

高速转子系统支承结构及力学特性设计方法

洪 杰^{1,2}, 宋制宏¹, 王 东³, 马艳红^{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 110015)

摘 要: 针对航空发动机高速转子系统支承结构及力学特性设计问题,开展支承结构约束特性(支点位置 and 支承刚度)对转子系统刚度及转子动力学特性的影响分析,建立转子支承结构约束特性与转子力学特性关联力学模型。通过对转子系统支承结构特征参数与刚度特性、振动特性等力学特性的关联性分析,定量描述了转子支承约束特征及轮盘惯性载荷对转子系统动力学特性的影响规律,在此基础上,提出了基于转子变形控制的支承约束特性与转子力学特性一体化设计方法。仿真计算结果表明:对于高速转子系统可以通过对支点位置及支承约束刚度的设计,调整转子弯曲变形和临界转速的分布特征,使其在通过或靠近弯曲振型临界转速的高转速工作状态下,具有足够的安全裕度。这种通过结构特征参数的变化,优化转子系统力学特性的方法,对航空发动机总体结构布局及动力学设计具有重要的工程参考价值。

关 键 词: 高速转子系统; 支承结构特性; 力学特性; 动力学特性; 结构几何构形

中图分类号: V231.96 **文献标志码:** A

Design method for bearing-support structure and mechanical properties of high-speed rotor system

HONG Jie^{1,2}, SONG Zhihong¹, WANG Dong³, MA Yanhong^{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 110015, China)

Abstract: For the optimization design of the structure and mechanical properties of the high-speed areo-engine rotor system, the influence of bearing-support properties (supporting point and supporting stiffness) on the rotor stiffness and dynamics was studied, and the correlation model for the bearing-support structure and rotor dynamics properties was established. The correlation between bearing-support parameters and mechanical properties, including the rotor stiffness, vibration, was analyzed. The influences of bearing-support properties and inertia load of rotating disc on rotor dynamics were quantitatively described, and the optimization design method and flow of bearing-support structure and rotor dynamics

收稿日期: 2018-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(51575022,11672017)

作者简介: 洪杰(1965—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事航空发动机转子力学、航空发动机整机动力学、旋转机械振动控制、智能结构与新型阻尼材料等。

引用格式: 洪杰,宋制宏,王东,等. 高速转子系统支承结构及力学特性设计方法[J]. 航空动力学报,2019,34(5):961-970. HONG Jie, SONG Zhihong, WANG Dong, et al. Design method for bearing-support structure and mechanical properties of high-speed rotor system[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(5): 961-970.

were presented. The numerical simulation result shows that the bearing-support structure properties method could determine the supporting point and supporting stiffness, and improve the stuffiness and vibration properties. This method is highly feasible, and beneficial to improve the design efficiency, and has important reference value for design of areo-engine overall structural layout and structural dynamics.

Key words: high-speed rotor system; bearing-support structure characteristic; mechanical properties; rotor-dynamic characteristic; geometry configuration of structure

随着航空燃气轮机转子系统向高转速、轻质化的发展,转速负荷不断加大,支点数目的减小使系统刚性弱化。在整体结构布局、质量惯性和转速负荷等限制下,转子结构的质量/抗弯刚度沿轴向分布不均性加大,在高转速工作时易出现弯曲变形,支点动载荷较大等特点^[1]。在现代航空发动机转子系统动力学设计中,需要综合考虑转子系统不同工作载荷环境下的刚度及振动特性,并掌握结构几何构形、支点位置及支承刚度等结构特征参数对转子系统力学特性的影响规律及优化设计方法。

洪杰等^[2]通过静刚度、动刚度以及整机模型的建立,针对支承动刚度对转子动力学特性的影响开展相关研究,研究结果揭示了转子支承刚度剧烈变化的原因。于欢、洪杰等^[3-4]建立支承松动转子动力学模型,对松动支承引起的支承刚度非线性/非确定性变化的产生机理及影响规律开展了相关研究,并提出了采用低敏感度设计降低支承刚度变化对转子系统动力特性的影响。

Ghahramani 等^[5]将遗传算法与有限元法结合,优化悬臂转子轴段长度与截面面积,使得转子系统最大转速远离临界转速。Lopez 等^[6]以“避开共振”为优化目标,采用罚函数法对转子-轴承系统临界转速进行优化设计,与权重法、非支配排序遗传算法等优化方法相比该算法可有效提高计算效率。于平超等^[7]通过局部非线性刚度复杂转子系统动力学模型的建立,将 FFT 迭代法与 Brodey 迭代法相结合,对存在由结构特征所引起的局部非线性刚度柔性转子系统动力响应规律进行了分析。朱爱斌、魏源等^[8-9]对基于现代语言编译开发平台,针对对各类转子-轴承系统动力学分析系统的开发问题进行阐述,并对系统的总体设计与具体实现途径进行了详细介绍。

随着航空发动机转子结构负荷的不断提高和工作载荷环境越发复杂,采用各构件单独设计后组合,再进行“避开共振”动力特性评估及给定安

全裕度的转子动力学设计方法,是无法满足高转速、高结构效率^[10]转子系统力学特性设计要求。由于同几何构形相比,支承结构具有可变性强,易于调整等特点。因此,本文以支承结构特性为主要对象,通过建立支承约束特征参数对系统力学特性影响的关联模型,掌握支承约束、轮盘陀螺力矩效应对转子系统刚度特性、振动特性影响规律,提出了高速转子支承结构及力学特性优化设计方法。

1 转子支承结构约束特性

转子是由轮盘、轴段及相关连接结构组成。轮盘的质量和位置主要是由强度和气动设计决定,对于转子动力学特性影响最为敏感的结构特征参数是转子几何构形及支承结构特性。图 1 为典型两支点高速转子结构系统,转子质量和截面抗弯刚度沿轴向分布极不均匀对转子刚度与振动特性具有不利的影响。

