

基于改进离散粒子群算法的传感器布局优化设计

朱喜华¹, 李颖晖¹, 李 宁¹, 曹华金²

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安 710038; 2. 空军柳州 95275 部队, 广西柳州 545005)

摘 要: 传感器布局优化是复杂系统测试性设计的重要内容, 属于典型的组合优化问题. 通过改进系统的故障-传感器相关性矩阵, 建立了考虑传感器故障检测能力的约束优化模型. 利用混沌的遍历性初始化粒子群的参数, 惯性权重则根据粒子群的早熟收敛程度自适应调整, 并对粒子的位置更新方式进行了重新定义, 用改进后的离散粒子群算法求解建立的优化模型. 仿真实例验证了本文方法的有效性, 优化结果能满足系统的各项指标要求, 为复杂系统的传感器布局优化设计提供了一种可行途径.

关键词: 离散粒子群算法; 传感器布局优化; 故障检测能力; 早熟程度; 混沌

中图分类号: TN432 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 10-2104-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.10.036

Optimal Sensor Placement Design Based on Improved Discrete PSO Algorithm

ZHU Xi-hua¹, LI Ying-hui¹, LI Ning¹, CAO Hua-jin²

(1. School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China;

2. Liuzhou 95275 Unit of Air Force, Liuzhou, Guangxi 545005, China)

Abstract: Optimal sensor placement is important content of testability design for complicated systems, which belongs to the typical combinatorial optimization problem. Based on the improvement of the fault-sensor correlation matrix, the constraint optimization model is set up which considers the fault detection abilities of the sensors. The ergodic of chaos has been used to initialize the parameters of the particles, and the inertia weight is adjusted adaptively according to the swarm's premature convergence degree. Besides, the update of the particle's position has been redefined, then the improved discrete PSO algorithm is used to solve the optimization model. The simulation examples demonstrate that the proposed method is effective, and the optimization results can satisfy all the requests of the system, and it is a feasible approach for optimal sensor placement for complicated systems.

Key words: discrete PSO algorithm; optimal sensor placement; fault detection ability; prematurity degree; chaos

1 引言

综合的故障诊断、预测与健康管理 (Prognostics and Health Management, PHM) 已成为民用飞机和先进军机必须采用的一项先进技术, 信息的准确获取是 PHM 系统功能实现的基础, 而信号的获取离不开传感器, 因此, 合理的传感器选择、布局和优化对信息的准确获取起着决定性作用^[1]. 传感器布局优化需要解决以下两个问题^[2]: (1) 在保证系统故障覆盖和辨识的前提下, 确定需要采用的传感器类型和数量; (2) 对选定传感器的布局进行优化, 其优化准则是在保证系统具有较高可靠性的前提下具有较好的检测性能.

传感器布局优化属于典型的集合覆盖和多目标组合优化问题, 求解难度较大, 对于此类问题许多文献提

出了相应的求解方法, 如基于贪婪策略的方法、基于遗传算法的方法和基于粒子群的方法等^[3~6], 并在工程中得到了广泛的应用. 本文利用离散粒子群算法对传感器布局优化模型进行求解, 并对算法进行了改进, 提高了算法的全局寻优性能. 此外, 针对现有传感器布局优化的研究都只考虑传感器自身的可靠性, 而没有考虑其故障检测能力的问题^[2,5,7~9], 本文在建立传感器布局优化模型的时候考虑传感器的故障检测能力, 以提高所建模型和优化结果的准确性和可靠性.

2 传感器布局优化模型的建立

2.1 系统故障-传感器相关性矩阵及其改进

系统的故障-传感器相关性矩阵是对其进行传感器布局优化的基础, 它描述了系统故障和传感器 (测试信

号)的二元相关关系. 设某系统有 m 种故障模式, 可供选择的传感器测量信号有 n 类, 则该系统的故障-传感器相关性矩阵可记为布尔逻辑矩阵 $\mathbf{D} = \{d_{ij}\}$, 其中 $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$. 矩阵的行表示故障模式, 列表示传感器(测试信号)类型, 如表 1 所示.

