

基于物理规划的航空保障多目标优化模型^①



史海庆¹, 杨航², 赵冬梅²

¹(海军参谋部办公室, 北京 100071)

²(海军航空大学 青岛校区, 青岛 266041)

通讯作者: 杨航, E-mail: 13576150@qq.com

摘要: 根据作战需求确定优化权衡目标, 以使用保障需求和技术可行性为约束条件, 以保障能力指标集合, 以备件储备量的组合为决策变量, 建立多个单目标优化模型和多目标优化模型, 提出了基于物理规划的航空保障能力多目标优化方法, 结合粒子群算法得到了满足设计者偏好的最佳航材备件方案. 设计了航空保障能力系数的满意等级, 构造了各优化目标的偏好函数和综合偏好函数, 使整个设计过程更加灵活地反映决策者偏好, 减轻大规模多目标设计问题的计算负担, 使军用机群的保障能力更适合实际作战要求, 同时通过对比单目标优化的结果, 验证了算法的有效性.

关键词: 航空保障; 多目标优化; 物理规划; 粒子群算法; 功能框架

引用格式: 史海庆, 杨航, 赵冬梅. 基于物理规划的航空保障多目标优化模型. 计算机系统应用, 2020, 29(9): 184-190. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7542.html>

Multi-Objective Optimization Model of Aviation Equipment Support Based on Physical Programming Algorithm

SHI Hai-Qing¹, YANG Hang², ZHAO Dong-Mei²

¹(Office of Naval Staff, Beijing 100071, China)

²(Qingdao Campus, Naval Aeronautical University, Qingdao 266041, China)

Abstract: Together with the particle swarm optimization algorithm, a physical programming-based multi-objective optimization model is developed to seek the optimal strategy for spare parts arrangement. The levels of satisfaction and the preference functions as well as the aggregate objective function for the supportability are designed which can reflect the preference of decision makers. With the proposed optimization method, the computational burden in large-scale multi-objective design problems can be greatly reduced. Meanwhile, the results from the proposed method are compared with that of single-objective optimization, demonstrating the effectiveness of the proposed model.

Key words: aviation equipment support; multi-objective optimization; physical planning; particle swarm optimization; functional framework

保障能力是军用飞机保障性设计水平及其他面向保障系统对需求的一种满足程度. 军用飞机机群保障能力提升和优化是典型的多目标优化问题^[1,2], 目前主要方法为基于偏好的经典方法, 如线性加权和法^[3]、主要目标法^[4]、目标规划法^[5]等, 以及智能优化方法包括多目标遗传算法 (Multi-Objective Genetic Algorithms,

MOGA)^[6]、多目标粒子群算法 (Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)^[7]、多目标模拟退火算法 (Multi-Objective Simulated Annealing, MOSA)^[8] 和多目标蚁群优化算法 (Multi-Objective Ant Colony Algorithm, MOACA)^[9] 等. 但由于涉及众多决策变量, 单一传统优化算法很难求解这类优化问题, 甚至会陷

① 收稿时间: 2019-12-19; 修改时间: 2020-01-14; 采用时间: 2020-03-11; csa 在线出版时间: 2020-09-04

入局部最优. 本文以任务成功率、系统可用度和经费需求为优化目标, 利用物理规划的方法^[10-17], 设计目标的综合偏好函数, 确定响应的设计目标值范围对应于不同的满意程度区间, 从而减轻大规模、多目标设计过程种的计算量负担, 形成整个过程更加灵活、自然的框架, 最后, 针对物理规划总结出的目标函数, 使用粒子群算法^[8,10,11,18]进行寻优, 与单目标优化方案进行对比, 得到最佳的军用机群保障方案.

1 优化目标

在保障能力综合参数中, “任务成功率”既是在战时衡量保障能力高低的关键参数, 也体现了作战规模和作战任务的成败, 因此本文将“任务成功率”定义为关键保障能力指标. 在训练场景下, 依据收集到实测数据, 训练任务完成与使用可用度强相关, 系统可用度也是关键保障能力指标. 总费用是保障能力供给中的重要参数, 是决定航材补充量的关键, 本文也将其作为优化目标之一. 基于以上分析, 保障能力关键参数确定为:

任务成功率: 军用飞机在一定的保障资源和保障方案下, 在规定时间内完成作战任务的概率.

