

文章编号:1001-9081(2005)09-2163-02

## 双冗余飞行控制计算机系统设计与实现

石贤良, 吴成富

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

(laohainpu@21cn.com)

**摘要:**采用冗余技术是提高系统可靠性的重要手段。结合工程实践,详细介绍了一种双冗余飞行控制计算机系统的设计思路与方法。首先,描述系统设计结构和工作原理,然后,重点讲述如何在嵌入式实时操作系统 VxWorks 环境下进行多任务算法设计的要点。该冗余系统能有效地提高安全性和任务可靠性,并具有良好的实时性和实用性的特点。

**关键词:**计算机控制系统;双冗余;可靠性;Vxworks

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A

## Design and implementation of dual-redundancy flight control computer system

SHI Xian-liang, WU Cheng-fu

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

**Abstract:** Redundancy technology is very important to improve the reliability of system. A kind of new method of dual-redundancy flight control computer system was presented in detail. First, the system architecture and the basic principle working were introduced in brief. Second, how to write multiple-task arithmetic in the embedded real-time operating system of VxWorks was introduced. This dual-redundancy system can improve safety reliability and task reliability effectively, and by using this method, the designed system becomes good real-time and practicable.

**Key words:** control computer system; dual-redundancy; reliability; VxWorks

### 0 引言

为了保证飞行控制系统的任务可靠性和安全可靠性,在现代飞行控制系统特别是电传飞行控制系统中主要采用冗余容错技术,相应的飞行控制计算机均采用冗余技术<sup>[1]</sup>。本次设计采用自监控二模冗余飞行控制计算机系统结构<sup>[2]</sup>。嵌入式实时操作系统 VxWorks 是一个运行在目标机上的高性能、可剪裁的嵌入式实时操作系统,它以其良好的可靠性和卓越的实时性被广泛地应用在通信、军事、航空、航天等高尖端技术及实时性要求极高的领域中。

结合在参与某飞行控制计算机系统项目过程中的一些体会,探讨和总结了双冗余飞行控制计算机系统设计方法和在 VxWorks 环境下进行软件设计实现的要点。

### 1 系统结构设计

#### 1.1 系统硬件结构图

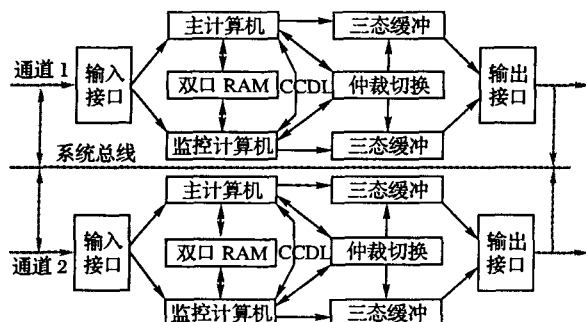


图1 自监控二模冗余飞行控制计算机系统结构

自监控二模冗余飞行控制计算机系统结构最大的好处是系统结构紧凑,利用共享内存技术,提高了系统的通信时间和数据的交换质量,并且在系统时间允许的情况下,可利用监控计算机对输入的信号进行采样和表决,节省了主计算机的处理时间,提高了系统部件的利用率。同样也提高了系统的可靠性。它兼顾了双-双冗余系统的特点,又具有自己的优点,是一套较实用的结构。图1为自监控二模冗余飞行控制计算机系统结构图。

#### 1.2 系统工作原理

该系统的工作原理:在通道内部,输入的信号分别输入到主计算机和监控计算机,分别进行监控表决,然后两个计算机通过共享存储器进行对话,决定输入信号的对错,进行各自解算控制律的计算,同样对计算的中间结果和最后结果进行监控表决,若结果正常则进行下一步处理,否则发现故障则两台计算机分别进行故障诊断和故障定位,确定故障计算机并将它切除,同样在通道之间,每隔一定的时间通过交叉数据通信链(CCDL, cross-channel data link)相互通信。若某一通道发生了永久性故障,则由仲裁机构进行通道的切换。它的信号决策是在监控计算机里面通过对共享内存的操作进行的,这样就很好地解决了比较器的稳定性问题。

### 2 系统余度管理软件设计

飞行控制计算机系统软件作为飞行控制系统的核心,承担着系统控制律计算、余度管理、机内自检测(BIT)和系统管理等任务,同时指挥协调系统有序的工作,管理系统硬件资源,是系统功能实现和保证飞行安全的关键。根据飞行控制

