

文章编号: 1001-0920(2006)08-0913-05

## 防空火力分配建模及优化方法研究

王小艺, 侯朝桢, 原菊梅, 郭飞, 郝伟  
(北京理工大学自动控制系, 北京 100081)

**摘要:** 在综合考虑防空对抗双方作战价值的基础上, 建立了一种用于防空作战多武器系统对抗多批目标的火力分配模型. 在此基础上, 提出了基于粒子群优化(PSO)算法以及粒子群与遗传算法相结合(PSO-GA)的火力优化分配方法. 通过仿真, 并与遗传算法(GA)进行了比较, 验证了火力分配模型的可行性以及所提出优化方法的有效性和优越性.

**关键词:** 火力分配; 粒子群优化算法; 粒子群遗传算法; 遗传算法

**中图分类号:** TP301.6 **文献标识码:** A

## Modeling and Optimization Method on Antiaircraft Firepower Allocation

WANG Xiaoyi, HOU Chaozhen, YUAN Jumei, GUO Fei, HAO Wei

(Department of Automatic Control, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China. Correspondent: WANG Xiaoyi, Email: bitwxy2003@bit.edu.cn)

**Abstract:** Considering the battle value on both sides of antiaircraft counterwork, a firepower allocation model of multiweapon systems antagonizing multi-target is set up. On the basis of this model, two methods based on particle swarm optimization (PSO) algorithm and the firepower optimization allocation given by integrating particle swarm optimization algorithm with genetic algorithm (PSO-GA) are put forward. Simulation results compared with genetic algorithm (GA) show that the firepower allocation model is feasible and these two optimization methods are effective and preponderant.

**Key words:** Firepower allocation; PSO algorithm; PSO-GA; GA

### 1 引言

防空作战的目的就是选择最优的火力分配方案, 使武器系统对空中来袭的多批目标尽可能地分配给它们射击最有利的火力单元, 以达到最优的整体抗击效果, 发挥最大的作战效能和防御效能. 防空对抗的火力分配问题实质上是一种整数型非线性组合优化决策问题, 属于N-P难问题<sup>[1]</sup>. 火力分配作为指挥控制系统一个重要的辅助决策功能, 与作战原则、策略、方案等因素密切相关, 存在大量的变量和参量. 因此, 在对火力分配进行建模时, 一方面要综合考虑多方面因素, 以建立合理的火力分配模型; 另一方面, 还应在理论研究的方法上进行探讨, 尝试

一些新算法, 目的是使用更加简练、快速的方法, 使得决策结果更加客观合理.

目前, 一些学者运用智能算法对防空火力分配问题进行了研究<sup>[2-4]</sup>. 其中, 遗传算法作为一种新发展起来的启发式优化算法, 在解决火力优化分配问题上已广泛采用<sup>[5-7]</sup>. 但是, 目前有关文献对防空火力分配建模尚存在片面性, 只单独考虑了武器系统的作战效能<sup>[7-10]</sup>, 而忽略了防御效能. 针对这一问题, 本文在综合考虑防空武器系统作战效能和防御效能的基础上, 建立了一种用于防空多武器系统对抗多批目标的火力分配模型, 提出了基于PSO以及PSO-GA的火力优化分配方法, 并将一种编码方法

收稿日期: 2005-05-25; 修回日期: 2005-07-26

基金项目: 国防预研基金项目(Z172004A 001).

作者简介: 王小艺(1975—), 男, 山西新绛人, 博士生, 从事人工智能指挥控制系统建模与效能评估的研究;  
侯朝桢(1938—), 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 从事计算机控制、高级仿真体系结构等研究.

