

# 航空发动机数字式电子控制器综合测控系统设计

黄祺晟, 杨纪明, 周章文, 孙四海

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

**摘要** 针对某型发动机数字式电子控制器在外场维修保障中面临的现实问题,在充分研究该型电子控制器信号特点并对一线维修人员实际需求进行广泛调研的基础上,设计了一型综合测控系统。通过采用全数字化设计、改进 DDS 技术的信号调理电路、运用虚拟仪器技术等手段,实现了高精度测控系统的小型化、模块化及自动化。测试表明,系统能够实现对原系统的上位替换,且操作简便、携行能力强、精度高,其中电压参数及时间参数的测量精度分别可达 $\pm 0.01\text{ V}$ 、 $\pm 10\text{ ms}$ ,传感器信号的模拟精度则分别能达到 $\pm 0.2\text{ Hz}$ 、 $\pm 0.01\text{ V}$ 与 $\pm 0.01\ \Omega$ ,同时该系统也能为后期智能化检测提供硬件支撑。

**关键词** 测控系统;传感器信号模拟;航空发动机数字式电子控制器;DDS;虚拟仪器

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.04.004

**中图分类号** V233.7 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)04-0023-06

## A Design of Comprehensive Measurement and Control System for Digital Electronic Engine Controller

HUANG Qisheng, YANG Jiming, ZHOU Zhangwen, SUN Sihai

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract** Aimed at the problems that it remains to solve the practical problems in the field maintenance at a certain type of digital electronic engine controller, a comprehensive measurement and control system is designed on the basis of fully studying in the signal characteristics of the DEEC and conducting extensive investigation on the actual needs of the front-line maintenance personnel. The measurement and control system output and acquisition accuracy are ensured to realize the miniaturization, modularization and automation of the system by adopting full digital design, the modifying signal processing circuits of DDS technology, the virtual instrument technology and other means. The test shows that the system is simple and convenient in operation, excellent in loading ability, and high in precision, realizing to take the place of the original measurement and control system. In fact, the measurement precision of the voltage and time can be up to  $\pm 0.01\text{ V}$  and  $\pm 10\text{ ms}$ , the accuracy of the sensor signal simulation can be also up to  $\pm 0.2\text{ Hz}$ ,  $\pm 0.01\text{ V}$  and  $\pm 0.01\ \Omega$ . Moreover, the system can also become a good hardware platform for studying the intelligent testing technology.

**Key words** measurement and control system; sensor signal simulation; digital electronic engine controller; DDS; Virtual instrument

**收稿日期:** 2020-01-06

**作者简介:** 黄祺晟(1995—),男,福建南安人,硕士生,主要从事航空发动机检测与故障诊断研究。E-mail:hqs42@163.com

**引用格式:** 黄祺晟, 杨纪明, 周章文, 等. 航空发动机数字式电子控制器综合测控系统设计[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(4): 23-28. HUANG Qisheng, YANG Jiming, ZHOU Zhangwen, et al. A Design of Comprehensive Measurement and Control System for Digital Electronic Engine Controller[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(4): 23-28.

航空发动机,是一个集各种高新技术于一体的故障多发系统,具有结构复杂、工作环境恶劣、工作状态多变的特点<sup>[1]</sup>,因此控制系统在提高发动机性能及稳定性、减少总体费用等方面起着至关重要的作用<sup>[2]</sup>。为实现对发动机的控制,早期的发动机采用简单的液压机械开环控制系统,但随着发动机控制系统功能及控制变量的不断扩展,液压机械装置逐渐到达了极限。为解决发动机在最大状态下的控制问题,机械液压+模拟电子控制系统应运而生,为发动机在飞行包线内提供超温超转保护<sup>[3]</sup>。随着电子技术的发展,数字电子控制器的诞生标志着控制律的实现由硬件主导向软件主导的过渡,使得快速实现控制系统改进而无需修改硬件成为可能<sup>[4-5]</sup>。

某型航空发动机早期采用模拟式电子控制器,随着型号发展,后期升级为数字式电子控制器。根据反馈,原有综合测控系统已无法满足维修保障需求,且原系统存在体积重量大、系统升级困难、语言障碍等问题,极大影响了保障效率及转场能力。目前国内关于该型发动机电子控制器测控系统的相关研究较少,缺乏大修条件下的检测能力,系统集成度也不高<sup>[6-9]</sup>。

