基于自动平衡的涡桨发动机螺旋桨模拟转子的设计及分析



孙勇1,*,邓旺群1,2,杨海1,2,唐虎标1,2,冯义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重点实验室, 湖南 株洲 412002

摘 要:基于自动平衡试验研究的需要,参照某涡桨发动机真实螺旋桨转子的结构,遵循结构和动力学相似等原则并考虑自动平衡系统的安装、轴向传递功率的需要设计了一个螺旋桨模拟转子。理论分析表明:螺旋桨模拟转子与真实螺旋桨转子的动力特性具有良好的一致性,选择振动位移作为测量和控制参数可以满足螺旋桨模拟转子自动平衡试验的要求。本文研究建立了螺旋桨模拟转子自动平衡的试验平台,为后续自动平衡试验研究奠定了基础,具有理论意义和工程应用价值。

关键词:涡桨发动机;螺旋桨模拟转子;自动平衡;动力特性

中图分类号: V231.96 文献标识码: A

随着航空发动机朝着高转速、高性能的方向发展,转子 不平衡引起的振动问题目益凸出,因此,动平衡对控制航空 发动机转子系统的振动就显得尤为重要。目前,国内航空 发动机转子的动平衡基本上都是离线平衡,无法实时消除 转子运行过程中的不平衡量,特别是对于大型涡桨发动机 的螺旋桨转子,传统的动平衡技术在实施上就非常困难,控 制这类转子不平衡引起的振动最有效的途径是采用自动平 衡技术。国外已有利用自动平衡技术对涡桨发动机螺旋桨 转子进行实时自动平衡的成功实例,确保了涡桨发动机螺 旋桨转子在整个飞行过程中处于最佳平衡状态,有效降低 了发动机返厂维修的次数,节约了维修经费,提高了使用寿 命[1-3]。国内在转子自动平衡技术方面虽然也开展了很多 研究工作[4-8],但针对涡桨发动机螺旋桨转子开展自动平衡 试验研究尚属空白,因此,迫切需要针对这类转子开展自动 平衡试验研究,尽快让自动平衡技术在涡桨发动机上得到 工程应用。为验证自动平衡原理的正确性和自动平衡系统 的可靠性,本文参照某涡桨发动机真实螺旋桨转子的结构, 遵循结构和动力学相似等原则,并考虑安装自动平衡系统、 轴向传递功率的需要设计了一个螺旋桨模拟转子,开展了 相关计算分析,在国内首次建立了螺旋桨模拟转子自动平 DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2020.03.003

衡的试验平台,为后续自动平衡试验研究奠定了基础[9-12]。

1 某涡桨发动机螺旋桨转子简介

某涡桨发动机螺旋桨转子为动力输出部件,与涡桨发动机之间的动力传输原理如图1所示。发动机的功率由动力涡轮转子的传动轴传出,通过减速器将扭矩和转速传递给螺旋桨转子。

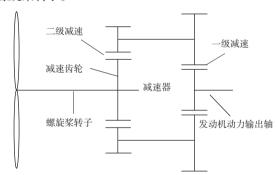


图 1 螺旋桨转子与发动机动力传输原理图

Fig.1 Power transmission schematic diagram between rotor and engine

螺旋桨转子主要由桨轴组件、桨毂组件(带桨叶)、减速齿轮、轴承等零部件组成,其二维示意图如图2所示。最大

收稿日期: 2019-12-13; 退修日期: 2020-01-14; 录用日期: 2020-01-30 *通信作者. Tel.; 18073369656 E-mail; 1348754967@gg.com

引用格式: Sun Yong, Deng Wangqun, Yang Hai, et al. Design and analysis of simulation propeller rotor of turboprop engine based on automatic balance[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(03):34-40. 孙勇, 邓旺群, 杨海,等. 基于自动平衡的涡桨发动机螺旋桨模拟转子的设计及分析[J]. 航空科学技术, 2020, 31(03):34-40.

