

湖南大学硕士研究生毕业（学位）论文开题报告

姓 名	宋金林	学 号	S151000856	已修学分	33
所属学院	信息科学与工程			一级学科	计算机科学与技术
二级学科	计算机科学与技术				
指导教师	李仁发			开题时间	2016. 12
研究方向	汽车电子				
论文题目	新一代汽车异构网络时间特性分析				

一、文献综述

1、汽车电子系统概述

汽车电子系统是汽车上电子控制装置的总称，是电气技术、电子技术以及软件技术的综合应用，主要包括发动机控制系统、底盘控制系统以及车身电子控制系统等等。随着社会经济的发展，人们对汽车的安全性、舒适性以及娱乐性有了更高的需求，电子化、网络化、智能化是汽车发展的必然趋势。新一代汽车在功能和结构上变得越来越复杂，汽车上的电子电气装置数量也急剧增加。在宝马、奔驰、奥迪的一些高端车型上所应用的 ECU 已经有上百个，实现的电子功能也成百上千，代码已达到上千万行^[1~3]。

汽车电子系统的高速发展虽然使得汽车在安全性和舒适性等方面都有了巨大改变，同时它的网络体系结构的复杂性也骤增，网络体系结构的复杂性已经成为汽车电子系统复杂性的重要方面，未来车用网络将处于多种网络异构融合的状态。网络体系结构设计的相关问题是新一代汽车电子系统设计所需解决的首要问题。

汽车总线种类繁多，主流的总线有 LIN (Local Interconnection Network)，CAN (Controller Area Network)，FlexRay，Ethernet 以及 MOST(Media Oriented Systems Transport)这五种^[4]。而在这五种总线网络中，CAN 和 FlexRay 总线无疑是现代汽车中应用的最广泛和最具有前景的总线。CAN(Controller Area Network)总线因其较低的技术门槛和低廉的成本获得了巨大的市场，是当前被广泛应用的主流车载网络。FlexRay 作为下一代车载总线标准将引导整个汽车电子产品结构的走向，具有高吞吐量、确定性、容错性三大属性。它具有高的数据传输速率，能够满足汽车安全性和可靠性的需求，同时满足分布式控制系统的通信要求，是对 CAN，LIN 和 MOST 等主要车用总线技术标准

的有效补充。CAN 和 FlexRay 分别是事件触发类型网络技术和时间触发类型网络技术的典型代表^[5]，对它们进行研究也可以为其它同类型的网络技术的相关研究提供一定的借鉴和参考，因此具有一定的代表性意义。

2、消息传递机制

2.1 CAN 消息传递

对于 CAN 而言，信号打包后得到的消息将被先插入到 CAN 控制器中的消息等待队列中就绪并等待发送，每个 CAN 消息都具有系统全局唯一的优先级(即 ID)。消息等待队列的管理方式依据不同的芯片生产商而不同，大多数的芯片中都按照优先级高低对消息进行排序，所以现有 CAN 消息的调度分析模型一般都按照该种情况进行假设。但是也存在其它特殊情况，如富士通 90390/MB90385/MB90387、英特尔 87C196(82527)和英飞凌 XCI61CJ(82C900)等芯片中消息在队列中是按照传输队列的编号进行管理；英飞凌 XCI 61 CS 芯片中消息队列则是按照先入先出的方式进行管理。CAN 是一种典型的事件触发类型的网络技术，网络中的通信节点不具有全局同步时钟，当网络空闲时，系统中的所有通信节点都可以开始传递消息，最先访问网络的通信节点将获得总线仲裁并可开始消息传递。当多个通信节点同时开始消息传递时，将依据消息优先级对应的 ID 按照“按位仲裁”的方式选择优先级最高的消息进行传递，其它的消息需在就绪队列中继续等待直到网络再次空闲。消息在网络中的传递是非抢占式的，即当某个消息获得网络仲裁权而开始传递的时候，不能再被其它的消息所中断。因此，CAN 消息在网络中的传递是按照基于固定优先级的非抢占式调度算法进行的。

2.2 FlexRay 消息传递

FlexRay 是一种典型的时间触发类型的网络技术，网络中的通信时间被划分为一个个等长的通信周期(Communication Cycle)，每个通信周期主要包括静态段(Static Segment)和动态段(Dynamic Segment)两个主要组成部分。由于利用静态段进行传递的消息具有更好的时间确定性，所以静态段一般用于对实时性、可靠性要求严格的安全和实时关键性应用如线控功能等。FlexRay 静态段被进一步划分为一个个等长的时隙 (Slot)，时隙被唯一分配给某个 ECU，ECU 所包含的消息仅在所分配的时隙到来时才可以进行传递。由于 FlexRay 总线的事件触发特性，时隙与 ECU、时隙与 ECU 包含的消息之间的映射关系在设计时就需要静态配置。对于 FlexRay 而言，为了实现不同的 ECU 包含的任务之间的通信，任务发送的信号也需要先被打包成消息才能在网络中传输。

