

doi:10.11920/xnmdzk.2018.01.009

物联网智能感知节点基于 π 网软硬件划分模型研究

刘晓霞,周绍军

(四川水利职业技术学院信息工程系,四川 崇州 611231)

摘要:针对物联网智能感知节点的软硬件划分问题,提出了基于 π 网的物联网智能感知节点的软硬件划分模型,并对模型进行了实验与仿真.首先对物联网智能感知节点进行带约束定义,得到了智能感知节点的约束模型;然后利用 π 网理论,建立了基于 π 网的物联网智能感知节点软硬件划分模型,并对模型进行了演化分析;最后,利用先进 Pareto 优化算法对划分模型进行了优化,同时与 TS 禁忌搜索算法和 GA 遗传算法等进行了对比实验.通过分析实验仿真,建立的模型,在适应度和划分执行时间等方面具有一定的优越性和实用性.

关键词:物联网;智能感知节点; π 网;软硬件划分

中图分类号:TP391.44

文献标志码:A

文章编号:2095-4271(2018)01-0056-07

Research on hardware/software partitioning model for intelligent sensing nodes of internet of things based on π -nets

LIU Xiao-xia, ZHOU Shao-jun

(Department of Information Engineering, Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chongzhou 611231, P. R. C.)

Abstract: Aiming at the problem of hardware and software partition of intelligent sensing nodes in Internet of Things, a hardware and software partition model of intelligence nodes based on π network was proposed, experimented and simulated. Firstly, the constrained model of the intelligence node was obtained by defining intelligence nodes of the internet of things with constraints. Then, the hardware and software partition model of intelligent sensing nodes based on π network was established by using the π network theory, and the model was analyzed by evolution analysis method. Finally, the partition model was optimized by the advanced Pareto optimization algorithm, and compared with TS tabu search algorithm and GA genetic algorithm in experiments. Through the analysis and experimental simulation, the model established has certain superiority and practicability in the aspects of adaptability and division of execution time.

Key words: internet of things; intelligent sensing node; π -net; hardware/software partitioning

随着物联网的不断发展,智能感知已广泛的应用且为物联网感知领域的重要基础设施.智能感知节点将感知信息采集、实时信息处理和实时通信于一体,如智能交通领域的车联网,若在行进路上发生故障或事故,则智能感知系统将位置、环境状况等信息进行实时感知、处理,并将处理后的信息进行实时传输,以便得到快速处理.智能感知节点具有较高的性能,如

全新的、覆盖面广和实时性强等特点,又如互通信、互操作能力等;而且,智能感知节点在功耗、体积、处理器速度等方面存在约束;因此,急切需要对其软硬件划分进行研究.

就软硬件划分算法而言,国内外研究者对其进行了诸多研究.文献[1]提出了基于可满足性理论(Satisfiability Modulo Theories, SMT)的软硬件划分算法,并

收稿日期:2017-11-03

作者简介:刘晓霞(1976-),女,汉族,河南人,副教授,硕士,研究方向:计算机应用技术、物联网

基金项目:国家科技计划支撑基金项目(2012BAH76F01);四川省水利厅2017年科研计划项目(SL2017-01)

进行了实验验证. 文献[2]利用最新的不确定性理论对线性不确定分布和正态不确定分布,提出一种用于硬件/软件资源共享的参数增强系统划分不确定性模型,并对模型进行了分析与验证. 文献[3]在不牺牲系统质量的情况下,提出图归约技术进行软硬件划分,以减少进行系统设计时的软硬件划分的设计空间. 文献[4]提出一种将流式细胞粒度的粒子群优化算法、模糊 C 均值算法和粒子群优化算法相结合的二进制多核软硬件划分算法. 文献[5]提出了两种软硬件划分算法,即启发式的扩展 0-1 背包算法和基于禁忌的启发式算法. 文献[6]利用生物行为学理论,提出一种基于从众和声粒子群算法的冰箱软硬件划分方法. 文献[7]提出一种将遗传算法与蚂蚁算法进行动态融合的软硬件划分算法. 文献[8]对可重构的 FPGA 利用混合式两阶段的动态重建建立软硬件划分算法. 文献[9]将软硬件划分问题看作带有动态通信代价的变异 0-1 背包问题,提出一种基于迭代排序思想的 NodeRank 算法. 这些研究,针对一般嵌入式系统而进行软硬件划分研究,提出了相应的算法;但未针对物联网智能感知节点的具体特点,进行具有针对性的软硬件划分研究;因此,本文针对物联网智能感知节点的特殊性,对其进行软硬件划分研究,是十分必要的.