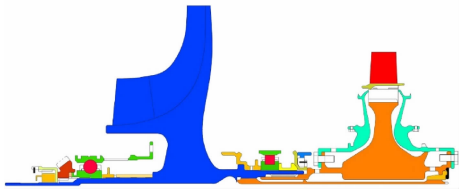


图 1 典型两支点高速转子结构系统

Fig. 1 Exemplary high-speed rotor system with two bearings

对于复杂转子结构而言,可采取质量/抗弯刚度分布评估^[11-12]的方法对转子结构特征准确描述,以便通过转子结构参数对力学特性进行优化设计。

在转子几何构形确定后,支承结构对转子系统力学特性起到决定性作用,其主要设计参数为支点位置和支承刚度。支承结构的力学效果是确定转子系统约束边界条件。在支承结构设计中,

通过优化支点位置和支承刚度来实现在工作载荷环境下对转子变形的控制,以及调节转子系统振动特性等作用。图 2 为横向载荷下支承结构特性对转子变形的影响。

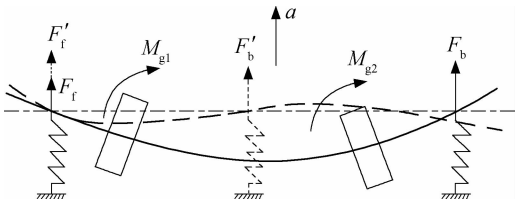


图 2 横向载荷下支承结构特性变化对转子变形影响
Fig. 2 Influence of bearing-support properties on rotor deformation with transverse load

如图 2 所示, a 为横向过载加速度, M_{g1} 、 M_{g2} 为前后轮盘所引起的惯性弯矩, F_f 、 F_b 为 1-0-1 转子结构下,前后支点所受的载荷, F'_f 、 F'_b 为 1-1-0 转子结构下,前后支点所受的载荷。

在过载/机动等飞行状态下,转子结构质量产生惯性载荷,不同支点位置及支承刚度可以具有不同承担惯性载荷和控制变形特性。此外,支承结构特性也对转子系统振动特性有巨大影响^[13]。

转子结构特征与支承结构特性共同决定了转子系统的力学特性。结构动力学的基本原则为等刚度设计,由于航空发动机转子结构具有非均匀性分布特征,因此,在结构及其动力特性的优化设计中,在保证转子质量/刚度分布的协调性的基础上,应通过调整支承结构特性参数,使得转子系统在具有良好动力学特性,同时具有最轻的质量。

2 转子系统及其力学特性

在转子系统设计过程中,力学特性主要取决于转子结构特征与支承结构特性,其中,结构设计参数包括:转子几何构形、支点位置和支承刚度,此外,随着转子系统的运动和转速上升,轮盘陀螺力矩效应对转子系统动力学特性影响敏感度逐步增加。

2.1 支承约束特性

在给定转子几何构形及关键尺寸参数情况下,支承结构特性设计对转子系统的横向/角向变形和振动特性具有重要影响。转子支承结构的约束效应主要取决于两个参数,即支点位置和支承刚度,前者确定约束的位置,后者则表示约束的强度。

对于具有结构非均匀轴向分布特征的航空发

动机转子系统,在工作中既承受机动/过载所产生的惯性载荷^[14],又要在多阶振动模态以上的高转速下工作,因此,根据转子结构及其受力环境,建立转子系统支承约束力学模型,如图 3 所示,研究支承结构特性对转子系统力学特性的影响规律。

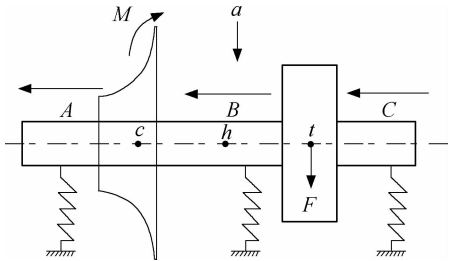


图 3 高速两支点转子系统支承约束力学模型
Fig. 3 Constrained mechanical model of high-speed rotor system with two supporting points

图 3 中, M 、 a 、 F 分别为转子工作过程中可能受到的弯曲载荷,横向过载加速度与集中载荷;点 c 、 h 、 t 分别表示压气机轮盘、转子、涡轮盘的质心标志。

航空发动机高速转子多采用两支点支承方式,根据总体结构布局,前支点位置区域位于压气机前(A),后支点位置区域一般位于压气机与涡轮之间(B)或涡轮后区域(C)。支承结构除对转子起到支承作用外,还需要为承受复杂载荷的转子提供变形约束,并对转子系统的振动特性进行调整,以确保转子系统在工作转速范围内具有良好的振动特性。因此,通过建立典型两支点高速转子系统支承约束力学模型对转子支承约束与刚度特性及振动特性的关联性进行分析与研究。

2.1.1 对转子惯性刚度的影响

转子系统工作于复杂载荷环境中,转子的抗变形能力是保证其在外部或惯性载荷下,稳定工作的重要力学特性参数,可以通过“刚度”特性进行定量反映。实际转子系统为弹性体,在惯性载荷作用下,转子结构存在弯曲变形;而惯性刚度,则反应了非惯性运动时,转子承受自身质量惯性载荷作用下的抗变形能力,其定义表达式为

$$\begin{cases} K_{\text{iner}}(x) = \frac{m_{\text{rotor}} a}{y(x)} \\ K_{\text{iner-min}} = \frac{m_{\text{rotor}} a}{y_{\text{max}}(x)} \end{cases} \quad (1)$$

其中 m_{rotor} 为转子质量, a 为过载加速度, $y(x)$ 和 $y_{\text{max}}(x)$ 为转子惯性载荷下各位置横向变形及最大横向变形, $K_{\text{iner}}(x)$ 、 $K_{\text{iner-min}}$ 分别为惯性刚度和

