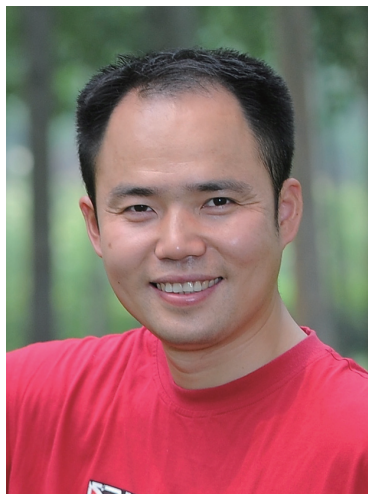


应用WSN技术提高飞机部件 数字化装配制造水平

Improve Aircraft Digital Assembly and Manufacturing With WSN Technology

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 张国义
航空工业发展研究中心软件工程部 曹晓东



张国义

西北工业大学博士研究生,从事航空航天测控技术及工业现场数据采集技术研究。

工业测量系统在国外航空工业中已广泛应用在部件制造装配、型架安装和飞机检修等方面。据国际资料,国外航空工业已发展到室内设备测量系统。这种室内吊顶定位式激光测量系统坐标选定方便、测量简便、数据可靠;如安装在紧固件的工具上,可设置坐标点或选择在螺栓接头处设坐标。因此,测量系统是引领航空制造业检测和自动化技术的基础,特别是针对民用飞机全机部件对

无线传感器网络系统提供了一种全新的数据采集模式,它将带动针对飞机制造数字化柔性装配制造技术领域新的重大变革。基于FPGA的无线传感器网络节点设计在实验中表现出比较好的效果,可以实现监测设备信号的采集传输与处理。

接、外型测量等。

数字化柔性装配技术体系^[1]是针对飞机制造的特点,利用数字化技术,对飞机独特的组部件装配和部段对接装配工艺进行研究而形成的现代先进的飞机装配新技术,它纠正了传统飞机装配工艺技术的缺点,可以尽量减少各种专用工装和夹具,增加了装配工装的通用性,降低了工装制造成本,实现了数字化自动装配,缩短了工装准备周期,大幅度提高了飞机的装配效率和质量。

数据采集技术是激光跟踪测量技术和自动化机械随动定位控制技术的主要支撑技术之一。而无线传感器网络系统提供了一种全新的数据采集模式,它体现了在数字化柔性装配中测控技术新的方向。测量系统主要实现装配制造过程中的数据采集与监测,提高测量精度和装配准

确度;实现装配过程中的数据采集与位置监测,并将测得结果反馈给计算机,通过软件系统进行各种运算操作,计算机软件将获得的测量数据进行汇总、整理分析、处理、传递并向制造系统发出控制指令等。

在传统上为了对制造过程进行检测,需要使用大规模由电缆连接在一起的传感器阵列来进行数据探测,传感器造价昂贵且能耗很高。由于数量的限制,这些传感器必须被布放在特定的位置。由于位置复杂,部署和电缆连接工作非常困难,一般需要专门的走线系统来保证传感器位置的准确,如果使用成本很低且易于部署的无线传感器网络(WSN)来替代这种由大量昂贵设备构成的探测系统,将节约大量的成本^[2]。

针对数字化柔性装配体系的具体应用,对在航空器制造过程数据采

集这个特定的场景下,需要对一些关键部件和设备的技术参数进行监测与跟踪,以监控设备的运行情况,合理调度、预报关键部件的失效概率,制定关键部件的维护或更换计划,避免出现大的系统故障或航空制造设备长期的停转,降低工作强度和人为误差发生概率,提高航空制造设备试验效率,保障航空制造设备安全运行。

在不便于安装有线传感器的情况下,均可考虑无线传感器网络。WSN 的具体应用需求包括:(1)运动机构的监测。包括轴角机构、滚珠丝杆等旋转机构振动特性的监测与跟踪,以及角度检测与跟踪等;(2)航空制造设备运行监测。对航空制造设备运行状态进行监测,包括压力状态、航空制造设备安全联锁状态等,具体监测温度、压力、位置、电流、电压等物理参数。

无线传感器网络研究现状及重点

无线传感器网络体系结构是网络的协议分层和网络协议的集合,是对网络及其部件所应完成功能的定义和描述^[2]。图1所示为无线传感器网络体系结构分层的网络通信协议,在无线传感器网络管理连同应用

