

支持多属性决策的嵌入式系统软硬件划分*

谢晓娜, 朱清新

(电子科技大学 计算机科学与工程学院, 成都 611731)

摘要: 针对硬件面积、价格成本、功耗、实时性和可靠性多目标优化的一类嵌入式系统软硬件划分问题, 提出了一种采用多属性决策技术的求解方法。首先对可靠性指标进行了转换, 通过改进的最短路径算法获得满足约束的 Pareto 方案集合; 然后, 采用基于组合权重的 TOPSIS 算法对多个划分方案进行评价排序, 得到最优的多目标划分解; 最后, 通过一个实例验证了本方法的有效性和可行性。

关键词: 嵌入式系统; 软硬件划分; 多属性决策; 组合权重; TOPSIS

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2014)05-1445-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.05.038

Hardware-software partitioning of embedded systems using MCDM method

XIE Xiao-na, ZHU Qing-xin

(School of Computer Science & Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: This paper proposed a multiple objective hardware-software partitioning algorithm for embedded systems under chip area, price, power consumption, real-time and reliability constraints. The presented approach was based on multiple attributes decision making methods. It processed the reliability attribute firstly. It formulated the hardware-software partitioning problem as the shortest path problem of a weighted, directed graph, and used a modified shortest path algorithm to obtain a set of Pareto solutions meeting the constraints. Then it presented the TOPSIS technique based on combined weights to rank the solutions and select the preferred multiple objective hardware-software partitioning solution. Experimental results verify the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: embedded system; hardware-software partitioning; multiple attributes decision making; combined weights; TOPSIS

嵌入式系统是软硬件一体化的系统。在系统级进行软硬件协同设计是提高嵌入式系统设计质量及效率的必然选择, 在过去的近三十年中已引起了研究人员的广泛关注^[1]。随着集成电路和电子系统、计算机软件等技术的不断进步, 嵌入式系统的功能越来越强大, 其体积、成本及产品周期却越来越小。系统的设计目标也从早期的减少运行时间、价格成本, 逐渐转变为更为注重优化功耗及可靠性指标。软硬件划分是嵌入式系统软硬件协同设计中的一个重要问题^[2]。根据具体应用需求, 嵌入式系统中的许多功能单元, 如移动智能终端中音视频的编/解码模块, 既可以用一个专用的 DSP 硬件核来实现, 也可以用软件算法在处理器上运行实现。但两种实现形式在执行效率、功耗及开发成本上各有优劣, 不同的软硬件划分结果对嵌入式系统的功能及性能指标有着非常重要的影响。

近年来, 国内外的学者针对不同系统模型, 考虑了低价格成本、低功耗、低响应时间等单目标或多目标优化的软硬件划分问题, 并提出了不同的划分算法^[3,4], 如混合整数线性规划^[5]、成组移动^[6]、智能优化算法^[7-9]、神经网络^[10]及多算法的融合等。

文献[11]针对采用可重用组件的片上系统, 考虑了具有累加特性的芯片面积、价格、功耗及时间等性能指标约束, 提出了一种多目标软硬件划分算法。但该算法未考虑可靠性指标, 且获得的最优划分结果是一个包括多个 Pareto 解的候选方案集合。当系统模块较多且性能指标增加时, 该集合中的候选

方案数目可能较大, 如何对划分方案进行评价及进一步排序, 从中选出最优的软硬件划分解是一个待解决的问题。文献[12]针对成本和实时性约束下的多核片上系统, 解决功耗最优软硬件划分问题, 并采用一种自动波机制的神经网络算法进行求解。文献[12]同样也没有考虑可靠性指标, 且不适用于多目标优化软硬件划分问题。

本文定义了一类面积、价格、功耗、实时性和可靠性多目标优化的嵌入式系统软硬件划分问题, 在获得满足约束条件的 Pareto 方案集合的基础上, 采用一种多属性决策方法, 对各个划分方案进行自动、高效的评价排序, 并从中选择出综合评价性能最佳的候选解。

