分析驱动设计方法研究与应用

宋玉旺 席 平

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

摘 要：对产品设计过程中的大量迭代现象，从设计方法上进行了深入分析与高度总结，提出了分析驱动设计(ALD)方法，定义了设计信息(DI)、设计活动(DA)、设计模型(DM)、设计文件(DF)和分析驱动设计流程(ALDF)等基本概念.分析驱动设计方法的核心内容是分析驱动设计流程.详细阐述了分析驱动设计流程中的设计信息和设计活动；重点讲解了分析驱动设计流程的设计活动规划方法，并给出了串行化和并行化的设计活动规划的时间计算公式.基于自动化的分析驱动设计流程对产品设计方案进行验证和优化，提高了产品设计效率和设计质量，解决了分析驱动设计方法中的部分关键技术，并以航发涡轮叶片为例验证了分析驱动设计方法.

关 键 词：产品设计；分析；优化；涡轮

中图分类号：TP 391.72

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)08-0980-06

Research and application of analysis leads design method

Song Yuwang Xi Ping

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The analysis leads design(ALD) method was advanced to summarize the key concepts and analyze the essential ideas from the iterative phenomena during the product design process. The concepts of design information(DI), design activity(DA), design model(DM), design file(DF) and analysis leads design flow(ALDF) in the ALD method were defined. As self-driven design flow, ALDF was the core concept of the ALD method. The process of establishing the ALDF was the ALD method. The design information and the design activity of the ALD flow were elaborated. The serial and parallel methods to order the design activity of the ALDF were emphasized, of which the function of time cost was given. The product design plan was optimized by the ALDF to improve the design quality and efficiency. Some key techniques of the ALD method were resolved, and the ALD method was exemplified by the structure design of the turbo-jet blade. And the conditions, the self-driven design flow, the diagram of geometry variables and performance variables of the example were given.

Key words: product design; analysis; optimization; turbines

根据产品设计目标，工业界一般将产品设计类型分为可行设计、改进设计、单目标优化设计和Patero(多目标)优化设计4类[1].而文献[2]将产品设计划分为创新设计、适应设计和变量设计3类.针对产品设计过程中存在的三维建模、性能分析、性能评价、设计改进、模型更新等迭代现象[3-4]，本文进行了深入的总结和分析，将基于变量设计的设计与多目标(Patero)优化设计相结合，提出了分析驱动设计方法(ALD, Analysis Leads Design).分析驱动设计方法认为产品设计的最终目标是满足产品的设计性能要求，即设计是由性能分析结果驱动的.“分析”指产品性能分

收稿日期：2008-06-20

基金项目：国家863基金资助项目(2007AA04Z125)

作者简介：宋玉旺(1980—)，男，黑龙江哈尔滨人，博士生，yuwangsong@buaa.edu.cn

析;“驱动”指产品性能评价和设计改进;“设计”指产品的三维实体模型.

1　分析驱动设计方法基本概念

从设计方法来讲,分析驱动设计方法将产品设计过程抽象为设计模型,基于设计模型建立分析驱动设计流程.分析驱动设计方法通过设计模型实现分析驱动设计流程的创建与应用.

从物理实现来讲,分析驱动设计方法以设计模型表示产品的设计过程,并以设计文件为信息载体规范的记录了设计模型,分析驱动设计方法通过设计文件的重用实现设计过程重用.下面详细阐述分析驱动设计方法中的基本概念.

定义 1　设计信息(DI,Design Information)

基于计算机辅助设计平台实现产品设计,对产品数据进行的信息化描述.

设计信息,解决产品相关信息的计算机表示问题.设计信息分为输入设计信息和输出设计信息.

定义 2　设计活动(DA,Design Activity)

根据设计目标和设计活动,在设计平台和设计知识支撑的基础上,将已知的输入设计信息,转化为需要的输出设计信息.

设计活动,解决产品设计信息的处理问题.设计活动之间存在逻辑和时间上的顺序:顺序关系,与聚合关系,与分解关系.如图 1 所示,DA(1)与 DA(4)为顺序关系;DA(1)与 DA(2)和 DA(3)为与分解关系;DA(2)和 DA(3)与 DA(4)为与聚合关系.产品设计过程由系列的设计活动完成,产品设计过程可表示为以设计活动为节点的有向图.

