

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.08.068

涡桨发动机低压模拟转子动力特性研究

邓旺群^{1, 2, *}, 范潘潘^{1, 2}, 徐友良^{1, 2}, 袁胜^{1, 2}

1. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002

2. 航空发动机振动技术航空科技重点实验室, 湖南 株洲 412002

摘要: 对某涡桨发动机低压模拟转子的动力特性进行了研究。基于梁单元的有限元法, 建立了转子的分析模型, 借助转子动力学分析软件 SAMCEF/ROTOR 对转子的前三阶临界转速和振型进行了计算, 并在高速旋转试验器上实现了全转速范围内的动力特性试验。研究表明, 在额定工作转速范围内, 低压模拟转子有两阶临界转速, 前两阶振型均为刚体振型, 止口定心传扭结构设计合理, 在全转速范围内能够可靠工作, 为同类转子的动力特性分析和试验提供了参考。

关键词: 涡桨发动机; 低压模拟转子; 止口定心传扭结构; 有限元法; 临界转速; 振型

中图分类号: V231.96 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2017) 08-0068-06

转子是航空发动机的重要构件,对航空发动机的安全性、可靠性具有重要影响。现代先进航空发动机追求更高的性能和更轻的重量,导致转子动力学问题日益突出。对中小型航空发动机而言,高速转子动力学设计和试验技术已经成为研制过程中必须解决的关键技术。近年来,国内外学者对航空发动机高速转子动力学开展了大量研究。邓旺群^[1-4]以某涡轴发动机超两阶弯曲临界转速工作的动力涡轮转子为研究对象,对转子的动力特性、高速动平衡、细长柔性转子高速动平衡方法、平衡在涡轴发动机整机减振中的作用等开展了系统的理论和试验研究; 邬国凡等^[5]对某涡轴发动机超第一阶弯曲临界转速燃气发生器转子的动力特性和平衡平面的灵敏度进行了计算和分析; 董超等^[6]研究了某航空发动机三支点低压转子系统在不对中故障情况下的振动特性和影响规律; Seve 等^[7]基于转子动力学理论,结合有限元法和影响系数法研究了柔性变速转子的平衡; 聂卫健^[8]对某小型涡扇发动机四支点低压模拟转子的动力特性进行了系统的理论和试验研究; 邓旺群等^[9]针对某对转涡扇发动机超三阶弯曲临界转速的低压转子开展了研究,揭示了转子的前四阶临界转速随支承刚度和支承轴向位置的变化规律;

王勃等^[10]研究了某小型涡扇发动机柔性转子的高速动平衡技术。

涡桨发动机低压转子具有多盘、大长径比空心轴的结构特点,并且第二级压气机盘与第一、三级压气机盘之间采用了止口定心传扭的新结构,轮盘之间采用止口定心传扭结构可以使转子结构紧凑、重量轻,但其设计是否合理、工作是否安全可靠必须经过全转速的试验验证。本文以能很好地反映发动机真实转子的结构和动力学特性的低压模拟转子为研究对象,建立了有限元模型,完成了前三阶临界转速和振型的计算,并在高速旋转试验器上完成了全转速范围内的动力特性试验。研究表明,转子临界转速和止口定心传扭结构设计合理,研究成果为同类转子的动力特性分析和试验提供了参考。

1 计算模型和参数

1.1 计算模型

低压模拟转子主要由模拟压气机轮盘、模拟涡轮盘、低压轴、中心拉杆等零部件组成,采用 1-1-1 三支点的支承方式。其中,1 号和 3 号轴承均为滚棒轴承,2 号轴承为滚珠

收稿日期: 2017-04-10; 退修日期: 2017-06-16; 录用日期: 2017-07-15

基金项目: 航空科学基金 (20112108001, 2013ZB08001)

* 通讯作者. Tel.: 0731-28593442 E-mail: hnzzdwq@163.com

引用格式: DENG Wangqun, FAN Panpan, XU Youliang, et al. Dynamic characteristics study of simulated low-pressure rotor of turboprop engine[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (08) : 68-73. 邓旺群, 范潘潘, 徐友良, 等. 涡桨发动机低压模拟转子动力特性研究 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (08) : 68-73.