收稿日期:2005-03-20;修订日期:2005-05-23

作者简介:石贤良(1977-),男,海南文昌人,硕士研究生,主要研究方向:飞行控制系统设计与仿真、导航、制导与控制; 吴成富(1962-),男,浙江金华人,副教授,主要研究方向:飞行控制系统设计与仿真、视景仿真、交互式仿真、实时仿真。

计算机系统各功能模块, VxWorks 中任务调度的特点以及依照完成各任务的不同来划分飞行控制计算机系统中各功能模块。

### 2.1 系统任务划分

作为飞行控制系统调度模块的飞行控制计算机软件, 依照任务的优先级别协调、调度和安排各任务的执行。由于实时性的需要, 应根据任务组在飞行控制系统中所具有的作用、重要程度和其本身的变化率, 可将多任务划分成各种不同速率组任务调度执行。

系统任务调度与管理应遵循下面几条原则<sup>[3]</sup>:

- 所有的任务按系统要求的任务最高执行频率划分为几大类, 组成相应的不同速率任务组, 即每个速率组中所有任务执行频率是相同的, 并满足该组最高执行频率的要求, 且相邻频率组按整数倍增加。
- 执行频率高的速率组具有高的优先级, 以确保其速率组的重复执行频率要求。
- 在速率组内部, 任务采用非剥夺方式调度算法。
- 在速率组之间, 任务调度采取剥夺方式调度算法。
- 根据 VxWorks 中系统任务调度算法的特点, 采用基于优先级的抢占式调度算法和时间片轮转调度算法相结合, 对各个任务进行管理。

对于本次设计的自监控二模冗余飞行控制计算机系统, 其基本工作流程如图 2 所示, 图中所示为两冗余通道之间的工作情况。

### 2.2 系统余度管理算法

按照实时多任务软件开发步骤, 设计飞行控制计算机系统余度管理算法结构。

#### 2.2.1 需求分析

飞机飞行控制系统需求如下:

- 飞机的传感器数据必须每隔 20ms 采样一次;
- 飞机的控制面根据当前周期内获得的数据, 每 20ms 调整一次;
- 地面控制台发出的信号是基于中断事件, 高于一切事件的优先级;
- 控制律计算是具有固定周期的任务;
- 余度管理任务应充分考虑实时性和优先级的划分以

及任务之间的通信机制。

#### 2.2.2 任务划分<sup>[3]</sup>

根据余度管理的功能将其划分为 6 个任务: 启动 BIT、引导操作系统的功能模块划分为后台任务, 只在系统启动时加载, 以后定时进行检测, 后台任务只要保证在任务周期内能够完成即可, 没有特殊的实时性要求; 任务同步作为初始态和调整态, 运行于系统中; 输入数据的采集、比较及重构作为一组任务; 控制律的计算作为计算任务; 数据输出、比较监控作为一组任务; 计算机的故障诊断及通道故障逻辑作为一组任务。相应的用 main、Timesame、Task1、Task2、Task3、Checkcomputer 表示 6 个任务。

##### (1) 任务优先级的划分

- 高优先级的设备服务任务 (Task1)

此设备服务任务每 20ms 被信号量触发。当他从传感器上读取数据后, 向消息队列发送消息。若比较数据的结果不相同, 则转入相应的程序模块进行系统重构, 取得正确的传感器信号。若不能进行重构则进行计算机的故障诊断及通道故障逻辑, 切换到正常通道。

- 低优先级的任务

此任务组包括同步任务 (Timesame) 和计算机的故障诊断及通道故障逻辑任务 (Checkcomputer), 他们只是在系统需要时通过信号触发机制调用。此外启动 BIT、引导操作系统的功能模块 (main) 等后台任务也作为低优先级的任务运行于系统中。

- 计算任务

此任务主要包含控制律的解算 (Task2), 此任务的优先级不高, 当高优先级的任务不运行时才执行此任务, 重复的执行计算。

##### (2) 定义任务间的接口

传感器输入数据存储区用来存储传感器数据的当前值, 让输入数据的信息排成一个消息队列, 以供传感器输入任务读取。高优先级的传感器输入数据任务和控制律计算任务之间的接口是一个消息队列, 用一个消息模块来处理这个消息队列。当数据到达并比较结果正确时, 传感器输入任务模块向计算任务模块发送一条“开始计算”的信息, 低优先级的计算模块便开始进行计算。此时高优先级的输入输出模块便被堵塞, 低优先级的计算任务获得 CPU 的使用权, 开始计算。同样, 计算结果值与输出数据任务之间也通过一个消息队列进行通信。当计算结果经过比较正确时, 计算任务便向数据输出任务发送“输出数据”的消息。数据的输出比较监控作为消费者, “消费”计算任务发送的数据。

