三维曲面插值在发动机涡轮叶片有限元温度场计算中的应用

沈 毅
(中国航空工业沈阳发动机设计研究所,沈阳 110015)

摘要:利用拉格朗日插值法建立了工程实际应用中的三维曲面插值模型,解决了利用有限元的方法进行发动机涡轮叶片温度场计算的边界条件问题。

关键词:三维曲面插值模型 热分析 边界条件 涡轮

A 3D Interpolation Model of Twist Blade Boundary Conditions in Thermal Analysis of Turbine

Shen Yi
(Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015)

Abstract: A numerical method was presented to load thermal boundary conditions onto surfaces of twist blade. The loading of thermal boundary conditions was achieved by using a three-dimensional interpolation model, that is, the LAGRANGE formula is performed to interpolate along span wise and stream wise orderly. Calculated results were presented for a typical vane, and those showed effectiveness and reasonable temperature distribution.

Key words: 3D interpolation model; thermal analysis; boundary condition; turbine

1 引言

高温涡轮技术是现代发动机发展的关键技术,是决定高性能发动机研制成败的重要因素。发动机热端部件之一的涡轮叶片的温度分布,将在研制过程中起着极为重要的作用。尤其是推重比为10的发动机,涡轮进口燃气温度高达1850~2050K,涡轮的工作温度已远远超过了材料的允许温度。由于受材料耐高温能力的限制,高温涡轮叶片均采用先进的冷却技术,而预估的温度结果直接影响到叶片的冷却结构设计方法和使用寿命。

发动机涡轮叶片的温度预估问题就是导热问题。导热问题的数值解法之一为有限元法,适用于热分析工作,当今流行的商业软件如ideas和marc都采用这种方法,但是都不能快速、准确地加载边界条件。以往需先进行插值计算,得到每一个节点的数值再加载费时,费力,出错率较高。有限元热分析计算的边界条件三维曲面插值程序可以快速、准确、高效地计算、加载边界条件,有效地解决了上述问题。这两种软件在导热温度场计算的前、后处理及解算器方面各有所长,但都无法快速、准确地沿三维曲面空间变化的换热边界条件加载。即使这些软件的最新版本在这方面有所突破,也无法解决类似发动机涡轮叶片这样复杂的曲面问题。针对上述问题,通过解读商业软件的输入格式,在此基础上进行二次开发,使得沿三维曲面空间变化的换热边界条件加载得以自动实现,并在科研生产实践中得到了应用。

2 涡轮叶片有限元温度场计算的基本内容

涡轮叶片有限元温度场计算的基本内容包括热分析物理建模、有限元网格的划分、叶片相关表面的

收稿日期:2002-05-08

作者简介:沈毅,女,工程师,1971年出生,1993年毕业于西北工业大学,1998年北京航空航天大学工学硕士,从事航空发动机空气系统设计和部件热分析研究。

有限元节点或面上的边界条件加载、温度场计算及计算结果的后处理,如图1所示。

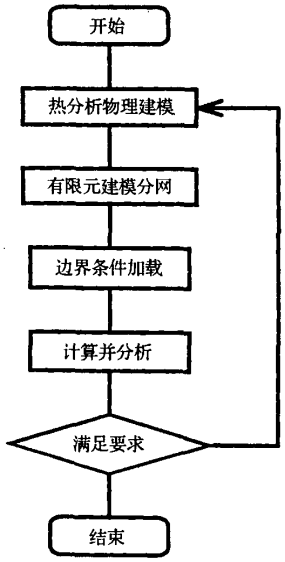


图1 涡轮叶片有限元温度场计算流程示意图

涡轮叶片温度场计算属于导热问题。处理导热问题时,计算对象的边界条件有三类。

(1) 第一类边界条件,给定物体边界上的温度 t_w;

(2) 第二类边界条件,给定物体边界上的热流 q;

(3) 第三类边界条件,给定物体边界上的换热系数 h 和环境温度 t_f。

涡轮叶片的边界条件多为第三类边界条件。

3 三维曲面插值的基本方法

发动机涡轮叶片外表面是复杂的弯扭曲面。通过涡轮叶片外表面的换热系数计算程序,可以得到给定截面上的给定坐标的换热系数和环境温度。也就是说,换热系数和环境温度的计算是沿着叶高分截面进行的,在每一个截面上,计算结果随叶盆、叶背上给定站点的坐标变化。但涡轮叶片经过有限元分网后,换热表面上需要加载边界条件的边界节点与已经计算出结果的站点坐标通常不一致,不能满足叶片三维有限元温度场计算的需要,需将计算结果插值到对应曲面的有限元网格节点上。

采用拉格朗日(LAGRANGE)二次插值的插值方法,即可解决三维曲面插值问题。

插值的基本原则如下:

(1) 分别以有限元节点的相对弧长和半径为自变量,进行换热系数和恢复温度的插值;