旋转直径(桨叶处)为4100mm,如图3所示。该螺旋桨转子由三个轴承支承,1号和3号轴承为滚棒轴承,起径向支承作用,2号轴承为球轴承,2号轴承的外环与轴承座内孔之间为间隙配合(半径间隙0.65mm),工作过程中仅承受轴向力,整个转子系统依靠2号球轴承实现轴向定位。

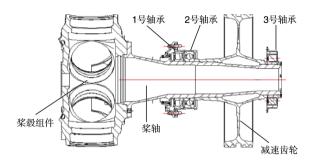


图2 某涡桨发动机螺旋桨转子结构简图

Fig.2 Structural sketch of a propeller rotor of turboprop engine

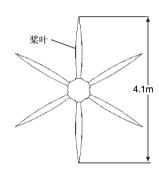


图3 最大旋转直径示意图

Fig.3 Sketch of maximum diameter of rotation

2 螺旋桨模拟转子设计

2.1 设计要求

涡桨发动机螺旋桨模拟转子的设计目的是进行自动平 衡试验研究,需满足如下设计要求:

- (1) 动力学相似要求。应保证螺旋桨模拟转子整体结构形式、支撑布局、刚度和质量分布特性等均与真实螺旋桨转子相似,使螺旋桨模拟转子尽可能真实地反映实际螺旋桨转子的动力学特性。
- (2)自动平衡系统安装要求。螺旋桨模拟转子要实现自动平衡系统的安装,即在模拟桨毂内设计有安装自动平衡系统的结构。
- (3) 试验设备适应性要求。螺旋桨模拟转子要实现在试验器上的安装及运转,需要轴向传递功率。
- (4)结构简化。在满足动力学相似的要求下,考虑到成本等因素,对螺旋桨转子的结构进行适当简化。

遵循上述要求设计的螺旋桨模拟转子主要由模拟桨轴、模拟减速齿轮、模拟桨毂组件、动密封环、螺母、轴承等组成,与真实转子相比,主要对减速齿轮、桨毂组件、桨轴三个零部件进行了模拟设计,关键的接口和配合尺寸均与真实转子相同,并且这三个零部件的强度、固有频率(防止在工作转速下出现共振)经分析均满足要求。

