

支承方式对变循环发动机转子临界转速的影响

陈云,臧朝平,杨志强,周煌亮

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:分析某双涵道变循环发动机转子系统结构特点,建立转子-支承系统三维有限元模型,计算、分析转子支承方式的改变对转子临界转速的影响。结果表明:以低压转子为主激励,转速在 20 000 r/min 内,4 支点支承比 5 支点支承临界转速多一阶,其中第一、三阶临界转速降低,第二阶升高,第四阶基本不变。5 支点方式能有效地减少柔性低压转子弯曲振动模式出现,但是会增加低压风扇盘的上下偏摆振动模式,较易发生风扇叶片与机匣的碰磨。4 支点方式结构更简单,但是转子系统在高转速时需要多经过一阶临界转速,会增加转子及整机的振动。

关键词:变循环发动机;三维有限元模型;转子临界转速;支承方式

中图分类号:V231.96 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)06-0148-03

Influence of Bearing Method on Critical Rotor Speed of Variable Cycle Engine

CHEN Yun, ZANG Chaoping, YANG Zhiqiang, ZHOU Huangliang

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The structural characteristics of the rotor system of a double culvert variable cycle engine are analyzed, the three-dimensional finite element model of rotor-bearing system is established, and the influence of the change of rotor bearing method on the critical speed of rotor is calculated and analyzed. The results show that the four-bearing method, with the low-pressure rotor as the main excitation, has one more critical speed than the five-bearing method within 20 000 r/min., in which the first and third critical speeds decrease, the second increases, and the fourth basically remains unchanged. The five-bearing method can effectively reduce the occurrence of bending vibration modes of the flexible low-pressure rotor, but will increase the up and down pendulum vibration modes of the low-pressure fan disk, which is more prone to collision and friction between the fan blade and the casing. The structure of the four-bearing method is simpler, but the rotor system needs to pass through one more critical speed at high speed, which will increase the vibration of the rotor and the whole engine.

Keywords: variable cycle engine; 3D finite element model; critical rotor speed; bearing method

0 引言

变循环发动机(variable cycle engine, VCE)是一种多设计点发动机,通过改变某些部件的几何形状、尺寸或位置,来调节其热力循环参数,如增压比、涡轮前温度、涵道比、空气流量,从而实现涡喷、涡扇之间的模式转换,使发动机在所有飞行包线内具有最佳工作状态^[1]。国外对变循环发动机的研究起始于 20 世纪 60 年代,取得了一定研究成果的主要代表国家有美国、英国、法国、日本等^[2-5]。英国设计的选择性排气变循环发动机运用两轴三压气机设计原理,具有分排、混排涡扇和涡喷三种循环方式。日本开展了核心机为 HYPR90-T 的组合循环发动机的技术与验证,该核心机将低压涡轮设计为可调结构。法国的 SNECMA 公司提出了双压缩系统变循环发动机概念,该发动机采用中间风扇的 MCV99VCE 方案,通过控制中间风扇系统开关实现工作模式的转换。美国对变循环发动机的研究时间最为持久,影响最为深远。GE 公司对变循环发动机的研究已经历经 5 代,第 3 代 YF120 采用了模

式选择活门与核心驱动风扇(core driven fans, CDFS)技术,是世界上第 1 种经飞行验证的双外涵道变循环发动机^[6]。

国内对变循环发动机的研究尚处于起步阶段。刘治呈、梁春华、胡晓煜等^[7-9]对变循环发动机的发展历程做了部分综述;聂永斌、周红等^[10-11]对变循环发动机的性能进行了数值模拟仿真;王元、苟学中等^[12-13]对变循环发动机的部件建模技术进行了研究;窦健、吴琮对变循环发动机后涵道引射器调节工况进行了数值研究^[14]。

变循环发动机与传统涡扇、涡喷发动机相比较,不仅静子机匣增加了许多几何可调构件,转子系统也有较大的改变。中间风扇的增加,涡轮系统设计成可调结构以及 CDFS 的存在都使得转子的动力学特性变得更加复杂。为实现变循环功能,转子系统本体结构无法作出较大调整,转子支承的合理布局能有效地改善转子系统动力学特性。临界转速是表征转子系统稳定性以及设计合理性的重要参数。基于此,本文详细分析了某双涵道变循环发动机转子系统结构特点,建立了双涵道变循环发动机转子-支承系统三维有限元模型,并对转子、支承的有限元建模

