

文章编号: 1000-8055(2007)07-1050-05

学科间载荷参数空间 插值传递方法

李立州¹, 王婧超², 吕震宙¹, 岳珠峰²

(1. 西北工业大学 航空学院; 2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710072)

摘 要: 针对多学科优化分析中面面耦合学科网格间载荷传递的问题, 提出了在参数空间中的三次函数插值传递方法. 该方法将三维空间的源学科载荷点投影到二维参数空间平面上, 用三次插值函数对目标点载荷进行计算. 此方法解决了叶片表面弯曲对载荷传递精度的影响. 某涡轮叶片温度传递的结果表明本文的方法具有很高的精度.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 多学科优化设计; 载荷传递; 参数空间

中图分类号: V231. 9

文献标识码: A

A load interpolation transfer method among disciplines in parametric space

LI Li-zhou¹, WANG Jing-chao², LÜ Zhen-zhou¹, YUE Zhu-feng²

(1. School of Aviation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Mechanics Civil Engineering and Architecture, Northwestern
Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The multidisciplinary analysis (MDA) and optimization (MDO) of turbine blades introduce the needs of load transfer between computation fluid dynamics (CFD) models and computation structural mechanics (CSM) models, as meshes are mostly different on the disciplinary coupling interfaces. The direct interpolation method is the first and easiest method considered for this purpose. But this method requires fine meshes to reduce the influence of geometric curvature on transfer precision, which in turn will block the whole MDO process. In this paper an interpolation method in parametric space was proposed to transfer the loads. The coupled nodes of the dissimilarly meshed, the disciplinary interfaces were mapped into a flat parametric space in the method. There, the loads were transferred. During calculating load of a target node parameterized, several source nodes were selected in a small area around the target point. The load distribution in the area was fitted by a cubic function. Then, the load of the target point was calculated by the function. For the load are transferred in the flat parametric space in the method, the influence of geometric curvature on the interpolation precision is minimized, and the transfer accuracy is good enough even for coarse interface meshes.

Key words: aerospace propulsion system; multidisciplinary design optimization; load transfer; parametric space

收稿日期: 2006-06-12; **修订日期:** 2006-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(50375124)

作者简介: 李立州(1977-), 男, 山西太原人, 博士生, 主要从事结构设计方面的研究. 通讯地址: 西北工业大学 410 信箱, E-mail: lilizhou@163.com.

多学科设计优化考虑学科之间的耦合关系,因此,需要在各个学科之间进行数据传递.传递主要包括两种类型:a) 载荷传递;b) 变形传递^[1-5].载荷传递指温度和气压等不需要调整网格模型的耦合量的传递.变形传递指会引起模型的几何变形且需要调整网格模型的耦合信息的传递,通常是指结构变形.近 30 多年来,国外航空航天领域在耦合信息传递方面做了大量的工作,文献[1,4]针对飞机多学科优化问题将气压从流场传递到结构模型,文献[2]给出了一个简单结构的温度传递过程,文献[3-5]将结构变形传递到流场网格模型中.通过这些研究,产生了诸多耦合信息的传递方法,并成功地用于诸如 HSCT (High-Speed Civil Transport)^[6-7],Business Jet^[5,8]等一系列优化设计问题.然而,国内在这些方面研究较少,没有形成系统有效的方法.

本文作者曾试图用面面直接插值方法将某涡轮叶片气动温度传递到结构分析模型,然而结果不是十分理想.分析认为,导致误差的原因有:1) 各学科模型的匹配程度;2) 学科分析模型中的网格密度;3) 插值点几何面的弯曲程度;4) 载荷沿几何面变化剧烈程度.其中,3) 和 4) 是面面直接插值方法难以克服的障碍.为克服面面直接插值方法对几何面的弯曲程度敏感的缺陷,本文提出了一种在参数空间进行载荷插值传递的方法.该方法将载荷信息投影到参数空间,并在那里用高次函数进行插值传递.该方法被应用到了涡轮叶片温度传递中.

1 载荷参数空间插值传递方法

网格节点模型是数值分析方法计算和数据存储的基础,因此,学科之间载荷传递只能通过耦合学科网格节点之间的关系来实现.同面面直接插值一样,本文的载荷参数空间传递插值方法也是通过学科界面网格节点之间的关系实现的,不同之处在于,本文方法将所有学科耦合界面的三维空间节点投影到二维参数空间平面上,并在那里进行载荷数据传递.数据传递可以用插值法,也可以用拟合法.由于耦合界面被投影到参数空间平面上,该方法克服了几何面弯曲对插值精度的影响.

