

基于矩阵分解的 TTE 通信任务规划方法^{*}

连天野¹ 李 峭¹ 熊华钢¹ 程子敬²

(1.北京航空航天大学 电子信息工程学院 北京 100191; 2.北京卫星信息工程研究所 信息技术国家重点实验室 北京 100086)

摘 要: 在航空航天电子领域,时间触发以太网(TTE)可以担当承载控制指令和实时数据的综合化网络,其中具有高关键性等级的通信任务采用时间触发(TT)通信。TT 通信任务调度需要拓扑构型和路径选择等深化设计参数;然而,在设计的前期更关注应用层对于通信任务的要求,需要在不具备深化设计参数的条件下对 TT 通信任务进行规划。本文提出含有两个阶段的通信任务规划方法,首先将双次通信任务交换矩阵扩容为通信任务容量矩阵,随后引进并改进 BVN 分解方法,将后者分解非冲突通信任务组合的时间片,形成易于在后续调度过程中排布的模板。案例仿真研究表明,该规划方法可使通信任务延迟缩短 43%,同时兼容后续时间调度表生成步骤。

关键词: 实时通信;矩阵分解;严格周期;时间触发

中图分类号: TN91 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

TTE communication task planning method based on matrix decomposition

Lian Tianye¹ Li Qiao¹ Xiong Huagang¹ Cheng Zijong²

(1.School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2.State Key Laboratory of Space Ground Integrated Information Technology, Beijing Satellite Information Engineering Research Institute, Beijing 100086, China)

Abstract: In the aerospace electronics field, time-triggered ethernet (TTE) can act as an integrated network for carrying control commands and real-time data, with time-triggered (TT) communications for missions with high critical levels. TT communication task scheduling requires deepening design parameters such as topology configuration and path selection; however, in the early stage of design, it pays more attention to the application layer requirements for communication tasks, and it is necessary to plan TT communication tasks without deepening design parameters. This paper proposes a two-stage communication task planning method. Firstly, the communication task switching matrix is expanded into a communication task capacity matrix. Then, the BVN decomposition method is introduced and improved, and the latter is decomposed into time slices of non-conflicting communication task combinations, which is easy to form. A template that is arranged during subsequent scheduling. Case study shows that the planning method can reduce the communication task delay by 43% and compatible with the subsequent time schedule generation step.

Keywords: real-time communication; matrix decomposition; strict cycle; time triggered

0 引 言

SAE AS6802 标准定义的时间触发以太网(time-triggered ethernet, TTE)已经实用于航天航空等工业领域的安全关键性实时系统,如美国 NASA 已经将 TTE^[1]网络作为猎户座载人飞船的骨干网络,支持不同类型的数据和通信需求,形成一个灵活的分布式综合化电子系统。在这种分布式综合化系统中包含时间触发(TT)、速率约束(RC)和尽力传(BE)流量,其中 TT 流量对应着具有严格时间确定性要求的通信任务组,相应通信任务规划是设计

中必须考虑的问题和实施的过程。

在 TTE 网络中,TT 通信任务根据应用的不同在主机端产生多种待发送的消息,并根据消息的类型进行派发,进而经过一级或多级交换机转发到目的端系统进行发送。目前,对于 TTE 网络的实时性能保证设计将通信任务抽象为虚拟链路(virtual link, VL)的配置^[2-3],主要关注于流量调度的问题^[4]。然而,在系统设计的前期,设计者更关注于通信任务与应用的关联,期望在系统配置运行之前,对各主机端多种 TT 通信任务发送的时机进行规划,文献[5]曾经进行任务负载均衡分配,但主要针对通信任务与多处理器的

分配关系。

对于可以进行多输入多输出的交换式网络,可以采用 Birkhoff-von-Neumann(BVN)分解的方法解决时间轴上空分复用的问题,但是仅针对单台交换机的内部结构^[6]。

