

基于 CAN 总线的某型数字化战车 自动测试系统设计

杨云飞, 葛 玉, 黄林昊, 吴建磊

(武汉军械士官学校, 武汉 430075)

摘要: 针对现代数字化战车电气与电子系统技术复杂、各分系统关联程度高、维修保障困难等问题, 设计了一种基于 CAN 总线的数字化战车自动测试系统; 整体设计基于模块化思想, 充分利用车载备用总线, 综合运用了 DSP+FPGA 控制处理技术、AFPV 智能故障诊断技术, 在诊断过程中对功能模块的每个扩展方向分别建立模糊 Petri 网模型, 能够对车载电气与电子系统进行分系统独立测试和全系统联合检测, 具有快速故障定位能力和拓扑适应能力; 采用适配器与上位机测试软件的分体式设计, 实现了平台物理资源复用, 从而实现了底层设备的通用、互换, 保障了测试一致性; 应用表明, 该系统能够较好的适用于现代数字化战车的维修保障, 使用方便, 故障诊断快速有效。

关键词: CAN 总线; 自动测试系统; AFPV 故障诊断; 数据采集; 信号调理

Design of Automatic Test System for a kind of Digital Chariot Based on CAN Bus

Yang Yunfei, Ge Yu, Huang Linhao, Wu Jianlei

(Wuhan Non-commissioned Officer Academy of PLA, Wuhan 430075, China)

Abstract: The automatic test system based on CAN bus was designed, which could be used to maintain the digital chariots; The DSP + FPGA control processing technology and the AFPV intelligent fault diagnosis technology was used in the system, and in the process of diagnosis for each extension direction of the functional modules respectively fuzzy Petri net model was established, the system can be used to test the subsystem independently or the whole system, by which the people could locate the fault quickly. The system has strong ability to adapt. The application showed that the system would be better applicable to modern digital chariots of maintenance support, and which was used easily, the fault could be done quickly and efficiently.

Keywords: CAN bus; automatic test system; AFPV fault diagnosis; data acquisition; signal conditioning

0 引言

随着我军军事现代化的不断加速, 越来越多的某型数字化战车开始大量列装部队。相对于传统战车, 该型数字化战车的各类电气与电子系统组成更加复杂, 自动化程度更高, 为了提高系统的工作可靠性, 节约各分系统联锁控制的硬件开销, 该大型装备系统之间的互联广泛采用了 CAN 总线结构, 系统集成化、一体化程度越来越高。由于该型装备电气与电子系统的复杂性和重要性, 其对维修保障的要求也越来越高, 当发生故障时, 采用传统的方法判断故障部位进行修理变得越来越困难, 传统的分部件单独检测的维修设备已远不能满足某型数字化战车全系统联动集成检测的需求。基于此, 设计开发了基于 CAN 总线的某型数字化战车自动测试系统, 利用战车双路冗余总线及各分系统预留检测接口, 成功实现了战车全系统联动工作时各类控制信息、工作状态信息及必要工作参数等数据的快速采集及传送, 利用上位机集成智能故障诊断系统, 可快速准确的完成全系统联动工作时各子系统的数据分析与故障诊断, 为该型复杂装备电气与电子系统的维修提供了可靠地保障。

1 系统总体设计

某型数字化战车电气与电子系统主要包括驾驶员信息化终端子系统、底盘电子信息子系统、发动机电控子系统、供输弹控制子系统及火控子系统等, 通过对以上系统各类信息的充分研究与分析, 可对影响故障诊断分析的数据分成两大类, 一类是通过 CAN1 总线 (CAN2 总线为冗余总线) 互相传输的各类控制命令信息, 这类信息主要是各分系统联动工作时相互之间传递的控制信息及返回的执行结果, 另一类信息是各子系统内部工作时的控制信号和主要工作参数, 这类信息均集中在子系统检测接口输出, 以方便检测设备进行故障分析与诊断。

