

文章编号:1000-8055(2012)06-1201-09

基于多层优化策略的涡轮盘叶设计研究

王荣桥, 贾志刚, 杨俊杰, 胡殿印, 樊江, 申秀丽

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对涡轮多学科优化设计, 将多层优化策略中的重要原则学科自治扩展到组件自治; 并结合目前的多学科优化策略 BLISS(bi-level integrated system synthesis)2000 和 CO(collaborative optimization)以及 ATC(analytical target cascading), 设计出新的多学科优化框架。利用 BLISS2000 建立了涡轮盘叶的两层双子系统优化框架和两层三子系统的优化框架; 结合 BLISS2000 和 CO 各自的优点构建了三层三子系统优化框架; 从定性的分析角度排除了 ATC 在涡轮多学科多层优化设计上的应用。通过对比分析, 三子系统的多层优化策略的优势主要体现在优化效率方面; 层与层之间存在复杂的交互迭代过程导致三层系统往往比双层系统表现出差的精度和效率。

关 键 词: 多学科优化设计; 多层优化策略; 涡轮盘叶; 学科自治; 组件自治

中图分类号: V232.4

文献标志码: A

Study on disk and blade design based on multi-layer optimization strategy

WANG Rong-qiao, JIA Zhi-gang, YANG Jun-jie, HU Dian-yin,
FAN Jiang, SHEN Xiu-li

(School of Jet Propulsion,

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

Abstract: For the turbine multi-discipline optimization (MDO) design, the important principle of MDO firstly extended to component autonomy from disciplinary autonomy. Based on these principles, four kinds of MDO frameworks, which were applied on the turbine design, combining present MDO strategies including BLISS (bi-level integrated system synthesis) 2000, CO (collaborative optimization) and ATC (analytical target cascading) were designed. Both the two-layer including double-subsystem strategy and the two-layer including triple-subsystem strategy were built by BLISS2000 strategy as the two-layer framework for turbine design, while the three-layer including triple-subsystem strategy gave the full play to the merits of BLISS2000 and CO strategies. The ATC optimization strategy required huge extra optimization cost, so it is not qualitatively suitable for triple-layer MDO strategy on turbine. After testing, the preponderance of the multi-layer optimization strategies including three subsystems is higher efficiency, while complex interactions between layers always lead to worse optimization accuracy and efficiency on three layers strategy compared with two layers strategy.

Key words: multi-discipline optimization (MDO) design; multi-layer design strategy; turbine disk and blade; disciplinary autonomy; component autonomy

收稿日期:2011-08-04

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120704.1152.201206.1201_001.html

作者简介:王荣桥(1968—),男,山东莱阳人,教授、博士生导师,博士,研究方向为航空发动机结构强度可靠性及多学科优化设计等。

涡轮盘叶结构包括涡轮叶片、榫接结构和涡轮盘,是航空发动机的热端关键件;涉及气动、传热和结构等学科的耦合,是典型的跨学科、多部件的复杂结构设计问题^[1]。在传统设计中一般需要经过多次往复迭代才能实现盘叶结构的整体协调设计,而采用多学科优化设计方法可以在最初阶段就同时考虑各学科、各部件之间的协调关系,减少设计迭代的次数,缩短设计周期。同时,对涡轮盘和涡轮叶片进行一体化设计更加接近两者的实际工作状态,并且对关键部位进行可靠性分析所要考虑的随机因素也不同于盘和叶片的单独设计,计算结果会更加准确。但是,涡轮盘叶的一体化计算不但包含了榫接结构的接触分析,而且涉及盘叶本身的热弹塑性计算,是一个非常复杂的非线性问题,必须根据涡轮叶片和涡轮盘的相关计算和分析,结合盘叶整体模型的特点采用合适的可靠性分析方法和多学科优化策略,通过对问题恰当的分解与协调完成涡轮盘叶的基于结构可靠性的多学科优化设计。

以并行子空间优化 CSSO^[2](concurrent subspace optimization)、协同优化过程或协作优化 CO(collaborative optimization)^[3]过程、二级系统集成合成 BLISS(bi-level integrated system synthesis)^[4]和解析目标传递 ATC(analytical target cascading)^[5]等为代表的多学科优化过程的提出,代表着 MDO(multi-discipline design)已经从原来的 AAO(all-at-once)^[6]、单学科可行 IDF(individual discipline feasible)^[6]、多学科可行 MDF(multidisciplinary feasible)^[7]等单层优化方法转向多层分解方法。多层 MDO 过程的意义不仅仅在于对问题复杂度的降低,更重要的是,它们表现出对迅速发展的以分布式、网络化为特征的并行协同设计环境所特有的相容性、学科自治、并行与可分布计算等典型优势。自从这些方法出现以来,已经被广泛应用在航空航天、汽车、船舶以及核工程等重大工程系统方面的研究^[8-9],获得了巨大的成功。

