

转子结构布局及其力学特性优化设计

李超¹, 金福艺¹, 王东³, 马艳红^{1,2}, 洪杰^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191;

3. 中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所, 沈阳 110042)

摘 要: 针对高推质比航空发动机结构设计, 提出了航空发动机转子结构布局优化设计方案。对总体结构布局的优化可以有效提高材料使用效率, 获取更优的力学特性, 减小结构质量以提高推质比。介绍了转子结构布局的研究内容, 给出了结构布局优化设计方法, 并通过对高负荷转子结构系统的布局优化设计, 验证了结构布局设计方法的可行性。算例结果表明: 该方法可使结构效率损失系数降低 0.335, 方法的创新对航空发动机转子系统初始结构设计具有指导意义, 对转子结构设计方案筛选和缩短设计周期具有重要的作用。

关键词: 结构设计; 结构布局; 航空发动机; 转子结构; 构形设计; 结构效率

中图分类号: V232.2

文献标志码: A

Optimum design of rotor structure layout and its mechanical properties

LI Chao¹, JIN Fuyi¹, WANG Dong³, MA Yanhong^{1,2}, HONG Jie^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China;

3. Shenyang Engine Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110042, China)

Abstract: For the structural design of high thrust-mass ratio aero-engine, the method of optimum design of aero-engine rotor structure was put forward. The optimization of the overall structure layout can effectively improve the material utilization efficiency, obtain higher mechanical properties, reduce the structural mass and increase the thrust-mass ratio. The research content of the rotor structure layout was introduced, and the optimum design method of the structure layout was given. The feasibility of the structure layout design method was verified by optimizing the layout of the high load rotor structure system. The numerical results showed that this method can reduce the structural efficiency loss coefficient by 0.335, and the research content was of guiding significance to the initial structure design of the aero-engine rotor system, playing an important role in screening the design scheme of the rotor

收稿日期: 2018-07-01

作者简介: 李超(1977—), 男, 讲师、硕士生导师, 博士, 主要从事航空发动机结构设计、智能结构动力学与控制的研究。

E-mail: lichao7715@163.com

通讯作者: 马艳红(1977—), 女, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事航空发动机结构、强度、振动和可靠性的研究。

E-mail: mayanhong@buaa.edu.cn

引用格式: 李超, 金福艺, 王东, 等. 转子结构布局及其力学特性优化设计[J]. 航空动力学报, 2019, 34(2): 282-291. LI Chao, JIN Fuyi, WANG Dong, et al. Optimum design of rotor structure layout and its mechanical properties[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(2): 282-291.

structure and shortening the design cycle.

Key words: structural design; structure layout; aero-engine; rotor structure; configuration design; structural efficiency

目前,我国航空发动机的研制正处于从测绘仿制到自主研发的过渡阶段^[1],由于对转子系统结构及动力学设计方面的理论基础研究不足,在结构布局设计上主要依赖于已有样机和工程经验。而对于要求具有高推质比、高可靠的航空发动机来讲,多学科先进设计技术需要在“结构设计”中给予综合体现,即在结构布局设计中需要考虑多个学科的先进设计水平,只依靠单纯的测绘仿制和已有经验很难满足不断提高的设计指标对结构创新性的要求。结构布局主要包括结构构形^[2]和支承结构的设计,即基于数学优化算法对结构系统中的关键设计参数进行优化筛选,确定最优或次优布置的方法,最终获得可展示结构构形所带来的力学特征的改善。通过结构布局可以有效地通过对结构特征参数的灵活选取,在相同质量的材料下获取更多的力学特性,进而实现结构与力学特征一体化设计,这是经验设计或半经验设计所达不到的。

如果不考虑结构几何特征,结构力学特性完全取决于弹性模量和泊松比等材料机械性能。而结构构形和约束方式可对其力学特性产生显著影响,因此,结构力学特性不仅与材料属性有关,还与结构构形密不可分。结构布局设计就是在相同力学特性前提下,通过结构构形和几何尺寸的优化,提高结构力学特性,同时减轻结构质量。结构布局的核心是利用结构构形与力学特性之间的关联性,提高材料的使用效率。

在航空发动机转子结构设计中,高结构效率^[3]的转子结构通常具有较高的材料使用效率,从而使转子结构最大程度的轻量化设计。高负载、轻量化的结构设计正是先进性的体现,而结构布局是实现先进性的重要途径。结构布局被认为是结构力学中最具挑战性的一类问题^[4],因为在有效空间中存在着多种可能难以区分和量化的拓扑结构,而结构布局的任务便是从可能性空间中找到关键设计参数,通过调整这些对力学特性具有较高敏感性的关键设计参数,可以方便快捷地达到调整力学特性的目的。

航空发动机转子结构的材料使用效率,主要体现在结构的抗变形能力。由于航空发动机安装在进行非惯性运动的飞机上,又是高速旋转机械,

因此转子结构的抗变形能力根据载荷性质的不同分为静刚度、动刚度和惯性刚度^[5],所谓惯性刚度可定义为在机动飞行或过载情况下,转子质量惯性载荷与最大变形的比值。在设计中对转子系统抗变形能力的要求是:转子系统不仅要具有足够的横向弯曲刚度,在轮盘-轴连接处还要具有足够的角向刚度。

结构布局设计在汽车外形^[6]、飞行器外形^[7],建筑^[8]等领域已经有着较为深入、系统的理论方法研究和应用,但是在航空发动机领域,对结构布局设计的理论方法研究鲜有报道。而对转子系统的研究多集中在转子系统的力学特性计算^[9-10]和影响转子动力学特性的关键参数及其优化技术^[11]。但是实际工程中的转子结构构形和几何参数确定,影响因素繁多,在工程设计中难以得到在变形匹配、刚度特性和振动特性等多方面均较好的优化结果。结构布局优化设计在传统机械结构设计经验基础上,充分考虑结构工作载荷环境对结构系统力学特性的影响,具有较高的工程实用价值。

