

文章编号: 1001-4888(2020)02-338-05

某型电动飞机螺旋桨振动特性实验研究^{*}

项松^{1,2,3}, 杨凤田^{1,2}, 王志³, 刘远强^{2,3}, 赵为平³

(1. 沈阳飞机设计研究所, 辽宁沈阳 110035; 2. 辽宁通用航空研究院, 辽宁沈阳 110136; 3. 沈阳航空航天大学, 辽宁沈阳 110136)

摘要: 某型电动飞机采用螺旋桨产生拉力, 为了防止螺旋桨工作时共振, 利用 ES-2-150 振动实验系统进行了两叶木质螺旋桨和碳纤维螺旋桨的振动特性实验, 采用谐振搜索与驻留方法测量出木质螺旋桨的第一阶固有频率为 36.07 Hz, 碳纤维螺旋桨的第一阶固有频率为 73.58 Hz。螺旋桨爬升状态转频为 39 Hz, 这与木质螺旋桨的第一阶固有频率非常接近, 导致木质螺旋桨在爬升状态出现比较严重的振动故障。因此, 某型电动飞机最终选择两叶碳纤维螺旋桨作为其拉力产生装置。

关键词: 电动飞机; 螺旋桨; 振动特性; 固有频率

中图分类号: V211.44 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-201

0 引言

燃油动力飞机具有噪声污染、空气污染和“碳排放”, “碳排放”对区域和全球气候会造成影响。电动飞机具有零“碳排放”、低噪音、运营成本低廉、使用维护方便等优点, 目前的电动飞机主要型号包括: 美国的单座轻型电动飞机 Electra Flyer-ULS、德国 PC-Aero 公司研发的双座电动飞机 Elektra One、法国生产的纯电动单座飞机 APEV Pouchelec、德国斯图加特大学飞机设计研究院研制的太阳能电动滑翔机 e-Genius、斯洛文尼亚 Pipistrel 公司研制的四座电动飞机 Taurus G4、德国慕尼黑科技大学的工程师、博士研究生与 ESA 联合设计的喷气式电动飞机 Lilium jet、中国沈阳航空航天大学研制的锐翔双座电动飞机。

电动飞机普遍采用螺旋桨产生拉力, 为了提高电动飞机航时, 螺旋桨要具有高的气动效率^[1-9]。为了避免螺旋桨在工作中出现共振故障, 螺旋桨的固有频率应该和工作转频错开, 并且留有一定的裕度, 很多学者开展了螺旋桨振动特性的研究。高宇^[10]分析了复合材料螺旋桨桨叶的振动特性, 计算了桨叶的静频和动频。孔瑞莲和王延荣^[11]采用有限元素法对某型螺旋桨及其改型桨叶的振动特性进行了计算和分析, 结果表明用动频系数计算各转速下的动频是可行的。李其汉等^[12]用实验模态分析技术研究了螺旋桨桨叶振动特性, 分析了桨叶根部连接状态和安装方式对固有频率和模态的影响。陈颖等^[13]对某结构开展了多轴随机振动实验研究, 探讨了典型线性结构在多轴随机振动实验中的动力响应特点。

本文利用 ES-2-150 振动台进行木质螺旋桨和碳纤维螺旋桨的振动特性实验, 采用谐振搜索与驻留方法测量出两种螺旋桨的第一阶固有频率, 最终确定了某型电动飞机振动故障的原因, 保证了该型电动飞机适航取证工作的顺利进行。

^{*} 收稿日期: 2018-09-05; 修回日期: 2018-12-18

基金项目: 航空科学基金项目(20173254006); 辽宁省教育厅项目(L201622); 辽宁省自然科学基金指导计划(20180550824); 沈阳市科学技术计划项目(F16-205-1-07)资助

