

双核锁步技术在汽车芯片软错误防护中的应用详解

摘要： 本文深入探讨了双核锁步技术在保障汽车芯片安全性中的应用。文章首先分析了国产车规芯片在高安全可靠领域面临的软错误难点及攻克方向，然后详细介绍了双核锁步技术的基本原理及其在汽车芯片防软错误的重要性。通过对比国内外多家厂商的芯片技术，分析了软错误设计在车身域控制器中的关键作用，为汽车芯片的国产化替代提供参考依据。

一、引言

随着汽车电子技术的飞速发展，汽车芯片在车辆的智能化、网联化和电动化进程中扮演着至关重要的角色。汽车车身控制的车身域控制器作为汽车电子控制系统的核心部件之一，其可靠性直接关系到车辆的安全性和舒适性。双核锁步技术作为一种有效的容错手段，能够显著提高汽车芯片在复杂工况下的抗干扰能力和安全性，尤其在应对软错误方面具有独特的优势。

二、国产芯片在高安全可靠领域的软错误问题与攻克方向

（一）软错误的定义与危害

软错误是指由于外部环境因素（如宇宙射线、电磁干扰等）或内部工艺缺陷导致的芯片内部状态的瞬时变化，这种变化不会永久损坏芯片，但可能导致数据错误或系统故障。在汽车电子控制系统中，软错误可能引发车身控制系统的误操作，如车窗意外升降、车灯异常闪烁等，严重时甚至可能导致车辆失控。

（二）国产 RISC-V 芯片面临的软错误难点

- 工艺限制：国产 RISC-V 芯片在制造工艺上与国际先进水平仍存在一定差距，导致芯片对软错误的敏感度较高。
- 设计经验不足：在软错误防护设计方面，国内芯片企业起步较晚，缺乏成熟的设计经验和验证方法。

- 生态系统不完善：RISC-V 指令集架构的生态系统相对薄弱，缺乏针对软错误防护的专用工具链和软件支持。

（三）攻克方向

- 版图加固技术：通过对传统工艺的标准单元库进行系统性加固，重新设计具备抗软错误能力的单元库，从芯片底层解决软错误问题。
- 冗余设计与容错机制：采用双核锁步等冗余设计技术，结合 ECC（错误校正码）等容错机制，提高芯片在软错误环境下的可靠性。
- 加强测试与验证：建立完善的测试验证体系，包括硬件在环测试、软件仿真测试等，确保芯片在各种工况下都能稳定运行。

三、双核锁步技术概述

（一）基本原理

双核锁步技术是指在一个芯片中集成两个相同的处理器内核，它们执行相同的代码并严格同步。其中一个内核作为主核（Master Core），负责访问系统内存并输出指令；另一个内核作为从核（Checker Core），不断执行主核获取的指令。从核的输出结果通过硬件比较器与主核的输出结果进行逐周期比较。一旦发现两者结果不一致，即触发错误信号，系统可据此采取相应的容错措施，如切换到备用系统或进入安全模式。

（二）技术优势

- 提高硬件可靠性：通过减少硬件元器件数量和连接，相比使用两个独立的 MCU，双核锁步架构能够显著提高硬件的可靠性。
- 增强故障诊断能力：故障能够在源头被及时检测到，避免潜伏故障的积累。
降低软件复杂度：无需双 CPU 之间的通信和数据同步，减少了数据比较和决策逻辑，降低了软件验证的复杂度。
- 满足功能安全标准：双核锁步技术能够有效满足汽车功能安全标准（如 ISO 26262）的要求，尤其在 ASIL-D 等高级别安全应用中表现出色。

四、双核锁步技术在车身域控制器中的应用

（一）车身域控制器概述

车身域控制器是汽车电子控制系统的核心部件之一，负责管理车辆的车身电子设备，如车窗、车灯、雨刷、座椅等。其主要功能包括：设备控制、状态监测、故障诊断和安全功能。

（二）软错误对车身域控制器的潜在影响

软错误在汽车车身控制的车身域控制器中可能导致一系列严重后果。例如，车窗控制系统可能因软错误而意外升降，导致乘客受伤或车辆损坏；车灯控制系统可能因软错误而出现异常闪烁或熄灭，影响车辆的行驶安全；座椅调节系统可能因软错误而无法正常工作，降低乘客的舒适性。此外，车身域控制器还负责车辆的防盗系统、车门锁止等功能，软错误可能导致这些系统失效，增加车辆被盗的风险。

（三）双核锁步技术如何应对软错误

双核锁步技术通过硬件冗余和实时比较机制，能够有效检测和纠正软错误。在汽车车身控制的车身域控制器中，双核锁步技术的应用可以显著提高系统的可靠性：

- **实时检测与纠正：**双核锁步技术能够在每个时钟周期对主核和从核的输出结果进行比较，一旦检测到不一致，立即触发错误信号并采取纠正措施。这种实时检测机制可以有效避免软错误积累，确保车身域控制器的稳定运行。
- **冗余设计：**双核锁步技术通过引入冗余的处理器内核，提高了系统的容错能力。即使主核受到软错误的影响，从核仍然可以正常工作，确保车身域控制器的基本功能不受影响。
- **增强功能安全性：**汽车车身控制的车身域控制器需要满足严格的功能安全标准（如 ISO 26262）。双核锁步技术能够有效降低系统故障率，提高系统的安全性。

