

文章编号:1000-8055(2013)08-1858-07

基于混合优化算法的无叶片粒子分离器 优化设计

于广元, 雷雨冰

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 将混合优化算法引入粒子分离器优化设计, 减小粒子分离器流动损失并简化结构. 利用四次样条曲线参数化描述粒子分离器模型, 建立粒子分离器自动化仿真流程. 采用优化拉丁方实验设计方法获取样本点并建立椭圆径向基函数神经网络代理模型, 基于该模型使用非支配排序遗传算法进行全局多目标优化, 最后采用序列二次规划算法进行局部优化, 得到了粗砂分离效率达到 100%、细砂分离效率达到 86.7%, 总压损失小于 0.6%、出口总压畸变较小的设计方案.

关 键 词: 粒子分离器; 气固两相流; 多目标优化; 代理模型; 混合优化算法

中图分类号: V228.7⁺1

文献标志码: A

Optimization design of vaneless inlet particle separator based on hybrid algorithm

YU Guang-yuan, LEI Yu-bing

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To reduce flow loss and simplify the structure of the inlet particle separator (IPS), hybrid optimization algorithm was introduced into the IPS optimization design. Firstly, four order spline curve was adopted as parameterized description of the IPS model and an automated simulation process was established. Optimal Latin hypercube design (OLHD) method was used to obtain the sample points, and an elliptical radial basis function (EBF) surrogate model was established to substitute the simulation code. Then non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) was used for multi-objective optimization based on surrogate model, and finally non-linear programming by quadratic Lagrangian (NLPQL) algorithm was applied to local optimization. As a result, a new configuration was obtained, with the scavenge efficiency of C-spec distribution improved to 100% and 86.7% for AC coarse distribution fine sand and total pressure reduced to less than 0.6% with smaller main outlet pressure distortion.

Key words: particle separator; gas-solid two phase flow field;
multi-objective optimization; surrogate model; hybrid algorithm

T700 发动机进气道为典型的带预旋叶片
的整体式粒子分离器, 预旋叶片可以有效提高分离
效率, 但是增加了流动损失, 实验表明: 预旋角每

增大 1°, 流动损失增加约 100 Pa. 相比而言, 无叶
片粒子分离器具有结构简单, 质量轻, 流动损失小
的优点.

收稿日期: 2012-09-05

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130802.1224.201308.1858_025.html

作者简介: 于广元(1989-), 男, 江苏盐城人, 硕士生, 主要从事内流气体动力学优化设计.

目前,粒子分离器的设计主要依靠在数值仿真基础上进行设计变量影响分析,最后综合各影响因素,选择较优的设计方案.这种设计方法很难做到对设计空间信息全面捕捉,效率较低,而将优化算法引入粒子分离器设计,可以提高设计效率.目前国内外对于粒子分离器构型优化所作的工作较少,AL-Faris E F 等开发了一种粒子分离器优化设计软件,但是采用了无黏流近似处理,没有考虑粒子撞击壁面的反弹,不符合粒子分离器真实工作状态^[1]. Smithd C F 等主要研究了机械加工误差对粒子分离效率性能的影响,采用基于代理模型的遗传算法针对 $2\sim 5\mu\text{m}$ 粒径粒子进行了粒子分离器构型优化^[2],但是没有针对基于代理型使用遗传算法优化结果的误差进行处理,该误差大小会影响优化方案的性能与实际性能的偏差程度.

粒子分离器设计变量多,优化空间复杂,选择一种可靠性高的优化策略是至关重要的.混合优化算法可以实现不同算法的优势互补,将传统优化算法的局部寻优能力与现代智能算法的全局搜索优势集合起来并具有全局收敛性^[3].目前混合优化算法在其他领域有所应用,文献^[4]利用遗传逐步二次规划(GA+SQP)混合优化算法进行直升机操纵稳定性优化设计,证明了混合优化算法相对经典数值算法以及智能算法的可靠性.文献^[5]使用遗传算法与最速下降法相混合的两步优化算法进行二维翼形的优化设计,文献^[6]将线性规划算法与模式搜索算法相结合的混合优化算法用于航空发动机总体性能优化,都验证了混合优化算法的有效性.