为解决上述问题,本文设计了某型综合测控系统。经实验室的测试与外场实机测试,该测控系统工作良好,且能实现对原系统功能的上位替代。

## 1 信号分析及综合测控系统组成

### 1.1 数字式电子控制器功能及其信号分析

该型发动机数字电子控制器的功能主要包括:

根据发动机及机上传感器信号调节和限制高低压转子转速及涡轮后燃气温度;发动机喘振检测、预防及消除;涡轮冷却控制;低压导叶调整;控制系统主备份切换;发动机加力控制;发动机振动值监控;空中自动起动控制;应急放油控制;发动机工作状态监控;发动机有寿件运行时间记录等。

为便于与测控系统建立联系,按方向及功能大致可将与控制器交联的信号进行如下分类:其中输入信号包括传感器信号、地面检查数字信号及开关量信号,输出信号则包括传感器激励信号、开关量信号、地面检查数字信号、占空比控制信号及经电子控制器处理后的传感器线性电压信号。

### 1.2 综合测控系统功能分析及组成

综合测控系统通过全面模拟发动机、机上相关传感器、电门及执行机构等产生的输入信号,离线模拟发动机的各种工作状态,并通过采集处理输出信号实现电子控制器的自动检测、校准及故障定位诊断。此外,系统还能为试车状态下的发动机提供在线参数记录及分析。

原测控系统为纯模拟器件搭建的柜式检测台,体积庞大且检测流程由人工实现,效率较低。新系统则全面采用数字化设计,将测控系统缩小至手提箱大小,具备了快速转移、部署的能力,并实现了常规检测项目的自动化。