3、相关研究

3.1 消息调度分析理论

消息的调度分析主要是对消息的最差反应时间 WCRT 进行分析, 通过与其最终时限 D , 进行比较以判断其是否可满足实时性要求。消息的 WCRT 定义为消息从归属 ECU 节点触发就绪到传输完毕到达目标 ECU 节点之间的时间段。在可信可靠网络中对其分析显得尤为重要, 针对不同网络的最坏响应时间分析也是不同的, 本文选取基于时间触发的 CAN 网络和基于时间触发的 FlexRay 网络静态段, 对其进行详细描述。其他网络可按照时间触发和时间触发和自身的协议帧来进行推导。

以 CAN 网络为例, CAN 网络的消息 Γ 的 WCRT 为可以表示为:

$$WCRT_{\Gamma} = J_{\Gamma} + W_{\Gamma} + T_{\Gamma} \quad (3-1)$$

其中 J_{Γ} 为消息 Γ 入队抖动, 代表 Γ 从触发到进入发送缓存队列就绪时间, T_{Γ} 为消息传输时间, 通常这两者可作为已知量。 W_{Γ} 为 Γ 在队里中的排队时间, 主要有高优先级消息抢占和低优先级消息反转的影响。消息在队里中的最坏等待时延是在消息 Γ 的通信周期内, 所有高优先级消息 $hp(\Gamma)$ 实例的传输时间之和, 加上 $\{hp(\Gamma), \Gamma\}$ 集合中的最大传输时间^[6], 如式 3-2 所示。

$$wc_{\Gamma}^{t+1} = B_{\Gamma} + \left(\sum_{\forall k \in hp(\Gamma)} \left\lceil \frac{wc_{\Gamma}^t + J_{\Gamma} + \tau_{bit}}{T_k} \right\rceil \cdot C_k + 3\tau_{bit} \right) \quad (3-2)$$

其中 B_{Γ} 为消息 Γ 反转时间, J_{Γ} 为消息 Γ 入队抖动, τ_{bit} 为设定波特率下传输 $1bit$ 所需时间, $3bit$ 为消息帧间隔时间, 上述公式的起点为 $wc_{\Gamma}^0 = B_{\Gamma}$ 。在 FlexRay 网络静态段中, 由于其时间触发特性, 假定消息 Γ 是在通信周期 T_c 开始的时候产生, 其最坏响应情况 Γ 在 T_c 的最后一个静态时隙发送, 即 $wc_{\Gamma} = N_{STS} \cdot T_{STS}$, N_{STS} 是静态时隙数目, T_{STS} 是静态时隙长度。FlexRay 静态段消息 Γ 可调度只要满足 $wc_{\Gamma} < deadline_{\Gamma}$ 即可。

3.2 CAN 网络相关研究进展

在 CAN 网络在汽车上进行应用的早期, 汽车工业界一般采取以下两种方法来保障 CAN 消息能满足实时性方面的要求: 一种方法是限制 CAN 网络的负载来保证消息的反应时间不至于太大, 从而能满足实时性的要求。在汽车领域, 一般将 CAN 网络的负载率限定在不超过 30%~40% 的范围内^[7]。如果负载率超过这一限定, 那么 CAN 网络中的某些信息就可能会延迟很久, 这将影响到某些正常功能的实现。另一种方法即通过对

汽车电子功能进行广泛的测试和仿真验证,来保障消息的反应时间不会超过设定的最终期限。但这两种方法都存在缺陷,一方面会导致系统的资源利用率不高,另一方面大量的测试验证会延长系统设计的成本和周期。因此对消息调度进行形式化的分析是非常有必要的。

York 大学的 Tindell 等人^[8,9]提出采用基于固定优先级的非抢占式调度理论的方法,对消息的实时性进行形式化调度分析,并将该方法成功应用到沃尔沃公司(Volvo)的 Volvo S80 车型所包含的 CAN 网络的配置和分析中^[10]。

Bril 等人^[11]指出采用 Tindell 等人提出的方法所分析得到的 CAN 消息的 WCRT 可能是乐观的,即消息可能最终会错过它的截止时间,排除了很多干扰因素仅仅在理论上进行了简化的消息端到端最坏响应时间分析,所以并不实用。因此,Bril 等人对原来提出的分析方法的缺陷进行了更正。后来又发表了另外一篇论文对上述缺陷进行了更深入的阐述^[12]。该研究是关于单个 CAN 网络中的消息的实时性分析的最新成果,并最具经典。但是上述研究成果都基于同样的假设前提,即“目标消息在经历最大的翻转时延的同时,还与所有高优先级消息同步到达”,此时消息的反应时间将取最大值。所以,基于上述方法分析得到的结果比较悲观。

