

# 给定冗余度下可重构计算系统的可靠性最优化研究

周密<sup>1</sup> 尚利宏<sup>1</sup> 胡瑜<sup>2</sup>

(北京航空航天大学 601 教研室 北京 100083)<sup>1</sup> (中国科学院计算机系统结构重点实验室 北京 100080)<sup>2</sup>

**摘要** 研究在给定冗余度及给定配置版本数量的约束下,以可靠性及平均失效时间为优化目标,多个配置版本在可重构器件中所占据资源的面积分配问题。上述问题使用论域划分模型来建模,并转化为非线性规划问题进行求解。给出了可靠性一阶近似最优化的充分必要条件。提出了使用二阶近似规划求解上述问题的方法与流程。选择 ITC99 中的部分基准电路进行了仿真试验。理论计算和仿真试验均表明,大多数情况下采用现提出的二阶近似最优化方法的可重构系统在可靠性和平均失效时间等指标上优于以往的研究。

**关键词** 可重构计算,容错,论域划分,故障恢复

**中图分类号** TP331.2 TP393.05 **文献标识码** A

## Reliability Optimization of Reconfigurable System under Given Redundancy

ZHOU Mi<sup>1</sup> SHANG Li-hong<sup>1</sup> HU Yu<sup>2</sup>

(Faculty 601, Beihang University, Beijing 100083, China)<sup>1</sup>

(Key Laboratory of Computer System and Architecture, ICT, CAS, Beijing 100080, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In a reconfigurable FPGA based system, the entire circuit is protected by several partially overlapped configurations. A domain partition model was used to formulate the problem of planning the overlaps of alternate configurations to maximize the reliability and MTTF. The necessary and satisfactory condition of first-order approximation optimization was given. A second-order approximation domain-partition method was proposed. Experiments on ITC99 benchmark circuits were carried out. Results show the proposed approach outperforms previous works in MTTF in most cases.

**Keywords** Reconfigurable, Fault tolerant, Domain partition, Fault recovery

## 1 简介

由于兼具高运算性能和灵活性,现场可编程门阵列(FPGA)常成为可重构计算系统的核心。然而随着制造工艺的进步,FPGA的可靠性问题反而日益严峻<sup>[1]</sup>。器件的特征尺寸缩小使得它更易于因电迁移等原因发生永久失效。同时FPGA中包含SRAM单元的密度越高就越易于受粒子辐射,从而发生单粒子反转,造成瞬时故障。

针对上述问题,可以利用FPGA的内部冗余来增强可重构系统的容错能力,常见的技术包括故障屏蔽、故障恢复、失效安全等。

对于可重构计算系统而言,其与身俱来的重构能力为故障恢复技术的实施提供了非常便利的条件<sup>[2]</sup>。在可重构计算系统中,故障恢复是通过重构,即重新加载替换配置到无故障的资源中来完成的。因此多个替换配置的资源分配问题是可重构系统故障恢复的关键问题。

为了解决上述资源分配问题,本文使用论域划分模型(Domain Partition Model)对可重构器件的可靠性及平均失效时间(MTTF, Mean Time to Failure)进行建模,并将上述问题转化为非线性规划问题来求解。

## 2 研究现状

如前文所述,可重构计算系统中具有一定数量的“虚拟”后备模块<sup>[3]</sup>。而利用这些“虚拟”后备模块的过程,也就是通过重构实现故障恢复的过程。

可重构系统的故障恢复技术可以大致分为如下两类:(1)基于动态重布局布线的技术,即使用故障检测和定位后动态生成的替换配置进行故障恢复;(2)基于预编译配置的技术,即使用在设计阶段生成的替换配置进行故障恢复<sup>[2]</sup>。

文献[4,5]中采用的随走随选自测试区(roving STAR)技术是第1类技术的典型案例。第2类技术的案例参见文献[2,10,7,8]等。

分析上述案例可知,虽然可重构器件理论上可以具有无数个替换配置,但是替换配置的数量增加往往导致开销的增加。因此有必要对各个替换配置所占据的可重构资源进行合理的分配,尽量保证故障发生时系统仍然能够正常工作。

针对替换配置的资源分配问题,文献[9]采用论域划分(DP, Domain Partition)模型来描述容错的可重构计算系统,将资源分配问题描述为一个非线性最优化问题,即给定面积下的模式优化(POGA, Pattern Optimization under Given Area)

