

# 旋转环境下的无线时钟抖动估计与修正方法

卢翔宇<sup>1</sup>,陈正武<sup>1</sup>,刘雄<sup>2</sup>

(1.中国空气动力研究与发展中心 气动噪声控制实验室,四川 绵阳 621000;

2.西南科技大学 信息工程学院,四川 绵阳 621000)

**摘要:**直升机旋翼表面非定常载荷测量试验中,导电滑环的性能优劣和现场环境的电磁辐射对外部时钟信号的质量影响较大,受影响的外部时钟信号会导致错误的采集动作,从而无法准确地获取特定方位角处的载荷数据。为提高外部时钟信号的品质,提出一种用于旋转环境下的数据采集系统的无线时钟抖动估计及修正方法,即外部时钟信号经无线收发模块传输,采用两组相位差90°的三角波进行等幅度斜边估计时钟抖动量,并且使用拉格朗日插值算法修正传感器的采样值。仿真与风洞表明,该方法能有效地减小外部时钟抖动造成的采集误差,对准确测量旋转环境下旋翼表面的载荷信号具有显著效果。

**关键词:**外部时钟;时钟抖动;数据采集系统;三角波;插值修正

中图分类号: TN919.3

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.212498

中文引用格式: 卢翔宇,陈正武,刘雄. 旋转环境下的无线时钟抖动估计与修正方法[J]. 电子技术应用, 2022, 48(8): 76–80, 85.

英文引用格式: Lu Xiangyu, Chen Zhengwu, Liu Xiong. Wireless clock jitter estimation and correction method in rotating environment[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(8): 76–80, 85.

## Wireless clock jitter estimation and correction method in rotating environment

Lu Xiangyu<sup>1</sup>, Chen Zhengwu<sup>1</sup>, Liu Xiong<sup>2</sup>

(1. Laboratory of Aerodynamic Noise Control, China Aerodynamic Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

2. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In the measurement test of unsteady load on helicopter rotor surface, the performance of slip ring and the electromagnetic radiation of the field environment have great influence on the quality of external clock signal. In some serious cases, the affected external clock signal may lead to erroneous acquisition actions, which makes it impossible to accurately obtain the load data at a specific azimuth. In order to improve the quality of the external clock signal, a wireless clock jitter estimation and correction method of data acquisition system in rotating environment is proposed. The external clock signal is transmitted through the wireless transceiver modules, two sets of triangular waves with the phase difference of 90° are used to estimate the clock jitter with equal amplitude hypotenuse, and the Lagrange interpolation algorithm is used to correct the samples of sensors. Simulation and wind tunnel tests show that this method can effectively reduce the acquisition error caused by external clock jitter, and has significant effect on accurately measuring the load signal on the rotor surface in rotating environment.

**Key words:** external clock; clock jitter; data acquisition system; triangle wave; interpolation correction

## 0 引言

在直升机旋翼桨叶表面非定常载荷测量试验中,需要准确测量桨叶旋转过程中其表面载荷的变化规律,即采集不同方位角时对应的压力信号<sup>[1]</sup>。使用与桨叶同步旋转的编码器的输出脉冲作为数据采集的外部时钟信号,可以准确提供桨叶的方位角信息<sup>[2~6]</sup>。目前通常采用有线的方式将时钟信号进行传送:即通过导电滑环和线缆将编码器脉冲信号输送至数据采集设备。试验中发现,外部时钟信号经过干扰环境下的长距离传输和导电滑环后,其信号质量会受到影响<sup>[7]</sup>,尤其在导电滑环磨损后以及时钟信号线与动力强电线缆长距离并行部署

等重干扰情况下,时钟信号会出现高频毛刺和变形,导致数据采集设备产生错误的采集动作,从而无法实现相同相位的等角度采集。

为解决旋转环境下有线时钟信号严重干扰导致数据采集错误的问题,本文研究和设计了一种基于通断键控(On-Off Keying, OOK)调制方法的时钟信号无线传输系统,消除了因导电滑环性能下降和强电磁干扰导致的错误采集动作。然而,无线采样时钟信号由于进行了OOK调制解调过程,会引入微秒量级的时钟信号抖动,该随机性的时基偏差难以从根源上消除,只能对其进行检测估计与补偿,尽可能减小时钟抖动<sup>[8]</sup>。传统的时钟

抖动研究中,信噪比测量法<sup>[9]</sup>与相位噪声测量法<sup>[10]</sup>都能够很好地估计时钟抖动大小,但不能测量时钟抖动中相位差分布,存在一定的局限性。而传统正弦信号时钟抖动估计同样存在其他信号适用性的局限性,不能进行时间误差补偿。