1 系统模型

1.1 嵌入式系统功能应用模型

如图1所示, 一个嵌入式应用的功能设计需求可以用任务流程图来表示。图中的每个节点代表指定嵌入式应用的一个计算功能模块, 节点间的有向边表示任务模块之间的控制依赖关系。任务流程图有一个入度为0的开始节点和一个出度为0的终止节点。不失一般性, 设图中有一个从开始节点到终止节点的关键路径, 由图中的若干个顶点组成。

形式化地, 用集合 $\Gamma = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$ 表示嵌入式应用任

收稿日期: 2013-09-11; **修回日期:** 2013-10-25 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61003032, 61100118); 人工智能四川省重点实验室开放基金资助项目(2010RY010, 2011RYJ05)

作者简介: 谢晓娜(1978-), 女, 河南宝丰人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为高可靠嵌入式实时系统、能耗优化等(xnxieok@163.com); 朱清新(1954-), 男, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为算法设计、最优控制与搜索。

务流程图中的 n 个任务集合,其中 $\tau_i \in \Gamma$ 代表一个任务模块, τ_1 和 τ_n 分别为开始节点、终止节点。用 Γ 的子集 $F = \{\tau_1, \dots, \tau_i, \dots, \tau_n\}$ 表示任务流程图中的关键路径。

1.2 嵌入式系统平台模型

一个嵌入式系统硬件平台可以由处理器、存储器及一定数量的硬件单元模块组成,如图2所示。软件保存在存储器中,由处理器执行。设平台中包含单个处理器,且存储器的数量也已固定,可以满足嵌入式应用的计算和存储能力需求;但单纯用软件方式无法满足系统的功能及性能需求,需要选择若干硬件模块完成一些计算功能。此处不考虑平台内的通信方式,各计算节点间可采用各种通信方式。对应于目标平台,有一个供选择的可用组件库,其中的每个组件是一个软件或硬件可重用单元。对于嵌入式应用中的每一个任务模块,可能有多个软件或硬件组件可实现其需要的功能。由于生产厂家、型号、版本的不同,不同的组件具有不同的性能参数。本文中性能指标包括面积、价格、功耗、运行时间、可靠性五类。

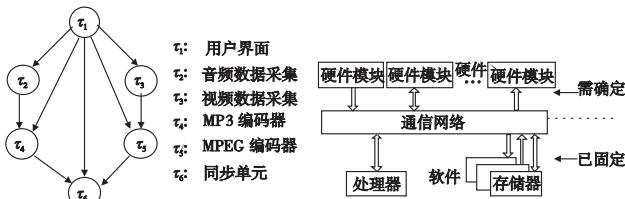


图1 嵌入式应用及功能模块

图2 嵌入式系统平台

令 $CL = \{core_1, core_2, \dots, core_n\}$ 表示一个嵌入式系统平台对应的可用组件库,其中, $core_i = \{core_{i1}, core_{i2}, \dots, core_{im}\}$ 是实现任务 τ_i 的候选组件集合; $m = |core_i|$ 是 τ_i 的候选组件个数。五元组 $core_{ij} = (A_{ij}, C_{ij}, E_{ij}, T_{ij}, R_{ij})$ 表示一个软件或硬件组件,其中, A_{ij} 为组件 $core_{ij}$ 的面积, $C_{ij}, E_{ij}, T_{ij}, R_{ij}$ 为 $core_{ij}$ 的价格、功耗、运行时间和可靠性。