本文采用 T700 粒子分离器进出口尺寸,去除预旋叶片、反旋叶片和清除叶片,以粒子分离效率、总压损失与出口总压畸变为优化目标,使用遗传算法与序列二次规划算法依次使用的混合优化算法,优化设计无叶片粒子分离器流道形状,获得了粒子分离器最佳设计方案.

1 粒子分离器构型二维参数化描述

典型的整体式粒子分离器的构型为一个包含空气入口、清除流出口以及主气流出口的回转型通道(图1).本文粒子分离器进出口采用 T700 对应尺寸,优化过程中保持不变,内外壁构型通过4段四次样条曲线确定,其中1点、3点、4点、6点的斜率为设计变量,2点、5点为极值点,两点轴向、径向位置及曲率半径作为设计变量,两点之间

径向距离给定约束范围.10-12-11,10-8,11-9是光滑连接的三段圆弧,圆弧半径为设计变量,其中10-12-11以7点为圆心,10点径向位置不低于8点.整个粒子分离器构型由15个设计变量决定,该构型方法不仅保证流道型线的平滑过渡,还以较少的设计变量表达出粒子分离器构型.

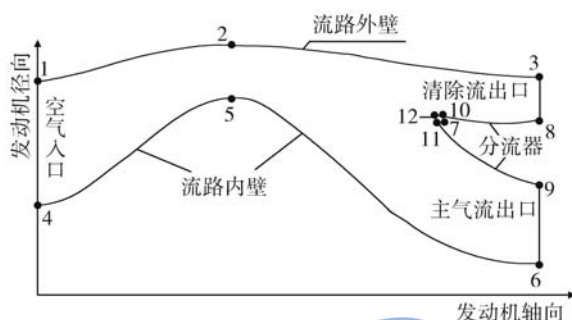


图1 粒子分离器参数化模型

Fig. 1 Parameterized description of particle separator

2 粒子分离器数值仿真

2.1 粒子分布规律的模拟

粒子分离器的分离效率一般用其对粗砂(C型砂)与细砂(ACC)两种标准砂尘的分离效果来衡量.文献^[7]给出了这两种标准砂尘不同粒径粒子的质量占比规律,本文用三次插值样条表示粒径与质量占比之间的关系.在进行粒子轨迹数值分析时,每一个计算节点包含不同粒径的粒子,其质量流量由插值函数得到,同时保证粒子入射速度与粒子分离器进口当地气流速度相同,通过这种方法遍历进口截面上所有计算节点,得到粒子轨迹计算的初始条件.

2.2 气固两相流数值仿真方法

本文采用 Fluent 软件进行气固两相流数值仿真.由于粒子分离器中存在流线弯曲程度较大的流动,湍流模型采用了 RNG(re-normalisation group) $k-\epsilon$ 模型^[8],近壁面采用标准壁面函数进行处理,同时保证 y^+ 值在 30 左右.入口设总压边界条件,主气流及清除流出口使用静压边界,清除流设定目标流量,该流量与主通道流量比值(清除比 SCR)保持在 16% 左右,调节出口压力保证主气流出口平均马赫数恒定为 0.5,壁面边界采用绝热壁面与无滑移边界条件.粒子运动轨迹采用基于拉格朗日坐标系下的颗粒轨道法求解,壁面反射规律采用公式(1)~公式(3)^[9]

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = 1 + 0.409\beta_1 - 2.52\beta_1^2 + 2.19\beta_1^3 - 0.531\beta_1^4 \quad (1)$$

$$\frac{V_{n2}}{V_{n1}} = 0.993 - 1.76\beta_1 + 1.56\beta_1^2 - 0.49\beta_1^3 \quad (2)$$

$$\frac{V_{t2}}{V_{t1}} = 0.988 - 1.66\beta_1 + 2.11\beta_1^2 - 0.67\beta_1^3 \quad (3)$$