轴承, 1 号和 2 号轴承位置均有鼠笼式弹性支承和挤压油膜阻尼器, 3 号轴承位置有弹性环式弹性支承, 第二级压气机盘与第一、三级压气机盘之间采用止口定心传扭的新结构, 如图 1 所示。

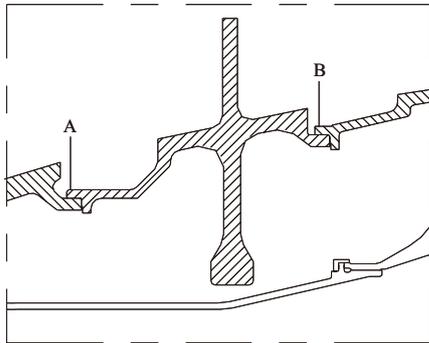


图 1 止口定心传扭结构

Fig.1 Fixing structure for adjective-center and toque transmission

基于梁单元的有限元方法, 借助大型转子动力学分析软件 SAMCEF/ROTOR, 建立了低压模拟转子的有限元分析模型, 如图 2 所示。模型共有 5 个集中质量单元、3 个轴承单元、40 个刚性连接单元和 1217 个梁单元。

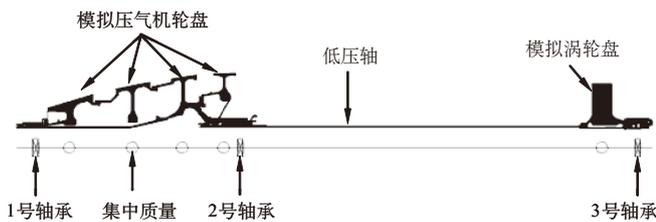


图 2 低压模拟转子的有限元计算模型

Fig.2 Finite element calculation model of the simulated low-pressure rotor

1.2 计算参数

(1) 支承刚度

计算模型中共有 3 个支承, 1 号~3 号支承的弹支刚度实测值如表 1 所示。

表 1 支承刚度

Table 1 Supporting stiffness

支承刚度编号	1 号	2 号	3 号
实测值 (E+7N/m)	2.5	6.1	0.5

(2) 集中质量

为了便于网格划分, 将结构复杂的压气机轮盘和涡轮盘的部分结构简化为集中质量处理, 集中质量特性如表 2 所示。

表 2 集中质量特性

Table 2 Concentrated masses characteristics

零件名称	质量 / kg	极转动惯量 E-3 (kg·m ²)	直径转动惯量 E-3 (kg·m ²)
第一级压气机盘	2.947	63.017	31.526
第二级压气机盘	1.490	35.906	17.959
第三级压气机盘	0.900	22.622	11.314
第四级压气机盘	0.837	22.913	11.459
涡轮盘	6.787	158.573	79.595

(3) 转子主要零件的材料

低压模拟转子压气机轮盘、中心拉杆、空心轴和涡轮盘的材料分别为钛合金、钛合金、高温合金和不锈钢。

2 计算结果及分析

利用 SAMCEF/ROTOR 分析软件计算了低压模拟转子前三阶临界转速和振型。

2.1 临界转速计算结果及裕度

低压模拟转子前三阶临界转速的计算结果和裕度如表 3 所示。

表 3 临界转速计算结果和裕度

Table 3 Calculation results of critical speeds and abundant of critical speeds

	第一阶	第二阶	第三阶
临界转速 / (r/min)	4765	14145	26060
临界转速裕度 / %	>50	>45/30	>20

临界转速裕度定义如下:

$$\text{临界转速裕度} = (| \text{慢车转速或额定工作转速} - \text{临界转速} | / \text{慢车转速或额定工作转速}) \times 100\%$$

低于慢车转速的第一阶临界转速, 取慢车转速进行评定, 在慢车转速和额定工作转速之间的第二阶临界转速, 取慢车转速和额定工作转速分别进行评定, 高于额定工作转速的第三阶临界转速, 取额定工作转速进行评定。