从学科耦合的角度上,可以把涡轮盘叶的多学科优化分解为两层结构。其中顶层为系统层,负责整体目标和约束的优化;子系统层为气动学科与结构学科,分别负责学科相关的目标与约束的优化,如图 1 所示。

虽然按照学科耦合的分解原则实现了气动与结构的“学科自治”,但是需要注意的是,在实际的工程设计中,涡轮盘和涡轮叶片通常由不同的设

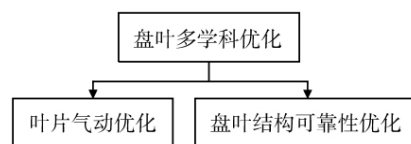


图 1 涡轮盘叶的两层双子系统多学科优化结构

Fig. 1 Two-layer including double-subsystem MDO structure on turbine

计小组负责。多学科优化的“自治”原则,不仅仅是狭义的、学科意义上的自治,还包括组件(子系统)的自治,即应该尽力保证优化的组织方式与现代产品设计的组织形式相似,保证专业小组对子系统优化能够实现完全的自主控制,并且不需要过多关注不属于自己工作范围的事情。因此,在对涡轮盘叶整体模型的多学科优化进行系统分解时,考虑涡轮叶片和涡轮盘的结构耦合特性,使两个组件能够实现并行的自主优化是非常必要的。

本文的研究就是从涡轮盘叶结构的参数化模型入手,按照学科自治和组件自治的原则,将多学科优化中多层优化策略的、方法应用到涡轮盘叶一体化设计中。并且本文比较了 4 种多层策略的优化性能和结果,给出了最佳的涡轮盘叶一体化设计的多学科多层优化策略。

1 涡轮盘叶一体化设计

1.1 涡轮盘叶结构参数

涡轮盘叶结构包括涡轮盘和涡轮叶片,两者通过榫接结构联接在一起,形成结构上的耦合关系。涡轮盘叶一体化结构如图 2 所示。为了方便阐述多层优化策略的研究目的,以及考虑到涡轮结

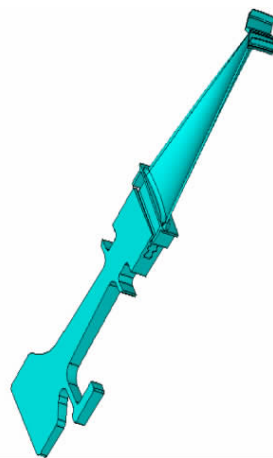


图 2 涡轮盘叶一体化结构

Fig. 2 Integrative structure of disk and blade of turbine

构中的重要参数. 结合先前的研究经验, 本论文选择部分结构参数作为设计参数. 主要包括叶冠顶部封严齿的相对位置 (a_1 和 b_1) 作为叶冠的优化参数, 如图 3; 榫接结构选择伸根圆角半径 (R_m)、齿形角 (β_m) 和榫槽底部连接底面直线段的圆角半径 (R_r) 作为榫接优化参数, 如图 4; 涡轮盘选择 D_h, D_w 作为轮盘优化参数, 如图 5; 叶片采用叶根、叶中和叶尖三个叶栅截面的轴向长度 (D_{z1}, D_{z2} 和 D_{z3}) 和安装角 (γ_1, γ_2 和 γ_3) 作为叶片优化参数, 如图 6. 各个参数的初始值和取值区间如表 1 所示.

