

基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 水下异物打捞机器人 控制系统的设计

窦 普, 廖礼斌, 张志刚

(中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要: 核电站日常运行或大修期间进行水下作业时, 普遍存在检测不直观、异物无意跌落等问题, 对堆芯回路及燃料组件造成影响, 导致大修周期变短、时间变长、资源耗费严重; 针对这些问题, 该文提出了一种基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 嵌入式操作系统的核用水下异物打捞机器人的设计方法; 硬件上将各功能节点模块化, 采用 RS485 总线通讯方式, 便于系统扩展及维护; 软件上将 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 嵌入式操作系统移植于微处理器中, 实现了系统的实时性, 同时增强了系统的鲁棒性和冗余性; 现场水下试验证明, 该打捞机器人具有较强的可靠性, 同时也验证了该设计方法的可行性和有效性。

关键词: 水下机器人; 通讯总线; 嵌入式操作系统; 异物打捞; 微处理器

Design of a $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ Based Control System for a Underwater Foreign-salvage Robot

Dou Pu, Liao Libin, Zhang Zhigang

(Institution of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: In the daily operation or overhauling period of nuclear power station, the underwater operations have the prevalence that detection is not intuitive, unintentional foreign falls and other issues. These affect the core circuit and the fuel assembly, cause overhaul cycle shorter, time becomes longer, severe resource consumption. To solve these problems, this paper presents an design method based on $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ embedded operating system nuclear foreign-salvage robot in underwater. In hardware each node of function uses modular design, the communication method based on RS485 bus. It facilitates system expansion and maintenance. In software $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ embedded operating system is migrated into the microprocessor. This method realizes the system's real-time, enhances the system's robustness and redundancy. The field tests in underwater show that the salvage robot has strong reliability, but also verify the feasibility and effectiveness of the design method.

Keywords: underwater robots; communication bus; embedded operating system; foreign-salvage; microprocessor

0 引言

随着能源和环境问题的日益突出, 核电以其清洁、环保和相对安全的实际运行业绩受到世界各国的广泛重视。截止 2010 年底, 世界上的 30 个国家中共有 441 台核电机组在运行, 总装机容量大约 359 GW^[1]。核安全是核电站的生命线, 不仅与核电行业的发展息息相关, 更必须为人类、环境发展担负责任。核电运行的安全性, 一直是核电运行管理的重中之重。

核电站内放射性水池面积较大又没有绝对可靠的异物防范措施, 在大修期间由于参与人员多, 常常都是许多工种交叉作业。因此, 异物落入水池的事件常有发生。特别是异物若落入反应堆底部或堆芯狭窄的环境中, 普通的异物打捞工具往往束手无策, 通常需要吊出反应堆堆芯组件进行彻底检查和异物打捞, 这种情况将造成大修关键路径的延迟和重大的经济损失。而且, 堆芯大件的吊装往往面临一些不可知的风险, 操纵不当会对电站内的维修人员造成极大的辐照危害。因此, 核电站有必要开发一些多自由度的机器人及智能系统应用于反应堆堆芯及构件池等水下环境中精确打捞^[2]。

本文所论述的水下异物打捞机器人应用于核电站日常运行或停堆换料大修期间, 在燃料水池、传输池、构件池及堆芯水池满水情况下, 对一些特殊位置进行视频检测及异物打捞, 以消除异物对堆芯回路及燃料组件造成的影响, 具有重量轻、可靠性高、操作灵活等特点。

1 总体系统设计

现有的各种通讯网络总线产品, 由于其兼容性差、造价高、维护不便等方面的原因, 未能得到普遍应用。

RS485 总线作为一种简易、廉价的通信技术, 其收发器采用平衡驱动和差分接收, 具有抑制共模干扰的能力。总线上允许带多个驱动器和接收器, 最新的收发器可带 128 个节点, 用于构建多点通信网络。由于 RS485 总线具有设备简单、价格低廉、能进行长距离通信的特点, 故在工程中得到了广泛应用。

本系统采用分布式控制系统, 网络物理拓扑结构采用总线型结构。通过对分布式系统中不同节点进行功能层次划分, 即得到了分层式体系结构, 如图 1 所示。这种结构能很好地解决智能和控制精度的关系, 但在灵活性、实时性和适应性方面存在缺陷。

