

透平机械CAD/CAM应用技术*

陈林根 张俊迈

(武汉海军工程学院)

[提要] 本文介绍了英、美、日三国用于透平机械设计的CAD/CAM系统。根据这些系统对软件开发的总要求,提出了适用于燃气和蒸汽透平设计计算和满足绘图功能要求的十四类软件模块的设想。这些软件的研制、开发,能推动我国透平机械设计制造技术朝着CAD/CAM/NCM方向发展。

主题词 计算机 辅助设计 涡轮

一、引言

透平机械在航海、航空及电力工业中发挥着重要的作用。透平机械的设计是一个十分复杂的过程,包括气动计算、热传导计算和结构强度校核等等。为了获得最佳的设计,达到低成本快速设计的目的,且保证透平机械的性能和可靠性,必须引进CAD/CAM技术^[1]。

近几年来,国外不少院校、厂家和研究单位已经开发了用于透平机械的综合CAD/CAM系统。这些系统,有的针对透平中某些特殊部件的设计制造而建立;有的则针对透平整机而开发;有的用于航空燃气透平的设计和制造;有的用于电站大型蒸汽透平的设计制造;还有的则用于内燃机的增压涡轮设计制造。本文首先介绍英、美、日各国的几个代表性实例,并就CAD系统软件开发设想了十四类软件模块。

二、英、美、日透平机械CAD/CAM技术实例

1. 英国

POLYSURF是剑桥CAD中心的工作系统^[2]。该系统允许工程技术人员利用显示器的交互显示功能去设计适当的部件,绘制最终校验用的设计图及制作加工部件用的

*本文在中国现代设计法研究会CAD学会首届学术年会(1987年武汉)上宣读。本文收到日期:1987年4月20日

数控带。POLYSURF系统由下列各成分组合起来:各种平面、柱面、圆锥面、球面、各种板状柱面(直纹面)、回转面及多元曲面。在设计阶段,透平制造用的大部分模具和叶片都很容易通过这些基本成份的组合来加以描述。在加工阶段,用区域间隙法生成刀具轨迹。使用该系统,包括出图在内的一个典型叶片部件的设计阶段,一般只需几天时间。文献[2]中给出了叶片及其失腊模的设计实例。

多年来,ROLLS-ROYCE公司已建立了一大批计算机辅助设施,设立了若干个子系统。COMET(计算机化发动机工艺)是解决航空透平机零部件CAD/CAM问题的一个系统^[3],可用于透平叶片几何形状的技术设计、生产计划安排、数控带的制备及工艺检验等。该系统能完成包括三坐标几何形状设计,气体载荷应力分析,用有限差法得出叶片温度分布曲线,及包括各种振动分析在内的叶型型线设计。在型线设计作适当调整修改的基础上,可以得到一套详细的工程图,该系统又可根据零件生产进度、材料和成品控制、批量及制造工艺等将图纸发送给制造部门。然后,用实用三维数控铣削程序来制造整个模型,再由熔模“失腊”工艺来完成叶片的精密铸造。最后由计算机研制的探针检验法检验叶型型线,及叶片的扭转、倾斜等指标。

Bath大学研制了用于内燃机透平增压器的综合CAD程序包,并设计和试验了几种先进的透平转子^[4,5]。研制的转子和标准的径向流动结构形式显著不同,该程序包可提供良好的流量特性和效率。通过这些程序,可以从基本性能数据出发进行设计工作。首先确定总的转子尺寸,随后设计叶片和喷嘴的详细形状,最终绘出工作图,提供适于数控机床使用的技术数据。

2. 美国

GE公司在1978年建立了Calma IAG三维交互绘图系统,已经开发和正在实现计算机综合技术总体规划,它把工程、制造、商务和自动计划管理系统综合成一个交互网络系统。GE公司已经建立了用于轴流透平的初步设计和性能预测的透平设计系统TDS^[6-10]。TDS是把气动、热传导和结构分析与外形处理一体化的对话式模块化系统,其中每个模块涉及设计过程的一个主要方面。该系统可自动生成通流部份的点阵模型、叶型型面气体温度分布,构作叶型型线,子午面流场分布,可构作三维叶栅。

GE公司一个蒸汽透平分部(MST)的三维交互计算机绘图系统(IAG),用于进行透平机械装置的热平衡计算,流量分配计算及制图等平面问题,所需时间可以从常规计算的三至四天缩短到四个小时。MST的IAG系统用于三维设计时,更显示出了其功效。该系统被用于透平整体外形设计,透平提升机构的设计,转子和叶片的设计及制图、蒸汽控制凸轮的设计等。由IAG系统得到的数据用以产生数控带,实现CAD/CAM/NCM一体化。使用IAG系统极大地提高了生产率,节省了大量的资金。据报道,仅MST分部应用IAG的第一年,就节省了资金五十七万五千美元^[11]。

