

改进的 TT-RMS 调度表生成算法

张 超, 南建国, 褚文奎, 代西超

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038)

摘要 基于时间触发以太网的网络模型与消息模型, 改进了时间触发单调速率调度(TT-RMS)通信表生成算法, 用于生成时间触发以太网的调度表。改进后的 TT-RMS 算法, 首先根据消息的周期属性, 计算出消息调度的集群周期长度, 其次根据消息的周期及经过的路径长度, 确定出消息调度的先后顺序, 最后根据时间槽的分配状态进行消息调度。实验结果显示, 改进后的 TT-RMS 算法, 可以在多跳网络环境下, 基于不同长度和周期的消息, 生成时间触发消息调度表, 同时生成的调度表能够满足消息的时延需求。

关键词 RMS 调度机制; 时间触发以太网; 通信表生成; 实时通信; 多跳网络

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.06.015

中图分类号 TP393 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)06-0082-06

An Improved Communication Table Generation Algorithm Based on Time-Triggered Rate Monotonic Scheduling

ZHANG Chao, NAN Jianguo, CHU Wenkui, DAI Xichao

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: According to the characteristics of network model and message model in time-triggered ethernet, a rate monotonic scheduling (RMS) based time-triggered communication table generation algorithm is improved, which is used to generate configurable communication schedule in the time-triggered network. The improved time-triggered RMS (TT-RMS) algorithm can be used to calculate the scheduling of message timeslots based on the periods of messages, determine orders of messages transmission in accordance with the message period and routing links, and make scheduling messages by timeslots. The experiment results show that the improved TT-RMS algorithm can generate communication table according to the multi-hop networks and messages with different size and period, and at the same time the communication table can also meet the needs of the deadline requirement of messages.

Key words: rate monotonic scheduling (RMS) mechanism; Time-Triggered Ethernet (TTE); communication table generation; real-time communication; multi-hop networks

目前航空电子系统架构正在向分布式综合模块化航空电子系统(Distributed Integrated Modular

收稿日期: 2016-05-17

基金项目: 航空预研基金(619010601)

作者简介: 张超(1992-), 男, 山西太原人, 硕士生, 主要从事机载计算机应用技术研究. E-mail: hahaaa600@163.com

引用格式: 张超, 南建国, 褚文奎, 等. 改进的 TT-RMS 调度表生成算法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2016, 17(6): 82-87. ZHANG Chao, NAN Jianguo, CHU Wenkui, et al. An Improved Communication Table Generation Algorithm Based on Time-Triggered Rate Monotonic Scheduling[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(6): 82-87.

Avionics, DIMA) 发展^[1-3], 对任务的实时性有了更高的要求。全双工交换式以太网 (Avionics Full-Duplex Switched Ethernet, AFDX) 在机载信息量增大的情况下暴露了时延抖动大, 同步精度低, 确定性不够强, 带宽利用率低等问题, 不能满足 DIMA 对机载网络的需求。经过激烈的竞争, 时间触发以太网 (Time-Triggered Ethernet, TTE) 网络从 20 余种解决方案中脱颖而出^[4], 有较大可能成为 DIMA 的互联基础设施。

TTE 网络为了满足不同实时性和关键性数据流传输的需求, 提供了 3 种不同类型的消息: 时间触发 (Time-Triggered, TT) 消息、速率受限 (Rate-Constrained, RC) 消息和“尽力传” (Best-Efforts, BE) 消息^[5-7]。TT 消息传输具有低抖动和固定延时的优点, 可用于航电系统中实时性、关键性要求高的子系统^[8-9]。TTE 网络中, TT 消息是基于 TT 消息调度表传输的, 因此 TT 消息调度表的质量决定了 TT 消息的调度时延和 TTE 网络的负载。

目前, 国内外对 TTE 的研究主要集中在 TT 消息调度表的生成与优化方面。文献[10~13]提出一种基于可满足性模理论 (Satisfiability Modulo Theories, SMT) 解析器的 TT 消息调度表生成方法, 通过给定的约束集求得满足条件的可行解; 文献[14~15]基于禁忌搜索算法离线设计 TT 调度表, 降低了 RC 消息的时延, 使 RC 消息可以在消息的最大时延内传输完毕; 文献[16]提出了基于单调速率调度机制的离线消息调度算法——时间触发单调速率调度 (Time-Trigger Rate Monotonic Scheduling, TT-RMS), 优化了消息的调度过程; 文献[17]设计了一种混合关键性系统, 该系统基于多环拓扑结构的 TTE 网络实现; 文献[18]提出了一种基于时间窗检测的 TT 消息与 RC 消息的转换策略, 增加了 TT 消息调度表的健壮性。