螺旋桨模拟转子的三维模型图和二维示意图分别如图 4 和图 5 所示。螺旋桨模拟转子动力传输原理图如图 6 所示。



图 4 螺旋桨模拟转子三维模型图

Fig.4 Three-dimensional model of simulation propeller rotor

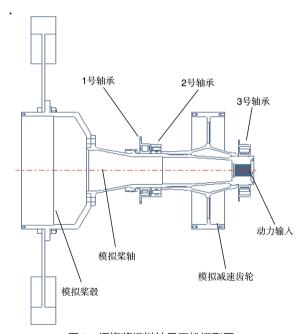


图5 螺旋桨模拟转子二维模型图

Fig.5 Two-dimensional model of simulation propeller rotor

2.2 模拟桨轴的设计

桨轴是涡桨发动机重要的传力构件,如图7所示。桨轴前端通过15个拧紧螺栓和三个定位销轴与桨毂相连,后端通过三段过盈圆柱面与减速齿轮配合并实现传递扭矩

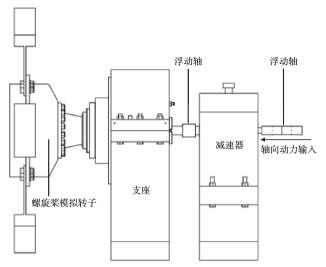


图6 螺旋桨模拟转子动力传输原理图

Fig.6 Power transmission schematic diagram of simulation propeller rotor

(功率),三个支承轴承与桨轴之间采用过盈配合。

根据桨轴的结构特点和模拟转子的设计要求,设计了模拟桨轴,如图8所示。

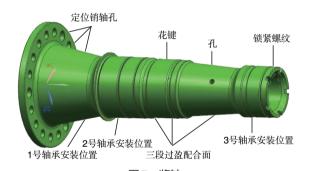


图7 桨轴 Fig.7 Propeller shaft

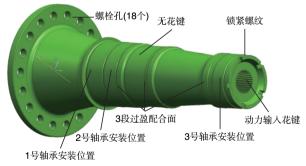


图8 模拟桨轴

Fig.8 Simulation propeller shaft

(1)依据动力学相似要求,模拟桨轴的材料、轴向长度、 支承方式,以及与其他零件的定位和配合关系均与真实桨 轴保持一致。

- (2)真实螺旋桨转子的动力是由与之旋转中心偏置的 减速轴通过减速齿轮输入,为了满足试验器动力输入的要求,需要轴向传递功率,将桨轴的尾端改成内花键的结构, 用于连接花键浮动轴以实现轴向动力输入。花键和齿只传 递扭矩,都无支承作用,改变模拟转子动力输入方式不会改 变模拟转子的动力特性。
- (3)考虑到模拟转子运转需要的功率较小,且动力输入 方式改为桨轴尾端花键输入,因此,去掉了桨轴与减速齿轮 之间传递大功率的花键结构,仅靠模拟桨轴与模拟减速齿 轮之间的三段过盈配合面来带动模拟减速齿轮转动。删去 该花键也不会改变模拟转子的动力特性。
- (4)由于模拟转子不用多次装拆,为简化连接方式,将 桨轴前端的法兰上的三个定位销轴孔改为精密螺栓孔,修 改后靠18个高强度精密螺栓与模拟桨毂相连。

经过以上修改和简化后,模拟桨轴的结构形式和支撑方式等与原桨轴是一致的,仅质量分布特性有微小改变,设计的模拟桨轴能够满足动力学相似要求。桨轴与模拟桨轴的动力学参数见表1。

表 1 模拟桨轴与原桨轴的动力学参数对比

Table 1 Dynamic parameter comparison of propeller shaft and simulation propeller shaft

动力学参数	桨轴	模拟桨轴	相对误差/%
质量/kg	27.9	28.1	0.7
质心/mm	(0,0,238)	(0,0,240)	0.8
极转动惯量/(kg·m²)	0.183	0.185	1.0

从表1可知,桨轴和模拟桨轴的质量、质心位置和极转动惯量的相对误差均不大于1%。

2.3 模拟桨毂组件的设计

桨毂组件主要由桨毂、桨叶、桨叶操纵机构等组成,如图2 所示(不含桨叶和桨叶安装结构)。结构较为复杂,且没有安装自动平衡系统的接口和空间,根据桨毂组件的结构特点和模拟转子的设计要求,设计了模拟桨毂,如图9所示。

- (1)模拟桨毂与模拟桨轴连接处的法兰接口与真实桨毂一致,设计有18个高强度精密螺栓与模拟桨轴连接。
- (2)考虑到安装自动平衡系统的需要,在模拟桨毂的前端设计有专门安装自动平衡系统的结构,如图10所示。
- (3)依据试验设备的适应性要求,模拟桨叶需要重新设计。真实桨叶的最大旋转直径为4100mm,而试验设备的最大允许旋转直径仅为1400mm,因此,模拟桨叶设计为扇形叶片,其最大直径为1388mm,在模拟桨叶外缘处设计有质量较大的

扇环形质量块。同时,每个模拟桨叶上均设计有三个用于施加配重螺钉的螺纹孔(M20),试验过程中,可通过施加配重螺钉来调节转子的不平衡量,如图11所示。



图 9 模拟桨毂组件 Fig. 9 Simulation propeller hub component

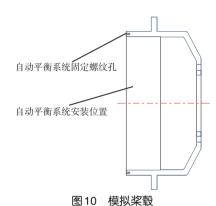


Fig.10 Simulation propeller hub

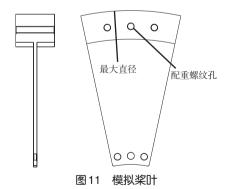


Fig.11 Simulation blade

考虑到加工、成本等因素,对桨毂的主体结构进行了适当简化,桨毂组件和模拟桨毂组件的动力学参数见表2。从表2可知,桨毂组件与模拟桨毂组件的质量、质心位置和极转动惯量的相对误差均不大于1%。

表2 模拟桨毂与原桨毂的动力学参数对比

Table 2 Dynamic parameter comparison of propeller hub and simulation propeller hub component