西屋公司1979年配置了自动绘图软件和ICEM系统。ICEM系统运用共享数据库内的应用软件管理系统,提供用户使用几何造型、设计/绘图、有限元模型和分析,以及数控加工等功能^[11],已用于透平机构设计。

3. 日本

日立制作所自1971年开始使用大型蒸汽透平计算机合理组装系统^[12]。该系统有零部件发送管理系统,用以保证数据可靠性的尺寸参数机器汇总系统及零部件维护管理系统等子系统。另外还有用来进行设计尺寸检验、加工实测尺寸检验和评价及加工完成后最终间隙预测的转子间隙管理系统。使用该系统,提高了间隙精度,确保合理间隙的性能,从而使可靠性提高,并且缩短了交货期。

近几年,日立制作所研制了一系列蒸汽透平的对话式设计系统。透平的设计是在数据库(包括性能、形状和解析计算数据)基础上的数据传递、图形处理程序和网络分割程序以及用于流动解析计算(包括子午面流动计算,叶栅流动计算和考虑各种损失后的性能预测)组成。运用这类系统设计时间可缩短二分之一^[13~15]。目前,日立制作所正在研制将此类设计与透平的流体力学计算,振动强度计算及热传导计算相结合,发展成为CAE系统^[16]。

三菱重工的高砂研究所自1973年开始研究燃气透平的对话式设计系统TDSYS^[17]。该系统分为四个系统,分别完成透平通流部分设计,叶型气动力学设计,冷却计算及叶片振动和强度计算。TDSYS系统将设计周期缩短到原有的五分之一以下,并且使得实现最佳设计成为可能。

针对大容量火电站蒸汽透平发展带来的叶片设计问题,从1970年开始,三菱重工着手研制了从蒸汽透平叶片的开发设计到生产所需图纸的绘制,直至制造加工一体化的对话式自动设计系统BLADECS^[18]。该系统通过对话形式有效地完成下列工作:基于三元流动的流型设计,叶片成型设计,以FEM为基础的振动强度设计。完成设计后,在数据文件里记录下有关的叶片基本设计数据,进入生产设计的系统,通过规格化处理,确定叶片重要尺寸,接着一方面完成制图工作,一方面产生数控带,并绘出模具图形,交付生产。

三、透平机械CAD/CAM软件开发

研究各种CAD/CAM系统,可以看出对系统软件的总要求为:软件应能完成初步设计(技术设计和工艺设计),进行性能预测,也能用于设计参数的研究,还能完成现有透平的改型设计或现有透平中某些级或级组的重新设计。软件应能选择通流部分形状,并对不同的通流部分实现设计和非设计工况性能预测和分析,能通过人机对话进行寻优计算。对按模型级法设计的蒸汽透平,软件应能根据母型机及现有叶栅的试验性能曲线查找出几何和物理基本相似的叶栅组合。对一般按速度三角形法设计的透平,能自动或通过对话完成型线的优化设计,叶片扭转规律的优化设计,三元流各截面的迭代计算分析。对燃气涡轮级,有冷却措施的应能进行热传导分析和冷却流量的分布情况分析。软件还能完成叶片、轮盘、轴系及外缸的应力分析和寿命估算。所有的计算数据应能实现自动传递。在需要时,可通过对话人为地加以辨别、控制。

根根以上总要求，常用透平机械CAD/CAM软件包，除了通用的各种程序外，还有相应的其他程序配合。根据各类系统的特点，作者设想应由以下十四类软件模块组成，其总体构成如图 1 所示。

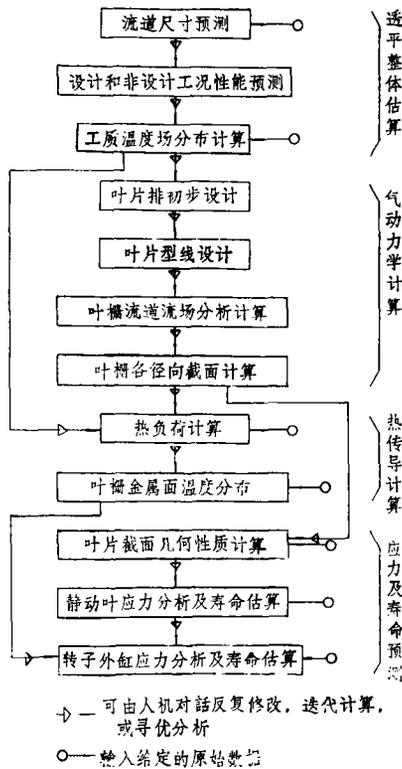


图 1 软件模块总体构成框图

透平叶片热应力计算。因此，需要求解作为边界条件的温度场分布。温度场的计算包括主流和冷却流量在内的能量平衡方程，在每个叶片排的进出口站上得到。每一个计算站上应给出两种温度场分布，一是静止部件分析用的最大峰值分布，一是转子分析用的平均周向分布。