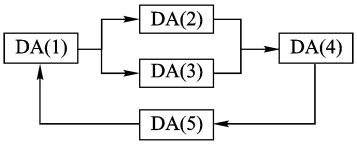

图 1　设计活动之间的逻辑关系

定义 3　设计模型(DM,Design Model)

面向设计重用的产品设计信息和设计活动的逻辑模型.

设计模型中包含设计信息,设计活动,以及它们之间的关系.设计模型中还包含了产品设计过程中设计活动对设计信息操作的过程和结果.

设计模型是对产品设计过程的抽象化表示.设计过程是信息处理的过程,设计过程的信息被收集和存储,以服务于设计重用.分析驱动设计方法详细阐述了设计模型的建模、集成与重用方法.

定义 4　设计文件(DF,Design File)

采用分析驱动设计方法基于计算机设计产品过程中,记录产品设计信息、设计活动和设计过程的用以支持产品设计的物理文件.

设计文件是分析驱动设计方法的最终物理实现形式.产品的设计信息、设计活动和设计模型必须以设计文件为载体.设计文件分为 4 类:设计支撑文件,设计过程文件,设计结果文件,设计集成文件.设计支撑文件:分析驱动设计实现的软件平台,根据需要进行部分的自主开发;设计过程文件:记录设计模型的文件;设计结果文件:阶段设计活动输出信息记录文件.设计模型以设计过程文件规范化的记录了产品设计过程中的设计信息、设计活动和它们之间的相互关系,包括了设计信息之间的相互关系、设计活动之间的相互关系和设计信息与设计活动相互关系等.

2　分析驱动设计方法

分析驱动设计方法的核心内容是分析驱动设计流程,分析驱动设计方法就是分析驱动设计流程的创建和应用方法.分析驱动设计方法基于设计活动创建和应用分析驱动设计流程,通过分析驱动设计流程的应用,完成产品设计方案的优化和验证.

2.1　分析驱动设计流程

定义 5　分析驱动设计流程(ALDF,Analysis Leads Design Flow)

基于设计目标、设计知识和设计平台,自动化的实现产品设计方案的性能分析、设计目标评价、设计变量修改、三维几何模型更新等任务,完成设计方案的验证和优化.

分析驱动设计流程中包含了 3 个设计子过程,分别是几何设计子过程、分析设计子过程和驱动设计子过程,如图 2 所示.分析驱动设计流程以设计模型表示设计过程,基于设计模型的重用实现设计过程重用.其设计模型分为 3 类,分别是几何设计模型(GDM,Geometry Design Model)、分析设计模型(ADM,Analysis Design Model)和驱动设计模型(DDM,Driven Design Model).

分析驱动设计流程是设计活动和设计信息组成的自驱动的闭环设计流程.分析驱动设计流程通过产品性能分析、设计目标评价,改进产品设计参数,对产品的三维几何模型进行反馈控制,是逐步求精的产品设计过程.

2.2　设计模型中的设计信息

产品设计信息应该反映设计问题中的主要产

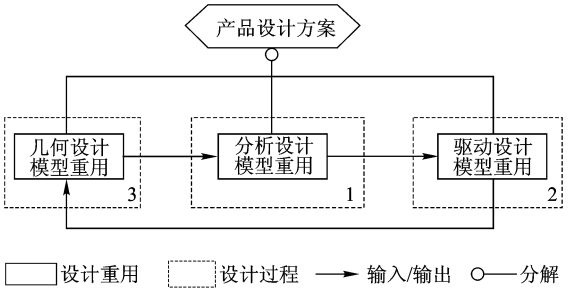

图2 分析驱动设计流程中的设计过程

品信息与其它产品信息之间的关系.产品设计信息应该包含设计目标、设计约束、性能要求和几何信息,以及产品生命周期中的其它设计信息.产品的几何设计信息集中体现了产品的设计要求和设计约束.产品几何结构是产品功能的载体,是产品设计意图和设计知识的体现;产品几何结构信息是设计的结果,更是产品制造的起点和依据.分析驱动设计方法以产品的几何设计信息(GDI,Geometry Design Information)为基础,添加了分析设计信息(ADI,Analysis Design Information)和驱动设计信息(DDI,Driven Design Information).产品设计始于GDI,在设计过程中,逐步添加ADI和DDI,构成了完整的产品设计信息.如果将DI,GDI,ADI和DDI均表示为集合,则