通讯作者: 项松(1978—), 男, 在读博士, 高级工程师。主要研究领域: 高效率螺旋桨设计。Email: xs74342@sina.com

1 实验设备及实验件

实验在辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室进行。

1.1 实验设备

实验使用 ES-2-150 振动实验系统进行,该实验系统由振动台体(见图 1)、功率放大器、风机、振动控制仪等部分组成,具有冲击响应谱控制、谐振搜索和驻留等功能。技术参数如下:

频率范围:5~8000Hz;正弦激振力:2kN;随机激振力:2kN;最大负载:70kg;最大加速度:1000 m/s²;最大位移(峰-峰值):25mm;最大速度:2m/s。



图 1 振动台体
Fig. 1 Vibration table



图 2 木质螺旋桨
Fig. 2 Wooden propeller



图 3 碳纤维螺旋桨
Fig. 3 Carbon fiber propeller

1.2 实验件

实验件为辽宁通用航空研究院自主设计的两叶木质螺旋桨(图 2)和两叶碳纤维螺旋桨(图 3),直径均为 1.6m。

2 实验方法

采用谐振搜索与驻留方法测量螺旋桨的第一阶固有频率。控制传感器和监测传感器均为 ICP 类型;控制传感器灵敏度为 97.2mV/g;监测传感器灵敏度为 98.4mV/g;木质螺旋桨频率搜索范围为 5~250Hz;碳纤维螺旋桨频率搜索范围为 5~200Hz;扫频模式为线性;扫频率为 60Hz/min;品质因子为 5。