4. 选定叶片排（型栅）的初步设计模块。根据计算所得的叶片排进出口的气流角度，马赫数、进口压力、叶片个数和圆周速度选择模型级组。可以由设计人员在终端进行对话式操作来实现，同时也可采用数值计算方法实现自动寻优。该模块应能进行选定叶片排在轮缘、轮壳及平均直径处的几何参数和气动参数计算。

5. 叶栅成型计算模块。对于重新设计的叶栅，可以根据多种方法来成型。如控制厚度分布，最大厚度，型线曲率及安装角来产生叶型；或输入描述叶型外型的坐标数据进行成型；还可以由满足某些规定条件的叶型中线再迭加标准叶型厚度分布得到。该模块也应能实现效率和/或重量的优化设计。

1. 通流部分选择及其在设计和非设计工况下初步性能评估模块。该模块应在终端输出通流部分子午面的大致轮廓，由设计人员根据外观的具体要求及加工可行性用光笔进行修改，直至外观满足要求为止。通流部分的性能评估要根据不同的算法（模型级法、速度三角形法）进行。该模块应适合于寻优计算。

2. 给定流道的设计工况和非设计工况性能分析模块。该模块能解一轴对称的无粘性稳定流，且略去径向速度分量的准二维流体力学方程。忽略径向分量造成的影响可由控制流道扩角来控制。可以分轴向（按叶片排）和径向（按几组流管）计算站逐次进行计算。在此种假设下，只需进行径向和轴向动量方程及连续方程的迭代求解。

3. 计算气体温度场分布程序模块。

对燃气涡轮而言，热传导计算是十分重要的，这影响到冷却方式、冷却流量，以至

6. 流场分布计算模块。为了确定叶型面的压力分布,以评估叶片截面性能,须测叶片热效率,可采用流线曲率法(*SLC*)求解稳定可压缩流无粘性方程。应能在终端修改计算用网格的形状参数。迭代因子也能通过人机对话形式修改,以确保*SLC*算法的迅速收敛性能。计算结果给出叶片表面的马赫数分布。

7. 沿径向不同截面计算模块。可先获得最佳的扭曲规律,然后以平均直径处的叶型为基础,作插值计算,得到不同叶高截面处的叶型。根据扭曲规律的不同,可以用线性成型法,只要使用轮缘和轮壳处的截面参数即可;或用三点插值法,得到非线性的扭曲成型。

8. 叶片热负荷计算模块。由强迫对流换热和燃烧室(对燃气涡轮而言)辐射效应引起的热负荷,计算叶片金属温度及冷却流量。可以只计算平均截面的局部热传导系数,对流换热和辐射系数分布也可按平均截面计算,只要假定单位高度热负荷为某一定值。为简化起见,也可以不用附面层法计算对流换热系数,而是可以对进出口边附近及负压面和压力面假定不同的模型用简化关系式计算。

9. 叶片排平均截面处金属温度估算模块。对燃气涡轮叶片而言,可用叶片上、中、下三个截面的热负荷作平均值以计算温度分布,然后确定冷却效应,冷却流孔的面积及冷却流量。可根据每个叶片的工质流量,温度场分布,热负荷密度及冷却剂进口参数用描述复杂冷却系统及其效应的不同简化模型进行上述计算。

10. 叶片应力分析用的截面参数计算模块。要计算出叶片截面积,最大和最小转动惯量,最小惯性轴的角度,以及计算弯曲应力用的三个特殊点坐标。计算中,可根据不同的方法处理具有冷却孔和槽道的叶片截面。可以事先计算出径向冷却通道的坐标装置;对于周向和切向冷却通道,也可以从终端给出所在截面的位置。

11. 设计工况静、动叶应力分析模块。对动叶来讲,离心应力是主要因素。静叶的计算重点是气流所引起的弯曲应力。另外还有动叶自振频率的计算。所有计算可以借助于*FEM*进行分析,单元划分可以终端输入,也应能自动分割。在计算中应充分注意空心叶片的特点,如是压力容器式结构,应计算其变形量等等。同时也应能进行初步的疲劳寿命估算。