由于总体结构布局和结构质量的限制,在转子结构设计中要求采用不同的材料和合理的构形以实现高的结构效率。本文对航空发动机转子系统结构布局设计方法研究包括主体构形和支承结构的布局设计,以及对关键设计参数的优化设计。建立了转子结构布局设计的通用优化方法和流程,为高推质比航空发动机转子结构设计提供定量优化方法。

1 转子结构布局设计内涵

如图1为典型小涵道比涡扇发动机转子结构示意图,观察可知,存在转子主体结构、支承结构、连接结构和叶盘结构等四类结构。

所谓转子结构构形是指转子承受拉压、扭转和弯曲载荷的结构骨架。由于各部件结构间的互相制约,高压转子呈现“ π ”形结构,低压转子呈现“扁担”形结构。在转子主体结构上有叶盘结构,因此在转子结构构形中还要考虑叶盘质量在高速旋转时所产生的惯性载荷的影响。

轴系支承位置的选取,特别是中介支点位置的确定,对转子-支承系统振动特性的影响显著,因此

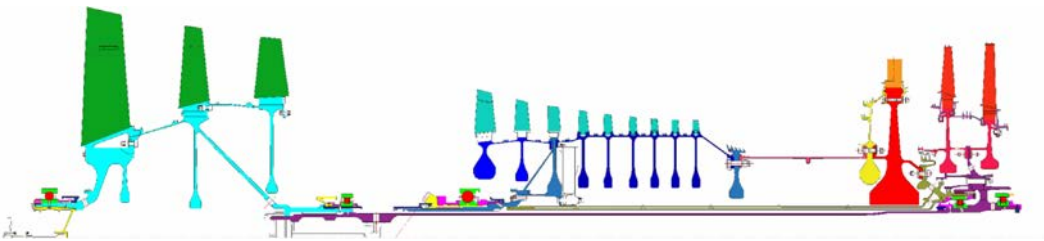


图 1 小涵道比涡扇发动机转子结构系统

Fig.1 Rotor structure system of small bypass ratio turbofan engine

在结构布局设计中,支承位置的选取至关重要。

由于装配、材料、加工等诸多原因,转子结构存在大量的零部件,通过各种形式的连接结构,如螺栓-法兰、止口、端齿及套齿连接等组合而成。连接界面在复杂、多变的工作载荷作用下可能会产生接触损伤。因此在结构布局设计中,有时仍需要考虑连接结构的位置,最大程度降低连接界面损伤及其对转子系统力学特性的影响。

综上所述,在转子结构布局设计中主要是转子结构的主体结构和支承结构的位置等结构参数的确定。

1.1 转子结构构形设计

轴承直径和气流通道结构尺寸是转子径向尺寸的上下边界,其构形是以“拱形”为基础进行衍生变化。

如图 2 所示,图中绿线勾勒出了两支点刚性转子和多支点柔性转子的主体构形,叶盘等转子构件按照一定的规则分布其上,其中红色圆点代表构件的集中质量和转动惯量。可见主体构形由锥形轴段结构组成,一般的锥形轴段如图 3 所示。

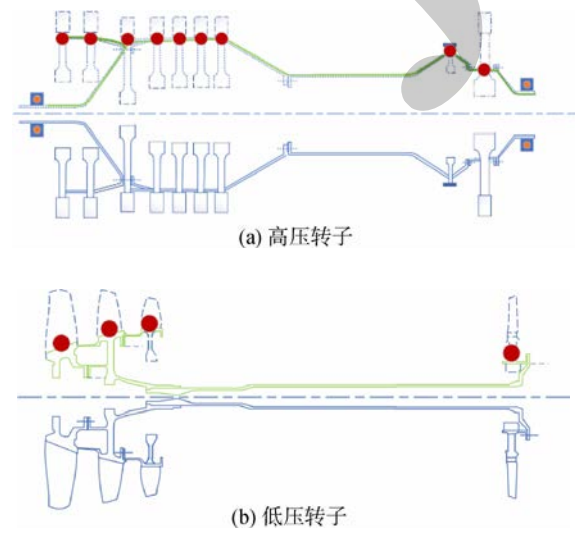


图 2 转子主体构形示意

Fig.2 Main body configuration of rotor

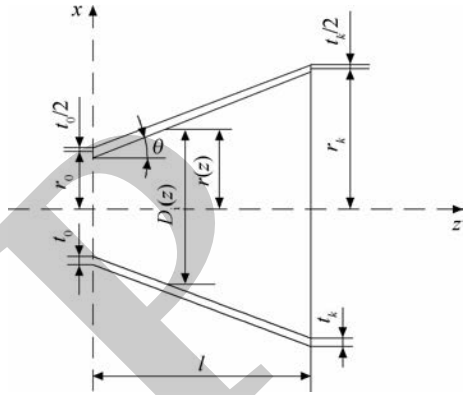


图 3 锥形轴段结构

Fig.3 Conical shaft structure

下面以锥形轴段结构为对象研究构形变化对力学特性影响规律,为转子结构构形设计提供优化设计指导。

如图 3 所示,任一截面处弯矩可表示为

$$M(z) = E(z)J(z) \frac{d\theta}{dz} \tag{1}$$

式中 $E(z)$ 、 $J(z)$ 为轴段材料的弹性模量和轴段的截面惯性矩,均设为 z 的函数。设轴段任一截面处的弯矩为

$$M(z) = M_0 + Q_0 z \tag{2}$$

式中 M_0 、 Q_0 为轴段左端截面的弯矩和剪力。

将将式(2)代入式(1)中,整理并积分,得挠角 θ 为

$$\theta(z) = M_0 \int_0^z \frac{1}{E(z)J(z)} dz + Q_0 \int_0^z \frac{z}{E(z)J(z)} dz + \theta_0 \tag{3}$$