本文提出了一种时钟信号无线传输系统和时钟抖动估计与修正方法。以FPGA为核心,结合无线传输优势的多通道数据采集系统<sup>[11]</sup>,针对数据采集系统的外部无线传输的时钟信号,采取等幅度三角波斜边检测方法进行时钟抖动估计,进而得到时钟抖动估计量,反复进行拉格朗日插值修正,减小外部时钟信号抖动,提高数据采集精度和准确性。该系统和方法适用于无线传输的时钟信号的时钟抖动估计与测量,特别适用于旋转环境下多通道数据系统采集。

## 1 数据采集系统应用场景

旋转环境下数据采集系统的应用场景如图1所示。主要包括多路压力传感器、数据采集器、无线外部时钟接收模块、导电滑环、编码器、无线外部时钟发送模块、测量计算机和电源等。压力传感器分布在旋翼桨叶表面,用于感应局部压力载荷的瞬时变化;桨毂和编码器分别安装在传动机构旋转轴的两端,而数据采集设备安装在桨毂上方。试验过程中,桨叶、数据采集器和编码器同步高速旋转;编码器采用增量式旋转编码器<sup>[12]</sup>,每圈输出1 024个脉冲信号(A相脉冲)作为外部时钟,同时输出1个脉冲信号(Z相脉冲)作为采集开始触发信号,通过OOK调制后由无线外部时钟发送模块进行发送;数据采集器中的外部时钟接收模块完成OOK信号的解调,恢复出采样时钟信号;系统供电以及采集设备与测量计算机之间的控制与数

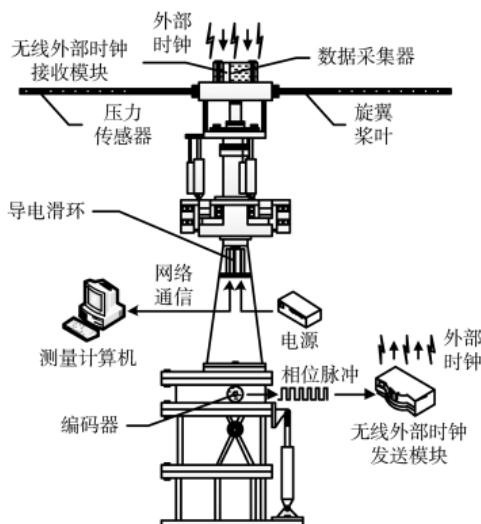


图1 旋转环境下数据采集系统的无线时钟传输系统框图

据信息交互通过导电滑环完成。

## 2 时钟抖动估计与修正方法

旋转环境下,数据采集系统的无线时钟抖动估计及修正任务由参考信号产生与采集模块、时钟抖动估计与修正模块两部分配合完成。参考信号产生与采集模块上使用高精度数模转换器DA产生本地的同相三角波基准源信号 $S_1$ 和正交三角波基准源信号 $S_0$ ,利用高精度基准源信号自身的规律性为无线时钟的抖动估计提供参考,使用无线外部时钟信号完成对多路传感器信号 $u(t)$ 与同相/正交基准源信号( $S_1$ 和 $S_0$ )的采样。在时钟抖动估计与修正模块中,使用采集到的基准源信号数据对时钟抖动进行计算和估计,再使用得到的时钟估计值对采集到的传感器信号数据进行修正。时钟抖动估计与修正方法框图如图2所示。