其中 β_1 为入射角; β_2 为出射角; V_{n1} , V_{n2} 法向入射与出射速度; V_{t1} , V_{t2} 为切向入射与出射速度。

2.3 数值仿真方法准确性校验

为了校验本文数值计算方法的准确性,对文献[10]给出的 RTM322 发动机粒子分离器模型进行了流场计算,得到内外壁面沿程压力分布,与文献[10]给出的实验值进行对比(图2),结果显示采用本文数值计算方法计算结果与实验值吻合较好,可见本文流场数值计算方法的准确性较高。同时为了验证本文粒子轨迹计算准确性,进一步计算了文献[7] 10-Tilt 粒子分离器构型的粒子分离效率,计算结果与文献[7]给出的统计结果进行对比见表1,结果显示粗砂的分离效率一致,细

砂分离效率误差为 0.07%,粒子分离效率误差极小,所以,本文粒子轨迹计算方法准确性高,为优化设计提供了保证。

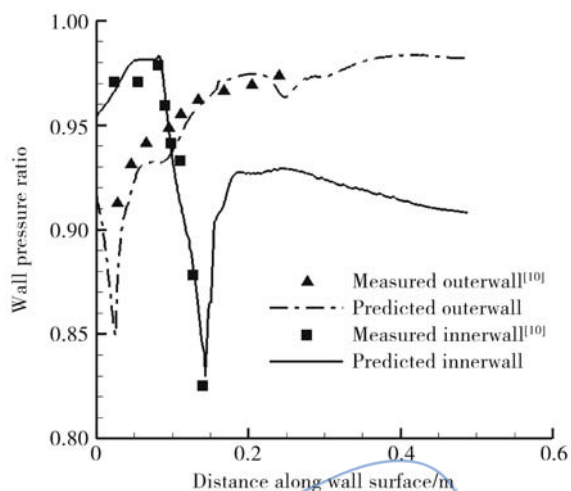


图2 流场计算结果与实验结果对比

Fig. 2 Comparison of predicted and measured results of the flow field

表1 粒子分离效率计算结果与文献[7]结果对比

Table 1 Particle separation efficiency results contrast with Ref. [7] results

	粒子粒径/ μm														C	ACC
	2	5	10	20	30	40	50	60	80	100	200	500	800			
粒子分离效率/% (文献[7])	15.86	30.07	55.40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	81.91
粒子分离效率/%(本文)	28.00	34.00	48.00	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	81.98

3 粒子分离器优化设计方法

本文以粒子分离效率、主通道总压恢复系数以及出口总压畸变为优化目标,进行粒子分离器多目标优化设计,优化流程示意图及采用的优化策略见图3。

气动优化计算存在着仿真时间长、数值噪声大的特点,优化设计变量的数量跟优化设计规模直接相关,在优化过程中反复调用仿真代码使得计算代价高昂甚至难于实施。优化拉丁方实验设计(OLHD)在随机拉丁方实验的基础上进行改进,既满足正交性,又提高了均匀性,能够为实验设计方法(DOE)后处理提供更精确的数据信息,同时构建的代理模型也更加准确。

对于比较耗时的气动仿真计算,一般不适合使用遗传算法等全局型优化算法直接寻优,代理

模型的引入有效解决了这个矛盾。RBF(radial basis function)模型的适用性比较强,Kriging 对噪声干扰比较敏感,实验设计采样要求较高,响应面模型(RSM)建立快,抗噪声干扰能力强,单对于非线性度较高的多变量问题适应度不高^[11]。椭圆径向基函数神经网络(EBF)模型是RBF模型的拓展,比RBF方法精度要高^[12]。

高维非线性设计空间由于其问题的复杂性,采用传统优化算法很难保证收敛性,尤其是依靠梯度算法往往只能寻找到局部解。采用一种全局搜索能力较强的算法与搜索效率较高的局部算法串联的混合策略,可以使不同算法的优势互补,还充分运用了设计点的信息,保证全局收敛性。本文首先基于EBF代理模型使用基于精英保留策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行全局设计空间的搜索,逼近全局最优解,并检查基于代理模型