任一截面的惯性矩

$$J(z) = \frac{\pi}{64} [D_h^4(z) - D_i^4(z)] = \pi r^3(z) t(z) \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left[\frac{t(z)}{r(z)} \right]^2 \right\} \tag{4}$$

式中 $D_h(z)$ 为 z 处截面的外径, $D_i(z)$ 为 z 处截面的内径, $r(z)$ 为 z 处截面的平均半径, $t(z)$ 为 z 处

截面的壁厚。若锥形轴段为薄壁结构,可以忽略式(4)中的 $\frac{1}{4}\left[\frac{t(z)}{r(z)}\right]^2$ 项。若锥形轴段等壁厚,则 $t(z)=t$ 为一常数,这样,式(4)可以简化为

$$J(z)=\pi tr^3(z) \tag{5}$$

锥形空心轴段的平均半径

$$r(z)=(r_k-r_0)\frac{z}{l}=r_0\left(1+\frac{\tau z}{l}\right) \tag{6}$$

式(6)中 r_0 为左端界面的平均半径, r_k 为右端截面的平均半径, $\tau=\frac{r_k-r_0}{r_0}$ 为无量纲系数。将式(6)代入式(5),得到锥形空心轴段截面惯性矩表达式:

$$J(z)=J_0\left(1+\frac{\tau z}{l}\right)^3 \tag{7}$$

将式(7)代入式(3)可得,当锥形轴任一截面处承受弯矩 M 时,所产生的挠角为

$$\begin{aligned} \theta(z) &= M_0 \int_0^z \frac{r_0^3}{E(z)l^3(r_0+\theta z)^3} dz + \\ &Q_0 \int_0^z \frac{zr_0^3}{E(z)l^3(r_0+\theta z)^3} dz + \theta_0 \end{aligned} \tag{8}$$

式(8)中 $\theta=\frac{r_k-r_0}{l}$ 。假如某一锥形轴段同时承受横向载荷和轴向载荷的作用,如图 4 所示。在 $z=0$ 处固支约束,设 $E(z)=E$ 为一定常数,现分析距离左端部 $z=l'$ 的角变形情况。对于载荷 F_1 、 F_2 都可以分解成沿截面部分 F_{12} 和垂直截面部分 F_{11} ,其中垂直截面部分的载荷 F_{11} 只会产生沿着该力方向的拉压变形,并不影响角向变形。沿截面部分的载荷 F_{12} 将会产生角变形 $\theta'(z)$

$$\theta'(z)=\int_0^z \frac{M(z)}{E(z)J(z)} dz + c'_1 \tag{9}$$

式中 c'_1 为待确定的常数,由于左端固定约束,由 $\theta'(0)=0$,得到 $c'_1=0$,因为锥形结构厚度一定,故沿截面惯性矩 $J(z)$ 为定值。这样,在 $z=l'$ 处总的角变形为

$$\theta_{\text{total}}(l')=\theta(l')+\theta'(l') \tag{10}$$

定义角向刚度为

$$k_\theta=\frac{|\mathbf{F}_1+\mathbf{F}_2|}{\theta_{\text{total}}} \tag{11}$$

并对其进行归一化

$$\bar{k}_\theta=\frac{k_\theta}{k_{\theta,\max}} \tag{12}$$

其中 $k_{\theta,\max}$ 为最大角向刚度。

经过数值计算发现,锥形结构的角向刚度随着锥角的变化,呈现如图 5 所示的变化规律。可

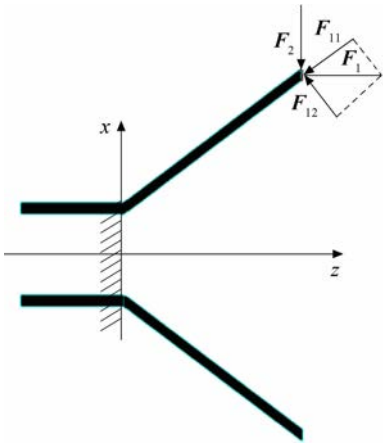


图 4 锥形轴段结构边界条件

Fig. 4 Boundary conditions of the conical shaft structure

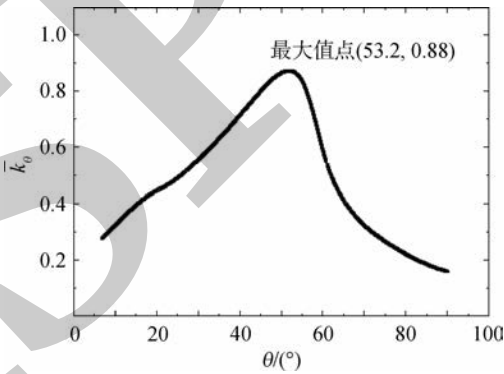


图 5 无量纲角向刚度变化规律

Fig. 5 Change law of equivalent angular stiffness

以看到,锥壳结构构形对抗变形能力有着明显的影响,存在最佳倾角(即挠度 θ)使角向刚度最大、变形最小。

1.2 支承结构设计

高压转子为刚性转子设计,即工作转速位于刚体振型临界转速与弯曲振型临界转速之间,随着转子转速的不断提高,要求高压转子具有更高的刚度和弯曲临界转速。对于高压转子,在转速范围内存在多阶临界转速,低阶为刚体振型,高阶为弯曲振型,如图 6 所示。

支承刚度对转子系统刚体振型临界转速的影响是正单调关系,对于前后两个支点的支承刚度的敏感度可能是不同的,这与转子质心位置和惯性矩中心位置有关,常见的不同支承刚度下转子弯曲振型如图 7 所示。