第一作者简介:陈云(1994—),男,江西赣州人,硕士研究生,研究方向为航空发动机整机建模及动力学特性分析。

单元进行了详细介绍。使用商业通用软件 ANSYS 计算了 4 支点形式和 5 支点形式转子临界转速,并对结果进行了对比分析,分别阐述了两种支承方式对变循环发动机转子临界转速与相应振型的影响。

1 某双涵道变循环发动机转子系统结构特点

某双涵道变循环发动机的基本结构是高、低压对转涡轮双转子涡轮发动机,如图 1 所示。低压转子系统主要由两级前段风扇、单级低压涡轮、低压风扇轴以及低压涡轮轴组成,风扇轴与涡轮轴通过套尺进行连接实现转矩的传递。高压转子系统主要由一级核心驱动风(CDFS)、4 级高压压气机、单级高压涡轮、高压压气机轴以及高压涡轮轴组成,两段轴在过渡处用螺栓连接。CDFS 与高压压气机相连,由高压涡轮驱动,其功能恰似 1 个后段风扇,也可当作一级高压压气机。核心驱动风扇与高压压气机之间有 1 个 CDFS 涵道,经过 CDFS 的气流部分通过该涵道之后进入主外涵道。CDFS 和 4 级高压压气机均采用了整体叶盘结构,这种结构可以消除气流在榫根和榫槽间缝隙中流动所带来的损失与微动磨损,也可使发动机零件数大大减少。转子系统的支承方式与 F110 的基本相似,低压转子采用了 1-1-1 的支承方式,分别在进气机匣、中介机匣、后承力机匣安装了轴承,低压转子主要通过这 3 个承力机匣向外传递载荷。高压转子采用了 1-0-1 的支承方式,前支承处于中介机匣,后支承(即中介支承)位于低压涡轮轴上。这种 5 支点支承方式可以减少整台发动机的承力构件数目,也可以减少发动机的长度,达到大大提高推重比的目的。

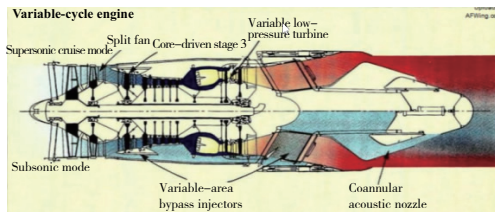


图 1 某双涵道变循环发动机结构示意图

2 变循环发动机转子临界转速计算

2.1 有限元模型的建立

本文应用有限元法对变循环发动机转子动力学特性进行研究,不考虑叶片以及连接结构对转子动力学特性的影响。材料弹性模量为 210 GPa,密度为 7 850 kg/m³,泊松比为 0.3,建立的基于某双涵道变循环发动机的转子-支承系统三维有限元模型如图 2(a) 所示。低压转子总长 1 900 mm,最大外径 630 mm,最小外径 45 mm,质量 118.8 kg;高压转子总长 1 100 mm,最大外径 640 mm,最小外径 70 mm,质量 229.2 kg。高、低压所有轴段均为空心轴。CDFS 盘的质量为 25.1 kg,占高压转子质量的 11%。CDFS 盘与第一级高压压气机盘的距离是 107.5 mm。转子部分全部用六面体

网格进行划分,采用 SOLID186 单元,单元总数为 86 529,节点数为 442 050。SOLID186 单元是一种高阶三维六面体单元,如图 2(b) 所示,该单元由 20 个节点组成,每个节点有 3 个自由度:在节点 x 、 y 和 z 方向上的平移。该单元支持塑性、超弹性、蠕变、应力加强、大挠度和大应变计算分析。它还具有模拟近不可压缩弹塑性材料和全不可压缩超弹性材料变形的混合形式能力。使用 SOLID186 划分网格能减小畸形单元的产生,在保证有限元模型精度的条件下大幅度减小单元总数量,降低模型自由度,加快计算速度。为了更加准确地模拟实际支承情况,在与支承位置对应的轴段中心建立一个质量单元,该单元质量和转动惯量取极小值,选取较小范围内的一圈节点与建立的质量单元进行刚性连接,质量单元与外部某一全约束节点之间建立 COMBIN214 支承单元。该单元是二维轴承单元,如图 2(c) 所示,由两个节点组成,每个节点有 x 、 y 两个自由度,具有刚度和阻尼特性。本文假设轴承各向同性,忽略阻尼对转子系统动力学特性的影响。