木质螺旋桨和碳纤维螺旋桨的谐振搜索与驻留实验控制曲线如图 4 和图 5 所示。

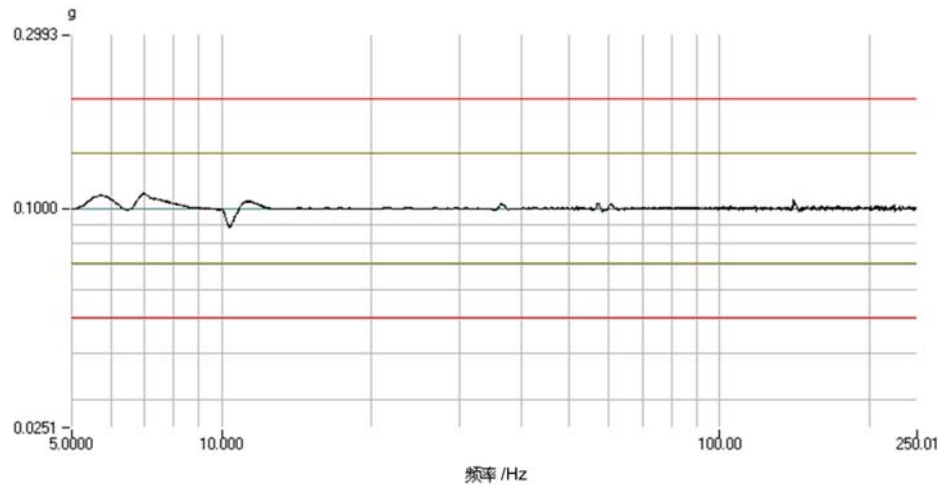


图 4 木质螺旋桨控制曲线
Fig. 4 Control curve of wooden propeller

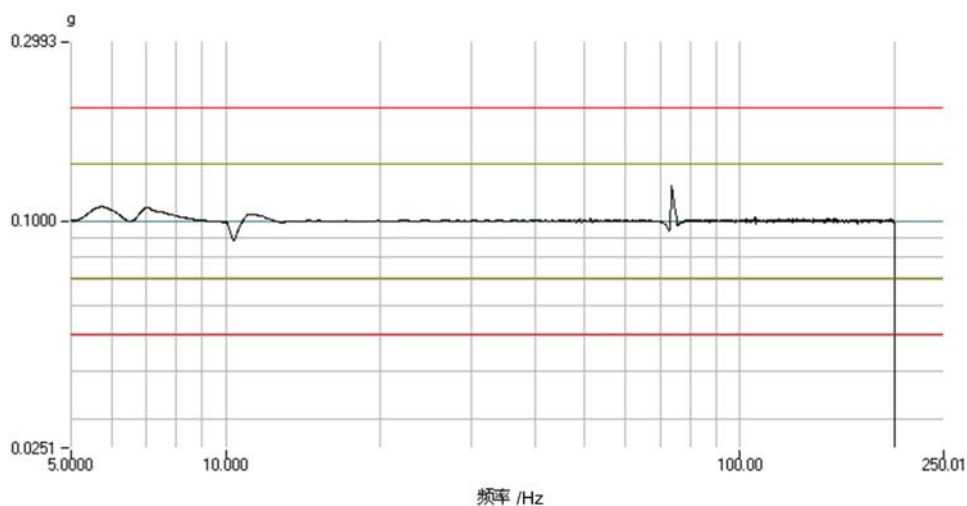


图 5 碳纤维螺旋桨控制曲线

Fig. 5 Control curve of carbon fiber propeller

3 实验结果

3.1 木质螺旋桨

木质螺旋桨传递特性如图 6 所示。

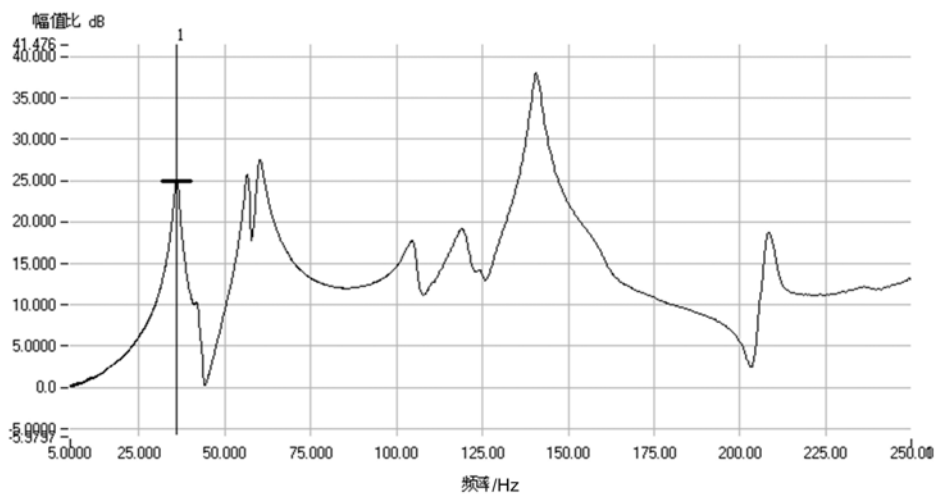


图 6 木质螺旋桨传递特性

Fig. 6 Transfer characteristics of wooden propeller

从图 6 可以看出,木质螺旋桨的第一阶固有频率为 36.07Hz。某型电动飞机最大起飞重量 600kg,巡航速度 110km/h,巡航状态转速 1700r/min,爬升状态转速 2340r/min(39Hz),爬升转频 39Hz 与木质螺旋桨的第一阶固有频率 36.07Hz 非常接近,导致螺旋桨在转速 2340r/min 附近时,出现比较严重的振动故障,并伴随螺旋桨噪声增大。

3.2 碳纤维螺旋桨

碳纤维螺旋桨传递特性如图 7 所示,由图 7 可以看出,碳纤维螺旋桨的第一阶固有频率为 73.58 Hz,某型电动飞机爬升状态转频为 39Hz,与碳纤维螺旋桨的第一阶固有频率相差很远,因此,碳纤维螺旋桨在巡航状态和爬升状态均运行平稳,并且噪声也不高。