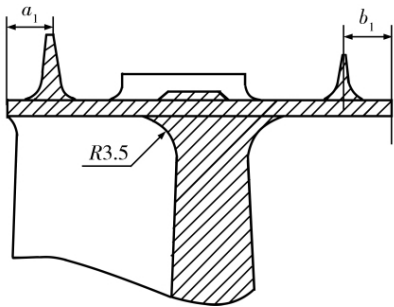


图 3 锯齿叶冠参数化模型
Fig. 3 Parametric model of serrated shroud

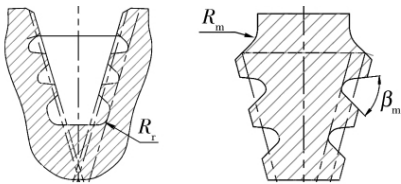


图 4 榫接结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of mortise

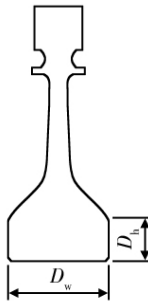


图 5 涡轮盘子午面示意图
Fig. 5 Schematic diagram of turbine disk meridian plane

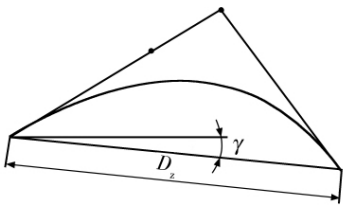


图 6 一个叶栅的参数
Fig. 6 Parameters of a section

表 1 涡轮盘叶优化参数
Table 1 Optimization parameters of turbine

	几何参数	初始值	下限值	上限值
叶冠 X_1	a_1/mm	3.5	2.5	4.5
	b_1/mm	2.8	2.1	3.5
叶身 X_2	D_{z1}	44.5	40	50
	D_{z2}	32.5	30	40
	D_{z3}	21.89	20	30
	$\gamma_1/(\text{^\circ})$	-5.58	-6.58	-4.58
	$\gamma_2/(\text{^\circ})$	-22.0	-23.0	-21.0
	$\gamma_3/(\text{^\circ})$	-54.6	-55.6	-53.6
榫接 X_3	R_m/mm	2.1	1.5	3
	R_r/mm	2	1.5	2.5
	$\beta_m/(\text{^\circ})$	53.5	52.5	54.5
盘身 X_4	D_h/mm	30	25	40
	D_w/mm	52	40	65

1.2 优化模型

为了简化计算, 强度方面考虑静强度约束. 对于涡轮叶片 (包括叶身、叶冠和叶根), 保证在所有正常工作条件下的等效应力不超过 $75\% \sigma_{0.1}$, 其中叶冠与叶身连接处的最大应力 σ_{schanfer} 不超过 $60\% \sigma_{0.1}$; 对涡轮盘盘心和腹板区最大等效应力 σ_{dcentre} 和 σ_{web} 均要求不超过材料在该温度下 $\sigma_{0.2}$; 在榫接结构处, 榫槽最大等效应力 σ_{mortise} 不大于 $75\% \sigma_{0.2}$; 榫头最大等效应力 σ_{rabber} 不大于 $75\% \sigma_{0.1}$, 榫槽伸根处最大等效应力 σ_{mroot} 不超过 $75\% \sigma_{0.1}$. 气动分析中的流量 (m_f) 限制在 $[78.5, 80.5]$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) 范围内. 由于所采用材料的限制温度远超过盘叶的最高可能温度, 此处不再进行温度约束. 另外还要求叶尖的径向伸长量 d_{xtip} 不超过 0.01 m . 同时, 考虑叶身、伸根、榫接以及盘身的可靠性约束, 要求这些部位最大等效应力在其应力边界的可靠度不得低于 95% ($\beta=1.645$), 具体如表 2 所示.

表 2 盘叶可靠性优化约束

Table 2 Reliability optimization constraints of turbine

模型考察点	初始模型结果	可靠度/%	边界
$d_{\text{xtip}} / \text{m}$	0.0055		0.01
$\sigma_{\text{shroud}} / \text{MPa}$	554.05		645.5
$\sigma_{\text{schanfer}} / \text{MPa}$	265.88		516.4
$\sigma_{\text{blade}} / \text{MPa}$	419.96	95	697.0
$\sigma_{\text{mroot}} / \text{MPa}$	522.58	95	697.0
$\sigma_{\text{rabbet}} / \text{MPa}$	649.99	95	697.0
$\sigma_{\text{mortise}} / \text{MPa}$	937.43	95	941.0
$\sigma_{\text{web}} / \text{MPa}$	894.02	95	1003.3
$\sigma_{\text{dcentre}} / \text{MPa}$	960.23	95	1043.6

本研究简化可靠性计算方法,通过基于均值的单循环单向量^[10](mean value based single loop single vector, MV-SLSV)方法把可靠性约束转化为确定性约束,从而把基于可靠性的多学科优化转化为一般的确定性的多学科优化问题。

目标函数取叶片的等熵效率和盘叶总重的加权和,如下式:

$$\begin{cases} F(X) = W_1/\eta(X) + W_2 \cdot m(X)/m_0(X) \\ m(X) = m_1(X) + m_2(X) \\ m_0(X) = m_{10}(X) + m_{20}(X) \end{cases}$$

式中 $\eta(X)$ 为转子叶片的气动等熵效率函数; $m(X)$ 为盘叶质量函数, $m_0(X)$ 为盘叶的初始模型的质量,下标 1 表示叶片,2 表示轮盘; W_1 和 W_2 为加权因子,分别取 0.7 和 0.3^[11];设计变量 $X = \{X_1, X_2, X_3, X_4\}$, 其中

$$\begin{aligned} X_1 &= \{a_1, b_1\} \\ X_2 &= \{D_{Z1}, D_{Z2}, D_{Z3}, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\} \\ X_3 &= \{R_m, R_r, \beta_m\} \\ X_4 &= \{D_h, D_w\} \end{aligned}$$

则涡轮盘叶结构的多学科优化模型可以写为

$$\begin{cases} \text{find: } X \\ \min F(X) = W_1/\eta(X) + W_2 \cdot m(X)/m_0 \\ \text{s. t. } \begin{cases} g_1 = d_{\text{xtip}} - 0.01 \leq 0 \\ g_2 = \sigma_{\text{shroud}} - 645.5 \leq 0 \\ g_3 = \sigma_{\text{schanfer}} - 516.4 \leq 0 \\ P\{g_i \leq 0\} \geq 95\% (i = 4, \dots, 8) \\ g_4 = \sigma_{\text{blade}} - 697.0 \leq 0 \\ g_5 = \sigma_{\text{mroot}} - 697.0 \leq 0 \\ g_6 = \sigma_{\text{rabbet}} - 697.0 \leq 0 \\ g_7 = \sigma_{\text{mortise}} - 941.0 \leq 0 \\ g_8 = \sigma_{\text{dcentre}} - 1043.6 \leq 0 \\ g_9 = mf \in [78.5, 80.5] \end{cases} \end{cases}$$