本文介绍了 TTE 网络的网络模型和消息模型, 介绍了 TT-RMS 调度表生成算法, 并说明了该算法的不足。在此基础上, 改进了 TT-RMS 调度表生成算法, 使 TT-RMS 调度表生成算法可以在多跳网络环境下, 基于不同长度和周期的消息, 生成时间触发消息调度表。最后对该算法的适用性和实时性进行了仿真验证, 证明了生成的调度表能够满足消息的时延需求。

1 TTE 网络及消息模型

1.1 TTE 网络模型

TTE 网络由通信链路、交换机 (Network Swit-

ches, NSes) 和终端 (End Systems, ESes) 组成, 其中交换机与终端之间、交换机与交换机之间, 通过通信链路连接在一起。TTE 网络中的通信链路采用全双工方式, 即数据流可以同时链路的 2 个方向上传输。图 1 中网络拓扑包含 5 个 ES、3 个 NS 以及 8 条通信链路。

建立 TTE 网络模型 $G\{V, E\}$, 其中 V 表示网络中所有的终端与交换机的合集, E 表示终端与交换机之间、交换机与交换机之间的通信链路的合集。在典型 TTE 网络拓扑结构图 1 中, $V = ES \cup NS = \{ES_1, ES_2, ES_3, ES_4, ES_5\} \cup \{NS_1, NS_2, NS_3\}$, $E = \{VL_1, VL_2, \dots, VL_8\}$ 。链路 $VL_i = [v_j, v_k] \in L$, 其中 L 为链路 VL_i 的合集; v_j 为消息的源节点, v_k 为消息的终点, v_j 和 v_k 可以为 ES 或者 NS。链路 VL_i 的速度为 $Rate_VL_i$ 。

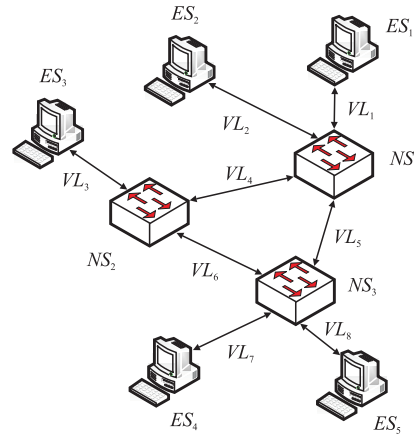


图 1 典型 TTE 网络拓扑

Fig.1 Typical topology of time-triggered ethernet

1.2 TTE 消息模型

本文将时间触发消息流模型的定义为:

$m_i (size, period, deadline, offset, dp_i, v_l, v_k) \in M$
 其中: M 为 TT 消息的合集, 包含所有的 TT 消息; $size$ 为消息的长度; $period$ 为消息的周期; $deadline$ 为消息的截止时间, 即消息的有效到达时限; $offset$ 为周期偏移, 即消息 m_i 在消息周期中的开始传输时间; dp_i 为消息 m_i 选择通过的路径, 并且 dp_i 是由数条物理链路组成的, 即 dp_i 为:

$$dp_i = [VL_1, \dots, VL_k] = [[v_i, v_p], [v_p, v_q], \dots, [v_r, v_k]]$$

TTE 采用帧的方式传输数据。对于不同的消息种类, TTE 采用不同的帧头部描述, 其中 TT 帧头部的 type 域值为 0x88d7。由帧的格式可知, 帧头部的长度为 42 B。帧的可用负载最小值为 17 B, 如果消息长度不足 17 B, 则会填充至 17 B; 最大负载为 1 471 B, 如果消息长度大于 1 471 B, 则会消息封装到数个不同的帧内。

TTE 的协议中指出, TT 消息的周期可以为调

和周期,也可以为非调和周期。调和周期指通信任务的周期呈 2 的幂次的调和整数倍关系。而非调和周期指多个任务之间的周期不呈 2 的幂次的调和整数倍关系,甚至是互质的周期。

