

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.05.009

发动机电控单元线束传导虚拟注入方法

武子栋, 魏民祥

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京 210016)

摘要: 电磁脉冲(Electromagnetic pulses, EMPs)耦合进入发动机电控单元(Electronic control unit, ECU)的主要方式是通过线束传导, 大电流注入(Bulk current injection, BCI)是控制器敏感度测试的标准试验方法。为了在设计阶段对电控单元的电磁脉冲防护设计进行优化, 提出了基于线束传导规律的虚拟注入方法。该方法由基于一维卷积神经网络(Convolutional neural network, CNN)的线束传导预测模型及仿真电路实现, 线束传导预测模型基于一维卷积神经网络, 训练模型所用数据集为 BCI 试验采集的注入电流信号与调理电路输入端口响应信号, 仿真电路在软件 Multisim 中建立。选择注入电流信号输入至预测模型, 得到端口的预测信号, 将该信号“注入”到仿真电路输入端口, 通过监测仿真电路输出端口信号分析发动机电控系统是否发生电磁敏感现象。结果表明, 预测信号与实际测量信号的误差不超过 5.8%, 虚拟注入结果与 BCI 试验结果一致, 并与试验中观测的敏感现象吻合。该方法可以在设计阶段快速分析电控单元各模块的电磁敏感度, 为电控单元的电磁脉冲防护设计提供参考依据。

关键词: 发动机; 电控单元; 电磁脉冲; 大电流注入; 一维卷积神经网络

中图分类号: U464

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2025)05-0880-09

Virtual Injection Method Conducted by Engine Electronic Control Unit Wiring Harness

WU Zidong, WEI Minxiang

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Electromagnetic pulses (EMPs) primarily couple into an engine electronic control unit (ECU) through harness conduction. Bulk current injection (BCI) is the standard method for assessing controller sensitivity. To optimize EMP protection design for the ECU during the design phase, a virtual injection method based on harness conduction characteristics is proposed. This method uses a harness conduction prediction model based on a 1D convolutional neural network (CNN) and a simulation circuit built in Multisim. Injection current signals from BCI experiments serve as input to the model, generating predicted port signals, which are then injected into the simulation circuit. By monitoring the circuit's output, the electromagnetic susceptibility of the engine electronic control system is analyzed. The predicted signals have an error margin of less than 5.8% compared to actual measurements. The virtual injection results match the BCI test outcomes and observed sensitivities. The method can provide a rapid analysis method for ECU module susceptibility during the design phase and aid EMP protection design.

Key words: engine; electronic control unit (ECU); electromagnetic pulse; bulk current injection (BCI); 1D convolutional neural network

基金项目: 发动机数控系统强脉冲效应分析与防护设计技术(1002-ACA24001)。

收稿日期: 2024-08-05; **修订日期:** 2025-05-30

通信作者: 魏民祥, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: wmxnuaa@126.com。

引用格式: 武子栋, 魏民祥. 发动机电控单元线束传导虚拟注入方法[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(5): 880-888. WU Zidong, WEI Minxiang. Virtual injection method conducted by engine electronic control unit wiring harness[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2025, 57(5): 880-888.

近年来,二冲程航空煤油活塞发动机在小型无人飞行器领域得到了广泛应用^[1]。相较于传统的应用对象与应用环境,当活塞发动机被应用到飞行器上时,其面临的电磁环境更加复杂。由于半导体技术、微电子技术以及计算机技术的飞速发展,发动机的控制方式已发生重大转变,无论是民用发动机还是军用发动机均采用数字电子控制方式^[2]。随着发动机控制器的集成度与复杂度的增加,电控单元设计更多选用体积小、集成度高的电子元件,这类电子元件的干扰和损伤阈值较低,因此发动机控制系统抵御电磁脉冲(Electromagnetic pulses, EMPs)干扰的能力也不断降低。外部电磁脉冲通过传导与辐射的方式耦合进入电子控制系统内部,会造成数据传输错误或丢失、控制逻辑混乱等现象,甚至会损坏控制器硬件,对发动机工作的安全性与稳定性造成巨大威胁^[3-4]。电控单元是发动机控制系统的核心,它通过线束接收传感器采集的信号,并依据发动机的运行参数对喷油、点火等执行机构发出指令。因此,对发动机电控单元(Electronic control unit, ECU)在电磁脉冲干扰下的电磁敏感度展开研究具有重要价值。

针对小型无人飞行器在局部冲突战场受到雷达、微波武器等脉冲源产生的强电磁脉冲干扰使得发动机控制系统处于极其恶劣的电磁环境这一状况^[5],国内外部分学者对发动机控制系统强电磁脉冲干扰耦合机理、防护设计开展了相关研究。Lubkowski等^[6]基于窄带高功率电磁脉冲(High-power electromagnetic, HPEM)对无人机传感器的电磁敏感性进行了评估,结果表明HPEM对无人机控制信号产生干扰,造成无人机电机转速突变、机身抖动,进而影响到加速度计和陀螺仪的传感器读数。Pywell^[7]基于电磁脉冲对军用飞机的影响进行了分析,指出为了验证全机的电磁兼容性,需要产生高功率电磁脉冲的大型设备,导致试验成本高、耗时长且重复性差。因此有必要开发一些特定的测试手段进行验证。Yang等^[8]通过仿真和试验研究了高空核电磁脉冲(High-altitude electromagnetic pulse, HEMP)对发动机电控系统的影响,发现HEMP造成了控制信号混乱,但并未对发动机造成永久性硬件损坏。Zhou等^[9]研究了HEMP对发动机转速采集系统的干扰机理,分析了终端负载对干扰信号的影响。结果表明,干扰信号会被转速采集系统采集,影响了发动机的正常运行。李庆颖^[10]建立了航空发动机机载设备电磁脉冲耦合模型,仿真分析后发现电磁脉冲的主要耦合途径为天线、线缆和孔缝,并针对机载设备电磁脉冲的耦合

