

文章编号:1000-8055(2013)03-0591-06

超径向可视化技术及其在火箭设计中的应用

孙兴亮, 方 杰, 蔡国飙

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 针对传统可视化技术处理高维多目标设计优化问题的不足,对超径向可视化技术开展了研究.该技术将超空间 Pareto 前沿无损地显示于二维空间,有助于设计人员直观了解复杂的 Pareto 解集空间,并快速获得较好的权衡设计.此外,在超径向可视化过程中,通过采用权重因子和基于偏好区间的颜色标记原则引入设计偏好,可以辅助设计者选择出更加符合特定偏好的设计方案.将超径向可视化技术应用于近地空间火箭的多目标设计优化,验证了该技术处理高维多目标设计优化问题的可行性和高效性.

关 键 词: 超径向可视化; 偏好引入; 多目标优化; Pareto 解集; 固液火箭发动机

中图分类号: V421; TP301.6

文献标志码: A

Hyper-radial visualization and its application in launch vehicle design

SUN Xing-liang, FANG Jie, CAI Guo-biao

(School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Considering the deficiency of traditional visualization methods when dealing with high-dimensional multi-objective design optimization, the hyper-radial visualization (HRV) method was studied. HRV provided a lossless visualization way to represent the hyperspace Pareto frontier, enabled designers to realize the complex Pareto set intuitively, and identified a better trade-off design quickly as well. Besides, with the purpose of assisting designers to choose a more specific optimal design solution, the designers' preference was incorporated by the weights and color marks with range-based preferences. A multi-objective optimization design of a sub-orbit launch vehicle was accomplished by HRV, which indicates the HRV method is feasible and efficient for high-dimensional multi-objective design optimization.

Key words: hyper-radial visualization (HRV); preference incorporation; multi-objective optimization; Pareto set; hybrid rocket motor

在求解高维多目标设计优化问题时,多目标优化算法获得的超空间 Pareto 前沿(hyperspace Pareto frontier, HPF)无法在笛卡儿坐标系直观显示^[1].如果将原问题简化为单目标或低维多目标优化问题,这就存在信息损失,从而难以获得全局最优解.而采用传统可视化技术直接处理

HPF,也存有一定的缺陷或不足^[2-6]:①平行坐标法,随着 Pareto 点和目标函数个数的增加,所显示出的折线簇将变得密集,不利于设计者对 Pareto 解集进行研究^[7-9];②超空间对角计算,由于在可视化过程中没有维持各目标函数之间的相互关系,最终实现的是有损的可视化显示^[10-11].

收稿日期:2012-03-30

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130326.1743.201303.591_017.html

作者简介:孙兴亮(1988—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士生,主要从事火箭发动机优化仿真研究.

为解决上述问题,美国纽约州立大学的研究人员提出了超径向可视化(hyper-radial visualization, HRV)^[12]技术.该技术可将 HPF 无损地显示于二维空间,有助于设计人员对 HPF 进行高效、直观地权衡分析,并最终确定符合偏好的全局最优解.本文将 HRV 技术应用于火箭设计中,在研究该技术的同时验证其在处理火箭高维多目标优化问题的可行性和高效性.

1 超径向可视化技术

1.1 基本概念

HRV 概念来源于传统的半径计算.如图 1 所示,利用半径值代替坐标值来表征各数据点,从而实现二维数据到一维空间的映射.

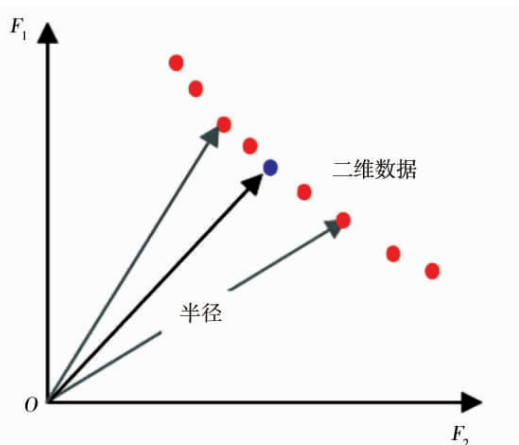


图 1 超径向可视化示意简图

Fig. 1 Concept of HRV method

仿照传统半径计算的过程,HRV 技术采用公式(1)计算超空间 Pareto 点的超径向半径值(hyper-radial calculation, HRC),记作 C .

$$C = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \tilde{F}_i^2}{n}}, C \in [0, 1] \quad (1)$$

式中 F_i 为目标函数 i 的值, n 为目标函数个数.