(2) 在任一截面上,从前缘到尾缘,分别沿叶背、叶盆方向插值,以相对弧长为自变量;

(3) 在径向方向,以有限元节点半径为自变量,以上一步的插值结果为样本点插值,得到各有限元节点的最终插值结果;

(4) 当有限元节点在所有样本点的截面之外时,则依据基本原则(2),在最近的截面上插值,其结果为最终插值结果;

(5) 本方法的插值顺序为由叶顶到叶根,从前缘到尾缘,先叶背再叶盆,如图2所示。

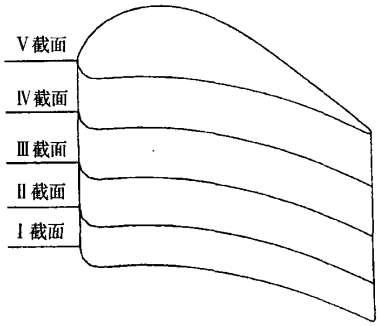


图2 插值顺序示意图

4 涡轮叶片温度场的计算

冷却空气从叶片上缘板流入叶片内腔,由下缘板流出。叶身处在主流道,高温燃气冲刷叶身外表面。计算的关键在于将叶身表面换热系数和换热温度的插值结果加载到有限元模型上,如图3所示。边界条件分区示意图如图4所示。插值结果如图5所示。计算结果如图6~8所示。

图5中的方形代表已知计算结果的Ⅴ截面,圆形代表已知计算结果的Ⅰ截面,正三角形代表任意截面的插值结果。经过三维曲面插值,其结果均在Ⅰ、Ⅴ截面的计算结果中间,而且与几何位置相邻近截面的结果相近,这说明插值的结果是正确的。