途径提出了有效的防护方法,对防护效能进行了仿真计算。吴元新^[11]对某型无人机机舱及内部线缆进行建模,利用CST全波仿真软件,研究了强电磁脉冲环境下不同线缆类型的终端感应电压,结果表明,感应电压值足以对设备的正常工作产生影响甚至直接将设备损坏。目前,研究者针对发动机电控单元电磁敏感度的研究主要是通过试验方法展开,确定电控单元的敏感度后才能进行针对性的防护设计,试验方法不具有推广性,对不同模块需要不同的试验方案。另外,试验方法无法在设计阶段进行,为了验证防护设计的有效性,往往需要多次试验,导致试验成本较高。

本文以无人机发动机电控单元为研究对象,提出了一种能在设计阶段分析电控单元电磁敏感度的虚拟注入方法,弥补了单一试验方法的局限,其可以在设计阶段快速分析电控单元各模块电磁敏感度,为在设计阶段优化电控单元的电磁脉冲防护提供参考依据。

1 发动机电控单元大电流注入试验

1.1 试验系统

发动机电控单元由多个功能模块组成,如转速模块、温度模块、压力模块和电源模块等。本文选取转速模块为对象,首先,通过大电流注入(Bulk current injection, BCI)试验方法对其电磁敏感度展开研究。BCI试验系统由信号发生器、电流注入探头、电压监测探头、示波器、直流电源、转速传感器、线束以及控制器等组成,主要试验设备及其参数如表1所示。

表 1 BCI试验系统主要设备清单
Table 1 List of BCI test equipments

设备名称	参数
信号发生器	R&S TS 9982
电流注入探头	PRANA DR-250
电压监测探头	TYPE 9123
示波器	Tektronix DRO 4104B
直流电源/V	+12
转速传感器	CV-CD-010

图1为BCI试验现场示意图。图2为BCI试验系统示意图。由图2可知,电流注入探头与电压监测探头置于电控单元与传感器的连接线束上,电流注入探头与电压监测探头分别与脉冲源和示波器连接,试验中电流注入探头放置于距电控单元0.10 m,电压监测探头放置于距电控单元0.05 m的位置。通过上位机软件与电控单元通信,实时采集转速数值并记录。

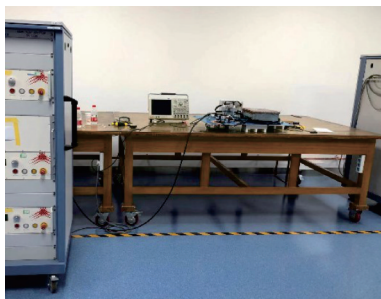


图1 BCI试验图

Fig.1 Photograph of the BCI test site

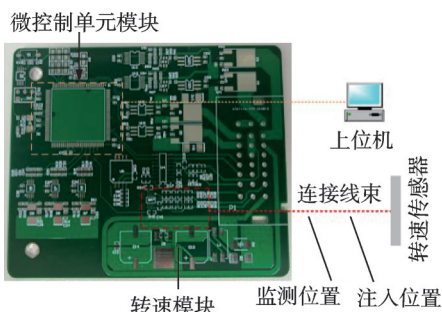


图2 BCI试验系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of BCI test

BCI测试试验流程如图3所示。选择阻尼正弦电流脉冲信号作为注入信号,频率范围设置为10~100 MHz,改变脉冲源的信号幅值、频率和阻尼系数得到不同的注入信号,试验中通过上位机界面观测控制系统是否发生电磁敏感现象,并通过电压监测探头记录不同注入信号下转速模块调理电路输入端口的信号。

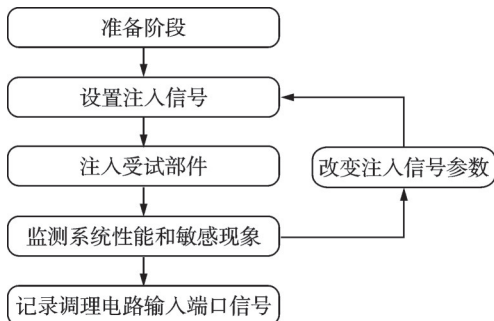


图3 BCI试验流程图

Fig.3 Schematic diagram of BCI test procedure

1.2 结果分析

选取6个主要频率点进行测试,分别为10 kHz, 100 kHz, 1 MHz, 10 MHz, 30 MHz, 100 MHz, 监测不同频率的脉冲干扰信号注入到电流探头后转速模块调理电路输入端口的信号。不同频点的脉冲电流对电控单元的电磁干扰不同。图4为注入电流信号频率为100 MHz时,转速模块调理电路监测结果,其中注入电流信号用虚线标注,调理电路输入端口信号用实线标注。