为了在同一坐标系下对具有不同量级和不同单位的目标函数进行显示,采用公式(2)分别对各目标函数进行归一化处理

$$\tilde{F}_i = \frac{F_i - F_{i,\min}}{F_{i,\max} - F_{i,\min}}, \tilde{F}_i \in [0, 1] \quad (2)$$

考虑如公式(3)所示的多目标设计优化模型: n ($n > 3$) 个目标函数, HPF 包含 q 个 Pareto 点. 采用 HRV 技术分别对各 Pareto 点进行处理.

$$[F_1, F_2, F_3, \dots, F_n]_j \quad j = 1, q$$

$$\text{Group 1: } [F_1, F_2, F_3, \dots, F_s]$$

$$\text{Group 2: } [F_{s+1}, F_{s+2}, F_{s+3}, \dots, F_n] \quad (3)$$

第 1 步 将目标函数按照公式(3)进行分组(设计者也可选择其他的目标函数分组方式).

第 2 步 对各目标函数进行归一化处理,然后代入公式(4)计算出每组的 C 值.

$$\text{Group 1: } C_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^s \tilde{F}_i^2}{s}}$$

$$\text{Group 2: } C_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=s+1}^n \tilde{F}_i^2}{n-s}} \quad (4)$$

第 3 步 以 $[C_1, C_2]$ 为坐标数据, 实现高维数据 $[F_1, F_2, \dots, F_n]$ 到二维空间 $[C_1, C_2]$ 的映射.

对于求最小值的优化问题,由于归一化后的各目标函数的最小值为 0,所以理想设计点为一个 n 维零向量 $[0, 0, \dots, 0]$,其也必定为低维空间 $[C_1, C_2]$ 的坐标原点.因此,设计者可根据各 Pareto 点离坐标原点的距离来评定其全局性能的优劣.

1.2 火箭高维多目标设计优化

本文采用 HRV 技术,针对基于固液火箭发动机的近地空间火箭开展高维多目标设计优化,以获得全局最优的设计方案.

设计优化模型的详细参数如下:设计变量为发动机半径、药柱肉厚、燃烧室压强、发动机推力、氧燃比、喷管扩张比、发射仰角;目标函数为最小化起飞总质量 M 和轴向过载 N_X ,最大化设计比冲 I_s 和弹道顶点高度 Y .通过符号变换,可以将此设计优化问题转换成求最小值问题,即 $\min(Y, M, N_X, I_s)$.

采用多目标遗传算法进行优化计算,可获得由 1428 个 Pareto 点组成的 HPF.采用 HRV 进行处理,令 $[Y, M]$ 构成 C_1 , $[N_X, I_s]$ 构成 C_2 ,即可得到如图 2 所示的 HPF 可视化结果.设计者通过选择距离原点(即理想点)最近的解集区域作为深入研究对象,可最终获得全局最优的火箭设计方案.

通过以上的设计应用,可以表明 HRV 技术有助于设计者直观地分析研究 HPF,同时也验证了该技术处理 HPF 的可行性和高效性.需要说明的是:不同的分组方式,只会改变关于 HPF 结果的可视化显示方式,并不影响最终对全局最优解的选择确定^[12].

