

文章编号: 1000-6893(2005)05-0562-05

物理规划方法及其在飞机方案设计中的应用

王允良, 李为吉

(西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

Physical Programming and Its Application in Aircraft Concept Design

WANG Yun-liang, LI Wei-ji

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 物理规划方法是一种高效的设计优化方法,它与设计者的工程经验紧密联系,能以较低的计算代价获得真实反映设计者偏好的折衷解,对解决多目标优化设计问题具有重要意义。将物理规划设计方法与稳定、高效的粒子群优化算法相结合,有效地求解多目标优化问题中的折衷非劣解。通过求解数值算例和民用飞机方案设计问题,验证了该方法的有效性。

关键词: 物理规划; 多目标优化; 粒子群优化算法

中图分类号: O221; V221

文献标识码: A

Abstract: Physical programming is an effective method for design optimization. It provides a flexible and natural design framework and the computational cost is reduced significantly. Compared with the conventional weight-based approach for multi-object optimization, Physical Programming is associated with the engineering experiences of designers and the tradeoff solution is obtained which can express designers' preferences correctly. It is of significance to use Physical Programming in multi-object optimization. When Physical Programming method is combined with robust and effective Particle Swarm Optimization Algorithms, the tradeoff Pareto solution of multi-object optimization can be evaluated effectively. Physical Programming method reveals its efficiency in a mathematical paradigm and an aircraft concept design problem.

Key words: physical programming; multi-object optimization; particle swarm optimization

物理规划(Physical Programming)^[1]是 20 世纪 90 年代后期出现的新的优化设计方法,将设计问题置于更加灵活、自然的框架中。大多数工程设计问题都是多目标优化设计问题,常用的将多个设计目标加权集成的权重方法,正确选择权重十分困难,是一个需要反复迭代的过程,计算工作量很大。相比之下,在物理规划方法中,设计者的偏好明确之后,便可获得符合这种偏好的最优设计,无需反复设置各个目标的权重系数,降低了计算耗费。该方法已经受到极大的关注,并在飞机设计等复杂的工程设计问题中得到应用^[2~4]。

1 物理规划的数学模型

(1) 物理规划的设计思路 物理规划从设计者那里获得信息,将设计问题描述成一个能够反映设计者对设计目标偏好程度的真实框架结构,使设计过程更加自然灵活。物理规划通过偏好函数来表达设计者对各个设计目标的偏好程度,将设计目标的取值划分为若干连续区间,以反映设

计者的各种偏好程度。通过分段样条曲线拟合,得到符合物理规划要求的能定量描述偏好程度的偏好函数。将各个设计目标的偏好函数综合起来,得到综合偏好函数,作为物理规划的优化目标函数,结合设计约束条件,应用适当的优化算法,得到最优设计。

(2) 偏好函数的建立 工程优化设计中的设计目标、设计变量和约束条件均属于设计指标。在物理规划中,对设计指标的偏好分为 4 种不同的类型:

Class1: 指标越小越好;

Class2: 指标越大越好;

Class3: 指标趋于某值最好;

Class4: 指标在某取值范围最好。

每种类型分为软、硬(S, H)两种情况。图 1 中,横轴代表设计指标 C_i ,纵轴代表设计指标对应的偏好函数值 P_i 。偏好函数用于将设计指标映射到正实数空间,偏好函数取值越小,表示设计者对该设计指标的取值越满意。对于软型指标,在可行域内偏好函数取值随设计指标变化,表示对设计指标的不同取值有不同的偏好程度;对于硬型指标,在可行域内偏好函数均取最小值,表示

收稿日期: 2004-07-28; 修订日期: 2005-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(10377015)资助项目

只要设计指标可行即可。这种映射形式可以确保将具有不同物理意义的各设计指标变换到统一的数量级上。

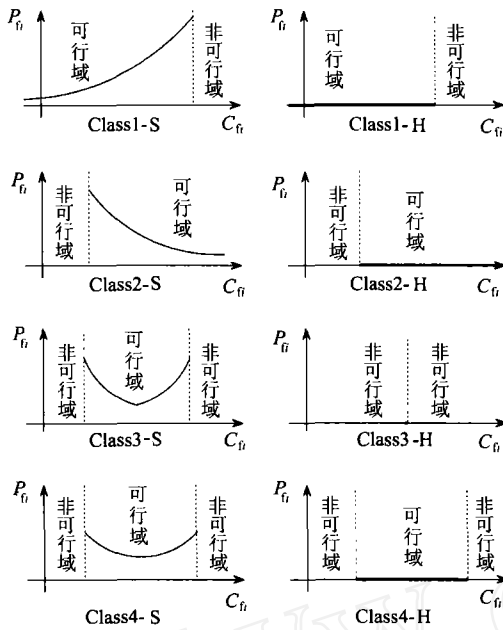


图 1 偏好类型的划分
Fig. 1 Preference types

各种偏好类型的设计指标中,软型设计指标(Class1-S~Class4-S)对应工程优化问题中的设计目标,硬型设计指标(Class1-H~Class4-H)对应设计变量或约束条件。设计目标与其偏好函数的关系如图 2。