1.1 载荷参数空间插值传递方法具体步骤

(1) 将各个学科耦合面上的节点 $P(x, y, z)$ 投影到参数空间^[9-11],即,建立影射关系 $P(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$,或 $x = x(u, v), y = y$

$(u, v), z = z(u, v)$.该参数空间平面是通过将耦合界面投影到一个平面定义的(见图 1).适当的选择投影方法,可以将载荷空间分布变的较为平坦,从而提高载荷传递的精度.

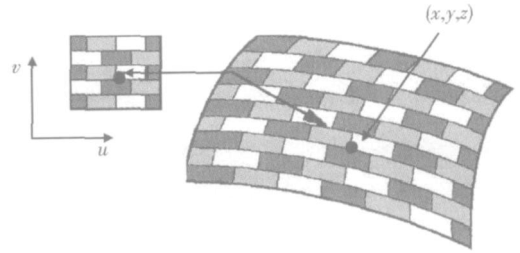


图 1 三维空间点 (x, y, z) 到二维参数空间点 (u, v) 的投影关系

Fig. 1 Projection of a 3D point (x, y, z) to 2D parametric space

(2) 在参数空间中,对目标学科节点 $P(u_p, v_p)$,从源学科节点中选出 n 个距离最近的点 $b_i(u_i, v_i), i = 1, 2, \dots, n$.

(3) 将结点 b_i 的参数坐标 (u_i, v_i) 和载荷 $T_i, i = 1, 2, \dots, n$ 带入二元三次插值函数,并以最小二乘法求得函数的系数 $a_j, (j = 1, 2, \dots, 10)$.插值函数的形式为

$$T(u, v) = a_1 + a_2 u + a_3 v + a_4 u^2 + a_5 uv + a_6 v^2 + a_7 u^3 + a_8 u^2 v + a_9 v^2 u + a_{10} v^3$$

(4) 将目标节点 $P(u_p, v_p)$ 的参数坐标 (u_p, v_p) 和求得系数 a_j 值代入插值函数 $T(u, v)$,就可求得目标点的载荷 T_p .

(5) 逐一求得目标学科的耦合界面所有节点的载荷值.

根据以上的步骤编写用于载荷传递的程序.

1.2 载荷传递误差估计方法

采用插值函数拟合误差来估计目标节点载荷传递误差.将距目标节点 $P(u_p, v_p)$ 最近 n 个节点 $b_i(u_i, v_i)$ 的参数坐标值 (u_i, v_i) 和求解后的系数值 a_j 带入温度拟合函数 $T(u, v)$,求得节点 $b_i(u_i, v_i)$ 的拟合温度 T'_i .目标节点 $P(u_p, v_p)$ 载荷传递的绝对误差 ERR_p^{abs} 可由下式估计

$$ERR_p^{abs} = \max\{\text{abs}(T'_1 - T_1), \text{abs}(T'_2 - T_2), \dots, \text{abs}(T'_n - T_n)\}.$$

目标节点 $P(u_p, v_p)$ 载荷传递的相对误差 ERR_p^{pre} 可由下式估计

$$ERR_p^{pre} = \max\{\text{abs}((T'_1 - T_1)/T_1), \text{abs}((T'_2 - T_2)/T_2), \dots, \text{abs}((T'_n - T_n)/T_n)\}.$$

2 某涡轮叶片温度载荷传递与
结果分析

某叶片进行多学科设计优化,需要将温度从
气动分析的结果传递到结构模型中.叶片表面的
气动网格和结构网格如图 2 和图 3 所示.叶片气
动温度如图 4 和图 5 所示.将叶片表面吸力面和