一些学者从“消息属性的优化配置”和“考虑物理实现方面的因素的影响”等方面对 CAN 消息的实时性和实时性分析结果进行了优化。大多数分析方法假设每个消息的填充位都取最大值,这在一定程度上增加了 CAN 消息反应时间分析的悲观性,Nolte 等人^[13]提出对 CAN 消息填充位的分布进行建模,通过对消息长度进行更准确的描述来实现消息反应时间分析的优化。后来又提出了一个在考虑消息填充位的分布概率的前提下,减小消息反应时间的抖动的方法^[14]。Cheng 等人^[15]提出了一个填充位的概率分布模型,并依据消息的不同长度给出了填充位的概率分布曲线,基于此提高了消息反应时间分析的准确性和可靠度。

前面 CAN 消息的实时性分析方法通过假设目标消息与其它高优先级消息同步触发的情况来分析它的 WCRT,但是通过给同一通信节点内的消息分配不同的偏移量(Offset),可减小消息之间同步触发的机会,从而可以实现消息 WCRT 的优化。息的偏移量定义为“从 ECU 启动到消息的第一个实例就绪并开始传输的时间间隔”。Renier 等人首次提出通过给消息分配不同的偏移量来减小目标消息与其它消息同步触发的机会,从而实现消息 WCRT 优化的方法^[16]。Chen 等人将消息模型扩展到可同时考虑偏移量和

CAN 控制器中的消息队列分别按照固定优先级和先入先出方式进行管理的情况^[17]和消息同时具有偏移量和抖动(Jitter)的情况^[18]。另外, Ziermann 等人^[19]和 Chen 等人^[20]对消息的偏移量分配方法进行了研究, 以实现最大程度的消息 WCRT 的优化为目标。

在 CAN 控制器的物理实现方面, 上述关于 CAN 消息实时性分析的相关研究给出了很多理想化的假设前提, 如消息队列按照固定优先级的方式进行管理、通信节点在任何时候都可以使得具有最高优先级的消息获得总线仲裁等。但是实际上, 不同半导体厂商所提供的 CAN 控制器芯片中消息队列的长度和管理方式等与上述理想化模型可能不同, 因此, 需要针对 CAN 通信节点的具体实现情况, 对 CAN 消息的实时性分析方法进行相应的修改或采取一些特殊的弥补措施。Meschi 等人^[21]考虑了当消息队列的长度小于 3 的情况, Chen 等人^[17]和 Davis 等人^[22]则研究了消息队列采用先入先出管理方式时的调度分析问题。对于静态优先级可抢占系统, Johannes 等人^[23]提出一种基于忙窗口的完整任务链最坏响应时间分析方法, 改善了最坏情况下端到端的时间延时界限, 通过 ADAS 的实例证明了该方法在优化 WCRT 界限的有效性并具有良好的适用性。

3.3 FlexRay 网络相关研究进展

FlexRay 网络方面, FlexRay 的静态段是用于确定的周期性数据通信, 在 FlexRay 通信周期静态段内传输的任务就是周期性地在不同节点之间交换数据信息。静态消息的调度算法就是寻找到第一个可以用于消息传输的时隙和静态数据帧的最佳编码方法并能够最大化静态段的带宽利用率。

时隙分配问题优化方面, Grenier M 等人^[27]提出了一种最佳时隙优先的启发式消息调度算法, 在考虑信号满足最终时限要求的前提下, 通过减少消息的过度采样来实现时隙使用个数的最小化和网络带宽利用率的优化。文献^[28]就消息的时隙分配问题进行了研究, 提出了一个基于异构整数线性规划的算法框架对时隙使用个数和消息的抖动进行联合优化。Schmidt K 等人^[29]提出将消息调度问题划分为信号打包和消息时隙分配 2 个子问题, 并采用整数线性规划方法对其进行建模和求解, 分别以最大化网络带宽利用率和最小化时隙使用个数为优化目标。文献^[30]充分考虑到之前研究的不足, 并在现有优化模型的基础上基于静态段带宽利用率对消息分割进行进一步的研究, 通过改变静态时隙的长度, 得出时隙长度、帧 ID 个数与最佳带宽利用率的关系, 大大提升了静态段的带宽利用率。然而以上研究都只对网络进行单独设计, 而未从系统级的角度对计算系统和网络进行集成化设计, 没有考虑时隙分配可能造成的影响。

关于动态段，FlexRay 通信周期的动态段消息传输是基于事件触发的，动态段的消息调度是基于最小时间片的优先级优先的原则，对时间要求比较苛刻，消息的调度也比较灵活。消息响应和传输时间优化方面，文献[31]提出了一个考虑动态段不同长度但却享有相同的帧标识符的消息传输概率延迟模型，并以空时隙分布作为性能指标分析了帧延迟概率。文献[32]提出了一种在动态段使用的名为递归资格的调度方法。该方法是基于多槽分配，采用总线可访问性的索引来决定每个节点的优先级，这样动态段就能够用来有效地传输消息。Schmidt E G 等人^[33]对 FlexRay 周期中动态段内消息的传输特性进行了详细的分析，并提出通过构建消息组对动态消息进行调度的方法，并通过实验证明该方法能够最小化动态段的传输时间。然而上述研究都忽略了消息响应时间的不确定性而可能产生的时间抖动，也没有考虑抖动可能导致整个系统时钟不同步的问题。