从图6~8中可以看出,涡轮叶片的温度分布与主流道燃气的温度分布是一致的,即中截面附近是温度比较高的区域,上、下缘板附近由于冷气的作用,温度较低。

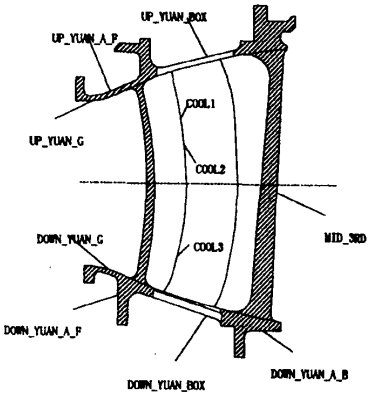


图 3 计算模型及边界条件示意图

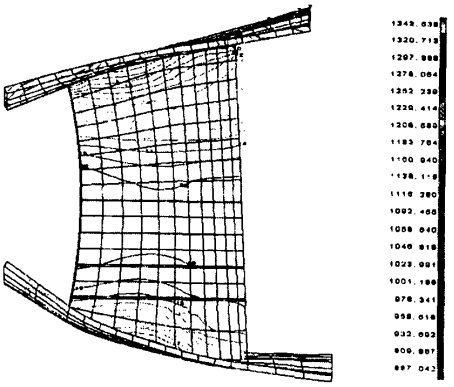


图 6 叶片温度分布的等值线

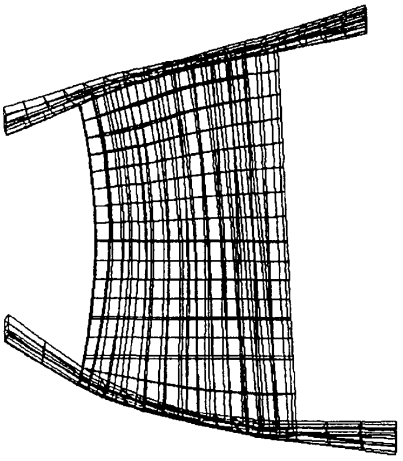


图 4 有限元模型示意图

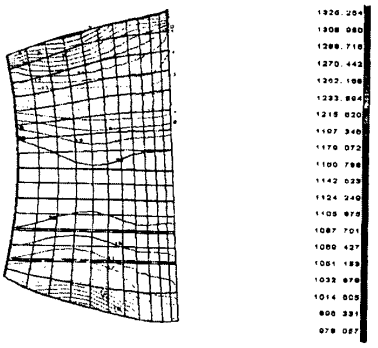


图 7 叶背温度分布的等值线

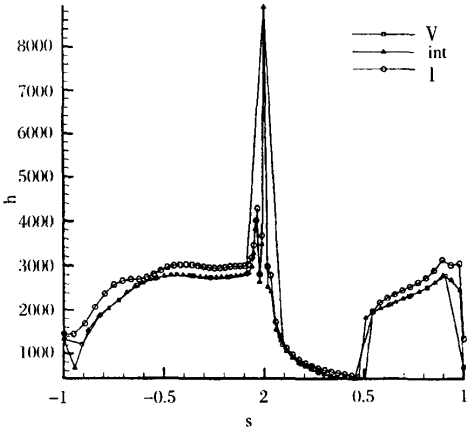


图 5 任意截面的插值结果

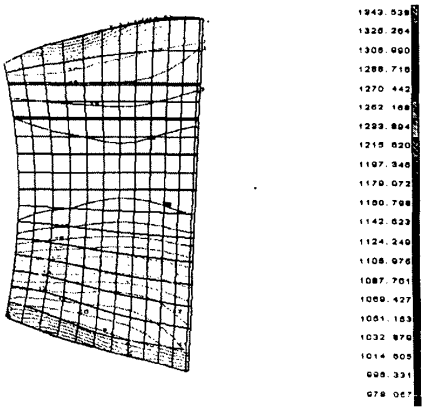


图 8 叶盆温度分布的等值线 (下转第 58 页)

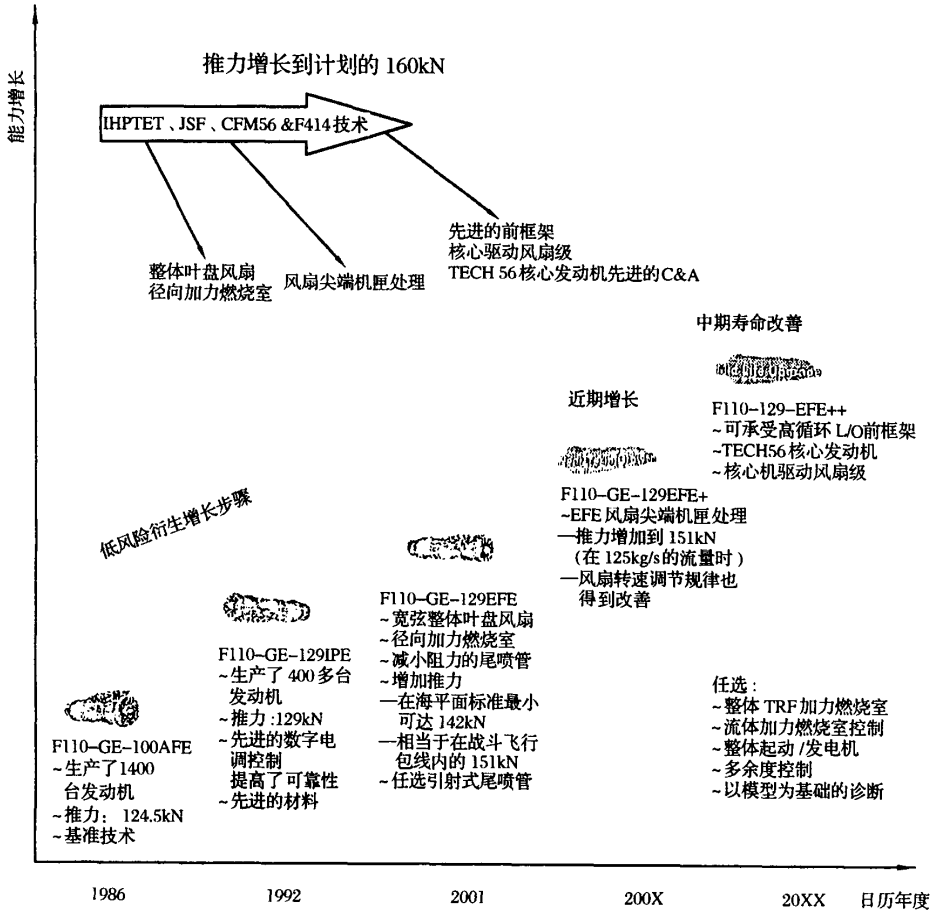
和冷却技术等一系列部件改进措施，显著地改善了性能、减轻了重量、提高了寿命、降低了使用和维护成本。

F110 系列发动机的研制动向，请见“F110 发动机发展途径”图。从图中可以看出其未来 10 年及其以后的发展方向。从中也可体会到 GE 公司是如何将低风险型号衍生方法与各种预研计划及其成熟的技术成果巧妙结合的。

一个性能先进的核心机，不断吸纳各种预研计划产生的成熟的先进技术，可以产生一系列性能先进、可靠性好、寿命长、使用维护成本低、研制风险小的发动机。这些成熟的先进技术包括三维计算流体力学设计计算方法、先进的结构设计、先进的复合材料、不断完善的部件、先进的工艺等。这就是 GE 公司 F110 的发展途径。

（沈迪刚　刘红霞　梁春华）

F110 发动机发展途径



（上接第 45 页）

5 结论

综上所述，三维曲面插值方法有效解决了工程实际中涡轮叶片三维温度场计算遇到的问题，弥补了目前应用的商业软件的不足，并在相关商业软件基础上进行了二次开发，做了有益的尝试。

致谢

本研究工作得到了陆海鹰的指导、于霄的合作与支持，在此致谢。