$$\mathrm{DI}=\mathrm{GDI}\cup\mathrm{ADI}\cup\mathrm{DDI} \tag{1}$$

几何设计信息与分析设计信息和驱动设计信息之间存在紧密关系.几何设计信息的部分内容是分析设计信息的核心内容,命名为GADI(Geometry and Analysis Design Information),分析设计信息基于GADI添加了必要的性能分析信息,比如材料、单元类型、工作条件等;分析设计信息的部分内容则要用于作为驱动设计信息的输入,命名为ADDI(Analysis and Driven Design Information),驱动设计信息基于ADDI添加了必要的驱动设计信息,比如设计约束、设计目标等;驱动设计信息的部分内容则要用于改进几何设计信息,命名为DGDI(Driven and Geometry Design Information),用于更新产品三维几何模型.分析驱动设计方法信息通过传递上述设计信息间的共享信息,实现产品设计,分析驱动设计信息的要求如式(2).

$$\left.\begin{aligned}\mathrm{GADI}&=\mathrm{GDI}\cap\mathrm{ADI}\neq\varnothing\\ \mathrm{ADDI}&=\mathrm{ADI}\cap\mathrm{DDI}\neq\varnothing\\ \mathrm{DGDI}&=\mathrm{DDI}\cap\mathrm{GDI}\neq\varnothing\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

2.3 分析驱动设计流程中的设计信息流

分析驱动设计流程,基于设计活动创建支持设计重用的几何设计模型、分析设计模型和驱动设计模型,用以支持"分析—驱动—更新"的自动化设计.几何设计模型重用活动、分析设计模型重用活动和驱动设计模型重用活动,通过产品的设计信息联系起来.分析驱动设计方法的设计信息流如图3所示,图3中的箭头有两重含义:①表示设计信息的流动方向,方向不可逆;②表示共享信息所属,如GADI被GDI和ADI所共享.

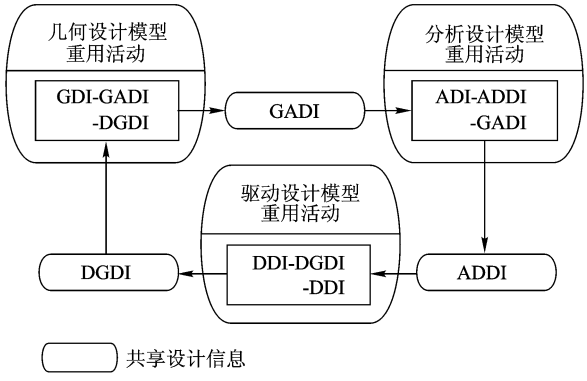

图3 分析驱动设计流程的设计信息流

2.4 设计模型中的设计活动

从设计活动的角度讲,分析驱动设计方法就是为了完成产品设计目标,通过一系列的可操作或可求解的设计活动,建立产品设计模型,并实现设计模型重用的过程.分析驱动设计方法规范了设计模型的建立过程,为产品设计提供方法指导.下面详细分析了分析驱动设计方法中的各类设计活动和设计活动之间的关系.

1)分析驱动设计流程基于设计模型表示设计过程,将设计活动按照分析驱动设计流程创建的顺序,可归纳为另外3类,分别是:设计模型创建活动(DMCA,Design Model Creation Activity),即创建设计模型;设计模型集成活动(DMIA,Design Model Integration Activity),即将设计模型集成到分析驱动设计流程中;设计模型重用活动(DMRA,Design Model Reuse Activity),即应用设计模型重用实现分析驱动设计流程.

2)从分析驱动设计流程的角度,将分析驱动设计流程中的设计活动ALDFDA划分为2类,分别是分析驱动设计流程创建活动(ALDFCA,ALDF Creation Activity)和分析驱动设计流程应用活动(ALDFAA,ALDF Application Activity),二者分别实现分析驱动设计流程的创建过程和应用.分析驱动设计方法就是将产品设计方案根据设计目标分解为分析驱动设计流程创建活动,并组合为分析驱动设计流程应用活动的过程.