引入到算法解的编码中。这种方法可以将模型的约束条件与解的编码融合到一起,从而避免了处理约束条件的主观性,提高了算法的运算效率。经过对这两种方法的仿真和测试,并与 GA 进行比较,验证了所建模型和方法的可行性、有效性和优越性。

## 2 防空火力分配数学模型

防空作战中火力优化分配应该遵行的主要原则是:优先射击重点目标,整体上达到最优分配,同时要考虑各个武器系统的火力单元数量,以达到最大作战效能和防御效能。由于火力优化分配的效率是根据消灭敌人、保护自己的战术原则确定的,也就是要达到我方武器系统对来袭目标的摧毁概率最大,同时还要考虑我方所保护的要点被摧毁的概率最小。

首先,考虑我方武器系统攻击敌方目标的作战效能。设有  $k$  类不同型号的武器系统,而且每个武器系统只有一种性能的火力单元,确定要打击的目标为第  $m$  批。火力分配的决策矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{k1} & X_{k2} & \dots & X_{km} \end{bmatrix},$$

其中  $x_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, m$ ) 表示用于打击第  $j$  批目标的第  $i$  个武器系统火力单元数目。

定义 1<sup>[10]</sup>  $W = [w_j]^T$  为目标的威胁度系数矩阵,  $j = 1, 2, \dots, m$ 。

对于目标分配火力单元,需要使毁伤目标数的数学期望达到最大值<sup>[11]</sup>。建立火力优化模型为

$$\max F = \sum_{j=1}^m w_j \left[ 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_{ij}) x_{ij}^{\alpha} \right], \quad (1a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^m x_{ij} = L_m, x_{ij} \geq 0,$$

$$i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, m. \quad (1b)$$

其中:第  $i$  个武器系统可利用的火力单元数目为  $L_m$ ,第  $i$  个武器系统对第  $j$  批目标实施打击的毁伤概率为  $P_{ij}$ 。

另外,当空中有多批目标进攻我方保卫要地时,还需考虑我方的防御效能,即我方对敌方进攻的任务分配原则是使各武器系统能取得在整体上的最大防御效能。为定量研究攻击任务的分配策略,需分析敌方目标、防空系统中基本火力单元以及保卫目标之间的相互关系。

定义 2<sup>[11]</sup> 整体防御效能是目标威胁度与防御系数的乘积,即  $R = Q\theta$  其中:  $Q = [w_l]$  为目标威胁矩阵,表示第  $j$  批目标进攻我方第  $l$  个保卫要地的威胁度;  $\theta = [\theta_i]$  为防御武器系统的权系数矩阵;  $R$  包

含了敌方目标、防御武器系统以及我方保护要地 3 方面的信息。

定义 3 火力分配与整体防御效能的乘积为整体防御效能,即  $F = XR$ 。

于是建立整体防御效能优化模型为

$$\max F = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^k x_{ij} (\omega_i \theta_i), \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^k \theta_i = 1, \sum_{j=1}^m x_{ij} = L_m. \quad (3)$$

在综合考虑我方武器系统进攻的作战效能 (1a) 以及我方对保护要地的防御效能 (2) 的前提下,建立防空综合火力优化模型为

$$\max H = \max (F + F) = \sum_{j=1}^m w_j \left[ 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_{ij}) x_{ij}^{\alpha} \right] + (1 - \alpha) \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^k x_{ij} (\omega_i \theta_i), \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m x_{ij} = L_m, x_{ij} \geq 0; \quad \sum_{i=1}^k \theta_i = 1. \quad (5)$$

其中  $\alpha$  为调节系数,表示作战效能与防护效能之间的权重。

## 3 火力优化的算法设计

遗传算法是一种借鉴生物界自然选择和遗传机制的随机搜索算法,已成功应用于解决火力优化分配问题。为比较本文算法的可行性和优越性,下面分别给出两种算法的设计步骤。

### 3.1 火力优化分配的 PSO 算法设计

粒子群优化算法是一种新的全局优化算法,最初是用于处理连续优化问题,目前已扩展应用于很多组合优化问题<sup>[12]</sup>。PSO 算法是通过潜在的解(粒子)以某种意义上的随机速度变化来追随当前的最优粒子,从而在解空间进行搜索,以寻找最优解。相对其他优化算法和演化式计算方法,粒子群优化算法最大的特点是搜索速度快。