使用物理规划方法,设计者能详细地对偏好程度进行定性和定量的描述。对各个设计目标,可以根据对它的偏好程度,将其取值范围分为不同的偏好区间(图 2),以 Class1-S 型目标为例,各个区间分别为:

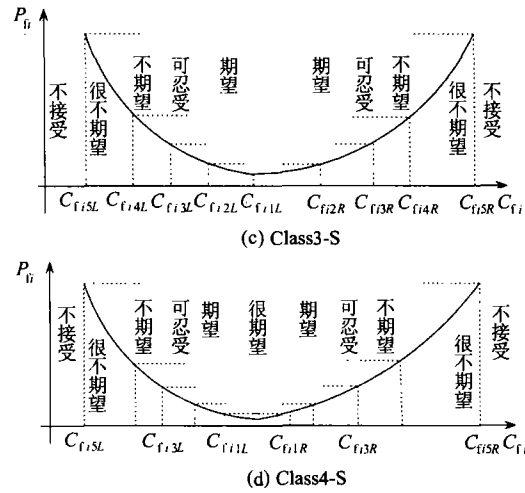
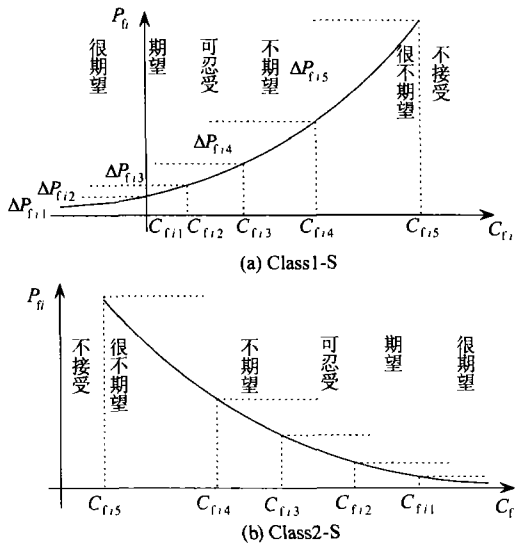


图 2 设计目标的偏好函数曲线

Fig. 2 Preference functions of design object

- ① 很期望域, $C_{fi} \leq C_{fi1}$, 该区间内目标取值可以接受,而且很期望;
- ② 期望域, $C_{fi1} < C_{fi} \leq C_{fi2}$, 该区间内目标取值可以接受,是所期望的;
- ③ 可忍受域, $C_{fi2} < C_{fi} \leq C_{fi3}$, 该区间内目标取值可以接受,仅能忍受;
- ④ 不期望域, $C_{fi3} < C_{fi} \leq C_{fi4}$, 该区间内目标取值可以接受,但不期望;
- ⑤ 很不期望域, $C_{fi4} < C_{fi} \leq C_{fi5}$, 该区间内目标取值可以接受,但很不期望;
- ⑥ 不接受域, $C_{fi} > C_{fi5}$, 该区间内目标取值将不能接受,设计方案不会被采纳。

$C_{fi1} \sim C_{fi5}$ 是具有实际物理意义的设计目标取值,反映了对设计目标的偏好程度,划分出偏好区间。

根据前述偏好函数的意义,其表达式必须满足几个重要条件:①严格为正;②一阶导数连续;③二阶导数严格为正;④偏好区间可任意划分,覆盖设计目标的整个值域。因此,可以在各个偏好区间内用分段样条的形式,构造偏好函数的表达式,保证函数曲线的光滑连续。各个区间内的样条通过区间两端点处的函数值和斜率来定义。

对设计目标 C_{fi} ,在偏好区间 $k(k=2,3,4,5)$ 内,构造偏好函数的二阶导数

$$\frac{\partial^2 P_{fik}}{\partial C_{fik}^2} = \lambda_{ik}^2 [a\xi_{ik}^2 + b(\xi_{ik} - 1)^2], 0 \leq \xi_{ik} \leq 1 \quad (1)$$

$$\text{其中: } \xi_{ik} = \frac{C_{fi} - C_{fi(k-1)}}{C_{fi(k)} - C_{fi(k-1)}};$$

$$\lambda_{ik} = C_{fi(k)} - C_{fi(k-1)};$$

a, b 是严格为正的实数。通过积分求得偏好函数

表达式

$$P_{fik} = \lambda_{ik}^4 \left[\frac{a}{12} \xi_{ik}^4 + \frac{b}{12} (\xi_{ik} - 1)^4 \right] + c \lambda_{ik} \xi_{ik} + d \quad (2)$$

