

一种新型无人机机载计算机同步策略研究

田心宇¹, 姚英², 肖佳伟¹

(1. 西北工业大学 365 所, 西安 710065; 2. 西安邮电学院 电信系, 西安 710121)

摘要: 机载计算机是无人机的核心部件, 其可靠性高低直接决定了系统的安全; 余度技术作为机载计算机可靠性设计的一项重要手段, 对提高系统的应变能力, 实现故障隐蔽以消除故障, 改善系统性能有十分重要的作用; 但是在余度技术中不同通道之间会存在一定的时钟误差, 如果不进行处理将会使其无法达到无缝切换, 从而影响系统的安全; 在对机载计算机内部通道间不同步的原因进行详细分析的基础上, 提出了一种软、硬件相结合的同步算法, 并以三余度机载计算机为例进行了实际测试; 测试结果证明该策略实现简单、同步效果好, 异步度完全满足系统要求且付出的软、硬件代价小, 显著提高了全系统的可靠性及可维护性。

关键词: 余度; 机载计算机; 同步; 可靠性; 可维护性

Research on a New Type Synchronization Design Technology of UAV Airborne Computer

Tian Xinyu¹, Yao Ying², Xiao Jiawei¹

(1. No 365 Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China; 2. Department of Electronic and Information Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: The airborne computer is the core component of the UAV, the reliability of the airborne computer influences the survival ability of the whole system. Redundant technology is an important method in airborne computer reliability design. It can improve the adaptability of system, realize avoiding malfunction by error concealment, improve system performance. But there are clock error between different channels, the seamless switching can't be realized and the system safety will be affected with it. Based on the analysis of non-synchronization between each channels in airborne computer, a synchronization method of software and hardware is put forward. A detailed algorithm design of the tri-redundancy structure in airborne computer is given. The method and strategy is effective to system synchronize, the system asynchronous is satisfied the requirement through actual test with low cost of software and hardware. The reliability and maintainability of system have been improved.

Keywords: redundancy; airborne; synchronization; reliability; maintainability

0 引言

机载计算机是无人机航空电子系统的核心部件, 是无人机控制与管理的中心。它完成无人机的稳定及控制, 统一管理和调度机载电子设备, 实现飞行控制与管理、定位与导航、任务规划与管理、飞行状态采集与处理、任务设备控制与管理等功能, 机载计算机的可靠性的高低已成为飞机性能和作战效能的关键因素。在某种程度上, 高可靠性的机载计算机系统已成为现代飞机的标志^[1]。

提高机载计算机可靠性最常用的方法是余度技术, 即机载计算机采用多套完全相同的软、硬件系统构成, 多套系统同时工作, 当出现故障时系统之间进行切换^[1-3]。这种方式实质是利用多余的资源来换取整个系统可靠性的提高。但采用余度技术的同时带来了机载计算机内部多套系统之间的时间同步问题。针对上述情况, 机载计算机内部各系统间的时间同步问题成为机载计算机系统重构的“焦点”。

收稿日期:2015-12-03; 修回日期:2016-01-06。

基金项目:国家自然科学基金(60134010)。

作者简介:田心宇(1977-), 男, 陕西汉中人, 高级工程师, 博士, 主要从事无人机系统及机载计算机方向的研究。

本文以三余度机载计算机为例设计了一套结构简单、实现方便且异步度小于 50 μs 的通道间时间同步算法。

1 机载计算机同步策略设计

1.1 三余度机载计算机同步策略分析

三余度机载计算机是由 3 个通道构成, 3 个通道的软、硬件完全相同, 一个通道在线运行, 另两个通道处于“监控”状态, 通道间同步运行。外部输入数据一起送入 3 个通道, 在线运行的通道进行输出, 通道间对各自的输入、输出结果进行交叉表决。如结果正常则系统正常输出; 若有一个通道失效, 则定位故障并成功切除, 此时系统降级为双机热备份系统继续运行, 若又有一个通道失效并被定位切除则系统运行在单机模式。同双余度计算机系统相比, 它为输出结果表决提供了第 3 个计算值, 对系统的故障判别提供了新的判据, 具体的就是, 在某两个通道之间计算结果不一致, 同时各通道的监控均未发现本通道的故障时, 将由第 3 个通道的计算结果决定哪一通道正确, 即采用少数服从多数的原则^[4-5]。

同构型三余度机载计算机体系结构如图 2 所示, 机载计算机 3 个通道完全相同, 每个通道由中央处理器(CPU)、模拟量处理模块(AIO)、串口收发模块(SIO)、数字量输入输出接口(DIO)、电源模块(PS)以及其他功能模块构成。正常