3.4 异构网络相关研究进展

上述的所有研究仅局限于单个网络的情况，但是在宝马 7 系和奥迪 A8 等包含的新一代汽车电子系统中，存在网关互连的同构 CAN 网络与网关互连的异构 CAN 网络的情况，需要对网关互连的 CAN 网络以及 CAN-FlexRay 异构的网络的情况进行考虑。Sommer 等人^[34]提出了一种可实现两个 CAN 网络互连的嵌入式网关的实现方法，并对消息在网关中进行处理所需花费的时间、缓存大小等进行了分析。Sojka 等人^[35]采用测量的方法来分析消息在网关中进行处理而引起的时延大小。后来 Davis 等人^[36]提出了一种当通信节点中采用先入先出队列对消息进行管理时，可对网关互连的 CAN 网络中的消息的实时性进行分析的方法，后来 Davis 等人^[36]提出了一种当通信节点中采用先入先出队列对消息进行管理时，可对网关互连的 CAN 网络中的消息的实时性进行分析的方法，并提出网关内可利用多个先入先出队列来优化消息的实时性。但给出的实时性分析方法局限于单个 CAN 网络的情况，未就网关互连的 CAN 网络中网关类型消息的端到端反应时间进行分析。因此，Ekain 等人^[37]考虑在网关互连的 CAN 网络中当消息的长度超过了标准帧的最大值而需要进行分割的情况下，如何对消息的实时性进行分析的问题。文献[38]研究未考虑消息拆分的情况，但是在消息的实时性分析方面，考虑了不同的网关类型消息在到达目的子网时应满足的最小时间间隔的限制，所以分析得到的结果将优于上述研究分析得到的结果。此外还对网关互连的 CAN 网络存在带宽异构情况下的消息调度分析算法进行了研究。

CAN-FlexRay 异构方面，CAN-FlexRay 异构网络的研究主要集中在网关架构、实现及性能分析方面，侧重于网关的硬件设计和软件设计，其中硬件设计主要是指板级电路

芯片的设计，软件设计主要集中在上层的架构方面，文献[39~42]提出了几种 CAN-FlexRay 的网关模型，在硬件上进行了实现，并验证了网关的可靠性。合适的数据帧转换方法和调度算法可以降低数据在网关的延迟时间，同时可以保证实时数据的传送实时性，这也直接影响到网关性能和整个车身网络性能的好坏。文献[43,44]就 CAN-FlexRay 异构网络的帧封装算法进行研究，文献[43]对 FlexRay-CAN 异构网络进行实时性分析，建立了网关信号的实时性约束模型。基于实时性约束模型，提出了一种启发式的封装算法 FCFP。最后，对 FCFP 算法进行性能评估，结果表明在满足实时性约束条件下，该封装算法能有效的降低带宽消耗，提高带宽利用率。文献[44]提出的一种数据封装算法通过提高消息数据位的利用率，减少消息竞争总线平率，在提高 CAN 网络消息可调度性和 FlexRay 网络带宽利用率方面有很大改进，并且极大的减少了网关对消息处理的时间。

目前很少有研究涉及异构车载异构网络 CAN-FlexRay 的可视化可调度性分析及调度策略问题。Schmidt 等人在文献[45]中研究了 CAN-FlexRay 异构网络和网关配置，然后评估了网络的性能，但没有建立该异构网络的形式化的可调度性分析方法。Pop 等人^[46,47]提出了一种方法针对由时间触发和事件触发的网关互连的多集群分布式嵌入式系统进行可调度性分析，然而他们的方法过于笼统而不能直接应用到 CAN-FlexRay 的异构网络中。Daniel 等人^[48]提出一种针对 CAN-Ethernet 异构网络可视化的时间分析，从系统级对异构网络的消息进行端到端的时间延迟分析并具有不错的效果，这对其它类型的异构异构网络的设计与分析具有参考作用，并且由于高带宽，低成品和应用面广的特点，Ethernet 将可能成为车内网的骨干网，由其连接不同域组成异构分层的车用网络电子系统，并有希望引领下一代车用网络协议的研究。

4 总结

通过以上分析和综述可知，对车载总线的可调度分析和实时性分析目前主要还是集中在单个网络上，未就新一代的汽车电子系统中的网关互连的 CAN-FlexRay 等异构网络中的消息可调度性分析和实时性分析等问题进行充分研究分析，而针对网关互连的 CAN-FlexRay 异构网络大多关注于硬件和软件的设计，消息的实时性进行研究也是基于分布式嵌入式实时系统领域提出的整体性能分析方法。如何就异构网络进行有效集成，从系统级对消息进行端到端延迟分析以保障系统的安全可靠运行和高效实现是现在迫切需要解决的关键问题。

