

文章编号:1000-8055(2013)09-2083-07

一种参数化轻量化涡轮盘结构的 CAD/CAE 集成方法

罗 斌, 丁水汀, 李 果

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室 适航技术研究中心, 北京 100191)

摘 要: 针对一种轻量化涡轮盘结构的特点, 分析了参数化 CAD/CAE 集成过程的文件与输入参数的关联性. 编写 C/C++ 程序, 利用 UG/OPEN API 实现参数化建模, 通过修改脚本并基于单向流固耦合算法有序调用 CAE 软件执行脚本的方式实现关联文件与输入参数关联, 从而实现参数化涡轮盘 CAD/CAE 过程自动集成. 程序运行效果显示, 相比人工执行同样的一次 CAD/CAE 流程, 该方法至少要快 54 min, 说明了该方法有效提高了轻量化涡轮盘的设计分析效率.

关 键 词: 参数化; CAD/CAE; 集成; 轻量化; 涡轮盘; 程序; 效率

中图分类号: V231.1; TP391.7

文献标志码: A

A parametric lightweight turbine disk structure CAD/CAE integration method

LUO Bin, DING Shui-ting, LI Guo

(Airworthiness Technologies Research Center,

National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: The relevance between input parameters and the files of parametric computer aided design (CAD) /computer aided engineering (CAE) integration was analyzed based on the lightweight turbine disk structure's characteristics. C/C++ program was compiled, and software UG/OPEN API was used to accomplish parametric modeling. CAE softwares were called sequentially to run the scripts modified based on one-way fluid structure interaction method to insure the relevance between input parameters and relevant files. Thus, the automated integration of parametric lightweight turbine disk CAD/CAE process was achieved. The program running results show that compared with the manual work which is the same with CAD/CAE process, this method costs less than 54 min, proving that the design and analysis efficiency is improved effectively.

Key words: parametric; computer aided design/computer aided engineering (CAD/CAE); integration; lightweight; turbine disk; program; efficiency

收稿日期:2012-09-07

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130926.1103.201309.2083_013.html

基金项目:航空发动机复杂系统安全性教育部创新团队(IRT0905)

作者简介:罗斌(1988—),男,广西玉林人,博士生,主要研究方向为传热传质.

涡轮盘是航空发动机的关键部件,其工作在极端的高温、高转速环境中.涡轮盘在结构设计技术上的改进对提高发动机推质比有很大贡献^[1-2].为了减轻涡轮盘的质量,付德斌等人^[3-4]采取了对简单涡轮盘模型盘心开槽加热的方式,表明了这种方式使涡轮盘轻量化是可行的,而对于什么样的结构形式和加热热流大小,尚需探索.由于不同的开槽方式、不同尺寸的槽以及不同的加热量都对涡轮盘的应力分布和减轻质量有很大的影响,为了得到合理的应力分布和减轻质量,必须通过尝试改变槽的位置尺寸和加热量来重新计算.如果每次计算过程都需要人工干预,那么改变某些参数,就需要重新进行同样的前处理.对于参数比较多的情况,势必增加工作量,这样就会严重影响设计的自动化程度和设计效率的提高.

参数化设计方法是提高设计效率的有效方法.国内许多研究者采用了参数化设计方法使得设计效率得到了提高.但是其中有的只是参数化几何模型^[5],有的只有参数化几何建模与计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)的集成^[6-9],有的只有参数化几何建模与有限元的集成^[10-14],而把参数化几何建模、CFD 和有限元都集成的研究却很少.其中酆仕云等人^[15]通过 iSIGHT 软件的多学科综合优化集成框架,利用 UG/OPEN API 实现参数化几何建模,实现了飞行器设计中几何建模,CFD 与结构分析的集成,大大提高了设计效率.

