

航空发动机叶片CAD技术综述*

Review of CAD Technology in Aircraft Engine Blade

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 宋玉旺 胡毕富 席平



宋玉旺

北京航空航天大学博士 / 博士后在站,研究方向为复杂产品智能CAD建模,多学科设计优化等。

航空发动机是飞机的“心脏”。航空发动机研制技术复杂,投资巨大,周期长。各国航空发动机行业在突破航空发动机设计技术、材料科学技术和制造技术的同时,广泛采用CAD技术,大力推进产品的信息化。航空发动机叶片是航空燃气涡轮发动机中的关键零件,其中的高压涡轮叶片更是被誉为“现代制造业皇冠

上的明珠”,不仅因为其单个产品上万美元的价值,更因其集中体现了各项性能设计要求之间的矛盾。航空发动机叶片属于功能和结构都比较复杂的产品,既要工作在高温、高压和高负荷的条件下,又要具有高效率、小体积和低重量的特点。因此,航空发动机叶片设计问题受到行业内的重点关注^[1-4]。

设计取得了十分理想的效果。后来,Engineous已经发展成为用于大型复杂产品优化设计的软件平台iSIGHT。

2 R·R公司

20世纪60年代中期,开始在叶片的设计中应用CAD技术,完成了气动分析、应力分析、振动分析和造型设计,并将几何模型存储在数据库中用于加工检验。80年代中期,建成了关键零件的设计计算系统,将CAD技术扩展到了详细设计部门和制造部门,以CADDs为CAD三维建模软件,开发了RADIAL数据库作为CAD/CAM和技术系统的中心几何图档系统。80年代末期,实施发动机的并行工程,基于产品定义、设计过程定义和产品信息支持,建立了协同的计算机工作环境,具体进行了3-D离心压缩机叶轮优化。

3 PW公司

早在1965年即着手研究将CAD/CAM技术应用于航空燃气涡轮发动机的设计/制造中。1968年

国外航空发动机CAD技术简介

1 GE公司

于20世纪60年代后期开始了CAD技术在航空发动机研发中的应用,1980年建立了飞机发动机部门的CIMS,使生产率提高、成本降低。1985年,在发动机设计优化技术基础上,着手开发了一个用于设计优化、自动化集成优化的软件平台Engineous,将Engineous与自主研发的涡轮设计软件和非设计状态分析系统TDOD、压气机设计软件CUS等集成,在压气机和涡轮的

* 国家863高科技发展计划(2007AA04Z125)资助项目。

开发涡轮叶型设计系统 TADSYS, 使工程分析时间缩短了 5/6, 提高了设计质量, 增强了工程师的判断能力。1974 年进一步发展为包括气动设计在内的交互式涡轮设计系统。陆续开发出压气机设计系统 CAMD, 发动机结构处理系统 STAEBEC, 后来又启动了以用户满意度为核心的 Q+ (Quality Plus) 工程, 并开始采用团队 (Team) 的形式来管理发动机全生命周期内的一切经济技术活动, 目前已经发展成为以并行工程为核心的集成产品开发 (Integrated Product Development, IPD), 即运用并行工程思想, 以信息集成为基础, 把设计制造、用户支持等产品开发的各个环节集成到一个团队中, 通过不同专业间持续不断的交流来减少重复设计, 提高设计质量。

航空发动机叶片 CAD 技术发展及问题分析

我国的航空发动机研制能力亟需提高。当前, 我国航空发动机在研制水平上与国外发达国家尚有明显差距。西方国家的公司 3 年就可以研制出发动机, 即从确定一个型号立项到发动机整机出来, 而国内搞的两型发动机都是用时 18 年, 花了西方国家 6 倍的时间, 差距巨大^[5]。美国在涡轮发动机的 CAD 技术研究方面走在了世界前列。

1 美国的 IHPTET 计划^[6]

