

文章编号: 1000-8055(2007)08-1346-06

涡轮冷却叶片参数化建模及多学科设计优化

虞跨海, 岳珠峰

(西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710072)

摘 要: 建立了一个涉及结构、气动、传热、振动、强度和寿命等学科的涡轮冷却叶片多学科设计优化系统,进行了单孔薄壁冷却叶片的多学科设计优化。提出了单孔薄壁冷却叶片的参数化造型方法,叶片叶型采用 5 次多项式构造,气动与传热为三维耦合分析;叶片体积平均温度与最高温度为优化目标,强度、振动和寿命等学科相关参数为约束,模拟退火与序列二次规划组合算法进行叶片参数空间寻优,在保持冷却气体流量不变的条件下,优化提高了冷却效果,降低了叶片材料的性能要求。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 冷却叶片; 多学科设计优化; 参数化建模; 耦合分析

中图分类号: V232

文献标识码: A

Parametric modeling and multidisciplinary design optimization for cooling turbine blade

YU Kua-hai, YUE Zhu-feng

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

Abstract: A multidisciplinary design optimization system for gas turbine blade, which involves structure, aerodynamic, heat transfer, vibration and service life, etc, has been developed, serving the purpose of multidisciplinary design optimization of single-hole thin wall cooling blade. A parametric modeling method was also proposed for single-hole thin wall cooling blade. The blade surface geometry is defined by five-order polynomials, while 3-D coupling analysis was made for aerodynamic and heat transfer. The average temperature and maximum temperature of blade volume were optimized, with aerodynamic, vibration and service life as the constraints. A combined algorithm of annealing simulation and SQP (Sequential Quadratic Programming) was used to optimize the blade parameters. While the flow rate of cooling air was kept unchanged, the cooling effect was improved and the performance requirement on the blade materials was reduced.

Key words: aerospace propulsion system; cooling turbine blade; multidisciplinary design optimization (MDO); parametric modeling design; coupling analysis

航空发动机涡轮入口温度的不断提高,对涡轮叶片材料与结构提出了挑战,目前涡轮叶片主要采用以空气为冷却介质的冷却方式,但是冷却气体的引入又降低了涡轮的热能效率,因此如

何提高冷却气体的冷却效率是涡轮叶片结构设计的重要内容。

国内外许多学者在涡轮冷却叶片的设计优化方面做了许多的工作,取得了一定的进展,Carlo

收稿日期: 2006-08-08; 修订日期: 2006-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(50375124, 10472094), 航空科学基金(03B53003)

作者简介: 虞跨海(1982-), 男, 浙江义乌人, 博士生, 主要从事多学科设计优化、结构设计与优化方面工作。

Carcasci^[1]等人进行了燃气涡轮静子叶片内冷却设计的研究,但是只分析了一维冷却叶片模型;Shuye Teng^[2]等人研究了气膜孔形状对涡轮叶片传热系数分布的影响问题;Louis^[3]等人进行了涡轮叶片冷却通道内部传热、流动和压力分布的数值测试;Talya^[4,5]等人进行了二维、三维冷却叶片优化.但是这些研究基本上都是基于单学科的,气动与传热的分析是分离的,在三维叶片的温度场计算上采用由二维到三维扩展的方法.

涡轮叶片设计是一个典型的多学科设计问题,涉及气动、传热、结构、强度、振动和寿命等多个学科,必须采用多学科设计优化的方法才能获得叶片的最佳设计方案.

1 涡轮冷却叶片参数化建模

涡轮叶片参数化过程中,叶栅的压力面与吸力面型线的选择对叶片的气动性能有很大的影响.5次多项式作为叶片压力面和吸力面型线可以减少流动损失,文献[6]中给出了叶栅几何参数与多项式系数之间的关系.

压力面和吸力面均为 5 次多项式

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + a_5 x^5 \tag{1}$$

如图 1 所示为叶型及中弧线示意图,根据中弧线的定义得到叶片中弧线求解方程组

$$\begin{cases} (y_0 - f(x_1)) f'(x_1) = x_1 - x_0 \\ (y_0 - g(x_2)) g'(x_2) = x_2 - x_0 \\ (x_1 - x_0)^2 + (f(x_1) - y_0)^2 = \\ (x_2 - x_0)^2 + (g(x_2) - y_0)^2 \end{cases} \tag{2}$$

其中, $[x_1, f(x_1)]$ 与 $[x_2, g(x_2)]$ 分别是压力面和吸力面上相对应的任意的一对内切圆切点, (x_0, y_0) 是与 x_1 和 y_1 相对应的内切圆的圆心坐标.