系统可用度: 军用飞机能工作时间与能工作时间、不能工作时间的和之比, 属于表征平时战备完好能力的参数.

除了保障能力关键参数之外, 总费用也被考虑为优化目标之一, 它包括军用机群在仿真过程中产生的一系列费用. 包括维修费用、库存费用和飞机保养费用等.

军用机群保障能力优化是典型的多目标优化问题. 优化目标设为保障能力的5个系数: 任务*a*的成功率, 任务*b*的成功率, 任务*c*的成功率, 系统可用度和总费用. 其计算模型如下.

任务*a*、*b*、*c*的成功率模型: $R_x = N_x1 / N_x2$, 其中 N_x1 为执行任务 $x=a$ 、 b 、 c 成功的次数, N_x2 为执行任务 $x=a$ 、 b 、 c 的总次数.

系统可用度模型:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n T_u}{nT_0} \quad (1)$$

其中, T_u : 飞机在观测时间内的可用时间, n : 飞机的数量, T_0 : 观测时间.

总费用模型:

$$W_0 = W_1 + W_2 + W_3 \quad (2)$$

$$W_3 = nkt \quad (3)$$

$$W_2 = \sum_{i=1}^{T_0} \sum_{j=1}^i r_{i1} + \sum_{i=1}^{T_0} \sum_{j=1}^i r_{i2} \quad (4)$$

其中, W_1 : 维修费用, W_2 : 库存费用, W_3 : 飞机保养费用, i : 部件数量, t : 观测的年数, n : 飞机的数量, k : 每架飞机每年的保养费用, r_{i1} : 第*i*个在团修理厂每小时库存费用, r_{i2} : 第*i*个在军区仓库每小时库存费用.

在任务执行过程中, 当有飞机出现故障时, 该架飞机则停止执行任务被送至维修机构进行维修. 而模型将判断备用飞机中是否有处于可用状态的飞机, 如果有则将备用飞机运送至任务平台执行任务, 送达的时间为两小时. 维修完成的故障飞机将送至备用飞机场, 成为备用飞机. 每次开始执行任务是派送任务所需的最多飞机数执行任务, 当在执行任务的过程中执行任务的飞机数始终不小于任务所需的飞机数时, 则判定该次任务成功, 反之, 则该次任务失败.

因此, 想要提高3个任务的成功率, 就必须增加备用飞机数和备件数, 而这必然会导致总费用的增加, 同时也会影响系统可用度. 所以本文利用代理模型产生的输出, 运用物理规划和粒子群算法, 使这5个优化目标都能得到较满意的结果.

2 优化流程

军用机群的部件失效过程和部件维修过程是本模型的关键. 部件失效过程伪代码如图1, 维修过程伪代码如图2.

```

Procedure 军用机群部件失效过程
Define
  观测时间  $T_0$  按每个部件的失效率分布产生第  $i$  个飞机最早失效的第  $j$  个部件的失效时间的  $\psi_{ij}$ 
   $\psi_{i\min} \leftarrow$  最小的  $\psi_{ij}$ 
While  $\psi_{i\min} < T_0$ 
Do 失效最早的第  $i$  个飞机部件  $j$  的维修过程
  对飞机  $i$  产生新的  $\psi_{i\min}$ 
   $\psi_{i\min} \leftarrow \psi_{i\min}$ 
  重新找出失效最早的飞机  $\psi_{i\min} \leftarrow$  最小的  $\psi_{ij}$ 
End
  
```

图1 部件失效过程伪代码

本模型中输入变量的范围如表1所示. 为了进一步检验本模型的正确性, 初步了解输入变量与输出变量的联系, 选取了两组特殊值代入模型求解.

(1) 所有决策变量取最小值. 在这种情况下输出变量的结果如表2所示, 团修理厂、军区仓库决策备件数的

变化情况和观测时间内的飞机状态变化如图3所示. 在这种情况下, 虽然这种情况下, 总费用很低, 但是任务a的成功率、任务b的成功率和任务c的成功率的结果很不令人满意. 因为没有备用飞机, 团修理厂和军区仓库的积压库存量也很多, 造成了不必要的库存损失.