同时, 低优先级的任务之间以及与高优先级的任务之间通过信号量进行通信。系统首先进行启动 BIT、引导操作系统等后台任务, 然后进行同步操作任务, 接着通过信号量机制触发高优先级的输入数据任务, 如果系统出错, 则将高优先级的任务堵塞, 启动系统重构或者故障诊断及通道故障逻辑等低优先级任务 (这种启动是通过动态的修改低优先级任务的优先级来进行的), 因为如果系统出错, 必须进行容错纠

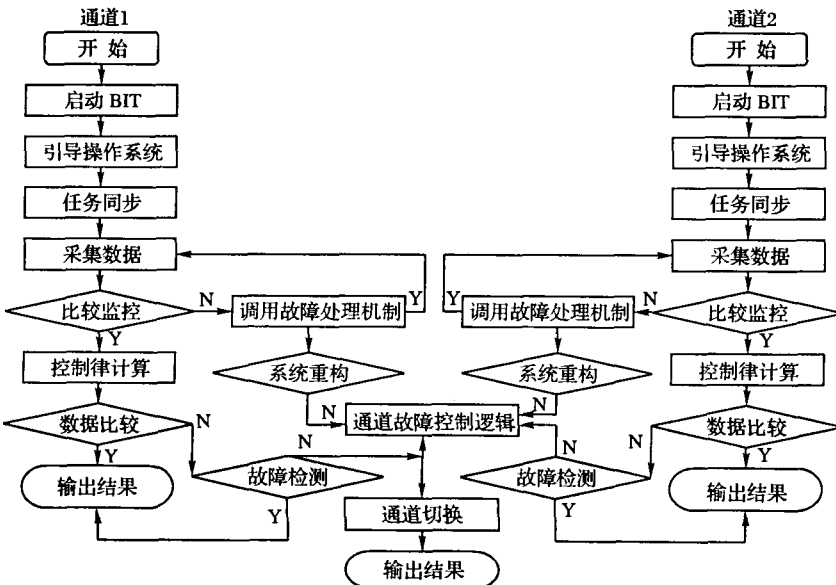


图 2 自监控二模冗余飞行控制计算机系统工作流程

表2 候选集 C1 表

Id	ItemName	ItemValue	ItemCount	MIS
1	道路宽度	宽	0.054	0.018
2	道路位置	东部	0.185	0.062
3	车流量	大	0.249	0.083
4	道路位置	南部	0.279	0.093
5	道路类型	商业街区道路	0.3	0.1
6	车流量	中等	0.306	0.102
7	道路类型	工业区道路	0.118	0.118
8	道路位置	中部	0.139	0.139
9	道路位置	北部	0.142	0.142
10	道路类型	居住区道路	0.429	0.143
11	车流量	小	0.445	0.148
12	道路类型	其他区域道路	0.153	0.153
13	道路宽度	窄	0.606	0.202
14	道路位置	西部	0.255	0.255
15	道路宽度	中等	0.34	0.34

设置最小置信度阈值为 85%，目标规则包含最小项目数为 4，规则后件为车流量，经发掘得到 3 个 4-项目集，由此产生 3 条空间关联规则，用产生式规则方式表达关联规则，内容如下：

规则 1：道路位置(东部) ∧ 道路类型(居住区道路) ∧ 道路宽度(窄) → 车流量(小)

规则 2：道路位置(南部) ∧ 道路类型(居住区道路) ∧ 道路宽度(窄) → 车流量(小)

规则 3：道路位置(东部) ∧ 道路类型(商业街区道路) ∧ 道路宽度(窄) → 车流量(大)

(上接第 2164 页)

错处理，所以此时故障诊断及通道故障逻辑等任务必须无阻塞的获得 CPU 的使用权。同样，当输出数据比较结果不一致时，亦必须采用上述方法调用机内故障诊断及通道故障逻辑等任务。

