

航空发动机涡轮叶尖间隙损失的统计设计*

邵锦文¹, 张振家², 袁宁², 马玉林³

(1. 哈尔滨工业大学 气动研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 航天科工集团公司 31 所, 北京 100074;
3. 哈尔滨工业大学 现代生产技术中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 应用数值计算方法对发动机涡轮叶尖间隙引起的涡轮效率损失进行了分析, 结合计算机辅助公差设计, 提出了基于涡轮叶尖间隙损失的间隙尺寸和公差优化设计方法。以制造成本和涡轮效率损失最小为优化目标函数, 采用 Monte Carlo 随机模拟法和基因遗传算法, 分析计算了涡轮间隙尺寸公差和装配组成环的尺寸公差分配。

关键词: 航空发动机; 叶尖间隙损失; 涡轮叶片; 公差设计

中图分类号: T031 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2003) 02-0122-03

Statistical design for turbine blades tip clearance loss analysis

SHAO Jin-wen¹, ZHANG Zhen-jia², YUAN Ning², MA Yu-lin³

(1. Aerodynamics Research Center, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China; 2. The 31st Inst., Beijing 100074, China;
3. Modern manufacturing technology Center, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Numerical algorithm was applied to analysis the turbine blades tip clearance loss combined with computer aided tolerancing (CAT) algorithm. The system analysis method was presented to determin the dimension and tolerance of turbine tip clearance. Manufacture cost and efficiency loss minimization as optimal objective function in dimensions and tolerances analysis and computation of the turbine tip clearance and assembly parts application with Monte Carlo random simulated algorithm and gene algorithm.

Key words: Aircraft engine; Tip clearance loss; Turbine blade; Tolerance design

1 引言

航空发动机涡轮工作效率的损失很大程度在于涡轮叶尖间隙损失^[1], 叶尖间隙的尺寸误差主要是由加工工艺水平和工艺设备的局限性造成的。零件制造误差服从某一个特定的分布, 建立零件尺寸和装配部件尺寸的误差变量模型, 利用统计分析和最小成本法进行分析和预测变化规律, 可减少尺寸变量的变化对产品性能的影响, 从而提高产品的质量与可靠性^[2-3]。为此, 本文在发动机涡轮叶尖间隙损失数值计算基础上, 运用计算机辅助公差设计技术, 优化确定了叶尖间隙尺寸公差和涡轮装配零件组成环的尺寸公差。

2 叶尖间隙损失分析

涡轮叶尖损失模型为

$$\Delta\eta = k \times \eta_0 \times T_{tip} / h \quad (1)$$

式中 $\Delta\eta$ 为发动机效率损失, T_{tip} 为叶尖间隙, h 为叶片高度, k 为变量, 和叶轮的物理和几何特性有关, η_0 为参考效率, 是没有叶尖间隙损失的理想效率。

文献[4]详细分析了叶尖间隙损失机理以及数值计算方法, 量化分析了发动机的叶尖间隙损失。图 1 为某涡轮的间隙损失流动机理示意图^[5]。

涡轮叶尖间隙与效率的关系方程为

$$\eta_{new} / \eta_{ref} = 1 - k \times C \times T_{tip} \quad (2)$$

式中 k 是叶片的气动负载系数, C 是和叶片几何形状有关的常数。考虑到涡轮正常冷却需要的漏气损失, 上式可转化为

$$\frac{\eta_{new}}{\eta_{ref}} = \frac{1 - k \times C \times T_{tip}}{1 - k \times C \times T_{tip, ref}} \quad (3)$$

对某涡轮进行数值仿真计算, 结果如图 2 所示。

* 收稿日期: 2002-03-29; 修订日期: 2002-06-17。

作者简介: 邵锦文 (1970—), 男, 博士生, 研究领域为航空发动机零部件的 CAD/CAM 以及发动机制造一体化工程。

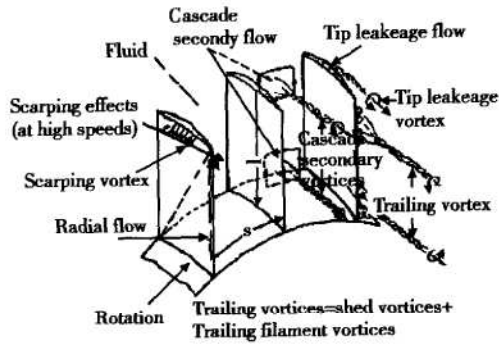


Fig.1 Flow loss mechanisms in turbine

在全推力工况下,涡轮叶尖间隙会受到叶片离心应力的影响,离心力可近似为

$$\sigma = \int_{r_h}^{r_t} \frac{\rho \times \omega^2 \times r_t^2}{2(1 - \alpha \times r)} \left[1 - \left(\frac{r}{r_t} \right)^2 - \frac{2\alpha r_t}{3} \left[1 - \left(\frac{r}{r_t} \right)^3 \right] \right] dr \quad (4)$$