(2) 所有决策变量取最大值. 在这种情况下输出变量的结果如表3所示, 团修理厂、军区仓库决策备件数的变化情况和观测时间内的飞机状态变化如图4所示. 在这种情况下, 任务a的成功率、任务b的成功率和任务c的成功率很高, 但是总费用也很高. 实际情况中可能并没有这样的资金支持来保障这样的备件方案. 而且因为备用飞机数的增加, 系统的可用度也受到了影响. 团修理厂和军区仓库的库存量很高, 同样造成了不必要的库存损失.

```

Procedure 军用机群部件维修过程
Define 团修理厂第j个部件的存储量Gj, 军区中心仓库第j个部件存储量Sj, 相应部件的更换准备时间和费用T1, W1, 相应部件的更换人工时间T2, 相应部件的维修准备时间T3, 相应部件的维修时间T4, 跟换时的折合部件单价W5, 相应部件的维修费用W6, 总费用W7, 维修时间T.
Read 失效飞机i的失效部件的编号j 失效时间ψi
If Gj > 0
    Gj ← Gj - 1
    W6 ← W6 + W1 + W2 + W3
    i号飞机维修时间Ti ← T1 + T2 + T3
Else if gj > 0
    gj ← gj - 1
    W6 ← W6 + W1 + W2 + W3
    i号飞机维修时间Ti ← T1 + T2 + T3
Else if
    W6 ← W6 + W4 + W5 + W6
    Ti ← T1 + T2 + T3 + T4 + T5
End If
End If
End
For t = ψi to ψi + Ti
    标记第i个飞机的不可用状态statei ← 0
End
    
```

图2 部件维修过程伪代码

表1 变量的取值范围

决策变量	备件数	Min	Max
X ₁	任务a的备用飞机数	0	5
X ₂	任务b的备用飞机数	0	5
X ₃	任务c的备用飞机数	0	5
X ₄	团修理厂武器悬挂物	35	90
X ₅	团修理厂座舱显示控制	80	160
X ₆	团修理厂发动机	90	240
X ₇	团修理厂的雷达	20	70
X ₈	团修理厂系统处理机	25	50
X ₉	军区仓库武器悬挂物	35	90
X ₁₀	军区仓库座舱显示控制	80	160
X ₁₁	军区仓库发动机	90	240
X ₁₂	军区仓库雷达	20	70
X ₁₃	军区仓库系统处理机	25	50

表2 决策变量取最小值下的参数输出

军用机群保障能力	数值
任务a的成功率	38.02%
任务b的成功率	51.86%
任务c的成功率	42.91%
系统可用度	63.28%
总费用(万元)	426 009.65

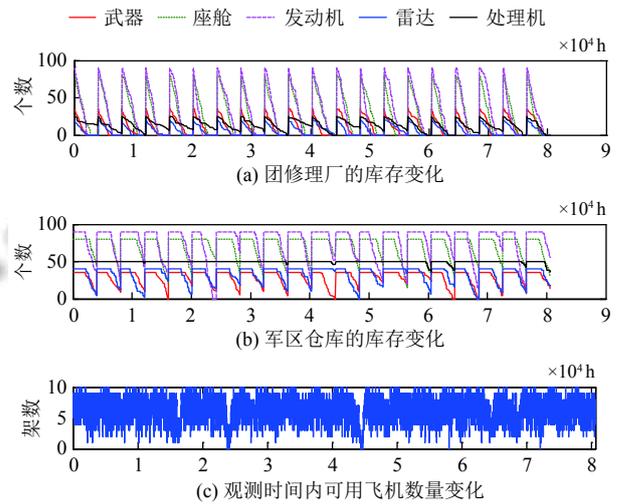


图3 最少备件方案下备件数和飞机状态变化图

表3 决策变量取最大值下的参数输出

军用机群保障能力	数值
任务a的成功率	79.11%
任务b的成功率	83.33%
任务c的成功率	76.46%
系统可用度	57.08%
总费用	989 903.41