其中 $g_i (i=1, \dots, 9)$ 代表优化模型中的不等式约束。

2 涡轮设计的多层多学科优化策略

2.1 两层双子系统策略

BLISS2000^[4]是一种新型的优化策略,关键的新概念在于子系统优化的目标函数的新形式和出于系统性能考虑而使用优化来控制子系统的输出。在 BLISS2000 中,子系统优化目标是子系统输出的加权和,每个输出对应一个系统加权系数,而加权系数被作为系统层的优化变量。BLISS2000 消除了系统灵敏度分析和最优灵敏度分析,使得子系统最优值可以在系统层通过离线准备的响应面来表示。与其他算法相比, BLISS2000 算法在效率和精度上都占据一定优势。因此,对于如图 1 所示的两层双子系统的涡轮盘叶多学科优化,优先选择 BLISS2000 策略进行分解,其算法结构如图 7 所示。

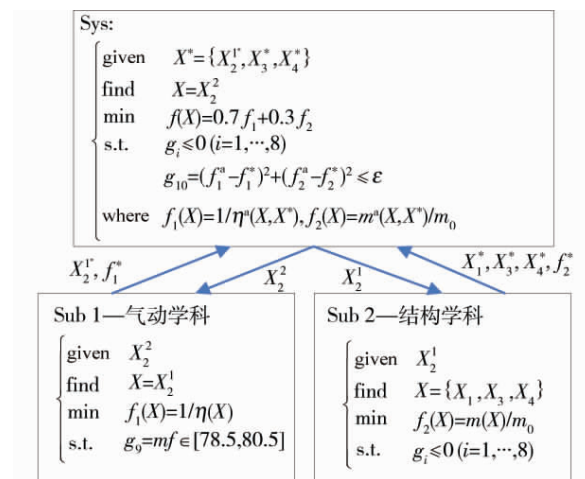


图 7 两层双子系统的 BLISS2000 策略

Fig. 7 Two-layer including double-subsystem using BLISS2000 strategy

图 7 中,上标 a 表示为该函数的近似模型,上标 * 表示为子系统的最优解;其中 X_2^1 表示 X_2 中气动学科的有关变量, X_2^2 为结构学科有关变量。 ϵ 为目标函数相容性准则,一般取 10^{-6} 。

2.2 两层三子系统策略

除了考虑学科自治的原则外,还要依照组件自治的原则,对涡轮盘叶整体结构的多学科优化进行系统分解。考虑涡轮叶片和涡轮盘的结构耦合特性,使两个组件能够实现并行的自主优化。由于榫接结构中的榫头和榫槽在很多设计参数上必须保持一致,并且在实际的设计中也是同步进行

的,所以两者通常作为一个整体进行优化.为了方便,把榫接结构和涡轮盘作为一个单独的子系统,这样可以在结构优化中避免引入耦合变量,减少了优化的复杂度.因此,按照学科耦合与结构耦合相结合的解耦方案,可以把涡轮盘叶模型分解为两层三子系统结构,如图8所示.

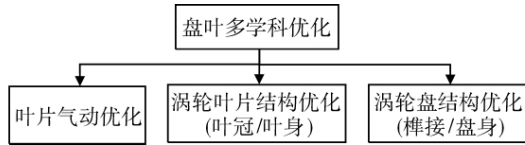


图8 涡轮盘叶的两层三子系统多学科优化结构

Fig. 8 Two-layer including triple-subsystem MDO structure of turbine

在对涡轮盘叶结构进行多学科优化时,为了提高收敛速度,通常采用近似模型代替精确的流场分析和有限元分析,并且一些多学科优化策略的顶层系统也需要构建子系统层最优值的近似模型.为了保证这些模型的精确性,必须保证足够的样本量.以构建全二次响应面模型为例,具有 n 个变量所需的最小样本量为 $m = n(n+1)/2$.

对于图1所示的优化结构,结构学科的设计变量个数为 $n = 10$,构建全二次响应面所需的最小样本量为 55 个.如果按照图8的结构对涡轮盘叶多学科优化进行分解,即把结构优化部分考虑为叶冠/叶身与榫接/轮盘的并行优化,第一部分优化参数为 X_1, X_2 ,同时由叶片的灵敏度分析结果可知,叶片中弧线的轴向长度(D_z)对结构的影响很小,在结构优化中可以不考虑 D_z 的影响,共 $n_1 = 5$ 个参数;第二部分优化参数为 X_3 和 X_4 ,共 $n_2 = 5$ 个参数.每个部分的设计参数都要小于总的设计参数,单独构建响应面所需要的小样本计算总量为 30 个,也远小于图1的双子系统结构所需要的样本计算量.

