{w2} \dot{\omega}_{w2} \quad (4)$$

为前级齿轮作用于蜗杆的转矩, T 为电机的输出转矩, n_1 、 n_2 、 n_3 为减速箱的三级传动比,其中蜗轮蜗杆的传动比 $n_3 = 60$, T_f 为前两级齿轮的传动阻力矩。

将以上方程进行整理,在 Simulink 中建立仿真模型。

1.2 控制系统建模

驱动单机使用的是两个串励式直流电机,相关的动态方程^[6]有

$$U = E + R_m I_a + L \frac{dI_a}{dt}, \quad (5)$$

$$\Phi = K_f I_a, \quad (6)$$

$$E = C_e \Phi \omega_{w1}, \quad (7)$$

$$T = C_T \Phi I_a, \quad (8)$$

式中: U 为电机输入电压; E 为反电动势; R_m 为电

阻; I_a 为电枢电流; L 为电感; Φ 为主磁通; K_f 为励磁系数; C_e 为反电动势系数; ω_{w1} 为电机转速; T 为电机输出转矩; C_T 为电磁转矩系数。

电机的控制与驱动方案如图 4 所示,电机含有两个方向相反的励磁绕组,用来产生正向和反向驱动力矩,功率器件采用绝缘栅双极型晶体管(IGBT)。控制信号由比例-微分闭环控制产生,控制信号为正时,与正向励磁绕组相连的 IGBT 导通,与反向励磁绕组相连的 IGBT 断开;控制信号为负时,与正向励磁绕组相连的 IGBT 断开,与反向励磁绕组相连的 IGBT 导通。为防止两个励磁绕组同时接通,在触发电路中放置了门限电路,使得 IGBT 的导通具有了迟滞性。协调定位时,励磁绕组上的电压为准脉冲形式,在功能上类似于脉宽调制。

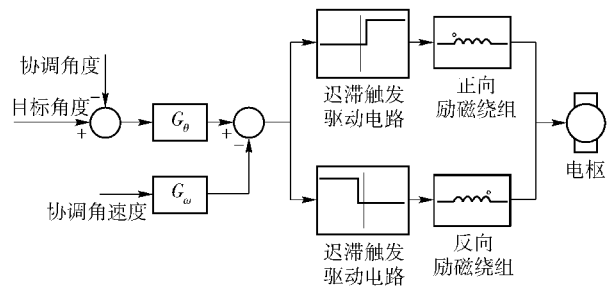


图 4 电机的控制与驱动框图

Fig. 4 Control and drive block diagram of motor

根据图 4 在 Simulink 中建立仿真模型中的控制模块。

2 不确定性变量与误差加权方法

2.1 不确定性变量及空间标准化转换

协调器工作时,可能受到由火炮射击带来的扰动;蜗杆蜗轮齿面之间受力大、受力情况复杂、不确定性明显,是协调过程中的关键受力面,蜗杆蜗轮间摩擦性能变化会对定位效果产生明显影响;小平平衡力直接加在支臂上,协调性能对小平平衡机压力变化比较敏感,造成该力变化的主要原因是环境温度的不确定性;在自行火炮工作中,车载电源需要同时给多套设备供电,可能造成协调器驱动电机的电压不稳定。

故选择此 4 个变量作为不确定性变量进行分析:扰动幅值系数 R ,蜗轮蜗杆间接触摩擦系数 μ ,多变指数 n_a ,电机输入电压 U 。

所掌握的以上 4 个变量的不确定性情形如表 1 所示。

对不确定性变量空间进行坐标变换,使得区间

表 1 不确定性变量
Tab. 1 Uncertain variables

变量	下界	均值	上界
R	0	0.3	1
μ	0.04	0.055	0.075
n_a	1	1.2	1.4
U/V	21.0	24.0	26.5

下界映射到标准空间中对应坐标的 -1 处, 区间上界映射到 $+1$ 处, 均值映射到 0 处。由于不确定性变量的均值不一定为区间上界和下界二者的均值, 需要选择单调的凹函数或者凸函数进行非线性变换。本文选择映射函数:

$$x_N = f(x) = a(x - e) + \frac{b(x - e)^2}{(x - e)^2 + 1}, \quad (9)$$

式中: x_N 为标准空间中的坐标; e 为变量均值; a 、 b 为函数的系数, 可根据各个变量的映射关系求出。

假设误差函数 $\varepsilon(\mathbf{X})$ 较为连续且平滑时, 考虑 $\varepsilon(X_N)$ 在标准空间内的分布与可靠性的关系, 可知:

- 1) 极限状态曲面 $\varepsilon(\mathbf{X}_N) = \varepsilon_0$ 的中心越靠近空间的原点(即均值点)可靠性越高;
- 2) 极限状态曲面围成的区域(即安全域)越大可靠性越高。

例如图 5 中 3 种情形中, B 的可靠性高于 A, C 的可靠性高于 B。

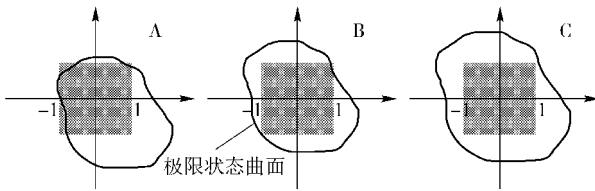


图 5 3 个不同的极限状态曲面

Fig. 5 Three different limit state surfaces

所以即使不计算可靠性数值, 在迭代过程中遵循以上两种趋势, 也能实现提高可靠性的最优化设计。

2.2 误差权值与性能参数

在略大于不确定性变量区间范围内进行采样。假设采样是比较均匀的, 为使得误差加权和对接近均值点的采样点的误差值更加敏感, 同时考虑到以采样点到原点距离为尺度时, 距离越大, 采样密度越大, 本文使用高斯函数作为误差权值函数:

$$error(k) = e^{-0.25d_k^2 \ln c}, \quad (10)$$

式中: d_k 为标准空间中第 k 个采样点到原点的距

离; c 为均值点加权系数与顶点加权系数之比。均值点处 $d = 0, error = 1$; 而标准空间中不确定性变量分布区间围成的 4 维超立方体顶点处 $d = 2, error = 1/c$ 。

对每个采样点, 将坐标值赋值到 Simulink 中的参数中进行仿真, 获得定位误差(绝对值形式)。将定位误差与相应的权值相乘取和作为性能参数:

$$perf = \sum_{k=1}^n error(k) \times \varepsilon(k). \quad (11)$$

在安全域内有 $\varepsilon(\mathbf{X}_N) < \varepsilon_0$, 而且在误差函数 $\varepsilon(\mathbf{X}_N)$ 不过分崎岖的情况下, 大致上越接近极限状态曲面, ε 越大; 越接近安全域的内部, ε 越小。

对于性能参数, 由于越接近均值点具有越大的加权系数, 故欲使性能参数 $perf$ 变小, 要么降低整体的误差, 使得安全域变大, 要么使安全域的中心靠近均值点, 即 2.1 节所述的两种提高可靠性的趋势。

c 的取值与不确定性变量空间的维数及采样有关, 并带有一定的主观性。本文采用拉丁超立方采样方法(LHS), 该采样方法具有更好的采样均匀性和样本效率^[7], 使用的采样点数为 100, 对每个采样点分别进行协调目标角度为 25° 和 60° 的动力学仿真并获取定位误差, 故 $n = 200$, 不确定性变量的维数为 4, 取 $c = 20$ 。 $error$ 与 d 的关系如图 6 所示。

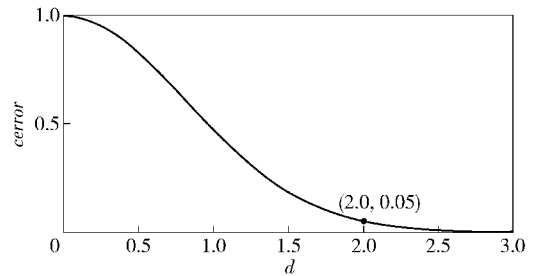


图 6 误差加权系数

Fig. 6 Error weights

3 粒子群优化

3.1 粒子群优化算法概述

粒子群优化算法(PSO)是一种模拟鸟群社会行为的群体搜索算法, 粒子群中的粒子有一个基本的行为: 仿效邻域个体的成功和他们自己的成功。从这个基本行为显现出来的集体行为就是在一个高维搜索空间中发现最优区域^[8]。PSO 算法具有结构简单、参数较少、易于实现以及寻优能力强等优点^[9]。