支撑技术中,其发展主要集中在几个方面,在协议通信层主要的研究重点是数据链路层 MAC 协议及网络层路由协议;在网络管理技术层主要的研究方向是收集数据的管理、节能问题的解决连同网络通信安全的实现;在网络支撑技术层,主要的研究点是节点定位问题的解决、时间同步技术的实现连同用户应用接口的实现,其中,协议的研究和节能的实现又是相辅相成的。

1 MAC 协议

无线传感器网络研究的核心问题之一是功耗管理。通过对现有系统的分析可知,射频模块是节点中最大的耗能部件,是其优化的主要目标,而 MAC 协议直接控制射频模块,对节点功耗有重要影响。

传感器节点的无效功耗主要有以下4个来源。(1)空闲侦听:节点不知道邻居节点何时向自己发送数据,射频模块一直处于接收状态,导致消耗大量的能源,这也是无效功耗最主要的来源;(2)冲突:多节点同时向同一节点发送多个数据帧,信号相互干扰,使得接收节点无法准确接收,重发而造成能量浪费;(3)串扰:接收和处理发往其他节点的数据属于无效功耗;(4)控制开销:控制报文不传送有效数据,消耗的能量对用

户来说是无效的。

由于上述原因,无线传感器网络 MAC 协议一般采用了“侦听/休眠”交替的信道侦听机制,节点空闲时自动转换为休眠状态,以减少空闲侦听。根据协议中为减少数据碰撞和串音现象而采用的不同方法,将 MAC 协议分为3类:(1)利用时分复用(TDMA)的方式为各节点分配单独固定的信道;(2)通过频分复用(FDMA)或码分复用(CDMA)的方式,实现无冲突的强制信道分配;(3)通过竞争机制,确保节点随机使用信道并且不受其他节点的干扰。

下面介绍几个比较有代表性的协议。S-MAC 和 T-MAC 协议在发送数据时采用带冲突检测的载波侦听多路访问以避免冲突;WiseMAC 和 B-MAC 协议在发送数据时采用载波侦听多路访问(CSMA),WiseMAC 通过增加载波侦听的范围来解决隐藏节点问题,代价是增加了功耗;而在 B-MAC 中,RTS/CTS 协议可由高层通过 MAC 协议提供的控制接口实现。BMA 协议借鉴了 LEACH 的分簇思想;D-MAC 在分析自适应工作/休眠调度的基础上,发现了数据转发中断问题,提出了一个新颖的解决方案;IEEE802.15.4 是美国电气电子工程师学会(IEEE)定制的标准,无线传感器网络是其主要应用领域之一,现在市场上已能够购买到符合该标准的产品化射频芯片。

2 路由协议

无线传感器网络路由协议的任务是在传感器节点和汇聚节点之间建立路由,可靠地传递数据。由于无线传感器网络资源严重受限,因此路由协议要遵循的设计原则包括不能执行太复杂的计算、不能在节点保存太多的状态信息、节点间不能交换太多的路由信息等。为了有效地完成上述任务,已提出的很多种路由协议大都利用了无线传感器网络的以下特点:(1)传感器节点按照数据属性

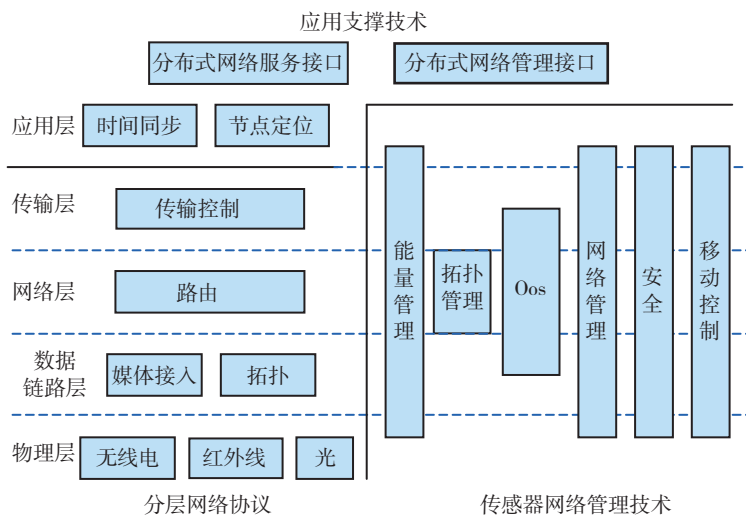


图1 无线传感器网络结构

寻址,而不是IP寻址;(2)传感器节点监测到的数据往往被发送到汇聚节点;(3)原始监测数据中有大量冗余信息,路由协议能够合并数据、减少冗余性,从而降低带宽消耗和发射功耗;(4)传感器节点的计算速度、存储空间、发射功率、电源能量有限,需要节约这些资源。

