

基于多信道无线传输的旋翼载荷测试技术研究

马亚平, 刘鹏, 谷士鹏

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘要: 直升机旋翼系统载荷和强度飞行试验是对真实大气环境中旋翼系统应力载荷谱的研究, 它提供的真实数据是理论计算所不能提供的; 因此旋翼系统载荷试飞是直升机设计定型试飞中极其重要的项目; 针对直升机旋翼系统载荷测试技术需求, 采用模块化、冗余度和高集成的设计理念, 通过多信道无线传输设计等技术, 将采集的动态载荷数据调制、发射与解调, 实现了多通道、高带宽和精同步的旋翼系统载荷数据采集与监控; 该技术对于直升机旋翼系统载荷试飞中遇到的类似问题具有一定的借鉴意义。

关键词: 旋翼系统; 载荷; FSK 调制; 时间同步

Research on Rotor Load Testing Technology Based on Multi-channel Wireless Transmission

Ma Yaping, Liu Peng, Gu Shipeng

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: Helicopter rotor system load and strength flight test is the real atmosphere environment of the rotor system stress load spectrum of the study, it provides real data can not be provided by the theoretical calculation, so the rotor system load test flight is the helicopter design stereotypes test flight is extremely important project. According to the requirements of helicopter rotor system load test technology, the dynamic load data modulation, transmission and demodulation are realized by multi-channel wireless transmission design using modularity, redundancy and high integration design. Data Acquisition and Monitoring of Rotor System Load with High Bandwidth and Accurate Synchronization. This technique has some reference significance for the similar problems encountered in the helicopter rotor system load test flight.

Keywords: rotor system; Load; FSK modulation; time synchronization

0 引言

直升机因具有固定翼航空器所不具备的垂直起降、悬停、小速度等特点, 在军民工作场合中使用越来越广泛。旋翼系统作为直升机的关键部件, 不仅为直升机提供升力和前进力, 而且提供直升机的纵向和横向操纵力矩以实现直升机的航向操作。旋翼系统的空气动力特性决定着直升机的性能、品质和可靠性, 是直升机的振动和噪声的主要来源。确定旋翼系统的应力载荷谱关系到直升机安全使用寿命。因此, 直升机定型试飞中旋翼系统的载荷试飞是直升机试飞的关键科目, 获取关于直升机疲劳定寿的旋翼载荷测试数据是直升机载荷和强度飞行试验必不可少的任务。旋翼系统件测量若处置不当则直接影响到飞机的操控系统进而危及飞行安全。旋翼系统在高速旋转过程中会产生非常大的离心过载且混杂有高温气流等恶劣工作环境, 因此安装在旋翼上的测试设备需要牢固可靠、测量准确且体积小等特性, 其不仅要获取真实可靠、高精度的飞行数据, 而且保证飞行安全也至关重要。本文主要讲述针对旋翼系统载荷试飞中采用无线传输技术实现旋转部件载荷数据的采集与传输。

1 旋翼载荷测试技术的特点与关键技术

直升机旋翼系统一般由主桨毂、倾斜盘、减摆器、弹性部件和桨叶等部件组成, 实现直升机的机动飞行。旋翼系统是直升机最复杂的结构之一, 许多机械结构是属于旋转部件, 导致

在实际工作中不可避免的存在振动, 过大的振动会造成直升机结构的损坏。因此对旋翼系统相关部件的强度载荷测试是直升机试飞中关键的环节。目前旋翼系统载荷试飞中对测试参数的数量要求至少 80 路, 采样率至少 1 K/sps。

旋翼载荷试飞作为直升机定型试飞科目中的关键考核环节。旋翼在高速旋转过程中会产生非常大的离心过载且混杂有高温气流等恶劣工作环境, 因此安装在旋翼系统上的测试设备需要牢固可靠、测量准确且体积小等特性, 其不仅要获取真实可靠、高精度的飞行数据, 而且保证飞行安全也至关重要。早期旋翼系统载荷测试采用的接触式测量方法, 即通过电刷集流环方式实现对载荷应变的供电设计与信号传输。电刷集流环工作方式是安装在动、静部件之间的电刷进行信号的传输, 该方式在旋翼高速旋转过程中会因剧烈摩擦而产生大量的噪声, 从而很容易导致载荷应变信号波形畸变, 其抗干扰性能比较差。此后, 避免信号传输产生畸变, 旋翼载荷测试主要采用采集记录一体化的形式开展, 测量设备安装在旋转件上, 直接采集并记录载荷传感器的输出信号, 不需要任何中间环节的转换与传输。但是, 该方案不能进行遥测传输, 无法实现载荷数据的实时监控; 且难以实现机载测试系统时间同步技术, 无法保证与机载数据采集系统的时间相关性。由于技术的局限性, 载荷参数从数量上和采样率都无法达到试飞需求。因此, 旋翼系统载荷测试关键技术研究的主要内容是非接触无线信号传输技术、旋转部件供电技术和非标准件定制技术。