全 粉	桨毂组件	模拟桨毂	相对
参数	(含桨叶)	组件	误差/%
质量/kg	232.1	233.59	0.65
质心/mm	(0,0,157.2)	(0,0,157.6)	0.25
极惯量/(kg·m²)	62.3	61.7	0.96

2.4 模拟减速齿轮的设计

减速齿轮三维模型图如图 12 所示,发动机输出的转速和扭矩通过人字齿传递给减速齿轮,再通过内花键传递给螺旋桨转子。考虑到螺旋桨模拟转子的动力输入方式发生改变,简化设计后的模拟减速齿轮如图 13 所示。

由于动力输入方式的改变,模拟减速齿轮无须传递扭矩,不再保留真实减速齿轮上加工难度较大的人字齿和内花键结构,改为圆面结构,在模拟减速齿轮外缘的端面上设计有一圈均布的用于低速动平衡的螺纹孔,但模拟减速齿轮的定位配合尺寸与减速齿轮完全一致。

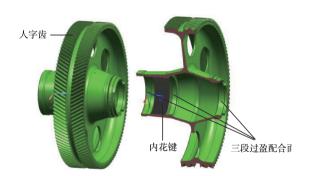


图 12 减速齿轮 Fig.12 Reduction gear

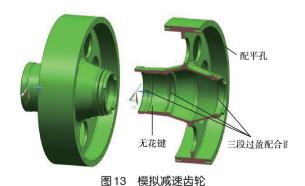


Fig.13 Simulation reduction gear

减速齿轮和模拟减速齿轮的动力学参数见表3。从表3可知,减速齿轮和模拟减速齿轮的质量、质心位置和极转

表3 减速齿轮与模拟减速齿轮的参数对比

Table 3 Dynamic parameter comparison of reduction gear and simulation reduction geart

参数	减速齿轮	模拟减速齿轮	相对误差/%
质量/kg	46.9	47.2	0.63
质心/mm	(0,0,168.3)	(0,0,168.7)	0.24
极惯量/(kg·m²)	2.08	2.06	0.90

动惯量的相对差异均不大于1%。

2.5 轴承

为确保支承刚度的一致性,螺旋桨模拟转子采用与螺 旋桨转子完全一样的轴承,如图14所示。







图 14 轴承

Fig.14 Bearings

3 螺旋桨模拟转子动力学计算分析

首先建立了螺旋桨转子和螺旋桨模拟转子的有限元计 算模型,然后对两个转子的动力特性进行了计算和对比 分析。

3.1 有限元计算模型

使用SAMCEF软件对转子进行动力特性分析,采用傅 里叶单元对模型进行网格划分,其简化与建模原则如下:

- (1)支承刚度只考虑径向刚度且径向刚度假设为常数, 1号和3号支承刚度值见表4。
- (2)对于螺旋桨转子,将桨毂组件和部分减速齿轮结构 简化为考虑了转动惯量的集中质量添加到计算模型中,其 中,由于桨毂组件的质心位于桨轴前端外侧,为了计算需 要,在原有模型上添加了延长段,用于施加桨毂组件集中质 量并假设延长段是刚度很大、密度很小的材质(即假设延长 段对动力特性没影响);对于螺旋桨模拟转子,将模拟桨毂 组件、模拟减速齿轮部分结构简化为考虑了转动惯量的集 中质量加到转子计算模型中。
- (3)对一些小零件(如衬套、螺栓等)的结构进行简化, 忽略一些细小的局部结构,同时将有可能严重影响到网格 质量的一些细小倒角也去掉。

建立的螺旋桨转子和螺旋桨模拟转子有限元分析模型 分别如图15和图16所示。

表4 各轴承支撑刚度

Table 4 Stiffness of bearings

	型号	径向刚度/(N/mm)
1号轴承	C1842030KNW1U(H)	9.893×105
3号轴承	6D1842224KNW1(H)	1.250×106

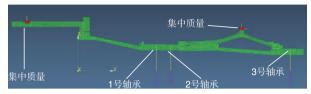


图 15 螺旋桨转子计算模型

Fig.15 Calculation model of propeller rotor

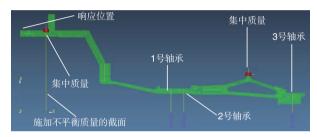


图 16 螺旋桨模拟转子计算模型

Fig.16 Calculation model of simulation propeller rotor

3.2 临界转速和振型分析

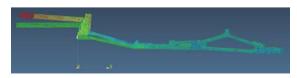
螺旋桨转子与螺旋桨模拟转子的临界转速及变化量计 算结果见表5,第一阶振型分别如图17和图18所示。