无线传感器网络路由协议能够归纳为以下几个类别:(1)以数据为中央的路由协议;(2)基于簇(Cluster)的路由协议;(3)基于位置的路由协议;(4)基于数据流模型和服务质量需要的路由协议。

除了前面几类经典的路由协议设计方法,近年又出现了很多针对无线传感器网络的新路由协议和设计方法,路由协议研究正逐渐深入和务实。例如,利用图论中流量优化的方法来为采样数据报选择路由;将MAC层和路由层协议捆绑设计,用跨层优化技术来进一步节省功耗;路由能对随机部署的无线传感器网络进行自适应调整网络拓扑,并让冗余节点经常处于睡眠状态中。

3 网络节能

能量的节约使用是采集节点工作的基础,采集节点节能问题,几乎贯穿无线传感器网络发展的各个方面。协议的建立需要考虑节能问题,从上述MAC协议的研究和路由协议的实现都能够看出;无线传感器网络中的数据收集需要考虑采集节点节能问题,采集节点没有能量,数据无法收集;时间同步也都需要考虑节点节能问题。

当然,纯粹的节点节能方式也有很多,比如让采集节点定期“休眠”和缩短节点射频工作时间等。但是,大部分的节能措施还是包含在了具体实现细节当中,如文献[2]采用了一种带有能量控制的有效路由方式,通过调整每个节点发送数据时的数据传输范围进而调整消耗的能量,以节省资源,从而延长网络寿命。

航空器制造过程 WSN 应用系统的体系结构

1 网络拓扑结构

根据航空器制造过程数据采集的布设区域结构复杂、待测参数数量多、范围广等实际需求,采用分层的 WSN 网络拓扑结构,如图 2 所示。

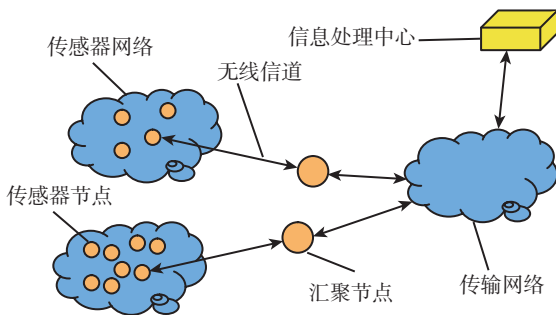


图2 WSN分层拓扑结构

在图 2 所示的分层 WSN 中,具有某种关联的网络节点组成簇。在一个簇内,通常有一个按一定事先确定规则产生的、被称为簇首(也称为汇聚节点 Sink)的节点。采集节点将采集并压缩的监测数据传到汇聚节点,然后由汇聚节点通过复接组帧发送方式完成多个 WSN 采集节点数据的汇集,最后在监控服务器将整个监测区域内的数据进行集中处理。

2 WSN 系统采集节点的实现

WSN 的性能在很大程度上依赖于 WSN 采集节点的特性。图 3 显示的是基于 FPGA 的 WSN 采集节点。采集节点采用选用 Altera 的 Cyclone II EP2C5 处理器,系统采用