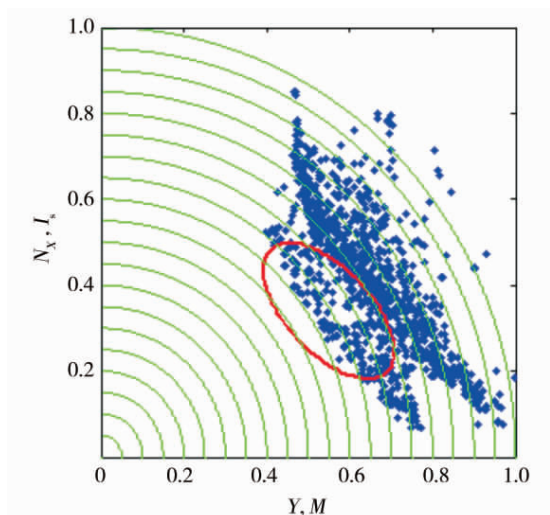


图2 应用 HRV 技术得到的 HPF 可视化结果

Fig.2 HPF visualization by HRV method

2 偏好引入

2.1 权重因子

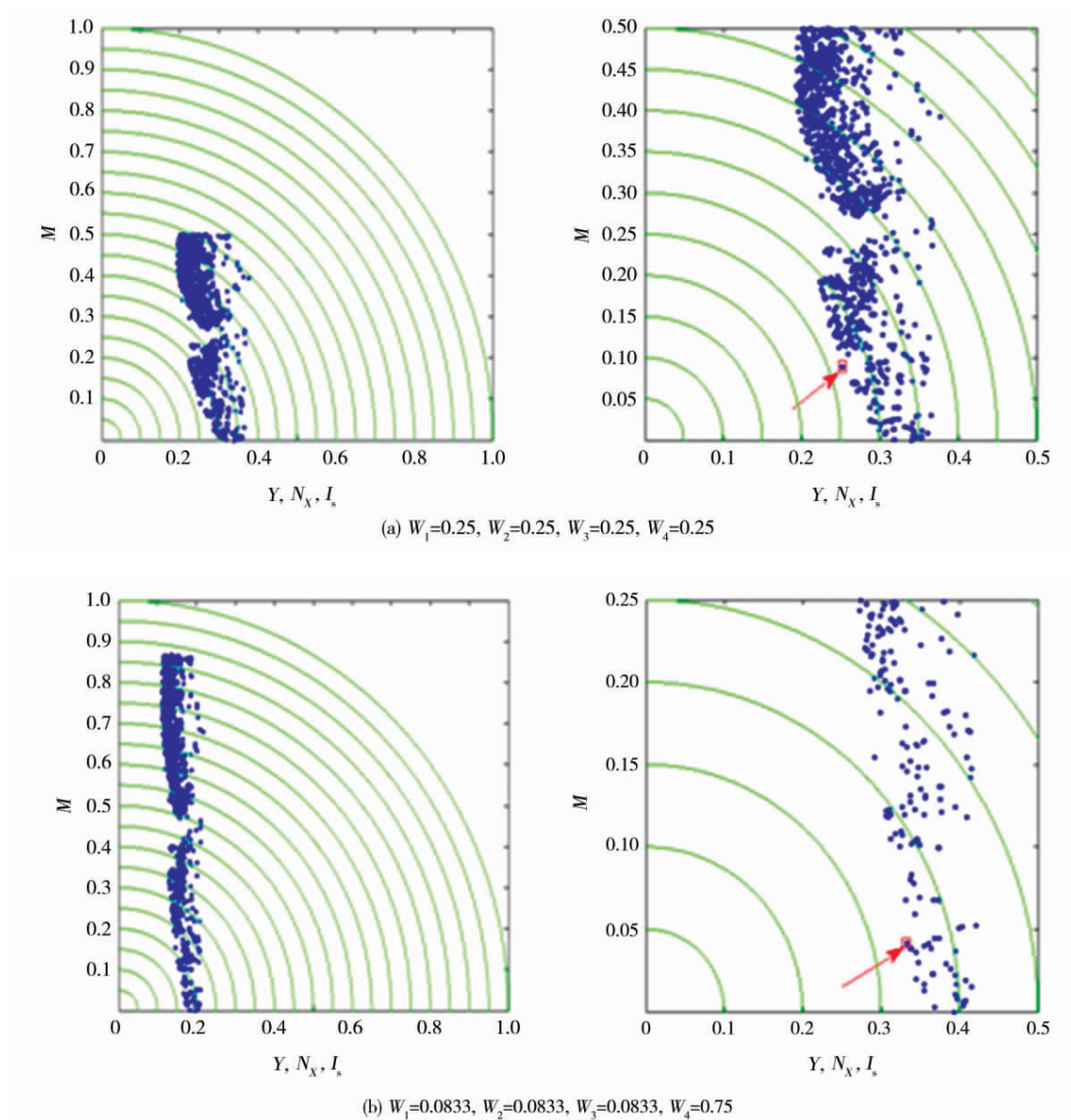
通过为各目标函数 F_i 指定相应的权重因子 W_i , 可以表征设计者对各目标函数的偏好程度. W_i 越大, 表明对 F_i 的偏好程度越大^[13].