最小惯性刚度。一般可将转子最小惯性刚度作为衡量转子系统抗变形能力的标准,并简称为“惯性刚度”。

在转子结构确定的情况下,其惯性刚度主要与支承特性有关,由于支承刚度的影响是一个定值,可将支点简化为简支,仅考虑支承位置的影响。同时,支点位置改变还会对支点载荷产生较大的影响,根据平衡方程可得

$$\begin{cases} \int_0^l q(x)dx + F_c + F_t = F_i + F_b \\ \int_0^l q(x)(x_h - x)dx + F_c(x_h - x_c) + F_t(x_h - x_t) = F_i(x_h - x_i) + F_b(x_h - x_b) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, x 为转子轴向坐标, $q(x)$ 为横向过载下转子 x 处受到的单位载荷; F_c 和 F_t 为压气机轮盘与涡轮盘所受到的集中载荷; x_h 、 x_c 、 x_t 分别为转子、压气机、涡轮的质心位置; x_i 、 x_b 为前、后支点支承位置; l 为前、后支点轴向距离。

前、后支点载荷随支点位置变化趋势,如图4所示。图中 m_{rotor} 为转子质量, a 为横向过载加速度。

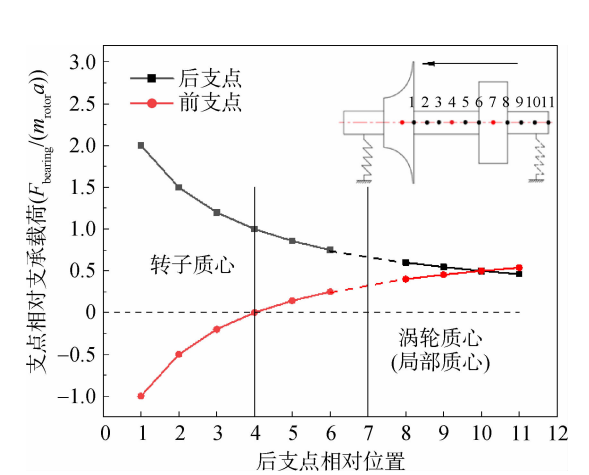


图 4 横向过载时,支点载荷与支点位置的关系
Fig. 4 Relationship between supporting point and bearing load under transverse acceleration

后支点由远端向前支点靠近时,后支点载荷不断增大,前支点载荷不断减小。当支点跨越转子整体质心,距质心较远的支点出现“载荷反向”的现象,其载荷大小随两支点距离的减小而增大,两支点载荷绝对值的和大于转子所承受的横向惯性载荷。因此,在支点设计时,后支点不应跨越转子质心。

根据欧拉梁变形^[15]理论,可求解惯性载荷

下,转子系统变形情况及“惯性刚度”。

$$\begin{cases} \theta(x) = \int_0^x \frac{M(x)}{EI(x)} dx + C_1 \\ y(x) = \iint \frac{M(x)}{EI(x)} dx + C_1 x + D_1 \\ y(x_i) = 0, y(x_b) = 0 \\ M(x) = - \int_0^x q(x)x dx + F_i \langle x - x_i \rangle - F_c \langle x - x_c \rangle - F_t \langle x - x_t \rangle + F_b \langle x - x_b \rangle \\ K_{\text{iner-min}} = \frac{\int_0^l q(x)dx + F_c + F_t}{y(x)_{\text{max}}} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $\theta(x)$ 、 $M(x)$ 、 $I(x)$ 分别为转子 x 处的转角、截面弯矩与截面惯性矩; E 为弹性模量, C_1 、 D_1 为通过边界条件确定的常数; $y_{\text{max}}(x)$ 为转子最小横向变形, $\langle \rangle$ 为麦考利括号。

图5为转子系统最小惯性刚度,随支点位置的变化情况。其中, $K_{i-\min}$ 为后支点位置为1时转子系统的最小惯性刚度。

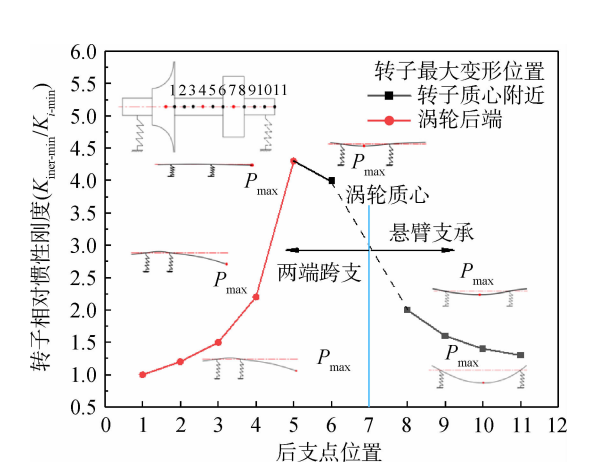


图 5 转子惯性刚度与支点位置的关系
Fig. 5 Relationship between minimum inertia stiffness of rotor and supporting point

转子系统的“惯性刚度”主要与局部质心和支点间的相对位置有关。图5以后支点位置变动为例,对支点位置与“惯性刚度”的关联性进行描述。当后支点位于涡轮局部质心外侧(8~11),前后支点间的跨距越大,转子“惯性刚度”越小,质心附近的最大变形越大。后支点位于压气机和涡轮两部件的局部质心之间(1~6),支点与局部质心的相对位置使得转子系统形成“两端支承”结构和“悬臂支承”结构。根据位移叠加原理^[15],在横向载荷作用下,两结构变形相反,互相抑制,结构变形如图6所示。