#### 3.1.1 算法的编码方法

传统 PSO 算法是将待优化的参数作为粒子的各个维,在优化过程中通过粒子速度和位置的更新来改变待优化的参数值,从而直接在解空间中搜索。具体到本文的优化模型,设有  $m$  个武器系统,  $n$  批目标,待优化的参数为第  $i$  个武器系统对于第  $j$  批目标分配的火力单元数,即  $M_{ij} = (M_{11}, M_{12}, \dots, M_{1n}, M_{21}, M_{22}, \dots, M_{2n}, \dots, M_{m1}, M_{m2}, \dots, M_{mn})$ 。约束条件为  $\sum_{j=1}^n M_{ij} \leq K_i, i = 1, 2, \dots, m$ ,表示第  $i$  个武器系统最多有  $K_i$  个火力单元。

本文的编码方式为采用一种等价形式表示待优化参数,并将其作为粒子的各个维,从而间接对待优化参数进行调节。具体到本文的优化模型,则按照每个火力单元分配给不同批目标进行编码,粒子的维数不再由目标数决定,而由每个武器系统的火力单元数决定。对于  $m$  个武器系统,每个系统的火力单元数为  $K_i$ ,则编码后每个粒子的维数为  $\sum_{i=1}^m K_i$ 。解空间的等价形式为,第  $i$  个武器系统的第  $t$  个火力单元分配的目标为  $A_{it}$ ,即待优化的参数为  $A_{it} = (A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1k}, A_{21}, A_{22}, \dots, A_{2k}, \dots, A_{m1}, A_{m2}, \dots, A_{mk})$ ,其中  $A_{it} \in [1, n]$ 。通过这种方法可以将约束条件直接加入到解的编码中。

### 3.1.2 权重的选取

考虑到粒子更新速度具有随机性,因此会扩大搜索空间。在实际优化过程中,往往应先进行全局搜索,使得搜索空间快速趋近于某一区域;然后采用局部精细搜索来提高解的精度。因此,对基本速度更新公式修正如下:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 \text{rand}_1 (p_{\text{best}d}^k - x_{id}^k) + c_2 \text{rand}_2 (g_{\text{best}d}^k - x_{id}^k);$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}; \quad (6)$$

$$\omega = \omega_{\text{max}} - \frac{(\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}) I}{I_{\text{max}}} \quad (7)$$

其中:  $c_1, c_2$  为加速系数(学习因子);  $v_{id}^k$  为粒子  $i$  在第  $k$  次迭代中  $d$  维的速度;  $x_{id}^k$  为粒子  $i$  在第  $k$  次迭代中  $d$  维的当前位置;  $I, I_{\text{max}}$  分别为当前迭代次数和总的迭代次数;  $\omega$  为加权系数,  $\omega_{\text{max}}$  和  $\omega_{\text{min}}$  分别为最大、最小加权系数。经过式(7)修正后,当  $\omega$  较大时具有较强的全局搜索能力,当其变小时具有局部搜索能力。

### 3.2 火力分配的优化算法设计

PSO 算法的最优解搜索依赖于“记忆”能力和粒子间的信息共享。如果当前最优为局部最优,所有粒子收敛于该粒子,则很难跳出局部最优,尤其对于多峰值搜索问题更易陷入局部最优。

遗传算法中染色体相互共享信息,整个种群比较均匀地向最优区域流动,因此遗传算法具有很强的全局搜索能力。遗传算法中的变异机制可以帮助粒子跳出局部最优,从而可利用遗传算法的并行搜索能力,粒子群的局部搜索能力和“记忆”能力来增强改进算法的全局收敛性能。

下面给出基于 PSO 和 PSO-GA 的防空火力分配优化算法。

#### 3.2.1 基于 PSO 的火力优化分配算法步骤

Step 1: 产生初始种群(50 个),并确定已知条件  $w_j, p_{ij}, \alpha, \omega_i, \theta_i$ ; 确定目标优化函数(4),将其作为适

应度函数

Step 2: 随机产生多目标火力单元分配数目,并根据已知值,代入式(4),计算出个体适应度

Step 3: 将每个粒子的适应度与  $p_{\text{best}}$  和  $g_{\text{best}}$  进行比较,同时更新  $p_{\text{best}}$  和  $g_{\text{best}}$