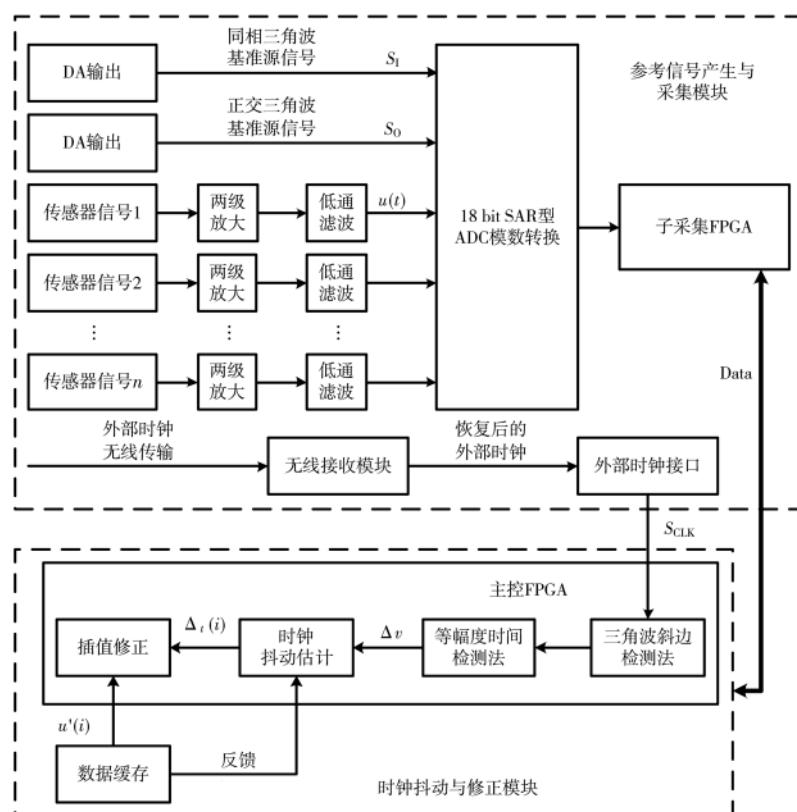


图2 时钟抖动估计与修正方法

### 2.1 采集电路与无线时钟收发电路

信号采集模块除完成两路基准源信号的产生和采集外,还要完成多通道传感器信号的放大、低通滤波等调理,以及18 bit ADC模数转换,并通过子采集FPGA传输数据至时钟抖动估计与修正模块<sup>[13]</sup>。

来自传感器的压力信号经放大器AD8250/8253两级放大和二阶巴特沃斯低通滤波后,再由18 bit的逐次逼近ADC芯片LTC2358<sup>[14]</sup>完成高精度模数转换,并传输至子采集FPGA,最后通过SPI通信接口与主控FPGA进行数据通信,其吞吐量可达到每通道200 kb/s。

外部时钟的无线传输使用 OOK 调制解调技术实现,发射端采用 CMOSTEK 公司的 CMT2119B 射频发射器,最高速率可达到 300 kb/s,发射功率为 20 dBm,工作模式采用中间处理环节最少的直通模式,接收端使用配套的 CMT2219B 射频接收器,典型接收灵敏度为 -110 dBm,时钟信号的无线收发使用 915 MHz 频段。CMT2219B 接收电路图如图 3 所示,CMT2119B 发射电路图如图 4 所示。

采集设备开始工作时需要一个触发信号,以确保每次采集到的首点数据均发生在相同的旋转空间位置,触发信号由编码器提供,该信号也使用无线方式传输。由于触发信号为单个脉冲信号,对无线传输的速率没有要求,使用更简单、更便宜、传输速率更低的 SYN115 单芯片 ASK/OOK 发射芯片和 SYN480R 单芯片 ASK/OOK 接收芯片来实现,工作频率设置在 433 MHz,与时钟信号的无线传输频率分开。

## 2.2 时钟抖动估计

时钟抖动估计模块包括主控 FPGA 和数据缓存两个部分。其中,由信号采集模块中的 DA 器件输出两组三角波基准源信号( $S_1$  和  $S_0$ )经 ADC 模数转换后传输至主控 FPGA 中完成三角波斜边检测。外部采样时钟  $S_{CLK}$  经无线传输模式传送至三角波斜边检测,配合三角波等幅度时间检测法得到时钟抖动估计量  $\Delta_t(i)$ 。基于三角波信号的时钟抖动估计方法如图 5 所示。具体的时钟抖动估计方法流程如下:

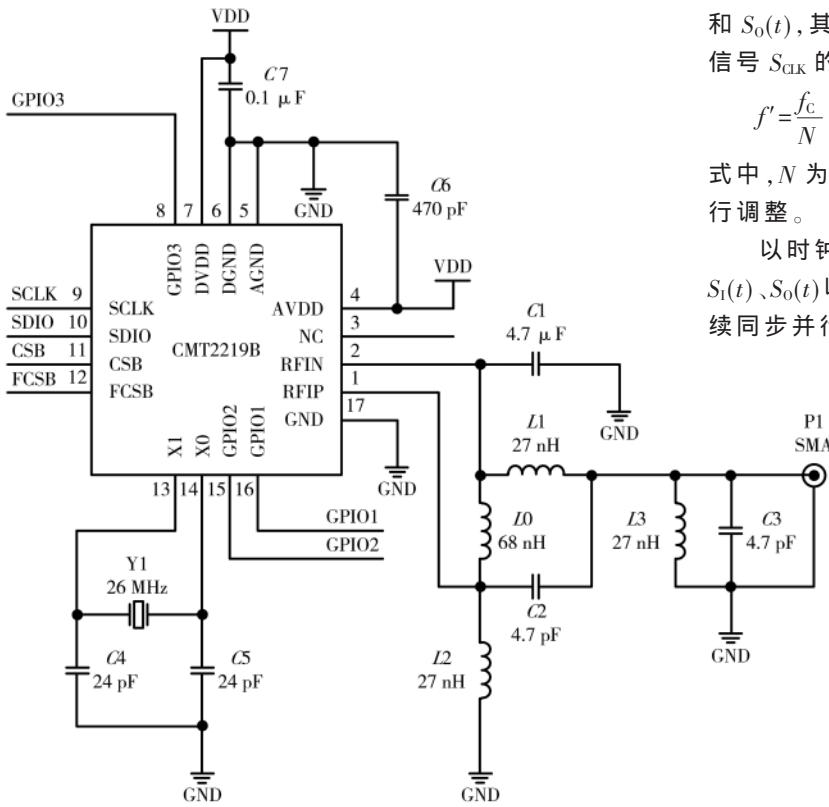


图 3 CMT2219B 无线接收模块电路

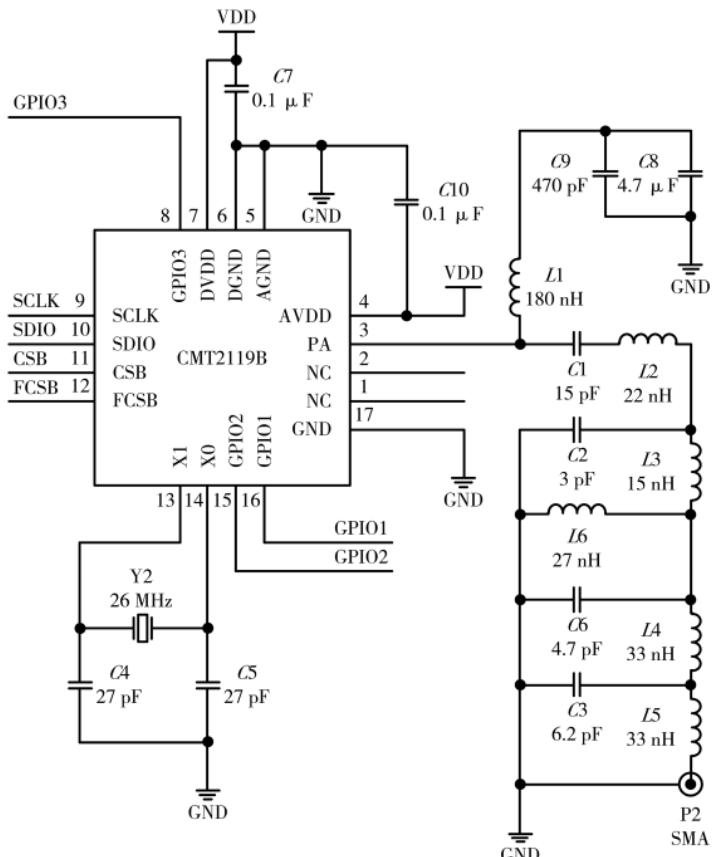


图 4 CMT2119B 无线发送模块电路

设定等幅度、等频率及相位差 90°的两组三角波  $S_1(t)$  和  $S_0(t)$ ,其频率为  $f'$ ,幅值范围为  $(V_L, V_H)$ ;外部采样时钟信号  $S_{CLK}$  的频率为  $f_c$ 。其中,  $f'$  与  $f_c$  之间满足以下关系:

$$f' = \frac{f_c}{N} \quad (1)$$

式中,  $N$  为正整数,大于等于 2,可根据实际估计效果进行调整。

以时钟采样信号  $S_{CLK}$  作为 SAR ADC 的采样时钟,对  $S_1(t)$ 、 $S_0(t)$  以及传感器信号  $u(t)$  进行等时间间隔  $T_c$  的连续同步并行采集,  $T_c$  满足以下关系:

$$T_c = \frac{1}{f_c} \quad (2)$$

利用三角波斜边特性进行判断:当时间间隔  $T_c$  的两个采样点同时位于信号  $S_1(t)$  和  $S_0(t)$  斜边阶段时,计算等间隔  $T_c$  两个采样点的理论幅度差值变化。同相三角波信号  $S_1(t)$  的理论幅度差值  $\Delta_v^1$  和正交相三角波信号  $S_0(t)$  的理论幅度差值  $\Delta_v^0$  如下:

$$\Delta_v^1 = \frac{2 \cdot f' \cdot (V_H - V_L)}{f_c} \quad (3)$$

$$\Delta_v^0 = \frac{2 \cdot f' \cdot (V_H - V_L)}{f_c} \quad (4)$$

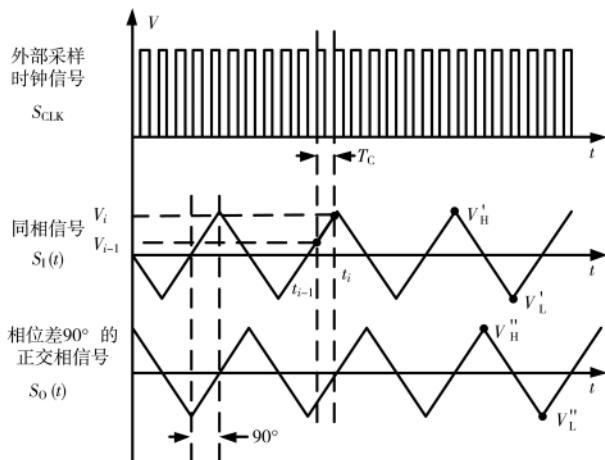


图 5 基于三角波信号的时钟抖动估计方法

式中,  $V_H'$  和  $V_L'$  分别为信号  $S_I(t)$  实际采样信号的最大幅值和最小幅值,  $V_H''$  和  $V_L''$  分别为信号  $S_Q(t)$  实际采样信号的最大幅值和最小幅值。

然而, 由于三角波信号存在尖峰, 当等间隔的两个采集点存在于尖峰两侧时, 理论幅度误差存在判断错误, 因此, 需要加入最大门限值进行判断。在满足过采样定理的前提下, 当一组三角波信号的两个采集点之间存在尖峰时, 另一组三角波信号的两个采集点之间不可能存在尖峰。

利用  $S_I(t)$  的理论幅度差值和  $S_Q(t)$  的理论幅度差值进一步确定当前采样频率下, 输入的三角波信号的标准理论幅度差值  $\Delta_V$  为:

$$\Delta_V = \begin{cases} \frac{\Delta_V^I + \Delta_V^Q}{2} & |\Delta_V^I - \Delta_V^Q| \leq \delta \\ \max\{\Delta_V^I, \Delta_V^Q\} & |\Delta_V^I - \Delta_V^Q| > \delta \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\delta$  为最大门限值因子。

根据采集的数据缓存结果, 计算出三角波信号的实际时间间隔  $T_C$  的两个采样点  $i$  和  $i-1$  的实际幅度差值  $\Delta_V(i)$ :

$$\Delta_V(i) = |V_i - V_{i-1}| \quad (6)$$

式中,  $i$  为基准信号源采集点序列,  $V_{i-1}$  和  $V_i$  分别为第  $i-1$  和第  $i$  个采样点对应幅值。

进一步计算出第  $i$  个采样点相对于第  $i-1$  个采样点的时间抖动变化量  $v_t(i)$ :

$$v_t(i) = T_C \cdot \frac{\Delta_V(i) - \Delta_V}{\Delta_V} \quad (7)$$

对于 SAR ADC 采集过程中的时间抖动积累效应, 第  $i$  个实际采样点距离第  $i$  个标准采样点的时间抖动估计量  $\Delta_t(i)$  为:

$$\Delta_t(i) = \sum_{k=0}^i v_t(k) \quad (8)$$

### 2.3 传感器信号的采样值修正

编码器输出的脉冲信号是可以准确反映桨叶相位

角度的时钟信号, 经过无线传输后, 时钟信号引入了随机抖动, 导致信号采样时刻偏离了期望采样时刻, 通过对时钟抖动的正确估计, 同时基于实际采样时刻的采样值, 使用拉格朗日插值修正的方法恢复期望采样时刻的传感器采样值, 即对传感器采样信号  $u(i)$  在  $(m+1) \cdot T_C$  个采集周期内进行修正, 得到修正后的传感器采样值序列  $u'(i)$ , 达到减小数据误差的目的。时钟抖动估计与采集数据修正方法如下:

在得到时钟抖动估计量  $\Delta_t(i)$  的基础上, 可以进一步得到传感器采集信号  $u(i)$  在  $(m+1) \cdot T_C$  时间内的实际采样值序列  $u(0), u(1), \dots, u(mT_C)$  和时间抖动估计量序列  $\Delta_t(0), \Delta_t(1), \dots, \Delta_t(mT_C)$ 。