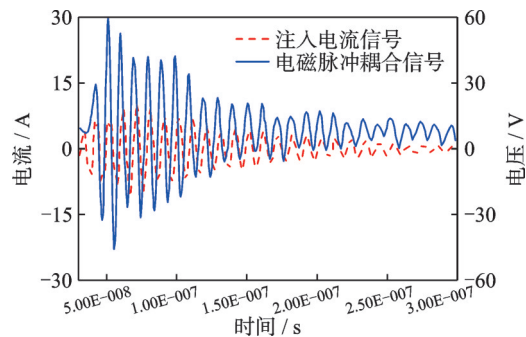


图4 调理电路输入端口监测信号

Fig.4 Monitoring signal of conditioning circuit input port

试验中所用传感器为磁电式转速传感器,在正常工作条件下,传感器输出至调理电路端口的信号为类正弦信号。由图4可见,试验中监测到的信号发生畸变,这是由注入电流信号在线束上产生的响应信号与正常转速传感器信号产生耦合后形成的电磁脉冲耦合信号。对电磁脉冲耦合信号进行分离,将正常转速传感器信号分离后得到调理电路输入端口响应电压信号,拟合处理后如图5所示。

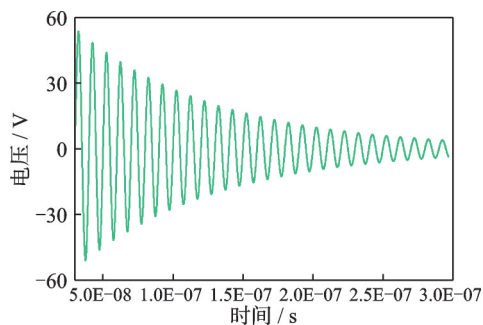


图5 调理电路输入端口响应信号

Fig.5 Response signal of conditioning circuit input port

调理电路输入端口响应电压信号从波形上同样表现出阻尼正弦信号的特征,且频率与图4中注入电流信号频率相同。通过数据拟合在时域上建立注入电流信号与电路输入端口响应电压信号的函数模型,即

$$I(t) = A_1 \sin(2\pi f_1 t) \cdot e^{-B_1 t} \quad (1)$$

$$V(t) = A_2 \sin(2\pi f_2 t) \cdot e^{-B_2 t} \quad (2)$$

式中: A_1 为注入电流幅值系数; B_1 为注入电流衰减系数; f_1 为注入电流信号频率; A_2 为响应电压幅值系数; B_2 为响应电压衰减系数; f_2 为响应电压信号频率。

通过式(1,2)可知注入电流信号与端口响应电压信号由幅值系数、衰减系数和信号频率3个参数决定。表2为部分注入电流信号参数与端口响应信号参数对应关系,表2中试验数据表明端口响应电压信号与注入电流信号的选取有关。

表 2 注入电流信号参数与端口响应电压信号参数
Table 2 Parameters of injected current signal and re-
sponse voltage signal

注入电流信号			端口响应电压信号		
频率/ kHz	幅值/V	衰减 系数	频率/ kHz	幅值/V	衰减 系数
10	9.8	2.2×10^3	10	0.89	3.1×10^3
100	4.4	2.1×10^4	100	0.96	2.2×10^4
1 000	7.6	2.2×10^5	1 000	1.60	3.1×10^5
10 000	4.8	2.4×10^6	10 000	6.80	3.1×10^6
30 000	6.2	9.5×10^6	30 000	12.00	6×10^6
100 000	10.0	1.2×10^7	100 000	53.40	1×10^7

图 6 为注入电流信号与端口响应电压信号的关系。转速模块调理电路对不同注入电流信号的响应能力不同,在主要耦合频点上,电磁能量更易耦合进入转速模块调理电路,使得端口响应电压信号的幅值系数更大。上述结果表明,注入电流信号与端口响应电压信号之间存在一定的传递关系,这种传递关系可理解为发动机控制系统连接线束的传导规律。基于 BCI 试验数据建立线束传导预测模型,模型根据注入电流信号对端口响应电压信号进行预测,能有效应对 BCI 方法难以在较宽频域内测试的不足,同时有利于降低试验成本。

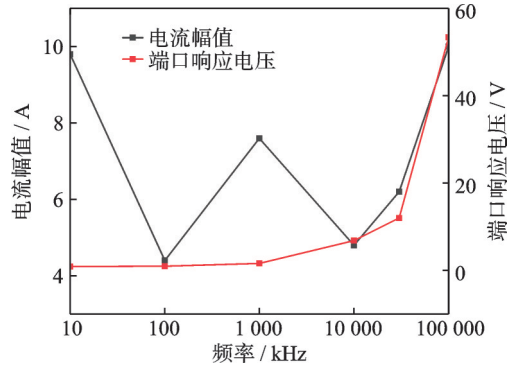


图 6 注入电流信号与端口响应电压信号关系
Fig.6 Relationship between injected current signal and port
response voltage signal