从表 3 可知 (1) 低压模拟转子运行至额定工作转速时, 需越过前两阶临界转速; (2) 低压模拟转子前三阶临界转速与慢车转速或额定工作转速的裕度均大于 20%, 满足临界转速设计准则要求^[11]。

2.2 振型计算结果

低压模拟转子的前三阶振型计算结果如图 3~ 图 5 所示。



图3 低压模拟转子的第一阶振型

Fig.3 The first-stage vibration mode of the simulated low-pressure rotor



图4 低压模拟转子的第二阶振型

Fig.4 The second-stage vibration mode of the simulated low-pressure rotor

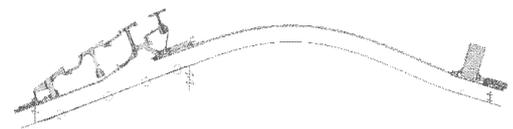


图5 低压模拟转子的第三阶振型

Fig.5 The third-stage vibration mode of the simulated low-pressure rotor

从图3~图5可知:低压模拟转子在前两阶振型下,低压轴几乎没有发生弯曲变形。因此,前两阶振型均为刚体振

型,在第三阶振型下,低压轴发生了明显的弯曲变形。因此,第三阶振型为弯曲振型。

3 动力特性试验

3.1 试验简介

低压模拟转子的动力特性试验在卧式高速旋转试验器上进行,试验器主要由支承系统、增速系统、动力系统、真空系统、控制系统、滑油系统、测试系统和控制系统等组成,试验中润滑轴承的滑油为8号和20号航空润滑油按一定比例的混合油。在低压模拟转子动力特性试验过程中,监测支座振动加速度、转子挠度、弹支应变、轴承外环温度以及转子的转速。其中,支座振动加速度由加速度传感器测量,转子挠度由电涡流位移传感器测量,轴承外环温度由热电偶温度传感器测量,弹支应变由应变计测量,转子转速由光电传感器测量。低压模拟转子在高速旋转试验器上的安装及测试示意图如图6所示。图6中的“ \perp ”表示垂直方向,“ $=$ ”表示水平方向; $A_1\sim A_6$ 为加速度传感器, $D_1\sim D_5$ 为电涡流位移传感器, $S_1\sim S_4$ 为应变计, $T_1\sim T_3$ 为热电偶温度传感器。

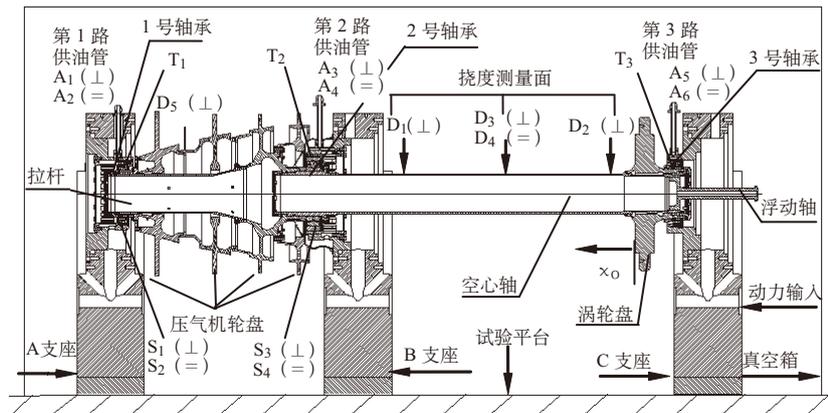


图6 低压模拟转子在试验器上的安装及测试示意图

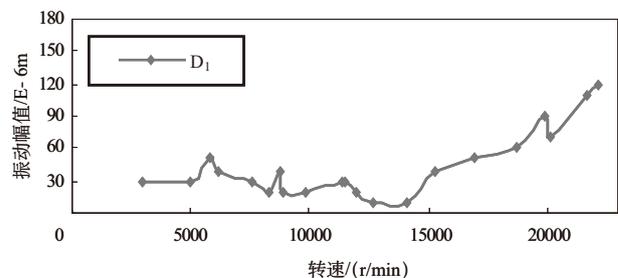
Fig.6 Installation and measurement diagrammatic sketch of the simulated low-pressure rotor on test rig