低压转子一般为多支点柔性转子系统,由于转子结构和支点位置的差异,在转速范围内可能出现多种模态振型,如图 8 所示。由于最大工作

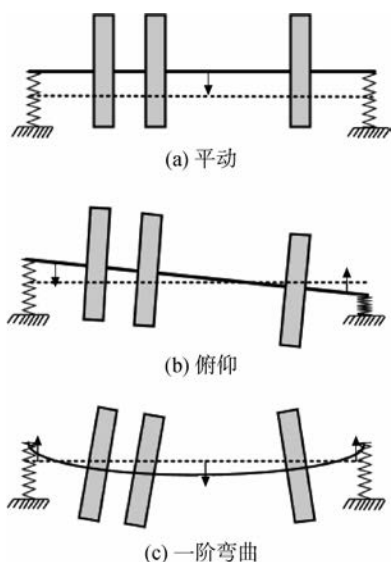


图 6 两支点高压转子模态振型

Fig. 6 Modal shape of two pivot high pressure rotor

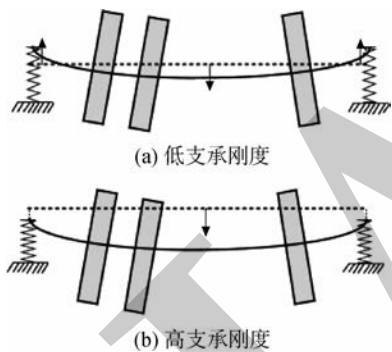


图 7 不同支承刚度下转子弯曲振型

Fig. 7 Bending modal shape of rotor under different supporting stiffness

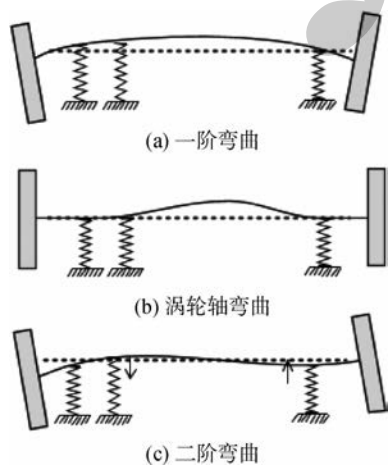


图 8 多支点低压转子模态振型

Fig. 8 Modal shape of multi pivot low pressure rotor

转速范围内转子会出现弯曲挠度,为控制转子结构的挠曲变形,通常采用多支承约束的结构设计。需要注意的是,由于转子具有弯曲变形,在临界转速计算分析中,需要综合考虑支承刚度和转子弯曲刚度的作用,以及轮盘陀螺力矩效应的影响。

支承刚度一般在转子主体结构布局之后确定,通过调整支承刚度使转子结构系统具有较高的稳定裕度。在支承刚度的优化设计中需要预估转子系统各阶临界转速并检查安全裕度,对各支承刚度的灵敏度进行定量分析,最后进行降低支承敏感度和允许刚度分散度(变差)优化^[12-13]。

研究表明^[14],对于中介支点位置的确定主要是依据转子振动模态。其原则是处于弯曲模态节点附近以减小转子之间振动影响,同时可以通过调整局部构型和轴的刚度改变转子模态特征。图 9 为典型中介支点布置示意图。图 9(a)将中介轴承外环固定在高压轴上,内环固定在低压轴上,可以有效地缩短转子的轴向长度。但是同样存在固有的缺点,如果高、低压转子转速相差比较大,随高压轴转动的中介轴承外环转速大,膨胀量大,而随低压轴转动的中介轴承内环转速低,膨胀量小,其结果是增大了轴承内的游隙,容易发生轻载打滑。图 9(b)则将中介轴承的内圈与高压轴相连,外圈与低压轴相连,中介轴承工作时,其游隙不是增加而是减少,因此能防止打滑,但是增加了轴承负荷。这在实际转子结构布局时,需要依据实际条件,合理设计不同的结构。

综上,在支承结构设计中,可通过调整支点位

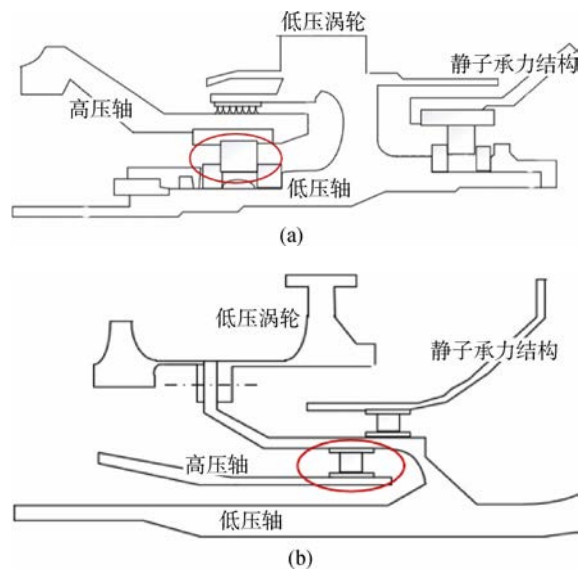


图 9 中介轴承布置方案

Fig. 9 Arrangement of medium bearing

置、支承刚度和对转子局部结构进行优化设计来控制转子弯曲变形,以提高转子系统动力学特性。

2 转子结构布局设计方法

航空发动机转子结构布局设计是对转轴结构构形和支承结构特性的优化及确定过程,而支承结构设计通常放在转子主体构形优化之后考虑,转子构形设计是结构布局的重点,通过对关键几何设计参数和多优化目标的筛选,最终确定结构布局。