1988 年美国制定并实施了 IHPTET (The Integrated High Performance Turbine Engine Technology, 综合高性能涡轮发动机技术) 计划, 其中一个很重要的任务就是开展推进系统数值仿真计划 (Numerical Propulsion System Simulation, NPSS), 该计划的主要目标是通过高度可靠的多学科综合计算机仿真达到高度的系统分析能力, 以提高发动机设计质量, 降低研

制成本。该计划在 1997 年实现了发动机的一维仿真, 1999 年实现发动机的二维仿真, 计划在 2010 年实现三维动态多学科仿真, 并最终实现飞机 / 发动机综合仿真。据称, 这一计划一旦实现, 美国航空发动机的设计水平将实现一个新的飞跃, 预计可使发动机的研制成本再降低 40%。

2 我国的 APTD 计划^[7]

在吸取美国 IHPTET 计划的成功经验的基础上, 我国推出了 APTD (Advanced Propulsion Technologies Demonstration, 航空推进技术验证) 计划。APTD 是国家为发展先进航空发动机而推动的一项综合的系统性工程, 是一项不针对具体型号的发动机技术推进计划。希望通过 APTD 计划能形成一

3 航发叶片 CAD 技术问题分析

我国航空发动机叶片的设计, 在产品结构建模方面经历了从二维手工制图到二维计算机制图, 再到三维实体建模的转变; 在性能分析和验证上经历了从物理样机验证分析到与计算机辅助工程相结合的数字样机的转变。航空发动机叶片的设计, 是航空发动机的虚拟样机的关键部分之一, 是典型的多环节、多学科、多部门协作的功能和结构都比较复杂的产品。以涡轮叶片为例, 其结构的方案设计流程如图 1 所示。

叶片是发动机中最复杂的零件, 其设计质量和代价直接影响发动机的质量和代价。国外高水平航空发动机研制基于 2 点: 一是以不断更新发展的最新数学模型作为软件来提

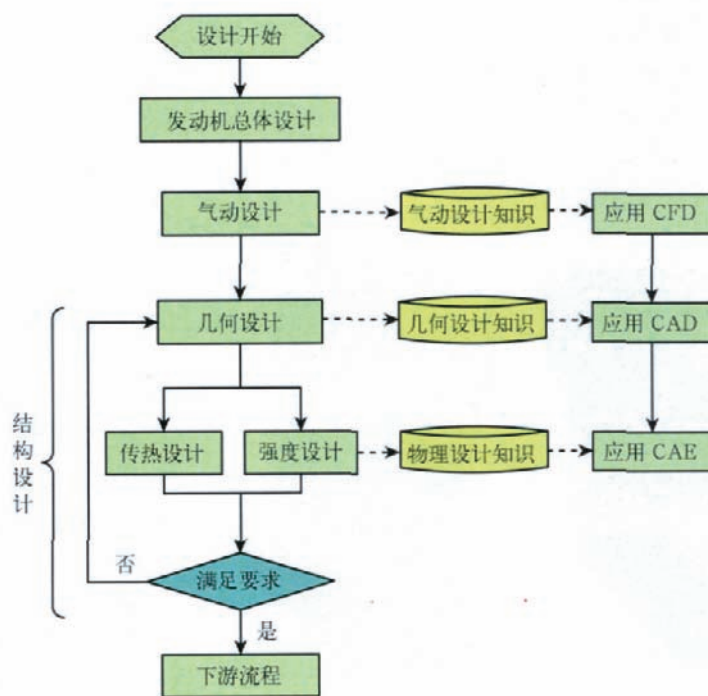


图1 航空发动机涡轮叶片设计流程图

套完整的以现代信息化手段作为平台的体系标准, 然后在整个航空发动机设计发展过程中不断地运用。在 APTD 计划中, 将航空发动机看作整个飞机的子系统, 即将其作为飞机的部件来综合考虑, 进行发动机先进航空推进技术的研究。