3)按照设计活动操作的产品设计信息不同,

将分析驱动设计流程中的设计活动分为 3 类:几何设计活动(GDA,Geometry Design Acitivity),分析设计活动(ADA,Analysis Design Acitivity),驱动设计活动(DDA,Driven Design Acitivity).这 3 类设计活动的操作对象分别是产品的几何设计信息、分析设计信息和驱动设计信息,如图 4 所示.

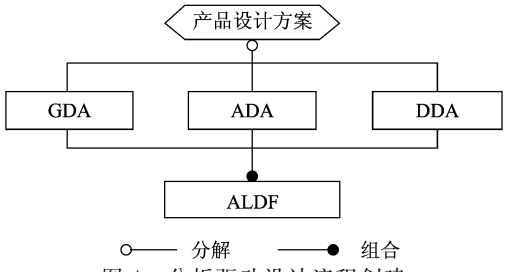

图 4　分析驱动设计流程创建

几何设计活动包括几何设计模型设计活动(GDMDA)、几何设计模型集成活动(GDMIA)和几何设计模型重用活动(GDMRA);分析设计活动包括分析模型设计活动(ADMDA)、分析设计模型集成活动(ADMIA)和分析设计模型重用活动(ADMRA);而驱动设计活动包括驱动设计模型设计活动(DDMDA)、驱动设计模型集成活动(DDMIA)和驱动设计模型重用活动(DDMRA).本文将上述设计活动集中表示为设计活动矩阵(DAM,Design Activity Matrix),命名为矩阵 DAM(3×3),如式(3)所示.

$$\mathrm{DAM}(3\times 3)=\begin{bmatrix}\mathrm{GDMDA} & \mathrm{ADMDA} & \mathrm{DDMDA}\\ \mathrm{GDMIA} & \mathrm{ADMIA} & \mathrm{DDMIA}\\ \mathrm{GDMRA} & \mathrm{ADMRA} & \mathrm{DDMRA}\end{bmatrix} \tag{3}$$

设计活动矩阵 DAM(3×3)是对分析驱动设计方法中设计活动的精炼表述,为分析驱动设计方法应用于具体产品设计奠定了设计方法基础.GDA,ADA 和 DDA,以及 DMCA,DMIA 和 DMRA 可表述如式(4)和式(5).

$$\left.\begin{aligned}\mathrm{GDA}&=\mathrm{DAM}(i,0)\\ \mathrm{ADA}&=\mathrm{DAM}(i,1)\\ \mathrm{DDA}&=\mathrm{DAM}(i,2)\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

$$\left.\begin{aligned}\mathrm{DMCA}&=\mathrm{DAM}(0,j)\\ \mathrm{DMIA}&=\mathrm{DAM}(1,j)\\ \mathrm{DMRA}&=\mathrm{DAM}(2,j)\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

其中,$i=0,1,2;j=0,1,2$.

2.5　设计活动规划

分析驱动设计方法将产品设计过程表示为以设计活动为节点的有向图.设计活动矩阵 DAM(3×3)可以表示为以设计活动为节点、设计活动次序为边的图 G.分析驱动设计活动次序规划如图 5 所示,可以作为分析驱动设计流程创建和应用的指导.

$$G=(V,E)$$

其中,V 表示设计活动集合;而 E 代表有向边$\langle v_i,v_j\rangle$,v_i,和 v_j 为 V 中的不同节点;V 表示如式(6)所示.

设计活动执行的必要条件:当且仅当入度为零时,设计活动才能被执行.

入度矩阵 IDDAM(3×3)如式(7).