3.2 试验结果及分析

在动力特性试验过程中,实测了转子在全转速范围内各测量参数随转速的变化曲线,由于篇幅所限,下面只给出转子挠度曲线。

在额定工作转速范围内,由 $D_1\sim D_5$ 位移传感器测得的幅值-转速曲线如图7~图11所示。

从图7~图11并结合计算结果,可得到各位移传感器测得的低压模拟转子的前两阶临界转速,如表4所示。

图7 D_1 传感器测得的幅值-转速曲线Fig.7 Curves of vibration amplitude versus speed measured by D_1 transducer

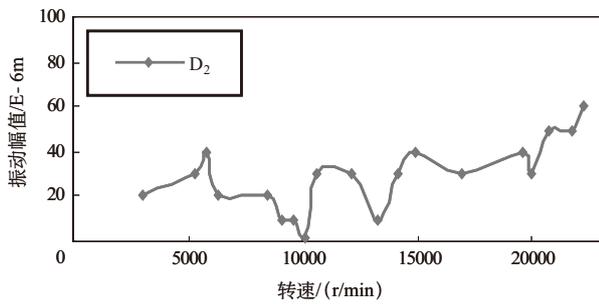


图 8 D₂ 传感器测得的幅值—转速曲线

Fig.8 Curves of vibration amplitude versus speed measured by D₂ transducer

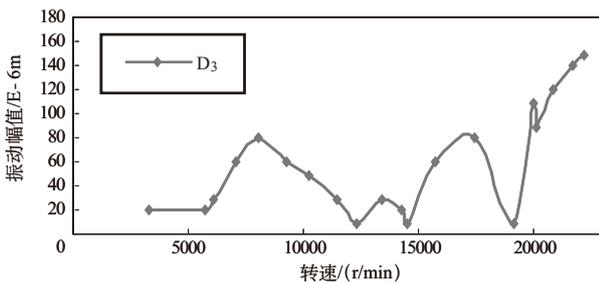


图 9 D₃ 传感器测得的幅值—转速曲线

Fig.9 Curves of vibration amplitude versus speed measured by D₃ transducer

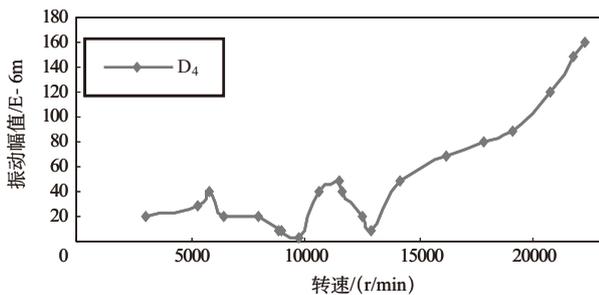


图 10 D₄ 传感器测得的幅值—转速曲线

Fig.10 Curves of vibration amplitude versus speed measured by D₄ transducer

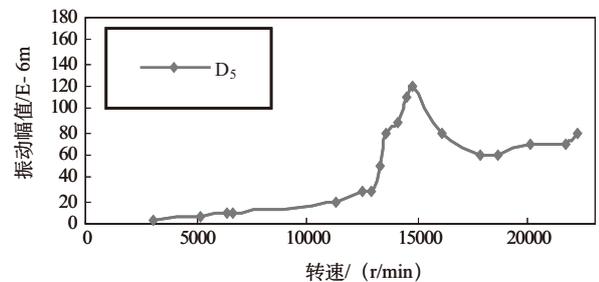


图 11 D₅ 传感器测得的幅值—转速曲线

Fig.11 Curves of vibration amplitude versus speed measured by D₅ transducer

表 4 位移传感器测得的前两阶临界转速

Table 4 The first two-stage critical speeds measured by displacement transducer

位移传感器	前两阶临界转速 / (r/min)	
	第一阶	第二阶
D ₁	5760	不明显
D ₂	5791	14788
D ₃	不明显	13394
D ₄	5844	不明显
D ₅	不明显	14760
平均值	5798	14314