π 网是一种基于 Petri 网和 π 演算的高级建模方法,主要用于描述和刻画并发系统,并能发挥 Petri 网的图形和数学优点,又能充分体现和应用 π 演算的代数特性,非常适合描述软硬件设计过程中的并发行为^[10]. 因此,在此利用 π 网理论,建立物联网智能感知节点在硬件面积、成本、实时性和可靠性等约束下的软硬件划分算法,并对算法进行分析和实验验证.

1 智能节点模型

物联网三层体系结构中,最底层为感知层,由诸多感知设备构成,如 RFID 设备、视频采集终端、传感器感知终端和条码终端等等. 而这些感知设备大多是智能设备,能够完成对物质世界的感知、处理和传输,故其功能需求可用任务流程图来描述^[11].

在智能节点任务流程图中,一个顶点 v_i 表示一个功能 IP_i 核,有向边 e_{ij} 表示 IP_i 核和核 IP_j 间的依附关系;有向边上的数字 ω_{ij} 表示顶点 v_i 到顶点 v_j 的约束条件;其中 $i, j = 1, 2, \dots, n$. 一个任务流程图中有且

仅有一个顶点的入度为 0、有且仅有一个顶点的出度为 0,将这两个顶点分别称为起始顶点和终止顶点;同样,在智能节点任务图中,存在一条由起始顶点到终止顶点的键路径,且键路径由图中的若干相互依附的顶点组成. 如图 1 所示,其中 v_1 表示智能节点的某种功能的软硬件划分开始, v_n 表示得到该功能的软硬件划分之最优结果.

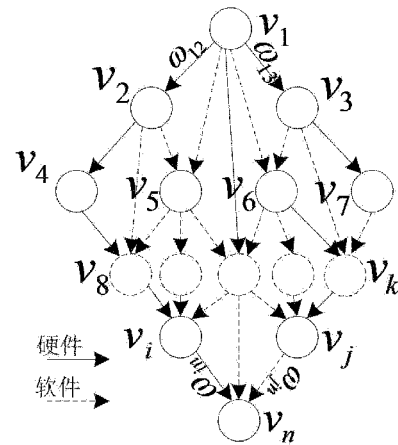


图 1 智能节点功能 IP 核任务图

Fig. 1 Intelligent node function IP kernel task diagram

物联网智能感知节点存在很多约束,比如在硬件面积/体积、能耗、可靠性和实时性等. 同时,智能节点还具有相应的性能指标要求. 假定智能节点的性能指标 PI_1 不超过 Bq_1 、性能 PI_2 不能超过 Bq_2 …… ,性能指标 PI_n 不能超过 Bq_n ,则性能指标 $PI_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的实现存在两种方法,即硬件实现和软件实现,且每种实现具有不同的性能指标数据. 设 C_i 为 n 元组,即 $C_i = (PI_{i1}, PI_{i2}, \dots, PI_{in})$,则以 C 描述智能节点设计时的第 i 个 IP 核,其中 $PI_{i1}, PI_{i2}, \dots, PI_{in}$ 为与该 IP 核对应的需重点考虑和评价的性能参数^[12].

物联网智能感知节点在设计时,需要重点考虑节点能耗和响应时间. 因智能感知节点大多为电池供电,存储的能量是及其有限的. 智能感知节点的第 i 个 IP 核的能耗主要由空闲能耗和运行能耗构成,即:

$$E_i = E_{idle} + E_{run} = E_{idle}(i) + E_{run}(i, task). \quad (1)$$

其中: E_{idle}, E_{run} 分别表示空闲能耗和运行能耗; $E_{idle}(i)$ 表示第 i 个 IP 核空闲能耗; $E_{run}(i, task)$ 表示第 i 个 IP 核运行时能耗; i 为 $1, 2, \dots, n$ 中取值. 故得到智能感知节点的总能耗为:

$$E_{sys} = \sum_{i=1}^n E_i(i). \quad (2)$$

智能感知节点的响应时间,特别是对实时感知而言,就显得尤为重要.节点的响应时间由感知时间、处理时间和通信时间构成,故可表示为:

$$T_{rts} = T_{sent} + T_{inpt} + T_{comt} = \sum_{i=1}^n T_{sent}(i, stask_i) + \sum_{j=1}^i T_{inpt}(j, ptask_j) + \sum_{k \in sys} T_{comt}(k, ctask_k), \quad (3)$$

其中: i, j, k 均为 $1, 2, \dots, n$ 中取值; $\sum T_{sent}(i, stask_i)$ 表示多种感知任务的响应时间进行累加; $\sum E_{inpt}(j, ptask_j)$ 表示多种感知信息进行处理所需要的时间的累加; $\sum E_{comt}(k, task_k)$ 表示整个智能感知节点的通信所需时间的累加.