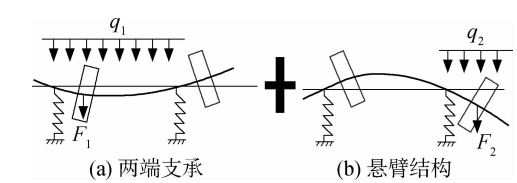


图 6 惯性载荷下,两结构变形情况
Fig. 6 “two structure” deformation with inertial load

图 6 中, F_1 、 F_2 为横向过载下,压气机与涡轮所受的惯性集中载荷; q_1 、 q_2 为“两端支承”与“悬臂支承”的转子转轴所受到的单位惯性载荷。

后支点距某部件局部质心越近,该结构的有效长度越短,“惯性刚度”越大,而另一结构的“惯性刚度”越小。因此,通过支点位置的选取,合理利用两结构变形抑制的效应,可以使得转子系统“惯性刚度”最佳。

转子系统受横向“惯性载荷”时,支点与“局部质心”及“转子质心”间的相对位置会分别对“惯性刚度”与支承载荷产生影响。因此,通过支点位置的合理选取,使得转子系统具有较强的抗变形能力与较低的支点载荷。

2.1.2 对转子振动特性的影响

由于转子系统较为复杂,为准确反映支承约束特征对转子系统振动特性的影响,可采取有限元法对转子结构进行离散化,并采用拉格朗日能量法建立其动力学方程。

转子系统一般由轮盘、弹性轴和支承三种单元组成,经推导可得转子振动方程^[16]为

$$\mathbf{M}\mathbf{U} + \mathbf{\Omega J}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = 0 \tag{4}$$

式中 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{J}$ 和 $\mathbf{K}$ 为转子系统的质量矩阵,转动惯量矩阵和刚度矩阵, $\mathbf{U}$ 为转子系统广义坐标向量, $\dot{\mathbf{U}}$ 为转子系统广义坐标向量, $\ddot{\mathbf{U}}$ 为转子系统广义坐标加速度向量。该方程反应了转子系统自身的固有振动特性,可通过给定公转转速 $\mathbf{\Omega}$,求解共振转速,临界转速等固有特性。

$\mathbf{F}$ 为转子系统所受到的实际外部载荷时,其余矢量符号与式(4)相同,其振动方程

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{\Omega J}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \tag{5}$$

该方程反映了转子载荷作用下的振动响应特性,可根据该方程对支点动载荷、运动轨迹等响应特性进行求解。

对于两支点高速转子系统的动力学设计,一般采用刚性转子设计,即在工作转速范围不存在弯曲模态临界转速,但是随着航空发动机转子负荷的增加,弯曲临界越来越靠近工作转速,因此转子支承结构设计的主要目标就是提高弯曲临界

转速。
支承刚度与转子刚度相比较小时,转子系统存在刚体振型临界,其振动形式主要为支承结构的振动,而共振转速则与两支点支承刚度组合有关。刚体振型可分为平动振型与俯仰振型,图 7 为转子刚体振型示意图。

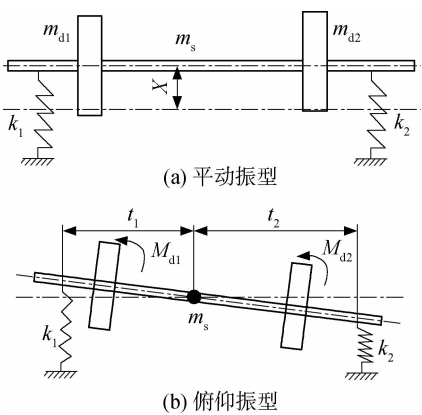


图 7 转子刚体振型示意图
Fig. 7 Rigid mode shape of rotor

图 7 中, m_s 、 m_{d1} 、 m_{d2} 分别为转子转轴质量、前轮盘质量、后轮盘质量; k_1 、 k_2 为前、后支点支承刚度; t_1 、 t_2 为前、后支点到振动节点的距离; M_{d1} 、 M_{d2} 为俯仰振型下,前、后轮盘所受到的陀螺力矩; X 为转子平动振幅。

对于转子弯曲振型临界,支点以变形约束的方式对转子弯曲刚度起到加强作用,从而提高转子系统共振转速,既支点位置变化和支承刚度与转子弯曲刚度比值的大小关系都会对转子系统振动特性产生影响。图 8 为弯曲共振转速随支点位置的变化情况。 f_0 为转子弯曲自由模态振动频率。

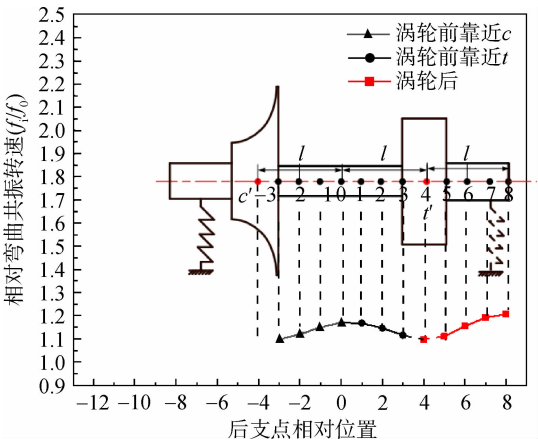


图 8 支点位置变化对弯曲共振转速的影响
Fig. 8 Influence of support point on bending resonance frequency

图 8 中 f_0 为转子一弯自由模态频率, f_i 为不同支点位置转子系统弯曲共振转速。

转子弯曲振型一般存在两个节点, 且靠近局部质心。支点距振型节点(图中 c' 、 t' 为弯曲自由模态节点)越远, 转子弯曲振动频率越高。这是因为, 当支点位置越靠近振动节点时, 振动弯曲变形越小; 在支承刚度一定的情况下, 支承对转子的变形约束能力越弱, 转子系统的弯曲共振转速随之降低; 而反之, 弯曲振动频率增大。图 9 为支承刚度对共振转速的影响。图中 K_{bearing} 为支点支承刚度。