1.3 软硬件划分模型

多目标软硬件划分追求嵌入式系统的面积、价格、功耗、运行时间最低,可靠性最高。用 $PP_0 = (PA_{\max}, PC_{\max}, PE_{\max}, PT_{\max}, PR_{\min})$ 表示系统的约束条件,其中, $PA_{\max}, PC_{\max}, PE_{\max}, PT_{\max}$ 分别为面积、价格、功耗、运行时间指标允许的上限值, $PR_{\min}$ 表示可靠性下限值。由于各个指标之间的相互矛盾,如面积与功耗、可靠性的折中,多目标软硬件划分的结果可能是一个 Pareto 解集合^[11],并非单个的解。

令 $HSP = \{HSP_k | 1 \leq k \leq M, M > 0\}$ 表示包括 M 个不同的嵌入式系统软硬件划分方案的集合,用 $HSP_k = \{core_{1j_{1,k}}, \dots, core_{i j_{i,k}}, \dots, core_{n j_{n,k}}\}$ 表示一个软硬件划分方案,其中 $core_{i j_{i,k}}$ 代表实现功能 τ_i 的组件。令 $PP_k = (PA_k, PC_k, PE_k, PT_k, PR_k)$,其中 $PA_k, PC_k, PE_k, PT_k, PR_k$ 分别表示在划分 HSP_k 下该嵌入式应用的面积、价格、功耗、时间和可靠性。

1.4 性能指标模型

给定一个软硬件划分方案 HSP_k ,本节定义嵌入式系统的各性能指标模型。

a) 面积。不考虑平台中已有的处理器、存储器的面积,嵌入式系统的总面积 PA_k 定义为所有选中组件的面积之和。

b) 价格。不考虑处理器、存储器,嵌入式系统的总价格 PC_k 定义为所有选中组件的价格之和。

c) 功耗。嵌入式系统的总功耗 PE_k 定义为所有选中组件的功耗之和。

d) 时间。嵌入式系统的执行时间 PT_k 定义为其关键路径中所有任务节点的运行时间之和。

e) 可靠性。对任意组件 $core_{ij}, R_{ij}$ 表示任务 τ_i 执行正确的概率。设各任务模块的可靠性相互独立,则嵌入式系统的可靠性 PR_k 为各模块可靠性的乘积。

2 问题定义

给定嵌入式应用和系统平台,支持多属性决策的嵌入式系统软硬件划分问题,就是要找到一个按综合性能评价排序的软硬件划分集合 HSP ,可定义为

输入:嵌入式系统功能应用模型 Γ 及 F ;可重用组件库 CL ;性能约束 PP_0 。

输出:符合约束条件的划分方案集合 HSP ,并按优劣程度对各划分方案进行排序。

约束: $\forall HSP_k \in HSP, PA_k < PA_{\max}, PC_k < PC_{\max},$

$PE_k < PE_{\max}, PT_k < PT_{\max}, PR_k > PR_{\min}$ (1)

3 求解算法

根据第2章对支持多属性决策的嵌入式系统软硬件划分问题的定义,本文所采用的求解算法分为:基于最短路径算法获得 HSP 和对其中各划分方案的评价排序两个步骤,如图3所示。

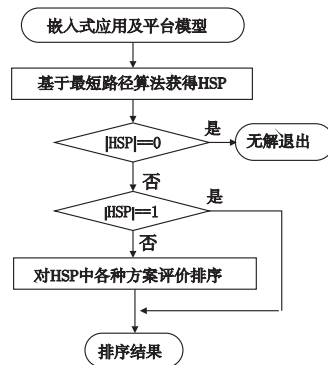


图3 支持多属性决策的划分算法

3.1 获得 HSP

1) 可靠性指标的转换

如上所述,嵌入式系统的面积、价格、功耗和时间特性均具有累加性,且此类指标越低越好。系统的可靠性指标为各模块的乘积,其值越大越好。为便于求解,本文用指标错误率 Z_{ij} 来代替 R_{ij} ,令 $Z_{ij} = -\ln R_{ij}$ 。对应地,令 $PZ_k = \sum_{i=1}^n Z_{i j_{i,k}}$ 。显然,对于可靠性越大的划分方案 HSP_k, PZ_k 越小,反之亦然。