12. 转子和缸套的应力计算模块。转子的临界转速、转子的应力计算及外缸套的热应力计算可借助于*FEM-BEM*实现。应能通过人机对话形式实现转子和外缸套的成形及分析。

13. 冷凝器设计模块。对蒸汽透平,常把冷凝器与汽轮机一体化计算。该模块应能确定冷凝器尺寸热交换表面积,冷却水量,泵功率,且能进行各运行工况下的性能核算。该模块也应适于寻优计算。

14. **数据库。**应具备各种现有叶栅的性能和几何数据,转子的剖面成形,缸套的外部布置等数据,使设计人员可以在终端屏幕上查找并且将各种配件组合,产生一定的图样,也可根据需要用光笔修改图案。应用同样的数据,也可产生NC带用来实现NCM。

四、结 论

透平机械CAD/CAM技术是正在迅速发展、应用的技术之一。为了加快设计速度,提高质量,减少工本,充分发挥现代技术的作用,应用透平CAD/CAM/NCM技术是十分必要的。作者认为,充分开发类似的软件功能,提高设计计算的计算机化,并逐步实现CAD/CAM/NCM应用,应是我国透平机械发展的目标之一。唯有如此,方能赶上二十一世纪CAD/CAM/NCM技术的发展及其应用水平。

参 考 文 献

- [1] 裘昌泳:“CAD/CAM及其在汽轮机方面的应用”,汽轮机技术,1985年,№6。
- [2] Flutter A.G.:“涡轮机部件的计算机辅助设计和数控制造”,*Proceedings of the 3rd International IFIF/IFAC Conference on Programming Languages for Machine Tools, June, 1976*
- [3] 赖利 K.P.:“英国Rolls-Royce公司的航空发动机压缩机和涡轮叶片的计算机辅助设计和制造”,*Conference on CAM, Jane, 1978*
- [4] Wallance F.J.,Whitfield A.,Atkey R.:“Computer Aided Design of Radial and Mixed Flow Compressors”,*Journal of Computer Aided Design, 1975, №3*
- [5] Baines N.C., Wallace F.J., Whitfield A.:“Computer Aided Design of Mixed Flow Turbines for Turbochargers”,*ASME Journal of Engineering for Power, July, 1979*
- [6] Thomas K.M., Piewdl J.J.:“An Automated Interactive Design System for Advanced Gas Turbines”,*ASME Gas Turbine Conference & Products Show, 1974*
- [7] Lopatka R.S.:“Gas Turbine Engine CAD/CAM”,*IBM Engine Conference, 1976*
- [8] Nilson E. N.:“Solving the CAD/CAM Interface Problems at Pratt & Whitney Aircraft”,*CAD/CAM IV (Soc.Mfg.Eng.) 1976*
- [9] Wysong R.R.:“Turbine Design System”,*F33615-75-C-2073, 1978*

- [10] Wysong R.R.: "TDS—A Preliminary Design System for Turbines", Aerospace Meeting Town & Country, 1978
- [11] Gingrich J.K., Winter R.L.: "Innovations in CAD of Marine Turbines Using Interactive Graphics", Naval Engineers Journal, April, 1980
- [12] 杉山俊介: "大型蒸气タービンの计算机シミュレーション組立", 1979
- [13] 鹿野, ほか 5名: "对话形蒸气タービン设计, システムの開発", 机构论, 1982, №9
- [14] 佐藤, 青木: "タービン翼列内部流オレの计算", 航空機计算空气力学シンポジウム论文集 (1984-11)。
- [15] Tsuzuki K.: "Interactive Design System for Turbomachinery", ASME. Interl. Comp. Eng. Conf. & Exhibit, 1983, 3
- [16] 鹿野芳雄: "タービン设计への数值解析手法の应用", タービン机械, 1985, №11
- [17] 青木素直, ほか3名: "ガスタービン对话形设计システム (TDSYS)", 三菱重工技报, 1981, №1
- [18] "汽轮机叶片CAD/CAM系统研究", 三菱重工技报, 1984.

(孙显辉 编辑)

Application Technology of CAD/CAM for Turbomachinery

Chen Lingen, Zhang Junmai

(Naval Engineering Institute)

Synopsis

This paper describes the CAD/CAM system used in the design of turbomachinery in Britain, America and Japan. Proposals are given of 14 kinds of software modules suitable for use in the design and calculation of gas and steam turbines and in meeting the drawing functional requirements. The research and development of these softwares can promote the use of CAD/CAM/NCM techniques in turbomachinery design and manufacture in China.

Key words: computer aided design turbine