2 线束传导预测模型

2.1 一维卷积神经网络模型

根据第 1 节试验结果分析可知,BCI 试验中注入电流信号与端口响应电压信号之间存在一定传递关系,基于此可建立端口响应电压信号预测模型。阻尼正弦信号曲线由频率、幅值和衰减系数决定,只需确定注入电流信号和响应电压信号的 3 个系数便可以构建数据集进行模型训练,后续便可由任意的注入电流信号预测出端口响应电压信号。改变 BCI 试验中注入电流信号参数,得到了 180 组数据,180 组注入电流信号与 180 组端口响应电

压信号一一对应,将其制作为数据集,对数据进行归一化处理后输入至卷积神经网络(Convolutional neural network,CNN)中训练。

如图 7 所示,基于一维 CNN 的线束传导预测模型流程大体分为 4 个部分:

- (1)数据集构造。通过 BCI 试验,经处理后获取端口响应电压信号,提取注入信号和端口响应电压信号的频率、幅值和衰减系数作为数据集。
- (2)数据集划分。将数据集划分为训练集和测试集,其中训练集占总数据集的 80%。
- (3)模型训练。搭建一维卷积神经网络模型,使用训练集训练 1D CNN 模型。
- (4)模型验证。使用测试集对 1D CNN 模型进行验证。

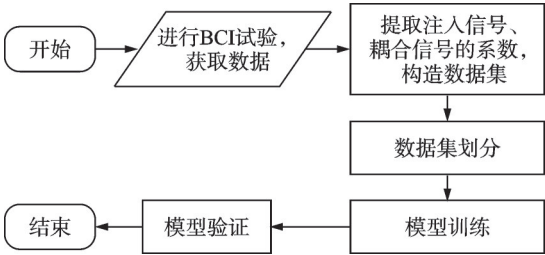


图 7 线束传导预测模型流程图
Fig.7 Flow chart of wire harness conduction prediction model

图 8 为提出的一维 CNN 模型结构图,包括输入层、卷积层、池化层、展开层、全连接层和输出层^[12-14]。注入电流信号经输入层后依次经过卷积层和池化层提取信号的特征信息,卷积层采用 ReLU 激活函数,池化层采用最大池化。之后经过展开层将二维特征矩阵展开为可输入到全连接层的一维向量,经全连接层后输出预测结果,输出层输出的结果为端口响应电压信号的频率、幅值与衰减系数。

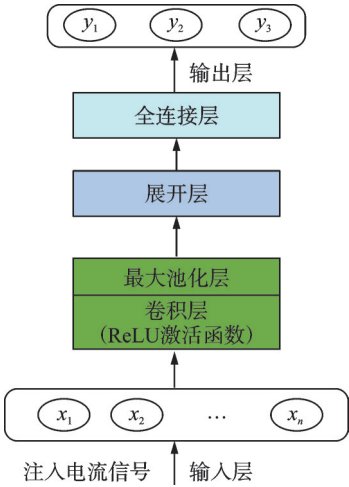


图 8 一维 CNN 结构图
Fig.8 1D CNN architecture

卷积层滤波器(即卷积核)使用 ReLU 作为激活函数,用于增加非线性,防止网络变为线性变换,尺寸为 3,个数为 6,步长设置为 1;最大池化层滤波器尺寸为 2,个数为 1,步长设置为 2。表 3 所示为 CNN 结构参数。

表 3 CNN 结构参数
Table 3 Structural parameters of CNN

层	核尺寸-个数	输出尺寸
输入层	—	600×1
卷积层	3-6	598×6
池化层	2-1	299×6
展开层	—	1 794×1
全连接层	—	300×1
全连接层	—	150×1
全连接层	—	75×1
输出层	—	2×1

2.2 预测模型验证

训练完成后得到调理电路输入端口响应电压信号预测模型。电控单元电磁敏感度 BCI 测试通过调节注入电流信号以实现不同的电磁脉冲干扰,而预测模型可直接根据注入电流信号预测调理电路输入端口响应电压信号,既克服了频繁改变注入电流的繁琐,又缩短了测试周期、节约了试验成本,同时弥补了 BCI 方法难以在较宽频域内测试的不足,具体预测方法如图 9 所示。根据测试需要的电磁干扰条件选定注入电流信号,将注入电流参数输入至一维 CNN 预测模型中,由预测模型输出响应电压信号的频率、幅值与衰减系数,从而得到了信号调理电路输入端口响应信号。

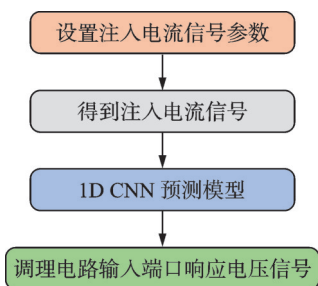


图 9 端口响应电压信号预测方法

Fig.9 Response signal prediction method

对训练完成的端口响应电压信号预测模型的性能进行评估,通过测试集验证其预测效果。当注入电流的频率为 100 MHz、幅值为 5 A 时转速模块调理电路输入端口的预测信号与测量信号如图 10 所示,红色曲线为试验测量信号,黑色曲线为预测信号。预测信号曲线与测量信号曲线在小部分窗口内存在误差,但两者的峰值和总体趋势具有较高的一致性。