由此,与其他四个指标相同,错误率指标亦具有累加性,且以降低嵌入式系统的错误率为优化目标。

2) 转换为多约束最短路径的求解

令 $PZ_{\max} = -\ln PR_{\min}$,则求解 HSP 转换为赋权有向图中的多约束最短路径问题。需要说明的是,对于嵌入式应用中非关键的任务模块 $\tau_j \notin F$,此时其对应的候选组件 $core_{jk} \in core_j$ 的时间指标值 T_{jk} 赋值为0。采用文献[11]中的求解算法,获得的每条最短路径 $(start, core_{1j_{1,k}}, \dots, core_{i j_{i,k}}, \dots, core_{n j_{n,k}}, end)$,对应于 $HSP_k = \{core_{1j_{1,k}}, \dots, core_{i j_{i,k}}, \dots, core_{n j_{n,k}}\}$,且该划分的可靠性指标为 $PR_k = e^{-PZ_k}$ 。由此,获得了最优划分方案集合 HSP ,若 $|HSP| > 1$,则需转入以下步骤。

3.2 TOPSIS 排序

对 HSP 中的 M 个划分方案,需要将其中各个方案进行排序,并选择最优划分,即为多属性决策 (multi-attributes decision making, MADM) 问题。Hwang 等人^[13]提出的逼近理想解排序法 (technique for order preference by similarity to ideal solu-

tion, TOPSIS) 是解决 MADM 问题的一种客观、高效的方法。其基本概念就是, 选择出的最优方案应与正理想解距离最近, 且与负理想解距离最远。以下介绍采用组合权重 TOPSIS 法的求解步骤。

3.2.1 对评价指标归一化

对于 M 个划分方案和 N 个性能评价指标, 用 x_{ij} 表示 HSP_i 的第 j 个评价指标值, 则 M 个划分方案的评价指标值组成矩阵 $X = (x_{ij})_{M \times N}$ 。为了统一各个评价指标的量纲, 便于比较, 首先对其进行归一化处理, 得到标准化矩阵 $Y = (y_{ij})_{M \times N}$:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^M x_{ij}} \quad i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

3.2.2 确定各指标的组合同权重

对 HSP 中 M 个划分方案的评价排序, 还依赖于 $PP_k = (PA_k, PC_k, PE_k, PT_k, PR_k)$ 的值及五个性能指标各自的权重。

一般来说, MADM 问题确定权重的方法可分为主观法和客观法两类, 但单纯使用主观或客观权重通常是不全面的。本文采用层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP)^[14] 和熵权法^[15] 分别计算主观权重与客观权重, 综合专家经验与候选方案原始数据的内在规律, 来确定各性能指标的组合同权重。

设由专家打分, 经过 AHP 法确定 N 个性能指标的权重为 $w_j^s (1 < j < N)$, 且 $\sum_{j=1}^N w_j^s = 1$ 。对于 $Y = (y_{ij})_{M \times N}$, 第 j 个指标的信息熵为

$$e_j = -k \sum_{i=1}^M y_{ij} \ln y_{ij} \quad j=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

其中: $k = (\ln M)^{-1}$ 是与 M 有关的常数, 因而 $0 \leq e_j \leq 1$, 各个指标的效用价值等于信息熵 e_j 与 1 的差值, 即 $h_j = 1 - e_j$ 。其中, 第 j 个指标的 y_{ij} 值分布分散程度与相应的 h_j 值成正比。于是第 j 个指标的熵权 w_j^o 为

$$w_j^o = \frac{h_j}{\sum_{j=1}^N h_j} = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^N (1 - e_j)} \quad (4)$$

在获得 w_j^s 和 w_j^o 两个权重值后, 用下式得到各指标的组合同权重 w_j :

$$w_j = \alpha w_j^s + (1 - \alpha) w_j^o \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (5)$$