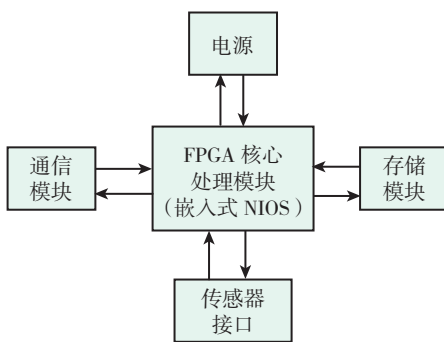


图3 基于FPGA的WSN采集节点

2.4GHz 无线单片收发芯片 nRF2401 射频收发器,并集成多种传感器,用以完成采集节点的数据采集、数据处理和通信。

基于 FPGA 的 WSN 采集节点在 FPGA 中嵌入一个 32 位的 Nios II 软核处理器,用于控制数据的传输、存储。主要完成了此数据处理平台硬

件系统的定制及编写相应程序,以控制数据的采集、存储及显示^[3-6]。采用 Nios II 处理器为核心进行设计,可以将全部的接口电路集成在同一片 FPGA 上,结构简单,同时利用 Nios II 软核可在线配置的优点,通过软件编程改变 FPGA 的内部结构,即可迅速、方便地实

现系统性能的扩展、升级,大大缩短了系统的开发周期,提高了性价比。能够利用有限的资源来进行高效率、低能耗的并行操作,程序核心很小,能够有效地运行在 WSN 上并执行相应的管理工作、自动发现和组成网络,提供可重用的组件,并能提供简单的调度机制。

基于 FPGA 的 WSN 采集节点硬件通用平台

1 传感器模块硬件结构设计

FPGA 芯片选用的 Altera Cyclone II EP2C5,其逻辑单元有 4608 个 LE,26 个 M4K RAM 块,142 个用户 I/O 引脚,选择内含采样保持器的 12 位 A/D 转换器 AD7892-1,系统中 A/D 转换器 AD7892-1 采用独立工作模式,其控制引脚设置为:CE 和 12/8 接高电平;CS 和 A0 接低电平。此时,AD7892-1 设置为 12 位 A/D 转换,12 位数据输出,其转换完全由 R/C 控制,如图 4 所示。当 R/C=0 时,启动 12 位 A/D 转换;当 A/D 转换结束时,状态信号 STS=0,否则 STS=1;当 R/C=1 时,读取 12 位

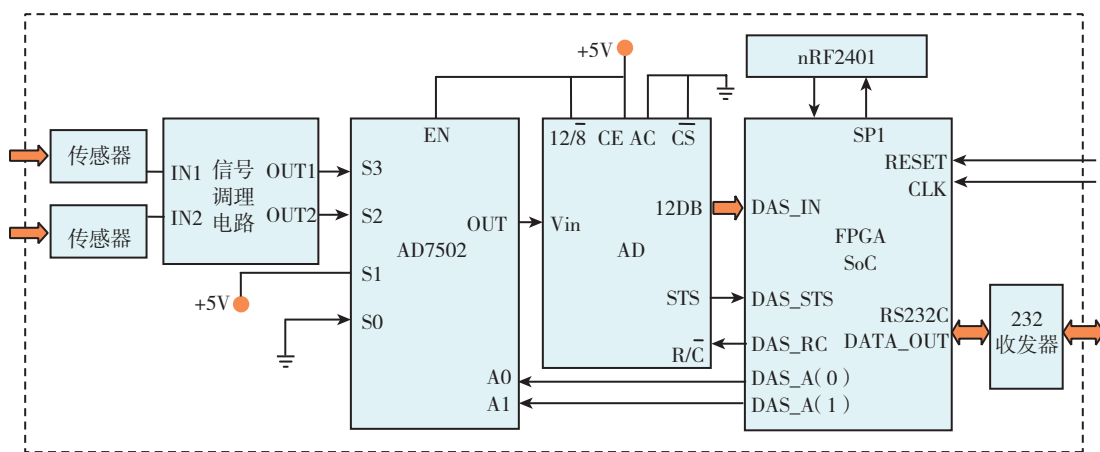


图4 传感器模块硬件结构设计

状态; St3 为输出转换数据; 选择其他通道, 返回 St0 状态。DAS 控制单元采用 VHDL 语言进行开发。

结束语

在航空制造设备进行了 WSN 航空制造设备监测应用的初步尝试, 实现了 WSN 的拓扑结构管理,

并开发研制了航空制造设备 WSN 无线传感器网络测量系统, 实现了对航空制造设备测量数据采集。采用 WSN 的测量数据能对航空制造设备结果进行有效的修正。

无线传感器网络系统提供了一种全新的数据采集模式, 它将带动针对飞机制造数字化柔性装配制造技术领域新的重大变革。基于 FPGA 的无线传感器网络节点设计在试验中表现出比较好的效果, 可以实现监测设备信号的采集传输与处理。但是由于射频信号多径效应的原因, 传输信号的质量和距离会有不同程度的影响, 这些问题都有待更深入的研究。