假定物联网智能感知节点的主要性能指标及其约束为:能耗 $\leq E$; 成本 $\leq Cost$; 面积 $\leq Ma$; 重量 $\leq W$; 可靠性 $\leq R$; 体积 $\leq V$; 响应时间 $\leq Rt$; 则可对第 i 个 IP 核而言,就有:

$$C_i = (E_{ik_0}, Cost_{ik_1}, Ma_{ik_2}, W_{ik_3}, R_{ik_4}, V_{ik_5}, Rt_{ik_6}), \quad (4)$$

其中: i 表示 IP 核, 且 $1 \leq i \leq n$; $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ 为确定的常数, 为第 i 个 IP 核的备选项的数目.

定义 1 假定物联网智能感知节点由若干 IP 核组成, 即:

$$CM_{isn} = \{FM_1, FM_2, \dots, FM_n\}, \quad (5)$$

则每个 IP 核均存在一组供选的构件集合, 即:

$$\begin{cases} FM_1 \rightarrow \{C_{11}, C_{12}, \dots, C_{1a}\} \\ FM_2 \rightarrow \{C_{21}, C_{22}, \dots, C_{2a}\} \\ \dots\dots \\ FM_n \rightarrow \{C_{n1}, C_{n2}, \dots, C_{nm}\} \end{cases}; \quad (6)$$

其中: C 为服从式(1); a, b, \dots, m 是常数, 分别表示 FM_1, FM_2, \dots, FM_n 所对应的备选 IP 核的数目.

由此, 物联网智能感知节点的软硬件划分问题就转化为求 CM_{isn} 的一个组合 $(C_{1i}, C_{2j}, \dots, C_{nt})$, 其中 $1 \leq i \leq k_0, 1 \leq j \leq k_1, \dots, 1 \leq t \leq k_6$, 且满足:

$$\begin{cases} E_{1i} + E_{2j} + \dots + E_{nt} \leq E \\ Cost_{1i} + Cost_{2j} + \dots + Cost_{nt} \leq Cost \\ \dots\dots \\ T_{1i} + T_{2j} + \dots + T_{nt} \leq Rt \end{cases}. \quad (7)$$

故得到物联网智能感知节点结构模型如图 2 所示.

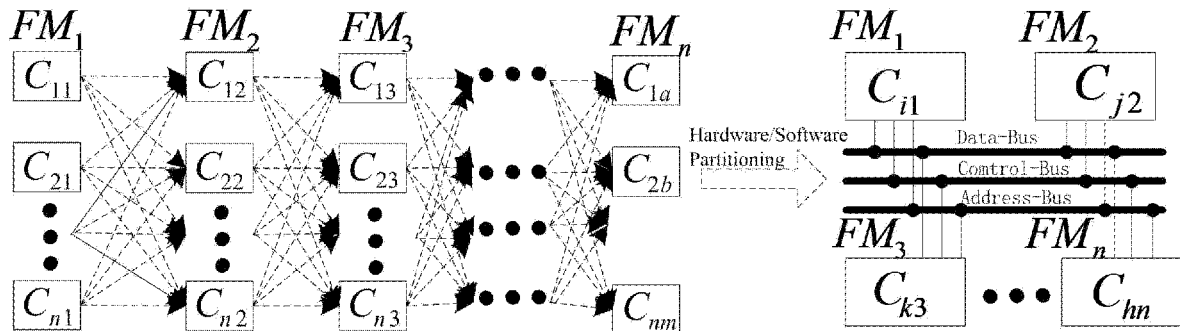


图 2 物联网智能感知节点结构模型

Fig. 2 Intelligent perceptive node structure model for Internet of things

2 软硬件划分模型

依据 π 网理论和智能感知节点模型, 可定义物联网智能感知节点的软硬件划分模型 HSPM (Hardware/Software Partitioning Model, HSPM) [11].