二、选题背景及意义

课题来源

国家自然科学基金资助，嵌入式与网络计算省重点实验室课题

背景及意义

随着社会经济的高速发展，汽车已经成为人们生活中必不可少的一部分，汽车产业已成为了国民经济中的支柱产业，电子化和智能化已成为汽车产业发展不可扭转的方向，人们对汽车的舒适性、安全性、娱乐性等各方面有了更高的要求，这促使了汽车电子技术的高速发展和车载网络的广泛应用。新一代汽车电子系统中所应用的 ICT 技术的程度被看作是衡量现代汽车水平的重要标志，是用来开发新车型、改进汽车性能最重要的技术手段。ICT 技术已成为汽车工业竞争力和创新的主要源泉，它在提升汽车的驾驶性能和舒适性，以及提高汽车的主动和被动安全方面将发挥非常关键的作用。

从本质上来看，新一代汽车电子系统仍然是一个复杂的控制系统，只不过车上的控制系统由传统的机械控制朝着电子化功能的趋势发展，典型的如线刹功能。同时从计算机的角度来看，它又是一个异构分布式实时嵌入式系统。这里的异构包含多个方面，如 ECU 的异构（单核或双核等）以及网络总线的异构（CAN 以及 FlexRay 等），ECU 嵌入到特定的机械部件之中，通过复杂的计算和控制以及相互之间的交互和协作来完成各种复杂的控制功能，从而提升整个系统的性能和安全性等。汽车电子系统是一个实时计算系统，不同的功能具有不同的实时性需求。高实时性需求的如动力控制、底盘控制相关的功能等，可以想象如果汽车线刹功能响应时间过长将会带来严重的安全隐患。而车门车窗等电子控制系统，更关注功能的实现，对于计算任务执行的实时性需求相对降低。

新一代汽车复杂性的骤增给汽车的设计带来挑战，传统的设计方法已经无法满足，需要一个全新的软硬件设计方法应对更加复杂的功能要求。通常为了验证某一功能的实现是否正常，常用的方法是对汽车电子功能进行广泛的测试和仿真验证，但大量的测试验证会延长系统设计的成本和周期。所以需要对功能实现进行形式化的建模分析，用数学的方法进行验证。当前研究大多集中于单个网络的分析，对 CAN-FlexRay 异构网络的研究也集中在网关的设计、硬件实现及性能分析上，形式化的时间分析还很少。因此对异构网络的建模和时间特性分析研究对汽车的分布式功能设计具有指导作用，有着较大的实际意义。

三、研究的主要内容

新一代汽车电子系统的安全可靠运行需要借助于多种网络，网络是实现系统中实时交互和精确控制的重要媒介，汽车中很多功能系统如动力控制子系统、底盘控制子系统和安全子系统所包含的功能对消息的实时性和安全可靠性的要求非常高，本文以车内最典型的两种网络 CAN-FlexRay 异构网络作为研究目标，对新一代汽车电子系统从实时性的角度对 CAN-FlexRay 异构网络中消息的最坏响应时间展开形式化的分析研究。具体包括以下几点内容：

（1）异构网络模型的建立，对 CAN-FlexRay 异构网络模型进行分析。由于 CAN 和 FlexRay 总线的通信协议不同，需要从软、硬件两个方面出发，设计一个合理的架构，对数据报文的映射进行研究设计等等。

（2）CAN-FlexRay 异构网络中非网关类型消息的最坏响应时间研究，异构网络中由于网关的引入，需要同时考虑本地网络消息以及其他网络消息对当前消息的影响。所以需要建立合适的数学分析模型，研究异构网络中非网关类型消息的最坏响应时间。

（3）CAN-FlexRay 异构网络中网关类型消息的最坏响应时间研究，网关类型消息的分析显然更加复杂，需要从系统级的角度研究消息端到端的最坏响应时间。

（4）CAN-FlexRay 异构网络中消息的可调度性分析，通过消息的最坏响应时间研究，分析消息的可调度性，并采取相应措施（如 offset、优先级的合理分配）改善消息的实时性以满足截止时限。

四、工作的重点与难点，拟采取的解决方案

重点与难点

(1) 掌握 CAN、FlexRay 总线基本原理，建立切实可行的异构网络模型，为调度分析奠定合理的假设前提。

(2) 充分了解现有单个网络消息调度分析模型以及算法，并就做精确的最坏响应时间分析。

(3) 对 CAN-FlexRay 异构网络进行可调度性分析并优化。

拟采取的方案

了解 CAN、FlexRay 总线基本原理，参考当前 CAN-FlexRay 异构网络硬件实现的相关研究，构建一个合理的通用的 CAN-FlexRay 异构网络和调度模型。基于此模型利用常用的软件（eclipse、matlab 等）模拟消息的调度过程，对提出的算法进行实现，分析最坏响应时间，然后采用专业领域的 SymTA/S 进行建模、时间分析做对比。