系统由综合测控箱、数控电阻箱、数据采集卡、装有测控软件的上位机平台及数控电源(或由机载电源供电)组成。测控系统的组成及信号交联关系见图1。

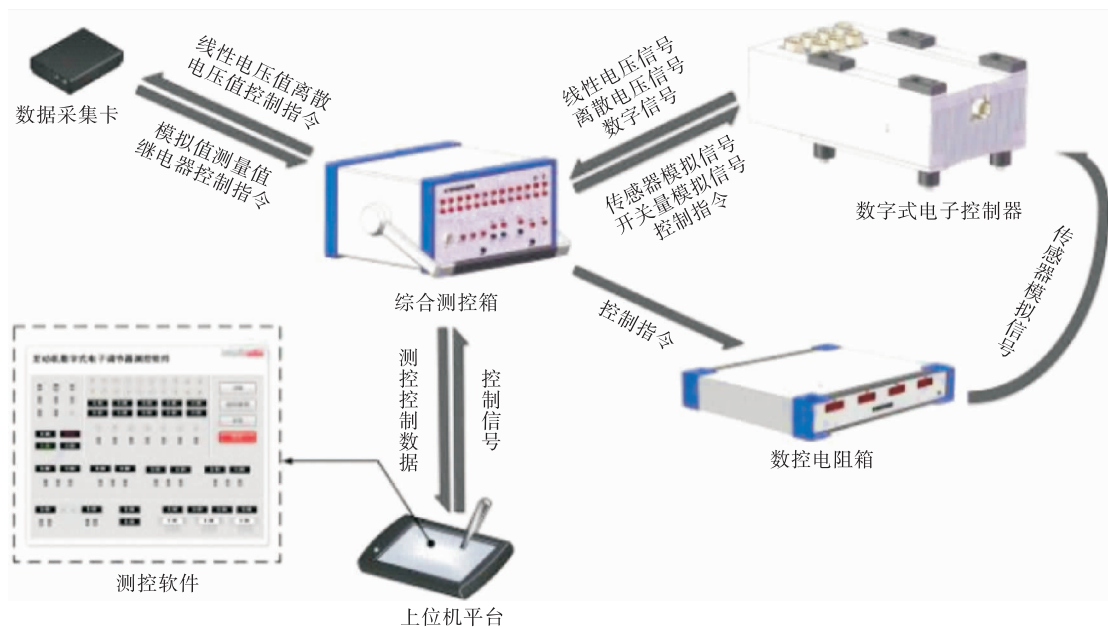


图1 综合测控系统组成

综合测控箱为测控系统的核心,其功能包括解析测控软件指令,模拟及回采开关量信号,故障模拟,传感器信号模拟,数据转发等。

数控电阻箱的功能是模拟热电阻阻值,为数字电子控制器提供发动机进口温度、滑油温度及燃油温度传感器的输入。

系统采用阿尔泰公司的 USB3121 型数据采集卡作为模拟量采集,该型数据采集卡提供了对应的 API 接口,可根据需要自行编写测控软件。

上位机平台为安装测控软件的计算机,可在满足测控软件运行最低要求的前提下根据实际需要进行更换。

测控软件基于 NI 公司的 LabVIEW 2017 平台

开发,并配合 Access 数据库,共同实现对测控系统的控制及数据存储。

## 2 系统硬件设计

系统硬件采用模块化设计,根据功能分为传感器信号发生、线性电压采集、指示灯信号采集、电源、开关量信号模拟及回采、通信等多个模块。

### 2.1 传感器信号发生模块

根据传感器的工作原理,综合检测系统需要模拟 3 种不同类型的传感器信号,包括频率信号、电压信号以及电阻信号,其中电压信号又细分为激励型和非激励型信号。模块的工作原理见图 2。

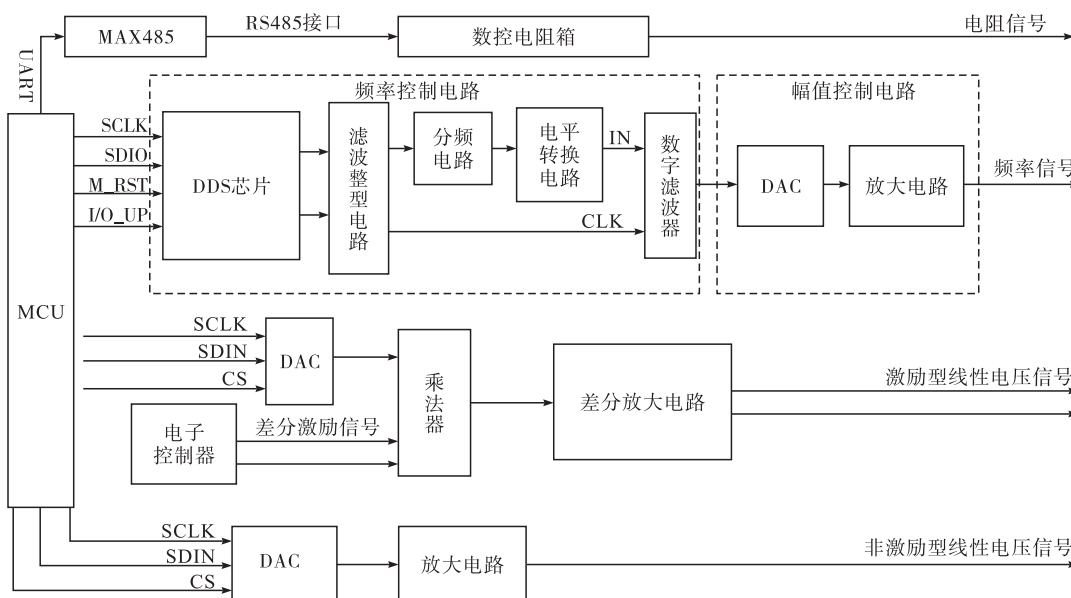


图 2 传感器信号发生模块工作原理

以频率信号为例,系统采用直接数字频率合成(DDS)技术产生幅值、频率可调信号。相较于模拟技术,具有频率分辨率高、频率转换速度快、相位变化连续、波形输出灵活、相位噪声和漂移低、使用灵活方便等众多优势<sup>[10-11]</sup>。常规 DDS 技术主要有 2 种实现方式,一是基于 FPGA 的方式,通过 DAC 将 FPGA 产生的数字量转换成对应的波形输出,经低通滤波器平滑处理后得到相应波形<sup>[12]</sup>。该方式的优点是通过对波形 ROM 数据来产生任意波形信号<sup>[13-14]</sup>,缺点是为确保信号的精度,技术难度较大<sup>[15]</sup>;二是通过 MCU 或 FPGA 控制专用 DDS 芯片产生频率信号,再经低通滤波器及高频运算放大器<sup>[16]</sup>后得到对应的频率信号,该方式的优势是电路结构紧凑、频率稳定、通用性高且整体功耗低<sup>[17-18]</sup>,但是输出波形灵活性不如前者。