升它的设计能力; 二是以庞大的数据库作为支撑使模型能够有效地应用^[5]。这 2 点都需要研发工具和设计方法的支持, 对航空发动机叶片的设计更是如此。

传统的产品几何设计方法以及单纯依赖通用 CAD 平台的手工设

设计方式,已经无法满足叶片结构的快速几何设计要求,更加难以实现快速修改^[8]。在设计过程中采用大型CAD\CAE等设计软件,由于设计环节之间的耦合性不强,使每个设计环节成为独立的自动化设计信息孤岛。在上下游设计环节之间,设计数据利用率低下,需要设计人员做大量的、反复的数据重复提取工作。设计人员受到领域知识的限制,难以对上下游设计环节作出有效的支持,大大增加了设计难度和设计的重复度,直接影响涡轮叶片的设计质量和设计效率的提高。下面具体地分析当前我国航空发动机叶片设计过程中存在的设计问题。

(1) 在研发工具方面,需要研发开发工具来支撑叶片的结构设计。国外航空发动机设计公司与设计软件公司之间关系密切,甚至具有核心设计软件的完全产权。比如GE公司的Engineous软件本身就是公司的产品之一,并最终发展为商用的多学科优化设计软件。而国内的大型

品建模和参数修改问题、产品分析过程建模问题和自动化设计问题等。传统的产品几何设计方法和基于通用CAD平台的手工设计方式,已经无法满足涡轮叶片结构的快速几何设计,更加难以实现快速修改。

(2) 在知识工程(Knowledge Based Engineering, KBE)方面,基于多领域知识的产品建模较为困难,需要引入CAE\CAO等辅助设计方法软件进行优化设计。航空发动机涡轮叶片的设计性能要求较高,工作条件苛刻,结构十分复杂,每个子结构的形状和参数都对不止一个性能参数产生影响,如隔肋位置的改变,不仅影响最大应力的分布位置和大小,还影响了冷却效果和气动效率;气膜孔的数目增加,虽然增强了冷却气体和高温燃气的掺混作用,提高了冷却效果,但是却降低了叶片强度;增加扰流肋和扰流柱,不仅增加了冷气的流动时间和与叶片内型的接触面积,增强了冷却效果,也增加了叶片的重量。另外,叶片结构和参数的调整还直接影响

叶片固有频率。针对上述问题,国内外研究者虽然做了大量的实物试验和仿真试验并从中总结出了许多计算公式,但这些知识积累仅能用于方案设计阶段,即建立叶片结构的近似初始模型。图2所示为某发动机叶片的CAD仿真模型。在叶片详细设计阶段,仍需要基

于CAE软件进行性能分析,并根据计算结果调整叶片子结构的形状和几何参数以满足设计要求。

(3) 在设计流程方面,航空发动机叶片的CAD/CAE设计环节之间的耦合性差,设计流程的自动化程度较低,需要研究设计方法来支持产品

设计流程的自动化。在CAD/CAE设计过程中采用了主流通用设计软件,由于设计人员受到领域知识以及涡轮叶片多学科的复杂性的限制,使得每个设计环节成为独立的信息孤岛,难以对上下游设计环节作出有效的支持,设计数据利用率低下。需要设计人员做大量的、反复的模型重构、参数调整和数据重复提取工作,仍然停留在数字化设计流程的传统应用阶段。

(4) 在优化设计方面,需要引进计算机辅助优化方法。涡轮叶片的设计质量,即单位参数所达到的水平,主要取决于所采用的设计方法和所选择的参数接近于最优参数的程度。在涡轮叶片相应设计环节中,采用数字化设计技术就其本身来说是有好处和经济实效的,但不能大大缩减发动机研制所花费的时间和财力、物力,更不能从根本上提高产品的设计质量。涡轮叶片的性能设计需要大量设计方案进行比较分析,当产品性能不满足设计要求时,由于设计软件之间的非自动化,设计人员主要凭已有设计经验和准则人工调整设计参数;结构设计受到设计工作复杂、繁琐,设计的高难度、高复杂度和高强度的限制,难以满足性能设计的要求,对涡轮叶片的设计效率和设计质量产生了直接的影响。所以,应该采用计算机辅助优化方法,在计算机中实现方案选择,按照数学模型计算每个产品设计方案的全部特性。基于这些特性组成的优化准则,来进行产品的全面评价并选出最优方案。