本文针对一种轻量化涡轮盘结构的关键特征,自编 C/C++ 程序,利用 UG/OPEN API 进行参数化建模.为了计算涡轮盘的应力,基于单向流固耦合计算的方法,利用程序控制使该计算过程自动化,实现了轻量化涡轮盘的几何建模,CFD 与结构分析的集成,提高了设计效率.

1 轻量化涡轮盘简介

轻量化涡轮盘模型如图 1 所示,图中显示的是 1/20 模型,该轻量化涡轮盘是在原始涡轮盘的基础上去掉三部分(减质体)所成.在涡轮盘上形成 2 个腔,称为减质腔,盘心形成一道槽,此处需要加热以减小由于涡轮盘轻量化带来的盘心应力上升,称为加热槽.其中减质腔和加热槽在轴向关于盘心底部直线段中心对称,该盘需要 8 个参数确定具体结构(图 2).涡轮盘与相关流体模型如图 3,涡轮盘表面与涡轮盘腔流体进行换热,涡轮盘减质腔有流体,盘外缘与盘心均为热流加热.

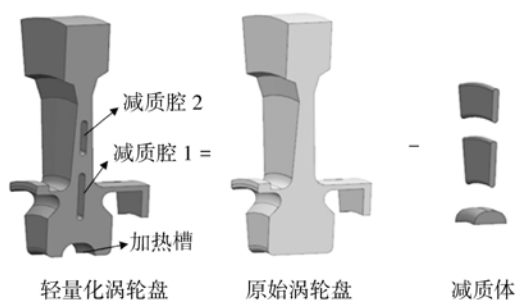


图 1 轻量化涡轮盘,原始涡轮盘和减质体
Fig. 1 Lightweight turbine disk, original turbine disk and lightweight body

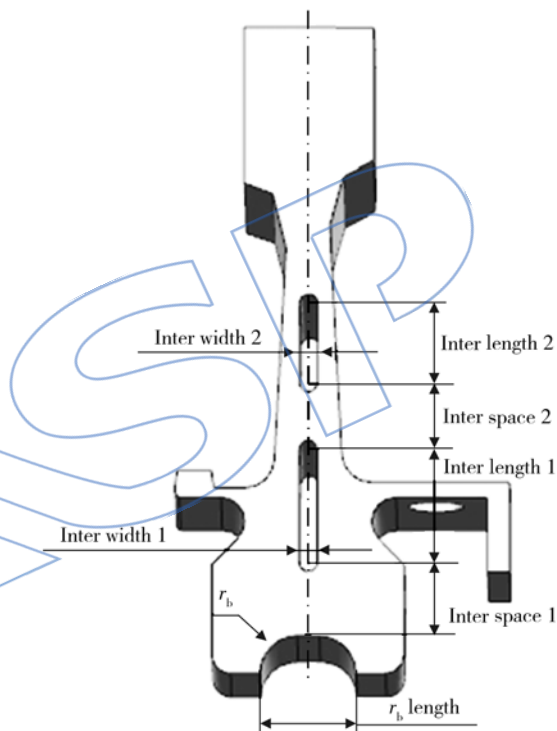


图 2 轻量化涡轮盘具体结构参数示意图
Fig. 2 Schematic of decisive parameters of lightweight turbine disk

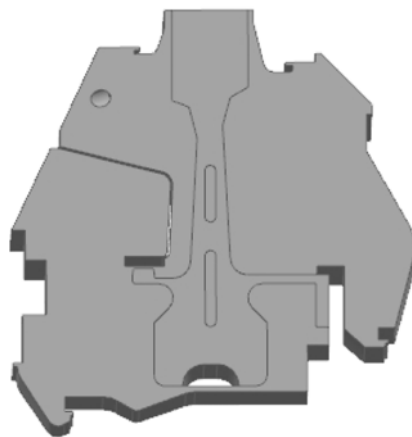


图 3 涡轮盘与相关流体模型
Fig. 3 Models of turbine disk and relevant fluids

2 应力计算方法

为了计算涡轮盘旋转时的应力,本文采用单向流固耦合算法,首先需要通过 CFD 软件计算涡轮盘与盘腔流体稳态换热时涡轮盘的温度场,再利用有限元软件把涡轮盘的温度场作为载荷和其他机械载荷加载到涡轮盘上,忽略涡轮盘变形对流体流动的影响以及气动力,计算