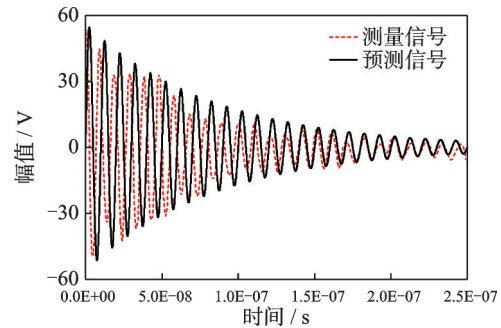


图 10 预测信号与测量信号对比图

Fig.10 Comparison of predicted and measured signals

对预测信号和测量信号的误差进行分析,其误差计算公式为

$$\text{error} = \left| \frac{V_P - V_M}{V_M} \right| \times 100\% \quad (3)$$

式中: V_P 为预测信号幅值, V_M 表示测量信号幅值。

对研究的 6 个频点上的预测信号与实际测量信号的误差进行分析,结果如表 4 所示。预测模型的性能与注入电流信号的频率存在非线性关系,在研究的频点上调理电路端口响应信号预测值与实际信号误差不超过 5.8%。

表 4 各频率的误差结果

Table 4 Error results of each frequency

频率/ kHz	误差/ %
10	3.7
100	1.3
1000	3.7
10 000	2.3
30 000	4.7
100 000	5.8

上述研究验证了端口响应电压信号预测模型的正确性,通过建立端口响应电压信号预测模型有效地获取了大电流注入下发动机线束上的传导规律,这是本文提出的电磁敏感度分析方法的关键。

3 发动机电控单元虚拟注入方法

3.1 虚拟注入方法

研究电控系统电磁敏感度的方法在总体上可以分为“场”和“路”两种方法。场方法基于麦克斯韦方程,进行几何建模并确定边界条件。场方法对于复杂系统建模难度很大,求解时间长,不适用于电控单元电磁敏感度的计算。因此,本文基于基尔霍夫定律采用对电控单元建立等效电路的“路”方法,由线束上传导规律来分析电控单元各模块的电磁敏感度,具体分析方法如图 11 所示。

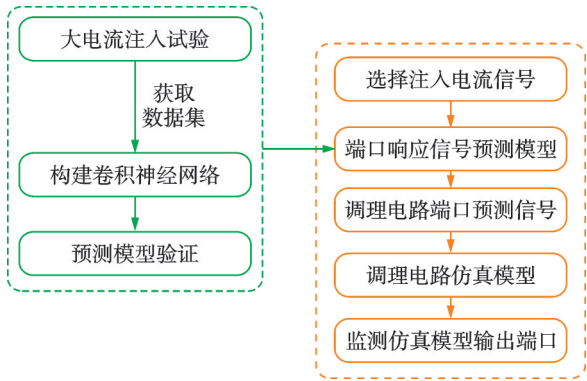


图 11 电磁敏感度分析方法框架图

Fig.11 Framework for electromagnetic sensitivity analysis method

图 11 中绿色框架内为本文第 1、2 节内容,基于 BCI 试验与卷积神经网络获取了电磁脉冲下调理电路输入端口响应电压信号的预测模型。图 11 中橘色框架内为虚拟注入方法的实现流程。首先根据测试需求选择注入电流信号,通过预测模型得到端口响应电压信号,其次在 Multisim 软件中建立信号调理电路仿真模型,最后将预测信号注入到电路仿真模型中求解,通过监测电路输出端口信号来

分析该电磁脉冲环境下发动机电控单元的电磁敏感度。

3.2 虚拟注入仿真计算与验证

为了验证本文所提分析方法的可行性与正确性,对发动机电控单元典型模块调理电路建立仿真模型并展开研究,将其结果与 BCI 试验结果对比验证。如图 12 所示为转速模块信号调理电路原理图,调理电路主要由滤波电容、集成芯片 MAX9924 UAUB/V+T 和其他无源器件组成。转速传感器输出信号经调理电路输入至 MAX9924 UAUB/V+T,经芯片处理后输出方波信号,微处理器模块根据单位时间内采集到的方波上升沿或下降沿个数来计算转速。当电流信号注入到置于线束上的电流注入探头时,耦合进入到调理电路输入端口的响应信号会对转速采集造成影响。端口响应电压信号与传感器正常信号耦合形成电磁脉冲耦合信号,此时 MAX9924 UAUB/V+T 的输入信号由类正弦信号变为畸变正弦信号。根据转速模块电路原理图,在 Multisim 中建立转速模块调理电路仿真模型,如图 13 所示。