由区间端点的偏好函数值 $P_{fi(k-1)}$, $P_{fi(k)}$ 及其斜率 $S_{i(k-1)}$, $S_{i(k)}$, 求得

$$a = \frac{3[3S_{i(k)} + S_{i(k-1)}] - 12\bar{S}_{ik}}{2\lambda_{ik}^3}$$

$$b = \frac{12\bar{S}_{ik} - 3[S_{i(k)} + 3S_{i(k-1)}]}{2\lambda_{ik}^3}$$

$$c = 2 \frac{P_{fi(k)} - P_{fi(k-1)}}{\lambda_{ik}^4} - \frac{S_{i(k-1)} + S_{i(k)}}{2}$$

$$d = \frac{3P_{fi(k-1)} - P_{fi(k)}}{2} - \frac{\lambda_{ik}(3S_{i(k-1)} + S_{i(k)})}{8}$$

其中: $\bar{S}_{ik} = \Delta P_{fik} / \lambda_{ik}$ 为偏好函数在区间 k 的平均斜率。

下列步骤确定偏好函数在区间端点的信息:

- ① 取 ΔP_{fi1} 为一个值较小的正数, 如 0.1;
- ② $\Delta P_{fi(k)} = \beta n_{sc} \Delta P_{fi(k-1)}$, $k = 2, 3, 4, 5$, $\beta > 1$, n_{sc} 为设计目标的个数;
- ③ $P_{fi1} = \Delta P_{fi1}$,
 $P_{fi(k)} = P_{fi(k-1)} + \Delta P_{fi(k)}$;
- ④ $S_{i1} = \alpha \bar{S}_{i2}$, $S_{i(k)} = (S_{i(k)})_{\min} + \alpha \Delta S_{i(k)}$,
 $0 < \alpha < 0.1$, 由 a, b 严格为正, 可得

$$(S_{i(k)})_{\min} = \frac{4\bar{S}_{ik} - S_{i(k-1)}}{3},$$

$$\Delta S_{i(k)} = \frac{8}{3} (\bar{S}_{ik} - S_{i(k-1)}).$$

对于很期望域, 设置

$$P_{fi} = P_{fi1} \cdot \exp[(S_{i1}/P_{fi1})(C_{fi} - C_{fi1})].$$

上述方法建立的设计目标偏好函数符合图 2 所示的变化趋势。偏好函数的取值没有严格限定, 只要它能反映出在不同偏好区间中设计者对目标值的不同满意度即可。对每个设计目标 C_{fi} , 具有相同满意度等级的偏好区间端点处的目标值 C_{fik} 因物理意义不同而相异, 但它们对应的偏好函数值是相同的。这种统一的设定, 使得对于不同设计目标, 只要它们位于相同的偏好区间, 比如均位于期望域, 对应的偏好函数值会在同量级, 表示它们有相近的满意度, 为将各个设计目标转换为综合满意度目标提供了依据。

(3) 物理规划的优化模型 综合各个设计目标的偏好函数, 得到设计问题的综合偏好函数作为物理规划优化模型的目标函数 P_{af} , 优化模型为

$$\min: P_{af} = \log \left[\frac{1}{n_{sc}} \sum_{i=1}^{n_{sc}} P_{fi}(C_{fi}(x)) \right] \quad (3)$$

$$\text{s. t. } : g_j(x) \leq 0, x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$$

其中: x 为工程优化设计问题的设计变量; $g_j(x)$ 为约束条件。

物理规划方法并不是一种新的非线性规划算法, 它是将非线性规划算法用于设计优化的一种新框架, 通过综合偏好函数将工程设计问题的多目标优化转换为单目标优化, 获得反映设计者偏好的最优设计。粒子群优化算法^[5,6]模拟群体模型中的信息共享机制, 能以较小的群体规模更快的收敛到最优解, 具有稳定、高效的特点。根据物理规划优化模型, 将优化目标函数 P_{af} 与各个约束条件 $g_j(x)$ 组成罚函数 $F(x) = P_{af} + \sigma \sum g_j(x)$, 其中 σ 为罚因子, 作为每个粒子的适应度函数。每个粒子对应着一个设计方案, 粒子群在设计变量的变化范围内随机初始化。本文用物理规划方法建立工程设计问题的优化模型, 并用粒子群优化算法进行求解, 充分利用建模方法和求解算法的优势, 是求解复杂工程问题的一种新的尝试。