当某设计活动执行完成后,该活动的出边所指向的所有设计活动的入度减 1.

$$V=\{\mathrm{DAM}(i,j)\mid i=0,1,2;j=0,1,2\} \tag{6}$$

$$\mathrm{IDDAM}(3\times 3)=\begin{bmatrix}0 & 1 & 1\\ 1 & 2 & 2\\ 1 & 2 & 2\end{bmatrix} \tag{7}$$

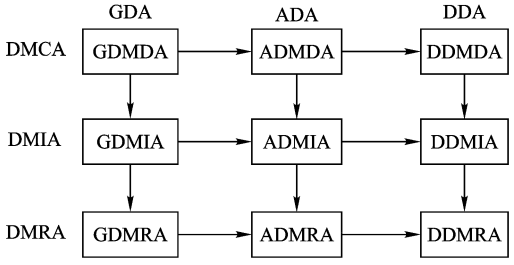

图 5　设计活动规划图解

2.5.1　设计活动规划的串行化

串行化,即入度为零的设计活动依次执行.限于工作条件,仅有 1 名设计者和 1 台计算机,每个设计活动仅能依次独立执行.串行化的设计活动执行次序是活动串,将图 G 看作是 AOV(Acitivity On Vertex)网,进行拓扑排序即可得到串行化结果,设计活动的拓扑排序结果有 42 种.分析驱动设计流程的串行化创建时间表示为式(8).

$$T_{\mathrm{total}}=\sum_{i=0}^{2}\sum_{j=0}^{2}T(i,j) \tag{8}$$

式中,$T(i,j)$为完成 DAM(3×3)中第 i 行、第 j 列设计活动所花费的时间,$i=0,1,2,j=0,1,2$.

2.5.2　设计活动规划的并行化

并行化,即入度为零的设计活动同时执行.如果工作条件允许,那么 3 名设计者则可以在 3 台计算机上同时执行满足要求的设计活动.分析驱动设计流程并行化创建的设计活动分为 5 组,分别是:GDMDA,{ADMDA,GDMIA},{DDMDA,ADMIA,GDMRA},{DDMIA,ADMRA 和 DDMRA},如图 6 所示.

令 $k=\{i+j\mid i=0,1,2;j=0,1,2\}$,可以总

结出，并行执行的设计活动分组有2个特征：① k 值相同的设计活动为同组，可同时被执行；②设计活动的执行次序为 k 值递增的顺序. 分析驱动设计流程的并行化创建时间表示为式(9).

$$T_{\text{total}} = T(0,0) + \max(T(0,1),T(1,0)) + \max(T(0,2),T(1,1),T(2,0)) + \max(T(1,2),T(2,1)) + T(2,2) \quad (9)$$

分析驱动设计流程串行化创建需要9个阶段，而并行化创建则仅需要5个阶段，对比时间计算公式(8)，可知并行化设计时间明显减少.

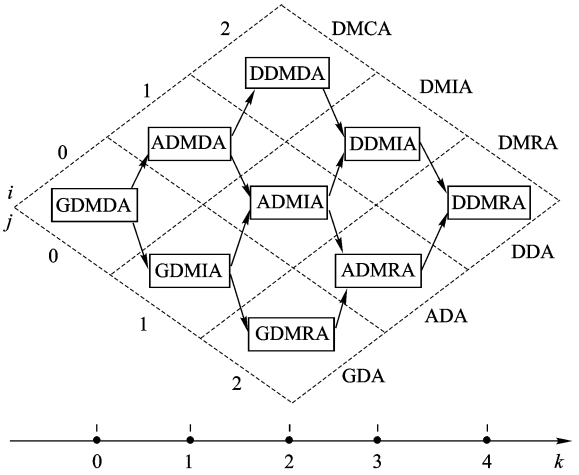

图6 分析驱动设计流程的并行化创建

3 设计实例

应用上述方法，以某航发涡轮转子叶片为例，在气动性能分析和流场计算得到叶型数据的基础上，建立叶片结构设计阶段的分析驱动设计流程. 在分析驱动设计流程的应用过程中，GADI是实体模型，ADDI是分析结果，而DGAI是设计变量，如图7所示.

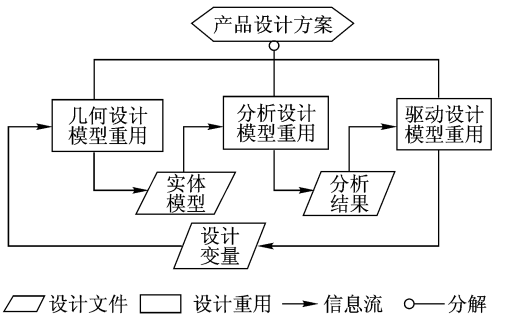

图7 分析驱动设计流程略图

设计平台选择：①CAD平台：开发了基于UG NX3开发了基于特征的变壁厚涡轮叶片建模系统[5-6]和根据设计变量更新实体模的关键程序 update.exe；②CAE平台：Ansys10.0；③多学科优化设计平台：Isignt 8.0.