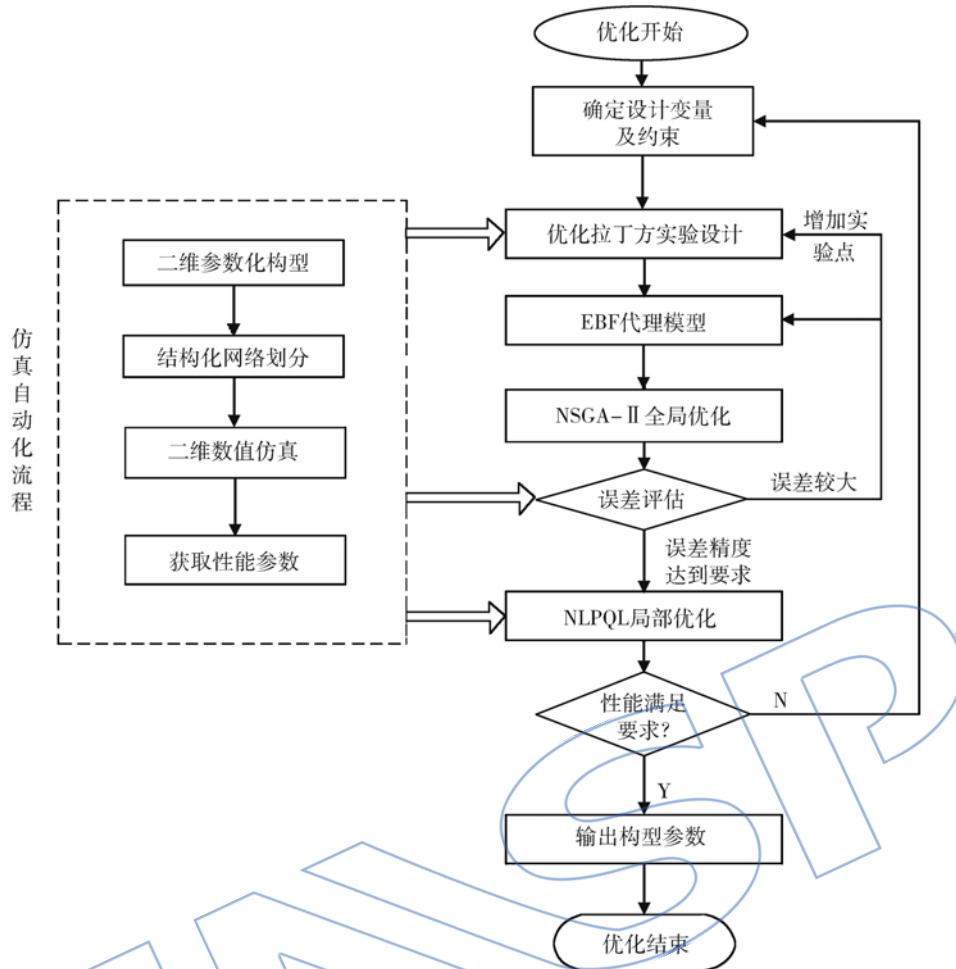


图 3 粒子分离器优化流程

Fig. 3 Particle separator optimization process

解的误差,最后为了逼近全局最优解,同时消除采用代理模型的误差,使用序列二次规划(NLPQL)算法进行局部设计空间的优化。

4 优化结果及其分析

本文以粒子分离器分离效率、主通道总压恢复系数以及主通道出口总压畸变为响应值,进行了150组优化拉丁方实验设计,得到个设计变量对各性能响应的敏度影响大小,表2列出了对粒子分离器性能影响较大的10个设计变量及其对粒子分离器各性能的影响,其中正值表示性能随着变量增大而增大,负值反之。