综合各项因素,本测控系统以 AD9959 专用

DDS 芯片为基础,通过改进信号调理电路处理方法,得到高精度频率信号。

以喘振信号发生电路为例(见图 3),信号发生分为频率发生和幅值调节 2 个步骤。以 10 位振幅精度 AD9959 芯片为核心的频率发生电路根据主控芯片指令产生频率可变的正弦电流信号,该信号经滤波放大后,由电压比较器整形为同频率方波信号。此方波信号一路经二级分频器分频后,作为数字低通滤波芯片的基频信号,另一路未经分频的方波信号则作为芯片的时钟信号,输出幅值固定、频率可调的标准正弦输出信号。

在幅值控制电路中,频率发生电路的输出信号作为 16 位高精度 DAC 的参考电压,DAC 在主控芯片的控制下产生与参考电压成正比的输出电压,即为幅值、频率均可调的标准正弦频率信号,且幅值分辨率远高于原芯片。

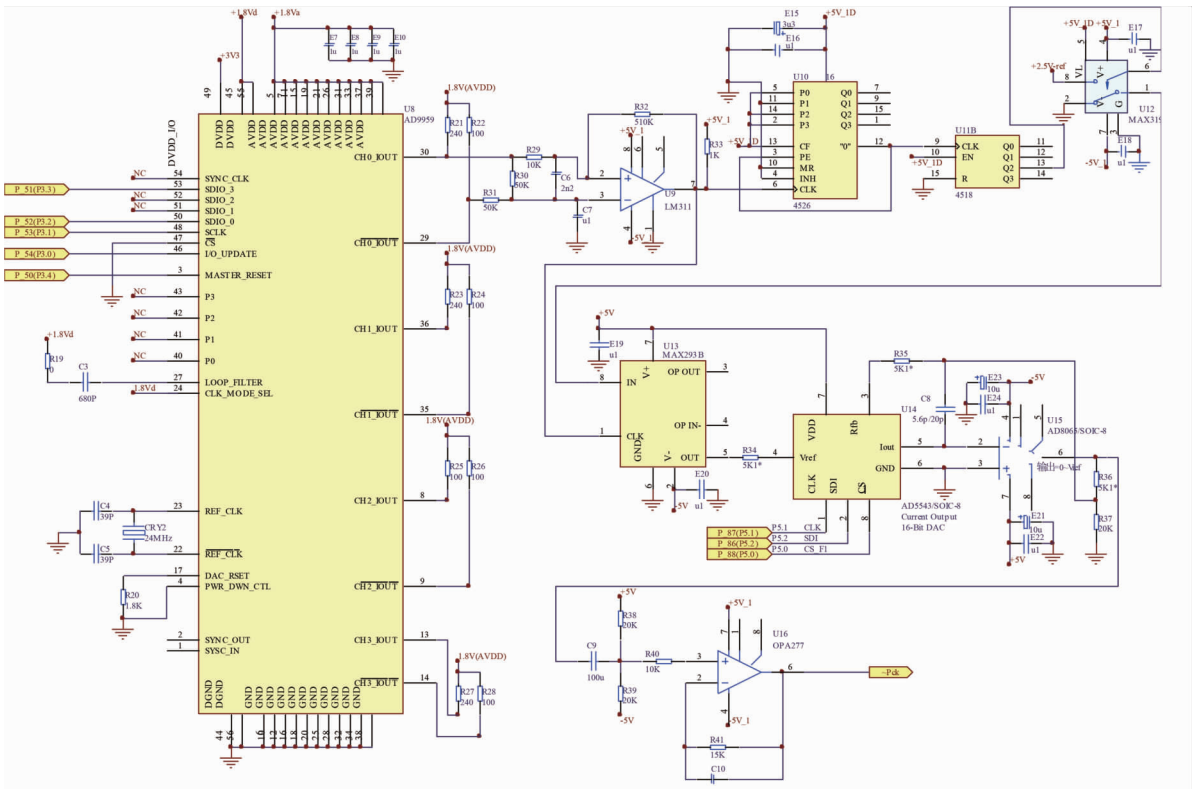


图3 喘振信号发生电路原理图

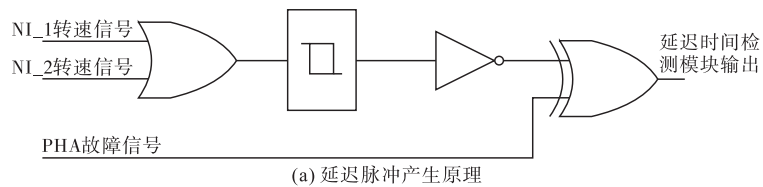
### 2.2 延迟时间检测模块

该模块用于检测电子调节器从故障发生至故障警告信号/控制信号产生之间的延迟时间。

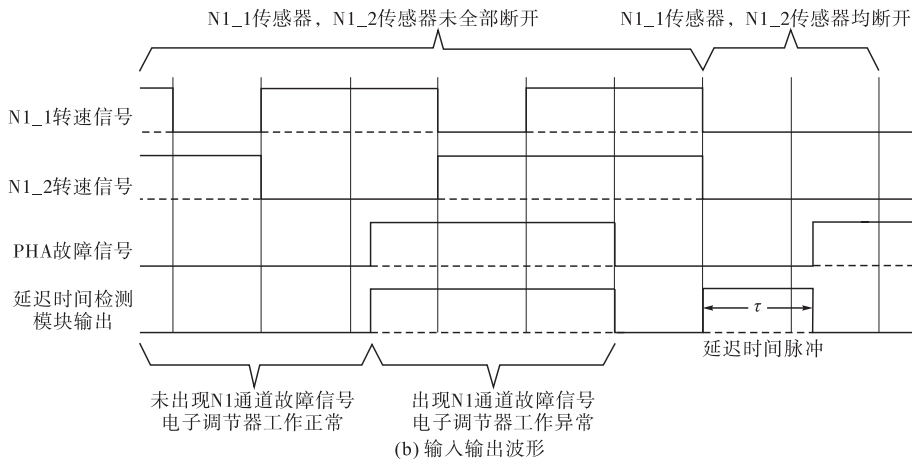
此模块利用 CPLD 高速响应的特点,将延迟时间转换为脉冲电平,由数据采集卡采样并计算得到延迟时间。