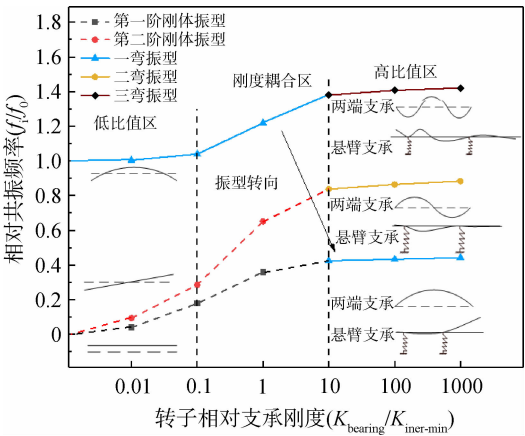


图 9 转子支承刚度对共振转速影响
Fig. 9 Influence of supporting stiffness on resonance frequency of rotor

支承刚度与转子最小惯性刚度的比值(相对支承刚度)较小时, 支承刚度变化对前两阶刚体振型影响较大, 对弯曲频率及振型的影响较小。这是由于刚体振型以支承结构的振动为主, 支承结构自身刚度的增大会造成振动频率升高。

随支承刚度与转子刚度差距逐渐缩小, 支承结构的变形约束能力增强, 弯曲共振转速对支承刚度变化的敏感性随之升高。

当支承刚度远大于转子自身刚度时, 支承结构可视为简支。此时, 支点对转子振动具有极强的约束能力, 支点位置几乎不存在振动位移, 振动节点位于支点处。此时继续增加支承刚度对共振转速几乎不存在影响。值得注意的是, 支承刚度较大时, 两端跨支转子的各阶振型转变为 $(n+1)$ 节点的弯曲振型。对于悬臂支承转子, 由于后支点位于压气机与涡轮的局部质心间, 转子系统可分别视为“两端简支”与“悬臂支承”结构的组合体, 其各阶振型转变为两结构不同阶次弯曲振型的叠加。

转子系统的振动固有频率, 模态振型受支承约束特性的影响较大。因此, 通过支点位置及支承刚度的优化设计可以有效控制各阶模态频率, 使得转子系统具有良好的振动特性。

2.2 轮盘惯性特性

航空发动机转子工作转速较高, 转轴的弯曲变形会造成不同轴向位置的轮盘产生不同程度的倾斜, 从而使得作用在转子上的惯性力矩(陀螺力矩或哥氏力)的大小及方向发生变化, 并对转子系统固有特性与响应特性产生影响, 转子系统陀螺力矩分布示意图如图 10 所示。

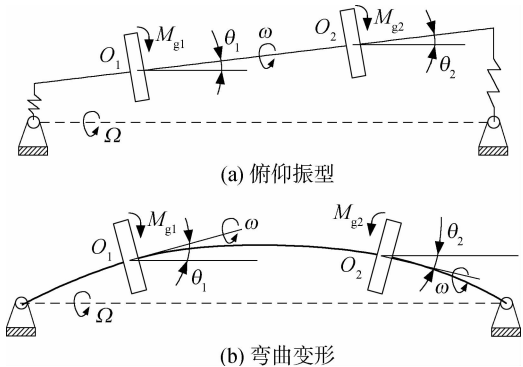


图 10 转子系统陀螺力矩示意图
Fig. 10 Effect of gyro moment on rotor system

图 10 中, ω 和 Ω 分别为转子自转与公转角速度, θ_1 和 θ_2 分别为转子前后轮盘处转角。

根据转子动力特性分析可知, 在转子做同步正进动时陀螺力矩方向与轮盘倾斜方向相反, 陀螺力矩有抑制转子变形的作用, 因而, 转子各阶共振转速随转速升高而增大, 从而导致转子临界转速提高。因此, 通过对轮盘陀螺力矩的合理利用可有效调节转子弯曲临界转速。

轮盘陀螺力矩效应不仅可以改变转子系统固有特性, 也会对其振动响应特性产生影响。

如图 11 为两端简支单盘转子模型, 具有质量为 m_e 的偏心轮盘(偏心距为 e), l 位于转子中点的一侧, 距离两支点的距离分别为 a' 、 b' ($a' > b'$), $a' = ul$, $b' = (1-u)l$, 转子转速为 ω , 以此讨论轮盘陀螺力矩与支点动载荷的关联性。

根据图 11 所示的转子模型, 建立单盘偏置转子系统振动方程, 对支点动载荷进行求解。采用复数表示方法, 将转子轮盘中心的横向位移为 $r = x + iy$, 轮盘位置转角为 $\theta = \theta_y - i\theta_x$, 其中 x 、 y 、 θ_x 、 θ_y 为系统广义坐标, 得到转子轮盘处横向变形 r_0 与角向变形 θ_0 。

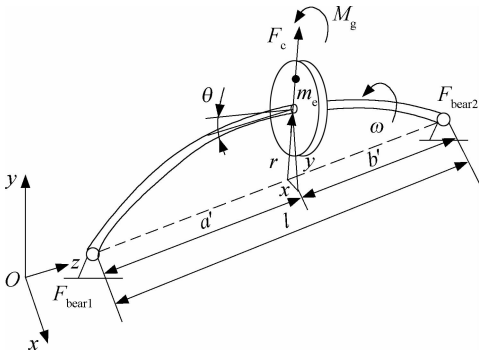


图 11 两端支承单盘偏置转子模型

Fig. 11 Model of rotor with bias disc and two bearings supporting at both ends

$$\begin{bmatrix} r_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-\lambda^2(Ql^2 + R\lambda^2)}{R\lambda^4 + Ql^2\lambda^2 - HQl^2 - HR\lambda^2 + T^2l^2} \\ \frac{Tl\lambda^2}{R\lambda^4 + Ql^2\lambda^2 - HQl^2 - HR\lambda^2 + T^2l^2} \end{bmatrix} e \quad (6)$$