我国航空发动机叶片CAD技术研究进展

为了解决上述航空发动机叶片的设计问题,提高涡轮叶片设计工作的自动化程度,必须深入总结和分析针对航空发动机叶片的CAD技术。国内的一些专家学者积极致力于航空发动机涡轮叶片CAD技术的研

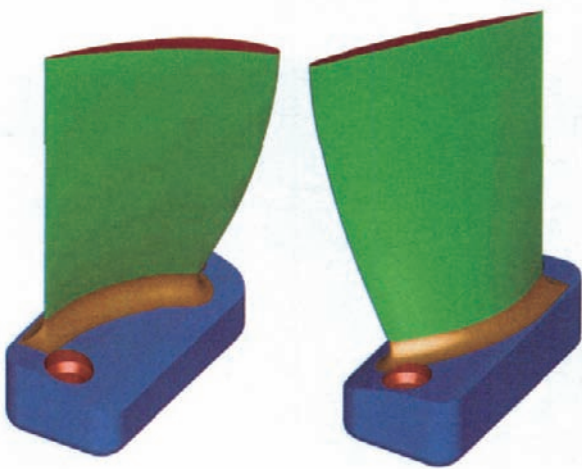


图2 发动机叶片CAD仿真模型

自主软件开发能力有限,在产品建模、性能分析和优化设计等方面,一般为主要引入核心CAD/CAE设计软件结合自主开发部分辅助设计软件的应用模式。数字化设计技术和软件的应用提高了设计效率,但是设计过程中仍然存在很多问题,如产

究与应用,解决了航空发动机叶片设计中的部分问题。研究的单位主要集中在清华大学、哈尔滨工业大学、株洲航空动力机械研究所、西北工业大学、南京航空航天大学 and 北京航空航天大学等6个单位。研究内容主要集中在3个方面:(1)叶型和叶身的几何表示;(2)叶片结构设计;(3)叶片综合优化设计。下面着重针对叶片设计过程中的几何建模问题和技术进行深入阐述。

1 叶型和叶身几何表示

叶型,即叶身截面线。叶型和叶身曲面的几何表示是叶片结构设计的前提。叶型和叶身曲面是一种复杂的、较为复杂的自由型曲线、曲面,不能用常规初等曲线、曲面来描述,它们的造型方法一直是人们研究的热点^[9]。叶身曲面由多条叶型作为基线积叠而成,分为线性积叠和非线性积叠^[10],其成型方法为蒙皮^[11]。涡轮叶片几何造型实质就是找到一种既能有效地满足形状表示和几何设计要求,又便于形状信息和产品数据交换的形状描述的数学方法来描述涡轮叶片曲面^[12]。

叶身曲面造型的难点在于前缘和尾缘等曲率急剧变化的地方易发生扭曲。哈尔滨工业大学的王刚等对叶身曲面几何表示进行了深入研究^[9,13-14],他研究了扭曲叶片的曲面造型,在柱面坐标系下采用双3次B样条曲面整体表示叶身曲面,并基于BP神经网络改进了叶身曲面在前缘和尾缘处的插值误差。NURBS方法表示灵活,具有局部性,统一了初等曲线、曲面和自由型曲线、曲面的精确表示,鉴于NURBS方法的这一系列优点,哈尔滨工业大学的李刚和王刚等,分别研究了叶身曲面基于NURBS的表示方法^[14-15]。北京航空航天的王春侠等^[16],讨论了叶身建模过程中的离散点处理等关键问题,采用双3次B样条拟合了叶片型面的空间样条曲面模型。西