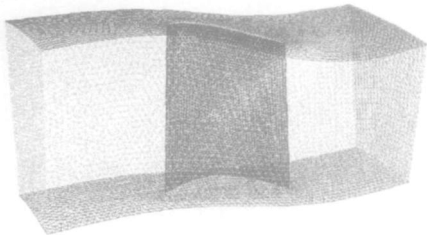


图 2 叶片气动网格
Fig. 2 Aerodynamics mesh

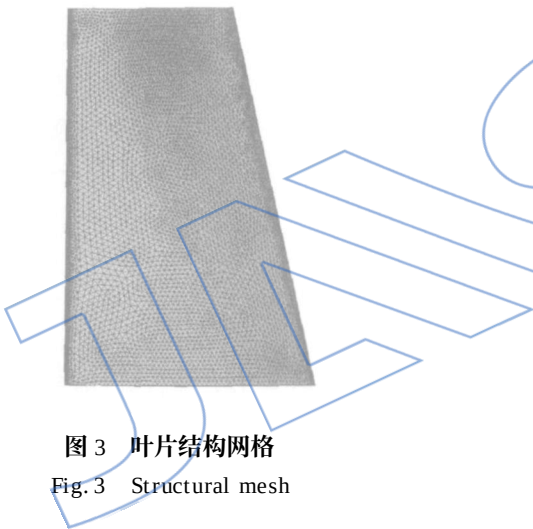


图 3 叶片结构网格
Fig. 3 Structural mesh

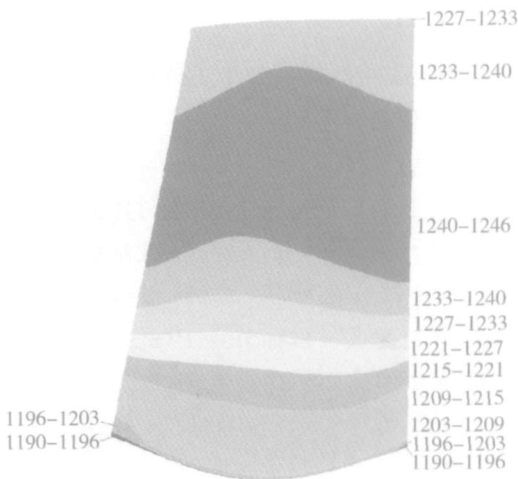


图 4 吸力面气动温度 (K)
Fig. 4 Aerodynamics temperature of
suction surface (K)

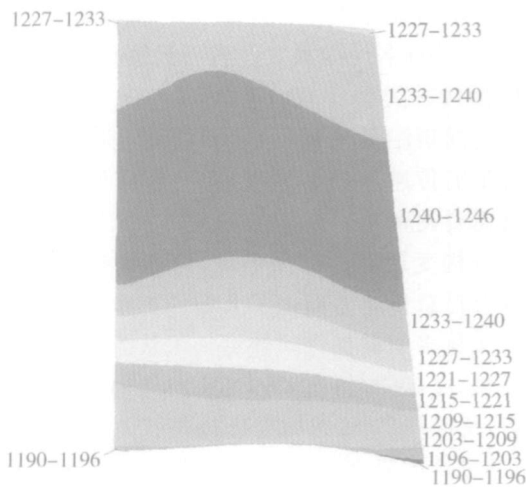


图 5 压力面气动温度 (K)
Fig. 5 Aerodynamics temperature of
pressure surface (K)

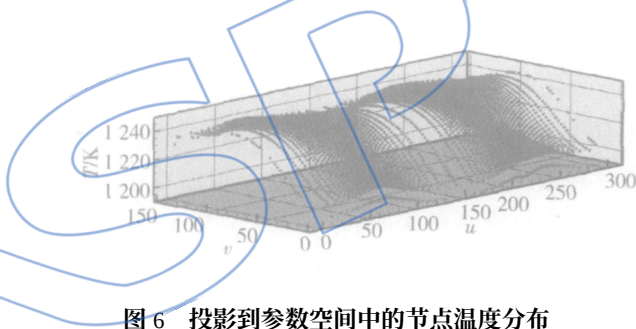


图 6 投影到参数空间中的节点温度分布
Fig. 6 Blade nodes and their temperature
projected into parametric space

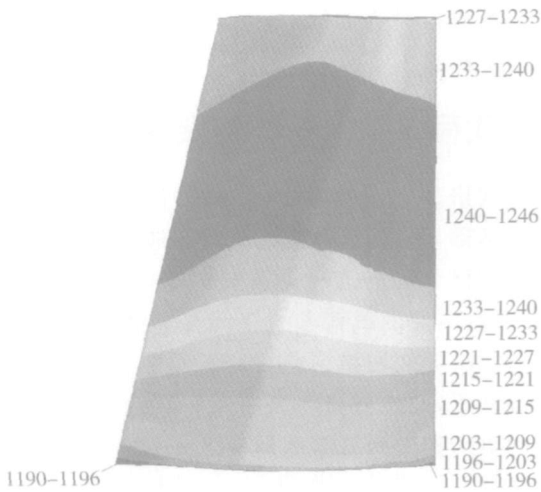


图 7 吸力面结构温度 (K)
Fig. 7 Structural temperature of
suction surface (K)