式中 $\lambda = \frac{\omega}{\sqrt{3EI/l^3 m_e}}$, $H = \frac{-3u^2 + 3u - 1}{u^3(u-1)^3}$, $T = \frac{2u-1}{u^2(1-u)^2}$, $Q = \frac{-1}{u^2-u}$, $R = \frac{J_d}{m_e}$, J_d 为轮盘直径转动惯量。

因此,转子受不平衡载荷为

$$F_c = F_{u,x} + iF_{u,y} = m_e \omega^2 (r_0 + e) e^{i\omega t} \quad (7)$$

轮盘陀螺力矩为

$$M_g = M_{g,y} - iM_{g,x} = (J_p - J_d) \omega^2 \theta_0 e^{i\omega t} \quad (8)$$

式中 J_p 为轮盘极转动惯量。

由转子受力可知,前后支点动载荷分别为

$$\begin{cases} F_{bear1} = F_{b1,x} + iF_{b1,y} = \frac{F_c b' - M_g}{l} = \frac{m_e \omega^2 (r_0 + e) b' - (J_p - J_d) \omega^2 \theta_0 e^{i\omega t}}{l} \\ F_{bear2} = F_{b2,x} + iF_{b2,y} = \frac{F_c a' + M_g}{l} = \frac{m_e \omega^2 (r_0 + e) a' + (J_p - J_d) \omega^2 \theta_0 e^{i\omega t}}{l} \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可知,除质量偏心所引起的不平衡载荷 F_c 外,转子支点动载荷还包括由转子弯曲变形引起的轮盘陀螺力矩项 M_g 。陀螺力矩 M_g 主要与轮盘处轴段弯曲变形弹性线斜率 θ ,轮盘转动惯量 J_p 与转速 ω 相关。

因此,在转子动力学设计中,需要通过转子抗弯刚度分布及支点位置的调整,控制轮盘轴段的弯曲变形,以减小轮盘陀螺力矩对支点动载荷的影响。

3 高速转子系统力学特性设计方法

航空发动机高速转子系统力学特性设计是对转子结构特征与支承结构特性的选取与确定过程。如图 12 所示,该设计方法以转子系统结构特征作为设计参数,并将结构特征对力学特征的影响规律作为设计手段,对转子系统进行“正向设计”,以确保转子系统抗变形能力,振动特性等力学特性良好。

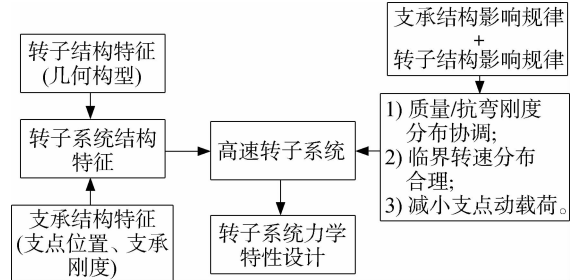


图 12 高速转子系统力学特性设计思路

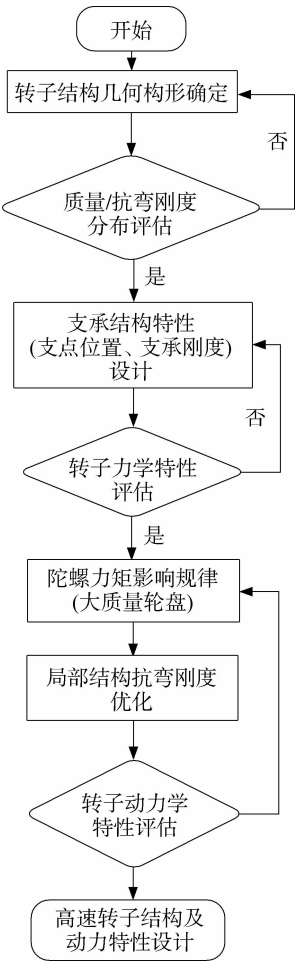
Fig. 12 Concept design of mechanical properties of high-speed rotor system

图 13 为高速转子系统结构及力学特性设计流程。如图 13 所示,在转子系统结构及力学特性设计过程中,首先根据转子结构特征对力学特征的影响规律,对转子结构构形进行优化设计,保证转子质量/抗弯刚度分布协调。其次根据支承结构对转子系统力学特性的影响规律,通过筛选及调整支点位置与支承刚度,控制转子系统弯曲变形,提高“惯性刚度”;调整临界转速分布,增大弯曲临界共振裕度,减小支点动载荷,以保证转子系统具有良好的动力学特性。此外,对大质量轮盘所引起的陀螺力矩效应对转子系统的振动特性影响进行局部结构优化,提高转子动力学性能。

本节以两支点高速转子系统为例,在给定几何构形情况下,将支点位置与支承刚度作为设计参数,对转子系统“惯性刚度”与振动固有特性进行设计,证明支承结构特性影响规律与动力学设计方法的可靠性与可行性。图 14 为典型高速转子系统主体结构示意图。

两支点高速转子系统稳定工作转速为 26 000 r/min,其弯曲自由模态频率为 495 Hz。

转子系统的抗变形能力(惯性刚度)主要受支点位置的影响,而临界转速则受到支点位置及支承刚度共同影响,其影响规律及相应机理,由前节



位置的优化模型可表示为

$$\begin{aligned} &\max K_{\text{iner-min}}(x) \\ &\text{subject to } \lambda - \left| \frac{\omega_b}{\Omega} - 1 \right| \leq 0 \quad (10) \\ &x \in Z \end{aligned}$$

式中 x 为支点位置, $\lambda=20\%$ 为弯曲临界允许裕度, ω_b 为弯曲临界转速, Ω 为转子工作转速, Z 为转子高压轴及后轴径位置。根据前节分析可计算“惯性刚度”与弯曲临界随支点变化规律。