本文的贡献在于,考虑应用层要求导致的部分通信任务之间消息发送的互斥关系,规划通信任务的主机端分组发送形式,为后续时间调度表生成过程提供通信任务模板,以降低发生冲突的可能性;在规划过程中,将通信任务的“源-目的”端系统双次^[6]通信任务交换矩阵转换为通信任务容量矩阵,引进 BVN 矩阵分解方法并加以改进,用以进行时间片分解,解决了通信任务组中存在互斥的问题,同时兼容后续时间调度表的生成步骤。

1 TTE 网络的建模

1.1 TT 通信任务

周期调度任务, T_i 的执行时间区间 I_i 为:

$$[\varphi_i + kp_i, \varphi_i + kp_i + e_i] \quad (k \in Z) \quad (1)$$

其中 φ_i, p_i, e_i 分别表示相位(第 1 个作业的释放时间)、周期(作业的固定释放时间间隔)和每个作业的执行时间^[7-8]。

任务集 Δ 在单处理器上严格周期可调度的充要条件是:

$$I_i \cap I_j = \emptyset \quad (i \neq j \text{ 且 } i, j \in 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

1.2 TTE 网络参量

TTE 网络体系结构由端系统(ES)、交换机(SW)、连接交换机与端系统的物理拓扑构成,每条物理拓扑上包含不同类型的消息。图 1 所示为具有一般意义的多级交换 TTE 网络结构^[9]。属于不同 TT 通信任务的消息利用全局时钟同步,各自遵循离线设计的时间调度表进行发送和转发。

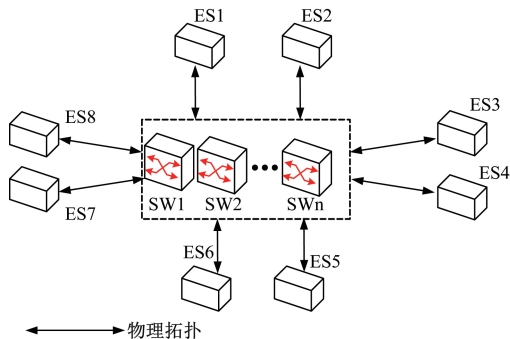


图 1 TTE 网络

时间调度表的生成要考虑多级交换的拓扑关系。然而,在总体设计前期,工程师更关注应用层要求对于通信任务消息发送合理性的影响,往往希望在指定 VL 路径和时间调度表之前,得到主机端通信任务的时间资源组合利用方案。这样,在通信任务规划中,多台交换机将被抽象为一

个“源-目的”端系统之间的通信任务交换矩阵,如图 1 中的虚线框所示。

在 TTE 网络中,周期性通信任务在不同的端系统中经由交换机进行消息传输^[10],将交换机看成一个整体的情况下, $T_p^e(ES_i, ES_j)$ 表示一个由端系统 ES_i 经由交换机(SW)到端系统 ES_j 的通信任务,该任务的消息长度为 e ,消息周期为 P 。

1.3 严格周期通信任务

任务调度技术是实时网络中的关键技术之一。在网络中,通信消息从源端系统发出,经过一个或者多个交换机到达目的端系统,此过程为通信传输。然而,在同一物理链路中多任务消息的同时存在会导致传输冲突,文献[11]证明得出,任意两个周期任务在但处理器上严格周期可调度的充要条件为:

$$e(o_i) \leq (s(o_i) - s(o_j)) \bmod g \leq g - e(o_j) \quad (3)$$

其中, $g = \gcd(p(o_i), p(o_j))$, $s(o_i), s(o_j)$ 是两个周期任务开始时间; $e(o_i), e(o_j)$ 为处理两个周期任务消息所用时间。在对通信任务组进行规划的过程利用改进形式的 BVN 矩阵分解方法将通信任务组分解为非冲突通信任务组^[12]。