定义 2 物联网智能感知节点的软硬件划分模型 HSPM 为一个 π 网 N_{HSPM} , 即 $N_{HSPM} = (E_{HW}, E_{SW}, E_F; E_r)$, 其中: E_{HW} 为设计中的硬件 IP 核实现的功能集合, 是网 N_{HSPM} 的库所集; E_{SW} 为系统设计中软件 IP 核实现的功能集合, 是网 N_{HSPM} 的变迁集, 使得 $E_{HW} \cap$

$E_{SW} = \varphi$; $E_F \subseteq (E_{HW} \times E_{SW}) \cup (E_{SW} \times E_{HW})$ 是网 N_{HSPM} 的有向弧集, 表示网 N_{HSPM} 的对应关系; E_r 是定义在 $E_{HW} \cup E_{SW} \cup E_F$ 上的一个属性函数, 表示物联网智能感知节点设计中的各种约束评价因子所构成的函数关系.

由参考文献[11], 可得到模型 N_{HSPM} 的软硬件划分算法步骤为:

第一步: 输入、输出和约束条件设置. 输入设置: 物联网智能感知节点的任务图及网 N_{HSPM} 的初始条件、可选 IP 核库所、约束条件; 输出设置: 符合约束条

件的划分集合,并进行最优化处理;约束条件设置:按照式(4)设定每个可选 IP 核的约束值,得到每个 IP 核的约束条件矩阵;

第二步:生成初始网.依据输入生成初始 π 网,得到初始的网;

第三步:初始 π 网进行演算.依据 π 网理论,在初始输入设置下进行初始 π 网演算;

第四步:子网划分.依据规则 1 和规则 2,对初始 π 网进行变迁使能和激发,同时进行输入库所的标识变迁使能与激发,得到中间 π 网 N'_{HSPM} ;依据约束条件进行库所、变迁的删减,得到最小网 N''_{HSPM} ;在网 N''_{HSPM} 中,计算变迁的最小时间及其对应的子网,直到得到网 N''_{HSPM} 中无同时被两个变迁同时覆盖的变迁,否则继续进行子网划分;

第五步:得到演化与划分后的 π 网,即 N_{HSPM} 模型.经过第三、四步,在约束条件下,对得到的网 N''_{HSPM} 进行性能评估,若符合所输入的约束条件,则得到模型 N_{HSPM} ,否则返回第三步;

第六步:对模型进行效用评估.对得到的模型进行效用度计算,并将其与给定的约束条件中的效用度值进行比较,若其值小于约束中的效用度值,则返回第一步;

第七步:输出划分结果.符合约束条件的划分,输出划分结果,启用最优化处理;

第八步:得到最优的划分结果.从所有符合约束条件的划分输出中,采用多目标最优化处理方法,得到最优的结果,并以此作为物联网智能感知节点的软硬件划分的最后结果输出;否则返回到第一步.

因此,物联网智能感知节点软硬件划分模型 N_{HSPM} 可表示为如图 3 所示.图 3 中,左边为模型 N_{HSPM} 的库所、变迁在约束条件下,进行软硬件划分时的过程;右边为模型 N_{HSPM} 进行划分之后,得到选中的可选 IP 核构成的智能感知节点模型.图 3 中, $Data_i (i = 1, 2, \dots)$ 为第 i 个库所的约束条件集合,其定义服从公式(4).