由于每个部分可以只考虑与参数相关对象的约束,图8的优化结构使优化规模得以进一步降低.按照 BLISS2000 策略对三子系统结构进行分解的策略如图9所示,与图7所示的优化策略相比,每个结构学科的优化规模明显变小.

图9中,上标 a 表示为该函数的近似模型,上标 $*$ 表示为子系统的最优解;其中 X_2^a 表示 X_2 中气动学科的有关变量, X_2^1 为结构学科有关变量. f_{22} 表示在 Sub 2 中的 f_2 , f_{32} 表示在 Sub 3 中的 f_2 .

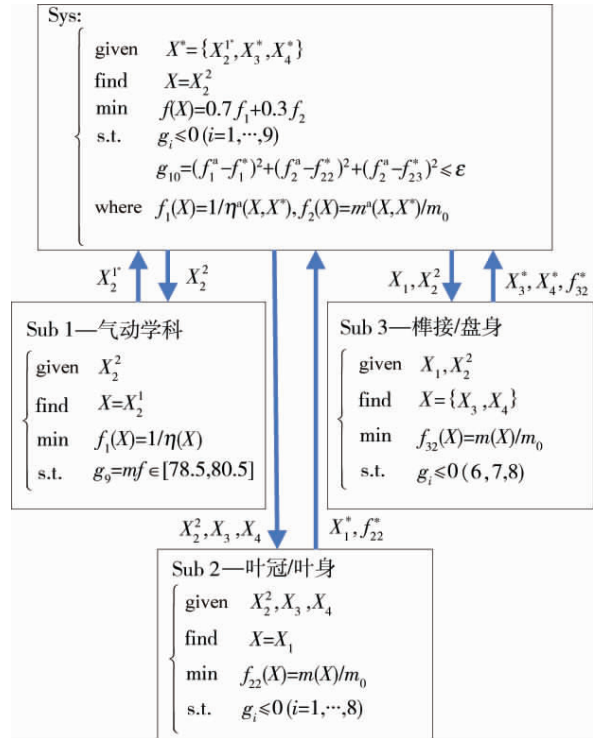


图9 两层三子系统的 BLISS2000 策略

Fig. 9 Two-layer including triple-subsystem using BLISS2000 strategy

2.3 三层三子系统策略

在两层三子系统的结构中,结构学科的两个子系统优化和气动学科优化处于同一个级别.为了更清晰地表达涡轮盘叶多学科优化的层次关系,首先按照学科解耦方案,把盘叶的学科耦合简化为气动与结构的松散耦合,将叶片的气动优化和盘叶的结构优化作为第一个子层;然后按照结构解耦方案,把盘叶的结构优化按照两个子系统进行分解,即把叶冠/叶身与榫接/盘身的结构优化作为系统优化的第二个子层,形成如图10所示的三层结构,这种形式实质上是前面两种方案的有机融合.

处理如图10所示的多层结构的优化策略有

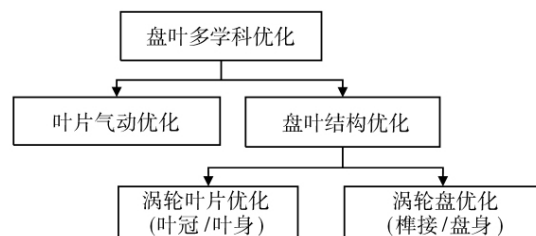


图10 三层三子系统涡轮盘叶多学科优化结构

Fig. 10 Three-layer including triple-subsystem MDO structure of turbine

CO 方法、BLISS2000 和 ATC 方法等,但是一般认为 BLISS2000 和 CO 策略最好用于两层结构,虽然从理论上讲它们也能够应用于多层结构,但是当进行多层拓展时,形式过于复杂。ATC 方法的本来目的就是为了处理具有多层结构的产品设计问题,因此能够用来处理多层结构的多学科优化问题,并且它是唯一收敛性得到理论证明的多学科优化策略^[12]。另一方面,BLISS2000 方法在收敛效率上的优势。从理论上讲,如果在优化中采用或者在某个阶段采用 BLISS2000 方法能够提高该问题优化的收敛速度。基于上述分析,本文针对涡轮盘叶整体模型的三层多学科优化设计提出了 ATC 方法和采用 BLISS2000 和 CO 方法的混合策略。两种方案如图 11、图 12 所示。