多目标优化问题的解为一个最优解集,称为Pareto最优解集或者非劣解集。对于本文多目标优化问题,优化结果为如图4的Perato锋面,设计者根据不同的设计要求可以选择不同的解。本文基于EBF模型使用NSGA-II全局优化算法得到的初步结果见表3。

全局优化结果由于代理模型精度问题,不可

避免存在误差,表3列出了基于EBF代理模型全局优化结果,并对该结果得到的设计参数进行重新仿真计算得到实际性能值,初步优化与实际值

表 2 主要设计变量对性能影响统计

Table 2 Statistic of main design variables affect the performance

	分离效率/%	总压恢复系数/%	总压畸变/%
圆弧半径 R_{11-9}	0.27	8.25	-20.51
5点曲率 C_5	-1.01	-8.14	-0.05
5点横坐标 X_5	-6.30	9.58	4.42
2点纵坐标 Y_2	15.83	-6.52	6.20
2点横坐标 X_2	22.81	-6.57	1.94
2点曲率 C_2	-6.08	0.002	-0.60
分离器前缘 Y_7	-22.80	-1.48	-3.03
分离器前缘 X_7	-15.40	13.95	-25.50
点6斜率 S_6	-0.87	0.80	-6.28
喉道高度 Y_{2-5}	-4.47	40.78	-25.50

的误差见表3,各项性能误差均小于3%。

为了有效逼近最优解,并消除代理模型误差对优化结果的影响,采用序列二次优化算法,以全局优化结果为初始点,进行局部优化设计,得到的最终优化结果见表4、表5,其中表4统计了优化后的粒子分离器构型对于单一粒径粒子的分离效率以及粗细砂的总体分离效率,可见本文优化得到的粒子分离器构型能够完全分离的最小粒径能够达到 $10\mu\text{m}$ 。表5为优化构型性能与T700带叶片与不带叶片的原始构型性能对比。表5中T700各项性能值取自于文献[13]与GE公司流量 15lb/s (6.8kg/s)T700粒子分离器模型实验结果^[14],最终优化结果显示在清除比相当的情况下,粗砂粒子分离效率粗砂提高了5%,细砂分离

效率提高了10.3%,总压损失降低了71%。相对于无叶片T700构型,在总压损失与畸变相当的情况下,粗砂粒子分离效率提高了9.4%,细砂分离效率提高了31.2%。

图5为优化前后粒子分离器构型对比图,优化后,粒子分离器内外壁均有所抬高,流道弯度增大,分流器前缘位置后移。粒子分离器综合性能的提高是靠设计参数之间的配合来实现的,结合粒子分离器性能主要影响因素(表1)与优化前后的粒子分离器构型进行分析,结果如下。

对于受气流影响较小的大粒径粒子,在内壁位置确定的情况下,较大的外壁最高点的径向与轴向位置以及靠前的分流器前缘位置可以促进大粒径粒子在撞击内壁面后经过外壁面的反射作用

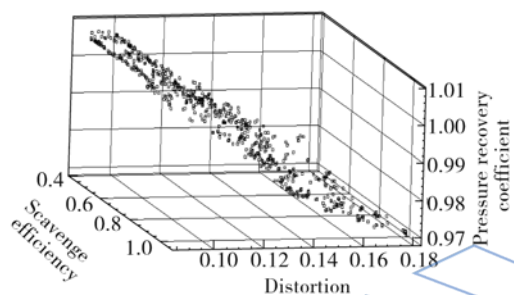


图4 本文优化得到的 Pareto 解

Fig. 4 Perato front of optimization of this paper

表3 粒子分离器全局优化结果统计

Table 3 Results of particle separator global optimization

	代理模型全局 优化结果	实际仿 真结果	相对 误差/%
粗砂分离效率	1.020	0.994	2.615
细砂分离效率	0.835	0.813	2.923
总压畸变	0.135	0.139	2.880
总压恢复系数	0.993	0.989	0.405