该体系结构包括运动规划决策层、任务层和执行子模块 3 个层次。运动规划决策层完成一些高层的规划决策以及传递给用户必要的信息并接受用户的指令; 任务层即协调层, 包括对

收稿日期: 2014-02-07; 修回日期: 2014-04-05。

作者简介: 窦 普 (1982-), 男, 山西应县人, 助理研究员, 主要从事特种机器人技术研究及特种检测设备开发方向的研究。

用户指令的解析以及一些可以在上层控制下自主执行的行为, 比如避碰、低电压保护、限位、预定动作等。控制子模块即执行控制层, 则是把用户指令转化为实际功能执行动作, 或者用自动控制理论和方法高速地控制执行器的运作^[4]。

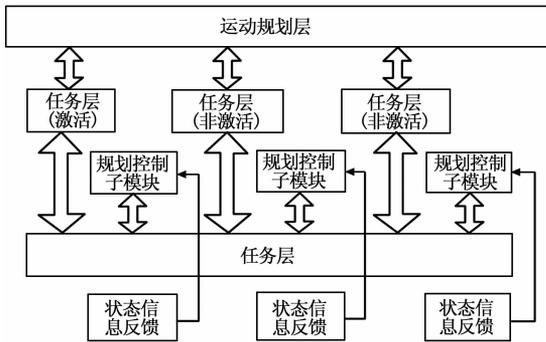


图 1 分层式体系结构图

图 2 为总体系统结构框图, 其中控制机箱作为运动规划层, 负责完成用户指令的读取、图像的采集压缩存储等; 各通讯控制卡作为协调层, 负责完成对规划层命令的解析、一些保护动作的自主执行以及各功能模块间的信息通信; 驱动模块作为执行层, 负责完成对执行机构的运动控制以及过流、过热等自我保护反馈的执行。

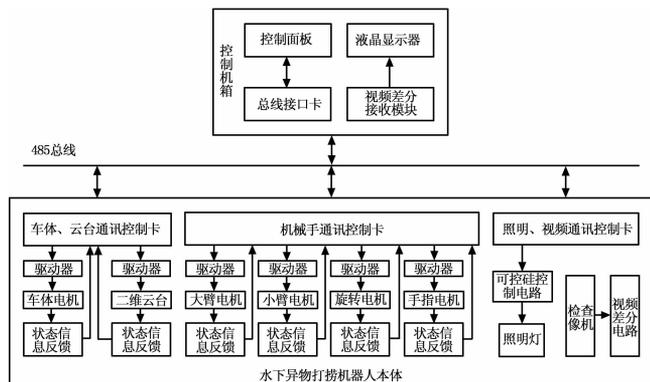


图 2 总体系统结构图

2 系统电路设计

在设计过程中, 发现各节点在接口以及功能特点上具有一定的相似性, 节点控制器可以设计成一块通用的控制卡来完成各项功能, 实现各节点模块化, 同时具有方便扩展、适应性强等特点^[5]。

2.1 控制器的选取

控制器是整个控制系统的核心部件, 直接影响到控制系统的功能和性能。因此, 合理选用控制系统的核心控制器, 对系统的设计至关重要。

根据各节点功能的要求, 须要求控制器具备串口、PWM 口、SPI 口、多个 I/O 口、AD 等常用接口。故此, 选择了 TI 公司推出的 MSP430F149 作为主处理器, 这是一类具有 16 位总线带 Flash 的单片机, 由于其性价比和集成度高, 受到了广大技术开发人员的青睐。该控制器可以在超低功耗模式下工作, 可靠性好, 加强电干扰运行不受影响, 适应工业级的运行环境^[6]。

2.2 视频差分传输电路的设计

作为一类主要依据视频图像完成现场作业的机器人来说, 视频图像的质量直接影响到了现场操作的准确性。视频信号在传输过程中对各种干扰信号非常敏感, 又需要长距离传输, 并且现场有多类大型设备运行, 此处考虑采用双绞线方式传输视频信号。

Intersil 公司的 EL5171 是一款 250 MHz 低功耗集成差分宽带放大器, 输入信号是单端而输出信号始终是差分形式, 因而主要用于视频传输应用中驱动双绞线。其发送原理图如图 3 所示。