根据以上特点, 结合现代自动测试系统模块化、集成化的设计思想, 设计制作了适合数字化战车的全系统联动自动测试系统。自动测试系统采用适配器+上位机的模式, 主要包括自动检测适配器、EVOC 上位机、总线设备及配套的集成智能故障诊断系统软件, 整体组成见图 1 所示。

1.1 自动检测适配器

自动检测适配器主要用来完成各子系统自身工作控制信号和主要工作参数的检测, 并发送给上位机, 由上位机综合分析判断, 诊断故障原因。为了减少车内狭窄空间的检测电缆布线和安装, 消除复杂电磁环境对检测信号的影响, 这里充分利用了车载冗余总线 CAN2, 通过 CAN2 总线完成其与上位机的信息传输, 充分保证了系统工作的可靠性。

收稿日期: 2014-04-26; 修回日期: 2014-07-02。

作者简介: 杨云飞(1980-), 男, 湖北武汉人, 硕士, 主要从事自动测试方向的研究。

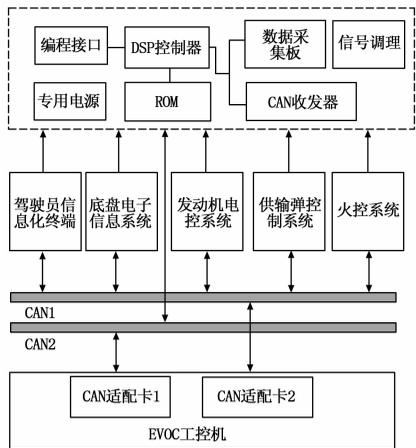


图 1 自动测试系统整体组成

自动检测适配器主要包括 TMS320C6713GDPA 控制器、信号调理电路、高精度数据采集板、CAN 收发电路、专用电源电路及 ROM 存储器和 JTAG 接口电路等。TMS320C6713GDPA 控制器用来接受上位机发送的检测命令，对适配器各类资源进行合理调度，完成自动测试适配器各项工作的综合控制，是适配器的控制核心；信号调理及高精度数据采集电路不仅对子系统众多的输入信号进行归类、分配转换、采集处理，对相关数据进行变压、锁存、延时及整形触发等，通过隔离电路，实现了检测系统与装备的电气隔离，实现了对装备的柔性测试，而且根据系统工作特点制定了硬件接口资源分配协议，实现了资源的有效充分利用，采集板将采集到的各类检测信号发送给 DSP 控制器，由 DSP 控制器控制，转入 CAN 收发电路；CAN 收发电路提供 CAN 总线协议控制和物理总线接口，而且对 CAN 总线控制器提供差动接收能力；专用电源电路提供检测适配器各电路所需的稳定电压，消除由于电源波纹造成的系统不稳定情况的发生；JTAG 接口电路提供了适配器控制部分的仿真调试接口，便于系统的试验调整。

1.2 EVOC 上位机

EVOC 上位机是自动测试系统和测试用户实现人机交互的接口，也是数据分析和智能故障诊断软件的载体，可以通过设定的程序集控制自动测试流程，实时显示装备电气与电子系统的工作状态，通过界面切换显示所有关键测试数据，并能通过智能故障诊断模块完成故障的分析、故障准确定位及推荐的故障处理方法。EVOC 上位机设置的两个 CAN 智能适配卡，分别用来实现上位机与数字化战车车载双冗余 CAN 总线进行互联互通，其中 CAN 适配卡 1 连接冗余 CAN2 总线，主要根据自动测试系统程序控制要求，发送检测控制命令，接收各子系统反馈的关键测试数据；CAN 适配卡 2 连接 CAN1 工作总线，用来采集处理装备全系统联动工作时的各类连锁控制信息、指挥控制数据等，传送给数据分析与智能故障诊断模块。

2 适配器主要电路设计

适配器整体设计见图 2。系统采用了 DSP+FPGA 的基本架构，配合多路转换器、信号调理电路、高精度数据采集电路及 CAN 收发电路，能够以最佳的工作性能完成数字化战车复杂检测信号采集处理及转发。