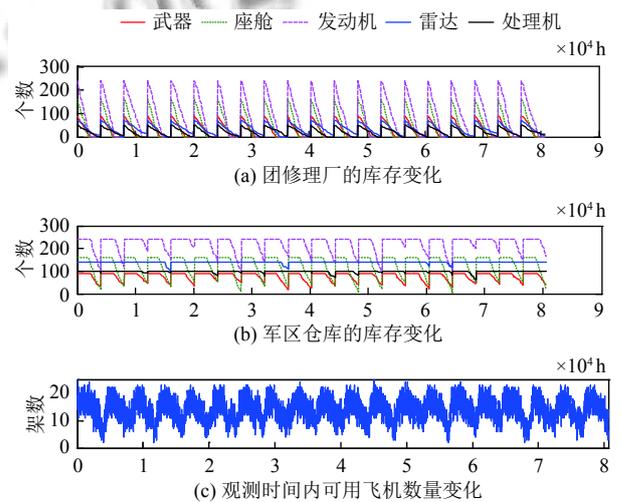


图4 最多备件方案下备件数和飞机状态变化图

从上述两种情况中, 我们不难发现, 最多备件方案和最少备件方案下都不能得到军用机群保障能力指标

的最优解. 由于目标函数与决策变量之间复杂的关系, 仅凭借简单的优化算法我们很难使目标变量都能得到比较满意的取值, 必须进行优化.

优化流程可描述如下: (1) 以保障能力指标的性质和优化要求为基础, 将机群保障问题描述成一个能反映规划者对规划目标偏好程度的函数, 即偏好函数, 设计保障能力目标函数的偏好结构; (2) 综合各个规划目标的偏好函数, 得到物理规划优化目标函数; (3) 用粒子群优化算法对优化目标函数, 计算满意的保障能力指标系数. 算法流程如图5所示.

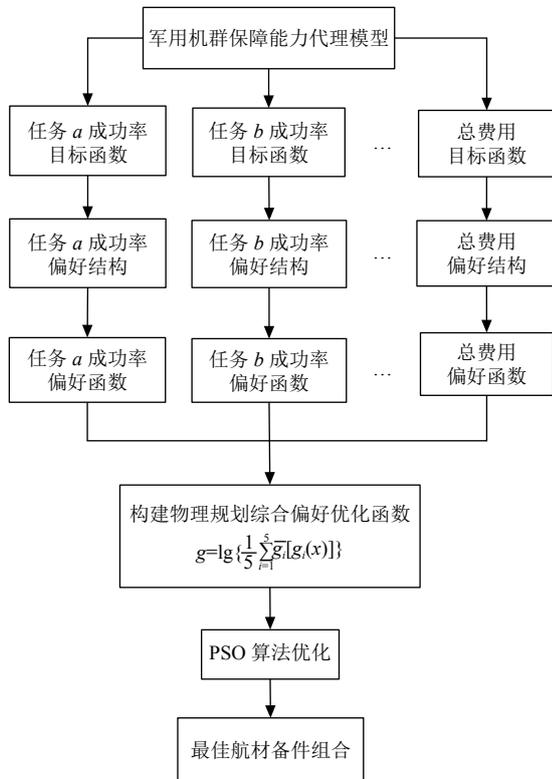


图5 指标体系优化流程

物理规划的综合偏好函数用粒子群优化算法的适应度函数表征, 由于物理规划中函数值与满意度成反比, 因此本次粒子群优化取最小值, 算法流程如图6.

目标偏好的区间边界值如表4所示, 其中 $f_1 \sim f_5$ 分别表示不同任务的成功率、系统可用度和总费用(单位为万元). 故可得物理规划模型如式(1)~式(3)所示.

$$\text{Min } g = \lg \left\{ \frac{1}{n_{sc}} \sum_{i=1}^{n_{sc}} \bar{g}_i [g_i(x)] \right\} \quad (5)$$