参考文献

- [1] 邹方, 张书生. 飞机总装自动化校准对接系统. 航空制造技术, 2008 (7): 32-36.
- [2] 陈涤. 网络化测控系统中 WSN 几个关键问题的研究 [D]. 山东: 山东大学, 2007.
- [3] 汤少维. 基于 FPGA 控制的高速数据采集系统设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
- [4] 李云. 超高速高精度并行 ADC 系统设计与实现. 微计算机信息, 2008 (7-2): 307-309.
- [5] 谭安菊, 龚彬. USB2.0 控制器 CY7C68013 与 FPGA 接口的 Verilog HDL 实现. 电子工程师, 2007 (7): 52-55.
- [6] 袁江南. 基于 USB2.0 与 FPGA 技术的高速数据采集系统的设计. 电子技术应用, 2007 (7): 116-118.

(责编 泰山)

A/D 转换数据。R/C 信号由 FPGA 芯片的 DAS_RC 控制。整个系统由基于 FPGA 的片上系统 (SoC) 控制。其中, FPGA 芯片中的 DAS_STS, DAS_RC, DAS_IN, DAS_A 引脚为用户定制逻辑, 即 DAS 控制单元的外部接口, 用于控制 AD7892-1 的工作时序转换和 AD7502 的通道选择。

2 处理器模块 SoC 结构的实现

SoPC 设计由 CPU、存储器接口、标准外设和用户定制逻辑单元模块等组件构成。Altera 的 SoPCBuilder 工具提供了大量 IP 核可供调用, 可以很方便地在单片 FPGA 芯片上配置嵌入 Nios II 处理器软核、片上 RAM 和 RS 232 控制器、扩展片外存储器、用户定制逻辑单元, 同时自动地为系统的每个外设分配地址、连接系统总线, 确定设备优先级, 其内部结构如图 5 所示。

系统实现重点是:(1) 在 Cyclone II EP2C5 FPGA 中, 使用 VHDL 编写控制信号驱动 ADC, 并且协调两者的工作;(2) 设计与 nRF2401 接口逻辑, 使用 C 语言编写

程序, 通过 SoPC Builder 配置的 SPI 接口读写向 nRF2401 输出的数据。

SPI 接口的编程设计实现节点通过 nRF2401 将采集到的数据射频发出, Nios 通过 SPI 接口读写信号并进行相应的处理。通过 Quartus II 中的 SoPC Builder 为 Nios 核配置 SPI 接口。在系统中, 将 SPI 配置为从设备。软件通过访问存储器中映射的 5 个 16 位的寄存器来控制 and 读写 SPI 接口。

3 数据采集控制单元的实现

数据采集系统 (DAS) 控制单元是整个系统的核心, 其输入端口及其功能: DAS_STS 用于接收 AD7892-1 的 STS 状态信号; DAS_IN (12 位) 用于接收 AD7892-1 并行 12 位转换输出; CLK, RST 用作系统时钟和 RESET 的信号。输出端口 DAS_RC 接 AD7892-1 的 R/C 端, 用以控制 A/D 转换器的启动和读数; DAS_A 用作控制 AD7502 的 A1A0 通道选通信号; DAS_OUT (加通道的序号为 16 位) 用作 DAS 控制单元的 16 位输出数据。

DAS 控制单元的有限状态机 (FSM) 有 4 个状态, 分别为 St0, St1, St2, St3。St0 为选择通道, 启动 A/D 转换, 进入 St1 状态; St1 为等待转换结束, 若转换结束, 进入 St2 状态, 否则保持在 St1 状态; St2 为发出读数据信号, 进入 St3

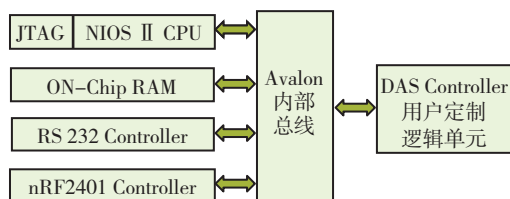


图5 FPGA内部功能框图的实现