表4 粒子分离器优化构型对粗细砂分离效率统计

Table 4 Overall scavenge efficiencies of C-Spec and ACC sand

	粒径/ μm													C	ACC
	2	5	10	20	30	40	50	60	80	100	200	500	800		
C 质量分数/%	0	0	0	0	0	1.15	0.9	2.25	4.45	22	39.75	24.15	5.35		
ACC 质量分数/%	5.75	10.25	11.75	11.1	9	7.9	7.5	10	10	9.75	6	0	0		
分离效率/%	9.5	29.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	86.7

表5 优化后构型与T700性能比较

Table 5 Performance comparison between the optimized configuration and T700

	T700	无叶片 T700	优化构型
清除比/%	16.0	16.1	17.2
进口平均马赫数	0.21	0.20	0.19
粗砂分离效率/%	95.2	91.4	100
细砂分离效率/%	78.6	66.1	86.7
总压恢复系数/%	97.96	99.13	99.41
出口总压畸变		0.135	0.113

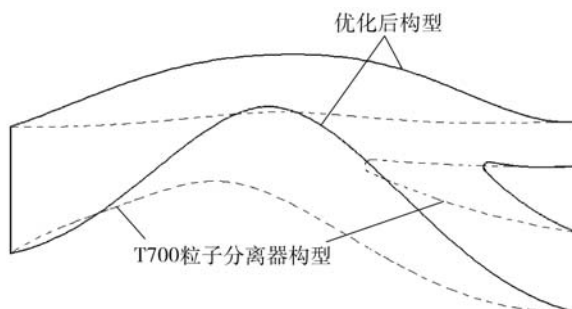


图5 粒子分离器优化构型对比图

Fig. 5 Configuration comparison after optimization

撞击在分离器上表面(图 6),进入分离通道,但是分流器前缘径向、轴向位置减小会导致压力损失变大^[15],优化位置能够保证粒子进入分离通道同时保证压力损失较小,同时该分流器唇口形状可促进撞击到分流器前缘的粒子向分离通道反弹。

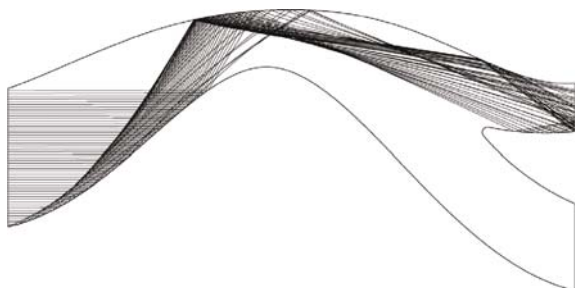


图 6 300 μm 粒子轨迹
Fig. 6 Particle tracks for 300 μm sand

喉道的高度对粒子分离效率影响不显著,但是却是影响压力损失与出口总压畸变的主要因素,喉道过窄会引起气流阻塞,内壁曲率增大,出现逆压梯度,增加流动损失,加大出口压力不均匀度,因此设计时,在不影响分离效率的前提下,尽量增大喉道宽度,减小流动损失,维持出口气流均匀性。

对于 10~20 μm 左右同时受惯性与气流影响的粒子,较大的外壁面最高点径向位置使得流道具有较大的转弯角度,粒子在随流运动同时受惯性力作用,进入分离通道(图 7),这个粒径范围内的粒子在细砂中质量占比达 23%,可以有效保证细砂的分离效率。表 5 的统计结果显示对于 10 μm 粒径的粒子,本文优化后的构型分离效率达到 100%,相比文献[7]结构形状与本文相近的 10° 进口构型,粒子分离效率提高较多。