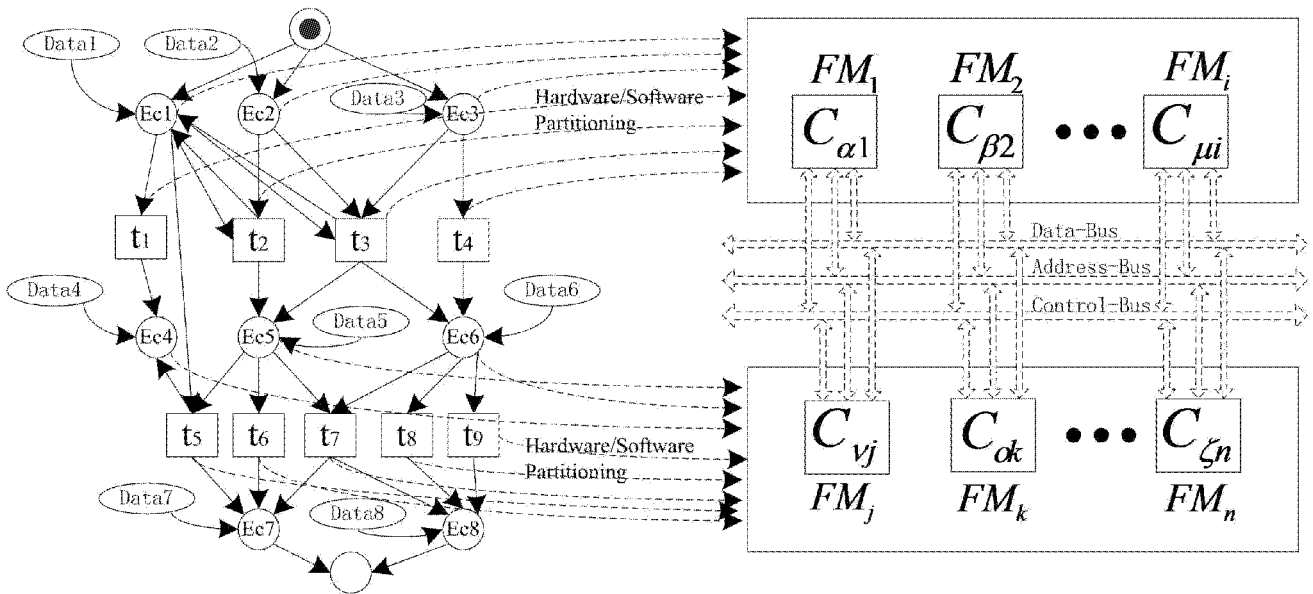


图 3 π 网的迁移变迁与划分结果的映射关系

Fig. 3 Mapping relationship between the migration and transition of the pion network and the result of the partition

3 模型动态演进分析

在得到物联网智能感知节点 π 网软硬件划分模型后,利用 π 网理论,对模型完成动态化的演化分析.

模型 N_{HSPM} 动态化的演化,在此仅仅探究候选 IP 核的创建、删除和更新等情况.

候选库所有新的库所加入时,该新的库所必须先进行库所注册,使其存储并作为库所候选库的一个候

选库所. 新库所建立进程 $NewPlace$ 可描述为:

$$\begin{cases} newPCreate(i_d, s) = PCreate(i_d, s), & (8) \\ regPlace(i_d, s) = (i_d, s)(\overline{reg}(i_d, s)), & (9) \\ conregplace(x, y) = (x, y)(reg(x, y)). & (10) \end{cases}$$

其中:式(8)表示新库所创建;式(9)表示新库所注册;式(10)表示新库所加入候选库中.

新库所加入到候选库后,需要参与模型的各种变迁. 新库所的变迁 $NewPlaceP$ 进程可描述为:

$$\left\{ \begin{array}{l} reqservpro(i, r, l) = \bar{i} \langle a \rangle \cdot r(z) \cdot \bar{z} \langle l \rangle, \\ queservpro(i, r, p) = i(y) \cdot ([y = a]r \langle p \rangle + [y \neq s] \overline{subs} \langle y \rangle), \\ deliservpro(p, s) = p(x) \cdot \bar{x} \langle s \rangle. \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} queservpro(i, r, p) = i(y) \cdot ([y = a]r \langle p \rangle + [y \neq s] \overline{subs} \langle y \rangle), \\ deliservpro(p, s) = p(x) \cdot \bar{x} \langle s \rangle. \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} reqservpro(i, r, l) = \bar{i} \langle a \rangle \cdot r(z) \cdot \bar{z} \langle l \rangle, \\ queservpro(i, r, p) = i(y) \cdot ([y = a]r \langle p \rangle + [y \neq s] \overline{subs} \langle y \rangle), \\ deliservpro(p, s) = p(x) \cdot \bar{x} \langle s \rangle. \end{array} \right. \quad (13)$$

其中式(11)为请求服务的进程;式(12)为连接件中相应的服务查询进程;式(13)服务提供进程.

若新库所不完备时,利用 π 网的弱时间等价互模拟关系,则将(12)改写为:

$$queservpro(i, r, p, R_f) = i(y) \cdot ([y = a]r \langle p \rangle + [y \neq s] \overline{subs} \langle y \rangle) Q_f. \quad (14)$$

其中: R_f 是在定义3的八元组上对时间的抽象与进程 Q_f 的弱时间等价.

因此,模型 N_{HSPM} 增加新的库所时,能够在库所库中实现动态交互.