工作时通道 A、通道 B 及通道 C 运行同一套软件，同时接收外部输入数据，将通道 A 的输出数据进行输出，通道 B 和通道 C 处于“监控”状态，当其中一个通道故障时，系统自动降为双余度系统。

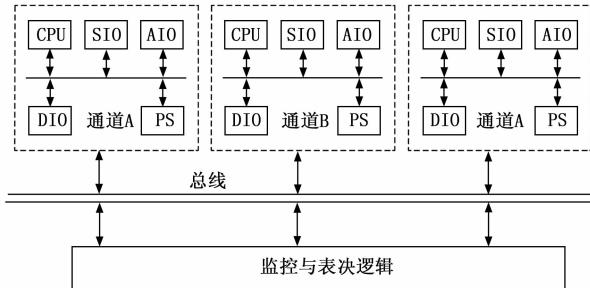


图 2 三余度机载计算机系统架构框图

三余度机载计算机监控表决运行时要选取三通道中最健康的一个通道成为控制通道，这一选取过程就依赖于表决算法。三余度机载计算机通道间表决逻辑状态表如表 1 所示。

如表 1 所示，A、B、C 三通道的状态由自检测结果给出，通道健康为“1”，故障为“0”。表 1 给出了三通道各自的运行模态。三通道的优先级是：1、通道 A，2、通道 B，3、通道 C。

表 1 三余度机载计算机通道间表决逻辑状态表

序号	A 通道状态	B 通道状态	C 通道状态	运行通道
1	0	0	0	A
2	0	0	1	C
3	0	1	0	B
4	0	1	1	B
5	1	0	0	A
6	1	0	1	A
7	1	1	0	A
8	1	1	1	A

三余度机载计算机通道间误差的产生原因主要有：

- 1) 通道间操作系统启动耗时差异；
- 2) 通道间处理器基准时钟的累积误差。

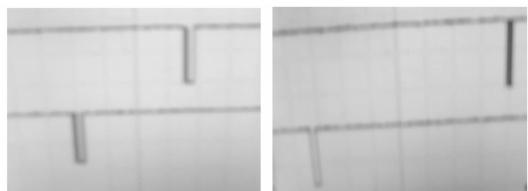
由于机载计算机通常使用嵌入式系统，处理器之间的差异造成使用同种操作系统的不同处理器之间的启动时间会有差异，其差异大小各有不同。

机载计算机上电后送出窄幅脉冲，采用示波器观测三通道之间的启动差异示波器采集步长为 0.5 s，三余度机载计算机通道间操作系统启动耗时差异如图 3、4 所示。

如图 3 所示，A 通道比 B 通道启动时间滞后约 2 s，A 通道比 C 通道启动时间滞后约 3.5 s，这种差异导致三通道执行任务的时间无法统一。

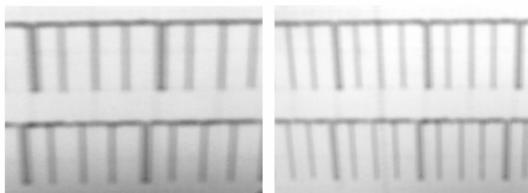
采用如下方法观察通道间的误差累计。机载计算机上电后并对 3 个通道进行开机同步后，三通道任务以 10 ms 为周期，周期性送出窄幅低电平脉冲。三通道间误差累计情况如图 4 所示。

观测到时钟误差不断累积，约 20 min 后三通道中，A 通道比 B 通道滞后约 8 ms，A 通道比 C 通道滞后约 5 ms，这种



(a) A、B 通道操作系统启动耗时差异 (b) A、C 通道操作系统启动耗时差异

图 3 3 通道操作系统启动耗时差异图



(a) A、B 通道间误差累计情况 (b) A、C 通道间误差累计情况

图 4 三通道间误差累计情况

误差在飞行过程中是致命的，它会对全系统的飞行安全产生严重的威胁，因此通道间除了开机同步外，还需要进行周期性同步。

为实现三台机载计算机间的同步，采用以软件为主，软/硬结合的双握手同步算法实现通道同步。实现同步算法，要求硬件上有专用的同步信号传输总线，因此我们使用机载计算机的数字 I/O 接口来实现这个功能。为使通道同步工作软件上提出一套握手协议来实现同步。

如图 5 所示，每台机载计算机内有一个数字量输出接口 DO，用以输出同步握手信号给另一通道；并有两个数字量输入接口 DI，用于接收另两台机载计算机的同步输入信号。