通过权重因子引入设计者偏好的公式为

$$C_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W_i \times \tilde{F}_i^2}{n}}$$

$$W_i > 0, \quad \sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (6)$$

在火箭的高维多目标设计优化中, 为获得关于火箭质量 M 最优的设计方案, 将 Y, N_X, I_s 包含于 C_{w_1} , M 包含于 C_{w_2} , 并使其相应的权重因子 W_4 不断变大, 可视化结果如图3所示. 其中, 右图



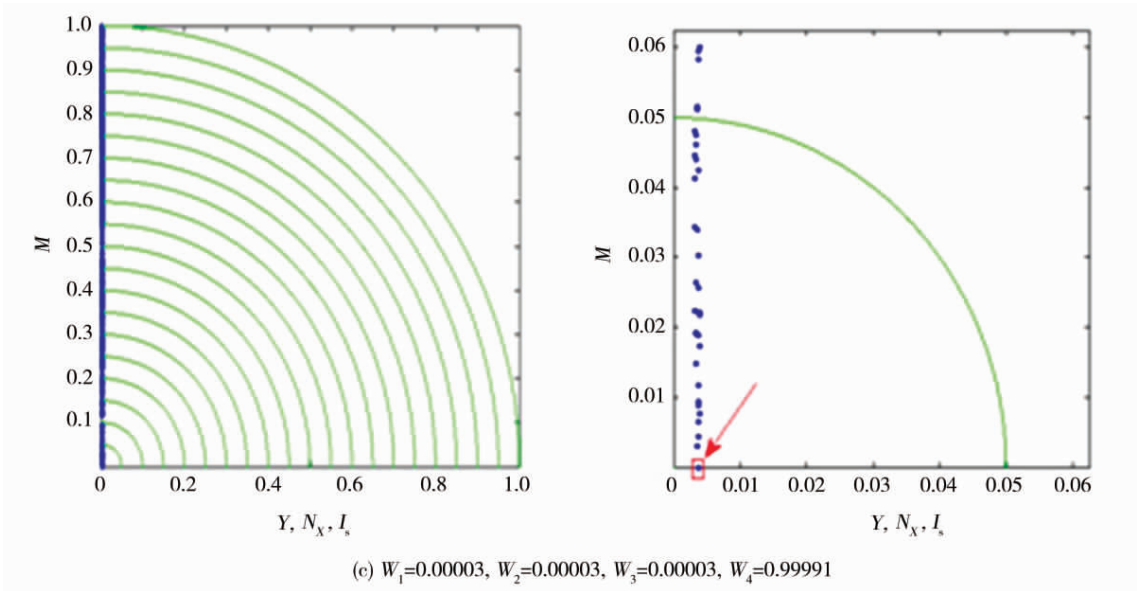


图 3 采用不同权重因子的 HPF 可视化结果(X 轴包含 Y, N_X, I_s ; Y 轴包含 M)

Fig. 3 HPF visualization with weighting procedure (X-axis includes Y, N_X, I_s ; Y-axis includes M)

为对应左图的放大图,右图中红框标记的为离原点最近的 Pareto 点,其具体数值见表 1.

表 1 离原点最近的 Pareto 点
Table 1 Minimum radius Pareto points

权重组合	a	b	c
Pareto 点序号	914	173	723
Y	0.3995	0.8766	0.9984
N_X	0.2889	0.5838	0.6630
I_s	0.7835	0.9550	1
M	0.4214	0.08615	0

从图 3 和表 1 可以看出,随着 W_4 由 0.25 增大至 0.99991, M 随之减小到 0,但 Y, N_X 和 I_s 性能值都有所变劣,此时获得的解为关于火箭质量 M 单目标最优的设计方案.

2.2 基于等偏好区间的颜色标记原则

研究表明:人有 75% 的注意力集中在视觉上.因此对 Pareto 点进行颜色标记将更有助于设计者对 HPF 进行分析研究^[14].

2.2.1 偏好区间

设计者首先需要在各目标函数的取值范围内定义偏好区间,然后根据各目标函数的具体数值,确定其所处的偏好等级.表 2 为 5 个偏好区间的定义:最期望等级(highly desirable, HD)、期望等

级(desirable, D)、可以接受等级(tolerable, T)、不期望等级(un-desirable, U)、最不期望等级(highly un-desirable, HU).设计者也可自行指定偏好区间个数,以及各偏好区间的界限值.