对比计算结果 (见表 3) 和试验结果 (见表 4), 可得到转子前两阶临界转速的计算误差, 如表 5 所示。

表 5 计算误差

Table 5 Calculation errors

临界转速 / (r/min)	试验值 (平均值)	计算值	计算误差 / %
第一阶	5798	4763	17.85
第二阶	14314	14099	4.57

计算误差的定义如下:

$$\text{计算误差} = (| \text{试验值} - \text{计算值} | / \text{试验值}) \times 100\%$$

从表 5 可知: 第一阶临界转速和第二阶临界转速的计算误差分别为 17.85% 和 1.50%。引起误差的主要原因有: (1) 实际转子结构复杂, 建模进行了适当简化, 不能与转子的实际状态完全一致; (2) 测量误差。总体来看, 计算结果与试验结果还是具有较好的一致性。

从图 7~ 图 11 还可以看出: (1) 转子在前两阶临界转速下的挠度很小, 没有发生明显的弯曲变形, 这与计算得到的前两阶模态为刚体模态是一致的; (2) 在全转速范围内, 转子挠度均没有发生突变, 说明转子的状态稳定、连接结构可靠, 表明止口定心传扭结构的设计是合理的。

4 结论

本文采用有限元法建立了低压模拟转子的分析模型, 对转子的前三阶临界转速和振型进行了计算分析, 在高速旋转试验器上完成了全转速范围内的动力特性试验。通过分析, 可以得出以下结论:

- (1) 低压模拟转子在额定工作转速范围内存在两阶临界转速。
- (2) 低压模拟转子的前两阶振型均为刚体振型, 在额定

工作转速范围内转子是一个刚性转子。

(3) 止口定心传扭结构设计合理,在全转速范围内可以稳定、可靠地工作。

AST

参考文献

- [1] 邓旺群,高德平. 涡轴发动机动力涡轮转子动力特性研究 [J]. 航空动力学报, 2003, 18 (6): 717-722.
DENG Wangqun, GAO Deping. Dynamics characteristics study of a power turbine rotor of a turbine shaft engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18 (6): 717-722. (in Chinese)
- [2] 邓旺群,高德平. 涡轴发动机动力涡轮转子高速动平衡技术研究 [J]. 航空动力学报, 2003, 18 (5): 662-668.
DENG Wangqun, GAO Deping. High speed dynamic balance technique of a power turbine rotor of a turbine shaft engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18 (5): 662-668. (in Chinese)
- [3] 邓旺群,李上福,高德平,等. 细长柔性转子高速动平衡方法 [J]. 航空动力学报, 2004, 19 (4): 506-511.
DENG Wangqun, LI Shangfu, GAO Deping, et al. Method of high speed dynamic balance to balance a slender flexible rotor [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19 (4): 506-511. (in Chinese)
- [4] 邓旺群,高德平,刘金南,等. 转子高速动平衡技术在涡轴发动机整机减振中的作用 [J]. 航空动力学报, 2005, 20 (1): 78-85.
DENG Wangqun, GAO Deping, LIU Jinnan, et al. Effect of high speed dynamic balance technique of rotor in reducing vibration of whole turbine shaft engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20 (1): 78-85. (in Chinese)
- [5] 邬国凡,陈国智,涂孟黑. 高速柔性转子动力特性分析与试验研究 [J]. 航空动力学报, 2006, 21 (3): 563-568.
WU Guofan, CHEN Guozhi, TU Mengpi. Analysis and experimental study of the high speed flexible rotor dynamic behaviors [J]. Journal Aerospace of Power, 2006, 21 (3): 563-568. (in Chinese)
- [6] 董超,王德友. 航空发动机转子系统不对中故障振动测试分析 [J]. 测试技术, 2015, 34 (增刊): 188-198.
DONG Chao, WANG Deyou. Vibration measurement on misalignment of aeroengine rotor system [J]. Measuring and Testing Technique, 2015, 34 (supplement): 188-198. (in Chinese)
- [7] Seve F, Andrianoely M A, Berlioz A, et al. Balancing of machinery with a flexible variable-speed rotor [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 264 (2): 287-302.
- [8] 聂卫健. 小型涡扇发动机多盘多支点高速转子动力学研究 [D]. 湖南: 中国航空动力机械研究所, 2015.
NIE Weijian. Dynamics study of a high-speed rotor with multi-disk and multi-support of a small turbofan engine [D]. Hunan: China Aviation Powerplant Research Institute, 2015. (in Chinese)
- [9] 邓旺群,王毅,聂卫健,等. 支承刚度和轴向位置对某型对转发动机低压转子临界转速的影响 [J]. 航空发动机, 2016, 42 (3): 7-11.
DENG Wangqun, WANG Yi, NIE Weijian, et al. Influence of supporting stiffness and axial location on critical speeds of a low-pressure rotor of a counter rotating engine [J]. Aeroengine, 2016, 42 (3): 7-11. (in Chinese)
- [10] 王勃,李光辉,廖明夫,等. 某小型涡扇发动机柔性转子高速动平衡试验研究 [J]. 噪声与振动控制, 2008, 28 (6): 136-139.
WANG Bo, LI Guanghui, LIAO Mingfu, et al. Experimental investigation on high speed dynamic balance of a flexible rotor of a small turbofan engine [J]. Noise and Vibration Control, 2008, 28 (6): 136-139. (in Chinese)
- [11] 《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 转子动力学及整机振动 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
《Aeroengine design manual》editorial board. Aeroengine design manual; Vol. 19 Rotor dynamics and whole engine vibration [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001. (in Chinese)