同步握手算法：机载计算机进入同步后，首先关中断，接着输出一个“逻辑高”同步 DO 信号，然后在限定期段内查询另两通道响应的“逻辑高” DI 信号；在握手成功后，打开中断，三通道均将 DO 信号输出逻辑低。同步算法的周期与定时任务周期一致为 10 ms，即每 10 ms 都要进行一次同步。

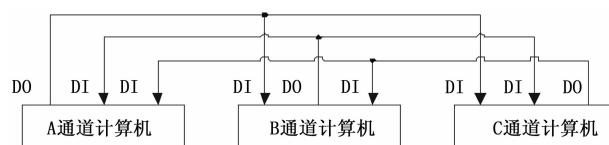


图 5 三余度同步硬件设计示意图

1.2 三余度机载计算机同步算法设计

针对三台机载计算机间操作系统启动过程中的启动耗时差异，提出开机同步概念。软件流程如图 6 所示。

开机同步实现算法：系统加电后，处理器通过 DO 引脚向另一个处理器发出同步信号，同时采集另一台机载计算机所发出的同步信号，当机载计算机在发出同步信号并采集到另一个机载计算机的同步信号后，开机同步成功，并转入实时任务周期。若机载计算机发出同步信号后未采集到另一个机载计算机的同步信号，则等待；同时继续采集另一机载计算机的同步信号，如等待 5 s 后还没有采集到另一机载计算机的同步信号，则认为另一机载计算机故障，且置为永久故障，并将该机载计算机隔离，进入双机工作模式。

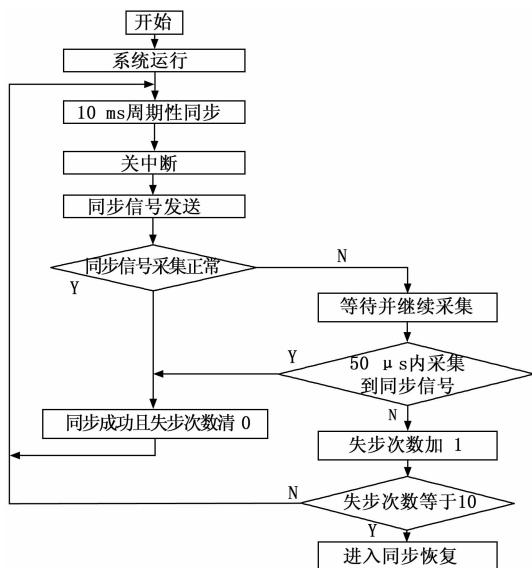


图 6 开机同步软件流程图

开机同步软件运行在系统加电后初始化过程中。将开机同步软件封装为一个函数: void Star Synchronization (void), 该函数只在开机后调用一次, 以消除三台机载计算机启动耗时误差。

针对通道间处理器基准时钟的累积误差, 提出了 10 ms 周期性同步概念。软件流程图如图 7 所示。

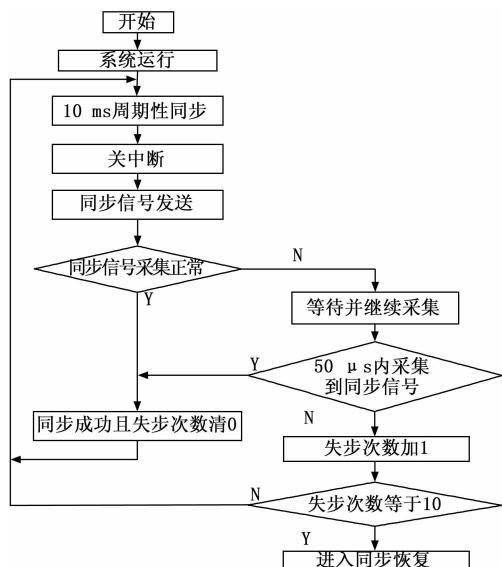


图 7 10 ms 周期性同步软件流程图

开机同步完成后, 系统转入到 10 ms 任务周期, 在执行 10 ms 周期性任务之前需进行 10 ms 周期同步, 10 ms 周期性同步实现算法: 函数首先禁止所有中断, 判断另一个通道是否可用, 若不可用则进入单机工作模式, 若可用, 进入同步。通过 DO 向另一个处理器发出同步信号, 同时采集另一个处理器发出的同步信号, 若采集到同步信号后使能中断, 进入 10 ms 定时任务。若未采集到同步信号则等待并继续采集, 若 50 μ s 内还没有采集到同步信号, 使能中断, 并将失步次数加 1, 如果连续 10 次不能同步, 则进入同步恢复阶段。将 10 ms 任务