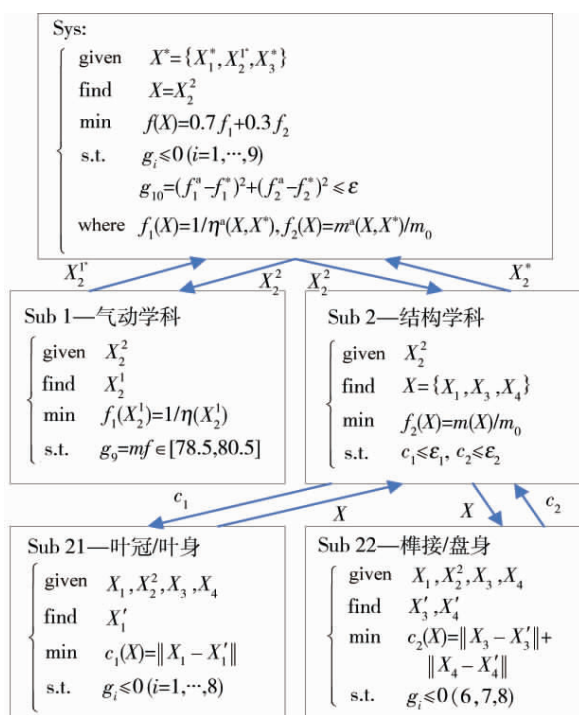


图 11 涡轮盘叶的 BLISS2000 与 CO 的混合算法结构

Fig. 11 Mixture of CO and BLISS2000 strategy of turbine

图 11 中,上标 a 表示为该函数的近似模型,上标 * 表示为子系统的最优解;其中 X_1^a 表示 X_2 中气动学科的有关变量, X_2^a 为结构学科有关变量。 ϵ_1 为 BLISS2000 中的目标相容性约束, ϵ_2 为 CO 中的变量相容性约束。

图 12 中,上标 u 表示上层变量,上标 l 表示为下层变量, ϵ_1 , ϵ_2 和 ϵ_3 表示相容性误差。

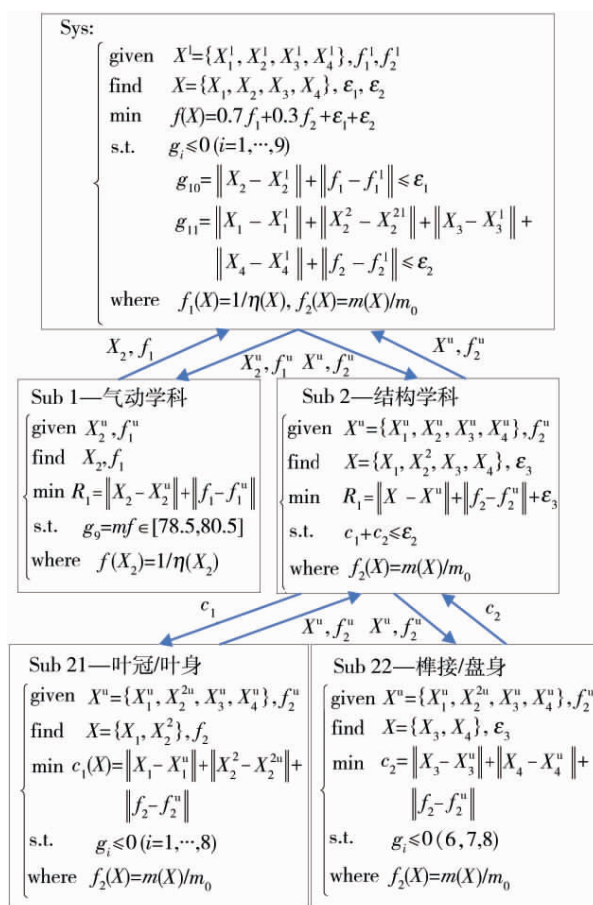


图 12 涡轮盘叶的 ATC 算法结构

Fig. 12 ATC strategy of turbine

比较图 11 和图 12, ATC 算法的分解虽然比较直观,但是由于引入了辅助变量和关联变量,增加了优化参数的个数,在某种程度上使优化规模变大。对于涡轮盘叶这样复杂的多学科优化问题,即使问题规模的少量增加都会带来大量的附加计算,非常不利于提高优化效率和降低计算开销。当使用 BLISS2000 和 CO 的混合算法时,首先采用 BLISS2000 算法来处理气动与结构的学科耦合,可以把气动学科的优化参数从总的设计参数中分离出来,从而使得在进行盘叶结构优化时的参数个数减小。否则,如果采用 CO 方法首先处理学科耦合问题,会使得原本与结构关系不大的一些气动变量在第一层仍然参与优化,并且需要引入辅助变量,使得优化的规模变大。BLISS2000 和 CO 策略的结合,充分利用 BLISS2000 针对函数目标分解和 CO 方法针对共享变量分解的优势,没有引入附加变量,从问题的规模来看明显要优于 ATC 算法。因此,就涡轮盘叶的多学科优化问题而言, BLISS2000 和 CO 的混合策略显然比 ATC 策略更加适用于三层结构。

3 优化结果陈列及其对比

3.1 优化结果和收敛曲线

通过前面分析,比较两层结构的 BLISS2000 算法和三层结构的 CO 与 BLISS2000 的混合算

法,首先利用 MV-SLSV 方法把可靠性约束转化为确定性约束,在优化过程中采用 Kriging 模型作为近似模型,按照以上三种方案对涡轮盘叶进行多学科优化,所得结果如表 3 所示.相应主系统的收敛历史曲线如图 13、图 14 和图 15 所示.