为了实现数字化战车驾驶员终端系统、底盘电子信息系

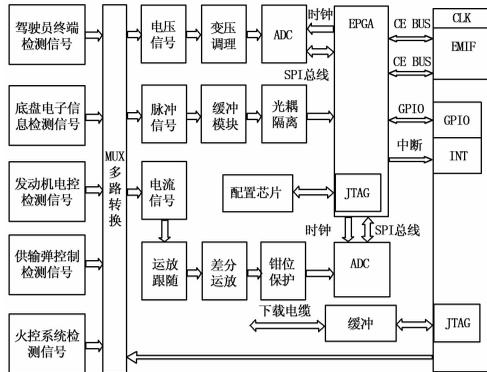


图 2 适配器组成框图

统、发动机电控系统、供输弹控制系统及火控系统等于子系统的同步实时信号采集，这里采用了高速 MUX 多路转换器，在 DSP 的控制下，实现各路数据的智能分配，分别输送给信号调理电路处理。针对信号的采集通常方案是采用 DSP 或单片机控制采集器、存储器等附属器件，由专用 ADC 采集电路实施信号采集，然而无论采用单片机控制还是 DSP 直接控制都有明显的不足，单片机控制由于相对速度较慢，无法满足装备并发的实时高速多路数据采集的需要，DSP 控制虽然处理速度快但通用 I/O 较少，控制能力较弱。因此这里采用 DSP+FPGA 的方式，系统的核心由 DSP 芯片和 FPGA 芯片组成，FPGA 对于 DSP 来说，相当于协处理器。适配器要处理的是实时多路并发高速数据，对于底层的信号预处理数据量大，但运算算法结构相对单一，重点关注其处理速度，特别适用于 FPGA 芯片实现。高层处理的数据量较少，但算法复杂，适用于运算速度快、功能灵活的 DSP 芯片实现。采用 DSP+FPGA 的方式兼顾了速度和灵活性的要求，既兼顾了底层数据需求也兼顾了高层信号处理要求，显著提高处理效率，特别适合实时信号处理，易于维护和扩展。信号调理电路接受多路转换器按规则分配的特征信号，按照需要分别进行阻抗匹配、增益控制和隔离放大等，以适合采集电路快速安全采集。CAN 收发电路用于适配器与 EVOC 上位机的信息传输，借用战车备用总线，实时完成装备各电气与电子系统监测数据的上传，为故障诊断分析提供可靠保证。

2.1 调理电路设计

战车电气与电子系统工作中产生各类信号，由低压直流信号、高压直流信号、电流信号、脉冲信号及交流电压信号等，为了有效地对战车各类测试信号进行检测，避免各种信号对适配器的冲击和损坏，实现采集系统的复用，在数据采集电路有效且精确地测量信号之前必须设计调理电路。信号调理详细电路如图 3 所示。包括信号匹配隔离、自适应放大、控制等几大部分，其中，电路基准电源采用 MAX872，信号自适应切换采用光继电器 AQW212E，跟踪运放采用 227 运放，隔离电路采用的是精密仪表开关电容模块 LTC1403 等。对于高压直流信号，通过自动控制切换电路，切入降压适配电阻阵列内，降压处理后再输出到低压调理电路，避免高压冲击；降压后的信号及正常低压信号通过 AQW212E 进入低压调理电路进一步处理。精密基准参考电源 MAX872 的采用可以较好提升输入较弱信号的电位，减少较低电压信号测量时的干扰误差；同时作为检测反馈，其结果可以修正其它回路的检测结果，实现系