由表5和图17、图18可知,螺旋桨转子和螺旋桨模拟转 子的第一阶临界转速分别为7458r/min和7366r/min,临界 转速仅变化了1.2%,转子的额定工作转速远小于第一阶临 界转速,第一阶振型均为刚体振型且基本一致。说明设计 的螺旋桨模拟转子很好地反映了螺旋桨转子的真实情况, 在螺旋桨模拟转子上取得的自动平衡试验研究的成果完全

表5 与真实转子的临界转速对比

Table 5 Comparison of critical speed with real rotor

ı	转子	第一阶临界转速/(r/min)	临界转速变化量/%
	螺旋桨转子	7458	1.2
	螺旋桨模拟转子	7366	1.2



螺旋桨转子第一阶振型

Fig.17 First mode of propeller rotor

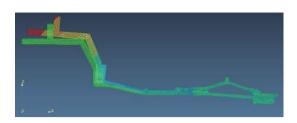


图 18 螺旋桨模拟转子第一阶振型 Fig.18 First mode of simulation propeller rotor

可以推广应用于真实螺旋桨转子。

3.3 螺旋桨模拟转子稳态不平衡响应分析

对螺旋桨模拟转子的稳态不平衡响应进行了计算分析,不平衡量的施加位置为模拟桨叶的质心位置,在试验过程中,通过在模拟桨叶外缘处的螺栓孔添加不同质量(见表6)的配重螺钉(孔的分度圆半径为648.5mm),计算模拟桨毂前端外圆处(该位置也是自动平衡试验过程中振动位移的测量位置)的稳态不平衡响应。计算得到的螺旋桨模拟转子的稳态不平衡响应曲线如图19所示(图中的相对转速是实际转速与额定工作转速的百分比),额定工作转速下的振动响应值见表7。

由图19和表7可知,螺旋桨模拟转子的振动位移随不 平衡量和转速均呈明显的递增关系;另外,根据参考文献

表 6 施加的不平衡量大小 Table 6 Value of applied unbalance

不平衡量/(g·m)	配重质量/g
50	77.1
100	154.2
150	231.3
200	308.4
250	385.5
300	462.6
350	539.7
400	616.8
450	693.9
500	771.0
550	848.1

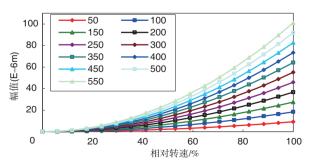


图 19 模拟转子的不平衡响应

Fig.19 Unbalance response of simulation rotor

表7 振动响应值 Table 7 Vibration response value

不平衡量/(g·m)	振动响应值/mm
50	0.009
100	0.018
150	0.028
200	0.037
250	0.046
300	0.055
350	0.064
400	0.073
450	0.083
500	0.092
550	0.101

[10]~参考文献[12],较低转速下选用振动位移测量更为合适。说明在自动平衡试验过程中,完全可以选择振动位移作为自动平衡试验的测量和控制参数,后续的试验也证明了这一点。

4 结论

本文基于自动平衡的某涡桨发动机螺旋桨模拟转子的设计进行研究,主要结论如下:

- (1)基于自动平衡试验研究的需要,进行了某涡桨发动机螺旋桨模拟转子的设计,该螺旋桨模拟转子与真实螺旋桨转子的动力特性基本一致,可以作为自动平衡试验研究的平台,在螺旋桨模拟转子上取得的自动平衡试验研究的成果可以推广应用于真实螺旋桨转子上。

参考文献

- [1] Timothy L S. Engine balancing system and method[P]. United States Patent, US 7243023, 2007.
- [2] Ghassaei S. Onboard aircraft engine balancing data gathering and analysis system[P]. Europe Patent. EP0577159 A1, 1993.
- [3] White J L, Heidari M A. Experience in rotor balancing of large commercial jet engines [C]//13th International Modal Analysis Conference, 1995.
- [4] Steve F H, Russell E A, Wayne W. Aircraft with transient-discriminating propeller balancing System [P]. United States Patent, US8360728 B2, 2013.
- [5] 孙宝东.高速转子自动平衡技术的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,1995.