设定传感器信号  $u(t)$  在第  $i$  个序列点的时间抖动估计为  $\Delta_t(i)$ , 则存在时间区间  $[t_0, t_i + \Delta_t(i)]$ , 其中  $t_i$  为第  $i$  个序列点的时间点。已知在  $t_0, t_1, \dots, t_i$  时刻传感器的实际采样信号为  $u(0), u(1), \dots, u(i)$ , 则可以构建拉格朗日插值多项式  $L_i(t)$ :

$$L_i(t) = \sum_{k=0}^i u(k) \cdot l_k(t) \quad (9)$$

式中,  $l_k(t)$  为拉格朗日基函数, 其定义如下:

$$l_k(t) = \frac{(t-t_0)(t-t_1)\cdots(t-t_i)}{(t_k-t_0)(t_k-t_1)\cdots(t_k-t_i)} = \prod_{j=0, j \neq k}^i \frac{t-t_j}{t_k-t_j} \quad k=0, 1, \dots, i \quad (10)$$

最后利用多项式  $L_i(t)$  插值计算在第  $i$  个序列点插值修正后的采样值序列  $u'(i)$ :

$$u'(i) = \sum_{j=0}^{i-1} \left\{ u(j) \cdot \frac{[t_i + \Delta_t(i) - t_0]}{(t_j - t_0)} \cdot \frac{[t_i + \Delta_t(i) - t_1]}{(t_j - t_1)} \cdot \right. \\ \left. \cdots \cdot \frac{[t_i + \Delta_t(i) - t_{i-2}]}{(t_j - t_{i-2})} \cdot \frac{[t_i + \Delta_t(i) - t_{i-1}]}{(t_j - t_{i-1})} \right\} \quad (11)$$

### 3 仿真与试验

针对旋翼旋转时出现无线时钟信号的时钟抖动情况进行仿真。在标准 1 kHz 正弦信号采集过程中添加采集时钟的时间扰动, 得到存在时钟抖动的原始外部时钟输入信号, 如图 6 所示, 时钟信号抖动造成数据采集误

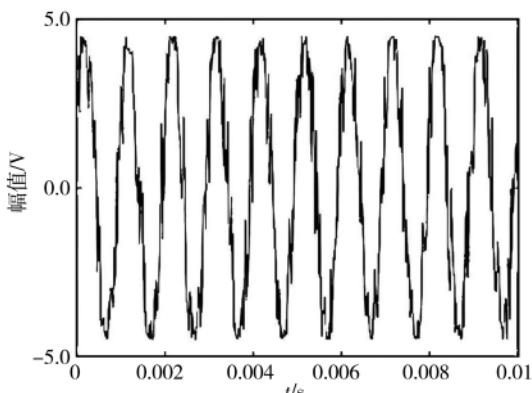


图 6 时钟抖动下外部时钟输入信号

差明显。采用时钟抖动估计及修正方法进行仿真,仿真结果如图7所示,显著减小时钟抖动误差。仿真表明,该方法能够有效减小因时钟抖动造成的数据采集误差。

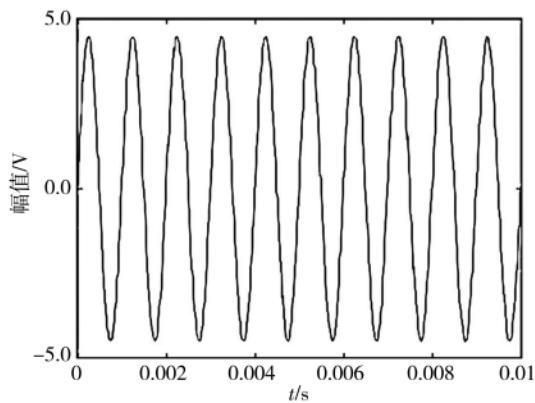


图7 估计与修正后的外部时钟输入信号

在风洞中完成旋翼桨叶现场测量试验,验证该方法的可行性和有效性。风洞试验通过改变转速  $N$ 、风速  $V$  得到不同的前进比  $\mu$ ,同时改变旋翼垂向力(升力)系数  $C_w$ 、参考轴倾角  $\alpha$  等参数,获得每个测点的非定常载荷系数  $C_p(\Psi)$  随方位角变化规律<sup>[15]</sup>。试验照片如图8所示。

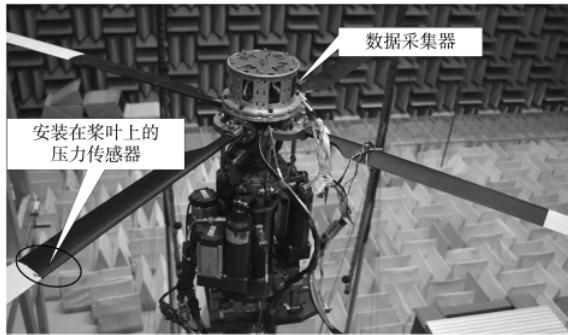


图8 安装在风洞中的旋翼桨叶模型和采集器

图9为  $N=1200 \text{ r/m}$ 、 $V=12.6 \text{ m/s}$ 、 $\mu=0.1$ 、 $C_w=0.011$ 、 $\alpha=-2^\circ$  时的试验结果。试验表明,触发和外时钟信号传输正常,采集动作准确,且每个测点在旋转  $360^\circ$  后首尾数据重合性较好,各测点系数变化趋势一致。