统的在线自校正。MAX872 电压适应能力较强 (2.7 ~ 20 V), 输出精度可达 $2.500\text{ V} \pm 0.2\%$ 。LTC1403CN 是双精密仪表开关电容, 设计时将内部开关频率定位在 300 Hz, 便于得到最高传输精确度。LTC1403CN 和运放 LT1013 一起组成了单端差分放大器, 差分输入的电压采样值来自于 LTC1403CN, 信号保持在电容器 C 上并送到接地参考电容器 Ch, 而 Ch 的电压送到运放 LT1013 的非反相输入端进行放大输出。由于 LTC1403CN 采用电容完成信号电压的输出, 这样就使得输入信号由差分输入转变成单端输入, 而且具有很好的信号隔离作用, 实现了系统的柔性测试, 最后一级的运放电路由 LT1013 和数字电位器 X9241M 组成, 放大增益取决于数字电位器 X9241 中 3 个数字电位器 RW1、RW2 和 RW3, 使输入信号经过低压处理电路后均变为 0~700 mV 的电压信号, 和后续数据采集电路形成良好匹配。对于电流信号, 由于加速度计信号对精度的要求很高, 因此其信号调理电路单独设计, 首先设计精密电阻对输入的电流信号转换得到与之成正比的电压信号, 因为采样电阻的性能直接影响所得的电压信号的稳定性和精度, 这里选用 VSMP 系列超精密金属箔电阻, 它具有极好的负载寿命稳定性和接近于零的温漂, 且具有极低的噪声和极高的阻值精度, 滤波电容 C 可以滤除高频信号的干扰, 跟随运放也采用 OPA227, 差分转换器采用全差分运算放大器 OPA1632, 以满足 ADC1282 的采集要求。

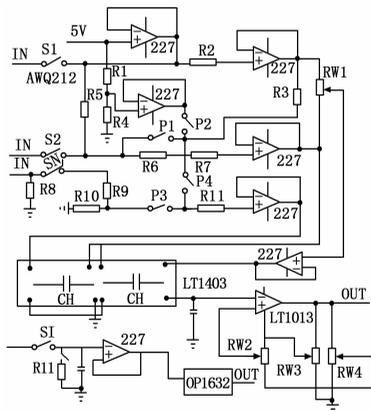


图 3 信号调理电路

2.2 高精度数据采集系统设计

高精度数据采集系统为专门设计的电路, 在输入信号经过信号调理以后, 根据 DSP 和 FPGA 的统一调度, 由数据采集系统实施数据采集。采集的数据包括输入的各种参数及在这种参数下的待测电气与电子系统的反馈结果, 最后由上位机进行进一步处理和故障分析。

数据采集的关键 ADC 芯片关系到整个数据采集系统性能指标。考虑到动态范围大、精度要求高和噪声处理强的数据采集要求, ADC 采用了 ADS1282。这是一个具有稳定四阶 Σ - Δ 调制器、31 位 Σ - Δ 型模数转换器的 ADC 器件, 在应用中表现出了非常好的噪声和线性特性。在高速数据采集电路中, 噪声影响无处不在, 无论有没有电压或电流激励, 每个电阻自身都会产生热电压噪声, 在频率达到电阻的寄生电容 (015 pF) 开始衰减噪声的频率之前, 这种噪声的幅值为常数, 另外运算放大器等有源器件, 也会在内部产生噪声, 这些都严重

影响系统性能。设计时可通过编程优化 ADS1282 选择数字滤波器的组合方式, 使输出信号和片上的数字滤波器联合使用, 可更好地降低噪声影响。另外通过设计片上多路选择器 (MUX) 用于内部自检电路, 能及时发现运行中的稳定情况。