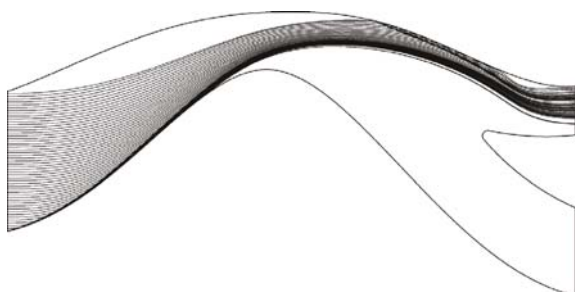


图 7 10 μm 粒子轨迹
Fig. 7 Particle tracks for 10 μm sand

对于更小粒径的粒子,由于随流性较强,粒子几乎不与内外壁面发生碰撞,粒子的分离完全依靠流道的弯曲,这对流道的形状提出了更高的要

求,由于本文限制了进出口位置,流道的形状受到了一定的限制,但是对于原 T700 构型来说,细砂的分离效果已经得到了很大程度提升(图 8)。

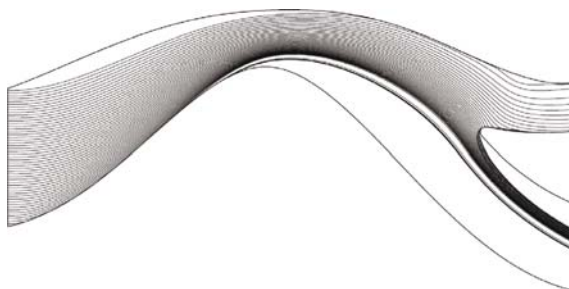


图 8 5 μm 粒子轨迹
Fig. 8 Particle tracks for 5 μm sand

由于粒子分离器为轴对称模型,本文将模型简化为二维进行数值计算,数值仿真时间较短,一定程度上为算法的选择上提供了方便。混合优化算法想要取得较好的优化效果需要具备以下几个条件:

- 1) 优化设计变量个数较少,设计变量个数较多会给代理模型建立带来极大难度,另外在局部优化设计时,采用梯度信息获取与设计变量相关的梯度优化算法时,获取梯度信息也会更加困难。
- 2) 数值仿真时间较短。数值仿真计算时间是影响气动优化设计发展的主要因素,对于计算代价较大的三维数值仿真,想要建立精度较高的代理模型以及梯度信息的获取也极其困难。

以上混合优化算法的局限性,在气动优化设计中显得尤为明显,使用梯度计算与设计变量无关的算法(如伴随算法)用于局部优化设计将大大提高优化效率。

本文根据粒子分离器优化模型特点,考虑优化设计变量个数与仿真时间限制,选取优化拉丁方实验设计方法,实验设计点个数 150,并进行主要设计变量筛选,设计变量个数由 15 个减少到 10 个,为了提高代理模型精度,代理模型更新增加实验设计点数 50,代理模型精度满足要求后,采用序列二次优化算法进行局部优化设计,迭代了 98 步,单次数值仿真收敛时长约为 30 min,每阶段耗时及优化设计总时长统计见表 6。

表 6 混合优化方法耗时统计

Table 6 Time consumption of hybrid optimization

实验设计	代理模型更新	局部优化设计	总时长
150 × 30 min	50 × 30 min	98 × 30 min	6.2 days

如果直接采用非支配排序遗传算法,依据本文代理模型采用的算法设置,种群数为40,最大进化代数数为200,最大计算时间为166天,即使减小种群数与最大进化代数,优化时间也比本文使用的方法要长得多,缩减种群数与优化代数会减小进化到最优解的机会,所以对于仿真代价较高的优化问题,直接运用传统遗传算法优化还是有困难的。

综上所述,相对于传统的遗传优化算法与梯度优化算法,混合优化算法既避免了采用遗传算法进化计算量大的弊端,又克服了采用梯度算法易获得局部最优的缺点,相比传统优化设计方法效率高、综合性能更好。

5 结 论

1) 利用基于代理模型的遗传算法能够找到全局最优解的初步范围,再使用序列二次算法通过局部寻优,不仅消除了由于代理模型引入的误差,而且找到了更优的设计方案,本文的优化结果显示该混合算法是有效的。