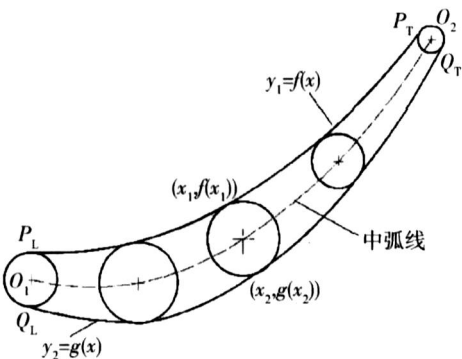


图 1 叶型及中弧线示意图
Fig. 1 Blade profile and camber line

直接求解方程组(2)比较困难,通过数值迭代方法求解得到中弧线上一系列离散点,再用 5 次多项式进行最小二乘法拟合得到各项系数:

$$\|r(y^*)\|_2 = \min \|r(y)\|_2 \tag{3}$$

在 $\{1, x, x^2, x^3, x^4, x^5\}$ 空间范围内,有:

$$A^T A C = A^T y \tag{4}$$

式中 C 为 5 次多项式系数向量,图 2 所示为求解得到的叶片两个不同截面的中弧线.

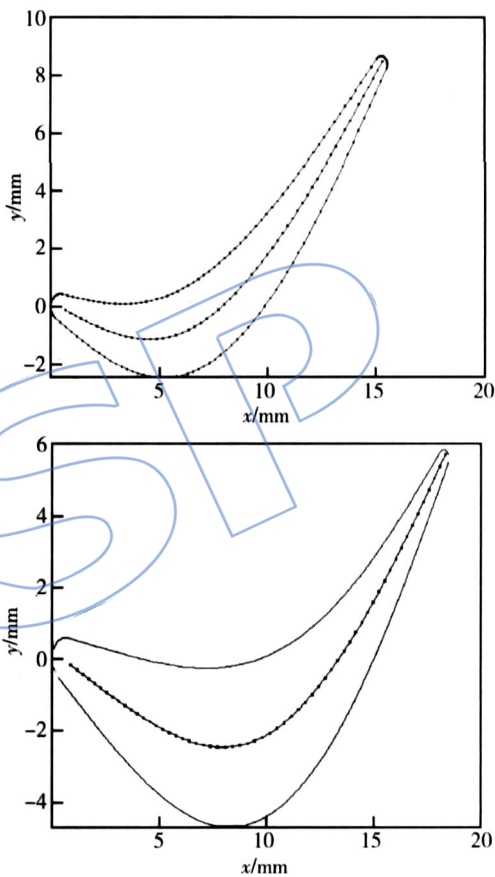


图 2 叶型型面中弧线

Fig. 2 Camber line of blade cascade

计算得到中弧线方程之后,沿中弧线给出壁面厚度分布函数,可以建立单孔薄壁冷却叶片参数化模型(图 3(a));通过圆心在中弧线上的定位,给出相应的圆半径,可以建立多孔直流冷却叶片参数化模型(图 3(b)).本文选取单孔薄壁冷却叶片进行了多学科设计优化.

2 各学科分析及优化策略

涡轮冷却叶片的优化涉及结构、气动、传热、强度、振动和寿命等多个学科,求解学科之间的耦合关系,是实现多学科设计优化的关键.本文的研究是建立在对叶片外形进行设计优化并获得理想气动外形的基础之上^[7],针对前述参数化方法建立的单孔薄壁冷却叶片,以冷却效果为优化目标

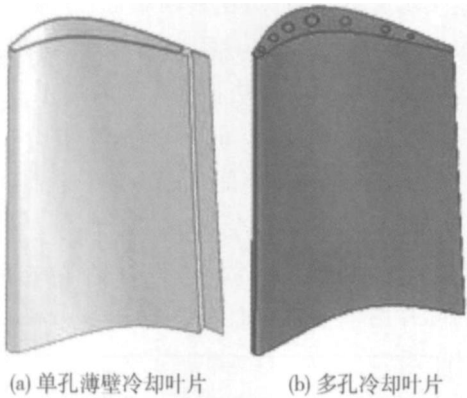


图 3 冷却叶片参数化模型

Fig. 3 Parametric cooling blade models

进行优化,优化过程中保持叶身外形不变,只改变叶片冷却内腔形状.