图 15 与图 16 分别为后支点位置对转子惯性刚度和弯曲临界转速的影响。

如图 15 和图 16 所示, 支点位置对转子“惯性刚度”和弯曲临界转速的影响规律与转子-支承力

图 13 高速转子系统结构及力学特性设计流程
Fig. 13 Design process of rotor structure and its mechanical properties

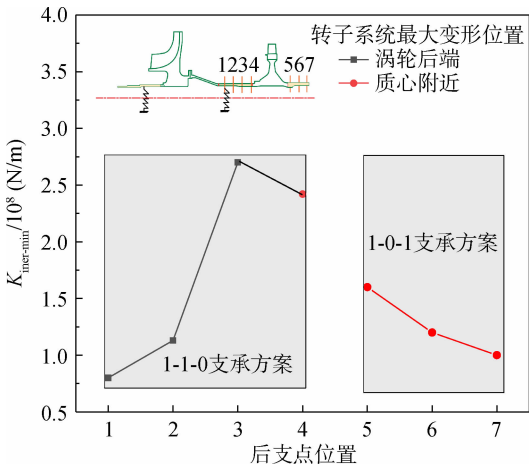


图 15 后支点位置对转子系统惯性刚度的影响
Fig. 15 Influence of rear supporting points on inertia stiffness of rotor system

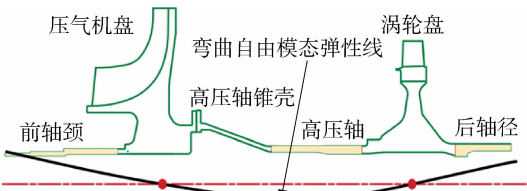


图 14 典型高速转子系统主体结构
Fig. 14 Exemplary high-speed rotor system major structure

分析可知。因此, 为使支承结构特性的优化更为简单, 且具有较强的可行性, 可分别对支点位置及支承刚度进行单独优化。

3.1 支点位置确定

根据典型高速转子系统主体结构构形, 在给定前支点位置前提下, 将转子系统最大“惯性刚度”作为优化目标, 由于转子弯曲变形是造成转子支点动载荷和振动过大的主要原因之一, 将弯曲临界“共振裕度”大于 20% ^[17] 作为约束条件, 支点

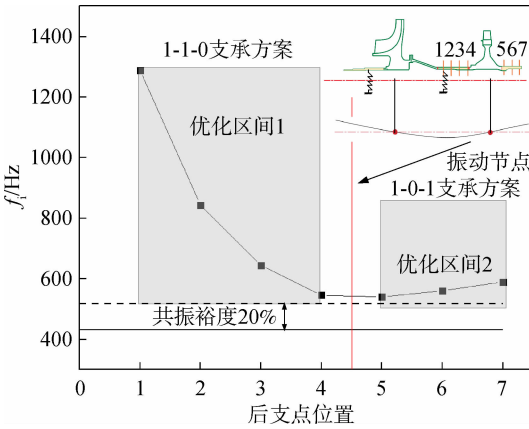


图 16 支点位置对临界转速的影响
(前后支点当量刚度: 4×10^7 N/m)
Fig. 16 Influence of supporting points on critical speed
(front and back support stiffness: 4×10^7 N/m)

学模型一致。值得注意的是,转子悬臂支承方案,其陀螺力矩效应远大于“两端跨支”,转子弯曲临界转速随位置变化大幅提升。

根据图 15、图 16 及优化模型可得,后支点位置确定在 3 号处时,转子系统惯性刚度最佳,且满足“共振裕度”约束条件。

综上,对于典型两支点高速转子系统,采用悬臂支承方案时,可以通过优化后支点位置得到最佳“惯性刚度”。

3.2 支承刚度确定

在支承刚度设计时,应增大转子弯曲临界共振裕度,并保证低阶刚体振型的弯曲变形(应变能)较小,支承刚度优化模型可表示为:

$$\max \left| \frac{\omega_b(K_{bearing})}{\Omega} - 1 \right|$$
$$\text{subject to } \left| \frac{U_{structure}^1}{U_{all}^1} \right| \leq \eta \tag{11}$$
$$K_{bear} \in Z'$$

式中 $K_{bearing}$ 支承刚度; $U_{structure}^1$ 、 U_{all}^1 分别为第 1 阶刚体振型,转子结构及转子系统的应变能; $K'_{iner-min}$ 由支点位置所确定的惯性刚度。 η 应变能分布系数,转子结构刚体振型下,所能允许的最大弯曲变形。 $Z' \in [K_n, 10^8]$ N/m, K_n 为确定支点位置时所选取的当量支承刚度。

图 17 为支承刚度对转子结构应变能的影响,转子第一阶刚体振型应变能随着支承刚度的增大而增大,支承结构约束能力的加强,使得转子结构的弯曲变形不断增大,应变能提高。应变能约束边界条件为 $\eta=20\%$ 。

根据图 17 与转子-支承力学模型,可计算该转子系统支承刚度对弯曲临界的影响,如表 1 所示。

根据支承刚度优化模型,在满足支承刚度变量范围与应变能约束条件下,支点当量支承刚度为 $0.25(6.71 \times 10^7 \text{ N/m})$ 时,转子系统具有最大共振裕度(50.2%)。

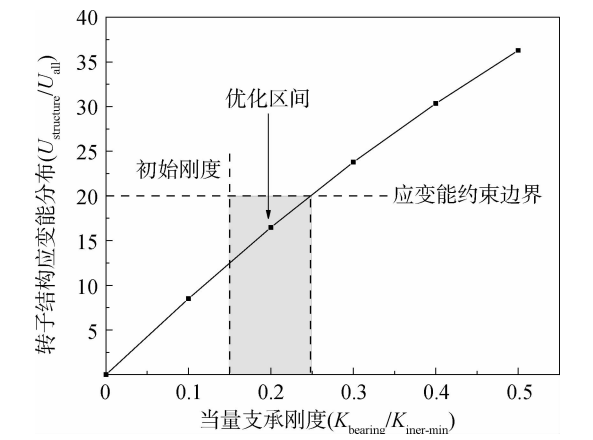


图 17 支承刚度对高速转子系统结构应变能的影响
Fig. 17 Influence of supporting stiffness on the highspeed rotor structure strain energy