表 1 故障-传感器相关性矩阵

	S_1	S_2	S_3	...	S_n
F_1	1	1	0	...	0
F_2	0	1	0	...	1
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
F_m	1	0	1	...	0

表 1 中, 元素 $d_{ij} = 1$ 表示故障 F_i 能被传感器 S_j 检测到, $d_{ij} = 0$ 表示故障 F_i 不能被传感器 S_j 检测到. 系统故障-传感器相关性矩阵描述了系统故障集和传感器集之间的相关关系, 其元素 $d_{ij} = 1$ 可以有两种含义: (1) 传感器 S_j 能检测到故障 F_i 的发生; (2) 传感器 S_j 检测到故障 F_i 的发生的概率为 1. 同理可得 $d_{ij} = 0$ 时的含义. 显然, 第一种含义更合理, 第二种含义则不符合实际情况. 在实际系统中, 由于传感器自身的可靠性问题及环境因素的影响, 即使 $d_{ij} = 1$, 传感器 S_j 也不一定能检测到故障 F_i 的发生.

传感器对故障的检测能力取决于多种因素, 如传感器的可靠性(故障率)、信噪比、灵敏度等. 定义传感器 S_j 对故障 F_i 的检测能力如下^[10]:

$$sd_{ij} = \begin{cases} (1 + e^{-b \cdot (V_{ij} - c)})^{-1} \times (1 + e^{-g \cdot (SNR_j - h)})^{-1} \\ \quad \times (1 - \frac{TTD_{ij}}{TTF_{ij}})^\alpha \times (\frac{SyD_{ij}}{TTF_{ij}})^\beta, & TTD_{ij} < TTF_{ij} \\ 0, & TTD_{ij} \geq TTF_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

其中, V_{ij} 为传感器 j 对故障 F_i 的检测灵敏度; SNR_j 为传感器 j 的信噪比; TTD_{ij} 为故障 F_i 的初发时刻与传感器 j 检测到该故障时刻之间的时间间隔; TTF_{ij} 为故障 F_i 的初发时刻与该故障引起系统失效时刻之间的间隔; SyD_{ij} 为传感器 j 能检测到故障 F_i 的征兆的持续时间; b, c, g, h, α 和 β 为常数. 由式(1)可知, 传感器的故障检测能力为(0,1)之间的实数.

典型的传感器故障检测能力如式(2)所示^[10]:

$$sd_{ij} = \begin{cases} (1 + e^{-10 \cdot (V_{ij} - 0.5)})^{-1} \times (1 + e^{-(SNR_j - 0.5)})^{-1} \\ \quad \times (1 - \frac{TTD_{ij}}{TTF_{ij}})^{0.5} \times (\frac{SyD_{ij}}{TTF_{ij}})^{0.2}, & TTD_{ij} < TTF_{ij} \\ 0, & TTD_{ij} \geq TTF_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

综合系统故障-传感器相关性矩阵和传感器故障检测能力, 改进的系统故障-传感器相关性矩阵 $\mathbf{PD} = \{pd_{ij}\}$ 可描述为:

$$pd_{ij} = d_{ij} \cdot sd_{ij} \quad (3)$$

2.2 优化模型的建立

传感器布局优化就是在满足系统各种测试性指标要求的前提下, 选择尽可能少的传感器, 使成本最小, 同时满足系统的可诊断性要求. 假设各故障模式的先验概率集为 $\mathbf{P} = \{p_0, p_1, \dots, p_m\}$, 且有 $\sum_{i=0}^m p_i = 1$, p_0 为正常状态的概率. 各类传感器的安装数量为 $\mathbf{Q} = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$, q_j 为非负整数, 且 $q_j \leq 3$; 各传感器的故障率为 $\boldsymbol{\lambda} = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$. 将传感器的购买、安装、维护以及相应的数据采集和处理费用等折算到每一个传感器, 设折合成本为 $\mathbf{c} = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, 则总成本为:

$$C = \sum_{j=1}^n c_j q_j \quad (4)$$

最优的传感器布局不仅要求能够检测到所有故障, 还要尽可能提高故障检测的可靠性. 故障检测可靠性可以描述为: 当系统发生某种故障时, 其相关传感器至少有一个正常工作, 保证能检测到该故障的发生. 对于故障 F_i , 构造其故障检测可靠性函数如下:

$$RF_i = p_i \cdot \prod_{j=1}^n \lambda_j^{q_j \cdot pd_{ij}} \quad (5)$$

系统的故障检测可靠性用平均值描述如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^m RF_i}{\sum_{i=1}^m p_i} = \frac{\sum_{i=1}^m p_i \cdot \prod_{j=1}^n \lambda_j^{q_j \cdot pd_{ij}}}{\sum_{i=1}^m p_i} \quad (6)$$

PHM 系统要求传感器布局方案对系统所有故障模式的覆盖, 即对于每一种故障 F_i , 都要有至少一个传感器对其进行检测, 数学描述为:

$$\sum_{j=1}^n q_j \cdot pd_{ij} > 0 \quad (7)$$

此外, PHM 系统传感器布局优化还需满足可诊断性要求, 具体数学描述如下^[2]:

故障检测率要求:

$$\frac{\sum_{i=1}^m p_i \cdot (1 - \prod_{j=1}^n \lambda_j^{q_j \cdot pd_{ij}})}{\sum_{i=1}^m p_i} \geq \gamma_{FD}^* \quad (8)$$

故障隔离率要求:

$$\frac{\sum_{i=1}^l p_i \cdot \prod_{j=1}^n (1 - \lambda_j^{q_j \cdot pd_{ij}})}{\sum_{i=1}^m p_i \cdot (1 - \prod_{j=1}^n \lambda_j^{q_j \cdot pd_{ij}})} \geq \gamma_{FI}^* \quad (9)$$

虚警率要求:

$$\frac{\sum_{i=1}^m [(1 - p_i) \cdot \prod_{j=1}^n \lambda_j^{q_j \cdot pd_{ij}}]}{\sum_{i=1}^m [p_i \cdot (1 - \prod_{j=1}^n \lambda_j^{q_j \cdot pd_{ij}})] + \sum_{i=1}^m [(1 - p_i) \cdot \prod_{j=1}^n \lambda_j^{q_j \cdot pd_{ij}}]} \leq \gamma_{FA}^* \quad (10)$$

综上可得,传感器布局的优化模型为在满足约束条件(7)–(10)的条件下,使目标函数(4)和(6)取最小值.

3 传感器布局优化模型的求解

传感器布局优化属于典型的集合覆盖和多目标组合优化问题,求解难度较大,采用一般的方法难以得到准确的结果.本文采用离散粒子群算法进行求解,并对算法进行了改进,以提高其求解速度和精度.

3.1 离散粒子群算法描述

离散粒子群算法是对基本粒子群算法的离散改进,使其能用于离散空间的优化问题.本文综合利用二元离散粒子群算法和取整粒子群算法的思想,并对其进行如下改进:粒子的速度更新方式与基本粒子群算法相同;对于粒子位置的更新,则先让其对1进行求模运算,运算结果与一随机数比较,根据大小关系对粒子位置作向上取整或向下取整,以保持粒子群体的多样性,如式(11)所示:

$$\begin{cases} v_{id}^{k+1} = \omega \cdot v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}^k) + c_2 r_1 (p_d - x_{id}^k) \\ x_{id}^{k+1} = \begin{cases} \text{ceil}(x_{id}^k + v_{id}^{k+1}), \text{rand} \leq \text{mod}((x_{id}^k + v_{id}^{k+1}), 1) \\ \text{floor}(x_{id}^k + v_{id}^{k+1}), \text{rand} > \text{mod}((x_{id}^k + v_{id}^{k+1}), 1) \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

3.2 算法改进策略

粒子群优化算法虽然具有算法结构简单、参数少及收敛速度快等优点,但容易陷入到局部极值点,导致得不到全局最优解.造成这种现象有两方面的原因:一是待优化函数的性质,二是算法在运行过程中由于算法的参数设计、粒子规模选择不恰当等原因,导致在计算的过程中粒子的多样性迅速消失,造成算法“早熟”现象.本文主要对惯性权重进行改进,同时利用混沌特性初始化粒子群的参数,以提高算法的全局寻优能力.