表 1 材料热导率及比热容随温度变化情况

温度/ °C	100	200	300	400	500	600	700	800	900
热导率/ (W/ cm · K)	13.39	15.07	16.32	17.58	19.25	20.57	21.77	23.02	24.70
比热容/ (J/ kg · K)	638	661	668	654	654	662	668	673	721

冷却叶片几何结构复杂,包含叶片内冷通道、主流通道、叶片固体区域,在网格的划分上难度较大,文中流体域与固体域均采用四面体非结构网格划分,网格总数约 100 万.流固耦合分析的结果,通过数据信息的传递应用于结构分析.由于流场与结构分析采用不同的计算软件,可能导致其分析模型网格划分的不一致,需要通过网格节点线性插值的方法进行温度与气压载荷的传递;为了提高精度,本文通过保持叶片气动分析与结构分析网格的一致性来保证载荷信息传递的高精度.如图 4 所示为载荷信息传递前后叶片温度分布情况,温度载荷在两个不同分析模型上的传递具有很高的精度.

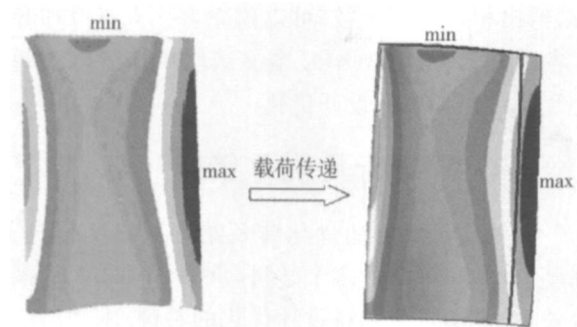


图 4 温度信息传递

Fig. 4 Transfer of temperature data

气动与传热实现了三维耦合分析计算,并根据计算结果将叶片内部温度载荷及叶片表面气压载荷传递到结构分析模型当中,强度分析的结果为寿命预测提供依据,振动分析考虑了温度与转动对固有频率的影响.

2.1 叶片三维流固耦合分析

涡轮叶片内外流场的三维流固耦合计算,可以更准确地得到叶片内部的温度场分布情况,为强度分析提供更可靠的计算数据.采用 Fluent 计算软件进行流固耦合分析,流体域计算采用三维稳态可压缩气体 N-S 方程和 $k-\epsilon$ 湍流模型进行求解;流体与固体之间的热交换采用标准壁面函数方法求解能量方程.分析过程中考虑了叶片温度对材料性能的影响,如表 1 所示.

2.2 强度、振动和寿命分析

采用有限元方法对涡轮叶片进行强度和振动分析.强度分析考虑了温度分布不均引起的应力应变以及叶片高速旋转产生的离心力,要求叶片内最大当量应力小于材料的屈服拉伸应力.

叶片振动分析采用了叶根固支和叶尖自由的悬臂梁式振动^[8-9],由于叶片的温度以及叶片转速对振动频率的影响,振动分析时在模型上施加了温度载荷以及叶片转速,确保分析结果更加准确可靠.

利用强度计算的结果,采用基于 Manson-Coffin 方程的经验公式方法对涡轮叶片低循环疲劳寿命进行近似预测,预测模型^[10]为

$$\sigma = 2 E \times [0.0417(2 N_f)^{-0.7013} + 0.0129(2 N_f)^{-0.1976}]$$

(5)

式中 σ 为强度分析求得的等效应力, N_f 为预测低循环疲劳寿命, E 为材料的平均弹性模量.

2.3 冷却叶片多学科设计优化策略

标准优化方法能较全面地反映问题的各个方面,可保证求解过程收敛到全局最优解,是目前用得最多的优化方法.根据各学科分析模型,本文采用标准优化方法进行了单孔薄壁冷却叶片的多学科设计优化,实现了各学科分析软件在多学科优化平台下的集成,图 5 所示为叶片多学科设计优

化(MDO)流程.