北工业大学的田庆^[17]基于UG开发了叶身造型系统,重点研究了截面线的叶型曲线拼接问题。白瑀^[18]和刘维伟^[19]等针对叶片造型易发生扭曲的现象进行了网格扭曲的校正方法研究,详细分析了叶身曲面造型中的问题和原因,采用厚度特征点参数调整方法和叶型整体参数化方法,基于等参数或等弧长放样成型叶身曲面,解决了叶身曲面造型的扭曲问题。

2 叶片结构设计

在叶片结构设计方面,一般都是以针对叶片结构特征而预定义的专用设计特征库为基础进行结构的快速设计,它涉及的关键技术有特征分析、特征建模和特征参数化等。西北工业大学的虞跨海^[20]基于解析以及特征造型进行叶片的参数化设计,实现了叶身、缘板、榫头和回流通道(隔肋)等特征的参数化设计,属于交互式的构造过程参数化。北京航空航天的赵炜^[21]等基于STEP在金银花平台上进行叶片的结构设计研究,对叶片的结构进行了设计特征分析,给出了叶片结构设计系统架构。王荣桥等^[22-23]则开发了压气机叶片的结构设计系统,以用户自定义特征为基础,在叶片结构优化方面做了初步探索。文献^[24]采用双3次B样条进行叶身曲面的表示,并针对涡轮的结构将涡轮叶片进行特征分类、特征表示和特征参数的详细分析,采用基于特征的参数化设计方法实现涡轮叶片的参数化设计,完成了参数化设计系统的初步设计,具体实现了叶身内外型实体、缘板、榫头和气膜孔的等壁厚叶片的结构参数化设计,属于交互式的离线参数化设计。文献^[8]则进一步对系统进行详尽完善,又实现了隔肋、扰流柱和排气尾缝等特征参数化设计。

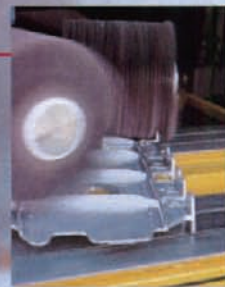
在变壁厚叶片的结构参数化设计方面,文献^[25]提出了基于中弧线的变壁厚设计算法,以每层叶型的6个壁厚标志点处的厚度参数控制叶

用于飞机制造业

大平面金属表面研磨、拉毛,铣加工成形件去毛刺。

典型客户:

- Airbus
- Boeing



祥生 中国区授权代理

杭州祥生砂光机制造有限公司

地址: 浙江杭州市余杭区瓶窑镇彭安路53号
电话: 0571-88524900 88524367
传真: 0571-88524278
邮编: 311115
网址: <http://www.xs-sander.com>
E-mail: sander@vip.163.com
<http://www.xs-sander.com>

片壁厚,该算法可设计出工程中常见的4种壁厚分布叶片。中弧线计算是实现变壁厚叶片结构设计的前提。在中弧线计算方面,西北工业大学的白瑀等^[18]提出基于内切等距的迭代中弧线算法,但当叶盆曲线和叶背曲线在内切圆切点处的2个切矢之间夹角过小时,方法可能无解,且计算量大。张力宁等对此进行了改进,提出了基于等距线的中弧线算法^[26]。但是,等距线方法通过有限点插值而成型中弧线,型值点密度的可控性较差。因此,文献^[25]提出了基于管道交线投影法的中弧线算法,显著提高了中弧线的计算效率,并基于管道交线投影法计算的中弧线提出并实现了变壁厚涡轮叶片结构设计。

在叶片结构设计重用方面,西北工业大学的夏禹^[27]提出基于知识的广义特征信息模型和记录设计历史的广义特征CSG树的表示方法,广义特征信息模型和广义特征CSG树存储于XML格式的广义特征信息表中,实现了设计过程的保存。北京航空航天大学赵晖^[28],结合航空发动机涡轮叶片的结构特点,在特征提取、特征属性和操作分析的基础上,提出了基于特征和面向对象表示的模型重用方法。