#### 4 结论

用于旋转环境下数据采集系统的时钟抖动估计及修正方法能够对时钟抖动量进行估计与修正,显著减小时钟抖动造成的采集误差,提高数据采集准确性。该方法满足旋转环境下旋翼桨叶表面非定常载荷的准确测量,为开展旋翼气动载荷特性研究提供支持。

#### 参考文献

- [1] 王勋年.低速风洞试验[M].北京:国防工业出版社,2002:358-417.
- [2] SCHEIMAN J.A tabulation of helicopter rotor-blade differential pressure, stresses, and motions as measured in flight[R].

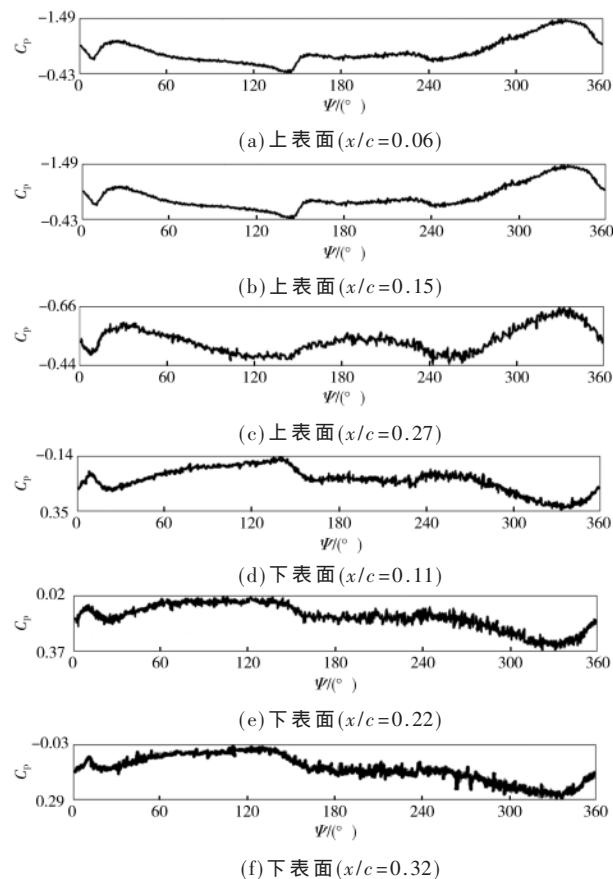


图9 旋翼上下表面测点在  $360^\circ$  范围内的载荷系数变化曲线

NASA TM X-952, 1964.

- [3] SHOCKEY G, WILLIAMSON J, COX C, et al. AH-1G helicopter aerodynamic and structural load survey[R]. USA-AMRDL-TR-86-39, 1977.
- [4] CROSS J, WATTS M E. Tip aerodynamics and acoustics test: a report and data survey[R]. NTRS, NASA RP-1179, 1989.
- [5] DADONE L, DAWSON S, BOXWELL D, et al. Model 360 rotor test at DNW - review of performance and blade airload data[R]. American Helicopter Society 43th Annual Forum, St.Louis, May, 1987.
- [6] PETER L F. Aerodynamic results of a pressure-instrumented model rotor test at DNW[J]. Journal of the American Helicopter Society, 1991, 36(4): 66-76.
- [7] 熊建军, 马军, 蒋敏. 基于旋转-振荡试验系统的强弱电信号传输与测量[J]. 兵工自动化, 2014, 33(11): 46-49.
- [8] SABOUI V, AGHDAM E N, SAEEDI S. A single-bit continuous-time delta-sigma modulator using clock-jitter and inter-symbol-interference suppression technique[J]. International Journal of Circuit Theory & Applications, 2017, 45(1): 63-82.
- [9] 刘洁, 王轩, 龚科, 等. 基于 ADC 噪声分布的亚皮秒级时

(下转第 85 页)