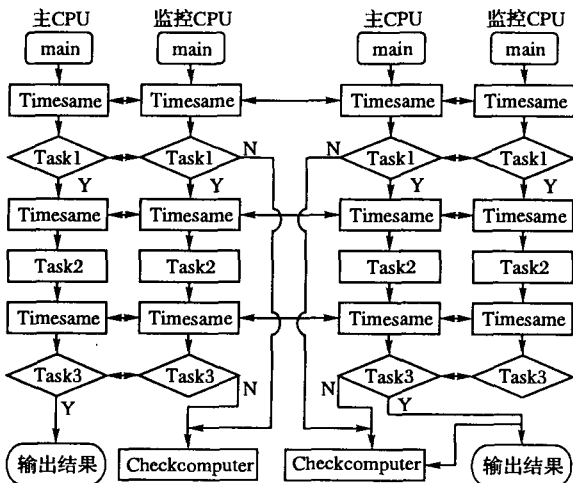


图3 自监控二模冗余飞行控制计算机系统冗余管理程序执行流程

周期同步机制以及具有严格时间每 20ms 采样的输入输出任务，必须有严格的时间限制，所以我们采用 VxWorks 中的时间片轮转调度策略，每隔一定的时间便进行周期同步校准及 20ms 采样的输入输出任务的刷新。

通道内自监控的监控 CPU 与主 CPU 之间通信采用共享内存技术共享数据，在 VxWorks 中提供了多 CPU 之间的采用信号量以及消息队列的通信机制，其基本原理同上述单机之间通信一样，只是在监控 CPU 读取共享内存中的数据时，应

根据得到的空间关联规则，系统用户可以获得他们所关心的道路情况信息，并以此作为道路规划管理的决策依据。

### 5 结语

本文讨论了在 GIS 中进行空间关联规则挖掘的流程，提出了一种基于多最小支持度的空间关联规则挖掘算法，在实际应用中运用该算法可以获得反映用户感兴趣程度的空间关联规则。接下去的工作主要是研究如何将空间聚类算法有效的整合到地理信息系统中去，以及如何进一步提高空间关联规则挖掘算法的效率。

#### 参考文献：

- [1] 雷小锋, 高韬, 谢昆青, 等. 扩展空间对象聚类问题的研究[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(23): 172 - 175.
- [2] 杨炳儒, 陈泓婕. 多最小支持度规则的挖掘算法[J]. 计算机工程, 2003, 29(6): 40 - 41.
- [3] 周剑雄, 王明哲. 基于关联规则的数据挖掘技术的快速算法[J]. 计算机工程, 2003, 29(12): 48 - 49.
- [4] 李铭. 关联规则的多支持度挖掘在销售数据中的应用[J]. 计算机工程, 2003, 29(8): 92 - 93.
- [5] 邹力鹏, 王丽珍, 何婧. 基于云南气象数据的空间关联规则挖掘[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(34): 187 - 190.
- [6] 邸凯昌. 空间数据发掘与知识发现[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2000.
- [7] MENNIS J, LIU JW. Mining Association Rules in Spatio-Temporal Data: An Analysis of Urban Socioeconomic and Land Cover Change[J]. Transactions in GIS, 2005, 9(1).

用到互斥信号量技术，从而访问共享内存数据。

本次设计利用了 VxWorks 中基于优先级的抢占式调度和基于时间片的轮转调度算法相结合的任务调度机制。并且在任务间通信采用同步、共享内存、互斥、信号量、消息队列等机制。通过这样的任务调度与通信机制，实现了系统实时可靠的运行。

图 3 是自监控二模冗余飞行控制计算机系统冗余管理程序执行流程。

通过本次对自监控二模冗余飞行控制计算机系统技术的研究，对于冗余系统有了进一步的认识和掌握。冗余管理其实就是对冗余系统运行机制的筹划和对出现的问题的处理，而冗余管理设计就是在已确定了系统硬件/软件资源的冗余配置等级的基础上，提高系统可靠性的又一关键技术。

### 3 结语

为进一步提高安全可靠性和任务可靠性，在计算机控制系统设计中可考虑采用三余度及四余度设计方案，但余度数的增多，相应的检测、判断隔离、转换装置及软件设计难度必然有所增多。整个冗余系统结构的设计应根据设计指标要求，从可靠性、重量、空间、成本、复杂性、维修性及设计时间等因素全面权衡考虑，采取适当的冗余结构。本文提及的冗余结构设计的思路、方法对类似的设计有良好的参考价值。

#### 参考文献：

- [1] 姚一平. 可靠性及余度技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991.
- [2] 周雪琴. 计算机控制系统[M]. 西安: 西北工业大学, 1998.
- [3] 罗国庆. VxWorks 与嵌入式软件开发[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.