图 2(a)中,消息 X 和 Y 的周期分别为 2、1,是调和周期的消息集。而图 2(b)中,消息 X 和 Y 的周期分别为 3、2,是非调和周期的消息集。

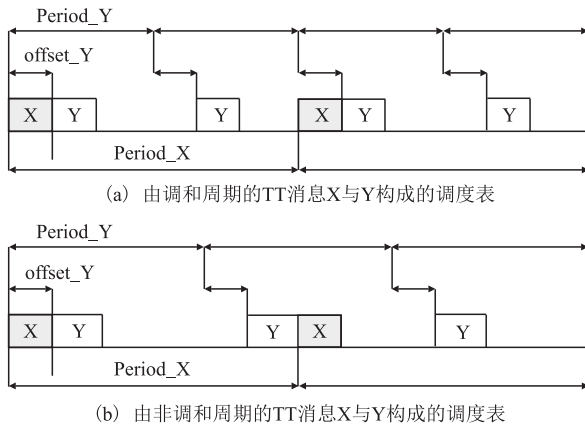


图 2 TT 消息周期举例

Fig.2 Example of TT messages' period

2 TT-RMS 算法及其改进

TT-RMS 调度表生成算法由徐晓飞等提出,已经证明了该算法具有运算速度快,负载率高的特点,可以满足航空航天电子系统中大量实时消息流的调度需求。

2.1 TT-RMS 调度表生成算法

TT-RMS 调度表生成算法用于离线生成 TT 消息调度表。该算法基于如下假设:①网络中,将要调度的 TT 消息全部为周期性消息,且消息的周期为调和周期;②网络中所有的通信链路资源都可以使用,交换机采用存储转发方式;③网络中所有的 TT 消息都可以在 1 个时间槽内传输完毕,而且每个时间槽最多有 1 个 TT 消息传输;④基于的网络拓扑为星型结构,即该网络中仅包含 1 个交换机,以及数个终端。

该算法在生成调度表时,首先根据消息的周期和负载,通过速率单调的原则,对所有的 TT 消息进行优先级排序,确定出消息调度的先后顺序;然后根据网络资源的状态对消息进行调度,优化了消息的调度过程。如果所有的消息都可以分配到网络资源,则说明调度表生成成功,能够满足 TT 消息调度的需求。

由于 TT-RMS 调度表生成算法基于等长的时间槽对消息进行调度,为了满足算法的需求,必须将

时间槽设置为传输最大帧长的传输时间。而消息的长度在实际中区别很大,这样实际上降低了网络链路的负载率。此外,该算法并不支持多跳的 TTE 网络,仅支持简单的星型网络,消息周期固定为 2 的幂次的调和整数倍关系,不能满足实际的需求。

2.2 改进的 TT-RMS 调度表生成算法

本文对 TT-RMS 通信表生成算法进行改进,主要的改进方面为:①支持非调和周期消息的调度,增加确定调度表集群周期长度的步骤;②对不同长度的消息分配不同长度的时间槽;③支持多跳网络的调度表生成,例如图 1 所示的网络拓扑;④在调度表生成后,可以对调度表中消息的时延进行判断,是否能够在最大时延内到达目的节点。

该算法基于如下假设:①网络中,将要调度的 TT 消息全部为周期性消息,且 TT 消息集及消息的属性已知;②网络中所有的通信链路资源都可以使用,且所有的链路属性均相同;③交换机采用“存储-转发”方式,即帧可以在交换机处等待停留一段时间,等交换机空闲时再发送;④网络中所有的 TT 消息都可以封装在一个帧内,这样将可以使消息在一个时间槽内传输完毕。

改进后的 TT-RMS 主调度程序如下:

```
{dLCM = LCM(Init_M);
Sort_message(Init_M);
RMS(SORT_M,dLCM);
}
```

其中,dLCM 为集群周期的大小,Init_M 为初始的消息集合,Sort_M 为经过排序操作后的消息集合。Init_M 和 Sort_M 均为结构体数组,包含消息的各项属性。

调度算法分为 3 个步骤:①求消息周期的最小公倍数,确定集群周期的大小;②对 TT 消息排序;③基于 TT-RMS 调度算法进行消息调度。

初始化的消息集置于数组 Init_M 中,处于随机的顺序。

函数 Sort_message() 基于消息的周期和经过路径的长度,对数组 Init_M 中的消息排序,将排序后的消息按顺序存入数组 Sort_M 中。消息按照周期由小到大的顺序排序,周期越小,优先级越高。对于周期相同的消息,则路径越长越优先。