对系统的测量结果分析,该系统充分利用了虚拟仪器的特点,操作便捷,自动化程度高,能够大幅缩短测试时长,在测试系统开发和多测试设备集成控制方面具有较强应用价值。

#### 参考文献

- [1] 邵晖.音频测试,更快更准[J].国外电子测量技术,2016,35(1):17-20.
- [2] KANG J , SHE F , JIE P , et al . Audio testing technology research[C]//IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments.IEEE , 2011 , 3 : 24–28 .
- [3] LAI H M , TSENG C C , YEH S T , et al . The design of LabVIEW-based audio and speech testing system[C]//2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics – Taiwan (ICCE-TW).IEEE , 2019 : 1–2 .
- [4] Yu Yanling , Wei Tianyu , Zhao Zhiwei , et al . DDS-based analog IC test system for audio ICs [C]//2021 4th International Conference on Circuits , Systems and Simulation(ICCSS).IEEE , 2021 : 118–122 .
- [5] 张震邦,汪小名,吴伟斌,等.应用LabVIEW开发的车载音响性能检测系统[J].实验室研究与探索,2020,39(4):102-106.
- [6] 俞宙,李静,魏亚峰,等.基于虚拟仪器的高速混合信号自动测试系统设计[J].仪器仪表学报,2016,37(S1):94-101.
- [7] DU P , LI H . Design of an integrated control system for multiple test instruments based on LabVIEW[C]//2020 13th International Congress on Image and Signal Processing, Bio-Medical Engineering and Informatics (CISP-BMEI).IEEE , 2020 : 904–908 .
- [8] 董琳,叶建芳,张志强.基于虚拟仪器技术的高频功率放

大器分析仪[J].实验室研究与探索,2019,38(3):72-76.

- [9] 洪胜和,林志贤,郭太良.基于OSD交互的液晶显示器光学测试系统设计[J].电视技术,2017,41(4):268-273.
- [10] 岳晓庚,任红伟,周宾,等.基于声学技术的矿井风速测量仪器设计[J].仪表技术与传感器,2020(5):42-47.
- [11] 毛瑞石,王相生.基于LabVIEW和DLL技术的USB测试仪软件在鱼雷上的应用[J].鱼雷技术,2016,24(2):141-144.
- [12] CHEN B , JIAO L , GAO D , et al . Runway icing prediction method and system development based on activex controls[J]. IEEE Access , 2019 , 7 : 153605–153617 .
- [13] CUI X , WANG S , MA N , et al . A universal structure model for switches and its application to automatic test system[C]// 2016 IEEE Autotestcon.IEEE , 2016 : 1–5 .
- [14] Chen Bei , Cao Wenlun , He Yuyao , et al . Monitoring system implement of marine electric – powered driven [ C ] // 2019 IEEE 10th Annual Information Technology , Electronics and Mobile Communication Conference(IEMCON).IEEE , 2019 : 798–801 .
- [15] 罗钦文,刘桂雄.基于LabVIEW的电线电缆检测数据集成系统开发[J].中国测试,2018,44(5):93-96.

(收稿日期:2021-12-12)

#### 作者简介:

卢毅(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:嵌入式系统与自动化。

徐胜(1974-),通信作者,男,博士,副研究员,主要研究方向:嵌入式系统,E-mail:xusheng06090@163.com。

林志贤(1975-),男,博士,教授,主要研究方向:嵌入式系统。



扫码下载电子文档

(上接第80页)

- 钟抖动测试方法[J].微电子学与计算机,2020,37(3):71-75,82.
- [10] 刘琨,李铁虎,张俊安.高速宽带锁相环的相位噪声影响研究[J].微电子学,2019,49(4):467-470,476.
- [11] 王威,卢翔宇,张秋云,等.基于FPGA的便携式多路高精度采集系统设计[J].电子技术应用,2019,45(9):53-59.
- [12] 肖猛,赵浩,冯浩,等.不同分辨率下增量式光栅编码器测量误差研究[J].计量学报,2021,42(8):1047-1052.
- [13] 易志强,韩宾,江虹,等.基于FPGA的多通道同步实时高速数据采集系统设计[J].电子技术应用,2019,45(6):70-74.

- [14] SOUSA J , THOMAS A , WAGNER C , et al . Signalkonditionierung leicht gemacht[J]. Elektronik Industrie , 2018 , 49 (1) : 56–59 .

- [15] 卢翔宇,尹熹伟,史皓羽,等.旋翼桨叶表面非定常载荷测量风洞试验技术[J].兵工自动化,2022,41(2):48-56.

(收稿日期:2021-12-24)

#### 作者简介:

卢翔宇(1980-),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向:低速风洞测量与控制。

陈正武(1981-),男,硕士研究生,副研究员,主要研究方向:气动声学。

刘雄(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向:嵌入式技术、无线电通信。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所