若候选库所集合中的库所进行变化或升级,则需要对原库所进行更新. 库所更新方式主要有保持语义更新和扩展性更新^[13].

规则1 设候选 IP 核 $C_{p,0}$ 的接口为 P , 组件 $C_{p,1}$ 的接口 Q , 若 $P \approx Q$ 成立, 并 $\exists \alpha$ 和 M , 有 $\alpha \cdot P + M \approx \alpha \cdot Q + M$ 成立, 则称 $C_{p,1}$ 可使 $C_{p,0}$ 进行保持语义更新.

规则2 设候选 IP 核 $C_{p,0}$ 的接口为 P , $C_{p,1}$ 的接口为 Q , 若 P 和 Q 使得:

(1) $f_n(P) \subseteq f_n(Q)$, 即 P 的自由名字是 Q 自由名字的子集;

(2) 如果 $\tau \cdot P \rightarrow P'$, 那么 $\exists Q', Q \Rightarrow Q'$;

(3) 如果 $P \xrightarrow{x(z)} P'$, 那么 $\exists Q', Q \xrightarrow{x(z) \cdot x_i(z_i)} Q'$;

(4) 如果 $P \xrightarrow{\bar{x} \langle y \rangle} P'$, 那么 $\exists Q', Q \xrightarrow{x \langle y \rangle \dots x_i \langle y_i \rangle} Q'$.

同时成立, 则进程 Q 对 P 进行了扩展性更新, 标记为 $P < Q$; 故 $C_{p,1}$ 对 $C_{p,0}$ 进行了扩展性更新.

由此, 模型 N_{HSPM} 可进行动态化更新, 进而可实现动态化的演化.

4 实验与仿真

物联网智能感知节点的硬件划分目标是搜索功能分配到软硬件模块, 使得其设计不仅满足能耗有限性的需求, 还要满足执行时间、可靠性、可用性、面积、体积和重量等的限制, 并在这些约束下使其指标达到最优. 因此, 采用先进 Pareto 优化算法 (Advanced Pareto Optimization Algorithm, APOA) 实现对模型 N_{HSPM} 的优化.

依据参考文献[14]提出的方法, 对模型 N_{HSPM} 进行代与代之间维持由潜在解组成的种群来实现全局搜索, 得到多目标优化的 Pareto 最优解集, 即为模型 N_{HSPM} 的最优解. 首先, 对所有候选库所进行 Pareto 排序, 并在能耗、可靠性、可用性、执行时间和成本等约束下, 对库所进行调度, 估算成本和功耗等且用 Pareto 排序; 然后计算个体的适应度值, 进行选择与交叉, 同时进行变异运算; 再进行父代与子代的混合, 得到新的种群, 依据等级和适应度值取前 50% 作为下一代种群, 而重新启动优化; 最后输出当前选中的种群, 即为 Pareto 最优解. 其优化流程如图 4 所示.

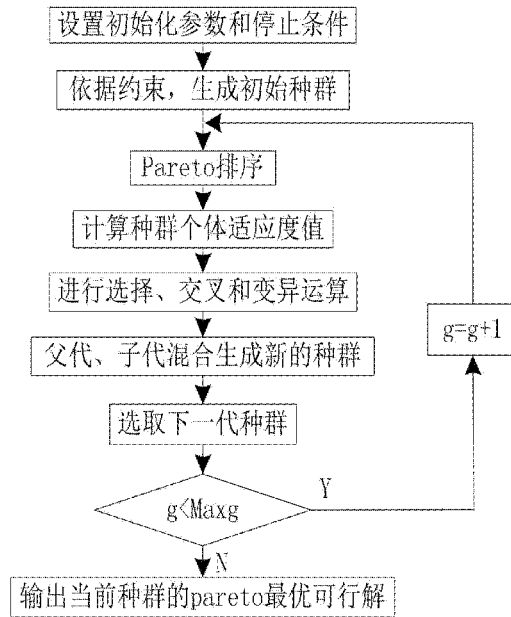


图 4 APOA 优化流程

Fig. 4 APOA Optimization process

对先进 Pareto 优化算法 (APOA)、遗传算法 (GA)、蚂蚁优化算法和禁忌搜索算法 (TS) 作了对比,每个算法的输入都是相同属性的 π 网^[15].并在实验过程中,每种算法使用相同的可知参数,亦确保不同算法具有可比特性.通过实验,得到如图 5 所示的实验结果.