表 1 支承刚度对弯曲临界的影响
Table 1 Influence of supporting stiffness on critical speed

参数	设计点 1	设计点 2	设计点 3	设计点 4
当量支承刚度	0.15	0.2	0.25	0.5
弯曲临界转速/Hz	637	651	660	736
共振裕度 $ \omega_b/\Omega-1 \times 100\%$	21.8	50.0	52.4	70.0
第一阶刚体振型-转子应变能比例/%	12.4	16.5	20	36.3

4 结论与分析

针对高速转子支承结构与力学特性优化设计问题,通过建立转子结构-支承约束力学模型,对复杂工作载荷下,转子系统多结构参数与力学特性的关联性进行分析,并提出支承约束特性与转子系统力学特性一体化设计方法,主要结论如下:

1) 转子几何构形与支承结构设计是保证转子系统良好动力学特性的基础。在动力学设计过程中,可采取转子结构质量/抗弯刚度分布定量分

析,支点位置及支承刚度筛选对转子系统抗变形能力、振动特性等多种关键力学性能进行一体化设计。

2) 在转子几何构形确定的情况下,支承结构设计对转子系统的抗变形能力,振动特性等力学特性起到决定性作用。与几何构形相比,支承结构更加易于调整,因此,以支承约束特性对转子力学特性的影响规律作为设计手段,可大大提高转子设计效率,降低设计成本。同时,通过转子系统局部结构优化,可利用大质量轮盘的陀螺力矩效

应,进一步提高转子系统的动力学性能。

3) 本文提出的航空发动机转子系统结构与力学设计方法,是以多种关键力学特性参数为设计目标的正向结构设计方法。该设计方法可以有利于摆脱多经验,单一目标参数的传统设计方法,具有重要的工程参考价值。

参考文献:

[1] 陈光,洪杰,马艳红. 航空燃气涡轮发动机结构[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010.

[2] 洪杰,王华,肖大为,等. 转子支承刚度对转子动力特性的影响分析[J]. 航空发动机,2008,34(1):23-27.
HONG Jie,WANG Hua,XIAO Dawei,et al. Effects of dynamic stiffness of rotor bearing on rotordynamic characteristics[J]. Aeroengine,2008,34(1):23-27. (in Chinese)

[3] 于欢,马艳红,肖森,等. 高速柔性转子支承松动力学特征及动力特性[J]. 北京航空航天大学学报,2017,43(8),1677-1683.
YU Huan,MA Yanhong,XIAO Sen,et al. Mechanical and dynamic characteristics of bearing with looseness on high-speed flexible rotor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2017,43(8),1677-1683. (in Chinese)

[4] 洪杰,于欢,肖森,等. 高速柔性转子系统非线性振动响应特征分析[J]. 北京航空航天大学学报,2018,44(4):653-661.
HONG Jie,YU Huan,XIAO Sen,et al. Nonlinear vibration response characteristics of high-speed flexible rotor system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2018,44(4):653-661. (in Chinese)

[5] BEHNAM G,ADAM K,JUSSI T S,et al. Genetic optimization of geometrical parameters of high speed rotor[R]. ASME Paper DETC2015-47291,2015.

[6] LOPEZ R H,RITTO T G,SAMPAIO R,et al. A new algorithm for the robust optimization of rotor-bearing systems[J]. Engineering Optimization,2014,46(8):1123-1138.

[7] 于平超,马艳红,张大义,等. 具有局部非线性刚度的复杂转子系统动力学模型及振动特性分析[J]. 推进技术,2016,37(12):2343-2351.
YU Pingchao,MA Yanhong,ZHANG Dayi,et al. Dynamic model and vibration characteristic analysis on complex rotor system with local nonlinear stiffness[J]. Journal of

Propulsion Technology,2016,37(12):2343-2351. (in Chinese)

[8] 朱爱斌,张锁怀,丘大谋,等. 转子轴承系统动力学分析系统的设计与实现[J]. 机械设计与研究,2005,21(3):44-45,48.
ZHU Aibin,ZHANG Suohuai,QU Damou,et al. Design and realization of the dynamic characteristics analysis system for a rotor-bearing system[J]. Machine Design & Research,2005,21(3):44-45,48. (in Chinese)

[9] 魏源,徐武彬,曾海景,等. 转子-轴承系统动力学特性分析系统研究[J]. 机械设计与制造,2012(6):236-238.
WEI Yuan,XU Wubin,ZENG Haijing,et al. Research on dynamic characteristics analysis system of rotor-bearing system[J]. Machinery Design & Manufacture,2012(6):236-238. (in Chinese)

[10] 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)

[11] 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)

[12] 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.

[13] 顾家柳,丁奎元,刘君洲,等. 转子动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1985.

[14] 高彤,张卫红,朱继宏. 惯性载荷作用下结构拓扑优化[J]. 力学学报,2009,41(4):530-541.
GAO Tong,ZHANG Weihong,ZHU Jihong. Structural topology optimization under inertial loads[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2009,41(4):530-541. (in Chinese)

[15] 单祖辉. 材料力学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,2009.

[16] ANDREW D D,STEFANOS A P,THOMAS G C. Analytical methods in rotor dynamics[M]. London:Applied Science Publishers,1983.

[17] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册:第 19 册[M]. 北京:航空工业出版社,2000.

(编辑:李岩梅、张 雪)