2 通信任务规划

2.1 双次通信任务交换矩阵构建通信任务容量矩阵

由于通信任务的物理特性,通信任务的传输过程包括:在源端系统发送队列等待,从发送队列到交换机;在交换机队列等待,从交换机发出到目的端系统;在目的端系统接收队列等待。在仅考虑通信任务的非冲突发送条件下,将整体过程抽象成:通信任务在源端系统和目的端系统的单一发送过程。在构建的 N 阶通信任务矩阵中,最多可包含 $N \times N$ 个元素,令每个矩阵元素代表一个通信任务,元素 $T = [t_{i,j}]$ 代表一个从 i 源端系统到 j 目的端系统的通信任务,元素的值代表该通信任务的通信任务流量,通信任务流量是指在确定带宽的情况下,传输消息所占带宽用的比例^[13]。

在任意端系统中,任意时刻通信任务组占用带宽比例之和不超过 1,即:

$$\sum_{i=1}^N t_{i,j} \leq 1, \forall j \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^N t_{i,j} \leq 1, \forall i \quad (5)$$

为保证后续调度过程的严格周期性,达到流量冗余的目的,将双次通信任务交换矩阵进行扩容^[14],构建成通信任务容量矩阵 $C, C = [C_{i,j}]$ 满足 $t_{i,j} \leq C_{i,j}, \forall i, j$ 在通信任务容量矩阵中,任意时刻通信任务组占用带宽比例之和为 1。即:

$$\sum_{i=1}^N t_{i,j} = 1, \forall j \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N t_{i,j} = 1, \forall i \quad (7)$$

双次通信任务交换矩阵扩容步骤如下:

1) 如果 $\mathbf{T} = [t_{i,j}]$ 中所有元素的和小于 N , 则存在一个元素 $t_{i,j}$ 使得 $\sum_n t_{i,n} < 1$ 以及 $\sum_m t_{m,j} < 1$ 。

2) 令 $\epsilon = 1 - \max[\sum_n t_{i,n}, \sum_m t_{m,j}]$ 将 $t_{i,j}$ 加上 ϵ , 则 $t_{i,j}$ 所在的行和列元素和至少有一个为 1, 而所得的元素 $c_{i,j} = t_{i,j} + \epsilon \geq t_{i,j}$ 。

3) 到所有的行和列的和均为 1, 此时得到的矩阵 $\mathbf{C} = [C_{i,j}]$ 为一个双随机矩阵。

将流量矩阵 $\mathbf{T}$ 转换为容量矩阵 $\mathbf{C}$, 其中 $C_{i,j} \geq t_{i,j}, \forall i, j$ 。

2.2 通信任务容量矩阵分解

为保证通信任务之间的非冲突性, 对通信任务容量矩阵进行时间片的分解。由于端系统的单一任务可用性, 对于一个包含 N 个端系统的整网, 在同一时刻最多传输 N 个通信任务所产生的消息。需要将通信任务容量矩阵分解成最多包含 N 个元素的矩阵组, 并且 N 个通信任务对应元素的所在行、所在列均不重复。

同时, 为了保证优先级较高的通信任务能够优先传输, 设置了通信任务模板, 按照通信任务模板进行消息的传输。对于包含 8 个通信任务的任务组, 如式(8)所示。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.1 & 0.5 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0.25 \\ 0.35 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.2 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

将通信任务分成不同的组, 在组内尽可能使通信任务的周期达到调和, 如式(9)所示。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.25 \\ 0.35 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

将分组后的通信任务与单位置换矩阵进行模板对应, 并且单位置换矩阵模板在进行通信任务矩阵分解时有最高优先级, 如式(10)所示。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

对于通信任务容量矩阵 $\mathbf{C} = [C_{i,j}]$, 总存在一系列的系数 ϕ_k 和对应的置换矩阵 $\mathbf{P}_k$ 使得:

$$\begin{cases} \mathbf{C} = \sum_{k=1}^K \phi_k \mathbf{P}_k \\ \sum_{k=1}^K \phi_k = 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: ϕ_k 为权值; $\mathbf{P}_k$ 为置换矩阵。