3.2 优化问题描述

取减速箱前两级传动比 n_1, n_2 , 控制系统中角度

反馈系数乘子 G_θ , 角速度反馈系数乘子 G_ω 为优化的设计变量。

根据设计要求和仿真模型的调试与分析, 设定各设计变量的可取值范围, 于是, 本文的优化问题可描述为

$$\begin{aligned} \min \text{perf} &= \sum_{k=1}^n \text{error}(k) \times \varepsilon(k), \\ \text{s. t. } &2 < n_1 < 4, 2 < n_2 < 4, \\ &6 < n_1 n_2 < 10, \\ &0.5 < G_\theta < 2, 0.5 < G_\omega < 2. \end{aligned}$$

3.3 优化流程

1) 对不确定性变量进行拉丁超立方采样。

2) 对不确定性变量进行坐标转换并计算采样点的误差加权系数 $\text{error}(k)$ 。

3) 粒子群初始化, 取种群大小 16, 初始化各粒子位置 $p(t, i, j)$, 其中 t 为迭代次数, 初始值 $t = 1$, i 为粒子标号, j 表示第 j 维设计变量。运行 Simulink 进行协调过程仿真, 获得定位误差 $\varepsilon(t, i, k)$, 计算性能参数 $\text{perf}(t, i) = \sum_{k=1}^n \text{error}(k) \times \varepsilon(t, i, k)$, 初始化粒子最优位置 $y(t, i, j)$ 和群最优位置 $\hat{y}(t, j)$, 初始化惯性权重 $w(t) = 0.9$, 初始化粒子速度 $v(t, i, j) = 0$, 加速系数 $c_1 = c_2 = 1$ 。

4) 更新各粒子速度:

$$\begin{aligned} v(t+1, i, j) &= c_1 r_1(t, j) [y(t, i, j) - p(t, i, j)] + \\ &c_2 r_2(t, j) [\hat{y}(t, j) - p(t, i, j)] + w(t) v(t, i, j), \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $r_1(t, j), r_2(t, j)$ 为 0~1 间的随机值。

5) 计算新的粒子位置:

$$p(t+1, i, j) = p(t, i, j) + v(t+1, i, j). \quad (13)$$

6) 分别检查每个粒子位置是否超出约束条件。如超出, 更改 $v(t+1, i, j) = 0$, $\text{perf}(t+1, i) = \infty$; 否则运行 Simulink 进行协调过程仿真, 获得定位误差 $\varepsilon(t+1, i, k)$, 计算性能参数 $\text{perf}(t+1, i) = \sum_{k=1}^n \text{error}(k) \times \varepsilon(t+1, i, k)$ 。

7) 根据性能参数更新粒子最佳位置 $y(t+1, i, j)$ 和群最佳位置 $\hat{y}(t+1, j)$ 。

8) 检查终止条件: 群最佳性能参数取得收敛或达到最大迭代次数 t_{\max} 。若达到最大迭代次数而未收敛, 回到步骤 3 重新进行粒子群的随机初始化; 若取得收敛, 终止程序; 否则, 更新惯性权重:

$$w(t+1) = 0.4 + \frac{(w(t) - 0.4)(t_{\max} - t)}{t_{\max}}. \quad (14)$$

9) 重复步骤 4~8, 直到满足终止条件。

3.4 优化结果

进行 3 次不同的不确定性变量采样, 分别进行优化, 取收敛后群最佳性能最小的一次作为优化结果。优化过程中群最佳性能的收敛过程如图 7 所示。设计变量的最优解为: 减速箱前两级传动比 $n_1 = 3.27, n_2 = 3.03$; 控制系统中角度反馈系数乘子 $G_\theta = 1.64$; 角速度反馈系数乘子 $G_\omega = 1.00$ 。对齿轮传动比进行规整, 最优设计变量取: $n_1 = 87/27 = 3.22, n_2 = 57/19 = 3; G_\theta = 1.64, G_\omega = 1.00$ 。

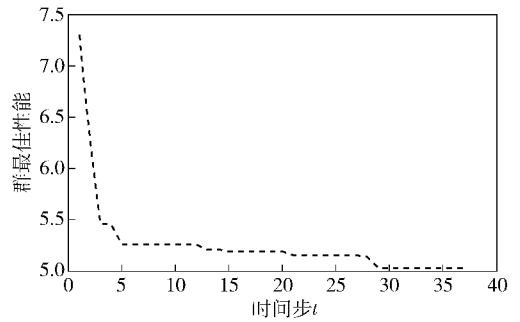


图 7 群最佳性能收敛过程

Fig. 7 Convergence process of swarm optimum performance

对比图 8 与图 9 中采样点定位误差与标准空间中采样点到原点的距离的分布关系可以看出, 优化后 (见图 9) 样本整体误差下降, 且大致上误差越大离均值点越远。可由此推测, 安全域更大且安全域的中心更加靠近均值点, 即实现了 2.1 节中的两个优化目标。