2.3 CAN 收发电路设计

由于采用的 DSP 芯片 TMS320C6713GDPA 具有内置局域网 (CAN) 控制器, 不再需要专门设置控制芯片, 但其内部的 CAN 控制器只是协议控制器, 并不能提供物理层的驱动, 为了实现 CAN 总线的正常数据传输, 还需设计对应的外围电路。CAN 收发电路见图 4 所示, SN65HVD231 芯片是 TI 公司专门针对其系列 DSP 芯片而设计的, 可对 CAN 总线提供差动发送能力, 对 DSP 内置 CAN 控制器提供差动接收能力。其 TXD 和 RXD 引脚是芯片和 CAN 控制器的连接引脚, 由于设计时采用的是 TMS320C6713GDPA 芯片 (内嵌 CAN 模块), 所以 TXD 引脚接 DSP 的 IOPC6, RXD 引脚接 TMS320C6713GDPA 的 IOPC7, Vref 为参考电压输出脚, 按照芯片要求该引脚的输入电压应该介于 0.4Vcc 和 0.6Vcc 之间, 作为输出电压的参考。引脚 RS 主要控制芯片的工作模式, SN65HVD231 主要有 3 种工作模式, 分别为高速模式、待机模式和斜率控制模式, 根据实际, 这里选用高速模式, 通过预置使 $VR_s < 0.3V_{cc}$ 就可以实现。工作在高速模式时, 为了保护 MCU 不被 CAN 总线上的干扰信号所影响, CAN 控制器引脚通过 HCPL0631 双路光电耦合芯片与 CAN 收发驱动芯片的 TXD 和 RXD 相连, 从而实现物理隔离, 并且电缆做出必要的抗干扰措施, 提高了系统的抗干扰能力与可靠性。

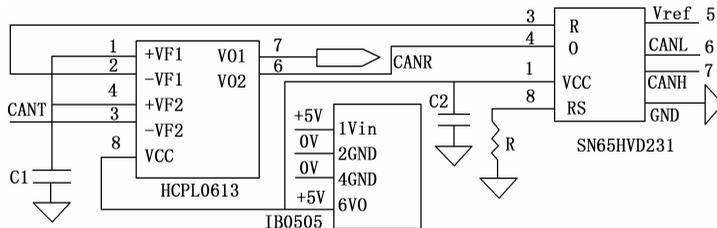


图 4 CAN 收发电路

3 EVOC 上位机软件设计

3.1 软件结构

EVOC 上位机部分是数据分析和故障诊断的中心, 主要依托软件以一定算法规则实现。软件整体贯彻了模块化和开放化的设计思想, 便于维护和扩充。软件总体框图如图 5 所示。

系统软件结构主要有用户管理、系统自检、主测试程序、故障诊断分析及数据管理等模块组成。主测试程序部分根据数字化战车装备特点和维修保障实际需求划分为各子系统单独测试和全系统联合测试两大模块, 各子系统测试针对数字化战车电气与电子系统分系统测试条件和要求, 根据测试过程控制产生对应激励信号并检测系统返回的各类信号, 为故障诊断提供可参考的必要数据, 联合测试则主要针对数字化战车电气与电子全系统联合工作状态下的测试, 过程中充分考虑连锁逻辑等实际工作条件开展检测; 故障诊断模块根据模糊规则结合 Petri 网络诊断方法, 依据系统测试数据, 判断故障部位, 并给出具体参考处理方法; 用户管理模块针对不同用户等级设定相应操作限制, 限定用户可使用的软件模块和技术权限, 以保证

系统安全可靠工作；系统自检部分用于开机后对各上位机和适配器硬件模块和软件部分进行自检；数据库管理模块对检测历史记录数据、故障分析数据、装备信息等内容进行存储与管理。

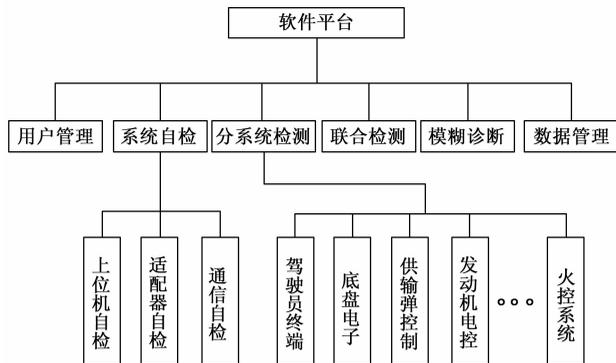


图 5 上位机软件总体框图

3.2 故障诊断

数字化战车电气与电子系统中故障的发生部位、时间、发生形式都呈现出多样化特性，故障诊断模块就是要对各类型故障进行辨识和决策。为了更好地分析和判断故障，使得软件辅助更符合维修人员的思维和认知方式，设计时采用了以模糊 Petri 网和神经网络相结合形成自适应模糊 Petri 网 (AFPN) 的故障诊断方法，在诊断过程中对功能模块的每个扩展方向分别建立模糊 Petri 网模型，不仅能够给出更加精确的诊断结果，而且对系统拓扑变化具有较好的适应能力，适用于数字化战车复杂系统的故障诊断。