2) 在无叶片粒子分离器设计过程中,一些设计变量对粒子分离器各性能的影响是矛盾的,NSGA-II遗传算法尤其适合多目标优化,能够权衡各性能之间矛盾,获得最优解。

3) 本文优化得到的粒子分离器构型,对于粗砂(C型)粒子分离效率达到100%,细砂(ACC)分离效率达到86.7%,尤其对于 $10\mu\text{m}$ 粒径的粒子能够有效分离,总压损失小于0.6%,进气道出口压力分布较均匀,完全符合粒子分离器设计要求。

参考文献:

- [1] Al-Fairs E F, Farooq S. Design and optimization method for inertial particle separator (IPS) systems[R]. AIAA Paper 2008-6066, 2008.
- [2] Smith C F. Six sigma methods applied to an inlet particle separator design[R]. AIAA Paper 2010-9398, 2010.
- [3] 彭智, 谢玲. 混合优化算法的全局收敛性分析[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(4): 435-440.
PENG Zhi, XIE Ling. Global convergence analysis of hybrid optimization algorithms[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(4): 435-440. (in Chinese)
- [4] 彭名华, 张呈林. 直升机操纵稳定性优化设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(3): 283-288.
PENG Minghua, ZHANG Chenglin. Optimization design of helicopter stability and control[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(3): 283-288. (in Chinese)
- [5] 段焰辉, 蔡晋生, 刘秋洪. 基于代理模型方法的翼形优化设计[J]. 航空学报, 2011, 32(4): 617-627.
DUAN Yanhui, CAI Jinsheng, LIU QiuHong. Surrogate model based optimization for airfoil design[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(4): 617-627. (in Chinese)
- [6] 朱玉斌, 樊思齐, 李华聪, 等. 航空发动机性能寻优控制混合优化算法[J]. 航空动力学报, 2006, 21(2): 421-426.
ZHU Yubin, FAN Siqi, LI Huacong, et al. Research of hybrid optimization method for aeroengine performance seeking control[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(2): 421-426. (in Chinese)
- [7] Taslim M E, Khanicheh A, Spring S. Numerical study of sand separation applicable to engine inlet particle separator systems[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2009, 54 (04 2001): 1-10.
- [8] 叶静, 胡柏安, 熊焰. 涡轴发动机无叶片粒子分离器流道设计[J]. 现代机械, 2007, 2(2): 39-42.
YE Jing, HU Boan, XIONG Yan. Flow path design of vanless particle separator for turbo shaft engine[J]. Modern Machinery, 2007, 2(2): 39-42. (in Chinese)
- [9] Taslim M E, Spring S. A numerical study of sand particle distribution, density, and shape effects on the scavenge efficiency of engine inlet particle separator systems[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2010, 55(02006): 1-9.
- [10] Mann D L, Tan S C. Application of a water droplet trajectory prediction code to the design of inlet particle separator anti-icing systems[R]. Belgium: Conference Proceedings on Low Temperature Environment Operations of Turbo Engines (AGARD-CP-480), 1990.
- [11] 谷海涛, 林洋, 胡志强, 等. 基于代理模型的水下滑翔机翼优化设计方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 7-14.
GU Haitao, LIN Yang, HU Zhiqiang, et al. Surrogate models based optimization methods for the design of underwater glider wing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(12): 7-14. (in Chinese)
- [12] 骆剑承, 郑江, 裴韬, 等. 基于 EM, EBF 模型的遥感影像分类方法研究[J]. 中国图像图形学报, 2005, 10(6): 698-705.
LUO Jiancheng, ZHENG Jiang, PEI Tao, et al. An elliptical basis function network for classification of remote-sensing images[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(6): 698-705. (in Chinese)
- [13] 刘大响. 航空发动机设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
- [14] General Electric Company Aircraft Engine Group. Integral engine inlet particle separator: Volume I technology program[R]. ADA013834. 3, 1975.
- [15] 况开鑫, 王锁芳. 分流器对进气粒子分离器性能的影响[J]. 航空动力学报, 2012, 27(7): 1542-1548.
KUANG Kaixin, WANG Suofang. Effect of splitter on performance of inlet particle separator[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(7): 1542-1548. (in Chinese)