物联网智能感知节点的实例,采用多参数智能感知某环境的温度和湿度,要求实现无线数据远程传输;由此得到该智能感知节点功能模块可分为温度模块、湿度模块、无线通信模块、处理器模块和电源模块

等,而每个模块对应诸多候选选项,如温度模块而言,仅硬件接触测温和非接触测温两大类型,其中接触测温可采用集成温度传感器、Pt100、热电偶、热电阻和半导体传感器,非接触又可采用红外测温、比色测温 and 超声测温等.物联网智能感知节点的各种约束条件的值,可使用一维数组描述为 $Cz = (16650\text{mah}, 1500\text{rmb}, 3\text{ms}, 0.9999, 0.9487, 2000\text{mm}^2, 200\text{g}, 30000\text{mm}^3)$,分别表示节点在能耗、成本、响应时间、可靠性、可用性、面积、重量和体积等约束.通过实验得到如表 1 所示数据.

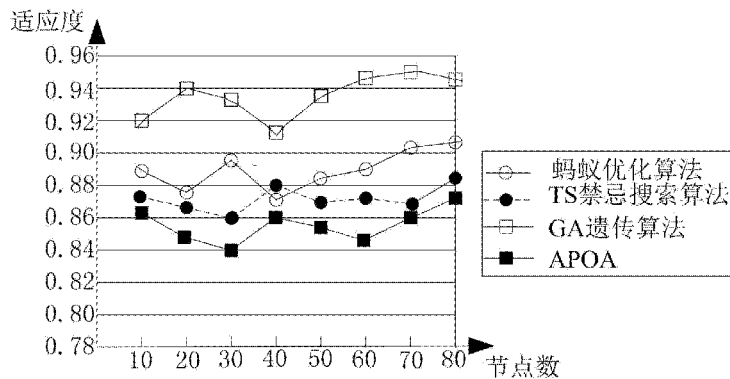


图 5 APOA 算法与其他算法性能比较曲线

Fig. 5 Performance comparison curve of APOA algorithm and other algorithms

表 1 候选 IP 核库所及其约束表

Table 1 Candidate IP core library and its constraint table

功能块	IP 核	能耗	成本	执行时间	可靠性	可用性	面积	重量	体积
FM1	软核 C11	113	35	0.637	0.9959	0.9343	0	0	0
	软核 C12	8	34	0.422	0.9953	0.9542	0	0	0
	软核 C13	21	68	0.483	0.9837	0.9213	0	0	0
	硬核 C14	214	128	0.531	0.8939	0.9321	413	21	4210
FM2	软核 C21	231	65	0.749	0.9932	0.9562	0	0	0
	软核 C22	251	87	0.698	0.9954	0.9342	0	0	0
	硬核 C23	231	213	0.368	0.9134	0.9469	521	32	3125
FM3	软核 C31	342	34	0.973	0.9743	0.9671	0	0	0
	硬核 C32	23	321	0.542	0.9246	0.9863	391	20	4356
FM4	软核 C41	208	34	0.651	0.9565	0.9315	0	0	0
	软核 C42	239	54	0.496	0.9678	0.9235	0	0	0
	硬核 C43	83	328	0.753	0.9065	0.9453	346	34	4067
FM5	软核 C51	239	230	0.549	0.9912	0.9369	0	0	0
	硬核 C52	452	221	0.458	0.9438	0.9347	430	56	3234
FM6	软核 C61	213	24	0.234	0.9939	0.9219	0	0	0
	硬核 C62	349	157	0.452	0.9357	0.9321	321	32	6782
	硬核 C63	561	132	0.863	0.9438	0.9132	267	45	6283
...	