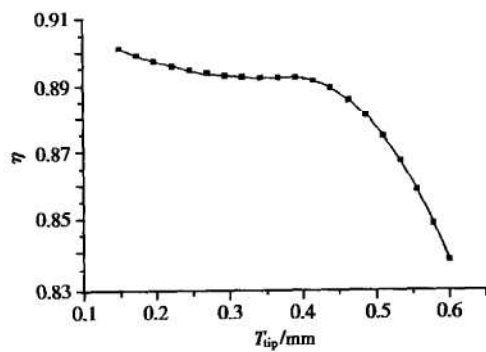


Fig.2 Turbine blade tip clearance loss correlations

由于涡轮的工作温度比较高,叶片的热变形应考虑到叶尖间隙的设计中,叶片的变形量为

$$\Delta l_t = \epsilon \times (T_{04} - T_{01}) \times h \quad (5)$$

式中 ϵ 为涡轮叶片的热膨胀系数, h 为叶片高度, T_{04} 为涡轮的进口温度, T_{01} 为常温。

在发动机工作过程中涡轮叶尖间隙的变化比风扇部件、压气机部件显著得多,进口温度为冷态和热态,在全推力和巡航状态工作时,叶尖间隙见图3。

发动机在全推力工况下,涡轮转子在温度和离心力负载的工作情况下,涡轮机匣还没有开始膨胀,此时涡轮转子和机匣的间隙最小。机匣的膨胀速度要小于转子,随着飞行工况的改变,机匣渐渐开始膨胀,间隙逐渐加大,涡轮的工作效率将降低。在涡轮机匣没有冷却系统情况下,精确设计涡轮的最小工作间

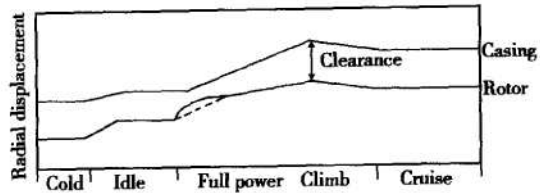


Fig.3 Turbine tip clearances set by mission

隙,是提高涡轮工作效率的关键。

3 基于间隙损失的公差设计

本文采用基于统计公差设计理论的方法,进行叶尖间隙尺寸的均值和公差设计。

3.1 叶尖间隙尺寸均值的设计

叶尖间隙尺寸均值设计按式(4)和式(5)确定:

$$\bar{T}_{tip} = t_b + t_h + t_t + \tau/2 \quad (6)$$

式中 t_b 为由离心力引起的叶片应变变量, t_h 为由于温度变化引起的热应变变量, t_t 为考虑附面层影响的设计值, τ 为叶尖间隙的设计公差。

3.2 叶尖间隙尺寸公差的优化设计

叶尖间隙尺寸公差的设计可转化为组成环部件装配公差设计,其设计值与发动机效率呈反比,但过小的间隙设计公差必然导致装配零部件的公差设计值变小,增加生产成本^[3]。叶尖间隙装配公差链方程

为 $\sum_{i=1}^n A_i^2 t_i^2 = \tau^2$, t_i 为涡轮及机匣部件的设计公差。

设 t_{min} 为叶尖最小间隙设计值, $t_{min} = t_b + t_h + t_t$ 为常数,由统计公差理论可知,在确定的工艺条件下,封闭环尺寸即叶尖间隙尺寸 T_{tip} 近似服从特定的正态分布 $N(\mu + t_{min}, \delta^2)$ 。其中: μ 为叶尖间隙公差的均值,在计算时近似取 $\tau/2$, δ 为叶尖间隙尺寸公差的标准差。在置信度为 0.9973 的情况下, $\mu = 3\delta$, T_{tip} 是以 δ 为自变量的函数,与效率的关系由图2确定。

对应叶尖间隙的公差,存在公差和成本关系曲线,见图4。 $C(\tau) = \text{Solve_cost}_i(\tau)$ 为叶尖间隙公差成本的关系函数,由图4曲线确定。

为了求解优化的叶尖间隙,提出质量损失-成本函数模型:

$$C = C(\tau) + k \times \tau^2 \quad (7)$$

式中 C 为总的质量损失-成本, k 为效率损失系数,

$k = \frac{\text{cost}_t}{(t_{max} - t_{min})^2}$, cost_t 为发动机涡轮质量不合格的损失成本, t_{max} 为发动机间隙设计容许的最大间隙值。