$$\text{s.t. } g_5 \leq g_{55} \quad (6)$$

$$g_i \geq g_{i5}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

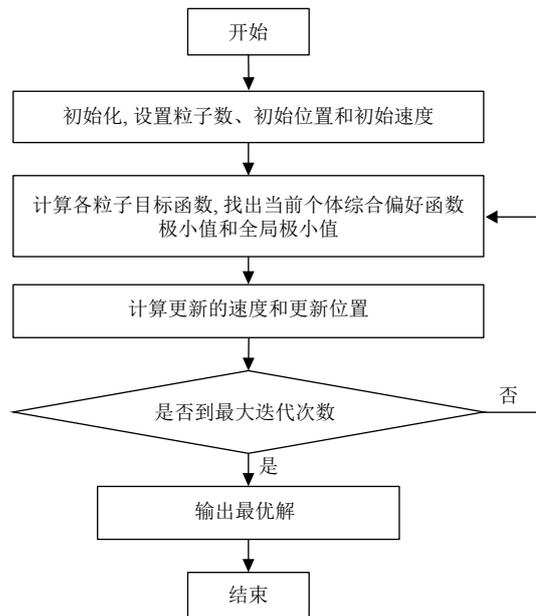


图6 粒子群算法流程图

表4 设计目标的偏好区间

目标函数	偏好类型	偏好区间边界				
		g_{i1}	g_{i2}	g_{i3}	g_{i4}	g_{i5}
f_1	2-S	85%	75%	70%	65%	55%
f_2	2-S	80%	70%	65%	60%	55%
f_3	2-S	75%	60%	50%	45%	40%
f_4	2-S	65%	60%	50%	45%	40%
f_5	1-S	600000	650000	680000	700000	720000

3 计算分析

我们将粒子群的种群设为100, 进化代数设为200, 其适应度曲线符合偏好函数的基本类型(如图7), 得出决策变量的值如表5所示. 此时 $J_1=0.7953$, $J_2=0.7323$, $J_3=0.5583$, $J_4=0.5589$, $J_5=663\ 695.9066$.

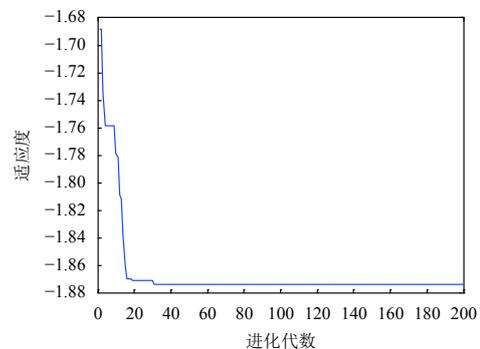


图7 适应度曲线

将求得的航材备件方案代入原军用机群仿真模型中, 得到该方案下某部修理厂和仓库中决策备件数量

变化情况和观测时间内的可用飞机数量变化情况,如图8所示.

表5 物理规划算法下决策变量的值

决策变量	最佳备件数
X^*_1	5
X^*_2	4
X^*_3	2
X^*_4	60
X^*_5	112
X^*_6	240
X^*_7	39
X^*_8	77
X^*_9	145
X^*_{10}	100

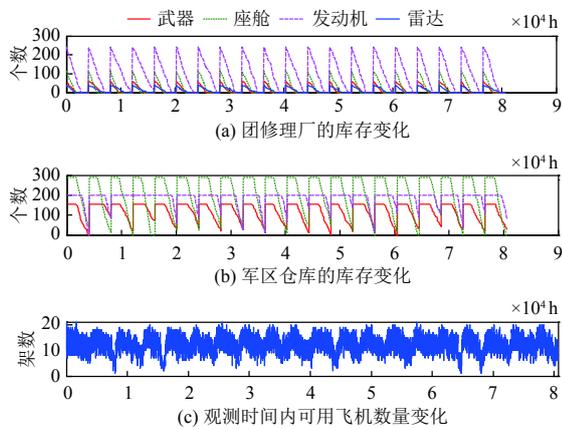


图8 备件数和可用飞机数量变化

将输出变量描述在其对应的偏好函数中(图9~图13),图中的圆点表示最优值,可以判断出其所在的满意等级.

用I-V分别表示非常不满意、不满意、可接受、满意、非常满意.根据物理规划得到的军用机群保障能力系数及其所对应满意等级如表6所示,最佳航材备件数方案如表7所示.