利用模型 N_{HSPM} 得到的该智能节点的软硬件划分, 与使用遗传算法和蚂蚁算法进行的软硬件划分,

在划分执行时间上进行对比实验, 得到如图 6 所示对比图。

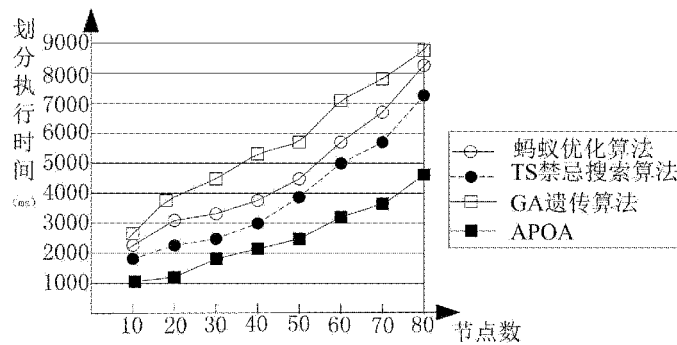


图 6 不同算法划分运行时间对比曲线

Fig. 6 Different algorithms for dividing running time contrast curves

在多参数智能感知情况下, 本实验在一定的约束条件下优化其软硬件划分. 通过实验与仿真, 模型 N_{HSPM} 在划分运行时间上和适应度方面, 较基于蚂蚁算法、TS 禁忌搜索算法和 GA 遗传算法在多参数智能感知下进行软硬件划分, 性能具有一定的优越性。

5 结论

物联网智能感知节点的软硬件存在划分问题, 其

划分方法直接影响性能、使用寿命等. 本文在对物联网智能感知节点进行带约束定义, 得到了智能感知节点的约束模型; 然后利用 π 网理论, 建立了基于 π 网的物联网智能感知节点软硬件划分模型, 并对模型进行了演化分析; 再后, 利用先进 Pareto 优化算法对划分模型进行了优化, 同时与 TS 禁忌搜索算法和 GA 遗传算法等进行了对比实验. 通过分析与实验仿真,

基于 π 网的物联网智能感知节点软硬件划分模型,在适应度方面优于 TS 禁忌搜索算法和 GA 遗传算法.因此,本文建立的模型,具有一定的先进性和实用性.

参考文献

- [1] TRINDADE A B, CORDEIRO L C. Applying SMT-based verification to hardware/software partitioning in embedded systems[J]. Design Automation for Embedded Systems, 2016, 20(1): 1-19.
- [2] WANG RUI, HUNG W N N, YANG GUOWU, et al. Uncertainty model for configurable hardware/Software and resource partitioning[J]. IEEE Transactions on Computers, 2016, 65(10): 3217-3223.
- [3] JIANG GUIYUAN, WU JIGANG, LAM S K, et al. Algorithmic aspects of graph reduction for hardware/software partitioning[J]. The Journal of Supercomputing, 2015, 71(6): 2251-2274.
- [4] MHADHBI I, OTHMAN S B, SAOUD S B. An Efficient Technique for Hardware/Software Partitioning Process in Codesign[J]. Scientific Programming, 2016(6): 1-11.
- [5] WU JIGANG, WANG PU, LAM S K, et al. Efficient heuristic and tabu search for hardware/software partitioning[J]. The Journal of Supercomputing, 2013, 66(1): 118-134.
- [6] 鄢小虎, 何发智, 陈壹林. 一种基于从众和声粒子群算法的并行软硬件划分方法[J]. 中国科学:信息科学, 2016, 46(9): 1321-1338.
- [7] 熊志辉, 李思昆, 陈吉华. 遗传算法与蚂蚁算法动态融合的软硬件划分[J]. 软件学报, 2005, 16(4): 503-512.
- [8] 马昱春, 张超, WAYNE. 基于混合式两阶段的动态部分重构 FPGA 软硬件划分算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016(3): 246-252.
- [9] 陈志, 武继刚, 宋国治, 等. NodeRank: 一种高效软硬件划分算法[J]. 计算机学报, 2013, 36(10): 2033-2040.
- [10] 曹木亮, 吴智铭, 杨根科. 一类新型的模块化高级 Petri 网 - π 网[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(1): 52-58.
- [11] 陈玮, 顾思思. 基于组合算法的嵌入式系统软硬件划分方法[J]. 计算机应用与软件, 2015(10): 240-243.
- [12] SHAHROUZI S N, PERERA D G. Dynamic partial reconfigurable hardware architecture for principal component analysis on mobile and embedded devices[J]. Eurasip Journal on Embedded Systems, 2017(1): 25-43.
- [13] 何海洋, 李强, 余祥, 等. 基于高阶 π 演算的构件演化行为研究[J]. 计算机科学, 2017, 44(3): 202-208.
- [14] 朱杰兵, 李聪, 曾平. 基于多目标模糊优化算法的边坡变形组合预测模型[J]. 固体力学学报, 2014(s1): 276-280.
- [15] 潘颖, 阮文惠. 基于改进蚁群算法的嵌入式系统软硬件划分[J]. 现代电子技术, 2017, 40(3): 164-166.

(责任编辑:张阳,付强,李建忠,罗敏;英文编辑:周序林)