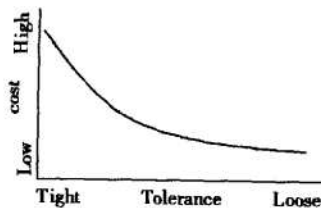


Fig. 4 Cost tolerance correlation

求解优化的叶尖间隙公差,即求解满足质量损失-成本函数值最小对应的公差。设计理论采用 Monte Carlo 方法^[6],对应某涡轮 $t_{\max} = 0.8\text{mm}$ 的叶尖间隙设计,求得:

$$t_{\min} = t_b + t_h + t_f = 0.086 + 0.134 + 0.15 = 0.37\text{mm}$$

$$\tau = 0.156\text{mm}$$

$$\bar{T}_{\text{tip}} = t_b + t_h + t_f + \tau/2 = 0.448\text{mm}$$

总的质量损失及加工成本为 2549.5 元。

3.3 组成环装配部件公差优化分配

涡轮叶尖间隙尺寸链见图 5,尺寸链方程为:

$$f = L_1 - L_2 - L_3 - L_4$$

$$\sum_{i=1}^4 A_i t_i = \tau, \quad \sum_{i=1}^4 A_i^2 t_i^2 = \tau^2$$

Fig. 5 Dimension chain frame

求解装配尺寸公差分配的优化的目标函数为:

$$\text{MINIMIZE} \quad Z = \sum_{i=1}^n C(t_i) \quad (8)$$

$$\text{S.T.} \quad \sum_{i=1}^n A_i^2 t_i^2 \leq \tau^2 \quad (9)$$

$$t_{\min_i} \leq t_i \leq t_{\max_i} \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

$$t_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

$$C(t_i) = \text{Solve_Cost}_i(t_i).$$

采用基因遗传算法求解上述非线性约束的最小化问题,计算的程序如图 6 所示。

组成环零件的公差范围由加工设备和工艺决定, $t_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, 4)$ 的公差设计范围如下:

$$0.08 \leq t_1 \leq 0.16, \quad 0.08 \leq t_2 \leq 0.15,$$

$$0.06 \leq t_3 \leq 0.24, \quad 0.06 \leq t_4 \leq 0.20$$

按效率损失和制造成本的优化分析,得到涡轮叶尖间

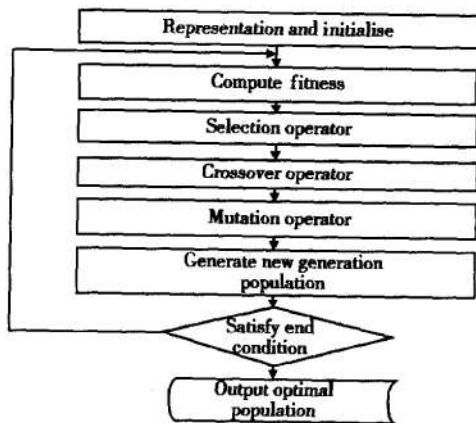


Fig. 6 Tip clearance tolerance allocation using genetic algorithm.

隙尺寸公差为 0.156,则组成环零件公差的优化分配为: $t_1 = 0.093, t_2 = 0.085, t_3 = 0.109, t_4 = 0.148$ 。

4 结 论

应用统计分析方法求解优化的叶尖间隙尺寸及公差值,适用于航空发动机的风扇、压气机、涡轮等部件的叶尖间隙尺寸及公差的设计,对提高发动机的性能及可靠性有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] Karl E Sheldon. Analysis methods to control performance variability and costs in turbine engine manufacturing[D]. Master of science degree thesis, Virginia Polytechnic and State University, 2001(4).
- [2] 张根保. 计算机辅助公差设计及其关键技术[A]. 首届计算机辅助公差设计学术会议论文集[C]. 2000.
- [3] Chase K W, et al. Least cost tolerance allocation for mechanical assemblies with automated process selection[J]. *Failure Prevention and Reliability*, 1989, 16: 165 ~ 171.
- [4] 袁 宁. 叶轮机械全三维数值计算与设计方法的研究[D]. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1999, 11.
- [5] Basson A, Lakshminarayana B. Numerical simulation of tip clearance effects in turbomachinery[R]. *American Society of Mechanical Engineers*, 93-GT-316: 1 ~ 16, 1993.
- [6] Early J, Thompson J. Variation simulation modeling-variation analysis using monte carlo simulation[J]. *Failure Prevention and Reliability*, 1989, 16: 139 ~ 144.

(编辑:朱立影)