3 叶片综合优化设计

叶片综合优化设计的必要前提,是叶型参数化和叶身曲面参数化。叶型参数化设计方法一般有分段表示法和整体表示法2种。从几何表示上,叶型截面参数化设计方法可划分为解析法(一般为3次或5次多项式,或Hicks-Henne函数)、Bezier、B样条和NURBS 4种方法。从实现方式上可分为程序参数化、在线交互式参数化和离线式参数化3种。叶型程序参数化是叶片综合优化设计的关键环节。

南京航空航天大学的周正贵等^[5-7,29]采用多项式参数化压气机叶片叶型,结合单纯形数值优化方法、

混合遗传算法,并以Hicks-Henne函数参数化方法表示叶型,结合并行遗传算法,进行了压气机叶片的自动优化设计。

西北工业大学的虞跨海等^[20,30]采用5次多项式参数化叶型曲线的方法,进行了涡轮叶片三维优化设计研究。王婧超等^[31]针对涡轮叶片多场耦合问题进行了深入研究,以单元线性插值法完成气动、传热和结构学科间载荷信息的传递,并采用5次多项式方法进行三维涡轮叶片的参数化建模,联合多岛遗传及二序列规划法对问题进行寻优。尚仁操等^[32]采用参数造型法和Bezier曲线进行了叶片初步造型,并利用多目标遗传算法和序列二次算法组合优化算法,通过调节吸力面和压力面的关键控制点参数对其压力损失和转折角进行优化。

北京航空航天大学邓家提等^[10,33]在涡轮叶片一维气动方案多学科优化设计基础上,又基于Bezier结合圆弧分段表示参数化叶型,进行了涡轮叶片的多学科优化设计。朱剑^[34]和马洪波^[35]等采用基于B样条曲线的12参数法进行叶型参数化设计,并基于该参数化设计方法进一步实现了航发涡轮叶片的三维气动优化设计。该方法以叶型设计参数为几何设计参数控制叶型,并以程序参数化结合离线参数化设计的混合方式实现叶片的参数化设计,提高了设计自由度,更符合设计习惯。

清华大学的陈波等^[11,36-37]和西北工业大学的刘波等^[38]基于NURBS进行叶型截面线的参数化设计,并分别基于人工神经网络进行了叶片的气动优化设计研究。

株洲航空动力机械研究所吴立强等^[39],对涡轮叶片的多学科优化设计进行了研究,定义了26个设计变量描述涡轮叶片叶型;蔡显新等^[40-41]则对整体离心叶轮进行了形状优化设计研究。

结束语

航空发动机是“现代制造业的皇冠”,而叶片是其关键零件,国内外专家学者对叶片的设计作了大量的研究工作。要提高叶片各主要设计环节的工作自动化程度,必须深入研究设计方法、技术,改进设计手段,下面对我国航空发动机叶片CAD研究技术存在的问题进行分析。

(1)叶型与叶身曲面的几何表示和参数化取得了一定进展,主流方法为以B样条和NURBS曲线、曲面为基础的各段曲线叶型表示方法,由数据传递带来的叶型、叶身曲面光滑对气动设计精度影响将是有待研究的问题。

(2)叶片结构设计已经奠定了较好的基础,但是对于约束较为模糊而要求又比较严格的自由曲面特征的建模仍研究不足,比如弯背叶片和叶片的自由型伸根等。这些复杂特征的快速精确的几何建模仍需要进行深入研究。

(3)叶片综合优化设计方面,目前实现的都是以气动设计为主的多学科优化设计,更复杂的结构综合优化研究仍然较少,原因是部分关键技术,如几何模型精简、快速稳定的有限元网格划分算法、边界条件定义和加载、多学科耦合、多学科间信息传递和复杂系统多学科优化效率等关键问题仍有待深入研究。

如何基于已有的大型CAD\CAE\CAO软件自主开发部分关键软件和程序搭建集成设计系统,如何快速地建立叶片的复杂自动优化设计流程,如何基于已有设计实例总结出相应设计知识和方法进行设计重用,将是解决航空发动机叶片设计问题的重点研究方向。

本文有参考文献41篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要请向本刊编辑部索取。(责编 玉龙)