2.1 关键设计参数

关键设计参数的寻优是布局设计的首要任务。所谓关键设计参数是指对转子的力学特性(刚度特征和模态特征)具有明显影响的构形参数。由于构形参数之间的关联性很难定量描述,对全部构形参数进行优化设计是不现实的,而依据工程设计经验所选取的部分构形参数,可能个别参数对转子力学特性影响不大,这些对整体力学特性无关紧要的构形参数是可以不考虑的。不仅如此,在后续 DOE(试验设计)研究中,设计点的数量会随着输入参数的数量增加而迅速增加,严重影响 DOE 的计算效率。因此,首先需要以一个较优的构形为基础(可直接由工程实际确定),对各个参数之间进行关联性研究,确定对转子力学特性有明显影响的关键设计参数。

所选取的关键设计参数应具备以下两点功能:

1) 关键设计参数具有将结构力学特性调到目标值的能力,即通过调节关键设计参数,可以使转子力学特性参数均值尽可能的趋近目标值,可以表示为 $\delta_y = |\bar{y} - y_0| \rightarrow \min$ 或 $\delta_y^2 = (\bar{y} - y_0)^2 \rightarrow \min$ 。这里, $\bar{y}$ 为实际输出均值, y_0 为目标值。

2) 结构力学特性相对于关键设计参数具有较强的灵敏度,这样才能通过调节关键设计参数,快速地调整到期望的数值,可以表示为 $\sigma_y^2 = \hat{E}[(y - \bar{y})^2] \rightarrow \min$ 其中, y 为目标输出值, $\hat{E}$ 表示取期望。

在工程应用中,对于航空发动机转子构形参数,由于限制繁多,设计参数不允许在初始数值附近大范围调节,因此,调整低灵敏度的参数难以实现将结构力学特性调到期望的数值;同样,不具备将力学特性调到期望值的能力的参数,不管灵敏度如何,也是不合适的。

现代统计学中的参数关联性研究有多种方

法,已广泛应用于优化设计,参数关联性的研究可以较为方便地得到关键设计参数。本文通过拉丁超立方^[15](Latin hypercube)法布置设计点,使用 Spearman^[16]方法进行数据之间的关联性分析。Spearman 法是在基于蒙特卡洛关系下,检查两个变量之间的单调关系,比线性关系限制较少,具有较高的准确度。Spearman 秩相关系数具有非参数性,即样本之间精确的分布可以在不知道 X 和 Y 的联合概率密度函数时获得,其计算公式如下:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{L(L^2 - 1)} \tag{13}$$

其中 L 表示样本总数量, d_i 表示任意两个样本(构形参数)重新排序后的位置之差。通过该方法从众多构形变量中选出较少的参数作为关键特征参数,这些参数也是后续待优化的设计变量。

2.2 结构布局设计流程

构形对于航空发动机转子结构布局设计是通过建立转子构形及关键几何尺寸确定,使其在结构质量限制范围内力学特性最优。重点是掌握结构构形和尺寸对转子刚度等力学特性的影响规律,并采用优化算法,以实现多参数、多目标的综合优化设计。除此之外,转子系统的支承结构(包括支承位置和支承刚度)也是布局工作重要的一部分。

精确的最优布局只能通过在结构可能性空间中使用连续体公式,并通过无限数量的潜在可能解来确定。因此,得到的解往往是网格状的连续体,包含无限数量的无穷小间隔的数值解,响应面优化方法正是在全体设计变量所组成的可能性空间中得到优化数值解的超曲面,再确定最优解的过程。因此响应面优化方法相比于其他优化算法具有更大的优势,可以在响应面上清楚地查看优化的趋势和走向。响应面法^[17]是以 DOE 为基础的用于处理多变量问题建模和分析的一套统计处理技术,目前已广泛应用于工程优化设计中。

对于转子力学特征的计算已存在较多成熟的方法,如传递矩阵法^[18]、模态综合法^[19]、有限元法等。传递矩阵法由于计算高阶频率或转子系统较为大型复杂时,计算精度往往难以保证,容易出现数值不稳定的现象;模态综合法主要是为了降低计算规模;有限元法鉴于其程序的通用性和可扩展性都比较好,且随着计算机技术的飞速发展,已经在航空工程中得到广泛的应用,因此有限元法也是本文算例所采取的方法。基于有限元法的结

构布局优化方法流程如图 10 所示。

概括为如下 6 个方面：

1) 首先建立原始 CAD 参数化转子模型,并初步判断对结构力学特征有明显影响的构形参数作为待优化的设计变量,往往是依据技术积累和工程经验来大致确定。

2) 建立有限元模型,进行有限元求解,指定优化目标变量,将有限元求解器与 CAD 软件关联。这里主要是为了使构形参数改变时,利用 CAD 快速建模和有限元求解器快速求解,实现迭代计算。

3) 参数关联性分析,即确定各个构形参数与转子系统的结构效率之间的相关系数,进而确定

关键设计参数,这是后续优化计算中的迭代变量。

4) 进行 DOE,绘制响应面。确定响应面的拟合优度,确保数据的准确性。

5) 基于某些数学优化算法(如多目标遗传算法、多目标自适应算法、蚁群算法等),找到最优或次优的构形参数。

6) 与原构形对比,验证优化结果。

3 高负荷转子结构系统优化设计

为了充分说明结构布局设计方法的可靠性和可行性,以高负荷转子结构系统优化设计为例,通过结构布局优化设计,使转子结构达到期望的响应量,提升转子的力学特性。

图 11 为转子结构典型构形,初步选取四个待优化的构形参数:前倒角半径 R_1 、前锥角角度 α_1 、后锥角角度 α_2 和过渡半径 R_2 ,其原始构形参数以列于表 1 中,优化过程中数据的波动均限制在原始构形数据的 $\pm 10\%$ 之间。在有限元计算时,盘和叶片只需将其质量和转动惯量等效加在原始位置即可(图中红色区域),前后支承处采用固定约束。