非接触式无线信号传输是对接触式测量方法的一种革新, 克服了传统接触式所带来的噪声干扰等一系列问题, 而且该技术成熟度高, 也是将来旋翼系统测量技术发展的必然趋势。该方法采用信号无线传输或光电技术克服了应变信号的采集传输

收稿日期: 2017-07-05; 修回日期: 2017-08-09。

作者简介: 马亚平(1972-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事飞行试验、测试系统方向的研究。

问题, 从总体上实现了旋翼系统旋转过程中动、静部件之间测试系统数据的无线连接。非接触无线信号传输技术就是将采集的数据通过频率调制, 以特定的频率发送到遥测接收机进行解调, 遥测接收机将解调出的应变信号以特定的形式送到机载数据采集系统。这样就可以有效的克服旋转部件的数据传输问题。目前较为先进的技术是在旋转件安装的采集模块即具备对应变信号的放大、采集、调制及发射单元, 通过在机舱安装接收装置实现对应变信号的实时采集与记录, 采用以太网数据提取技术插入到直升机机载网络化测试系统给试飞员和地面安全监控进行实时显示。

旋转部件供电技术和非标准件定制技术是针对旋转部件的机械结构特点, 实现旋翼载荷测试系统的冗余电源设计和针对高离心过载环境下的测试机械架构设计。

2 基于无线传输的载荷测试系统设计

2.1 设计原则

依据试飞测试要求和被测信号的类型、范围、频率响应等特性, 充分考虑旋转件载荷测试系统的可靠性、先进性和可扩展性, 设计了满足试飞环境下的要求的旋转件测试方案。

用于试飞的旋翼载荷测试系统应具有的主要功能如下:

- 1) 系统具有采集动态应变的能力;
- 2) 考虑到旋翼机械安装的复杂性与安全可监控性, 系统具有无线信号传输的能力;
- 3) 无线传输信道相互独立, 具有快速移植能力;
- 4) 模拟量参数的测量精度优于 1%;
- 5) 系统能够实现精确时间同步 (优于 1 ms);
- 6) 具有 IRIG-B 时间信号的输入功能, 保证与机载网络化测试系统具有时间统一性;
- 7) 信号采集通道数大于 80 路, 采样率大于 1 K/sps;
- 8) 双冗余供电系统, 提高供电的可靠性。

2.2 无线传输协议设计

根据直升机试飞测试系统设计要求, 无线信号传输的协议选择应该具有无线信号通道相互独立、信道之间可以互相移植的能力, 保证在试飞过程中在单一通道出现故障情况下实现现场的快速切换, 同时要求无线信道启动建立时间短、信号传输带宽满足测试要求。

数字调制技术决定了无线信道的性能。数字调制是使用载波信号对离散量进行调制。参靠目前主流的数字信号调制技术, 对比各自的技术特点最终确定采用 FSK (频移键控) 数字调制旋方式进行数据的无线传输。频移键控 FSK 数字调制是国际电信联盟确定的数字调制技术, 广泛使用在网络传输领域, 具有系统设计成熟可靠、抗串扰能力强、辐射功率小和信道建立时间短等特点。

FSK (频移键控) 调制技术是数字信号控制正弦波的频率, 使正弦波的频率随数字信号而变化。FSK 信号的数学表达式为:

$$S_M(t) = A \cos(2\pi m \Delta f t + \omega_0 t)$$

$$(m = 1, 2, 3, \dots, M; 0 \leq t \leq T)$$

其中: Δf 为 M 个频率之间的频率差。

二进制 FSK 信号是两个不同频率 f_1 和 f_2 的正弦波对应数字信号的“1”和“0”。二进制 FSK 信号波形如图 1 所示。

2.3 旋翼载荷测试系统设计

旋翼载荷测试系统主要包括数据采集与遥测单元、系统安

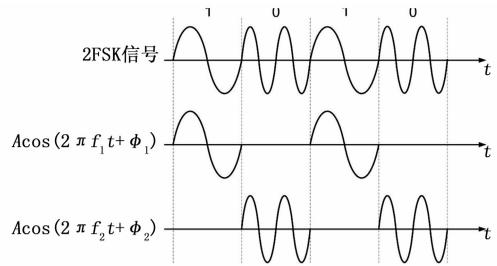


图 1 二进制 FSK 信号波形图

装盘、供电单元和遥测数据接收单元、以太网数据提取系统和地面与机上数据监控, 系统原理框图如图 2 所示。数据采集与遥测单元完成载荷数据的采集、调制和无线发送, 定制的系统安装盘是数据采集与遥测单元的安装载体, 该安装盘有数据采集与遥测单元的安装底座和信号传输与电源的相关电路, 供电单元完双冗余供电, 遥测数据接收单元是将接收的载荷数据解调后以模拟量和以太网的方式发送到机载网络化数据采集系统。