Step 4: 按式(6)进行粒子速度和位置的更新,求出适应度最大所对应的位置值

Step 5: 判断是否收敛,如果收敛,则转 Step 6; 否则返回 Step 2

Step 6: 判断是否重新进行火力分配,如果重新分配,则返回 Step 1; 否则结束

#### 3.2.2 基于 PSO-GA 的火力优化分配算法步骤

Step 1 和 Step 2 与 PSO 火力优化算法相同

Step 3: 判断算法是否收敛,如果收敛,则转 Step 7; 否则进行下一步。

Step 4: 对种群执行“选择 - 交叉 - 变异”操作,将所获得的新种群作为粒子群

Step 5: 按式(6)进行粒子速度和位置的更新,将每个粒子的适应度与  $p_{\text{best}}$  和  $g_{\text{best}}$  进行比较,并同时更新  $p_{\text{best}}$  和  $g_{\text{best}}$

Step 6: 判断算法是否收敛,如果收敛,则进行下一步; 否则转 Step 2

Step 7: 求出适应度最大所对应的位置值

Step 8: 判断是否重新进行火力分配,如果重新分配,则返回 Step 1; 否则结束

## 4 仿真与结果分析

考虑作战规模较小(作战想定 1)和作战规模较大(作战想定 2)两种情况下的火力优化分配

**作战想定 1** 设多批目标进入我防空领域,雷达探测到其中有 5 批目标对我方 4 个保护要地构成威胁,我方有 3 组武器系统对这 5 批来袭目标进行火力优化分配。武器系统的攻击参数(包括毁伤概率和目标威胁系数)如表 1 所示

目标威胁矩阵和防御武器系统的权系数矩阵分别为

$$Q = \begin{bmatrix} 0.10 & 0.38 & 0.22 & 0.30 \\ 0.41 & 0.12 & 0.09 & 0.38 \\ 0.25 & 0.10 & 0.10 & 0.55 \\ 0.13 & 0.19 & 0.48 & 0.20 \\ 0.28 & 0.47 & 0.14 & 0.11 \end{bmatrix},$$

$$\theta = \begin{bmatrix} 0.22 & 0.14 & 0.32 \\ 0.28 & 0.31 & 0.27 \\ 0.26 & 0.26 & 0.13 \\ 0.24 & 0.29 & 0.28 \end{bmatrix}.$$

在确定了目标分配优化函数的参数后,采用 C 语言编程,对本文第 3 节提出的防空火力分配的

表 1 武器系统的毁伤概率与目标威胁系数

武器系统	目标批次				
	1	2	3	4	5
1	0.82	0.50	0.27	0.95	0.40
2	0.30	0.90	0.11	0.41	0.88
3	0.40	0.46	0.97	0.11	0.44
$\omega$	0.15	0.25	0.15	0.25	0.20

PSO 和 PSO-GA 算法以及 GA 进行仿真实现遗传算法中初始种群选为 50 个,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.02 表 2 给出了 3 种算法的最终目标优化计算结果,3 种算法适应度的演变情况如图 1 所示

表 2 PSO, GA 和 PSO-GA 的火力优化分配情况

算法	目标批次					适应度	CPU/s
	1	2	3	4	5		
PSO	1	0	0	1	2	2.317 683	0.013 44
GA	2	0	0	1	0	2.317 683	0.066 98
PSO-GA	0	3	1	0	1	2.317 684	0.124 99

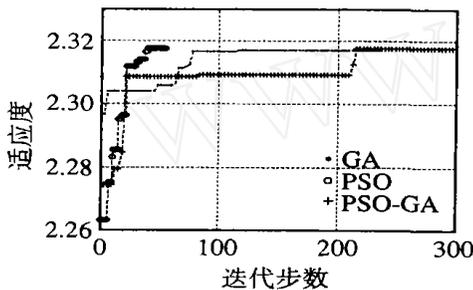


图 1 作战想定 1 情况下的 3 种算法适应度演变

仿真试验结果表明,在达到最大的适应度(综合效能)情况下,3 种算法得到的火力优化分配结果是一致的。由图 1 可以看出,基于 PSO 的优化算法在第 41 步便可以达到火力最优分配,且在运行时间上明显快于遗传算法,因此更加满足现代战争中辅助决策对实时性的要求