周期同步软件封装为一个函数: void Cycle Synchronization (void), 该函数在 10 ms 任务执行前执行, 以消除两台机载计算机处理器晶振的累积误差。

如 10 ms 同步任务执行失败则进入同步回复阶段, 同步恢复算法软件流程图如图 8 所示。

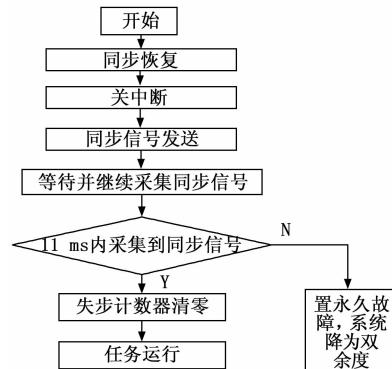


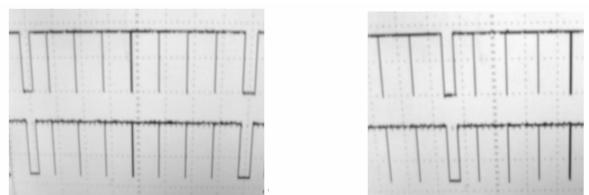
图 8 同步恢复算法软件流程图

同步恢复算法: 如果如果连续 10 次未能同步, 则未同步上的通道屏蔽所有中断, 采集同步信号, 如果 11 ms 内都未能采集到同步信号, 则认为同步恢复失败, 该通道记为永久故障, 系统进入双余度工作模式。由于此部分软件与 10 ms 同步任务密切相关, 所以将其封装进 10 ms 任务周期同步软件中。

2 实例测试与分析

我们使用一台基于本文介绍的余度算法设计的三余度机载计算机进行测试。

三套系统以 10 ms 为周期, 周期性送出窄幅低电平脉冲。机载计算机开机运行 20 分钟后, 系统间误差累计情况如图 9 所示。



(a) A、B 机载计算机同步执行后误差情况 (b) A、C 机载计算机同步执行后误差情况

图 9 误差累计情况图

如图 9 所示, 经过机载计算机开机及 10 ms 周期性同步执行后三余度机载计算机内的开机误差及累计误差消失, 机载计算机间完成了同步, 证明本算法切实可行, 且解决了三余度机载计算机系统同步问题。

3 结论

本文设计的三余度机载计算机同步策略经实践验证表明, 机载计算机通道间时间同步算法同步效果好, 异步度完全满足要求。提高系统的可靠性及可维护性, 而为此付出的软硬件代价较小。

参考文献:

- [1] 张小林. 小型飞行器机载计算机的余度设计技术西北工业大学学报, 2001, 19 (2): 274-278.
- [2] Chen P, Xu H C. Aviation electron system BIT summary [J]. China

Water Transport (Academic Version), 2002, 6 (2): 108–110.

- [3] ATCS Jeffrey J. Application of trend analysis methodologies on built-in-test (BIT) (and non-BIT) systems in a operational U. S. navy fighter/attack squadron [A]. 2005 IMTC – Instrumentation and Measurement Technology Conference [C]. Ottawa,

(上接第 180 页)

1) XApriori 算法只对 XML 文档数据库扫描一次，在后续计算只需要索引出相应项集的二进制代码，随着算法的运行，需要处理的事务和项集在不断地减小，从而节省了大量的时间，也大大的降低了 I/O 交互负载。

2) XApriori 算法的数据结构比较简单，设计了项目事务垂直对应的关系数据结构，对每一个项目进行了二进制编码，存储在 Hash 表中。在后续计算中使用了集合，使得计算比较节省时间。

3) XApriori 算法只在开始扫描数据库时对每个事务和项目进行了处理，在后续计算只需要索引出相应项集的二进制代码，不需对所有项集进行处理。例如支持项目 A 的事务的集合为 T_A ，支持项目 B 的事务的集合为 T_B ，则同时支持项目 A、B 的事务为两个集合交集（交集是两个集合的二进制代码进行按位逻辑与运算后的二进制代码所代表的事务集合，不再对事务中的项目进行匹配），这就使得寻找两个集合的交集时无需进行循环扫描。XApriori 算法避免了对所有项集进行大量的模式匹配计算和循环扫描，提高了时间效率。