这里以装备电源系统为例说明故障诊断过程。首先建立电源系统 Petri 网模型如图 6 所示。在模型中将故障征兆作为起始库所，故障起因作为终止库所。其中 $P_1 \sim P_{10}$ 分别表示主发电机控制盒工作电压低、主发电系统保护信号高、发电允许信号无、辅机发电系统保护信号高、辅机发电控制盒工作电压低、蓄电池电压低、主发电系统不发电、辅发电系统不发电、外接电源不工作及电源系统不工作。

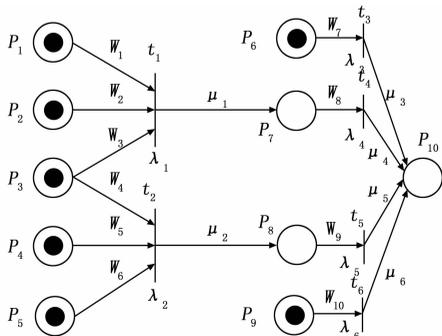


图 6 电源系统的 Petri 网模型

$W_9, W_{10}, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \mu_3, \mu_4, \mu_5, \mu_6)$

根据维修保障工程师维修经验，现设所有的预期阈值为 0.5，并设定各初始预置权值，依据模糊产生规则，采用多个样本进行系统训练，通过相关运算后得到权值 $W_1 \sim W_{10}, \mu_1 \sim \mu_6$ 。随后，系统根据权值依次输入各组非样本数值得到最终数据，在第 1 组数据中，由于 $\alpha(p_1)W_1 + \alpha(p_2)W_2 + \alpha(p_3)W_3 = 0.4$ ，该值低于 λ ，由此， t_1 无法完成迁移，所以 $\alpha(p_7)$ 应为 0，同样可计算得到 $\alpha(p_3)W_4 + \alpha(p_4)W_5 + \alpha(p_5)W_6 = 0.5$ ，该值虽然和 λ 相等，但依然不满足迁移条件，所以 $\alpha(p_8)$ 应为 0，结合 $\alpha(p_7)$ 和 $\alpha(p_6)$ 的结果，计算可得 t_3, t_4, t_5, t_6 均不能发射，由此可得 $\alpha(p_{10})$ 为 0。通过这组数据，说明当电源系统故障特征出现的概率较小时，这些故障特征并不是由蓄电池、主发电系统、辅发电系统或外接电源引起的。另外 P_{10} 的置信度为 0，也同时说明了现有故障特征信息可以推断发电允许信号板出现故障的概率很小。在第 2 组数据中， $\alpha(p_7)$ 为 0.38， t_4 不能发射， $\alpha(p_8)$ 为 0.42， t_5 不能发射， $\alpha(p_9)$ 为 0，所以 $\alpha(p_{10})$ 为 $\alpha(p_6)$ 迁移而得， $\alpha(p_{10}) = \alpha(p_6) - W_7 - \mu_3 = 0.8$ 。在所得第 3 组数据中， t_5, t_6 都能迁移，其中 $\alpha(p_8) - W_9 - \mu_5 = 0.75$ ，而 $\alpha(p_9) - W_{10} - \mu_5 = 0.6$ ，因此 $\alpha(p_{10})$ 是 t_5 迁移后产生的。