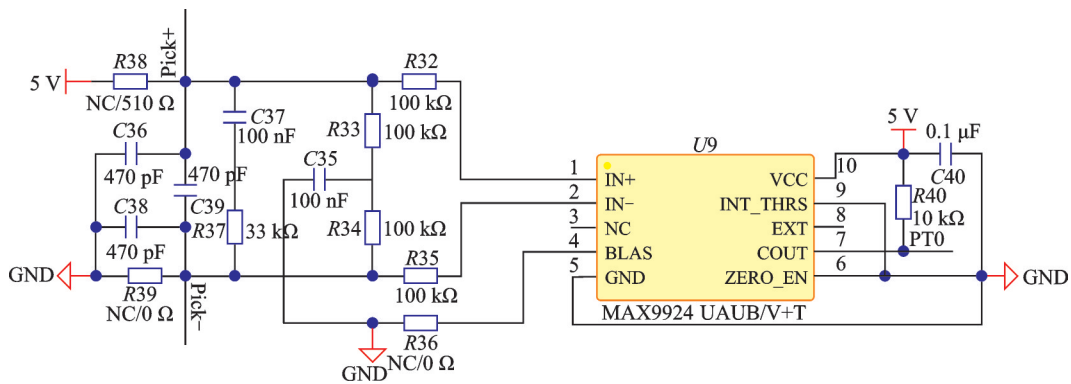


图 12 转速模块调理电路原理图

Fig.12 Schematic diagram of speed signal conditioning circuit

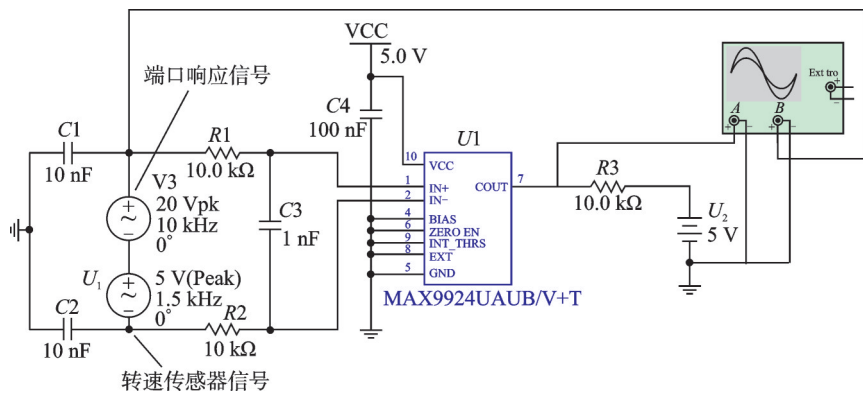


图 13 转速模块调理电路仿真模型

Fig.13 Simulation model of speed conditioning circuit

选取频率为 10 kHz、峰值为 16 A 的注入电流信号输入至预测模型,得到预测响应电压信号幅值为

20 V,频率为 10 kHz,将该信号注入到图 13 所示的电路仿真模型的输入端口。图中幅值为 5 V,频率

为 1.5 kHz 的信号为转速传感器信号。监测 MAX9924 芯片输出引脚的信号,如图 14 所示。图中黑色信号为 MAX9924 UAUB/V+T 芯片输出信号,红色信号为 MAX9924 UAUB/V+T 芯片的输入信号。当没有电磁脉冲干扰时,输入信号为标准的类正弦信号,即正常传感器信号,芯片输出的方波信号规整且频率与传感器信号一致。当受到电磁脉冲干扰后,输入信号由正常传感器信号变为电磁脉冲耦合信号,MAX9924 UAUB/V+T 芯片受到干扰,输出方波信号的频率迅速升高。

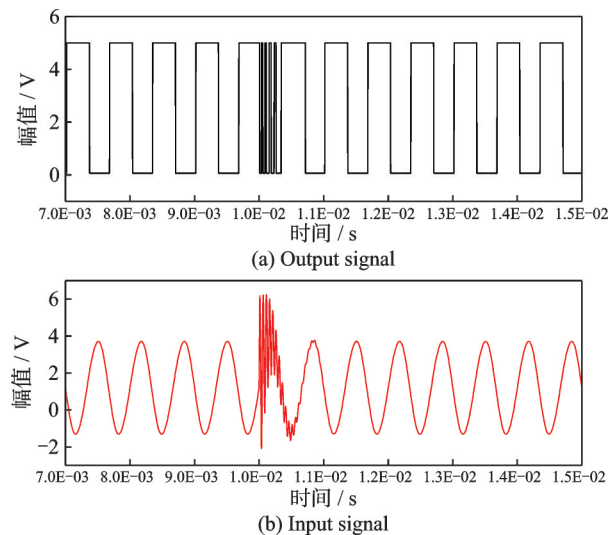


图 14 MAX9924 UAUB/V+T 输出端口监测结果

Fig.14 Monitoring results of the output port of MAX9924 UAUB/V+T

搭建转速传感器模块的 BCI 试验平台,如图 15 所示,进行转速传感器模块的 BCI 试验。使用任意信号发生器生成频率为 10 kHz、幅值为 16 A 的注入电流信号,通过示波器记录 BCI 试验中 MAX9924 UAUB/V+T 输出引脚的信号,如图 16 所示。图中红色部分为电流注入控制系统后转速模块的输出信号。

将图 14 与图 16 进行对比,在受到电磁脉冲干扰后仿真结果与试验结果监测到相同的现象,具有较高的一致性。此时 MAX9924 UAUB/V+T 芯片受到电磁脉冲耦合信号的干扰使得输出的方