压力面的所有节点及气动温度投影到一个参数
空间(见图 6),当然也可以对吸力面和压力面分别
投影,但在温度传递时就需要分片传递.传递到结

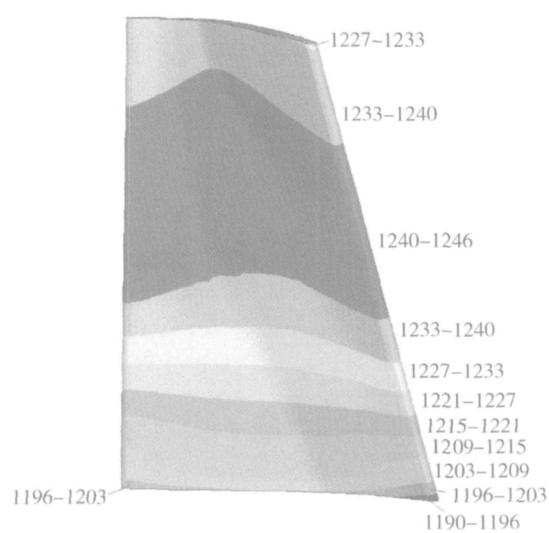


图 8 压力面结构温度 (K)

Fig.8 Structural temperature of pressure surface (K)

构场中的温度如图 7 和图 8 所示. 比较图 4 和图 5 以及图 7 和图 8 可以发现,结构模型中的温度同气动计算出的结果图形分布一致.