故障诊断采用数据驱动的 AFPN 辅助分析，使故障诊断具备了神经网络训练学习能力，减少了计算量，可快速准确获得故障定位。

4 实装测试与分析

在实装测试中，采用了模拟故障的方法检验测试，动态载入数据分析的人机交互界面，通过数据分析模块可以加载数据文件。测试系统会针对分系统测试需求调取相关资源控制测试过程，并采集各分系统工作参数，根据故障元件提取对应的故障录波数据，最后利用混合模糊 Petri 网进行故障类型的推理辨识。故障数据分析界面如图 7 所示。

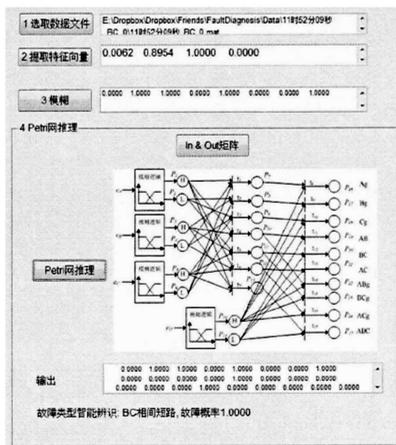


图 7 故障数据分析界面

由模型可知其模糊产生式规则如下。
 R1: IF P_1 OR P_2 OR P_3 Then P_7 ($W_1, W_2, W_3, \lambda_1, \mu_1$);
 R2: IF P_3 OR P_4 OR P_5 Then P_8 ($W_4, W_5, W_6, \lambda_2, \mu_2$)
 R3: IF P_6 AND P_7 AND P_8 AND P_9 Then P_{10} ($W_7, W_8,$

系统以数据的形式显示量化结果，以图形化形式构建推理过程，便于工程人员理解推理过程，最后给出故障分析结果，为装备维修提供参考。通过实际测试，证明该系统可以准确完成特征向量数据提取、模糊化以及混合模糊 Petri 网推理，显示 Petri 网的推理结构以及最终故障辨识结果，并输出了正确故障类型及可信度。通过模拟故障实验证明了自动测试系统故

障诊断的可行性和正确性。

5 结束语

基于 CAN 总线的数字化战车自动测试系统采用模块化、标准化设计, 实现了检测控制数字化、故障分析的智能化, 从根本上提高了测量与控制的精确度, 减少了传送误差, 增强了故障分析的准确度。采用的适配器与上位机测试软件的分体式设计, 实现了平台物理资源复用和测试程序与硬件无关, 从而实现了底层设备的通用、互换, 保障了测试一致性, 提高了系统工作可靠性。同时充分利用了数字化战车车载备份 CAN2 总线, 减少了复杂配套连接电缆, 增强了检测设备的便携性和环境适应性。适配器部分采用了 DSP+FPGA 的复合结构, 因此在运算速度和工作效率方面得到了很大提高, 为了适应战车电气与电子系统检测信号的复杂特点, 在高速数据采集电路前还增加了专用信号融合调理电路, 实现了检测信号与采集电路的完好匹配。上位机故障诊断模块采用 AFPN 故障诊断方法,

在诊断过程中对功能模块的每个扩展方向分别建立模糊 Petri 网模型, 不仅能够给出更加精确的诊断结果, 而且对系统拓扑变化具有较好的适应能力, 实际验证表明该方法特别适用于数字化战车复杂系统的故障诊断。

参考文献:

- [1] 韩大伟, 周 军, 于晓洲. 基于 PXI 总线的导弹自动测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2008 (1): 1650-1653.
- [2] 杨云飞, 高 强, 葛 玉. 基于嵌入式系统的某型火控系统检测仪设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010 (12): 2786-2788.
- [3] 梁宇恒. 高精度数据采集及 DSP+FPGA 高速信号处理硬件系统设计 [D]. 西安: 电子科技大学, 2012.
- [4] 高梅梅. 模糊推理 Petri 网及在故障诊断中的应用 [J]. 自动化学报, 2000 (5): 677-680.
- [5] 梁宇恒. 基于 CAN 总线的测试系统研究与设计 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.