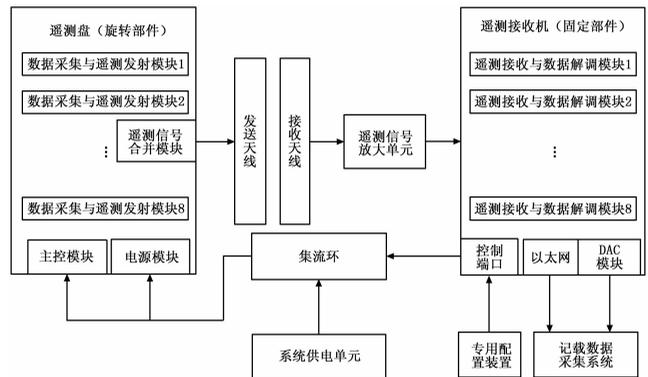


图 2 旋翼载荷测试系统原理框图

2.3.1 信号采集与处理单元

数据采集与处理单元设计如图 3 所示。

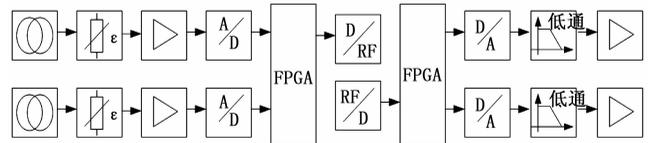


图 3 信号的采集表与处理

根据旋翼载荷测量对应变数据的精度要求, 应变数据采集采用高精度的恒流源应变电路设计, 可有效减少线路设计带来的非线性误差, 保证测量数据的精度。每路应变传感器都可独立提供高精度电流, 电流大小用户可设置。传感器信号通过可增益设置的放大器放大后进行 A/D 变换。处理器 (FPGA) 将接收的 A/D 数据转换并形成一条串行数据流。串行数据流以 FSK (频移键控) 调制技术对其进行调制后放大输出。载波频率可以通过用户进行设置, 以避免对原机无线信号产生干扰。

接收天线将接收到的调制信号送入到接收机进行解调。接收机可对不同的通道信号按用户要求进行滤波处理, 处理后的信号将以以太网或模拟量的方式输出到机载测试系统通用采集器。

2.3.2 系统安装盘设计

系统安装盘是旋翼载荷测试系统的安装载体, 根据载荷试

飞需求,系统安装盘需要安装固定信号采集与无线发射模块、双冗余电源控制模块和备份电池包等部件,实现应变信号的采集、调制与无线发射的功能。

由于旋翼桨毂安装支架的特殊结构,系统安装盘根据旋翼桨毂结构需要特殊定制。特别是设备的重量和结构强度有特殊的限制。通过前期相关技术协调,设计系统安装盘采用端面式安装,圆盘形设计。安装盘借用旋翼桨毂防雨盖板的安装螺钉,设计成盘型安装支过渡架。中心设计成圆盘平台,用于安装遥测盘。具体如图 4 所示。

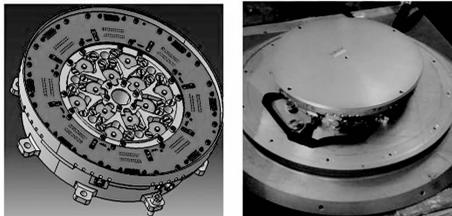


图 4 系统安装盘

信号采集与无线发射模块集成应变传感器供电、信号调理、信号转换、射频发射四大功能。该模块对所有通道进行同步采样,信号调理单元对输入信号进行滤波处理,A/D 变换器对其进行超采样,对采样的数字信号进行 FSK (频移键控) 数字调制,以无线方式发射到对应的接收机。

遥测盘技术指标:

信号输入:应变;通道数:80;传感器激励:恒流源激励,0~10 mA 可编程,步进 0.1 mA;测量范围:8 档增益可调;信号带宽:DC~19 kHz (可设置);线性度:±0.2% f. s.;重复性:<0.5%;自动调零:±200% f. s.;工作温度:-40~+125℃;温度漂移:±0.02%/℃典型温度补偿段内。