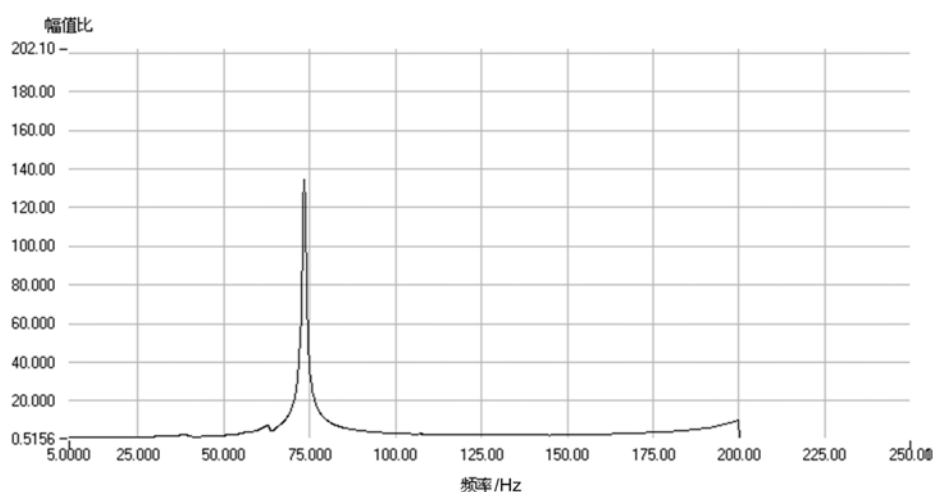


图7 碳纤维螺旋桨传递特性

Fig. 7 Transfer characteristics of carbon fiber propeller

4 结论

本文利用 ES-2-150 振动实验系统进行了两叶木质螺旋桨和碳纤维螺旋桨的振动特性实验,采用谐振搜索与驻留方法测量出两种螺旋桨的第一阶固有频率,发现木质螺旋桨的第一阶固有频率与飞机爬升状态转频非常接近,这是飞机爬升状态振动、噪声大的主要原因。

碳纤维螺旋桨的第一阶固有频率与转频相差很远,因此,碳纤维螺旋桨在巡航状态和爬升状态均运行平稳,并且噪声也不高。

螺旋桨是电动飞机的主要振动和噪声源,建议电动飞机研制过程中应该进行螺旋桨固有频率测试,确保螺旋桨固有频率与工作转频错开,并且留有足够的裕度。

参考文献:

- [1] 罗东明,周军,昂海松. 微型飞行器螺旋桨的气动优化设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(3):322—325 (LUO Dongming, ZHOU Jun, ANG Haisong. Aerodynamic optimization design of micro air vehicle propeller[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautical and Astronautics, 2003, 35(3):322—325 (in Chinese))
- [2] 焦俊,宋笔锋,张玉刚,等. 高空飞艇螺旋桨优化设计与气动性能车载试验[J]. 航空动力学报, 2017, 32(1): 196—202 (JIAO Jun, SONG Bifeng, ZHANG Yugang, et al. Optimal design and truck-mounted testing of aerodynamic performance for the propeller of high altitude airship[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(1): 196—202 (in Chinese))
- [3] 马晓平,宋笔锋. 提高小型无人机螺旋桨效率的工程方法[J]. 西北工业大学学报, 2004, 22(2):209—212 (MA Xiaoping, SONG Bifeng. Practical measures for raising propeller efficiency of low speed mini UAV[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2004, 22(2):209—212 (in Chinese))
- [4] 龚喜盈,张玉刚,宋笔锋,等. 大尺寸高空螺旋桨气动性能试验方法研究[J]. 飞行力学, 2014, 32(4):347—350 (GONG Xiying, ZHANG Yugang, SONG Bifeng, et al. Study on the large size high altitude propeller aerodynamic performance test method[J]. Flight Dynamics, 2014, 32(4):347—350 (in Chinese))
- [5] 高永卫,黄灿金,魏闯. 一种涵道螺旋桨的简便设计方法[J]. 航空工程进展, 2013, 4(3):352—357 (GAO Yongwei, HUANG Canjin, WEI Chuang. A simple approach to the design of ducted propeller[J]. Advances in Aeronautical Science And Engineering, 2013, 4(3):352—357 (in Chinese))
- [6] 项松,王吉,张利国,等. 一种高效率螺旋桨设计方法[J]. 航空动力学报, 2015, 30(1):136—141 (XIANG Song, WANG Ji, ZHANG Liguang, et al. A design method for high efficiency propeller[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(1):136—141 (in Chinese))
- [7] 项松,刘远强,佟刚,等. 某型电动飞机螺旋桨的设计与试验[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(3):460—466