2 物理规划与传统多目标优化的比较

在传统多目标优化方法中, 权重方法通常需要设置各个设计目标的权重系数, 这些权重系数只能反映各设计目标的相对重要度, 无法真实地表达设计者对目标的满意度。而且, 权重需要反复设置, 经过多次迭代才能使计算收敛, 计算耗费巨大, 却不能保证最终得到令设计者满意的设计方案。分级优化方法将各个设计目标按重要度等级排列的顺序分别进行优化, 然而在实际设计问题中认定某一目标远比其他目标重要的前提是不现实的, 无法对设计问题进行全面的探究。

在物理规划中, 设计者给出反映不同满意程度的偏好区间端点处的设计目标值, 称为偏好结构, 这些取值是符合工程实际的。尽管各设计目标有不同的物理意义, 取值的量纲也可能不同, 但是偏好函数用统一的尺度定量表达了设计者对各个设计目标的满意程度, 将不同物理意义的各个设计目标转换为具有相同数量级的无量纲的满意度目标。通过对偏好函数的优化, 可以寻求满意度最优的设计点作为设计问题的最优解, 真实反映设计者对各个设计目标的满意程度。因此, 物理规划与权重法有本质区别, 而且整个设计过程避免了反复迭代选择合适权重的复杂工作, 大幅度的减轻了计算负担。

3 算例分析

(1) 数值算例 多目标数值优化问题^[3], 数

学模型描述为

$$\begin{aligned} \min: F(\mathbf{x}) &= \{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), f_3(\mathbf{x})\} \\ \text{s. t. : } g(\mathbf{x}) &= 12 - x_1^2 - x_2^2 - x_3^2 \geq 0 \\ &0 \leq x \leq 5 \end{aligned}$$

其中优化目标函数为

$$\begin{aligned} f_1(\mathbf{x}) &= 10 - (x_1^3 + x_1^2(1 + x_2 + x_3) + x_2^3 + x_3^3)/10 \\ f_2(\mathbf{x}) &= 15 - (x_1^3 + 2x_2^3 + x_2^2(2 + x_1 + x_3) + x_3^3)/10 \\ f_3(\mathbf{x}) &= 20 - (x_1^3 + x_2^3 + 3x_3^3 + x_3^2(3 + x_1 + x_2))/10 \end{aligned}$$

表 1 设计目标偏好结构

设计目标	偏好类型	偏好区间边界值				
		C_{f11}	C_{f12}	C_{f13}	C_{f14}	C_{f15}
f_1	1-S	3	4.25	6	7.5	9
f_2	1-S	3.7	7	9.25	11.8	12.5
f_3	1-S	6	12	15	18	20

根据表 1 的数据,构造综合偏好函数作为优化目标函数,使用粒子群优化算法对优化模型进行求解,得到优化解为

$$\mathbf{x} = (1.6529 \quad 2.3944 \quad 1.8801)$$

对应设计目标为

$$\mathbf{f} = (6.0701 \quad 7.9662 \quad 13.691)$$

可以看到,所得的 3 个设计目标值都在可忍受域内,是在设计者提供的偏好结构下得到的一个折衷解。

(2) 飞机方案设计 将物理规划方法用于民用飞机方案设计,方案设计模型参考文献[7]。设计目标为:巡航段升阻比 C_L/C_D ;有效载荷系数 U 。设计变量包括:机翼面积 S ;机身长度 L ;机翼展长 b ;发动机地面安装推力 T_i ;全机起飞总重 W_{TO} 。约束条件包括:对起飞滑跑距离 S_T ;着陆距离 S_L ;全局燃油平衡系数 R_f ;起飞可达爬升梯度 q_T ;着陆失败可达爬升梯度 q_L 的设计要求。

飞机方案设计优化模型如下

$$\begin{aligned} \max: f_1 &= C_L/C_D, f_2 = U \\ \text{s. t. : } &\begin{cases} S_T \leq 1981 \text{ m} \\ S_L \leq 1372 \text{ m} \\ R_f \geq 1.0 \\ q_T \geq 2.7^\circ \\ q_L \geq 2.4^\circ \end{cases} \end{aligned}$$