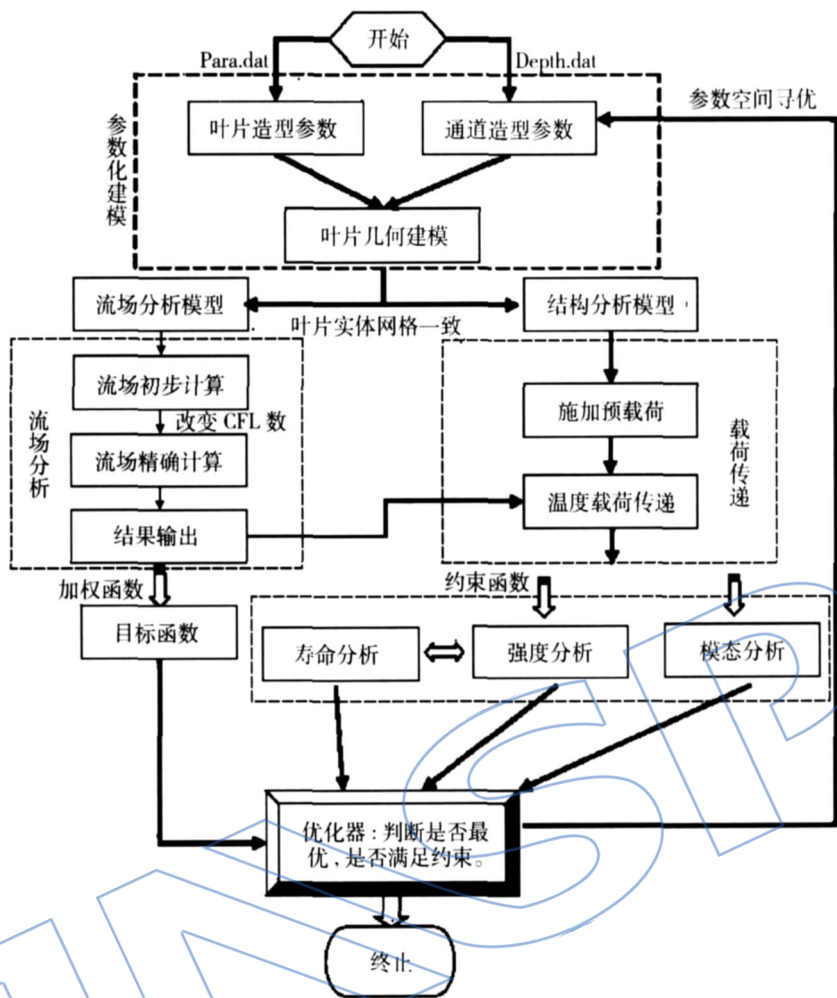


图 5 冷却叶片多学科设计优化流程图
Fig. 5 MDO flow chart for cooling blade design

优化设计以叶片内部体积平均温度与最高温度的加权值最小为目标

$$T = \lambda_1 T_{\text{average}} + \lambda_2 T_{\text{max}} \quad (6)$$

式中 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$, 文中取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$.

优化设计变量、约束条件以及优化算法的选取规则如下:

(1) 设计变量的选取

涡轮叶片参数化造型时,只采用叶根与叶尖两个截面来构造三维模型,因此在优化过程中只选取叶根与叶尖截面的壁面厚度作为设计变量.

(2) 约束条件的选取

叶片的设计必须考虑其在使用过程中的安全性与可靠性,设计时必须满足强度、寿命、振动等各方面的综合要求,这些要求体现在优化模型中就是满足一定的约束条件.对于各学科约束条件的规定如下:

(a) 叶片中的各项应力值必须满足应力指标规定的要求;

(b) 叶片激振频率根据转子叶片的实际工作情况(20 000 r/min 转速)和叶轮的叶片数为 36,计算叶轮激振频率

$$F_{\text{激振}} = (2\,000/60) \cdot 36 \cdot n = 12\,000 n \quad (7)$$

即对于本文中涡轮转子叶片而言,其激振频率为 12 000,24 000,⋯;衡量叶片是否避开共振区的指标是共振裕度 K ,其定义如下:

$$K = \frac{|\text{叶片频率} - f_{\text{激振}}|}{f_{\text{激振}}} \times 100\% \quad (8)$$

本文中要求叶片各阶频率裕度值不小于 10 %;

(c) 根据 Manson-Coffin 公式计算结果,规定叶片的低循环疲劳寿命最少循环数为 6 000 次,考虑到材料的分散性,在设计中取材料的分散系数为 6,则最少循环数不能少于 36 000 次.