其中: α 为权重参数, 表示主观权重在组合同权重中所占的比例。当 α 的值为 1 或 0 时, w_j 即为 AHP 权重或熵权。

3.2.3 计算相对接近度

确定各指标的权重因子 w_j 后, HSP 中各划分方案的性能指标加权评价矩阵 $V = (v_{ij})_{M \times N} = (w_j y_{ij})_{M \times N}$ 。

最理想和最不理想的指标加权评价集合, 即正理想解 V^+ 和负理想解 V^- 分别为

$$V^+ = \{ (\max v_{ij} | j \in J_1), (\min v_{ij} | j \in J_2) | i=1, 2, \dots, M \} \quad (6)$$

$$V^- = \{ (\min v_{ij} | j \in J_1), (\max v_{ij} | j \in J_2) | i=1, 2, \dots, M \} \quad (7)$$

其中: J_1 为效益型指标集, J_2 为成本型指标集。

HSP_{*i*} 与正理想解 V^+ 和负理想解 V^- 之间的距离可分别用如下的 N 维欧几里德公式计算:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^N (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad i=1, 2, \dots, M \quad (8)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^N (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad i=1, 2, \dots, M \quad (9)$$

划分方案 HSP_{*i*} 的 TOPSIS 评价价值 C_i , 即其与理想解的相对接近度为

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (10)$$

根据相对接近度的值大小对各划分方案 $HSP_i \in HSP$ 进行

排序, 值越大则该方案越优, 值最大者为最佳软硬件划分方案。

4 实例分析

为了验证本文算法的有效性和可行性, 用 C++ 在 Windows 7 系统上实现了本算法, 将其应用于一个 PDA 的视/音频发方子系统^[11] 中, 其任务流程图如图 1 所示。该应用系统有六个任务模块, 关键路径为 $F = \{\tau_1, \tau_2, \tau_4, \tau_6\}$ 。

嵌入式系统平台的组件库如表 1 所示, 其设计目标即约束条件为 $PP_0 = (1500, 1500, 2, 500, 0.99)$ 。由本实例所构造的赋权有向图如图 4 所示, 图中各有向边的权重如表 2 所示。由 $PP_0 = (1500, 1500, 2, 500, 0.99)$ 可得 $(PA_{\max}, PC_{\max}, PE_{\max}, PT_{\max}, PZ_{\max}) = (1500, 1500, 2, 500, 0.0100503)$ 。采用文献[11]中的最短路径算法, 获得符合约束条件的划分方案集合, 如表 3 所示。

表 1 组件库

组件	实现方式	面积/mm ²	价格/元	功耗/W	时间/ms	可靠性
core ₁	core11 软件	0	30	0.1	20	0.999 99
	core12 软件	0	50	0.08	10	0.999 999
	core21 软件	0	80	0.2	80	0.999 7
core ₂	core22 硬件	750	110	0.25	50	0.999 98
	core23 硬件	460	180	0.15	30	0.999 6
	core31 软件	0	95	0.3	100	0.999 7
core ₃	core32 硬件	980	150	0.3	60	0.999 78
	core33 硬件	644	180	0.2	50	0.999 999
	core41 软件	0	180	0.6	400	0.999 9
core ₄	core42 软件	0	220	0.5	350	0.9978
	core43 硬件	2 600	350	0.5	120	0.999 99
	core44 硬件	1 368	420	0.4	70	0.995
core ₅	core51 软件	0	150	0.6	400	0.966
	core52 软件	0	180	0.5	380	0.998 6
	core53 硬件	2 475	320	0.5	130	0.999 6
core ₆	core54 硬件	1 400	380	0.4	80	0.999
	core61 软件	0	120	0.4	150	0.999 92
	core62 软件	0	150	0.3	120	0.999 99
core ₆	core63 硬件	950	220	0.3	50	0.9999