表 3 涡轮盘叶基于可靠性多学科优化结果
Table 3 Results of reliability-based MDO of turbine

几何参数	初始值	BLISS2000(1)	BLISS2000(2)	CO+BLISS2000
a_1 /mm	3.5	3.988	4.0	3.983
b_1 /mm	2.8	3.5	3.5	3.439
D_{Z1}	44.5	40	40	40
D_{Z2}	32.5	37.61	37.83	38.262
D_{Z3}	21.89	20	20	20.0
γ_1 /($^{\circ}$)	-5.58	-5.459	-5.59	-5.552
γ_2 /($^{\circ}$)	-22.0	-22.06	-21.93	-21.81
γ_3 /($^{\circ}$)	-54.6	-54.61	-54.56	-54.13
R_m /mm	2.1	1.5	1.5	1.5
R_r /mm	2.0	2.5	2.5	2.385
β_m /($^{\circ}$)	53.5	52.5	52.5	53.27
D_h /mm	30	25.9	27.18	30.24
D_w /mm	52	52.04	52.68	59.96
m	0.9577	0.94115	0.94733	0.99504
η	0.97555	0.98383	0.98348	0.98393
F	1.00485	0.99385	0.99596	1.00995

注:(1)为图 7 所示的两层双子系统的算法结构所得结果;(2)为图 9 所示的两层三子系统的算法结构所得结果.

3.2 对比研究

从表 3 中可以看出,两层双子系统与两层三子系统的优化结果比较接近,均优于三层结构的优化结果.但是,两层结构中的双子系统和三子系统的优化变量的最终结果并不完全一致,是因为在两层三子系统的结构中,除去存在和双子系统结构中相同的学科耦合变量之外,在子系统 Sub 2(叶冠/叶身)与 Sub 3(榫接/盘身)之间还存在额外的结构耦合变量以及三个耦合约束,由于并不能保证这些耦合变量和耦合约束在优化结束时完全一致,因此在某些耦合变量上存在差别是完全正常的.从优化结果看,两层双子系统和两层三子系统使用 BLISS2000 算法得到的优化结果都是可以接受的.

由于在三层结构中采用了 BLISS2000 和 CO 的混合策略,虽然 BLISS2000 算法直接对优化目

标分解的特性造成其误差较小,但是由于 CO 算法是针对设计变量的分解,需要在上级优化中采用相容性约束,通常都会造成较大的误差.并且,两种误差的同时存在更加剧了优化结果与采用 BLISS2000 算法的两层结构优化结果的差别.表 4 为优化策略的各级系统迭代次数.

表 4 优化策略的各级系统的迭代次数
Table 4 Number of iterations in subsystems of MDO strategy

系统名称	BLISS2000(1)	BLISS2000(2)	CO+BLISS2000
Sys	38	34	33
气动学科	274	315	511
结构学科	902	203/656	1513
Sub 21/Sub 22			16687/68414

从图 13、图 14 和图 15 以及表 4 所展示的每种优化策略各级系统的迭代次数来看,虽然三者系统层的迭代次数相近,但是在 BLISS2000 和 CO 的混合策略中,第三层 Sub 21 和 Sub 22 的循环次数(16687/68414)才是决定收敛速度的主要因素,因此,三种优化策略中,混合优化策略是最慢的。

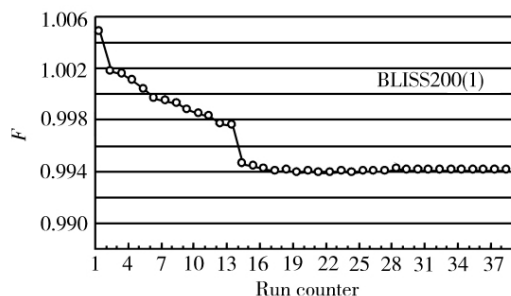


图 13 两层二子系统 BLISS2000 算法收敛历史曲线

Fig. 13 Convergence history curve of two layers including double subsystems using BLISS2000 strategy

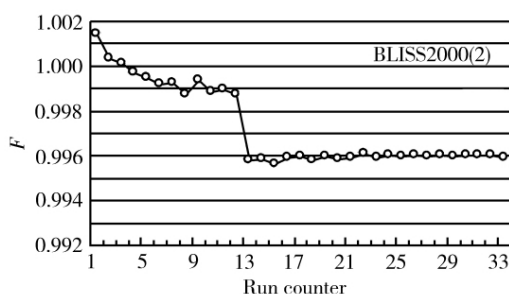


图 14 两层三子系统 BLISS2000 算法收敛历史曲线

Fig. 14 Convergence history curve of two layers including triple subsystems using BLISS2000 strategy