(3) 优化算法

采用模拟退火算法(SA)与序列二次规划(SQP)算法的组合进行设计参数空间的综合寻优,模拟退火算法全局搜索最优之后使用序列二

次规划算法达到快速收敛,这样既保证能取得全局最优解又能提高计算效率,降低计算成本.

3 优化计算与结果

前述方法建立的冷却叶片多学科设计优化模型,通过学科间信息的传递实现了强度、寿命与气动及传热学科之间的解耦.利用各学科分析软件的二次开发接口,在 Isight 优化平台下实现了各学科分析软件的集成,对单孔薄壁冷却叶片进行了优化设计计算.优化结果表明:在满足各学科约束的条件下,较大的降低了叶片体积平均温度,获得了目标函数的最优解,改善了叶片的性能.优化设计变量与约束变量优化前后的变化情况如表 2 和表 3 所示,表 4 为目标函数优化前后变化情况.

表 2 设计变量表

Table 2 List of optimized variables

变量名	设计初值	优化上限	优化下限	优化终值
叶尖壁面厚度/mm	0.320	0.500	0.250	0.401
叶根壁面厚度/mm	0.460	0.600	0.300	0.552

表 3 约束变量表

Table 3 List of bounded variables

变量	物理意义	设计初值	优化上限	优化下限	优化终值
$\sigma_{\max}$	最大当量应力/MPa	572.1	600	—	560.9
K_4	4 阶振动频率裕度/%	38.3	—	10	30.9
K_5	5 阶振动频率裕度/%	32.9	—	10	23.76
K_6	6 阶振动频率裕度/%	16.6	—	10	11.7
N_f	低循环疲劳寿命循环数	81 156	—	36 000	85 226

表 4 优化目标变化情况

Table 4 Object function values before and after optimization

变量名	优化前	优化后	优化量
温度值加权/K	1 164.591	1 161.150 5	3.440 5
平均温度/K	1 042.316	1 035.488	6.828
最大温度/K	1 286.866	1 286.813	0.053

如图 6 所示为叶片优化前后在 90 mm 高度与 110 mm 高度温度分布情况比较.在优化设计前后,叶片内部体积平均温度降低约 7 K,而最高温度的降低量较少.