表 2 各有向边的权重

有向边指向的顶点	有向边的权重	有向边指向的顶点	有向边的权重
core11	(0-30-0.1-20-1.00136e-005)	core43	(2600-350-0.5-120-1.00136e-005)
core12	(0-50-0.08-10-1.01328e-006)	core44	(1368-420-0.4-70-0.00501254)
core21	(0-80-0.2-80-0.000300035)	core51	(0-150-0.6-0-0.0345914)
core22	(750-110-0.25-50-2.00274e-005)	core52	(0-180-0.5-0-0.00140097)
core23	(460-180-0.15-30-0.000400087)	core53	(2475-320-0.5-0-0.000400087)
core31	(0-95-0.3-0-0.000300035)	core54	(1400-380-0.4-0-0.00100049)
core32	(980-150-0.3-0-0.000220025)	core61	(0-120-0.4-150-7.99926e-005)
core33	(644-180-0.2-0-1.01328e-006)	core62	(0-150-0.3-120-1.00136e-005)
core41	(0-180-0.6-400-0.000100022)	core63	(950-220-0.3-50-0.000100022)
core42	(0-220-0.5-350-0.00220243)	end	(0-0-0-0-0)

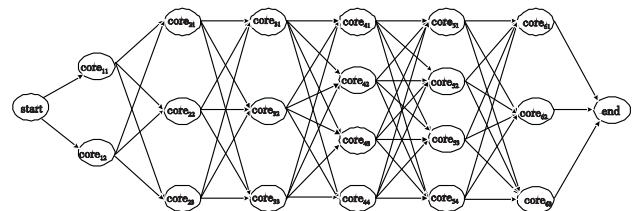


图 4 由应用实例构造的待求解图

表 3 最短路径算法求解结果

编号 k	软硬件划分方案 HSP _{<i>k</i>}	最短路径值
1	(core11, core21, core31, core42, core52, core63)	(950, 825, 1.9, 500, 0.00431351)
2	(core11, core21, core31, core44, core52, core61)	(1368, 925, 1.9, 320, 0.00710359)
3	(core11, core21, core31, core44, core52, core62)	(1368, 955, 1.8, 290, 0.00703361)
4	(core12, core21, core31, core42, core52, core63)	(950, 845, 1.88, 490, 0.00430451)
5	(core12, core21, core31, core44, core52, core61)	(1368, 945, 1.88, 310, 0.00709459)
6	(core12, core21, core31, core44, core52, core62)	(1368, 975, 1.78, 280, 0.00702461)
7	(core11, core23, core31, core41, core52, core63)	(1410, 885, 1.95, 500, 0.00231115)
8	(core11, core23, core31, core42, core52, core63)	(1410, 925, 1.85, 450, 0.00441356)
9	(core12, core23, core31, core41, core52, core63)	(1410, 905, 1.93, 490, 0.00230215)
10	(core12, core23, core31, core42, core52, core63)	(1410, 945, 1.83, 440, 0.00440456)

接下来, 基于 TOPSIS 法, 对获得的 HSP 中 10 个划分方案进行评价排序。初始矩阵 X 为

$$X = \begin{bmatrix} 950 & 825 & 1.9 & 500 & 0.9957 \\ 1368 & 925 & 1.9 & 320 & 0.9929 \\ 1368 & 955 & 1.8 & 290 & 0.993 \\ 950 & 845 & 1.88 & 490 & 0.9957 \\ 1368 & 945 & 1.88 & 310 & 0.9929 \\ 1368 & 975 & 1.78 & 280 & 0.993 \\ 1410 & 885 & 1.95 & 500 & 0.9977 \\ 1410 & 925 & 1.85 & 450 & 0.9956 \\ 1410 & 905 & 1.93 & 490 & 0.9977 \\ 1410 & 945 & 1.83 & 440 & 0.9956 \end{bmatrix}$$