(责任编辑 刘玲蕊)

作者简介

邓旺群 (1967—) 男, 博士, 自然科学研究员。主要研究方向: 航空发动机强度试验和转子动力学研究。

Tel: 0731-28593442

E-mail: hnzzdwq@163.com

范潘潘 (1988—) 女, 硕士, 助理工程师。主要研究方向: 航空发动机强度试验和转子动力学研究。

Tel: 0731-28592362

E-mail: 708949063@qq.com

徐友良 (1966—) 男, 博士, 自然科学研究员。主要研究方向: 航空发动机结构强度设计。

袁胜 (1991—) 男, 硕士研究生, 助理工程师。主要研究方向: 航空发动机强度试验和转子动力学研究。

Tel: 18073326162

E-mail: 810299353@qq.com

Dynamic Characteristics Study of Simulated Low-pressure Rotor of Turboprop Engine

DENG Wangqun^{1,2,*}, FAN Panpan^{1,2}, XU Youliang^{1,2}, YUAN Sheng^{1,2}

1. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China

2. Aviation Key Laboratory of Aero-engine Vibration Technology, Zhuzhou 412002, China

Abstract: The dynamic characteristics of a simulated low-pressure rotor of a turboprop engine was researched. Based on beam element, the analysis model was established by finite element method. The first three-stage critical speeds and vibration modes of the simulated low-pressure rotor were calculated by SAMCEF/ROTOR software, and dynamic characteristics experiment was carried out during the whole operating speed range on the high-speed rotating test rig. The experiment result show that there are two-stage critical speeds during the whole operating speed range, the first two-stage vibration modes are rigid body modes, the design of the fixing structure for adjective-center and toque transmission is reasonable, and it can reliably operate during the whole operating speed range. The research will provide reference for dynamic characteristics analysis and experiment of similar rotors.

Key Words: turboprop engine; simulation low-pressure rotor; fixing structure for adjective-center and toque transmission; finite element method; critical speed; vibration mode

Received: 2017-04-10; Revised: 2017-06-16; Accepted: 2017-07-15

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20112108001, 2013ZB08001)

*Corresponding author. Tel. :0731-28593442 E-mail: hnzzdwq@163.com