3.2.1 粒子参数的混沌初始化

混沌优化是一种新颖的优化方法,它利用混沌系统特有的遍历性特点进行优化搜索,而且不要求目标函数具有连续和可微的性质,其基本思想是首先产生一组与优化变量相同数目的混沌变量,用类似载波的方式将混沌引入优化变量使其呈现混沌状态,同时把混沌运动的遍历范围放大到优化变量的取值范围,然后直接利用混沌变量进行搜索.

一般应用 Logistic 映射(逻辑映射)来产生混沌变量,其映射形式如下:

$$z_{k+1} = \mu \cdot z_k \cdot (1 - z_k) \quad (12)$$

其中 $\mu \in [0, 4]$ 为控制变量, $z_k \in [0, 1]$, $k = 0, 1, 2, \dots$. 当 $\mu = 4$ 时,系统(12)完全处于混沌状态,此时,轨道布满区间 $[0, 1]$, 即混沌轨道在区间 $[0, 1]$ 内遍历. 由

任意初值 $z_0 \in [0, 1]$ 可迭代出一个确定的混沌时间序列 z_1, z_2, z_3, \dots .

3.2.2 基于群体早熟程度的自适应惯性权重调整

在 PSO 中,搜索陷入局部极值往往表现为粒子几乎停止不动.当群体的最优适应度值长时间未发生变化时,应对惯性权重进行调整.如果对整个群体采用相同的操作,则当群体已收敛到全局最优附近时,优秀粒子被破坏的概率会随着其惯性权重的增加而增加,从而使算法的性能下降.为了充分发挥自适应操作的效能,本文提出一种根据群体早熟程度和粒子自身适应度值自适应调整惯性权重的策略,针对不同的粒子分别采用不同的自适应操作,使得群体始终保持惯性权重的多样性.

粒子群的早熟收敛程度用如下指标来评价:

$$\Delta = |f_g - f_{ap}| \quad (13)$$

其中, f_g 为全局最优粒子的适应度值, f_{ap} 为适应度值优于当前所有粒子适应度平均值 f_{ag} 的粒子的适应度平均值. Δ 可用来评价粒子群的早熟收敛程度, Δ 越小粒子群越趋于早熟收敛.

对于适应度值为 f_i 的粒子,其自适应调整策略如下:

(1) f_i 优于 f_{ap}

此时粒子比较接近全局最优值,是群体中的较优粒子,其惯性权重应取较小值,避免“逃离”全局最优值,粒子的惯性权重按式(14)自适应调整:

$$\omega(t) = \omega_s - (\omega_s - \omega_{\min}) \cdot \left| \frac{f_i - f_{ap}}{\Delta} \right| \quad (14)$$

其中, ω_{\min} 为 ω 的最小值, ω_s 为 ω 取值范围的中间值. 粒子适应值越佳,其惯性权重相应越小,以加强局部寻优.

(2) f_i 劣于 f_{ap} 但优于 f_{ag}

此时粒子是群体中的一般粒子,具有较好的全局寻优能力和局部寻优能力,其惯性权重按式(15)所示的非线性递减策略自适应调整:

$$\omega(t) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot \left(\frac{t}{T} \right)^2 \quad (15)$$

(3) f_i 劣于 f_{ag}

此时粒子是群体中较差的粒子,应赋予较大的惯性权重,其自适应调整策略为:

$$\omega(t) = 1.5 - \frac{1}{1 + k_1 \cdot \exp(-k_2 \cdot \Delta)} \quad (16)$$

其中,参数 $k_1 > 1$ 用于控制 ω 的上限, k_1 越大, ω 的上限越大; $k_2 > 0$ 用于控制 ω 的调节能力.