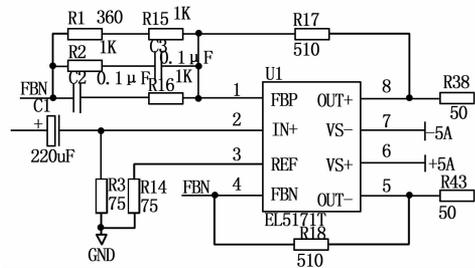


图 3 视频发送原理图

视频信号在双绞线中传输时, 由于电阻损耗、介质损耗及辐射损耗, 信号功率从进入传输线传送到负载时会衰减掉一些, 且衰减量的大小与传输距离和信号频率有关, 传输距离越远, 信号频率越高衰减越大。经过一定距离的传输视频图像就会变得不清晰, 尤其是高频部分, 表现为图像的边缘处模糊不清, 整体亮度偏暗。因此在发射端必须设置一定的增益, 在接收端进行频率加权补偿, 即频率越低增益越低, 频率越高增益越高, 对不同频率呈现不同的传输特性。R1、R2、C2、C3、R15、R16 的作用就是设定放大器的基本增益。

可以与 EL5171 配套使用的是 Intersil 公司的 EL5172。EL5172 的作用是将双绞线传输来的差分信号还原为单端输出的视频信号, 且要求复合视频信号的幅度保持在 1 V/3 dB, 输出阻抗为 75 Ω 。EL5172 是低功耗差分接收器, -3 dB 带宽 250 MHz, 信号上升斜率达 800 V/S, 放大器的输入共模电压信号范围为 -4.3 ~ +3.3 V, 差分信号输入范围为 -2.3 ~ +2.3 V, REF 脚的输入电压范围为 -3.6 ~ +3.3 V, 如果输入共模或差模信号超出以上范围将引起输出信号失真, 输出信号的范围为 -3.8 ~ +3.6 V, 其共模抑制比达到 95 dB, 因而可很好的抑制外界干扰信号。其接收原理图如图 4 所示。

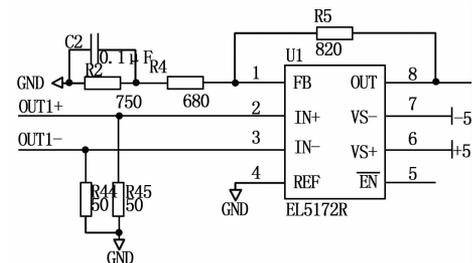


图 4 视频接收原理图

3 系统软件设计

控制系统的软件是整个控制系统正常运行的重要环节之一, 系统软件的质量直接关系到系统功能的实现。传统的软件

控制系统大多采用一个前后台系统，软件结构采用单任务的顺序机制，即应用程序是一个无限循环，循环中调用相应的函数来完成对应的操作，而与时间相关性较强的事件靠定时中断来保证。这种方式编程较为直观，但当系统功能较为复杂时，这种单任务机制很难保证系统的实时性与可靠性。

基于此问题，针对所设计系统功能的复杂性，本文将实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 应用于系统的软件编程，通过将系统功能细化为几个核心任务，由 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 实时内核进行调度，实现了多任务的并行运行，大大地提高了系统的实时性和可靠性。同时在软件设计时，采用了一种模块程序设计法，即把整个程序过程分成若干个部分、封装成独立的函数模块，这样易编写调试，并且一个模块可被多个任务在不同条件下调用。

3.1 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 在 MSP430 上的移植

嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 是基于优先级的抢占式实时多任务操作系统，包含了实时内核、任务管理、时间管理、任务通信同步（信号量，邮箱，消息队列）和内存管理等功能^[7]。绝大部分代码用 C 语言写成，与硬件相关部分用汇编语言编写，而且它的源代码是公开免费的。它是面向中小型嵌入式系统的，包含全部功能模块的内核大约为 10 k，如果经过裁减只保留核心代码，则可压缩到 3 k 左右。

$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 是针对嵌入式系统编写的，移植起来十分方便，只需改动部分与硬件相关的代码即可。 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的移植主要集中在 3 个文件：OS_CPU.H、OS_CPU_C.C 和 OS_CPU.ASM。

(1) OS_CPU.H 文件的修改：定义数据类型为 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 系统可用类型；定义开关中断两个宏为处理器相应得开关中断函数；设置堆栈增长方向与处理器相一致；任务级任务切换函数 OS_TASK_SW () 的定义。