在对通信任务容量矩阵 $\mathbf{C}$ 进行分解时, 将上述 M 个单位置换矩阵模板优先排列, 其余 $N \times N - M$ 个单位置换矩阵随机进行分解。从而保证了通信任务消息传输效率的最大化, 更改优先级容量矩阵分解算法如表 1 所示。

表 1 更改优先级容量矩阵分解算法

算法: 更改优先级容量矩阵分解算法

Input: Matrix C

```

1 MA={ [1 0 0 0]; [0 1 0 0]; [0 0 1 0]; [0 0 0 1] };
2 MB=perms(MA);
3 MB=ChangePriority(MB);
4 FOR number=1 TO 24
5   BB=[]; MIN=1;
6   FOR number1=1 TO length(C) DO
7     AA=cell2mat(B(number, number1));
8     BB=[BB; AA];
9     FOR number2=1 TO length(T) DO
10      IF AA(k)=1 && C(number1, number2)
~>=0
11       Mark=Mark + 1;
12       IF MIN > C(number1, number2)
13         MIN=C(number1, number2);
14     IF Mark==4
15       C=C-min*BB;
16        $\phi_k[\text{length}(\phi_k)+1] += \text{min}$ ;
17        $P_k[\text{length}(P_k)+1] = \{BB\}$ 
18 END
```

Output: ϕ_k [], P_k []

3 案例研究

通过仿真实验设定 8 个周期通信任务, $T_{2}^{0.3}(ES_1, ES_2)$, $T_{3}^{0.3}(ES_1, ES_2)$, $T_{4}^{0.1}(ES_1, ES_2)$, $T_{5}^{0.1}(ES_1, ES_2)$, $T_{6}^{0.35}(ES_1, ES_2)$, $T_{8}^{0.25}(ES_2, ES_1)$, $T_{8}^{0.2}(ES_1, ES_2)$ 。根据通信任务的源端系统和目的端系统以及通信任务流量构建双次通信任务交换矩阵, 如式(12)所示。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.25 & 0.3 \\ 0.3 & 0 & 0 & 0.25 \\ 0.35 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.2 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

按照双次通信任务交换矩阵构建通信任务容量矩阵的算法, 将 $\mathbf{T}$ 阵转换为 $\mathbf{C}$ 阵, 如式(13)所示。

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.1 & 0.25 & 0.3 \\ 0.3 & 0.4 & 0.05 & 0.25 \\ 0.35 & 0.2 & 0.45 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.25 & 0.45 \end{bmatrix} \quad (13)$$

按照通信任务容量矩阵分解算法, 确定单位置换矩阵

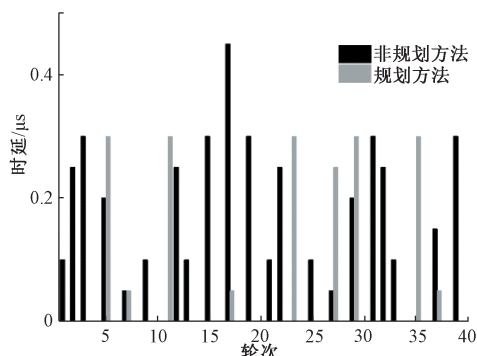
模板。模板如式(14)所示。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

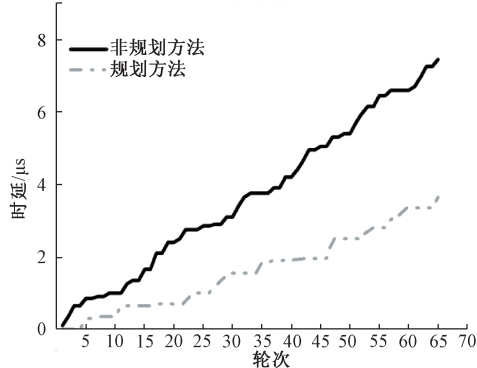
在进行更改优先级容量矩阵分解时将单位置换矩阵模板置于最高优先级。按照更改优先级容量矩阵分解算法进行分解,得到系数队列和单位置换阵队列。

$$\begin{aligned} \mathbf{C} = & 0.2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} + 0.25 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \\ & 0.05 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} + 0.05 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} + 0.1 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15) \end{aligned}$$