需要说明的是,本算例所选择的待优化构形参数和所选取的边界条件不具备工程意义,仅为说明结构布局优化方法的通用性和有效性。

对于航空发动机转子系统的载荷环境的确定,可根据飞行使用包线对不同工作状态分别进行结构力学特性计算和优化设计,最后再综合平衡各方限制。在本文算例中以两支点高速转子结构系统为背景,建立具有通用性的优化流程,掌握结构构形和尺寸变化对转子力学特性的影响规律,算例中载荷仅考虑横向/机动飞行时惯性载荷下转子变形及应力分布的优化设计问题。

对高压转子初始施加国军标所要求的横向过载载荷和机动飞行的角加速度,高压转子工作转速为 12000 r/min ,通过有限元法计算转子结构的径向最大弯曲挠度,优化的目标是控制转子系统结构质量的前提下,使转子结构最大挠曲变形降到最低。定义结构布局优化的数学表达式如下:

$$\min \begin{cases} \frac{1}{\sigma_{ave}(\mathbf{X}, f)} \\ w(\mathbf{X}, f) \end{cases} \quad \mathbf{X} = x_1, x_2, \dots, x_n$$
$$g_j(Y) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

式(14)即为目标函数。式中 $\mathbf{X}$ 为关键设计参数组成的参数向量, f 为环境载荷, $w(f, \mathbf{X})$ 为径向挠曲变形, Y 为结构力学特征参数。 $g_i(Y) \leq$

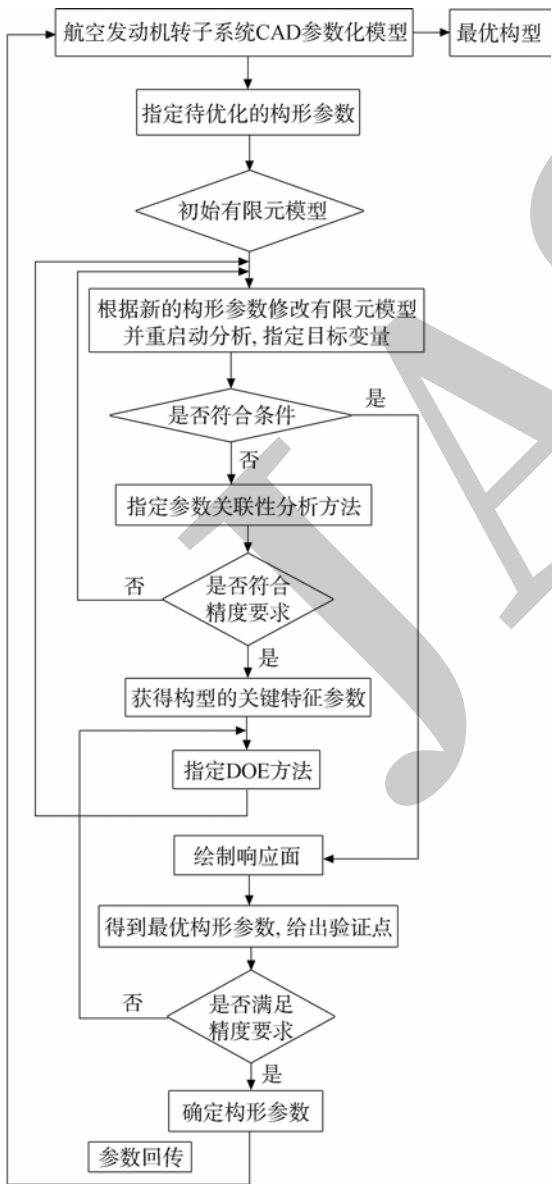


图 10 基于有限元法的结构布局设计流程
Fig. 10 Structural layout design process based on finite element method

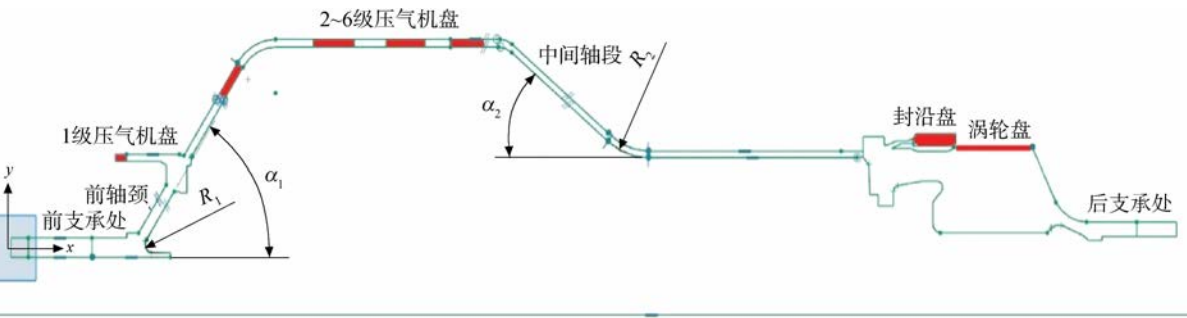


图 11 结构原始构形

Fig. 11 Structure original configuration

表 1 原始构形参数

Table 1 Original configuration parameter

$\alpha_1/(^{\circ})$	$\alpha_2/(^{\circ})$	R_1/mm	R_2/mm
55	42	12.1	112.2

0 为约束条件, $\sigma_{\text{ave}}(\mathbf{X}, f)$ 为外加环境载荷下结构的平均应力^[20], 表达式如下:

$$\sigma_{\text{ave}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \tag{15}$$

式中 σ_i 表示第 i 个结构单元的应力, m_i 表示第 i 个单元的质量。平均应力系数反映了材料的使用效率。式(14)是一个多参数、多目标的优化问题, 也可以在结构效率^[21]的意义下, 将其合并成一个参数, 定义为结构效率损失系数(Δ)

$$\Delta = \min \left[a \frac{1}{\sigma_{\text{ave}}(\mathbf{X}, f)} + b w(\mathbf{X}, f) \right]$$
$$\mathbf{X} = x_1, x_2, \cdots, x_n$$
$$g_j(Y) \leqslant 0 \quad j = 1, 2, \cdots, n \tag{16}$$