(2) OS_CPU_C.C 文件的修改：声明 10 个 C 函数，除堆栈初始化函数 * OSTaskStkInit () 外，其余函数只需声明不必包含代码。

(3) OS_CPU.ASM 文件的修改：最高优先级任务开始函数 OSStartHighRdy () 的编写；任务级任务切换函数 OSCtxSw () 的编写；中断级任务切换函数 OSIntCtxSw () 的编写；时钟节拍中断服务程序的编写，根据实际编写一般定时器或看门狗定时器设置的时钟节拍。

3.2 软件系统的设计

软件是在 IAR 公司的 Embedded Workbench 下开发的，它提供了方便且功能丰富的界面，使开发和调试的效率大大提高。我们采用它作为开发平台，用 C 语言来设计系统软件。根据系统的性能指标和技术要求，将应用程序划分为以下几个任务块：

(1) 与上位通讯任务：采用通用的 RS485 的通讯方式，实现上下位机间的控制及传感器信息的传递。

(2) 各传感器信息采集任务：主要对机器人本体上各传感器数据进行相应采集处理，实现上位机对机器人位姿及运动的控制。

(3) 车体运动控制任务：实现对机器人速度、位置的控制。

(4) 云台运动控制任务：实现对摄像机二维云台速度、位置的控制。

(5) 机械手运动控制任务：实现对机械手大臂、小臂、旋

转、手指多自由度运动的控制，通过划分任务，制定各任务的优先级，实现应用程序的调度过程，即各任务运行状态的切换、任务之间的通讯实现以及各任务相互配合以完成系统功能。其系统运行流程图如图 5 所示。

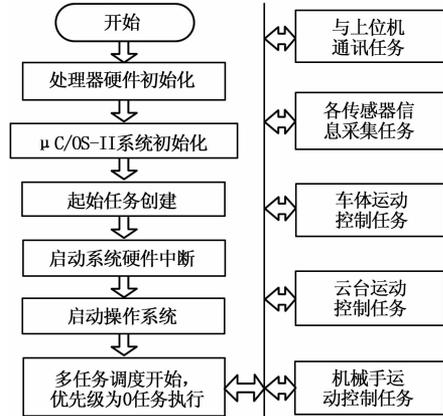


图 5 系统运行流程图

4 试验结果与分析

采用 RS485 转 RS232 调试工具对异物打捞机器人车体进行了实验验证，以计算机作为主节点，机器人车体各控制节点作为从节点，485 网络节点都能够以 9600bps 的速率正常通信，各任务执行正常。软件设计上采用嵌入式操作系统，将各任务函数结构化，较查询式软件设计，实时性有明显提高，降低了软件运行出错率。

5 结论

该设计方法，为多功能、复杂系统提供了一种新的解决方案。硬件上采用总线通信方式、模块化设计，减少了系统配线，提高了可靠性，易于系统的维护及功能扩展；软件上采用嵌入式操作系统，实现多任务的并行运行，大大地提高了系统的实时性和可靠性。据此方法投产的核用水下异物打捞机器人已成功应用于中广核旗下的多家核电站，设备运行情况良好，满足实际工况需要，缩短了关键路径的时间，节约成本，为大修服务人员提供了便利，也为核电站的安全运行提供了保障。

参考文献：

[1] 肖雪夫, 张伟华. 核电站反应堆的主要堆型简介 [J]. 机器人技术与应用, 2011, (3): 2-11.
 [2] 刘青松, 张一心, 向文元, 等. 核电站机器人技术应用现状及发展趋势 [J]. 机器人技术与应用, 2011, (3): 12-16.
 [3] 郝 铭, 刘景泰, 卢桂章. 基于 RS485 总线分布式智能控制系统的设计与实现 [J]. 自动化与仪表, 2005, 20 (2): 23-25.
 [4] 窦 普, 蔡 根, 黄冰峰, 等. 基于 CAN 总线移动机器人控制系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (12): 2975-2978.
 [5] 李治洋, 郭 威, 葛 新. 模块化水下机器人控制系统设计 [J]. 机械设计与制造, 2012, (1): 36-38.
 [6] 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.
 [7] Labrosse Jean J. 嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ (第 2 版) [M]. 邵贝贝, 等译. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.