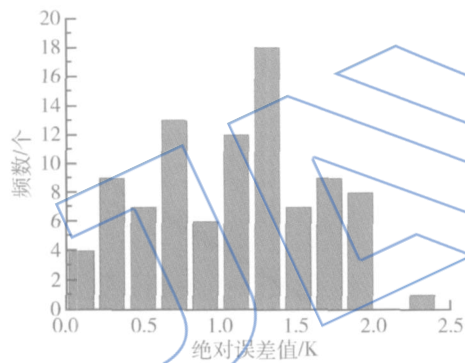


图 9 叶根节点温度传递绝对误差统计结果

Fig.9 Temperature transfer absolute errors at the root of the blade

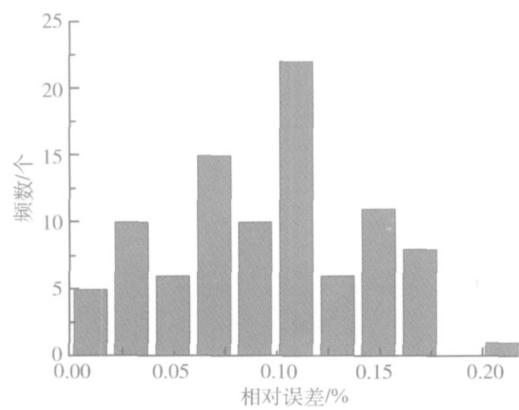


图 10 叶根节点温度传递相对误差统计结果

Fig.10 Temperature transfer relative errors at the root of the blade

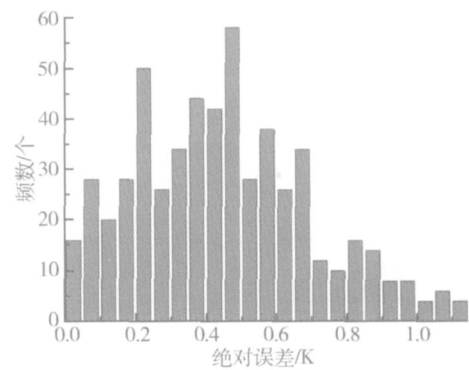


图 11 叶根 1/3 处节点温度传递绝对误差统计结果

Fig.11 Temperature transfer absolute errors at 1/3 of the blade

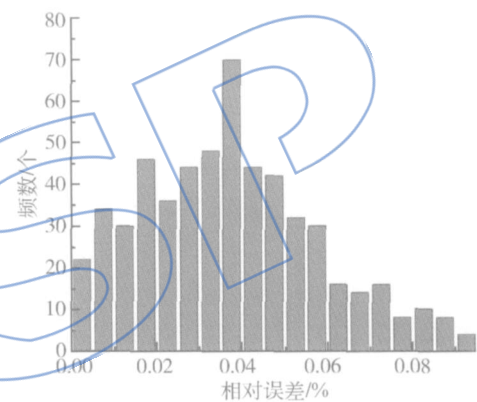


图 12 叶根 1/3 处节点温度传递相对误差统计结果

Fig.12 Temperature transfer relative errors at 1/3 of the blade

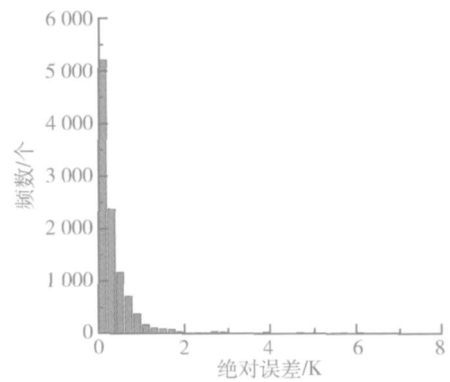


图 13 叶片所有节点温度传递绝对误差统计结果

Fig.13 Temperature transfer absolute errors of the blade

为确定叶片温度传递精度,本文估计了结构模型耦合界面所有节点的温度传递误差.表 1 简要给出了整个叶片所有节点温度传递误差统计结

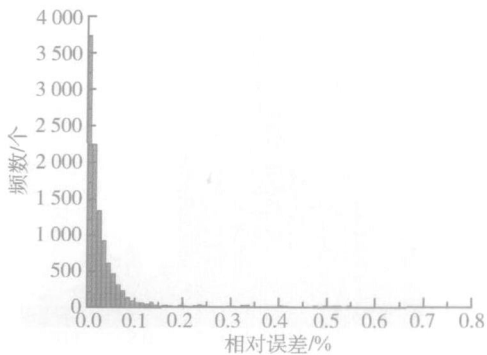


图 14 叶片所有节点温度传递相对误差统计结果
Fig. 14 Temperature transfer relative errors
of the blade

果,最大绝对误差为 9.19 K,最大相对误差为 0.7625 %。图 9~图 14 分别给出了影响整个叶身及强度重要部位的传递误差统计。图 9 和图 10 给出了叶根的误差分布,绝对误差在 0~2.5 K 内,相对误差在 0~0.22 % 内。图 11 和图 12 给出了叶根 1/3 处传递误差分布,传递误差在 0~1.2 K,相对误差在 0~0.1 % 内。图 13 和图 14 给出了叶片所有点传递误差分布,传递误差在 0~9.2 K,相对误差在 0~0.8 % 内,但大多数点的绝对误差在 0~2.0 K,相对误差在 0~0.15 % 内。据此可知,本文的方法是可以用来传递温度载荷。

表 1 叶片温度传递误差统计

Table 1 Temperature transfer errors of the whole blade

	气动计算 温度 T_i /K	拟合 温度 T_f /K	绝对 误差 /K	相对 误差 /%
绝对误差最大点	1 205.137	1 195.947	9.190	0.7625
相对误差最大点	1 205.137	1 195.947	9.190	0.7625
平均误差	-	-	0.5910	0.0499

3 结 论

为克服面面直接插值方法对几何面的弯曲程度敏感的缺陷,本文提出了一种在参数空间插值的载荷传递的方法。该方法将载荷信息投影到参数空间平面上,并在那里进行插值传递。投影过程

将空间的学科耦合界面扯平为一个平面,解决了插值点附近几何弯曲对插值精度的影响。涡轮叶片温度传递算例的结果表明本文的方法具有很高的精度。

参考文献:

[1] Samareh J A. A unified approach to modeling multidisciplinary interactions[R]. AIAA-2000-4704.
[2] Bock S. Approach for coupled heat transfer/ heat flux calculations[C] //Paper of the RTO AVT Symposium on Advanced Flow Management: Part B - Heat transfer and Cooling in Propulsion and Power Systems. Norway: 2001.
[3] Samareh J A. Aerodynamic shape optimization based on free-form deformation[C] //10th AIAA/ ISSMO Multidisciplinary Analyses and Optimization Conference. New York: 2004 ,AIAA-2004-4630.
[4] Samareh J A. Multidisciplinary aerodynamic-structural shape optimization using deformation (MASSOUD) [C] // 8th AIAA/ NASA/ USAF/ ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analyses and Optimization. Long Beach: 2000 ,AIAA-2000-4911.
[5] Hur J. Parametric mesh deformation for sensitivity analysis and design of a joined-wing aircraft [C] //42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: 2000 , AIAA-2004-116.
[6] Walsh J L. Multidisciplinary high-fidelity analysis and optimization of aerospace vehicles Part I: formulation [R]. AIAA-2000-0418.
[7] Walsh J L. Multidisciplinary high-fidelity analysis and optimization of aerospace vehicles Part II: preliminary results [R]. AIAA-2000-0419.
[8] Alonso J J. pyMDO: A framework for high-fidelity multidisciplinary optimization[C] //10th AIAA/ ISSMO Multidisciplinary Analyses and Optimization Conference. New York:2004 ,AIAA-2004-4480.
[9] 王国瑾,汪国昭,郑建民. 计算机辅助几何设计[M]. 北京: 高等教育出版社,2001.
[10] Floater M S. Parametrization and smooth approximation of surface triangulations [J]. Computer Aided Geometric Design, 1977, 14 :231-250.
[11] 秦绪佳,王青,华炜,等. 网格模型的局部编辑算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2004,16(4) :445-447.