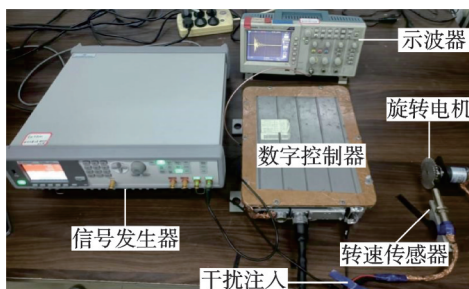


图 15 转速传感器 BCI 试验平台

Fig.15 BCI test platform for speed sensor module

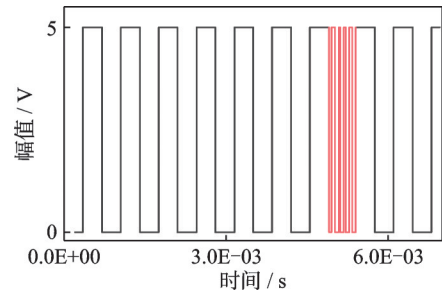


图 16 试验中监测信号

Fig.16 Monitoring signal during the test

波信号发生变化,单位时间内的方波个数激增,进而造成发动机转速计量值瞬间增大。通过上位机观测发动机运行参数,脉冲电流注入后转速显示数值瞬间增大,采集的转速远高于实际转速。该电磁敏感现象与仿真模型中 MAX9924 UAUB/V+T 输出端口采集到的信号相吻合。

上述研究内容以发动机电控单元转速模块为对象来开展,以相同方法对电控单元其他功能进行分析以验证所提方法的通用性。选择发动机节气门开度模块为对象进行分析,如图 17 所示为节气门开度模块调理电路仿真模型。由于不同模块信号调理电路电气特性存在差异,在相同电磁脉冲干扰下调理电路输入端口响应电压信号不同,即端口响应电压信号与注入电流信号之间的传递关系不同。因此,应根据节气门开度模块 BCI 试验结果建立节气门开度模块调理电路输入端口响应电压信号预测模型,将该预测模型输出的预测结果注入节气门开度模块调理电路仿真模型中求解。

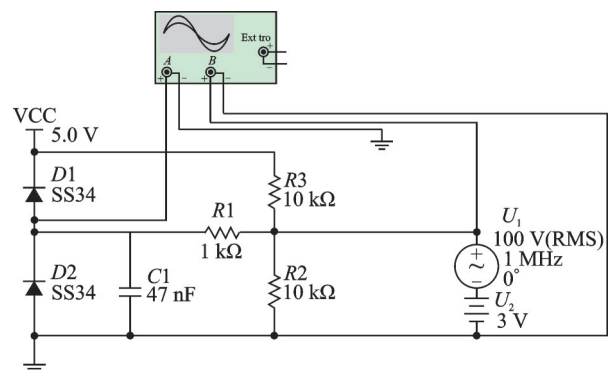


图 17 节气门开度模块调理电路仿真模型

Fig.17 Simulation model of the throttle valve opening module adjustment circuit

选取频率为 1 MHz、峰值为 30 A 的注入电流信号输入预测模型,得到预测端口响应电压信号幅值为 100 V,频率为 1 MHz,将该信号注入到图 17 所示的节气门开度模块仿真模型输入端口进行仿真。仿真结果如图 18 所示,红色曲线为预测端口响应信

号,黑色曲线为输出端口信号。正常工作下输出端口信号为3 V直流信号,当脉冲信号注入后,节气门开度信号产生较大波动且持续时间较长。

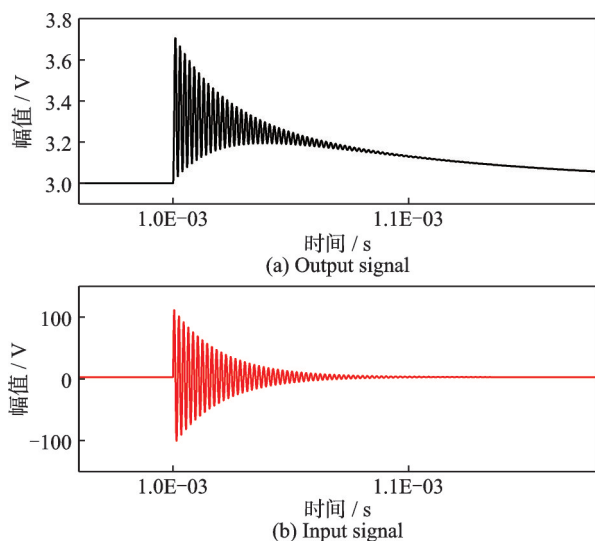


图18 输出端口监测结果

Fig.18 Monitoring results of the output port

线性输出的节气门开度传感器本质上是一个电位计,不同的节气门位置对应不同的阻值并将其转换为0~5 V的直流电压输出。节气门开度信号调理电路中没有采用集成芯片,仅由电容、电阻以及肖特基二极管组成。节气门开度模块BCI试验中利用滑动变阻器模拟发动机工作时的节气门开度。节气门开度不变的情况下调理电路输出端口信号为幅值固定的直流信号。

如图19所示为节气门开度模块BCI试验中调理电路输出端口信号,黑色部分是正常的开度信号,红色部分为电流注入后电路输出端口的开度信号,注入电流信号频率为1 MHz、峰值为30 A,试验结果与仿真计算结果基本相同。通过监测上位机发现,大电流注入后节气门开度显示数据高于实际开度,并存在一定波动,该电磁敏感现象与仿真结果具有一致性。因此本文所提分析方法适用于发动机电控单元不同功能模块的电磁敏感度分析。