式(16)中 a, b 为加权系数, 可根据工程实际进行适当的选取, 把该系数作为为结构合理程度的度量。本文以该式为目标函数, 其中 a, b 分别取

10 000、2。首先基于 Spearman 法的参数关联性分析, 考虑在外载荷不变时, 构形参数对挠曲变形的影响(进行了 100 组构形参数计算), 可以得到如表 2 所示的各参数间的相关性矩阵, 它是一个矩阵元素均在 0~1 之间的对称阵。

由表 2 可以看出, 对抗变形能力影响较大的两个构形参数为 α_1 和 α_2 , 故选定 α_1 和 α_2 作为关键设计参数, 舍去参数 R_1 和 R_2 。

基于有限元计算得到的响应面如图 12 所示, 拟合精度控制在 30% 以内。响应面拟合采用稀疏网格法^[22], 该方法可以根据精度要求自动加密拟合点, 可以比较方便地拟合出符合要求的响应面。

基于多目标遗传算法, 通过响应面可以较为容易地找到极小值点 $(\alpha_1, \alpha_2) = (49.6^{\circ}, 37.5^{\circ})$, 该点即是优化后的最优构形点。优化前后的总变形如图 13 所示。

按照式(16)定义的结构效率损失系数为目标函数, 优化后的结构效率损失系数($\Delta = 0.646$)同优化前($\Delta = 0.981$)相比, 下降 0.335, 使结构质量基本不变的条件下, 转子刚度特性大幅提高。从参数关联性矩阵也可以看出, 后锥角角度 α_2 对转子刚度特性产生较大影响, 合理的倾角选取可以

表 2 参数关联性矩阵

Table 2 Parameter correlation matrix

参数	参数关联性矩阵系数				
	α_1	α_2	R_1	R_2	最大变形量
α_1	1	0.275	-0.0286	-0.125	0.214 286
α_2	0.275	1	-0.0321	-0.0035	0.785 71
R_1	-0.028 571	-0.032 143	1	-0.171 4	0.203 57
R_2	-0.125	-0.003 571	-0.171 4	1	-0.046 42
最大变形量	-0.214 286	0.785 71	0.203 57	-0.046 4	1

有效提升结构的抗变形能力。从总体变形图(图13)上也可以看出,不仅结构效率损失系数有所下降,而且整体变形的分布形式并没有较大变化,这对结构整体性能提升是有意义的。

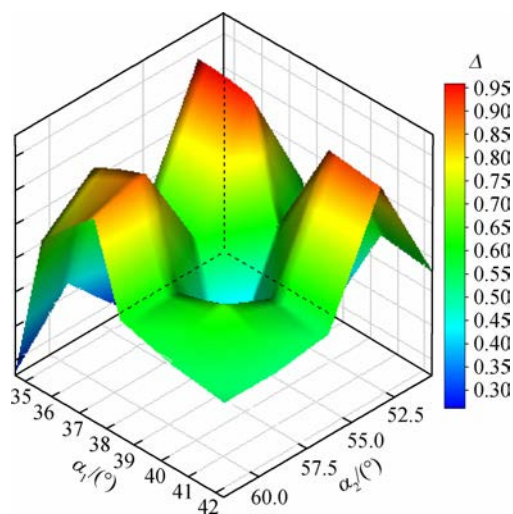


图12 拟合响应面

Fig. 12 Fitting response surface

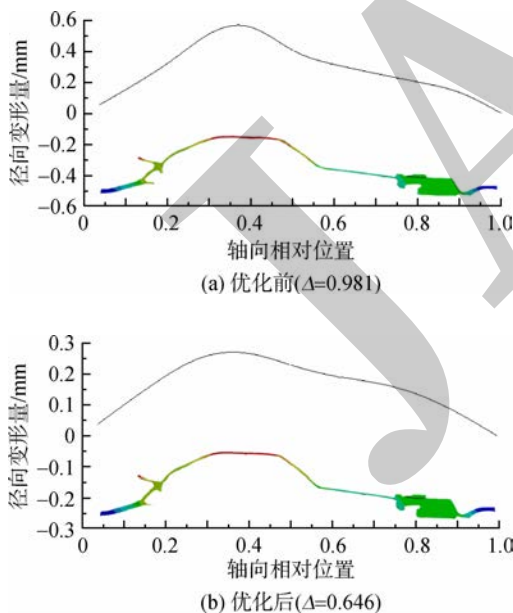


图13 优化前后总体变形

Fig. 13 Overall deformation before and after optimization

4 结 论

结构是航空发动机功能、性能及可靠性设计水平的综合体现,一切技术要求、性能指标、强度指标,以及安全性和可靠性都应建立在合理的结构布局设计上。合理的结构布局设计可以有效提高转子的力学特性。本文针对转子结构效率,提

出转子结构布局的优化设计方法,得到结论如下:

1) 转子系统的功能和性能是建立在合理的结构构形基础上,对转子构形的优化设计是从根本上提高转子力学特性的方法。本文针对转子构形关键参数的优化,提出了适合高性能航空发动机转子结构布局设计的方法和流程,并以两支点高负荷转子结构系统为例,验证了该方法的工程适用性。

2) 提出了的关键设计参数筛选和寻找方法,通过响应面法对转子进行结构布局优化设计。仿真结果表明,航空发动机转子构形的合理设计,特别是中间轴段的合理设计,使得转子结构效率损失系数下降 0.335,有效提升转子的抗变形能力。

3) 本文提出的航空发动机转子结构布局设计方法是以力学特性优化为目标的正向结构设计,是摆脱过多依靠经验,实现创新和先进性的有效途径,该方法不仅适合涡扇发动机,对涡轴/涡桨发动机等同样适用。