对 X 进行归一化,得到

$$Y = \begin{bmatrix} 0.0730 & 0.0904 & 0.1016 & 0.1229 & 0.1001 \\ 0.1051 & 0.1013 & 0.1016 & 0.0786 & 0.0998 \\ 0.1051 & 0.1046 & 0.0963 & 0.0713 & 0.0998 \\ 0.0730 & 0.0926 & 0.1005 & 0.1204 & 0.1001 \\ 0.1051 & 0.1035 & 0.1005 & 0.0762 & 0.0998 \\ 0.1051 & 0.1068 & 0.0952 & 0.0688 & 0.0998 \\ 0.1084 & 0.0969 & 0.1043 & 0.1229 & 0.1003 \\ 0.1084 & 0.1013 & 0.0989 & 0.1106 & 0.1001 \\ 0.1084 & 0.0991 & 0.1032 & 0.1204 & 0.1003 \\ 0.1084 & 0.1035 & 0.0979 & 0.1081 & 0.1001 \end{bmatrix}$$

采用 AHP 法构造判断矩阵,并经过一致性检验,获得各评价指标的主观权重为 $w^s = (0.1, 0.2, 0.3, 0.1, 0.3)$,即功耗和可靠性指标最重要,价格指标次之,面积和实时性权重最低。

采用熵权法获得各指标的客观权重为 $w^o = (0.2693, 0.0348, 0.0105, 0.6853, 0)$,即时间指标最重要,面积指标次之,可靠性权重为 0。

令 $\alpha = 0.5$,即主观权重与客观权重并重,由此得到组合权重为 $w = (0.1846, 0.1174, 0.1552, 0.3927, 0.1500)$ 。

加权规范化矩阵为

$$V = \begin{bmatrix} 0.0135 & 0.0106 & 0.0158 & 0.0482 & 0.015 \\ 0.0194 & 0.0119 & 0.0158 & 0.0309 & 0.015 \\ 0.0194 & 0.0123 & 0.0149 & 0.028 & 0.015 \\ 0.0135 & 0.0109 & 0.0156 & 0.0473 & 0.015 \\ 0.0194 & 0.0122 & 0.0156 & 0.0299 & 0.015 \\ 0.0194 & 0.0125 & 0.0148 & 0.027 & 0.015 \\ 0.02 & 0.0114 & 0.0162 & 0.0482 & 0.015 \\ 0.02 & 0.0119 & 0.0154 & 0.0434 & 0.015 \\ 0.02 & 0.0116 & 0.016 & 0.0473 & 0.015 \\ 0.02 & 0.0122 & 0.0152 & 0.0424 & 0.015 \end{bmatrix}$$

在五个指标中,可靠性为效益型指标,其他四个均为成本型指标,则正理想解为

$$V^+ = (0.0135, 0.0106, 0.0148, 0.027, 0.015)$$

负理想解为

$$V^- = (0.02, 0.0125, 0.0162, 0.0482, 0.015)$$

10 个划分方案的评价值与正/负理想解的距离分别为

$$S^+ = \begin{pmatrix} 0.0212, 0.0073, 0.0062, 0.0203, 0.0068, \\ 0.0062, 0.0223, 0.0177, 0.0213, 0.0168 \end{pmatrix}$$

$$S^- = \begin{pmatrix} 0.0068, 0.0174, 0.0203, 0.0068, 0.0184, \\ 0.0213, 0.0012, 0.0049, 0.0013, 0.0059 \end{pmatrix}$$

10 个划分方案的评价值与正理想解的接近度分别为

$$C = \begin{pmatrix} 0.2430, 0.7055, 0.7650, 0.252, 0.7288, \\ 0.7733, 0.0495, 0.218, 0.0587, 0.2591 \end{pmatrix}$$