其应力场.为了缩短有限元计算的时间,有限元计算所用的网格数量比进行 CFD 计算所用的网格数量少.本文采用商用软件 UG 进行几何建模,利用 ICEM CFD 软件生成 CFD 计算所需的流体和固体网格模型,通过 CFX 软件进行 CFD 计算,最后利用 ANSYS 软件生成有限元模型以及计算应力.不同网格之间的温度传递可通过 CFX 和 ANSYS 的交互完成.具体流程如图 4 所示.

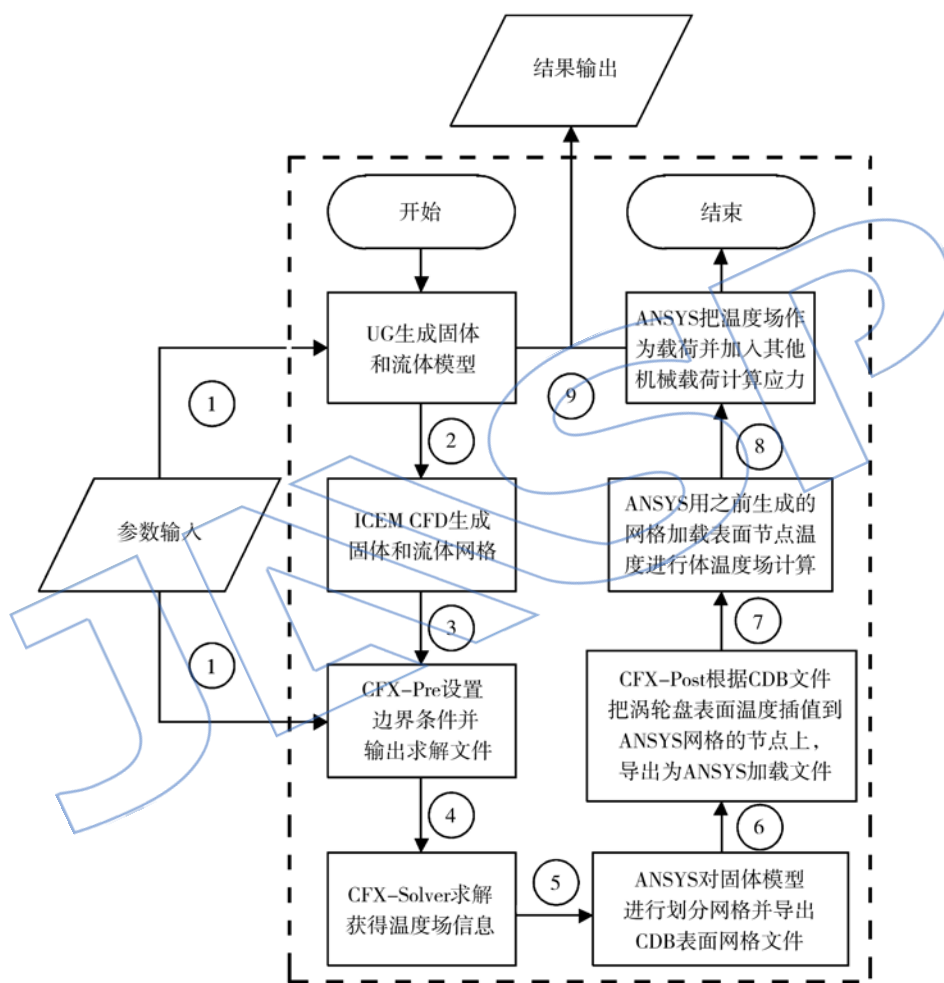


图4 应力计算流程图

Fig. 4 Flow diagram of stress computation

3 参数化 CAD/CAE 过程集成的实现

参数化 CAD/CAE 集成过程要求在输入参数改变后,其余相关数据自动更新,不需要人工干预.也就是当涡轮盘结构和加热边界参数发生改变时,用于 CFD 计算和有限元计算的前处理能够自动完成更新,并自动进行计算,应力和

体积自动获得.