- Sun Baodong. Study of high speed rotor automatic balancing technique [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1995. (in Chinese)
- [6] 贺世正.释放液体式自动平衡装置的研究[J].浙江大学学报, 2001,35(4):418-422.
 - He Shizheng. Study of liquid release auto-balancing head[J]. Journal of Zhejiang University,2001,35(4):418-422. (in Chinese)
- [7] 欧阳红兵,汪希萱.两种新型电磁式在线自动平衡装置[J].工 艺装备,2002,40(455):47-48.
 - Ouyang Hongbing, Wang Xixuan. Two new electromagnetic automatic balancing device[J]. Technological Equipment, 2002, 40(455):47-48. (in Chinese)
- [8] 沈伟.旋转机械主动平衡技术及工程应用[D].北京:北京化工大学,2006.
 - Shen Wei. Study on active balance technology and its application to rotating machinery[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006. (in Chinese)
- [9] 刘福国.电磁平衡装置结构优化设计及应用研究[D].北京: 北京化工大学,2016.
 - Liu Fuguo. Structure optimization design and application research on electromagnetic-balancer [D]. Beijing: Beijing

- University of Chemical Technology, 2016. (in Chinese)
- [10] 胡海岩.机械振动基础[M].北京:北京航空航天大学出版社,2007. Hu Haiyan. Mechanical vibration foundation[M]. Beijing: Beihang University Press, 2007.(in Chinese)
- [11] 李荣生. 航空发动机用振动传感器的现状与发展[J]. 航空科学技术,1997(02):22-23
 - Li Rongsheng. Status and development of aero-engine vibration sensors[J]. Aeronautical Science & Technology, 1997(02): 22-23. (in Chinese)
- [12] 李荣生. 航空发动机振动测量[J]. 航空科学技术,1994(04):33-36. Li Rongsheng. Aero engine vibration measurement[J]. Aeronautical Science & Technology, 1994(04):33-36. (in Chinese)

(责任编辑 皮卫东)

作者简介

孙勇(1996-)男,硕士研究生,助理工程师。主要研究方向:航空发动机结构强度与振动。

Tel: 18073369656 E-mail: 1348754967@qq.com 邓旺群(1967-)男,博士,博士生导师、研究员。主要研究 方向:航空发动机结构强度与振动。

Tel: 13973361196 E-mail: hnzzdwq.@163.com

Design and Analysis of Simulation Propeller Rotor of Turboprop Engine Based on Automatic Balance

Sun Yong^{1,*}, Deng Wangqun^{1,2}, Yang Hai^{1,2}, Tang Hubiao^{1,2}, Feng Yi^{1,2}

- 1. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China
- 2. Key Laboratory of Aero-engine Vibration Technology, Zhuzhou 412002, China

Abstract: Based on the need of automatic balance experiment research, a simulation propeller rotor was designed by taking the structure of the real propeller rotor as reference, according to the principle of structure and dynamics similarity, considering the installation need of automatic balance device and axial power transmission. The theoretical analysis shows that the dynamic characteristics of simulation propeller rotor are consistent with those of the real propeller rotor, and the requirements of automatic balance experiment of simulation propeller rotor can be satisfied by taking the vibration displacement as measurement and control parameter. The platform of automatic balance experiment of the simulation propeller rotor is established by the research, which lays a foundation for subsequent automatic balance experiment, with theoretical significance and engineering application value.

Key Words: turbo-propeller engine; simulation rotor of propeller; automatic balance; dynamic characteristics

Received: 2019-12-13; **Revised:** 2020-01-14; **Accepted:** 2020-01-30 *Corresponding author.Tel.: 18073369656 **E-mail:** 1348754967@qq.com