4) XApriori 算法的连接步和剪枝步可以提前删除不可能包含频繁项集的候选项集，减少了冗余，使得算法的效率得到了较大的提高。

为了测试 XApriori 算法，用 Eclipse 分别实现了 Apriori 和 XApriori 算法，使用了 XML 文档解析提取出的关系型数据，该数据的事务数为 1 000，平均每个事务拥有的项集数为 10。该实验在内存为 2 GB，CPU 主频为 2 200 MHz，操作系统为 Windows7 的计算机上进行。实验结果如图 1 所示，可以看出，XApriori 算法有了较大的提高。

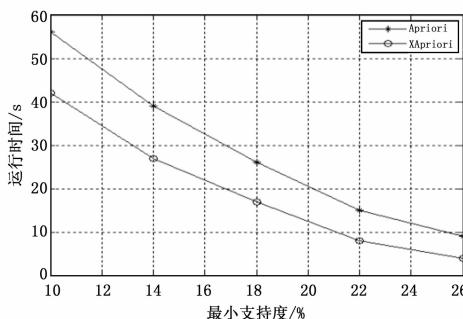


图 1 时间和支持度关系图

4 结束语

本文基于 XML 文档内容关联规则的挖掘，针对 Apriori 算法的缺陷，本文设计了一种高效的基于项目事务垂直对应关系的数据结构并且利用 Hash 表来存储、表示提取出的数据，

Canada, 2005.

- [4] 曾天翔. 电子设备测试性及诊断技术 [M]. 北京：航空工业出版社，1996.
- [5] 温熙森，徐永成，易晓山，等. 智能机内测试理论及应用 [M]. 北京：国防工业出版社，2001.

并通过 XApriori 算法的连接步和剪枝步进行了优化改进，提出了一种改进的 XApriori 算法，该算法应用于 XML 文档元素值之间关联规则的产生。Apriori 算法在运算中需要反复的扫描数据库，造成了非常大的 I/O 交互负载；在产生新的候选项集时需要反复的对上一级频繁项集进行对比与匹配，造成了运算效率的低下。而 XApriori 算法在整个过程中只需要扫描一次数据库，有效地降低了 I/O 交互负载；在生成候选项集的过程中，利用了逻辑运算，使得连接剪枝步运算大大的简化，逻辑运算对于计算机来说，使运算效率更高；在生成候选项集前，可以提前删除不可能包含频繁项集的候选项集，从而规避了冗余运算，使得算法的效率得到了较大的提高。

经过实验证明，XApriori 算法有效地提高了 Apriori 算法的运行效率。

参考文献：

- [1] 源艳芬，梁慎青. 简单介绍可扩展标记语言 XML [A]. 电脑知识与技术, 2010, 20 (6): 5523–5526.
- [2] 李巍. 半结构化数据挖掘若干问题研究 [D]. 吉林：吉林大学，2013.
- [3] 李露，郑琪. 数据挖掘原理与实践 [M]. 北京：电子工业出版社，2011.
- [4] 熊平. 数据挖掘算法与 Clementine 实践 [M]. 北京：清华大学出版社，2011.
- [5] 苏勇，王燕. 基于 XQuery 的 XML 文档的关联规则挖掘 [J]. 计算机工程与科学, 2011, 5 (10): 91–95.
- [6] Braga D, Campi A, Ceri S. Discovering interesting Information in XML Data with association rules [A]. Proceeding of the 14th International Conference [C]. 2003, (2454): 21–30.
- [7] Feng L, Dillon T. An XML – enabled association rule framework [A]. Proceeding of the 14th International Conference [C]. 2003, (2736): 88–97.
- [8] 蔚晓娟. 基于 DOM 的 XML 解析与应用 [J]. 计算机技术与发展, 2007, 17 (4): 86–89.
- [9] J. Han, M. Kamber. 数据挖掘概念与技术 [M]. 范明，孟小峰，译. 北京：机械工业出版社，2007.
- [10] 周艳山. 数据挖掘中关联规则的研究与应用 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2005.
- [11] 胡吉明，鲜学丰. 挖掘关联规则中 Apriori 算法的研究与改进 [J]. 计算机技术与发展, 2006, 16 (4): 99–101.
- [12] 张婕，张燕，李广水. 基于 Hash 表的多谓词约束下频繁项集挖掘 [J]. 微电子学与计算机, 2011, 28 (10): 56–59.
- [13] 黄根平，陈海勇，等. 数据集成中 XML 模式和关系模式映射模型研究 [J]. 信息工程大学学报, 2009, 10 (4): 529–531.
- [14] 崔贵勋，李梁，王柯柯，等. 关联规则中 Apriori 算法的研究与改进 [J]. 计算机应用, 2010, 30 (11): 2952–2955.