从流程图 4 中可知,该过程可简单地抽象为输入-处理-输出模型(如图 5),其中输入包括确定涡轮盘的尺寸参数和盘心加热的热流大小,输出为体积和应力结果,处理过程包括了整个计算流程.实现该参数化 CAD/CAE 过程集成的关键是处理好过程中承载数据的文件与输入参数的关联性.



图 5 抽象过程

Fig. 5 Abstract of process

3.1 集成过程的文件与输入参数关联性分析

从流程图 4 可看出:每个箭头代表输出到下一级子流程所需的关联性文件,如表 1 所示,其中 2 个输入和输出箭头用一个标号表示。

表 1 文件关联性

Table 1 Relevance of files

箭头 编号	与参数 关联	与参数 不关联	备注
1	InputFile. txt		InputFile. txt 包含参数化的 8 个几何尺寸和加热热流信息
2	Solid. x_t InternalFluid1 . x_t InternalFluid2 . x_t Solid. cfx5 InternalFluid1 . cfx5 InternalFluid2 . cfx5	fluid. x_t fluid. cfx5	分别代表涡轮盘、减质腔 1 流体、减质腔 2 流体和盘腔流体的几何模型
			分别代表涡轮盘、减质腔 1 流体、减质腔 2 流体和盘腔流体的网格模型
3	Structure. def		CFX-Pre 输出的求解文件
4	Structure_001 . res		CFX-Solver 对 Structure. def 的求解结果
5	*. cdb file. db		各表面组的 cdb 文件用 *. cdb 表示; file. db 为 ANSYS 文件,此时包含有限元网格信息
6	*. sfe		各表面组的温度加载文件用 *. sfe 表示
7	file. rth		ANSYS 热计算的结果文件
8	OutputFile. txt *. jpg		文本中包含体积和最大应力信息, *. jpg 显示某个角度看的应力云图

3.2 关联文件的更新控制

3.2.1 UG 输出控制

根据输入的参数,自编写程序计算得出减质腔和加热腔的特征点的位置信息,利用 UG/OPEN API 实现导入原始涡轮盘几何模型、画点、画线、旋转生成体、原始涡轮盘和减质旋转体的布尔差运算,几何模型文件 *. x_t 的导出,体积查询并使体积数据输出到 OutputFile. txt 等操作。

3.2.2 软件 ICEM CFD 输出控制

采取的是四面体网格划分方式,通过几何表面的不同边界条件对几何表面进行编组,并根据几何表面的大小以及曲率的大小给定该表面的最大网格尺寸,这里并不把网格信息参数化。在输入参数变化过程中,产生的几何体的方式一样,所以在 ICEM CFD 中,几何体的表面编号信息不变,这样就可以通过运行录制脚本的方式,重新生成新的网格文件。但需要注意的是,在体命名过程中,图形化操作界面是通过指定两个不同点的中心,使该中心在体的内部,在对应的脚本命令格式为:ic_geo_create_volume {x y z} {} bodyname, 其中 x, y, z 为点的坐标, bodyname 为体的名字。也就是说,脚本命令执行并不是以点的名称指定体,而是通过坐标定位的方式。当减质腔的径向位置变化比较大时,以至于两组输入参数的同一减质腔流体并无相交的内部,如图 6 所示。如果只用一个不变的脚本文件,则会导致体名称丢失,在