4 应用实例分析

对文献[2]中某车载稳定与跟踪伺服系统的传感

器系统进行布局优化设计,该系统的测试性设计要求为:故障检测率不低于 98%,故障隔离率不低于 95%,虚警率不高于 10%。通过故障模式影响及危害分析

(FMECA)可得其故障-传感器相关性矩阵如表 2 所示,系统各故障模式的先验概率、各传感器的成本及其故障率如表 3 和表 4 所示(相关数据见文献[2]和[3])。

表 2 某伺服系统故障-传感器相关性矩阵

	电平信号 S_1	振动传感器 S_2	电流传感器 S_3	光电编码器 S_4	温度传感器 S_5	振动传感器 S_6	光电编码器 S_7	速率陀螺 S_8	捷联惯导 S_9
F_1 :驱动器工作不正常	1	0	0	0	0	0	0	0	0
F_2 :定子与转子的气隙不均匀	0	1	1	1	0	0	0	0	0
F_3 :电机定子线圈断路	0	0	1	1	0	0	0	0	0
F_4 :电机定子线圈短路	0	0	0	1	1	0	0	0	0
F_5 :电机定子线圈接地	0	0	1	0	1	0	0	0	0
F_6 :电机轴承磨损	0	1	0	1	0	0	0	0	0
F_7 :减速器齿轮疲劳磨损	0	0	0	0	0	1	1	1	1
F_8 :减速器轴承疲劳磨损	0	0	0	0	0	1	0	0	0
F_9 :减速器无输出	0	0	0	0	0	0	1	1	1

表 3 某伺服系统先验故障概率(/1000h)

F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9
0.01	0.01	0.10	0.01	0.10	0.15	0.20	0.15	0.01

对上述系统根据文中方法建立其传感器布局优化模型,并用改进离散粒子群算法进行求解,优化结果为:各传感器的布局结果为[2,0,1,1,2,1,0,1,0],故障

检测率为 0.9925790,故障隔离率为 0.9826206,虚警率为 0.019966,传感器成本为 11552 元,系统故障检测可靠性 $R=0.00356$ 。文献[2]的优化结果为:传感器配置结果为[2,0,1,1,1,1,0,0,1],故障检测率为 0.9936010,故障隔离率为 0.9938112,虚警率为 0.01756336,传感器成本为 101452 元。

表 4 传感器成本及故障率(/1000h)

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9
价格/元	1	200	150	1000	100	200	1000	10 000	100 000
故障率	0.01	0.001	0.001	0.01	0.01	0.001	0.01	0.001	0.0001

通过分析仿真实例可知,本文传感器布局优化结果能满足系统的测试性指标要求,只是故障检测率和故障隔离率指标略逊色于相应参考文献,然而相比之下却节省了大量的成本。究其原因是在建模过程中结合传感器的故障检测能力改进了系统故障-传感器相关性矩阵,并且将故障检测可靠性函数同成本一起作为优化的目标函数。综合考虑系统的故障检测可靠性、成本要求和系统各故障情况,本文的优化结果更加符合实际情况。

5 结论

随着系统规模越来越大,其故障与测试之间的相关性变得越来越复杂,传感器布局优化问题也越来越突出,提高其优化效率和准确度就显得尤为重要。本文在建立传感器布局优化模型时考虑传感器的故障检测能力,对系统的故障-传感器相关性矩阵进行了改进。同时定义了故障检测可靠性函数,并将其和成本作为优化的目标函数。对于优化模型的求解则采用离散粒

子群算法,其改进策略综合了二元离散粒子群算法和取整粒子群算法的思想,即根据基本粒子群算法更新后的位置对 1 求模运算的结果与一随机数的大小关系,采用向上或向下取整运算来跟新粒子的位置;粒子的速度更新方式与基本粒子群算法相同;根据粒子群的早熟收敛程度对惯性权重进行自适应调整,适应度值不同的粒子采用不同的调整策略;文章最后的应用实例验证了本文方法的有效性,对复杂系统的传感器布局优化具有一定的参考价值。本文方法应用于工程实际需要进行大量的试验研究,这将是作者下一步的研究方向。

参考文献

[1] Shunfeng Cheng, Michael H Azarian, Michael G Pecht. Sensor Systems for Prognostics and Health Management[J]. Sensors, 2010, 10(6): 5774 - 5797.
 [2] 杨光,刘冠军,李金国.基于故障检测和可靠性约束的传感器布局优化[J].电子学报,2006,34(2):348 - 351.