(上接第 117 页)

调光控制终端的 MSP430 单片机软件主要包括联机应答测试、工作模式设置、时钟配置与管理、PWM 调光控制、现场光照度参数上传等功能模块。

其中, 工作模式设置模块依据上位机信令帧命令编码中的强制开、强制关、开启时间段、预期光照度等指令信息, 以及装置面板上的动手按键状态, 进行工作模式状态字变量的修改, 并完成相应功能模块子程序的跳转和调用。

PWM 调光控制模块, 通过光照度反馈信号与预期值的比较来判断是否需要增减 LED 光源控制引脚 P1.2 的占空比以使环境光照度保持在预期光照度状态下。若光照度过强, 则减少单片机 Timer_A 定时器比较寄存器 TA0CCR1 初值 (占空比递减), 否则增加 TA0CCR1 初值 (占空比递增); 若光照度等于预期值, 则 TA0CCR1 初值保持不变 (占空比不变)。

上位机监控管理软件主要由无线通讯协议处理、数据显示/存储与回调、人机接口等 3 类功能子程序组成, 由 VB 编程实现。程序设计中, 计算机与无线通讯模块的 RS232 串口通信处理可直接使用 ActiveX 控件 MComM。当 RS232 通信过程中有事件或错误发生, 就会引发 OnComm 事件并由 CommEvent 代码表示事件或错误, 程序根据不同的属性处理数据的收发或错误处理。

4 测试结果

在实验室环境进行系统的模拟测试以验证系统设计的可靠性和准确性。每个分布式 LED 光源由八只白光 LED 串联组成, 并利用反射聚光型灯具罩以增加 LED 光束的集中度和方向性。

通过测试, 分布式系统无线节点间的通信数据传输稳定, 可以完成强制开关、开启时间段调整、光照度数据上传等操作。控制终端 LED 调光控制运行可靠, 光照度调节线性度良好, 测试结果如表 4 所示。表明系统达到设计的功能要求。

表 4 光照度调节测试数据

数据编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
占空比/(%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
光照度/(Lux)	15	34	47	59	80	97	109	124	135

5 结论

本文应用无线通信技术和 LED 集成驱动技术, 以 MSP430 微处理器为控制终端核心, 设计了分布式智能 LED 光照度调控系统。该系统能够实现广域范围内的 LED 光源开关控制、开启时间段自动控制 and PWM 闭环调光控制, 以及光照度远程监控。系统具有较好的灵活性和扩展性, 为智能楼宇和基于物联网技术的 LED 光源调控, 提供了技术方案, 具有良好的应用前景和借鉴价值。

参考文献:

- [1] Huynh T P, Tan Y K, Tseng K J. Energy-aware wireless sensor network with ambient intelligence for smart LED lighting system control [A]. 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society [C]. Melbourne, Australian: IEEE, 2011: 2923-2928.
- [2] 窦林平. 国内 LED 照明应用探讨 [J]. 照明工程学报, 2011, 12 (6): 51-58.
- [3] 陈大华, 章荷珍. 物联网 LED 智能照明产业的崛起 [J]. 中国照明电器, 2013 (1): 11-15.
- [4] 谢 永, 许 炜, 王新勇. 基于 ARM 的智能节能照明系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (10): 2794-2797.
- [5] 刘雨鑫, 刘诗斌, 荣皖芳. 一种用于白光 LED 的亮度控制电路 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (3): 555-557.
- [6] 沈建华, 杨艳琴. MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与实践 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [7] 魏小龙. MSP430 系列单片机接口技术及系统设计实例 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [8] 吴爱华, 茅靖峰, 吴国庆, 等. 基于 MSP430 的风力风向无线数据采集系统 [J]. 低压电器, 2010, 16: 24-28.
- [9] Semefab Limited. Visible light detector product data sheet [EB/OL]. http://www.semefab.com/media/21073/412101_b_rev_d.pdf, 2014-05-04.
- [10] NXP Semiconductors. Real-time clock/calendar product data sheet [EB/OL]. http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PCF8563.pdf, 2012-04-03.