消息调度的思路如图 3 所示。对于每一条消息 m_i ,按照帧传输路径的顺序,对每一条路径执行函数 find_resource() 和 search_cluster(),在链路中寻找足够长且合适的时间资源,同时确保在整个集群周期内都可行。在一条消息分配资源结束后,根据该消息的起始发送时间与最终接收时间,判断能否

满足消息的最大延迟约束,如果不能满足,则对该消息重新执行前一过程。如果资源能够满足上述要求,则执行 insert_time_slot() 函数操作,对消息进行资源分配。

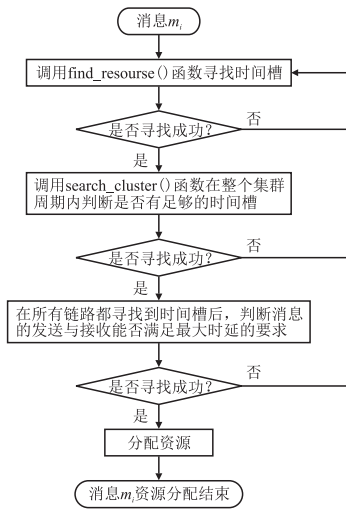


图 3 RMS 函数流程图

Fig.3 Flow chart of RMS function

对于一条消息,首先从开始传输经过的第 1 条链路开始,执行函数 find_resource()和函数 search_cluster()。函数 find_resource()从链路的第 1 个节点或者给定的偏移量开始寻找足够的资源,最大寻找范围为消息的 1 个周期,即要在消息的 1 个周期内寻找到资源,而此函数的返回值为资源的偏移量。如果不能找到资源,则说明该消息集 M 无法生成调

度表。当找到一个合适的资源后,执行函数 search_cluster(),用于判断整个集群周期中,该资源是否都可以被分配的状态。

在第 1 条链路执行结束后,查找到下一条经过的链路,并对该链路执行上述操作,函数 find_resource()开始的偏移量为上一条链路中该消息所占时间槽的偏移量与在链路中传输时延的和。

在消息经过的所有链路执行完上述操作后,将消息传输的结束时刻和开始时刻的差值,与消息的最大时延属性比较。如果开始时刻与结束时刻的差值小于消息的最大时延属性,则说明该消息已经能够分配资源,可以执行函数 insert_time_slot()。否则,则需要从消息的第 1 条链路开始,再次执行上述过程。此次在第 1 条链路的执行过程中,函数 find_resource()的初始偏移量为前次操作中该消息传输结束时刻的偏移量减去消息的最大时延,即 $offset = end_offset + mes.size/VL_Rate - mes.DeadLine$ 。

在所有消息都找到合适的资源后,输出 TT 消息调度表。否则,将无法生成调度表。

2.3 举例分析

假设网络拓扑如图 1 所示,包含 3 个交换机、5 个终端以及 8 条物理链路。消息集的配置见表 1。假设每条消息仅封装在 1 个帧内,而一个帧仅封装一条消息;消息传输链路选择采用最短路径原则,即消息传输走过的路径要短;链路的传输速度均为 0.5 MB/s;帧头部长度为 67 B。

表 1 消息配置举例

Tab.1 Example of message configuration

	周期/ms	最大时限/ms	长度/B	传输时间/ms	源节点	目的节点
M1	10	10	183	0.5	ES ₁	ES ₄
M2	10	10	683	1.5	ES ₂	ES ₄
M3	5	5	433	1	ES ₃	ES ₄
M4	10	10	433	1	ES ₁	ES ₅
M5	5	5	183	0.5	ES ₂	ES ₅
M6	7.5	7.5	433	1	ES ₁	ES ₂
M7	10	10	183	0.5	ES ₂	ES ₃
M8	7.5	7.5	433	1	ES ₃	ES ₅
M9	15	15	308	0.75	ES ₁	ES ₃
M10	5	5	183	0.5	ES ₂	ES ₅
M11	7.5	7.5	183	0.5	ES ₄	ES ₁
M12	10	10	433	1	ES ₄	ES ₂
M13	7.5	7.5	433	1	ES ₄	ES ₃
M14	5	5	183	0.5	ES ₅	ES ₂
M15	10	10	433	1	ES ₂	ES ₁
M16	10	10	683	1.5	ES ₃	ES ₂
M17	5	5	433	1	ES ₅	ES ₃
M18	5	5	183	0.5	ES ₅	ES ₂