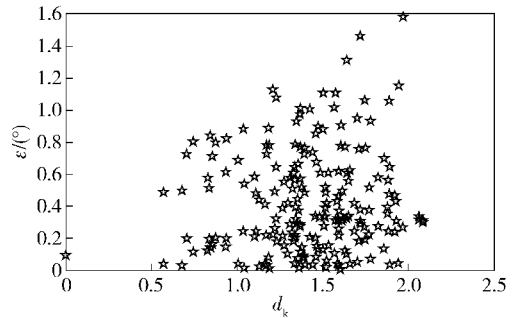


图 8 优化前采样点 $\varepsilon(k)$ 与 d_k 分布关系

Fig. 8 $\varepsilon(k)$ and d_k of samples before optimization

4 结论

本文利用 Simulink 建立了火炮弹药协调器机电系统模型, 并对定位过程中的不确定性因素进行了分析。对不确定性变量进行了空间变换和拉丁超立方采样, 根据空间变换后采样点到均值点的距离计

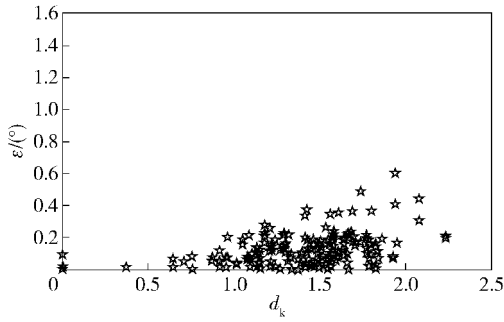


图9 优化后采样点 $\varepsilon(k)$ 与 d_k 分布关系

Fig.9 $\varepsilon(k)$ and d_k of samples after optimization

算误差权值后,对每个采样点进行 Simulink 仿真,将获取的定位误差值进行加权取和,通过粒子群算法对此加权和进行了优化。优化后样本整体误差明显下降,并且由于误差权值的作用,使得大致上误差越大的点离均值越远。根据对可靠性与标准空间中安全域分布关系的分析,此方法间接提高了协调器的定位精度可靠性。

参考文献 (References)

- [1] 侯保林,樵军谋,刘琮敏. 火炮自动装填[M]. 北京:兵器工业出版社,2010.
HOU Bao-lin, QIAO Jun-mou, LIU Cong-min. Ammunition automatic loading system of howitzer[M]. Beijing:Publishing House of Ordnance Industry, 2010. (in Chinese)

- [2] Nikolaidis E, Ghiocel D M, Singhal S. Engineering design reliability handbook[M]. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [3] 潘林锋,周昌玉,陈士诚. 基于 Kriging 模型的非概率可靠度计算[J]. 应用力学学报, 2010, 27(4): 791 - 794.
PAN Lin-feng, ZHOU Chang-yu, CHEN Shi-cheng. Non-probability reliability calculation based on Kriging model[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(4): 791 - 794. (in Chinese)
- [4] 吕震宙,杨子政. 基于神经网络的可靠性分析新方法[J]. 机械强度, 2006, 28(5): 699 - 702.
LYU Zhen-zhou, YANG Zi-zheng. New reliability analysis method based on artificial neural network [J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(5): 699 - 702. (in Chinese)
- [5] Valdebenito M A, Schueller G I. A survey on approaches for reliability-based optimization[J]. Struct Multidisc Optim, 2010, 42: 645 - 663.
- [6] 汪国梁. 单相串激电动机[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1980.
WANG Guo-liang. Single phase universal motor [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1980. (in Chinese)
- [7] Roshanian J, Edraimi M. Latin hypercube sampling applied to reliability-based multidisciplinary design optimization of a launch vehicle [J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 28: 297 - 304.
- [8] Engelbrecht A P. Computational intelligence: an introduction [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, INC, 2009.
- [9] 王维博. 粒子群优化算法研究及其应用[D]. 成都:西南交通大学, 2012.
WANG Wei-bo. Research on particle swarm optimization algorithm and its application [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)