以 N1 通道故障信号延迟时间为例,延迟脉冲产生的原理见图 4。2 路 N1 转速传感器的继电器控制信号(高电平为接通)通过或门及反相施密特触发器后,再与 N1 通道故障信号通过异或门输出。当 N1

传感器信号未全部出现问题时,反相施密特触发器的输出为低电平,若在此时出现了 N1 通道故障信号,则 CPLD 的输出为高电平,即数字控制器存在故障;当传感器均断开后,反相施密特触发器后的电平跳变为高电平,此时 N1 通道故障信号尚未产生,在异或门的作用下,CPLD 的输出同时跳变为高电平,在电子控制器发出 N1 通道故障信号后,CPLD 的输出跳变为低电平,此脉冲电平的宽度即代表了由 N1 通道故障到其故障信号产生之间的延迟时间。



(a) 延迟脉冲产生原理



(b) 输入输出波形

图4 N1 通道故障信号延迟时间检测电路工作原理



### 2.3 信号采集、开关量模拟及回采模块

本模块的原理如图 5 所示。

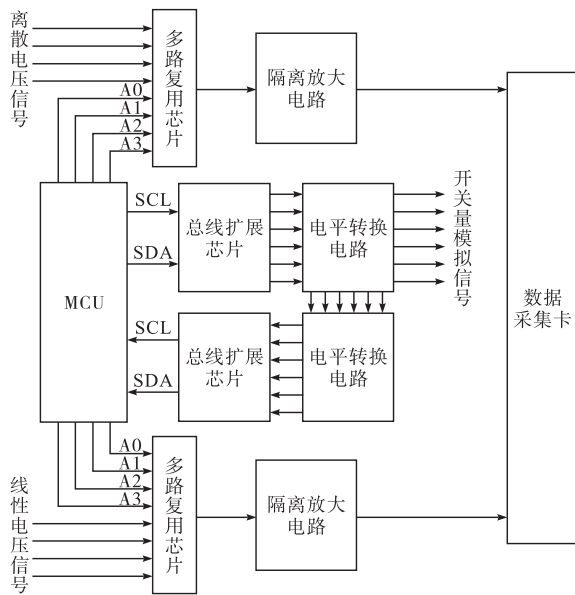


图 5 信号采集及开关量模块原理

为解决采集卡通道数不足的问题,对实时性要求不高的离散及线性电压,经多路复用芯片后,与主控芯片配合共同实现分时采集。

同理,开关量信号模拟及回采也借由总线扩展芯片实现。

### 3 测控软件设计

测控软件基于 LabVIEW 2017 平台及 Access 数据库进行开发。软件共有 2 级界面,一级界面通过软件的形式还原了旧检测台操作面板,即维修人员可通过人工方式完成相应的检测,见图 6。