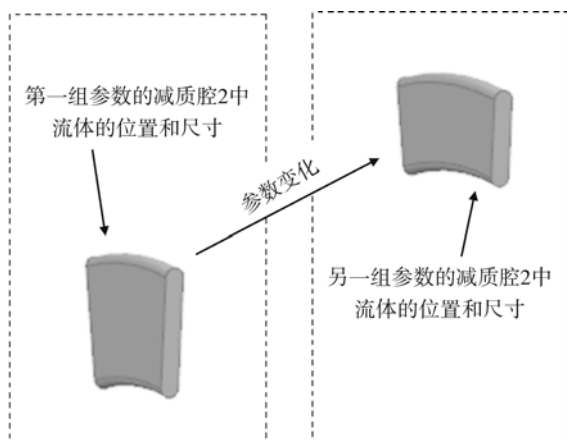


图 6 减质腔径向位置变化较大的示例图

Fig. 6 Schematic of large variation of lightweight cavity radial positions

CFX-Pre 中找不到对应的流体,所以在自编程序中需要加入重新修改减质腔流体脚本的 `ic_geo_create_volume` 命令中的位置信息的程序,使创建体的点总在减质腔的内部。

3.2.3 CFX-Pre 输出控制

Structure.def 的更新在图形化操作界面中可以通过读取上一个 Structure.cfx 文件,然后修改加热热流大小,再重载涡轮盘模型和减质腔流体模型网格,最后输出 Structure.def 得到。这一系列操作均可录制为脚本,但是不同的热流对应不同的脚本,而这些脚本除了热流大小的数值不同外,其他均相同,对应脚本中的语句为:Heat Flux in = $q[W\ m^{-2}]$, q 为热流大小。在自编程序中加入控制该脚本中 q 的数值就可保证不同的热流参数对应的脚本文件得到更新,从而保证了 Structure.def 的更新。

3.2.4 CFX-Solver 输出控制

Structure_001.res 的更新,只需前面保证 Structure.def 的更新。

3.2.5 ANSYS 表面网格输出控制

编写 APDL 脚步程序可自动执行表面网格的生成和输出。把 CFD 计算结果的表面温度插值传递到有限元模型的表面节点上,需要提供 ANSYS 的 cdb 表面文件,这些表面文件信息应与对应的 CFX 中表面组相对应。这就需要在 ANSYS 中对涡轮盘表面进行编组,与 CFX 中的表面组相对应。与 ICEM CFD 程序中不同的是,不同参数对应的涡轮盘表面编号在 ANSYS 环境下并不一定保持不变,这就使得表面选择操作必须通过表面的位置信息进行选取。不同参数表面位置信息可由这些参数以及涡轮盘的几何信息求得。这就要求不同参数生成表面网格文件的 APDL 脚本程序中的表面位置数据不同,自编程序在调用该 APDL 脚本程序前,需加入对 APDL 文件中的表面位置数据进行修改的程序,保证 cdb 表面文件与输入参数的关联更新。

3.2.6 CFX-Post 输出控制

在图形化操作界面下不同参数的 CFX-Post 输出所采取的操作都是一致的:首先导入 CFD 计算结果,然后导入 ANSYS 的 cdb 表面文件,最后输出 ANSYS 表面温度加载命令。那么在自编程序调用 CFX-Post 运行脚本时,不同的参数采用一个固定不变的 CFX-Post 脚本。

3.2.7 ANSYS 结果输出控制

由于从 CFD 结果插值的是表面温度,则 ANSYS 计算部分有热分析和结构分析两部分,都可以通过编写 APDL 脚本程序实现。首先需要根据差值传递的表面温度场,计算出体温度场,再把结果中的体温度场做为载荷加载到涡轮盘上,与其他机械载荷一起计算其应力场。而涡轮盘主体的最大应力可以通过排序查询获得。APDL 脚本程序根据计算结果输出应力云图,并提取最大应力输出到 OutputFile.txt。