表 2 偏好区间定义
Table 2 Specification of preference ranges

目标函数取值范围/%		偏好等级
0	20	HD
20	40	D
40	60	T
60	80	U
80	100	HU

2.2.2 颜色标记原则

对于不同的偏好区间,有 3 种颜色标记原则:最优颜色标记原则根据 Pareto 点中目标函数的最低偏好等级进行颜色标记;包容颜色标记原则根据 Pareto 点中目标函数的最高偏好等级进行颜色标记;混合颜色标记原则利用 2 个数字对各 Pareto 点进行颜色标记,其中,第 1 个数字以最优颜色标记原则进行设定,第 2 个数字以包容颜色标记原则进行设定^[2,15].混合颜色标记原则的样例如图 4 和表 3 所示.

根据标记原则,标号为 11 的点中各目标函数都处于最期望等级.因此,该点为设计者的理想

解;但由于各目标函数的优化求解往往是相互冲突的,导致其在现实情况下几乎不可能获得.

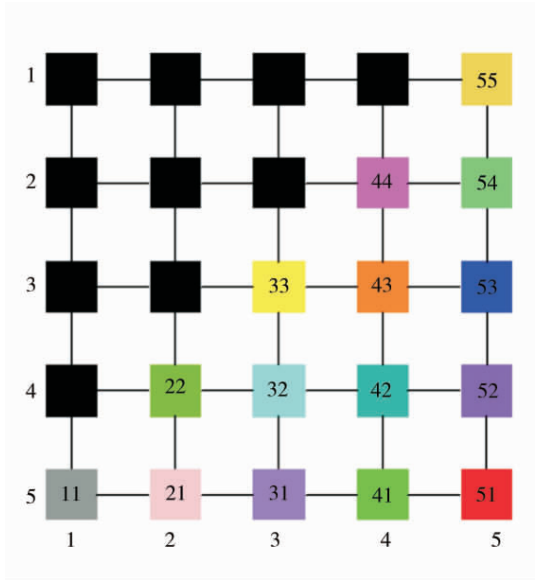


图 4 颜色与标号对照说明
Fig. 4 Contrast description between color and label

表 3 混合颜色标记原则定义样例
Table 3 Color code for hybrid preference structure

标号	偏好等级	标号	偏好等级
11	均为最期望等级	43	最低为不期望等级 最高为可接受等级
21	最低为期望等级 最高为最期望等级	44	均为不期望等级
22	均为期望等级	51	最低为最不期望等级 最高为最期望等级
31	最低为可接受等级 最高为最期望等级	52	最低为最不期望等级 最好为期望等级
32	最低为可接受等级 最高为期望等级	53	最低为最不期望等级 最好为可接受等级
33	均为可接受等级	54	最低为最不期望等级 最好为不期望等级
41	最低为不期望等级 最高为最期望等级	55	均为最不期望等级
42	最低为不期望等级 最高为期望等级		

采用基于偏好区间的颜色标记原则对火箭多目标设计优化的 HPF 重新进行 HRV 处理,得到如图 5 所示的可视化结果.可以看出,图中没有标

号为 11 的点,而出现了大量标号为 32,41 和 42 的点.这一方面说明通过多目标设计优化,得到的都是相对全局最优解,而非理想解;另一方面可以辅助设计者更直观、高效地在 HPF 中确定符合特定偏好的全局最优解.