**作战想定 2** 雷达探测到 12 批目标对我方 6 个保护要地构成威胁,我方有 8 组防御武器系统对来袭目标进行火力优化分配。限于篇幅,武器系统的攻击参数表以及目标防御武器系统的威胁矩阵和权重系数矩阵略

经过计算机仿真,3 种算法适应度的演变情况如图 2 所示。基于 PSO 和 GA 的优化算法,在第 92 步和 2 169 步时得到优化解(适应度分别为 47.293 和 47.583),但不是火力分配的最优解(只能得到次优分配解)。基于 PSO-GA 的优化算法,在 1 300 步得到优化解,适应度为 47.712。由于 PSO-GA 综合了 PSO 和 GA 的优点,可以得到最优的火力分配结果。本例的最优火力分配结果为

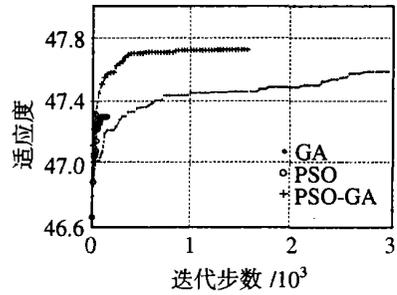


图 2 作战想定 2 情况下的 3 种算法适应度演变

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 3 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 3 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 3 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 3 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 5 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

仿真结果表明,在作战规模较小的情况下,3 种算法的分配结果相同。其中基于 PSO 算法的实时性较其他两种算法高,适合于实时的战场辅助决策;对于随着作战规模增大,模型的维数和复杂度随之增大的情况,基于 PSO-GA 的优化算法具有明显的优越性,可获到最优的火力分配结果。因此,在实时性要求相对不是很高的情况下,PSO-GA 优化算法可用于战场辅助决策

### 5 结 语

本文在综合考虑防空多武器系统对抗多目标的作战效能和防御效能前提下,提出了一种用于防空武器系统的多目标火力分配模型,首次将粒子群优化算法用于解决武器系统的多目标火力优化分配问题。针对所建模型的特点,分别提出了基于 PSO 和 PSO-GA 的火力优化分配方法。在解的形式上运用了一种编码方式,在保证算法正确性的同时,巧妙地处理了对于待优化参数的约束问题,提高了算法的运算效率,适合于现代战争对实时性、精度和可靠性的要求。最后对这两种算法进行了仿真,并与遗传算法进行了比较,结果验证了该模型和方法的有效性和优越性,为解决防空作战火力优化分配问题提供了一种有效的途径

### 参考文献 (References)

[1] Lloyd S P, Witsenhausen H S. Weapons Allocation is NP-complete [A]. *Proc of the 1986 Summer Conf on Simulation* [C]. Reno: NV, 1986: 1054-1058  
 [2] 高尚. 武器——目标分配问题的蚁群算法[J]. *计算机工程与应用*, 2003, 39(3): 78-79.  
 (Gao S. Ant Colony Algorithm for Weapon-target