3.3 集成过程控制

参数化设计过程的 CAD/CAE 集成主要是通过自编程序调用其他软件执行脚本的方式实现的,具体过程如流程图 7。

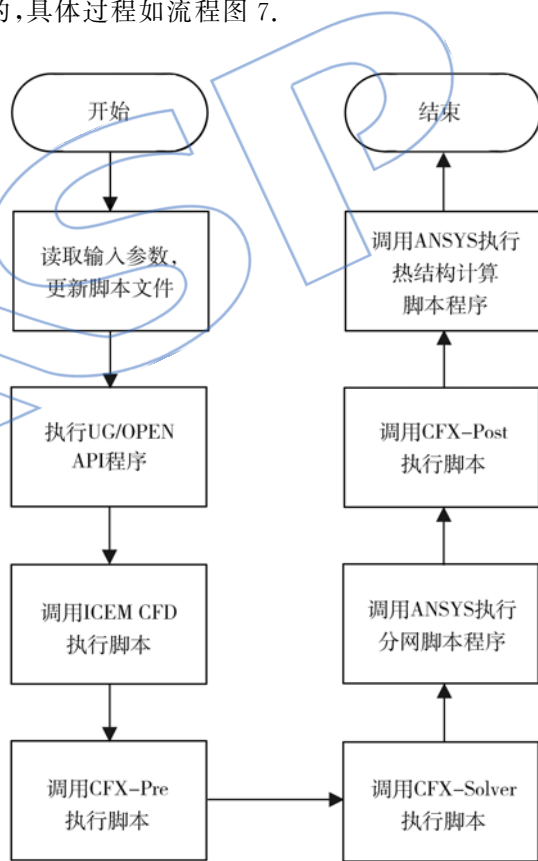


图7 程序流程图

Fig. 7 Flow diagram of program

4 程序实际运行效果

4.1 运行环境

为了验证程序运行的效率,使程序在一台安装了相关软件的计算机上进行测试。影响测试结果的主要计算机硬件及软件参数如表2。进行 CFD 前处理的网格信息如表3,效果图如图8。实

表 2 影响测试结果的主要参数
Table 2 Main parameters influencing test results

名称	属性
处理器	英特尔 Core i7 870 @ 2.93GHz 四核八线程
内存	4GB DDR3 1333 MHz
硬盘	日立 HDS721050CLA362 500GB 7200 r/min
显卡	ATI Radeon HD 4650 1GB 显存
操作系统	64 位 Windows 7 旗舰版
UG	32 位 版本 6.0
ICEM CFD	64 位 版本 12.1
CFX-Pre	64 位 版本 12.1
CFX-Solver	64 位 版本 12.1
ANSYS	64 位 版本 12.1

表 3 CFD 的网格参数
Table 3 Mesh parameters of CFD

名称	网格数	节点数
盘腔流体	754833	134404
减质腔 1 内的流体	32555	5906
减质腔 2 内的流体	38525	6955
轻量化涡轮盘	335332	59480
共计	1161245	206745

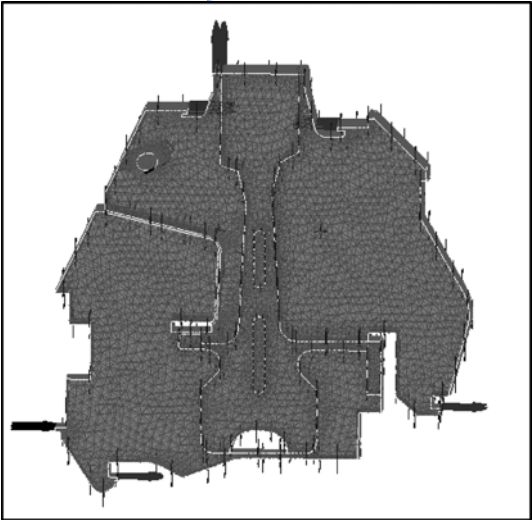


图 8 CFD 前处理效果图
Fig. 8 Rendering of CFD pretreatment

际上,该程序主要是提高前处理的效率,所以在这里 CFX-Solver 计算设置为 2 次迭代.轻量化涡轮盘在有限元计算中智能自动分网等级为 2 级(1 为最好,10 为最差),共产生 104 460 个网格与 24 480 个节点,效果图如图 9.