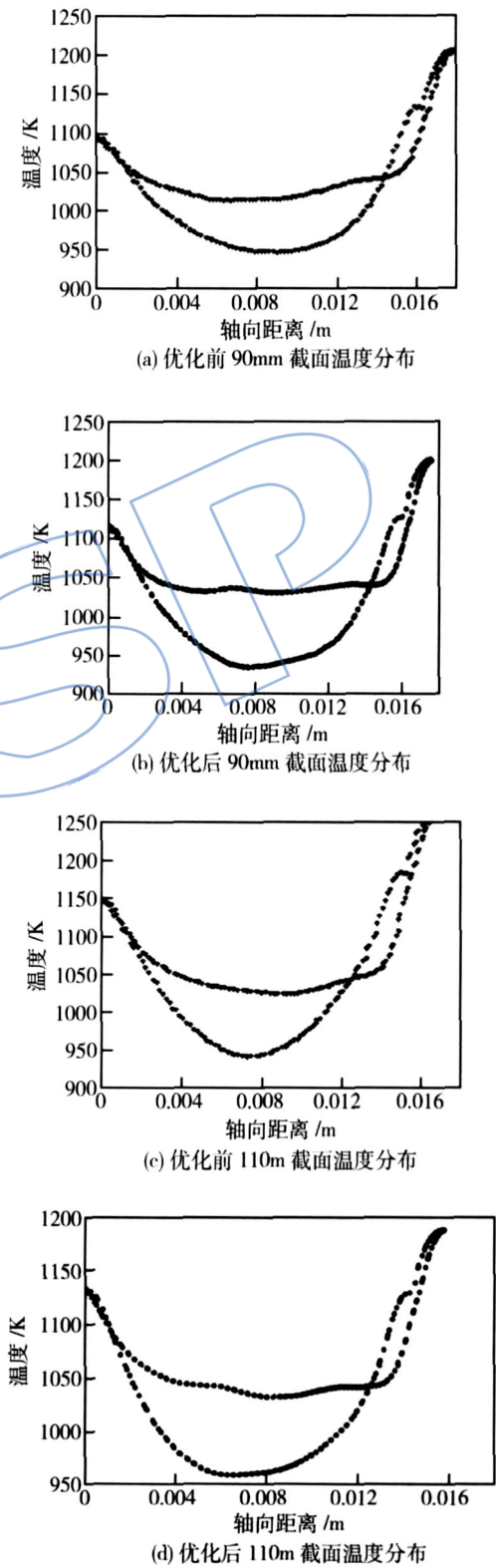


图 6 叶片优化前后温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of blade cascade before and after optimization

4 结 论

本文主要研究了涡轮冷却叶片的参数化建模方法以及涡轮冷却叶片多学科设计优化的实现,主要工作如下:

(1) 提出了一种涡轮冷却叶片参数化建模方法,采用 5 次多项式构造叶片型线,求解各叶型面中弧线方程,通过沿叶片中弧线厚度分布或圆心的定位,建立了冷却叶片模型;

(2) 实现了涡轮叶片的三维流固耦合分析,更准确地得到叶片内部温度分布;

(3) 考虑了多个学科以及学科间的耦合,学科间耦合信息的传递具有较高精度;

(4) 开发软件数据接口程序,在优化平台下实现了涡轮冷却叶片多学科设计优化系统的集成,完成了叶片冷却结构的优化,提高了冷却效率。

优化改善了涡轮叶片冷却结构的性能,在相同冷气流量的条件下,通过优化设计计算,提高了冷气的冷却效果,降低了叶片内部体积平均温度与最高温度,从而可以降低对叶片材料性能的要求,提高叶片工作的安全性与可靠性,因此具有良好的工程应用价值。

参考文献:

[1] Carcasci C, Facchini B. A numerical procedure to design internal cooling of gas turbine stator blades [J]. Rev Cen

Therm, 1996, 35: 257-268.

- [2] Teng S, Han J C. Effect of film-hole shape on turbine blade heat transfer coefficient distribution [R]. AIAA-2000-1035.
- [3] Russell L M, Thurman D R. Measurements of heat transfer, flow and pressure in a simulated turbine blade internal cooling passage [R]. NASA TP-3646, 1997.
- [4] Talya S S, Rajadas J N. Multidisciplinary optimization of Gas turbine blade design [R]. AIAA-1998-4864.
- [5] Talya S S, Rajadas J N. An integrated multidisciplinary design optimization procedure for cooled gas turbine blades [R]. AIAA-2000-1664.
- [6] 冯进, 符达良. 涡轮钻具涡轮叶片造型设计新方法 [J]. 石油机械, 2000, 28(11): 9-13.
- FENG Jin, FU Daliang. New design method of turbine blade shape of turbodrill [J]. China Petroleum Machinery, 2000, 28(11): 9-13.
- [7] 虞跨海, 李立州, 王婧超, 等. 涡轮叶片三维气动优化 [J]. 机械设计, 2005, 22(11): 31-33.
- YU Kuahai, LI Lizhou, WANG Jingchao, et al. Aerodynamic 3D optimization design for turbine blade [J]. Journal of Machine Design, 2005, 22(11): 31-33.
- [8] 林垲, 高庆, 黄维娜. 1 级涡轮叶片振动特性研究 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2002, 15(3): 28-33.
- LIN Kai, GAO Qing, HUANG Weina. Study on vibration characteristics of 1st stage turbine rotor blade [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2002, 15(3): 28-33.
- [9] 张锦, 刘晓平. 叶轮机振动模态分析理论及数值方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [10] 苏清友. 航空涡喷、涡扇发动机主要零部件定寿指南 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2004.