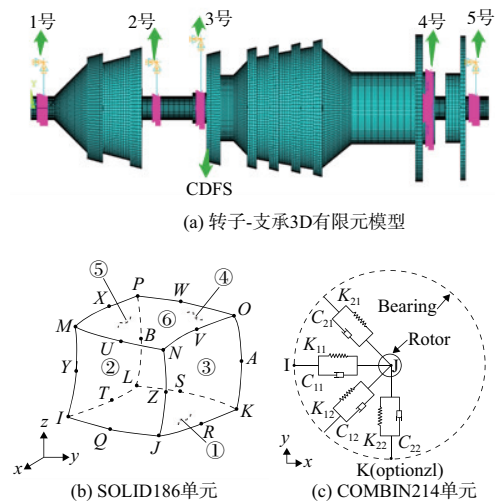


图 2 变循环发动机

2.2 不同支承方式转子临界转速计算

如图 2(a) 所示,双转子系统采用 5 支点方式,高压转子采用 1-0-1 支承,低压转子采用 1-1-1 支承,其中 4 号支承为中介支承,各支点的支承刚度如表 1 所示。低压转子转速范围设置为 0~20 000 r/min,高低压转子转速比为 -2(负号表示转动方向相反)。计算得到以低压转子为主激励有四阶临界转速分别为 3 108.6 r/min、3 996.0 r/min、7 589.0 r/min、11 309.1 r/min。

表 1 各支点支承刚度 单位:N/m

支承编号	1	2	3	4	5
支承刚度($\times 10^7$)	2.63	2.00	1.75	1.75	1.75

去除 2 号支承,将 5 支承形式改为 4 支承形式,高压转子采用 1-0-1 支承,低压转子采用 1-0-1 支承,各支点的支承刚度不变,计算得到以低压转子为主激励有五阶临界转速分别为 2 633.1 r/min、5 288.9 r/min、6 219.0 r/min、11 568.5 r/min、14 991.8 r/min。相比 5 支承方式,第一阶

临界转速降低了 15.3%,第二阶临界转速升高了 32.3%,第三阶临界转速降低了 18.1%,第四阶临界转速升高了 2.3%。

2.3 转子临界转速振型分析

由有限元法计算的 5 支承方式各阶临界转速对应的主振型如图 3(a)所示。第一阶振型主要是 1 号支承引起的低压风扇盘左右偏摆振动,在 1 号与 4 号支承之间的轴段发生较小弯曲。第二阶振型与第一阶类似,风扇盘偏摆的幅度有所增加,发动机在通过改阶临界转速时风扇叶片与机匣发生碰磨的可能性较大。第三阶振型是高压转子的刚体模态,3 号支承引起的俯仰振动以及耦合支承引起的低压涡轮盘摆动。第四阶振型是低压涡轮盘围绕轴心的左右偏摆振动。4 支承方式各阶临界转速对应的主振型如图 3(b)所示。第一阶振型与 5 支承方式基本一致,第二阶、第三阶、第四阶是低压涡轮盘的偏摆,第五阶临界振型是低压转子的一阶弯曲振动以及低压涡轮小幅度的偏摆振动。可以看出,5 支承方式的第三阶振型除外,其余各阶高压转子振动幅度较小,主要是低压转子风扇盘及涡轮盘的振动。4 支承方式未出现高压转子的明显振动,低压转子风扇盘及涡轮盘的振动依然存在,并且出现了低压转子的一阶弯曲模态。说明不管是 4 支承方式还是 5 支承方式,高压转子刚性较大,不易发生弯曲振动,低压转子轴向跨大,半径小,容易发生弯曲变形。在风扇盘与涡轮之间增加 2 号支承,可以有效防止第五阶弯曲临界振型的出现。