五、国内外厂商双核锁步技术对比

（一）国外厂商技术现状

国外厂商在双核锁步技术方面已经积累了丰富的经验，并在汽车芯片领域取得了显著的成果。例如，NXP（恩智浦）的 S32K 系列芯片采用了双核锁步架构，能够满足 ISO 26262 的 ASIL-D 级别要求。该系列芯片通过硬件比较器和冗余设计，显著提高了系统的可靠性。此外，Infineon（英飞凌）的 AURIX 系列芯片也采用了类似的双核锁步技术，并结合了先进的制造工艺，进一步降低了软错误的发生概率。

（二）国内厂商技术进展

国内厂商在双核锁步技术方面也取得了显著进展。例如，芯驰科技的 E3 系列车规 MCU 也采用了双核锁步架构，紫光芯能的 THA6 系列汽车域控芯片配置多达 5 组双核锁步内核。国科安芯的 AS32A601 芯片采用了双核锁步架构，并结合了 ECC 技术，能够有效检测和纠正单比特错误。此外，AS32A601 芯片还通过了 AEC-Q100 Grade 1 认证，符合 ISO 26262 ASIL-B 等级的功能安全标准。

国内厂商在双核锁步技术方面已经达到了国际先进水平，特别是在抗软错误能力和版图加固技术方面具有显著优势。此外，国内厂商的芯片在功耗和成本方面也具有一定的竞争力，能够满足国内汽车市场的需求。

六、双核锁步技术在国产芯片中的具体实现

（一）内核与锁步机制

以国科安芯的 AS32A601 为例，该芯片采用了自研的 E7 内核，带有 FPU 和 L1 Cache，最高频率可达 180MHz。该内核支持 8 级双发射流水线、动态分支预测和哈佛架构的缓存，能够提供高效的运算性能。在双核锁步架构中，主核和从核严格同步执行相同的指令，并通过硬件比较器实时比较输出结果。一旦检测到不一致，系统会立即触发错误信号，并采取相应的容错措施，如切换到备用系统或进入安全模式。

（二）存储系统与 ECC 保护

AS32A601 芯片的存储系统包括 512KiB 内部 SRAM、16KiB ICache、16KiB DCache、512KiB D-Flash 和 2MiB P-Flash，所有存储单元均支持 ECC 保护。ECC 技

术能够检测和纠正单比特错误，显著提高了存储系统的可靠性。在软错误环境中，ECC 保护可以有效防止数据损坏，确保系统在出现错误时能够正常运行。

（三）安全特性

AS32A601 芯片在设计中融入了多种安全特性，以满足 ISO 26262 ASIL-B 等级的功能安全标准。除了双核锁步架构和 ECC 保护外，该芯片还支持以下安全机制：

- 时钟监控：通过多个分立的时钟监测模块（CMU），实时监控系统时钟的稳定性。
- 电源监控：结合电源管理模块（PMU）和模数转换器（ADC），实时监测电源电压。
- 外设安全监控：硬件支持应用级冗余，通过连接至不同外设桥的 IO 模块，最大化被监控和监控资源之间的独立性。
- 故障诊断与反应：故障收集单元负责收集故障信息并向故障控制单元（FCU）报告，确保系统能够及时响应并采取措施。

（四）功能安全标准

AS32A601 芯片严格遵循 ISO 26262 标准，通过了 AEC-Q100 Grade 1 认证。该芯片的设计能够有效检测和纠正软错误，降低系统故障率，满足汽车车身控制的车身域控制器在功能安全方面的要求。

七、未来发展趋势与挑战

（一）未来发展趋势

- 更高集成度：随着汽车电子系统的复杂性不断增加，车身域控制器需要集成更多的功能模块。未来，双核锁步技术将与其他技术（如多核处理器、片上网络等）相结合，进一步提高芯片的集成度和性能。
- 更低功耗：汽车芯片的功耗直接影响车辆的续航里程和燃油效率。未来，双核锁步技术将通过优化芯片架构和制造工艺，进一步降低功耗。

- **更强功能安全性：**随着自动驾驶和车联网技术的发展，汽车芯片的功能安全性要求将越来越高。双核锁步技术将通过引入更多的冗余设计和容错机制，进一步提高系统的安全性。

(二) 面临的挑战

- **技术标准与认证：**汽车芯片需要满足严格的功能安全标准（如 ISO 26262）。国内厂商需要进一步完善其芯片的设计和验证流程，确保其产品能够通过国际认证。
- **生态系统建设：**RISC-V 指令集架构的生态系统相对薄弱，缺乏成熟的开发工具和软件支持。国内厂商需要加强与国内外合作伙伴的合作，共同推动 RISC-V 生态系统的建设。
- **市场竞争：**国外厂商在汽车芯片领域已经占据了较大的市场份额，国内厂商需要在技术、成本和服务等方面不断提升竞争力，逐步实现国产芯片的替代。

八、结论

双核锁步技术作为一种有效的容错手段，在汽车车身控制的车身域控制器中具有重要的应用价值。通过引入双核锁步技术，可以显著提高车身域控制器的抗软错误能力和功能安全性。国内厂商在双核锁步技术方面已经取得了显著的进展，其芯片在抗软错误能力和功能安全性方面表现出色。未来，随着汽车电子系统的不断发展，双核锁步技术将面临更高的要求 and 更大的挑战。国内厂商需要在技术标准、生态系统建设和市场竞争等方面不断提升自身能力，为实现国产汽车芯片的替代做出贡献。