- Assignment Problem [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2003, 39(3): 78-79.)
- [3] Lee Z-J, Lee C-Y, Su S-F. An Immunity-based Ant Colony Optimization Algorithm for Solving Weapon-target Assignment Problem [J]. *Applied Soft Computing J*, 2002, 2(1): 39-47.
- [4] Lee Z-J, Lee W-L. A Hybrid Search Algorithm of Ant Colony Optimization and Genetic Algorithm Applied to Weapon-target Assignment Problems [J]. *Computer Science*, 2003, 2690(9): 278-285.
- [5] 周林, 娄寿春, 赵杰. 基于遗传算法的目标优化分配模型[J]. *系统仿真学报*, 2001, 13(3): 311-313  
(Zhou L, Lou S C, Zhao J. An Optimization Apportion Model of Target Based on Genetic Algorithm s[J]. *J of System Simulation*, 2001, 13(3): 311-313.)
- [6] 曹奇英, 何张兵. WTA 问题的遗传算法研究[J]. *控制理论与应用*, 2001, 18(1): 76-79.  
(Cao Q Y, He Z B. A Genetic Algorithm of Solving WTA Problem [J]. *Control Theory and Application*, 2001, 18(1): 76-79.)
- [7] Lee Z-J, Su S-F, Lee C-Y. Efficiently Solving General Weapon-target Assignment Problem by Genetic Algorithms with Greedy Eugenics[J]. *IEEE Trans on*, 2003, 33(1): 113-121.
- [8] 陈绍顺, 王颖龙, 王君. 多武器系统的火力分配模型[J]. *光电与控制*, 2004, 11(3): 5-7.  
(Chen S S, Wang Y L, Wang J. Firepower Assignment Model for Multi-weapon System [J]. *Electronics Optics & Control*, 2004, 11(3): 5-7.)
- [9] 康英军, 李为民, 李续武. Hopfield 神经网络的防空火力最优分配问题[J]. *火力与指挥控制*, 2003, 28(6): 35-37.  
(Kang Y J, Li W M, Li X W. A Study of The Optimal Aerial Defense Firepower Distribution Based on HNN [J]. *Fire Control & Command Control*, 2003, 28(6): 35-37.)
- [10] 郑泽席. 使用多种防空武器时目标分配的数学模型[J]. *系统工程与电子技术*, 2000, 22(5): 15-16  
(Zheng Z X. A Mathematical Model of Target Assignment in Air Defense Fighting Many Kinds of Antiaircraft Weapon [J]. *System Engineering and Electronics*, 2000, 22(5): 15-16.)
- [11] 薛兵, 单甘霖, 黄允华. C<sup>3</sup>I 系统中基于多目标决策理论的对空攻击任务分配决策问题研究[J]. *火力与指挥控制*, 1997, (2): 17-20  
(Xue B, Shan G L, Huang Y H. On Decision-making of Air Defense Attack Task Assignment in C<sup>3</sup>I System Based on Multiobjective Decision Theory [J]. *Fire Control & Command Control*, 1997, (2): 17-20.)
- [12] Eberhart R C, Shi Y. Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources [A]. *Proc of the IEEE Congress on Evolutionary Computation* [C]. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2001: 81-86.

(上接第 912 页)

- [4] 陈希有, 陈学允. 矩阵变换器在非对称输入情况下输出电压波形的改善[J]. *电气传动*, 2000, 30(6): 16-20  
(Chen X Y, Chen X Y. The Improvement of Output Voltage Waveforms for Matrix Converter Under the Unbalanced Input Voltages[J]. *Electric Drive*, 2000, 30(6): 16-20.)
- [5] 陈希有, 陈学允. 直接实现式矩阵变换器在非对称输入条件下的谐波分析与改进[J]. *电机与控制学报*, 1999, 3(2): 103-107.  
(Chen X Y, Chen X Y. Analysis and Improvement of Harmonics on Directly Realizing Matrix Converter under Unbalanced Input Voltages[J]. *Electric Machines and Control*, 1999, 3(2): 103-107.)
- [6] Zhang L, Wathanasaran C, Shepherd W. Control of AC-AC Matrix Converter for Unbalanced and/or Distorted Supply Voltage [A]. *Proc of IEEE Electronics Specialist Conf* [C]. Chicago, 2001, 32: 1108-1113.
- [7] Lixiang Wei, Yoichi Matushita, Thomas A Lipo. A Compensation Method for Dual-bridge Matrix Converters Operating under Distorted Source Voltages [A]. *Proc Industrial Electronics Conf* [C]. Virginia, 2003: 2078-2084.
- [8] Domenico Casadei, Giovanni Serra, Angelo Tani. A General Approach for the Analysis of the Input Power Quality in Matrix Converters [J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 1998, 13(5): 882-891.