SymTA/S 可以评估、验证和优化 ECU 的任务调度、ECU 任务参数、CAN 和 FlexRay 总线通信参数和整个系统参数。SymTA/S 可以对某个信号做端到端（End-to-End）的时间分析，如一个信号从传感器采集之后经过 CAN 总线发送到一个 CAN-FlexRay 网关，然后通过 FlexRay 总线再发送到另一个 ECU，接收信号的 ECU 把这个信号经过控制算法运算后送到执行器，信号的整个传递路径称为一个“PATH”，SymTA/S 可以分析不同“PATH”的最好和最坏的信号延时，实现 ECU 和总线结合起来进行系统级的时间分析。

SymTA/S 图形化的编辑界面允许用户在系统级添加硬件和软件的设置，并可以建立软件任务和处理器，报文和信号的映射；可以选择多种调度策略和设置多个调度相关的参数；可以选择不同的触发机制（时间表、中断等）；可以为关键信号的路径进行端到端分析和设置本地时限等。基于上述设置的参数，SymTA/S 可以估算出：

- ①本地任务或者报文的最好和最坏（WCET）的响应时间
- ②对于特定信号路径进行端到端分析最好和最差响应时间
- ③是否超过最坏时限
- ④资源的使用情况

最坏情况调度（Worst-case Schedules）通过甘特图显示。这种显示方式可以方便开发人员快速而准确的定位非常复杂的系统潜在的时间相关的问题。

五、论文工作量及进度

论文工作量

(1) 文献阅读, 了解现有 CAN 网络以及 FlexRay 网络消息调度以及最坏响应时间分析算法, 构建 CAN-FlexRay 异构网络系统框架, 分析其与单个网络时间分析的不同。

(2) 实现现有单个网络最坏响应时间分析算法, 分析其不足以及如何应用到 CAN-FlexRay 异构网络中并进行实现, 提出合适的分析算法并用真实消息集的进行实验验证。

(3) 在 SymTA/S 软件平台上搭建 CAN-FlexRay 异构网络模型并进行实验验证。

进度安排

第一阶段: 2016.09~2016.12

阅读文献, 了解新一代汽车电子系统网络体系结构以及车用网络的发展现状; 总结当前 CAN、FlexRay 网络研究现状以及在有网关互连的异构网络方面的研究, 撰写开题报告。

第二阶段: 2017.01~2017.04

进一步熟悉 CAN、FlexRay 的协议设计和原理, 了解异构网络的网关设计原理, 构建所研究的 CAN-FlexRay 异构网络的总体架构, 为调度分析算法做基础。

第三阶段: 2017.05~2017.10

实现现有的时间分析算法, 分析其不足并就 CAN-FlexRay 异构网络的特殊性提出相应的的时间分析算法, 仿真测试其有效性并在 SymTA/S 平台上进行实验验证分析; 撰写学术论文。

第四阶段: 2017.11~2018.03

实验总结分析做最后修改优化, 撰写、整理学位论文并准备答辩。

六、论文预期成果及创新点

预期成果

(1) 搭建一个合理的通用的 CAN-FlexRay 异构网络模型，并提出相应的时间分析算法，能精确地分析消息的最坏响应时间，并通过 SymTA/S 专业软件平台实验验证算法的有效性。

(2) 在核心期刊上发表 1~2 篇学术论文。

创新点

现有的响应时间分析都集中于单个网络，异构网络也大多关注硬件设计（如网关的设计实现），考虑 CAN、FlexRay 这两种应用于汽车中的典型网络的异构情况，研究其时间特性，对消息的可调度性分析进行研究。