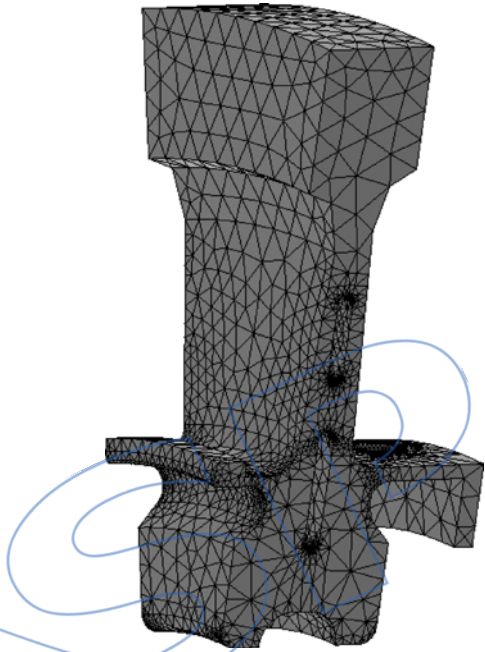


图 9 有限元网格效果图
Fig. 9 Rendering of finite element mesh

4.2 运行结果与讨论

程序执行一次前处理和输出结果过程总共花费时间为 6 min. 其中还包括了 2 次 CFD 迭代计算和 1 次有限元计算的时间. 所以只考虑程序运行在前处理和输出结果这个过程时,其运行时间会小于 6 min. 而人工利用图形界面完成这样的过程需要花费的时间约为 1 h. 由于输入参数有 8 个,如果每个参数取 3 个不同的值进行测试,则会有 $3^8=6\,561$ 种不同的组合. 按照每人每天工作 8 h,则每人每天最多只能做 8 次前处理和提取结果,仅计算前处理和提取结果所需的时间,一个人完成这个任务至少得用 820 天. 而计算机每天能 24 h 工作,完成同样的工作最多需要 27 天,可见程序自动集成 CAD/CAE 过程的高效率.

5 结 论

通过参数化轻量化涡轮盘,利用程序自动集成 CAD/CAE 过程,大大提高了轻量化涡轮盘设计分析的效率. 为后续的轻量化涡轮盘研究工作提供了基础,同时避免了人工重复操作过程中出

现的偶然错误,提高了结果的可靠性。该程序运行过程不需要图形化界面,使得该方法对计算机的显示硬件的功能要求降低,适用于更多的计算机。同时由于程序的自动化,使得计算工作能全天进行,大大缩短了轻量化涡轮盘的设计周期。

参考文献:

- [1] 江义军. 推重比 12—15 发动机技术途径分析[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 103-106.
JIANG Yijun. Technical approaches to thrust-weight ratio 12—15 of aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2): 103-106. (in Chinese)
- [2] 周强. 世界军用航空动力技术的现状与展望[J]. 长沙航空职业技术学院学报, 2003, 3(1): 26-30.
ZHOU Qiang. Current status and development direction of military aircraft power technology in the world[J]. Changsha Aeronautical Vocational and Technical College Journal, 2003, 3(1): 26-30. (in Chinese)
- [3] 付德斌, 丁水汀, 陶智, 等. 一种基于热管理的热端部件轻量化研究[J]. 航空动力学报, 2011, 26(4): 814-821.
FU Debin, DING Shuiting, TAO Zhi, et al. Study on heated components mass reduction based on thermal management [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(4): 814-821. (in Chinese)
- [4] 付德斌, 丁水汀, 陶智, 等. 旋转盘应力水平与温度分布的关联分析[J]. 航空动力学报, 2008, 23(4): 623-628.
FU Debin, DING Shuiting, TAO Zhi, et al. Analysis of the effects of temperature distribution on stress level in a rotating disk[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(4): 814-821. (in Chinese)
- [5] 彭波, 杨岳, 苏春模. 采用 SolidWorks API 的离心式叶轮参数化建模[J]. 工程图学学报, 2009, 30(5): 1-7.
PENG Bo, YANG Yue, SU Chunmo. Parametric modeling of centrifugal impeller based on SolidWorks API[J]. Journal of Engineering Graphics, 2009, 30(5): 1-7. (in Chinese)
- [6] 冯佰威, 刘祖源, 詹成胜, 等. 船舶 CAD/CFD 一体化设计过程集成技术研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 34(4): 649-651.
FENG Baiwei, LIU Zuyuan, ZHAN Chengsheng, et al. Research on process integration of the integrated optimization of the ship CAD/CFD[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 34(4): 649-651. (in Chinese)
- [7] 李中云, 蔡兆麟. 风机 CAD-CAE 设计中的参数化[J]. 通用机械, 2003(3): 27-29.
- [8] 石梦华, 赵坚行, 颜应文, 等. 航空发动机燃烧室参数化建模[J]. 航空发动机, 2011, 37(5): 11-15.
SHI Menghua, ZHAO Jianxing, YAN Yingwen, et al. Aeroengine combustion parametric modeling [J]. Aeroengine, 2011, 37(5): 11-15. (in Chinese)
- [9] 赵曜, 于庆波, 李榕. 基于参数化设计的轧钢加热炉 CAD/CAE 集成方法[J]. 中国冶金, 2011, 21(3): 35-38.
ZHAO Yao, YU Qingbo, LI Rong. Investigations on CAD/CAE integration method for steel rolling heating furnace based on parametric design technology[J]. China Metallurgy, 2011, 21(3): 35-38. (in Chinese)
- [10] 陈晓霞, 邢静忠. CAD/CAE 集成的三偏心蝶阀参数化设计[J]. 工程图学学报, 2009, 30(1): 37-40.
CHEN Xiaoxia, XING Jingzhong. Parametric design of three-eccentric butterfly valve based on CAD/CAE integrated[J]. Journal of Engineering Graphics, 2009, 30(1): 37-40. (in Chinese)
- [11] 纪福森, 吴铁鹰, 陈伟. 参数化 CAD/CAE 集成与应用[J]. 机电工程技术, 2006, 35(6): 86-88.
JI Fusen, WU Tieying, CHEN Wei. Integration and application of parametric CAD/CAE[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2006, 35(6): 86-88. (in Chinese)
- [12] 何晓华, 王振荣. 基于 ANSYS 的汽车齿轮参数化建模及有限元分析[J]. 汽车齿轮, 2011(1): 43-49.
HE Xiaohua, WANG Zhenrong. Parametric modeling and finite element analysis of automobile gear based on ANSYS[J]. Automobile Gear, 2011(1): 43-49. (in Chinese)
- [13] 袁安富, 郑祺. 基于 APDL 的斜齿轮造型技术[J]. 机械传动, 2009, 33(2): 53-55.
YUAN Anfu, ZHENG Qi. Modeling technology of helical gear based on APDL[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2009, 33(2): 53-55. (in Chinese)
- [14] 张军, 兆文忠, 李永华, 等. 基于 APDL 高速铝合金车体参数化建模[J]. 大连交通大学学报, 2009, 30(4): 13-17.
ZHANG Jun, ZHAO Wenzhong, LI Yonghua, et al. Research on parameter modeling for aluminum alloy rail vehicle body[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2009, 30(4): 13-17. (in Chinese)
- [15] 酆仕云, 宁汝新, 徐劲祥, 等. 气动和结构多学科优化设计过程集成技术研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(4): 852-855.
LI Shiyun, NING Ruxin, XU Jinxiang, et al. Research of integration technology of multidisciplinary design optimization of aerodynamic and structure[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(4): 852-855. (in Chinese)