经上述步骤分解的单位置换矩阵系数与通信任务周期最小公倍数乘积的结果来确定每个单位置换矩阵在时间轴上的数量;单位置换矩阵按照每隔对应系数的倒数依次放置。通过与未采用本文规划方法进行规划的数据进行对比,如图 2 所示。



(a) 非规划方法与规划方法单一 ROUND 通信任务时延对比



(b) 非规划方法与规划方法 Cluster Cycle 通信任务时延对比

图 2 实验数据对比

法与规划方法的通信任务时延抖动分别为 13.2 与 7.55 单位时间。采用本文规划方法可使通信任务延迟缩短 43%, 说明它具备大幅度优化通信任务发送策略的能力, 同时本方法还为后续规划过程提供通信任务模板, 兼容后续时间调度表生成步骤。

4 结 论

本文提出了适合于通信任务组规划过程的方法, 该方法分为双次通信任务交换矩阵扩容到通信任务容量矩阵过程以及通信任务容量矩阵分解成为时间片两个过程。可以在不具备深化设计参数的条件下对 TT 通信任务进行合理地规划。案例研究表明, 综合利用该方法, 与不考虑规划过程的通信任务调度过程相比, 可使通信任务组在每轮 Cluster Cycle 的时间延迟降低, 也为后续时间调度表的生成步骤提供了通信任务模板, 提高了通信任务调度的效率。同时通信任务规划是调度表生成(含路径分配)的前提约束, 但是实际的工程设计需要不断完善, 本规划方法兼容后续调度表生成, 便于规划和调度过程的多次迭代。

参考文献

- [1] 何锋. 机载网络技术基础[M]. 国防工业出版社, 2018.
- [2] WINDSOR J, HJORTNAES K. Time and space partitioning in spacecraft avionics[C]. IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology, IEEE Computer Society, 2009.
- [3] LITTLEFIELD-LAWWILL J, KINNAN L. System considerations for robust time and space partitioning in integrated modular avionics [C]. Digital Avionics Systems Conference, 2008.
- [4] 丁培丽. 时间触发以太网关键技术研究及核心模块设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [5] 汤宇, 李峭, 贾琪明. 时间触发以太网的分布式任务负载均衡分配方法[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(5): 1501-1505.
- [6] 魏丰, 潘小虎, 曾勇, 等. 光纤 CAN 总线集线器及其组网研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12): 2839-2844.
- [7] AL SHEIKH A, BRUN O, HLADIK P E, et al. Strictly periodic scheduling in IMA-based architectures[J]. Real-Time Systems, 2012, 48(4): 359-386.
- [8] SHEIKH A A, BRUN O, HLADIK P E, et al. A best-response algorithm for multiprocessor periodic scheduling[C]. Euromicro Conference on Real-time Systems, IEEE Computer Society, 2011: 228-237.
- [9] STEINER W, BAUER G, HALL B, et al. TTEthernet: Time-Triggered Ethernet[M]. In Time-Triggered Communication, CRC Press, 2011.
- [10] Issuing Committee. S-2d2 Deterministic Ethernet And Unified Networking[S]. SAE AS6802 time-triggered

通过案例对比后发现, 在单一 Cluster Cycle 非规划方

- ethernet.[2014-5-20].<http://standards.sae.org/as6802/>.
- [11] PRAKASH A, MOHIYUDDIN M, AZIZ A. Scheduling traffic matrices on general switch fabrics [C]. High-Performance Interconnects, 14th IEEE Symposium on IEEE, 2006:87-92.
- [12] DURKOVIĆ S, ČIČA Z. Birkhoff-von Neumann switch with deflection based load balancing [C]. Telecommunications Forum, IEEE, 2017:1-4.
- [13] ELMENREICH W, IPP R. Introduction to TTP/C and TTP/A [J]. Proceedings of the Workshop on Time, 2003.
- [14] LIN J, ANSARI N. Enhanced Birkhoff-von Neumann

decomposition algorithm for input queued switches[J]. IEE Proceedings Communications, 2001, 148(6): 339-342.