设计变量:

$$\begin{cases} 111 \text{ m}^2 \leq S \leq 232 \text{ m}^2 \\ 32 \text{ m} \leq L \leq 45.7 \text{ m} \\ 26 \text{ m} \leq b \leq 42.7 \text{ m} \\ 12\,587 \text{ kg} \leq T_i \leq 24\,948 \text{ kg} \\ 63\,504 \text{ kg} \leq W_{TO} \leq 113\,400 \text{ kg} \end{cases}$$

给定设计目标的偏好区间边界(表 2)。

表 2 飞机方案设计目标偏好结构

Table 2 Preference structures of aircraft concept design

设计目标	偏好类型	偏好区间边界值				
		C_{f15}	C_{f14}	C_{f13}	C_{f12}	C_{f11}
f_1	2-S	20	22.5	24	25	26
f_2	2-S	0.47	0.476	0.48	0.486	0.489

表 2 提供了物理规划优化模型的偏好结构,反映了设计者对飞机巡航段升阻比和有效载荷系数的不同偏好程度。用粒子群优化算法对物理规划优化模型求解,得到优化解

$$\mathbf{x} = (122.74 \quad 40.596 \quad 42.7 \quad 12587 \quad 67973)$$

对应设计目标为

$$\mathbf{f} = (26.124 \quad 0.47798)$$

应用基于小生境竞争排挤的多目标遗传算法[8],对飞机方案设计多目标优化模型进行求解,得到非劣解集,如图 3。

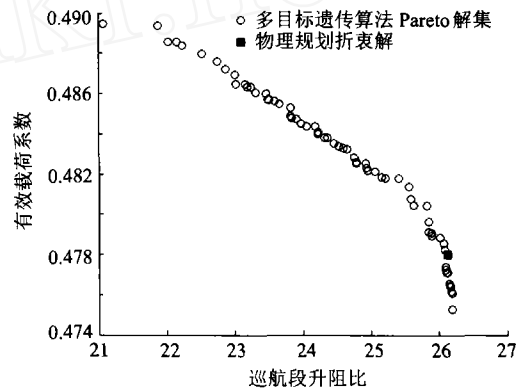


图 3 物理规划的折衷解

Fig. 3 Tradeoff solutions of Physical Programming

根据设计者提供的偏好结构(表 2),应用物理规划方法得到的折衷解真实地反映了设计者对优化目标的偏好,而且该折衷解位于多目标优化的非劣解集。因此,应用物理规划方法可以有效的获得反映设计者偏好的非劣解,对多目标的设计方案决策具有重要的指导意义。

4 结束语

介绍了物理规划方法的原理及其数学模型,将该方法与传统多目标优化算法进行了比较分析,和粒子群优化算法相结合,求出多目标优化问题的非劣解。通过求解飞机方案设计问题验证了物理规划方法在解决工程多目标优化设计的有效性。物理规划将整个设计过程置于一个更加灵活、自然的框架中,能够针对设计者的偏好,得到相应的设计方案。

参 考 文 献

- [1] Messac A. Physical programming: effective optimization for computational design[J]. *AIAA Journal*, 1996, 34(1): 149-158.
- [2] Messac A, Hattis P D. Physical programming design optimization for high speed civil transport[J]. *Journal of Aircraft*, 1997, 33(2): 446-449.
- [3] Tappeta R V, Renaud J E, Messac A, *et al.* Interactive physical programming: tradeoff analysis and decision making in multicriteria optimization[J]. *AIAA Journal*, 2000, 38(5): 917-926.
- [4] Messac A, Sundararaj G J. A robust design approach using physical programming[R]. AIAA-2000-0562, 2000.
- [5] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [A]. *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks* [C]. Perth, Australia, 1995. 1942-1948.
- [6] 王允良, 张勇, 李为吉, 等. 可重复使用运载器机翼外形优化[J]. *宇航学报*, 2004, 25(5): 488-491.
Wang Y L, Zhang Y, Li W J, *et al.* Wing shape optimization of the reusable launch vehicle[J]. *Journal of Astronautics*, 2004, 25(5): 488-491. (in Chinese)
- [7] Lewis K. An algorithm for integrated subsystem embodiment and system synthesis[D]. Atlanta, GA: Georgia Institute of Technology, 1996.
- [8] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 74-138.
Zhou M, Sun S D. Genetic algorithms: theory and applications[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 74-138. (in Chinese)

作者简介:



王允良(1977-) 男, 辽宁辽阳人, 博士研究生, 主要从事飞行器总体设计和优化技术的研究, E-mail: flyingwyl@163.com, 联系电话: (029)88491415。

李为吉(1939-) 男, 山东济南人, 西北工业大学航空学院教授、博导, 主要从事飞行器设计、优化理论方法和设计技术的研究。

(责任编辑: 李铁柏)