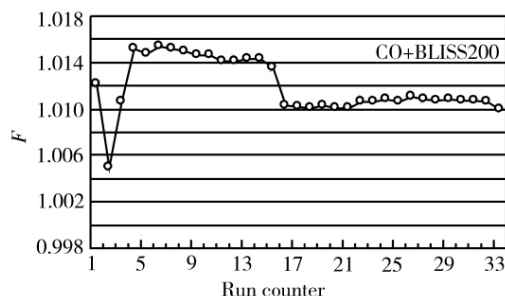


图 15 三层 CO 与 BLISS2000 混合算法收敛历史曲线

Fig. 15 Convergence history curve of three layers using mixture of CO and BLISS2000 strategy

两种两层结构优化策略的收敛速度比较接近,都明显快于三层结构.在 BLISS2000(2)中的两个结构子系统的优化迭代次数总和是 859(203+656)和 BLISS(1)中结构子系统的 902 次优化迭代次数比较接近.它们的气动子系统的优化迭代次数分别是 274 和 315,差别不大。

两层优化策略效率高的主要原因是,在三层结构的优化中,除去 CO 算法本身的原因之外,层与层之间的交互迭代会带来大量的额外运算.对于涡轮盘叶整体模型这样复杂的非线性问题,矛盾会更加突出.为了实现学科和组件的自治,尽可能把所有应该并行运行的子系统放在同一级别,这样有利于选择更加灵活的多学科优化策略,不但能够加快收敛速度,也有利于提高优化的精度。

4 结 论

1) 多层优化策略的学科自治原则可以扩展到组件自治,组件自治满足当前涡轮结构设计组织形式,并且在构建二阶的近似模型时可以大大的缩减样本量,减少了优化成本。

2) 针对涡轮盘叶结构设计,结合目前存在的多学科优化策略,本文提出了 4 种的多学科多层优化策略,主要分为两层策略和三层策略。

3) 从优化结果的对比研究可以发现,由于层与层之间的复杂的交互迭代,双层优化策略的优化效率和优化精度都要明显优于三层优化策略;另外,两层优化策略中两层三子系统优化策略在优化效率和优化精度上也最具优势。

参考文献:

- [1] 杨俊杰,王荣桥,樊江,等. 涡轮叶片的气动-热-结构多学科设计优化研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(3): 617-622.
YANG Junjie, WANG Rongqiao, FAN Jiang, et al. Multi-disciplinary aerodynamic-thermal-structure design optimization for turbine blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(3): 617-622. (in Chinese)
- [2] Sellar R S, Batill S M, Renaud J E. Response surface based, concurrent subspace optimization for multidisciplinary system design[R]. AIAA-96-0714, 1996.
- [3] Braun R D, Gage P J, Kroo I M, et al. Implementation and performance issues in collaborative optimization [R]. NASA-AIAA-96-4017, 1996.
- [4] Sobieszcanski-Sobieski J, Altus T D, Phillips M, et al. Bi-level integrated system synthesis (BLISS) for concurrent and distributed processing [R]. Atlanta, Georgia: 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, AIAA, 2002.
- [5] Kim H M, Michelena N F, Papalambros P Y, et al. Target

- cascading in optimal system design[J]. Transactions of the ASME, 2003, 125(9): 474-480.
- [6] Dennis J E, Lewis R M. Problem formulations and other optimization issues in multidisciplinary optimization[R]. Colorado Springs: AIAA Symposium on Fluid Dynamics, AIAA, 1994.
- [7] Cramer E J, Dennis J E, Jr, Frank P D, et al. Problem formulation for multi-disciplinary optimization [J]. SIAM Journal of Optimization, 1994, 13(4): 754-776.
- [8] Jun S, Jeon Y H, Rho J. Application of collaborative optimization using response surface methodology to an aircraft wing design[R]. AIAA 2004-4442, 2004.
- [9] De Baets P W G, Mavris D N. Aeroelastic design by combining conventional practice with bi-level integrated system synthesis(BLISS) [R]. Albany, New York: 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, AIAA, 2004.
- [10] Chen X, Hasselman T K, Neill D. Reliability based structural design optimization for practical applications[R]. Kissimmee, FL, USA: The AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 37th Conferences in Structures, Structural Dynamics and Materials, AIAA, 1997.
- [11] 田文正, 王荣桥. 基于 MDO 体系的涡轮叶片热-结构耦合分析[J]. 航空发动机, 2008, 34(2): 5-9.
TIAN Wenzheng, WANG Rongqiao. Coupled thermal-structural analysis of turbine blade based on MDO system [J]. Aeroengine, 2008, 34(2): 5-9. (in Chinese)
- [12] Michelena N, Park H, Papalambros P. Convergence properties of analytical target cascading[R]. Atlanta, Georgia: 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, AIAA, 2002.