涡轮叶片结构设计的分析驱动设计流程如图8所示，包括了设计过程文件、设计支撑文件、设计结果文件和设计集成文件.

涡轮叶片采用的材料为镍基高温合金，密度8.44 g/cm^3，弹性模量172.55 GPa，泊松比0.344 5. 有限元建模采用了6级精度的网格划分方法，单元类型为10节点实体单元SOLID92，边界条件取对叶片根部进行固支. 叶片工作条件：前一级静叶数目为30；转速为13 467 rad/min；优化目标：最大离心应力最小，暂未考虑温度载荷；设计变量：隔肋的水平位置：前肋位置和后肋位置，如图9所示；约束条件为共振裕度 $|f_i - f_g|/f_g > 8\%$，其中，f_i 为叶片 i 阶固有频率，$i=1,2,3$；f_g 为激振频率.

优化前前肋位置和后肋位置分别为95.207 7 mm和106.734 3 mm. 分析驱动设计流程

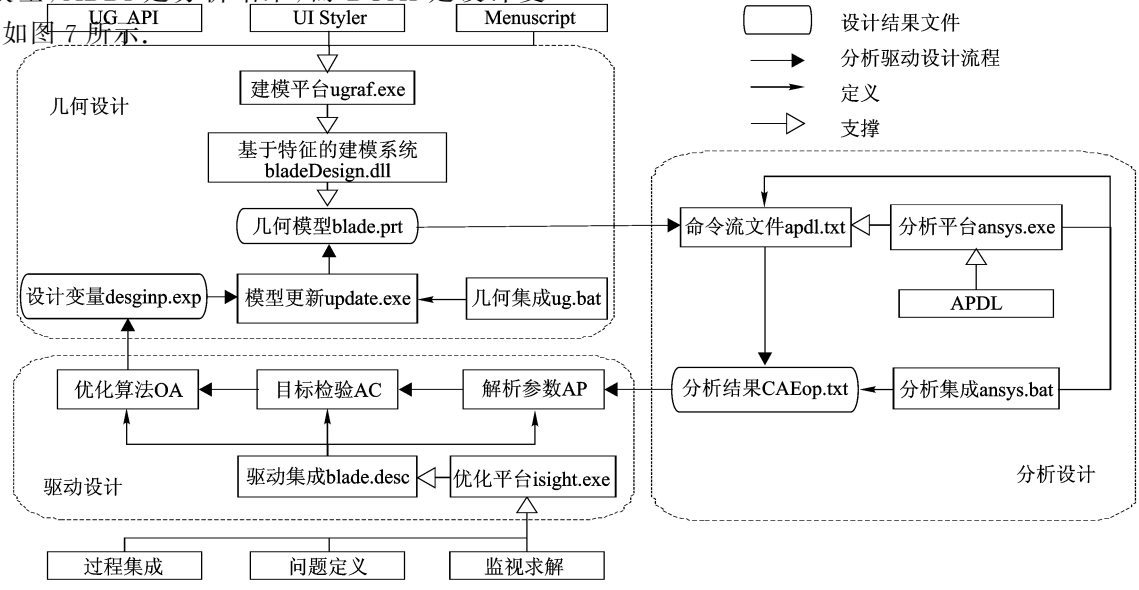

图8 分析驱动设计流程详图

执行一次的时间约为 900 s,共执行 53 次得到设计最优解.优化后前肋位置和后肋位置则分别为 96.654 950 mm 和 107.525 582 mm.满足约束条件下最大离心应力的最小值为 365.370 780 MPa.设计变量前肋位置、后肋位置和目标函数寻优过程分别如图 10～图 12 所示.