具体到算法本身，可能会改进现有单个网络中响应时间分析算法，然后针对异构网络系统提出端到端的时间分析算法。

专业领域 SymTA/S 软件进行实验，它可以在 ECU、总线和系统级不同层面完成实时系统的时间特性建模、分析和验证。

七、完成论文拟阅读的主要文献

- [1] Furst S. Challenges in the design of automotive software[C]// Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition. IEEE, 2010:256-258.
- [2] Broy M, Kruger I H, Pretschner A, et al. Engineering Automotive Software[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(2):356-373.
- [3] Audi A8'10 Electrical and network systems. <http://www.audionlinetraining.com>,2010-01-01.
- [4] Zeng W, Khalid M A S, Chowdhury S. In-Vehicle Networks Outlook: Achievements and Challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016:1-1.
- [5] Ishigooka T, Narisawa F. Message Packing Algorithm for CAN-Based Legacy Control Systems Mixed with CAN and FlexRay[J]. SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems, 2010, 3(1):88-97.
- [6] Davis R I, Burns A, Bril R J, et al. Controller Area Network (CAN) schedulability analysis: Refuted, revisited and revised[J]. 2007, 6794(29):45-56.
- [7] Natale M D, Sangiovanni-Vincentelli A L. Moving From Federated to Integrated Architectures in Automotive: The Role of Standards, Methods and Tools[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(4):603-620.
- [8] Tindell K W, Hansson H, Wellings A J. Analysing real-time communications: controller area network (CAN)[C]// Real-Time Systems Symposium, 1994. Proceedings. IEEE, 2010:259-263.
- [9] Tindell K, Burns A. Guaranteeing message latencies on control area network (can)[C]// IEEE International Conference on Communications. 1994:1 - 8.
- [10] Casparsson L, Rajnak A, Tindell K, Malmberg P. Volcano-A Revolution in On-Board Communications. Technology Report, 1998.
- [11] Bril R J, Lukkien J J, Davis R I, et al. Message response time analysis for ideal controller area network (CAN) refuted[J]. 2006.
- [12] Davis R I, Burns A, Bril R J, et al. Controller Area Network (CAN) schedulability analysis: Refuted, revisited and revised[J]. 2007, 6794(29):45-56.
- [13] Nolte T, Hansson H, Norström C, et al. Using bit-stuffing distributions in CAN analysis[J]. IEEE Real, 2009.
- [14] Nolte T, Hansson H, Norstrom C. Minimizing CAN response-time jitter by message manipulation[C]// Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2002. Proceedings. Eighth IEEE. IEEE, 2002.
- [15] Cheng A, Zhang L, Zheng T. The schedulability analysis and software design for networked control systems of vehicle based on CAN[C]// IEEE, International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering. IEEE, 2011:274-278.
- [16] Grenier M, Havet L, Navet N. Pushing the limits of CAN - scheduling frames with offsets provides a major performance boost[J]. European Congress on Embedded Real Time Software, 2008.
- [17] Chen Y, Kurachi R, Takada H, et al. Schedulability Comparison for CAN Message with Offset: Priority Queue Versus FIFO Queue[C]//RTNS. 2011: 181-192.
- [18] Chen Y, Zeng G, Ryo K. Effects of queueing jitter on worst-case response times of CAN messages with offsets[C]//Proc. of the Embedded System Symposium in Japan. 2012: 119-126.

- [19] Ziermann T, Teich J, Salcic Z. DynOAA — Dynamic offset adaptation algorithm for improving response times of CAN systems[J]. Design Automation & Test in Europe, 2011:1-4.
- [20] Chen Y, 陳陽. Real time scheduling and analysis for can messages with offsets[J]. 2012.
- [21] Meschi A, Di Natale M, Spuri M. Priority inversion at the network adapter when scheduling messages with earliest deadline techniques[C]//Real-Time Systems, 1996., Proceedings of the Eighth Euromicro Workshop on. IEEE, 1996: 243-248.
- [22] Davis R I, Kollmann S, Pollex V, et al. Controller area network (can) schedulability analysis with fifo queues[C]//2011 23rd Euromicro Conference on Real-Time Systems. IEEE, 2011: 45-56.
- [23] Schlatow J, Ernst R. Response-time analysis for task chains in communicating threads[C]//2016 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS). IEEE, 2016: 1-10.
- [24] Cena G, Valenzano A. On the properties of the flexible time division multiple access technique[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2006, 2(2):86-94.
- [25] Kang M, Park K, Jeong M K. Frame Packing for Minimizing the Bandwidth Consumption of the FlexRay Static Segment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(60):4001-4008.
- [26] Park I, Sunwoo M. FlexRay network parameter optimization method for automotive applications[J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2011, 58(4): 1449-1459.
- [27] Grenier M, Havet L, Navet N. Configuring the communication on FlexRay-the case of the static segment[C]//4th European Congress on Embedded Real Time Software (ERTS 2008). 2008.
- [28] Schmidt K, Schmidt E G. Optimal message scheduling for the static segment of FlexRay[C]//Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd. IEEE, 2010: 1-5.
- [29] Schmidt K, Schmidt E G. Message scheduling for the FlexRay protocol: The static segment[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(5): 2170-2179.
- [30] 张建军, 于萍, 张本宏. 基于带宽利用率的 Flexray 静态段研究[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(12): 4574-4576.
- [31] Kim B, Park K. Probabilistic delay model of dynamic message frame in FlexRay protocol[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(1): 77-82.
- [32] Jung K H, Song M G, Lee D, et al. Priority-based scheduling of dynamic segment in FlexRay network[C]//Control, Automation and Systems, 2008. ICCAS 2008. International Conference on. IEEE, 2008: 1036-1041.
- [33] Schmidt E G, Schmidt K. Message Scheduling for the FlexRay Protocol: The Dynamic Segment[J]. Vehicular Technology IEEE Transactions on, 2009, 58(5):2160-2169.
- [34] Sommer J, Blind R. Optimized Resource Dimensioning in an embedded CAN-CAN Gateway[C]// International Symposium on Industrial Embedded Systems. 2007:55-62.
- [35] Sojka M, Pisa P, Spinka O, et al. Measurement automation and result processing in timing analysis of a Linux-based CAN-to-CAN gateway[C]// IEEE, International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, Idaacs 2011, Prague, Czech Republic, September 15-17. 2011:963-968.
- [36] Davis R I, Kollmann S, Pollex V, et al. Schedulability analysis for Controller Area Network (CAN) with FIFO queues priority queues and gateways[J]. Real-Time Systems, 2013, 49(1):73-116.
- [37] Azketa E, Gutierrez J J, Palencia J C, et al. Schedulability analysis of multi-packet messages in segmented CAN[C]// Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2012 IEEE 17th Conference on. IEEE, 2012:1-8.
- [38] 谢勇. 新一代汽车电子系统的网络体系结构若干关键技术研究[D]. 湖南大学, 2013.