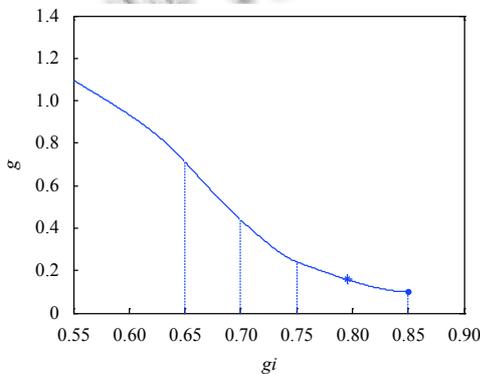


图9 任务a成功率偏好函数

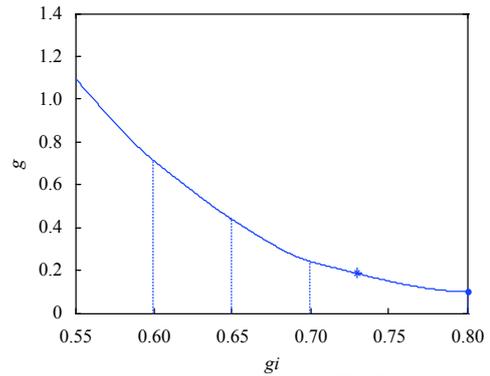


图10 任务b成功率偏好函数

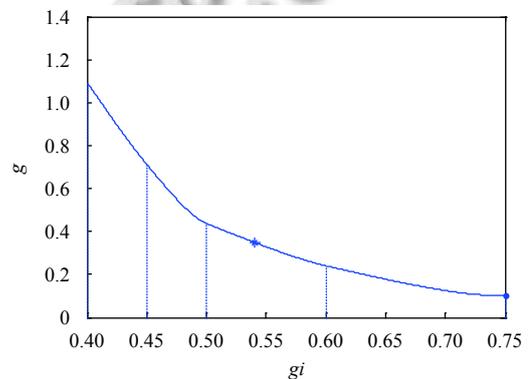


图11 任务c成功率偏好函数

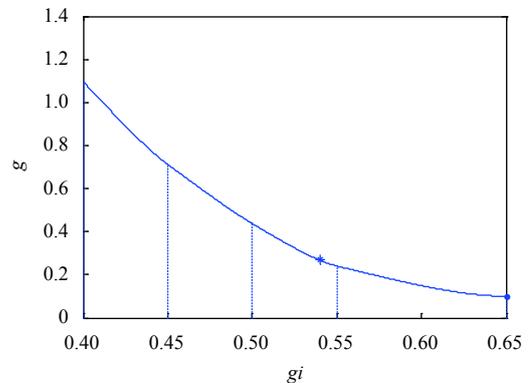


图12 可用度偏好函数

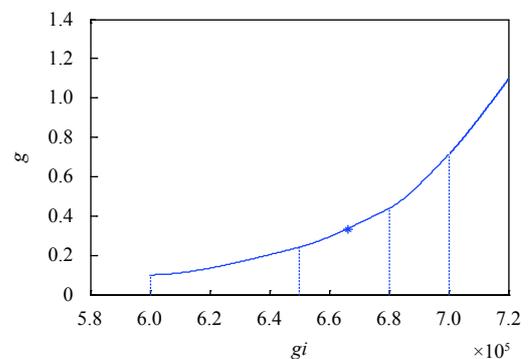


图13 总费用偏好函数

表6 军用机群保障能力系数及其所对应满意等级

保障能力	数值	满意等级
任务a的成功率	79.53%	IV
任务b的成功率	73.23%	IV
任务c的成功率	55.83%	III
系统可用度	55.89%	IV
总费用(万元)	663 695.9066	III

表7 最佳航材备件数方案

备件数	数量
任务a的备用飞机数	5
任务b的备用飞机数	4
任务c的备用飞机数	2
某修理厂武器悬挂物	60
某修理厂座舱显示控制	112
某修理厂发动机	240
某修理厂的雷达	39
某仓库武器悬挂物	77
某仓库座舱显示控制	145
某仓库发动机	100

4 性能比较

分别以任务 a 成功率、任务 b 成功率、任务 c 成功率、系统可用度和总费用的单目标优化方法和本文基于物理规划的规划方法分别进行比较, 5 种单目标优化方法下决策变量值如表 8 所示. 目标变量的值如表 9 所示, 粒子群算法下的适应度曲线如图 14~图 18.