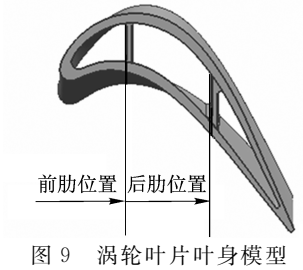

图 9　涡轮叶片叶身模型

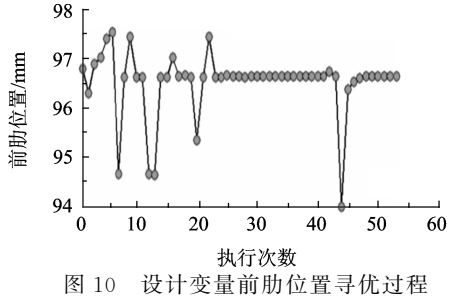

图 10　设计变量前肋位置寻优过程

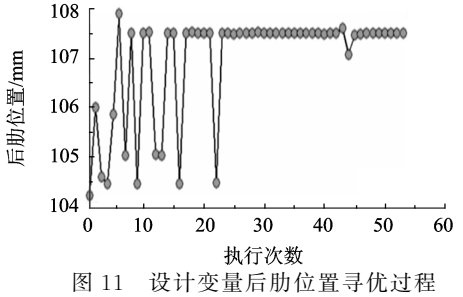

图 11　设计变量后肋位置寻优过程

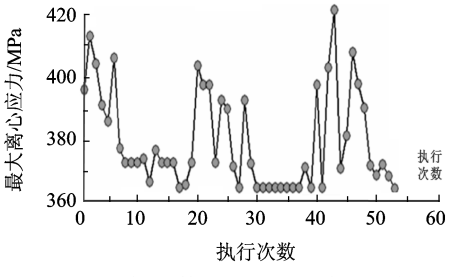

图 12　目标函数后最大离心应力寻优过程

4　结 束 语

分析驱动设计方法利用现代设计技术和设计手段,从设计方法上进行了深入的总结和分析,通过深入研究设计信息、设计活动、设计模型等主要概念和相应关键技术,分析驱动设计方法为产品设计信息的计算机表示和处理提供依据,规范设计模型的创建、集成和重用等设计活动,使得设计信息和设计活动支持设计重用.分析驱动设计方法是一种集设计分析、优化设计、设计驱动等设计方法于一体的现代智能计算机辅助设计方法.本文以航发涡轮叶片的结构设计为实例,以分析驱动设计方法为指导,采用并行化的设计活动规划方法,创建其分析驱动设计流程,实现其优化设计,验证了分析驱动设计方法的实用性和有效性.分析驱动设计方法改进了传统产品的顺序设计过程,消除产品设计过程中的设计信息孤岛,为功构复杂产品的快速设计和综合优化奠定了基础.

参考文献(References)

[1] 王振国,陈小前,罗文彩,等.飞行器多学科设计优化理论与应用研究[M].北京:国防工业出版社,2006:35
Wang Zhenguo, Chen Xiaoqian, Luo Wencai, et al. Research on the theory and application of multidisciplinary design optimization of flight vechicles[M]. Beijing: National Defence Industry Press,2006:35(in Chinese)

[2] Pahl G, Beitz W. Engineering design[M]. London: Springer, 2001

[3] 吴立强,尹泽勇,蔡显新.航空发动机涡轮叶片的多学科设计优化[J].航空动力学报, 2005, 20 (5): 795－801
Wu Liqiang, Yin Zeyong, Cai Xianxin. MDO technology applied to the aeroengine turbine blade design[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(5):795－801(in Chinese)

[4] 舒彪,韩前鹏,邓家褆.基于多学科涡轮叶片气动设计优化[J].南京航空航天大学学报,2005,37(6):714－719
Shu Biao, Han Qianpeng, Deng Jiati. Aerodynamic design optimization of turbine blade based on multidiscipline[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2005,37(6):714－719(in Chinese)

[5] 宋玉旺, 席平. 基于特征造型技术的涡轮叶片参数化设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(4): 321－324
Song Yuwang, Xi Ping. Parametric design of turbine blades based on feature modeling[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2004,30(4):321－324(in Chinese)

[6] 宋玉旺,余伟巍,朱剑,等.变壁厚涡轮叶片参数化设计[J].计算机辅助设计与图形学报,2008,20(3):304－309
Song Yuwang, Yu Weiwei, Zhu Jian, et al. Parametric design of turbo-jet blades with unequal thickness[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2008,20(3):304－309(in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)