- [39] Zhao R, Qin G H, Liu J Q. Gateway system for CAN and FlexRay in automotive ECU networks[C]// International Conference on Information NETWORKING and Automation. 2010:V2-49 - V2-53.
- [40] 吴任飞. 新一代车用网络的网关设计及其性能分析[D]. 湖南大学, 2014.
- [41] Kim J H, Seo S, Hai N T, et al. Gateway Framework for In-Vehicle Networks Based on CAN, FlexRay, and Ethernet[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(10):4472-4486.
- [42] Kim M H, Lee S, Lee K C. Performance Evaluation of Node-mapping-based Flexray-CAN Gateway for in-vehicle Networking System[J]. Intelligent Automation & Soft Computing, 2015, 21(2):2731-2744.
- [43] 吴任飞, 李仁发, 李龙, 等. 面向 FlexRay-CAN 异构网络的帧封装研究[J]. 小型微型计算机系统, 2015, 36(4): 749-753.
- [44] 胡游, 李仁发, 吴武飞. 车用异构网络网关的一种数据封装方法[J]. 计算机工程, :,1-5.
- [45] Schmidt E G, Alkan M, Schmidt K, et al. Performance evaluation of FlexRay/CAN networks interconnected by a gateway[C]// International Symposium on Industrial Embedded Systems. 2010:209 - 212.
- [46] Pop P, Eles P, Peng Z. Schedulability Analysis and Optimization for the Synthesis of Multi-Cluster Distributed Embedded Systems[J]. 2003, 150(5):184-189.
- [47] Pop T, Eles P, Peng Z. Schedulability analysis for distributed heterogeneous time/event triggered real-time systems[C]// Real-Time Systems, 2003. Proceedings. Euromicro Conference on. IEEE, 2003:257-266.
- [48] Thiele D, Schlatow J, Axer P, et al. Formal timing analysis of CAN-to-Ethernet gateway strategies in automotive networks[J]. Real-Time Systems, 2016, 52(1):88-112.

指导教师意见	<p>指导教师签名：_____ 二〇一 年 月 日</p>
评议小组名单	<p>由学院主管领导确定 3~5 名具有高级职称的教师为评议小组成员</p> <p>组长：_____</p> <p>组员：_____, _____, _____, _____,</p> <p style="text-align: right;">(公章)</p> <p>主管领导签名：_____ 二〇一 年 月 日</p>
评议小组意见	<p>1、论文选题： <input type="checkbox"/>有理论意义； <input type="checkbox"/>有工程背景； <input type="checkbox"/>有实用价值； <input type="checkbox"/>意义不大。</p> <p>2、论文的难度： <input type="checkbox"/>偏高； <input type="checkbox"/>适当； <input type="checkbox"/>偏低。</p> <p>3、论文的工作量： <input type="checkbox"/>偏大； <input type="checkbox"/>适当； <input type="checkbox"/>偏小。</p> <p>4、研究方案的可行性： <input type="checkbox"/>好； <input type="checkbox"/>较好； <input type="checkbox"/>一般； <input type="checkbox"/>不可行。</p> <p>5、研究生对文献资料及课题的了解程度： <input type="checkbox"/>好； <input type="checkbox"/>较好； <input type="checkbox"/>一般； <input type="checkbox"/>较差。</p> <p>6、研究生在论文选题报告中反映出的综合能力和表达能力： <input type="checkbox"/>好； <input type="checkbox"/>较好； <input type="checkbox"/>一般； <input type="checkbox"/>较差。</p> <p>7、研究生在论文选题报告中反映出的创新能力： <input type="checkbox"/>好； <input type="checkbox"/>较好； <input type="checkbox"/>一般； <input type="checkbox"/>较差。</p> <p>8、对论文选题报告的总体评价： <input type="checkbox"/>好； <input type="checkbox"/>较好； <input type="checkbox"/>一般； <input type="checkbox"/>较差。</p> <p>(在相应的方块内作记号“√”)</p>
评议结论	<p>评议小组组长签名：_____ 二〇一 年 月 日</p>