二级界面包括地面检查及波形显示 2 个子界面。在该界面下,用户能够实现电子控制器的自动检测及故障诊断、传感器校准、有寿件履历查询、信号波形查看等。

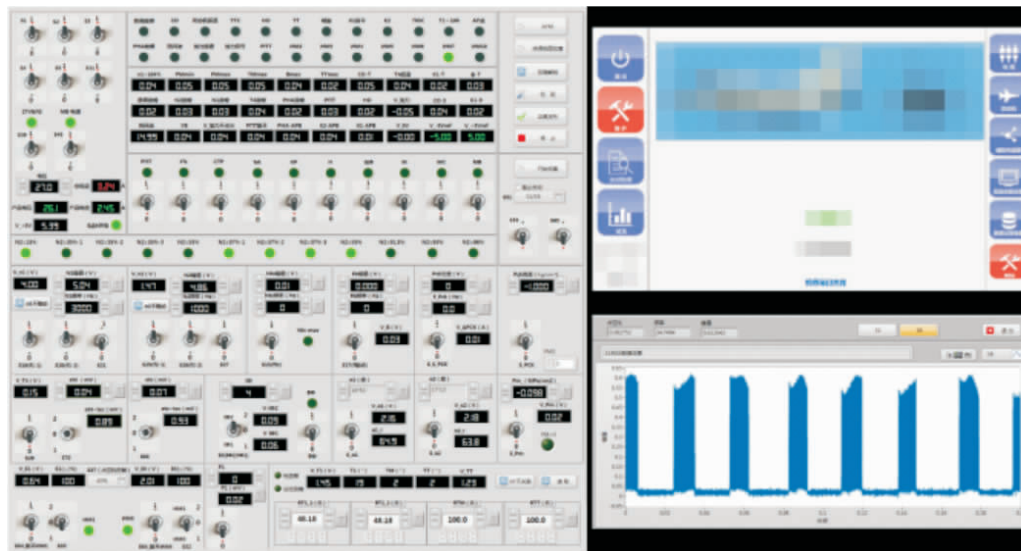


图 6 测控软件用户界面

### 4 系统测试

测控系统的测试主要分两阶段进行。第 1 阶段主要测试系统软硬件的基本功能,并对各模块信号进行采集、观察和校准。第 2 阶段主要验证测控系统与电子控制器的联合工作情况及系统精度测试。因系统涉及信号较多,下面仅以 N1 通道精度测试为例。将测控系统与状态良好的发动机电子控制器连接,手动调整模拟传感器信号参数,并借助高精度测量仪器测量电子控制器在该信号激励下产生的对应线性电压信号有效值,同时将测量值与维护手册

中对应的标准线性电压输出值进行比较,间接获得测控系统的控制精度。通过高精度测量仪器的测量值与测控系统的测量值进行对比,获得测控系统的测量精度,其中 N1 通道测试结果见表 1,传感器模拟信号输出波形见图 7。

表 1 N1 通道电压测量值

| N1 频率/Hz | V_N1 标准电压值/V | 精密仪器测量值/V | 测控系统测量值/V | 测控系统误差值/V |
|----------|--------------|-----------|-----------|-----------|
| 596.0    | 1.000        | 1.001     | 1.001     | 0.000     |
| 1 490.0  | 2.500        | 2.501     | 2.499     | 0.002     |
| 2 980.0  | 5.000        | 5.002     | 5.004     | 0.002     |