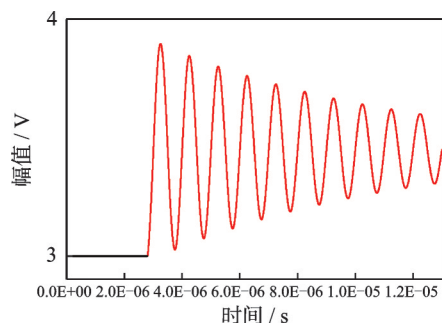


图19 节气门开度模块BCI试验输出端口信号

Fig.19 Throttle valve opening module output port signal in BCI test

4 结 论

本文在BCI试验方法的基础上,提出了一种基于线束传导规律的虚拟注入方法。以发动机电控单元典型模块为研究对象进行了相关试验,验证了该方法的可行性与准确性,得到如下结论:

(1)BCI试验中选择阻尼正弦电流信号作为脉冲源时,调理电路输入端口响应电压信号表现出相同趋势的阻尼正弦特征。基于试验数据建立注入电流信号与端口响应电压信号的函数模型,明确了端口响应电压信号与注入电流信号的幅值系数、衰减系数和信号频率存在传递关系。

(2)通过建立具有较浅层结构的1D CNN训练后得到端口响应电压信号预测模型,即大电流注入下发动机控制系统线束的传导规律。模型预测结果表明,预测信号与测量信号的总体趋势具有较高的一致性,仅在小部分窗口内存在误差。预测信号与测量信号的误差分析结果表明预测模型性能与注入电流信号的频率存在一定关系,在所研究的频点上,最大误差不超过5.8%。

(3)提出基于“路”的电磁敏感度分析方法,将预测模型得到的端口响应电压信号“注入”到使用Multisim建立的电路模型进行仿真。仿真结果与试验结果中电控单元功能模块输出端口信号相同,并与试验中观测到的电磁敏感现象吻合。

综上所述,本文提出的虚拟注入方法可以在宽频范围内快速分析发动机电控单元各模块电磁敏感度,极大地降低了试验成本,为设计阶段优化发动机电控单元的电磁脉冲防护设计提供了依据。

参考文献:

- [1] 王春利,卢杰,任志文,等.小型航空活塞发动机发展现状与应用研究[C]//第九届中国航空学会青年科技论坛.西安:[s.n.],2020.
WANG Chunli, LU Jie, REN Zhiwen, et al. Current development state and investigation of application for small piston aero-engine[C]//Proceedings of the 9th Youth Science and Technology Forum of the Chinese Aeronautical Society. Xi'an:[s.n.],2020.
- [4] 秦风,蔡金良,曹学军,等.车辆强电磁脉冲环境适应性研究[J].强激光与粒子束,2019,31(10):103203.
QIN Feng, CAI Jinliang, CAO Xuejun, et al. Investigation on the adaptability of vehicle in high-intensity electromagnetic pulse environment[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(10): 103203.
- [5] 朱超磊,金钰,王靖娴,等.2022年国外军用无人机

- 装备技术发展综述[J]. 战术导弹技术, 2023(3): 11-25, 31.
- ZHU Chaolei, JIN Yu, WANG Jingxian, et al. Overview of the development of foreign military UAV systems and technology in 2022[J]. Tactical Missile Technology, 2023(3): 11-25, 31.
- [6] LUBKOWSKI G, LANZRATH M, LAVAU L C, et al. Response of the UAV sensor system to HPEM attacks[C]//Proceedings of the 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility—EMC EUROPE. Rome, Italy: IEEE, 2020.
- [7] PYWELL M. Military aircraft combat the electromagnetic environment[J]. Electronics Systems and Software, 2003, 1(2): 35-39.
- [8] YANG S H, TANG Y F, LIU X K, et al. Study on effects of high-altitude electromagnetic pulse to engine electronic control system[J]. Advanced Materials Research, 2012, 443/444: 894-898.
- [9] ZHOU D, WEI M X, SHI L H, et al. Numerical simulation and experimental study of the impact of an early-time HEMP field on an engine speed acquisition system[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, 61(3): 403-417.
- [10] 李庆颖. 机载设备电磁脉冲防护方法研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
- LI Qingying. Research on the method of electromagnetic pulses protection for airborne equipment[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018.
- [11] 吴元新. 强电磁脉冲下机舱内线缆的电磁兼容研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
- WU Yuanxin. EMC studies of cables inside the cabin under strong electromagnetic pulse[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [12] ALZUBAIDI L, ZHANG J, HUMAIDI A J, et al. Review of deep learning: Concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions[J]. Journal of Big Data, 2021, 8(1): 53.
- [13] 周飞燕, 金林鹏, 董军. 卷积神经网络研究综述[J]. 计算机学报, 2017, 40(6): 1229-1251.
- ZHOU Feiyan, JIN Linpeng, DONG Jun. Review of convolutional neural network[J]. Chinese Journal of Computers, 2017, 40(6): 1229-1251.
- [14] 普运伟, 刘涛涛, 郭江, 等. 基于卷积神经网络和模糊函数主脊坐标变换的雷达辐射源信号识别[J]. 兵工学报, 2021, 42(8): 1680-1689.
- PU Yunwei, LIU Taotao, GUO Jiang, et al. Radar emitter signal recognition based on convolutional neural network and coordinate transformation of ambiguity function main ridge[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(8): 1680-1689.

(编辑: 孙静)