作者简介

连天野,硕士研究生,主要研究方向为航空电子与总线通信。

李峭(通信作者),博士、讲师,主要研究方向为航空电子与总线通信。

E-mail:lianty@buaa.edu.cn

熊华钢,教授、博士生导师,主要研究方向为航空电子综合等。

程子敬,研究员、博士生导师,主要研究方向为空间信息网络、通信协议等。

是德科技为 PathWave ADS 增添新分析工具

新 PEPro 软件使设计人员可以在制造和测试原型机之前方便地分析设计效果

2019 年 3 月 25 日,中国北京——是德科技公司(NYSE: KEYS)宣布推出电力电子专业(PEPro)软件。该软件是 PathWave ADS(先进设计系统)的一个新增附件,它使设计人员能够直接查看开关模式电源(SMPS)设计的效果,而无需耗费时间提前制造和测试设计原型。是德科技是一家领先的技术公司,致力于帮助企业、服务提供商和政府客户加速创新,创造一个安全互联的世界。

更高效率、更高功率密度和更低成本是 SMPS 客户始终迫切追求的目标。碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)等新型半导体材料具有十分卓越的性能和效率,可以为未来应用提供强大动力。不过,这些高性能材料也使得印刷电路板(PCB)的版图设计变得更困难,从而带来了新的挑战。对“虚拟原型”进行版图后期分析是应对这一挑战的理想方案,但它要求用户具有深厚的专业技术,并需要借助复杂的通用电磁(EM)场求解程序。

Keysight PEPro 软件使版图后期分析像版图前期分析一样简单。它能够自动完成设置,而无需像以前那样需要由电磁专家进行设置。此外,它还提供了预置分析功能,可以方便地分析电压尖峰和电磁干扰(EMI)等效果。

阿拉巴马大学电子与计算机工程系助理教授 Andrew Lemmon 博士表示:“是德科技认为,下一代宽带隙半导体对于电力电子设计人员来说是一个全新的领域。要想更好地利用这项技术,设计人员需要使用新的工具来深入分析各种设

计权衡的微妙差别,洞察它们对应用性能的重要影响。Keysight ADS 提供的这些改进,意味着它能进一步帮助电力电子设计人员掌握这些重要的细节。”

Picotest 总经理 Steve Sandler 表示:“Keysight ADS 一直是我最喜欢的版图后期分析工具。Keysight PEPro 支持电力电子设计人员向实现端到端仿真和打造完整的电力生态系统迈出了新的一步。”

是德科技电力电子 EDA 工具产品经理 Colin Warwick 表示:“是德科技深知,与通用工具相比,客户更青睐专用的版图后期分析工具。我很高兴是德科技能够推出 PEPro。它针对 SMPS 设计人员量身定制,能够帮助他们更轻松地应对高速开关时代带来的挑战。”是德科技在 2019 年 3 月 18 日至 20 日在美国加州阿纳海姆会议中心举行的 IEEE 应用电力电子大会(APEC 2019)上展出了 PEPro 软件。目前测试版 PEPro 仅向参加 ADS 早期试用项目的特定客户提供。量产版将于 7 月 1 日上市。

关于是德科技电力电子设计解决方案

是德科技的电力电子设计解决方案能够为电力器件的整个生产流程提供全方位支持,覆盖从仿真、设计和验证到制造、部署和优化的所有阶段。是德科技通过先进设计系统,提供完整的电磁电路协同仿真环境。关于是德科技电力电子设计解决方案的更多信息,请访问:<http://www.keysight.com/find/eesof-power-electronics>。