- Yang Guang, Liu Guan-jun, Li Jin-gu. Optimal sensor placement based on various fault detectability and reliability criteria [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(2): 348 - 351. (in Chinese)
- [3] 杨国锋, 邱静, 钱彦岭. 一种用于机电产品测试性设计的传感器优选 MINLP 模型[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(3): 103 - 106.
- Yang Guo-feng, Qiu Jing, Qian Yan-ling. Research on optimal sensor selection model in test design for mechatronics equipments[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2004, 26(3): 103 - 106. (in Chinese)
- [4] 蒋荣华, 王厚军, 龙兵. 基于离散粒子群算法的测试选择[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(2): 11 - 15.
- Jiang Rong-hua, Wang Hou-jun, Long Bing. Test selection based on binary particle swarm optimization [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2008, 22(2): 11 - 15. (in Chinese)
- [5] 陈仲生, 杨拥民, 李聪. 基于振动传递符号有向图的齿轮箱嵌入式传感器优化配置模型与算法[J]. 航空动力学报, 2009, 24(10): 2384 - 2390.
- Chen Zhong-sheng, Yang Yong-min, Li Cong. Model and algorithm of optimal embedded sensors placement for gearboxes based on signed directed graph of vibration propagation [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(10): 2384 - 2390. (in Chinese)
- [6] 王宏力, 张忠泉, 崔祥祥. 基于改进 PSO 算法的实时故障监测诊断测试集优化[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(4): 958 - 962.
- Wang Hong-li, Zhang Zhong-quan, Cui Xiang-xiang. Test optimization of real-time monitoring and fault diagnosis system based on improved particle swarm optimization [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(4): 958 - 962. (in Chinese)
- [7] 杨帆, 萧德云. 故障检测的可靠性描述及传感器分布优化算法[J]. 应用科学学报, 2006, 24(2): 125 - 130.
- Yang Fan, Xiao De-yun. Reliability description of fault detection and optimization algorithm of sensor location [J]. Journal of Applied Sciences, 2006, 24(2): 125 - 130.
- [8] 马存宝, 王彦文, 史浩山. 机载电子设备 BIT 优化设计技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2276 - 2279.
- Ma Cun-bao, Wang Yan-wen, Shi Hao-shan. Study on BIT optimization design of airborne electronic equipment [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(9): 2276 - 2279. (in Chinese)

- [9] 徐敏强, 宋其江, 王日新. 基于可观测性和可靠性的传感器分布优化设计[J]. 宇航学报, 2010, 31(11): 2618 - 2622.
- Xu Min-qiang, Song Qi-jiang, Wang Ri-xin. Optimization design of sensors location based on fault observability and reliability [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(11): 2618 - 2622.
- [10] Zhang G F. Optimum sensor localization/selection in a diagnostic/prognostic architecture [D]. USA: Georgia Institute of Technology, 2005.

作者简介



朱喜华 男, 1985 年 9 月出生, 湖南汝城人. 空军工程大学博士研究生, 研究方向为传感器优化配置、智能算法及其应用等.

E-mail: zhx2004_kgd@sina.com



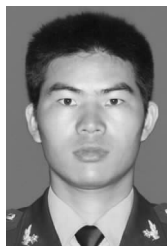
李颖晖 女, 1966 年 2 月出生, 湖南株洲人. 教授、博士(后), 博士生导师, 分别于 1987 年、1990 年和 2000 年获得西安交通大学学士、硕士和博士学位, 主要研究方向为先进控制理论及其应用、智能算法等.

E-mail: liyinghui66@163.com



李宁 男, 1985 年 6 月出生, 宁夏固原人, 空军工程大学博士研究生, 研究方向为最优化理论及算法、故障诊断与容错控制等.

E-mail: dorisyu@yahoo.com.cn



曹华金 男, 1985 年 2 月出生, 湖南永兴人, 于 2008 年获空军工程大学工学学士学位, 现为空军柳州 95275 部队助理讲师, 研究方向为优化理论及算法.

E-mail: chj364624788@qq.com