- (XIANG Song, LIU Yuanqiang, TONG Gang, et al. Design and test of an electric powered aircraft propeller[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(3):460—466 (in Chinese))
- [8] 项松, 佟刚, 吴江, 等. 某型三叶螺旋桨的设计及性能试验[J]. 航空动力学报, 2016, 31(8):1793—1798 (XIANG Song, TONG Gang, WU Jiang, et al. Design and performance test of a kind of three-blade propeller[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(8):1793—1798 (in Chinese))
- [9] 项松, 杨康, 佟刚, 等. 两种不同弦长螺旋桨的风洞试验及分析[J]. 实验力学, 2017, 32(2):273—278 (XIANG Song, YANG Kang, TONG Gang, et al. Wind-tunnel experiment and analysis for two kinds of propeller with different chord length [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(2):273—278 (in Chinese))
- [10] 高宇. 复合材料螺旋桨桨叶强度与振动分析[D]. 南京航空航天大学硕士学位论文, 2005 (GAO Yu. Research on strength and vibration of composite propellers [D]. Master Thesis of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005 (in Chinese))
- [11] 孔瑞莲, 王延荣. 某型螺旋桨桨叶振动特性计算分析[J]. 航空动力学报, 1991, 6(4):342—344 (KONG Ruilian, WANG Yanrong. Vibration characteristic analysis of a propeller blade[J]. Journal of Aerospace Power, 1991, 6(4):342—344 (in Chinese))
- [12] 李其汉, 陈志英, 张大林. 螺旋桨桨叶试验模态分析[J]. 航空动力学报, 1991, 6(4):337—341 (LI Qihan, CHEN Zhiying, ZHANG Dalin. Experimental modal analysis of propeller blades[J]. Journal of Aerospace Power, 1991, 6(4):337—341 (in Chinese))
- [13] 陈颖, 朱长春, 李春枝, 等. 某结构的多轴随机振动实验研究[J]. 实验力学, 2009, 24(1):35—41 (CHEN Ying, ZHU Changchun, LI Chunzhi, et al. Multiaxial random vibration research of a typical structure[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(1):35—41 (in Chinese))

Experimental study of vibration characteristics for an electric aircraft propeller

XIANG Song^{1,2,3}, YANG Feng-tian^{1,2}, WANG Zhi³, LIU Yuan-qiang^{2,3}, ZHAO Wei-ping³

(1. Shenyang Aircraft Design Institute, Shenyang 110035, Liaoning, China; 2. Liaoning General Aviation Academy, Shenyang 110136, Liaoning, China; 3. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, Liaoning, China)

Abstract: The propeller is used to generate the thrust for an electric aircraft. In order to prevent the propeller from suffering resonance, the ES-2-150 vibration testing system is used to study the vibration characteristics of two-blade wooden propeller and carbon fiber propeller. The first-order natural frequency of wooden propeller is 36.07Hz, and that of carbon fiber propeller is 73.58Hz by the measurement of resonance search and residence method. The rotation frequency of propeller at climbing state is 39Hz, which is very close to the first-order natural frequency of wooden propeller, resulting in the vibration fault of the electric aircraft at climbing condition. Finally, a two-blade carbon fiber propeller is used as the thrust generating device of the electric aircraft.

Keywords: electric aircraft; propeller; vibration characteristics; natural frequency