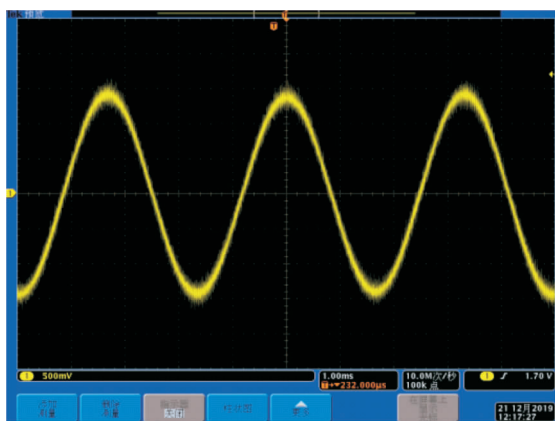


图7 N1转速传感器模拟信号输出波形

由测试结果可以得出,测控系统工作良好,测控精度较高,满足相关的测试要求,能够实现对原系统的上位替代。

## 5 结语

本文针对某型发动机数字式电子调节器设计了一型综合测控系统。该系统可应用于发动机的外场检测及大修检测,相较于原系统,具有便携、精度高、集成度及自动化程度高、使用门槛低等特点,降低了相关维护人员的培训难度,提高了维护效率。目前该系统已用于某型航空发动机大修维护中,经实际检验,该系统能很好地满足发动机电子调节器的维护需要。此外,作为全数字化测控系统,该系统也可为后期发动机智能测控系统研制提供试验平台。

## 参考文献

- [1] 张冬冬. 航空发动机健康管理系统快速原型方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [2] CULLEY D, THOMAS R, SAUS J. Concepts for Distributed Engine Control[C]//43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cincinnati, OH; AIAA, 2007: 5709.
- [3] 孙志岩. 航空发动机控制系统发展概述[J]. 测控技术, 2019,38(6):1-4.
- [4] REDIESS H A. Flight Dynamics and Control: From the Douglas Skyrocket to the Space Shuttle[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 35(3): 721-731.
- [5] CULLEY D. Transition in Gas Turbine Control System Architecture: Modular, Distributed, and Embed-

- ded [C]//ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. Glasgow, UK: ASME, 2010: 287-297.
- [6] 张生良,谢寿生. 某涡扇发动机电子综合调节器综合测试系统[J]. 推进技术,2003(2):190-192.
- [7] 刘艳梅,陶焘,李喜发,等. 虚拟仪器技术在综合调节器检测系统中的应用[J]. 测控技术,2010,29(5):82-85.
- [8] 邱智,骆彬,王玉峰,等. 发动机电子调节器防消喘通道检测系统[J]. 计测技术,2012,32(2):18-20.
- [9] 宋建华,王正,朱兴动,等. 航空发动机综合调节器检测系统的设计[J]. 测控技术,2014,33(12):50-53.
- [10] 苟力. 基于FPGA的高速DDS关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2016.
- [11] LI G, CAI D. Design of Digital Transceiver Unit Based on Multi-Channel Signal Synthesis and New Filter Combination[C] //2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Chongqing, China; IEEE, 2017: 485-488.
- [12] CARDOSO R O R, RIBEIRO J A J, SILVEIRA M. Direct Digital Synthesizer Using FPGA[C]//Proceedings of the Global Congress on Engineering and Technology Education (GCETE 05). São Paulo, Brazil: GCETC, 2005: 290-293.
- [13] 张新,吴风云,王帆. 基于FPGA与谐波合成信号发生器的实现[J]. 现代电子技术,2018,41(2):174-178.
- [14] REDDY B R, RAJU V, KUMAR CA. Development of FPGA for Custom Waveform Generator Based on Direct Digital Synthesizer[J]. International Journal of Engineering Research and Applications, 2013, 3(4): 2597-2602.
- [15] 韩潇,曾立,占丰,等. 基于分段多项式近似的DDFS研究及FPGA实现[J]. 电子技术应用,2018,44(3): 22-25.
- [16] RYBUSHKIN A Y, FOMIN Y N, ZHMUD V A, et al. High-Precision Frequency Synthesizer for Geophysical and Biotechnical Measurements Using Laser Meter [J] Journal of Physics Conference Series, 2019, 1333: 062030.
- [17] 宋征,许国宏,李星. 基于AD9959的高精度多通道雷达信号源设计[J]. 电子设计工程,2012,20(17): 95-97.
- [18] MURPHY E, SLATTERY C. Direct Digital Synthesis (DDS) Controls Waveforms in Test, Measurement, and Communications [J]. Analog Dialogue, 2005, 39(3): 12-15.

(编辑:姚树峰)