在实际工程中,受诸多其他条件的限制,优化后的构形还需要满足如气动、强度及加工装配工艺的要求,这时可以将结构布局优化问题转化为结构可靠性问题^[23]。需要搜索的最值区域是可靠性问题的缩减失效域,极值问题可以看做是稀疏事件的一种特殊情况,因此,可以将结构参数优化问题在可靠性问题的框架内进行求解,本文方法依然适用。

参考文献:

- [1] 洪杰,马艳红,张大义.航空燃气轮机总体结构设计与动力学分析[M].北京:北京航空航天大学出版社,2014.
- [2] ROZVANY G I N, BENDSOE M P, KIRSCH U. Layout optimization of structures [J]. Applied Mechanics Reviews, 1995, 48(2): 41-119.
- [3] 张大义,马艳红,梁智超,等.整机结构设计的评估方法:结构效率[J].航空动力学学报,2010,25(10):2170-2176. ZHANG Dayi, MA Yanhong, LIANG Zhichao, et al. Evaluation method on whole engine structural design: structural efficiency [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(10): 2170-2176. (in Chinese)
- [4] PARK P, GILBERT M, TYAS A, et al. Potential use of structural layout optimization at the conceptual design stage [J]. International Journal of Architectural Computing, 2012, 10(1): 13-32.
- [5] 陈予恕,张华彪.航空发动机整机动力学研究进展与展望 [J].航空学报,2011,32(8):1371-1391. CHEN Yushu, ZHANG Huabiao. Review and prospect on the research of dynamics of complete aero-engine systems [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(8):

- 1371-1391. (in Chinese)
- [6] FUKUSHIMA J, SUZUKI K, KIKUCHI N. Shape and topology optimization of a car body with multiple loading conditions[R]. SAE Technical Paper 920777, 1992.
- [7] SEITZ A, BIJEWITZ J, KAISER S, et al. Conceptual investigation of a propulsive fuselage aircraft layout[J]. International Journal of Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2014, 86(6): 464-472.
- [8] LIU Shutian, QIAO Heting. Topology optimization of continuum structures with different tensile and compressive properties in bridge layout design[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2011, 43(3): 369-380.
- [9] 王俨凯, 廖明夫, 张家豪. 航空发动机中介轴承的动力学减载设计[J]. 航空动力学报, 2017, 32(2): 492-499.
- WANG Yankai, LIAO Mingfu, ZHANG Jiahao. Dynamic load reduction design for inter-shaft bearing of aircraft engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(2): 492-499. (in Chinese)
- [10] FU Chao, REN Xingmin, YANG Yongfeng, et al. An interval precise integration method for transient unbalance response analysis of rotor system with uncertainty[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 107: 137-148.
- [11] CHO W, LEE K, CHO Y I, et al. Development and experimental verification of counter-rotating dual rotor/dual generator wind turbine: Generating, yawing and furling[J]. Renewable Energy, 2017, 114: 644-654.
- [12] 闻邦椿, 顾家柳, 夏松波, 等. 高等转子动力学: 理论、技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [13] 邓四二, 付金辉, 王燕霜, 等. 航空发动机滚动轴承-双转子系统动态特性分析[J]. 航空动力学报, 2013, 28(1): 195-204.
- DENG Sier, FU Jinhui, WANG Yanshuang, et al. Analysis on dynamic characteristics of aero-engine rolling bearing/dual-rotor system[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(1): 195-204. (in Chinese)
- [14] HYLTON P D. Minimizing dynamic response of counter-rotating engines through optimized node placement[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. Glasgow, UK: ASME, 2010: 25-32.
- [15] 曾小华, 王继新. 混合动力耦合系统构形与耦合装置分析设计方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015.
- [16] ASTIVIA O L O, ZUMBO B D. Population models and simulation methods: the case of the Spearman rank correlation[J]. Mathematical and Statistical Psychology, 2017, 70(6): 347-367.
- [17] 陈立周. 稳健设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 2-18.
- [18] 范叶森, 王三民, 杨振, 等. 多转子系统振动分析的子结构耦合矩阵法[J]. 航空动力学报, 2010, 25(3): 623-628.
- FAN Yesen, WANG Sanmin, YANG Zhen, et al. Substructure coupled matrix method for vibration analysis of multi-rotor systems[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(3): 623-628. (in Chinese)
- [19] 杨喜关, 罗贵火, 原鹏, 等. 模态综合法在双转子系统建模中的应用与验证[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(10): 1450-1454.
- YANG Xiguan, LUO Guihuo, YUAN Peng, et al. Application and verification of the modal synthesis method in dual-rotor system modeling[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(10): 1450-1454. (in Chinese)
- [20] 马艳红, 陈璐璐, 张大义, 等. 航空发动机转子系统结构效率评估参数及计算方法[J]. 航空动力学报, 2013, 28(7): 1598-1606.
- MA Yanhong, CHEN Lulu, ZHANG Dayi, et al. Assessment parameters and calculation methods of structural efficiency on rotor system in aero engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(7): 1598-1606. (in Chinese)
- [21] 于平超, 马艳红, 王存, 等. 航空发动机整机结构效率评估参数与计算方法[J]. 航空动力学报, 2016, 31(7): 1744-1753.
- YU Pingchao, MA Yanhong, WANG Cun, et al. Evaluation parameters and calculation methods of structural efficiency for whole aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(7): 1744-1753. (in Chinese)
- [22] 马石磊, 李方义, 李剑峰, 等. 基于稀疏网格的近似模型及其在轻量化设计中的应用[J]. 机械工程学, 2013, 49(7): 43-50.
- MA Shilei, LI Fangyi, LI Jianfeng, et al. Approximate model using sparse grid approach and its application in lightweight design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7): 43-50. (in Chinese)
- [23] 李洪双, 马远卓. 结构可靠性设计与随机优化设计的统一方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.

(编辑: 陈越)