表8 5种单目标算法下决策变量值

对象	X_1^*	X_2^*	X_3^*	X_4^*	X_5^*	X_6^*	X_7^*	X_8^*	X_9^*	X_{10}^*
任务a	5	1	1	66	150	101	52	73	135	85
任务b	3	5	1	74	140	91	52	64	137	83
任务c	3	1	5	56	137	86	22	72	144	101
可用度	2	0	0	65	130	100	35	78	140	84
总费用	1	1	0	49	130	46	33	42	124	69

表9 5种单目标算法下目标变量值(%)

对象	f_1^*	f_2^*	f_3^*	f_4^*	f_5^*
a	85.91	60.39	57.42	62.45	622291.88
b	69.94	90.01	57.00	61.40	653828.74
c	72.53	55.43	84.10	59.36	603507.53
可用度	72.03	65.26	47.92	68.17	551552.41
总费用	63.18	61.30	50.25	60.77	411351.34

为便于对比, 在进行单目标优化时将单目标优化和的约束条件设置为物理规划的不可行边界条件. 将单目标优化得到的输出结果对应到相应的满意等级中, 如表 10 所示.

可见, 单目标优化虽然可以使一至两个保障能力系数达到非常满意的等级, 但是其他目标往往就落入

不满意甚至非常不满意的范围内, 很难全方面地把握住偏好要求. 相比, 本文方法的优化结果均为满意或者可接受, 可以基本符合偏好要求. 通过军用飞机保障能力模型, 也验证了物理规划方法对本案例的有效性.

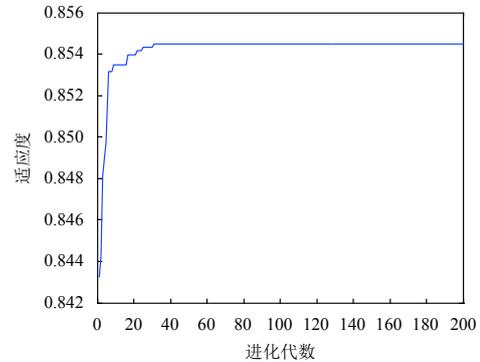


图14 成功率 a 单目标优化

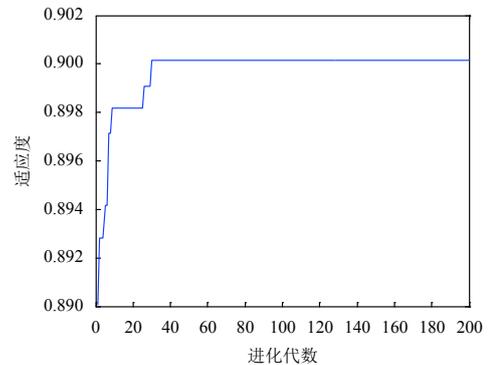


图15 成功率 b 单目标优化

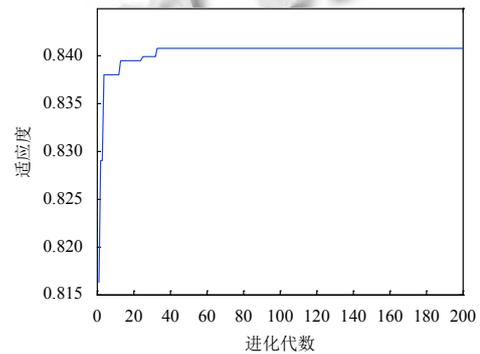


图16 成功率 c 单目标优化

5 结论与展望

本文基于物理规划算法, 确定了 5 个输出变量相应的满意等级要求, 构造出各自的偏好函数和综合偏好函数, 结合粒子群优化算法, 得到航材备件分布. 算法从成功率最高、系统可用度最高等方面分别对比了单目标优化法, 验证了算法对军用机群保障工程多目