则有 $C_6 > C_3 > C_5 > C_2 > C_{10} > C_4 > C_1 > C_8 > C_9 > C_7$ 。因此,所有的划分方案中, $HSP_6 = (\text{core}_{12}, \text{core}_{21}, \text{core}_{31}, \text{core}_{44}, \text{core}_{52}, \text{core}_{62})$ 为最优,

其次为 HSP_3 ,而 HSP_7 最劣。 HSP_6 的各性能指标为(1368, 975, 1.78, 280, 0.93),即 MP3 编码器模块用硬件实现,其他模块均用软件实现。

5 结束语

针对一类嵌入式系统硬件面积、价格成本、功耗、实时性和可靠性约束的多目标软硬件划分问题,提出了一种支持多属性决策的优化求解算法。通过应用实例验证了本文算法的可行性和有效性。本文的创新之处在于:

a) 在多目标嵌入式系统软硬件划分问题中,考虑了可靠性指标,将可靠性指标转换为累加性质的错误率指标,从而可以将软硬件划分问题转换为最短路径问题进行求解。

b) 首次考虑了多目标嵌入式系统软硬件划分方案集的评价排序问题,提出了一种自动、高效的求解算法。综合了主观权重和熵权,采用组合权重 TOPSIS 法进行多属性决策,获得最优划分结果。

参考文献:

- [1] TEICH J. Hardware/software codesign: the past, the present, and predicting the future [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100 (13): 1411-1430.
- [2] 叶华, 武继刚. 软硬件协同设计复杂问题的计算模型和算法 [J]. *电子科技大学学报*, 2011, 40(3): 333-345.
- [3] ARATO P, MANN Z, ORBAN A. Algorithmic aspects of hardware/software partitioning [J]. *ACM Trans on Design Automation of Electronic Systems*, 2005, 10(1): 136-156.
- [4] LÓPEZ-VALLEJO M, LÓPEZ JC. On the hardware-software partitioning problem: system modeling and partitioning techniques [J]. *ACM Trans on Design Automation of Electronic Systems*, 2003, 8(3): 269-297.
- [5] NIEMANN R, MARWEDEL P. An algorithm for hardware/software partitioning using mixed integer linear programming [J]. *Design Automation for Embedded Systems*, 1997, 2(2): 165-193.
- [6] VAHID F, LET D. Extending the Kernighan/Lin heuristic for hardware and software functional partitioning [J]. *Design Automation for Embedded Systems*, 1997, 2(2): 237-261.
- [7] ELES P, PENG Z, KUCHCINSKI K, et al. System level hardware/software partitioning based on simulated annealing and Tabu search [J]. *Design Automation for Embedded Systems*, 1997, 2(1): 5-32.
- [8] ZHANG Yi-guo, LUO Wen-jian, ZHANG Ze-ming, et al. A hardware/software partitioning algorithm based on artificial immune principles [J]. *Applied Soft Computing*, 2008, 8(1): 383-391.
- [9] SAHA D, MITRA R S, BASU A. Hardware software partitioning using genetic algorithm [C]// *Proc of the 10th International Conference on VLSI Design*. Washington DC: IEEE Computer Society, 1997: 155-160.
- [10] GUO Bing, WANG Dian-hui, SHEN Yan, et al. Hardware-software partitioning of real-time operating systems using Hopfield neural networks [J]. *Neurocomputing*, 2006, 69(16-18): 2379-2384.
- [11] ZHAN Jin-yu, XIONG Guang-ze. Optimal hardware/software co-synthesis for core-based SoC designs [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2006, 17(2): 402-409.
- [12] 常政威. 网络化 MPSoC 高效设计技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [13] HWANG C L, YOON K. Multiple attribute decision making: methods and applications: a state-of-the-art survey [M]. New York: Springer-Verlag, 1981.
- [14] 谢晓娜. 面向汽车售后服务的客户关系管理研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [15] 张继红, 黄大贵. 基于 AHP 法的智能制造 CNC 资源的优选 [J]. *电子科技大学学报*, 2006, 35(4): 514-517.