根据改进后的 TT-RMS 调度表生成算法,基于上述消息生成的调度表见图 4。该调度表的集群周期为 30 ms。

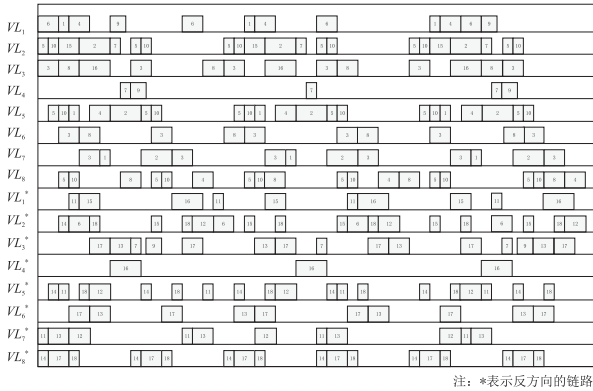


图 4 时间触发调度表

Fig.4 TT message communication table

3 实验环境与结果

用于测试调度表生成算法的实验环境为 3.4 GHz

的台式机,存储器大小为 4 GB。链路的速度均为 100 MB/s。消息模型采用均匀流量模型,即均匀流量的数据平均分布在网络的所有终端。在均匀流量模型的基础上,随机生成 TT 消息集。

3.1 消息的平均时延

由表 2 可知,改进后的 TT-RMS 算法可以支持复杂拓扑条件下的 TT 消息调度表生成。在生成的 TT 消息集中,以 7 组数据为例,进行分析。由 2、6、7 这 3 组数据可知,随着网络的负载率增加,消息的平均时延百分比增加。由 3、6 这 2 组数据以及 4、7 这 2 组数据可知,网络拓扑的复杂度对于消息的平均时延百分比影响较小。本次实验中平均时延百分比比较大的原因是,当消息在链路中不能一次性找到资源,需要迭代时,消息的初始偏移值根据消息的最大延迟时间获得。平均时延百分比=实际的网络时延/该消息的最大时延要求×100%。实际的网络时延=消息的完全接收时刻-消息的发送时刻。

表 2 TT-RMS 调度平均时延

Tab.2 Average time delay of TT-RMS schedule

序号	ES	NS	Load /%	消息量	Size_max/B	Size_min/B	T_max/ms	T_min/ms	帧数目	平均时延/%
1	5	3	30	65	1 451	3	25	2	703	51.03
2	12	4	40	101	1 433	10	37.5	2	2 462	54.32
3	21	6	50	86	1 464	1	100	4	1 303	61.86
4	30	8	60	220	1 460	13	37.5	4	6 871	72.57
5	35	8	70	283	1 443	4	37.5	2	6 130	87.19
6	12	4	50	101	1 437	5	37.5	2	2 844	62.32
7	12	4	60	101	1 445	2	37.5	2	3 357	74.32

3.2 最大负载率

基于不同的消息集和不同的拓扑结构,得到的链路最大负载率也不同。但是总体而言,如表 3 所示,在相同拓扑条件下,基于不同的消息集,链路资源负载率最大可接近 100%,而平均最大负载率可达到 83%以上。同时与原算法相比,由于时间槽的利用率增加,实际的负载率大大增加。

表 3 TT-RMS 调度负载

Tab.3 Load of TT-RMS schedule

序号	ES	NS	最大负载率/%	平均最大负载率/%
1	5	3	97.37	83.16
2	12	4	99.26	85.66
3	21	6	98.86	84.24
4	30	8	96.18	85.95
5	35	8	97.47	84.53

4 结语

本文改进了 TT-RMS 调度表生成算法,增加了 TT-RMS 算法的适用范围。经过分析与实验仿真,改进后的 TT-RMS 算法能够在复杂拓扑环境下,基于不同长度和周期的消息,生成 TT 消息调度表,同时生成的调度表能够满足消息的时延需求。改进后的 TT-RMS 调度表生成算法仍有不足的地方,例如目前并没有考虑时钟同步服务等,这是下一步研究的方向。

参考文献(References):

[1] 牛文生,王乐.机载计算技术的新进展[J].航空科学技术,2012(4):1-4.