标优化设计的有效性,同时也证明了物理规划方法可以帮助构造更加灵活、自然的框架,对设计者的偏好实现较好权衡把握。

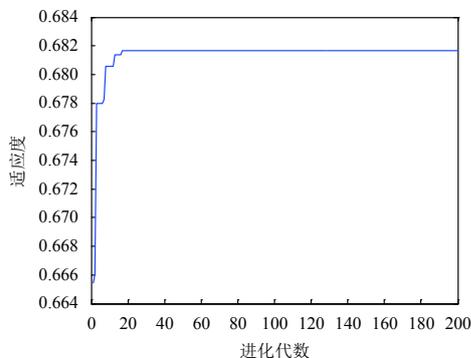


图 17 可用度单目标优化

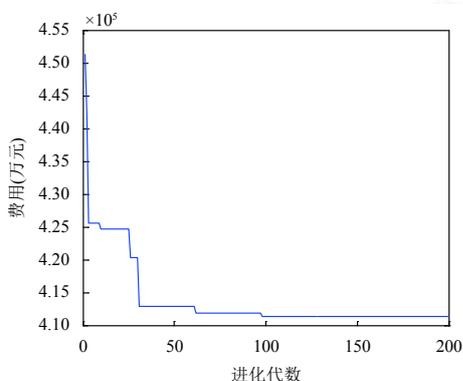


图 18 总费用单目标优化

表 10 单目标优化对应的满意等级

优化对象	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
任务a	V	I	III	IV	IV
任务b	II	V	III	IV	III
任务c	III	I	V	III	IV
可用度	III	III	II	V	V
总费用	I	II	III	IV	V

参考文献

- 1 Pareto V. Cours d'economies politique, Volume I and II. Lausanne: F Rouge, 1896.
- 2 Koopmans TC. Analysis of production as an efficient combination of activities. Activity Analysis of Production and Allocation. New York: Wiley, 1951.
- 3 Zadeh L. Optimality and non-scalar-valued performance criteria. IEEE Transactions on Automatic Control, 1963, 8(1): 59–60. [doi: 10.1109/TAC.1963.1105511]
- 4 Haimes YY, Lasdon LS, Wismer DA. On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. IEEE Transactions on

- Systems, Man, and Cybernetics, 1971, SMC-1(3): 296–297. [doi: 10.1109/TSMC.1971.4308298]
- 5 Charnes A, Cooper WW. Management models and industrial applications of linear programming. Management Science, 1957, 4(1): 38–91. [doi: 10.1287/mnsc.4.1.38]
- 6 Schaffer JD. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms. Pittsburgh, PA, USA. 1985. 93–100.
- 7 Moore J, Chapman R. Application of particle swarm to multiobjective optimization[Technical Report]. Alabama: Auburn University, 1999. 32.
- 8 Serafini P. Simulated annealing for multi objective optimization problems. In: Tzeng GH, Wang HF, Wen UP, *et al.*, eds. Multiple Criteria Decision Making. New York: Springer, 1994. 283–292.
- 9 Kumar S, Rao CSP. Application of ant colony, genetic algorithm and data mining-based techniques for scheduling. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, 25(6): 901–908. [doi: 10.1016/j.rcim.2009.04.015]
- 10 Messac A. Physical programming-effective optimization for computational design. AIAA Journal, 1996, 34(1): 149–158. [doi: 10.2514/3.13035]
- 11 Abadi M, Jalili S. Using binary particle swarm optimization for minimization analysis of large-scale network attack graphs. Scientia Iranica, 2008, 15(6): 605–619.
- 12 Messac A, Chen X. Visualizing the optimization process in real-time using physical programming. Engineering Optimization, 2000, 32(6): 721–747. [doi: 10.1080/03052150008941319]
- 13 Tappeta RV, Renaud JE, Messac A, *et al.* Interactive physical programming: Tradeoff analysis and decision making in multicriteria optimization. AIAA Journal, 2000, 38(5): 917–926. [doi: 10.2514/2.1048]
- 14 Chen W, Sahai A, Messac A, *et al.* Exploration of the effectiveness of physical programming in robust design. Journal of Mechanical Design, 2000, 122(2): 155–163. [doi: 10.1115/1.533565]
- 15 黄洪钟, 田志刚, 关立文. 基于神经网络的交互式物理规划及在机械设计中的应用研究. 机械工程学报, 2002, 38(4): 51–57. [doi: 10.3321/j.issn:0577-6686.2002.04.011]
- 16 李晓斌, 张为华, 王中伟. 基于物理规划的固体火箭发动机不确定性优化设计. 固体火箭技术, 2006, 29(3): 165–168, 173. [doi: 10.3969/j.issn.1006-2793.2006.03.003]
- 17 雍恩米, 陈磊, 唐国金. 基于物理规划的高超声速飞行器滑翔式再入轨迹优化. 航空学报, 2008, 29(5): 1091–1097. [doi: 10.3321/j.issn:1000-6893.2008.05.001]
- 18 孙冲, 李文辉. 基于搜索空间自适应分割的多目标粒子群优化算法. 吉林大学学报(理学版), 2019, 57(2): 345–351.