2.3.3 数据提取与安全监控

为满足安全监控的试飞要求,直升机旋翼载荷测试系统需要将采集的旋翼系统载荷数据遥测下传给地面监控大厅和飞行员,为飞行安全提供判别依据。旋翼载荷测试系统遥测接收机以模拟量和以太网的形式插入到机载网络化数据采集系统,再通过以太网提取技术通过机载遥测系统下传到地面供安全监控,同时为了保证试飞员第一时间得到载荷数据。具体如图 5 所示。

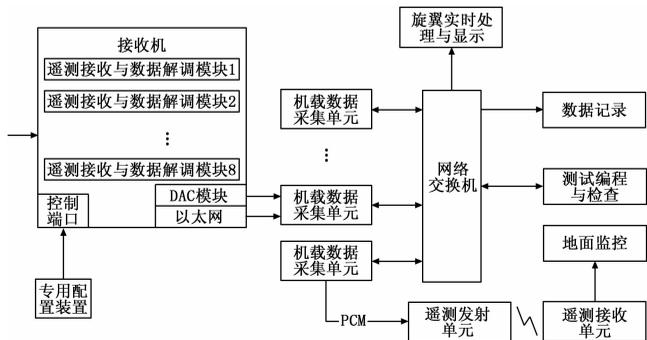


图 5 数据提取与安全监控

2.4 实验室调试与验证

对于载荷测试系统设计,时间同步技术设计是关键技术。基于时间历程的数据分析关键在于每个通道的时间延迟和通道之间的时间同步性指标。系统采用 IRIG-B 时间协议对系统

的各个处理单元进行时间同步,时间同步精度设计指标 1 ms。通过以太网对每个采集通道进行采集配置工作,将编程好的配置软件加载到旋翼载荷测试系统。机载遥测数据接收单元对整个系统的运行状态进行监控,检查整个测试系统的每个采集节点的时间同步性,最终保证旋翼载荷测试系统满足设计指标。

2.4.1 采集通道的同步性误差测试

对于不同通道的应变信号经过采样、调制、发射、接收、解调和二次采样的过程,通道间的同步误差关系到后期数据处理对参数时间相关性的要求。其试验结果如图 5 所示。

从示波器下测得的画面,可以得出同步时间间隔为:

$$T_0 = t_1 - t_2 = 464 \text{ ns} - (-472 \text{ ns}) = 936 \text{ ns} < 1 \mu\text{s}$$

2.4.2 采集通道的时间延迟测试

测试系统的时间延迟主要包含信号放大延时、滤波器延时、A/D 转换延时、D/A 转换延时、无线传输延时、处理与缓存延时等。任选两个采集通道,使用同一标准信号源做输入,利用高精度示波器监测这两个通道的信号波形,分析两个通道输入信号与输出信号的响应时间,就可测试出这两个采集通道的各自时间延迟,即载荷测试系统的时间延迟。其试验结果如图 6 所示。

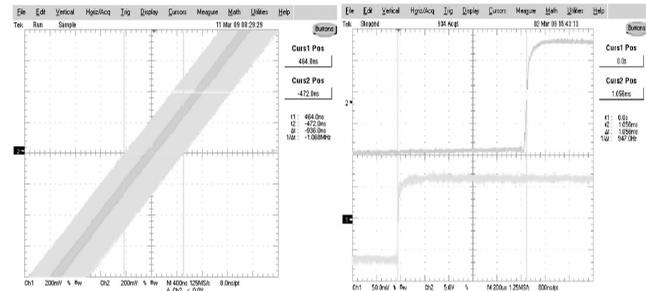


图 6 时间同步性与延迟性测试结果

从示波器下测得的画面,可以得出系统延时:

$$T_1: T_1 = t_2 - t_1 = 0.956 \text{ ms} - 0 = 0.956 \text{ ms}$$

3 结束语

通过采用多信道无线通信和双冗余度旋转部件供电等关键技术,顺利实现旋翼高速旋转过程中旋转件、静部件之间测试系统的数据无缝连接,从而提供一种切实可行的旋翼载荷测试方案。该技术方案稳定可靠,目前已经成功的应用,采集的旋翼载荷数据准确、可靠,并首次实现翼载荷信的实时安全监控。该技术对后续的直升机旋翼载荷测试具有一定的借鉴与推动作用。

参考文献:

[1] 张晓谷. 直升机动力学设计 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1995.
 [2] 杨永. 基于 PD 控制的航天飞行器控制系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (6): 1738 - 1740.
 [3] 赵雅兴. FPGA 原理、设计与应用 [M]. 第一版. 天津: 天津大学出版社, 1999.
 [4] Blostein S D, Leib H. Multiple antenna systems: Their role and impact in future wireless access [J]. IEEE Commune. 2003, 40 (7): 94 - 101.
 [5] Paulraj A J, Gore D A, Nabar R U, et al. An overview of MIMO communications - A key to gigabit wireless [J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92 (2): 198 - 218.