- NIU Wensheng, WANG Le. Latest Development of Airborne Computing Technology [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2012(4): 1-4.(in Chinese)
- [2] WOLFIG R, JAKOVIJCVIC M. Distributed IMA and DO-297: Architectural Communication and Certification Attributes[C]//Proceedings of 27th Digital Avionics Systems Conference(DASC), Saint Paul Minnesota: IEEE /AIAA,2008:1-10.
- [3] WATKINS C B. Design Consideration for System hosted on Integrated Modular Avionics Platforms[C]//The 27th Digital Avionics Systems Conference, 2008: 1A2-1 - 1A2-7.
- [4] 蒲小勃.现代航空电子系统与综合[M].北京:航空工业出版社,2013.
- PU Xiaobo. Modern Avionics System and Integration [M]. Beijing: Aviation Industry Press,2013.(in Chinese)
- [5] Warrendale. SAE AS6802. Time-Triggered Ethernet [S]. PA: SAE Aerospace Standard,2011.
- [6] KOPETZ H, GRUNSTEIDI G. The Time-Triggered Ethernet(TTE) Design [C]// 8th IEEE International Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing, Washington DC,2005: 22-33.
- [7] STEINER W,BAUER G,HALL B, et al. TTEthernet Dataflow Concept [C]//8th IEEE International Symposium on Network Computing & Applications. IEEE 2009:319-322.
- [8] 罗安心. 基于时间触发以太网的同步算法研究与实现[D]. 成都:电子科技大学,2013.
- LUO Anxin. Research and Implementation Synchronization Algorithm based on Time-Triggered Ethernet [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2013. (in Chinese)
- [9] 郝燕艳,潘瑞,万小磊. 基于 TTEthernet 的综合电子系统通信网络研究[J]. *航天器工程*, 2013, 22(6):98-99.
- HAO Yanyan,PAN Rui, WAN Xiaolei. Research of Integrated Avionics Communication Network Based on TTEthernet[J]. *Space Engineering*,2013,22(6) : 98-99.(in Chinese)
- [10] STEINER W. An Evaluation of SMT-based Schedule Synthesis for Time-Triggered Multi-Hop Networks [C]// 2010 IEEE 31st Real-Time Systems Symposium (RTSS). IEEE, 2010: 375-384.
- [11] HUANG J, BIECH J O, RAABE A, et al. Static Scheduling of a Time Triggered Network-on-Chip based on SMT Solving[C]// Proceedings of Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition. IEEE, 2012: 509-514.
- [12] BEJI S, HMADOU S, A GHERBI, et al. SMT-Based Cost Optimization Approach for the Integration of Avionic Functions in IMA and TTEthernet Architectures[C]// 2014 IEEE/ACM 18th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications. ACM, 2014: 165-174.
- [13] POZO F, RODRIGUEZ-NAVAS G, HANSSON H, et al. SMT-based Synthesis of TTEthernet Schedules: a Performance Study[C]// 10th IEEE International Symposium on Industrial Embedded Systems. IEEE, 2015: 1-4.
- [14] TAMAS-SELICEAN D, POP P, STEINER W. Synthesis of Communication Schedules for TTEthernet-based Mixed-criticality Systems[C]// Proceedings of the eighth IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/software Codesign and System Synthesis. ACM, 2012: 473-482.
- [15] TAMAS-SELICEAN D, POP P, STEINER W. Design Optimization of TTEthernet-based Distributed Real-Time Systems[J]. *Real-Time Systems*, 2015, 51(1): 1-35.
- [16] 徐晓飞,曹晨,郭骏,等.TT-RMS:时间触发网络通信表生成算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(8): 1403-1408.
- XU Xiaofei, CAO Chen, GUO Jun, et al. TT-RMS: Communication Table Generation Algorithm of Time-Triggered Network[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(8) : 1403-1408.(in Chinese)
- [17] ABUTEIR M, OBERMAISSER R. Mixed-Criticality Systems based on Time-Triggered Ethernet with Multiple Ring Topologies[C]// IEEE International Symposium on Industrial Embedded Systems. IEEE, 2014: 170-178.
- [18] 易娟,熊华钢,何锋,等.TTE网络流量转换策略及其延时性能保障调度算法研究[J]. *航空学报*, 2014, 35(4): 1071-1078.
- YI Juan, XIONG Huagang, HE Feng, et al. Research on Traffic Classes Transformation Strategy and Real-Time Guarantee Scheduling Algorithm in TTEthernet [J]. *Acta Aeronauticae Astronautica Sinica*,2014, 35(4):1071-1078.(in Chinese)

(编辑:徐楠楠)