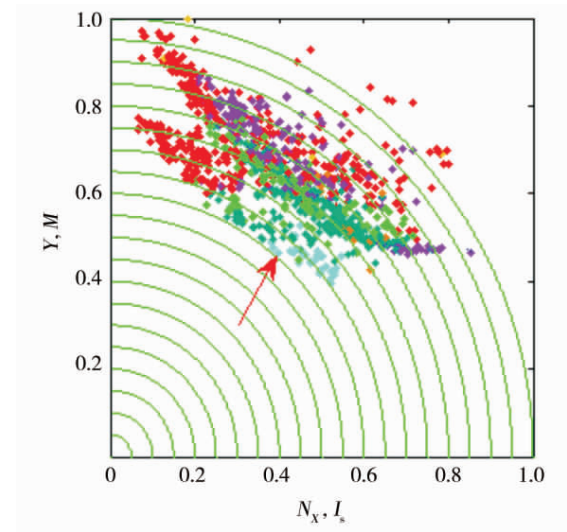


图 5 采用混合颜色标记的可视化结果
Fig. 5 Hybrid preference sorting of HRV results

从图 5 中选择离原点最近的标号为 32 的 Pareto 点作为相对全局最优解,并将其与 2.1 节中关于质量 M 的单目标优化结果进行对比,相应的实际目标值及其变化幅度如表 4 所示.相比于单目标最优解,多目标优化获得的最优解的 M 值变劣;但 Y, N_x 和 I_s 值变优,且其变化幅度大于 M 的变化幅度;该结果可以作为近地空间火箭高维多目标设计优化的最优方案.

表 4 单目标与多目标优化结果对比
Table 4 Solution comparison between single-objective and multi-objective design optimizations

	Y/km	$I_s / (\text{N} \cdot \text{kg})$	N_x/g	M/kg
单目标	100.01	2111.35	8.76	522.87
多目标	110.83	2353.78	6.48	534.55
变化幅度	10.82%	11.48%	26.03%	-2.23%

3 结 论

本文结合近地空间火箭的高维多目标设计优化,对超径向可视化及其相关技术开展了研究.通过在 HRV 处理过程中引入权重因子和基于偏好

区间的颜色标记,分别获得了关于质量 M 最优和相对全局最优的火箭设计方案,从而验证了 HRV 技术处理高维多目标设计优化问题的可行性和高效性,表明 HRV 技术可适用于火箭高维多目标优化问题.

参考文献:

- [1] Agrawal G, Lewis K, Bloebaum C. Intuitive design selection using visual n -dimensional Pareto frontier[R]. AIAA-2005-1813, 2005.
- [2] Chiu P W, Bloebaum C L. Hyper-radial visualization method with range-based preferences for multiobjective decision making[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2010, 40(1-6): 97-115.
- [3] John R, Amend Jr. A critical review of software tools for multidimensional visualization and related applications [R]. AIAA-2008-6088, 2008.
- [4] Simpson T W, Spencer D B, Yukish M A, et al. Visual steering commands and test problems to support research in trade space exploration[R]. AIAA-2008-6085, 2008.
- [5] Messac C, CHEN Xuan. Visualizing the optimization process in real-time using physical programming [R]. AIAA 98-4708, 1998.
- [6] Abdul-Jali T M K, Winer E H, Bloebaum C L. Development of a virtual visualization environment for largescale design[R]. AIAA 98-2067, 1998.
- [7] 欧海英, 李晓宇, 刘云翔, 等. 平行坐标法的发动机设计优化数据相关性分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(2): 388-392.
- OU Haiying, LI Xiaoyu, LIU Yunxiang, et al. Motor multi-variables optimization data relativity analysis based on parallel coordinates[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(2): 388-392. (in Chinese)
- [8] Inselberg A. Parallel coordinates for visualizing multidimensional geometry: new techniques and technologies for statistics II [M]. Amsterdam: IOS Press, 1997.
- [9] Inselberg A, Dimsdale B. Parallel coordinates: a tool for visualizing multidimensional geometry[R]. San Francisco, USA: Proceedings of the First 1990 IEEE Conference on Visualization, 1990.
- [10] Parashar S, Agrawal G, Bloebaum C L. Estimation of multi-objective Pareto frontier using hyperspace diagonal counting[R]. AIAA-2006-6959, 2006.
- [11] Agrawal G, Bloebaum C L, Lewis K E. Intuitive visualization of hyperspace Pareto frontier [R]. AIAA-2006-726, 2006.
- [12] Chiu P W, Bloebaum C L. Hyper-radial visualization (HRV) for decision-making in multiobjective optimization [R]. AIAA-2008-907, 2008.
- [13] Chiu P W, Naim A M, Lewis K E, et al. The hyperradial visualization method for multi-attribute decision-making under uncertainty[J]. International Journal of Product Development, 2009, 9(1/2/3): 4-31.
- [14] Laird D Approaches to training and development[M]. New York: Perseus Books, 1985.
- [15] Naim A M, Chiu P W, Bloebaum C L, et al. Hyperradial visualization for multi-objective decision-making support under uncertainty using preference ranges: the PRUF method[R]. AIAA-2008-6087, 2008.