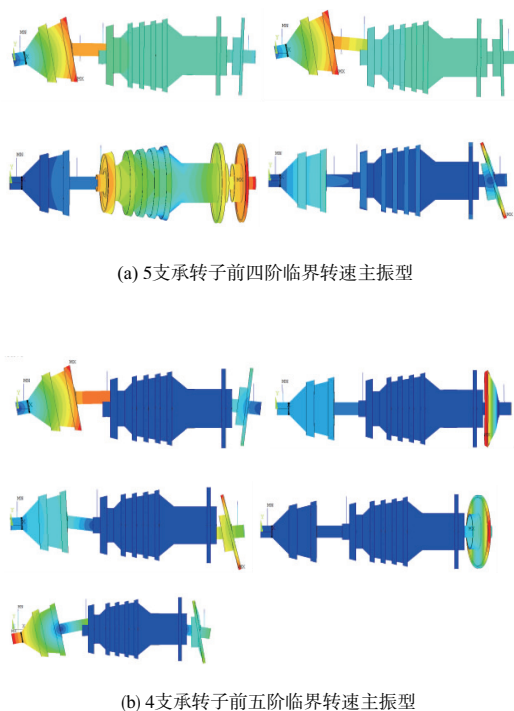


图 3 两种支承方式转子各阶临界转速主振型

3 结语

本文经过分析某双涵道变循环发动机转子系统的结构特点,建立了变循环发动机转子-支承系统三维有限元模型,计算分析了不同支承方式对变循环发动机转子临界转速与主振型的影响。结果表明:以低压转子为主激励,转速在 20 000 r/min 内,5 支承方式有四阶临界转速而 4 支承方式有五阶临界转速,且相对应的各阶临界转速有的增大,有的减小。增加 2 号支承,第一阶、第三阶临界转速上升,第二阶临界转速降低,第四阶临界转速基本不变。5 支承方式能避免低压转子的弯曲模态,但是会增加风扇盘的偏摆模态。临界转速的变化说明整体的支承刚度并不是与支点数目的多少呈正相关,还可能与支点的位置息息相关,后续可以对此进一步研究,进而完善支承方式的选择。

参考文献:

- [1] 方昌德. 变循环发动机[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(3):1-5.
- [2] JOHNSON J. Variable cycle engines - The next step in propulsion evolution [C]//12th Propulsion Conference. Palo Alto, CA. Reston, Virginia: AIAA, 1976.
- [3] JOHNSON J. Variable cycle engine developments at general electric-1955-1995 [M]//Developments In High-Speed Vehicle Propulsion Systems. Washington DC: AIAA, 1996:105-158.
- [4] SIMMONS R J. Design and control of a variable geometry turbofan with an independently modulated third stream [D]. Ohio: School of The Ohio State University. 2009.
- [5] DO NASCIMENTO M A R, PILIDIS P. The selective bleed variable cycle engine [C]//Proceedings of ASME 1991 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Orlando, Florida, USA; 2015.
- [6] 刘红霞. GE 公司变循环发动机的发展[J]. 航空发动机, 2015, 41(2):93-98.
- [7] 刘治呈. 变循环发动机发展综述[J]. 现代制造技术与装备, 2019(1):177-179.
- [8] 梁春华. 未来的航空涡扇发动机技术[J]. 航空发动机, 2005, 31(4):54-58.
- [9] 胡晓煜. 国外自适应发动机技术研究进展[J]. 国际航空, 2012(10):40-43.
- [10] 聂永斌, 孙冬. 变循环发动机对战斗机任务性能影响计算研究[J]. 航空发动机, 2017, 43(1):48-52.
- [11] 周红, 高翔, 王占学, 等. 变循环发动机飞行性能对比分析[C]//第八届中国航空学会青年科技论坛论文集. 江门: 2018:140-148.
- [12] 王元, 李秋红, 黄向华. 变循环发动机建模技术研究[J]. 航空动力学报, 2013, 28(4):954-960.
- [13] 苟学中, 周文祥, 黄金泉. 变循环发动机部件级建模技术[J]. 航空动力学报, 2013, 28(1):104-111.
- [14] 窦健, 吴琼. 变循环发动机后涵道引射器调节工况的数值研究[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(3):195-197.

收稿日期:2020-11-18