到稿日期:2008-10-20 本文受中国科学院计算机系统结构重点实验室开放课题资助。

周密(1981-),男,博士生,主要研究方向为可重构计算、容错计算等,E-mail: zoneme@sina.com。

a)问题,并给出了一阶近似最优解(以下简称为 POGA 解)。

在一些可重构器件中可配置逻辑块(CLB)列是重构的基本单位,因此基于列的分配方案也被广泛采用。文献[2,6-8]中采用了一种“ $m+k$ ”方案。整个设计由若干“片”组成。每个片包含  $m+k$  列可重构资源,其中  $k$  列用于实现目标电路,剩下的  $m$  列作为冗余资源。在“ $m+k$ ”方案中,比值  $(m+k)/k$  称为逻辑余度,它不能超过物理余度,即可重构器件中可用资源数与实现目标电路所需资源数的比值。文献[10]中给每个被使用的列预留了一个后备列,可以看作是“ $m+k$ ”方案的特殊情况; $m=1, k=1$ 。

本文使用论域划分模型(以下简称为 DP 模型)来描述一个容错的可重构计算系统。由于兼有 POGA 解和“ $m+k$ ”解的优点,理论计算和仿真试验均表明本文给出的二阶近似最优解在可靠性和 MTTF 指标上均优于上述二解。

### 3 DP 模型

文献[9]介绍的 DP 模型是具有多个替换配置版本的可重构器件的抽象。本文使用 DP 模型将替换配置在可重构器件中所占用资源的分配问题抽象为有约束的非线性规划问题。DP 模型如下:

令  $S$  是一个在可重构器件上实现的容错系统。 $S$  的论域划分定义为  $2^p$  维向量  $N$ ,其每一个分量为  $N(k)$ 。即

$$N=(N(0, \dots, 0), \dots, N(1, \dots, 1))$$

其中  $p$  表示替换配置的数量。 $k$  是以  $\{0,1\}$  为元素的  $p$  维向量。 $N(k)$  表示  $k$  中所有为 1 的分量对应的配置的重叠区的相对面积。例如  $N(0,1,0,0,1)$  表示配置 2 和配置 5 的重叠区的相对面积。

划分  $N$  必须满足:

$$N(k) \geq 0 \quad (k \in K) \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K} N(k) = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{\{k \in K | k_i = 1\}} N(k) = 1/r \quad (1 \leq i \leq p) \quad (3)$$

其中  $K$  表示所有以  $\{0,1\}$  为元素的  $p$  维向量的集合。 $k_i$  表示  $k$  的第  $i$  个分量。 $r$  表示余度,即可用的总面积与单个配置所占面积的比值。式(1)意味着每个重叠区的面积不能为负。式(2)意味着所有重叠区面积之和等于可用的总面积。式(3)意味着每个配置的相对面积为  $1/r$ ,这与  $r$  的定义相符。

文献[9]指出, $S$  在划分  $N$  下的可靠性  $R(N)$  可以表达为:

$$R(N) = 1 - e^{-\lambda} \sum_{l \in K} (-1)^{|l|} + p e^{-\lambda} \sum_{\{k \in K | \forall i, k_i \leq l_i\}} N(k) \quad (4)$$

其中  $|k|$  表示  $k$  中包含的 1 的数量, $\lambda$  是  $S$  的总可用资源的故障率。

通过计算可知, $S$  在划分  $N$  下的平均失效时间 MTTF 可以表达为:

$$MTTF(N) = - \sum_{\{l \in K | 0 \leq |l| \leq p-1\}} \frac{(-1)^{|l|} + p}{(1 - \sum_{\{k \in K | \forall i, k_i \leq l_i\}} N(k)) \lambda} \quad (5)$$

### 4 近似最优化模型

直接对 DP 模型求解的计算量很大,本文采用更简化的方法来进行近似计算。

#### 4.1 一阶近似模型及结论

根据式(4), $R(N)$  可以看作是  $e^{-\lambda}$  的线性组合。把各项  $e^{-\lambda}$  在  $x=0$  附近一阶展开可以得到可靠性的一阶近似表达式。

令  $S(n)$  表示被  $n$  个不同的配置重叠的区域的相对面积之和,即  $S(n) = \sum_{\{k \in K | |k| = n\}} N(k), 0 \leq n \leq p$ 。

定理 1 DP 模型中可靠性的一阶近似表达式为  $R_1(N) = 1 - \lambda t \cdot S(p)$ 。

证明:

$$R(N) \approx 1 - (-1)^p (1 - \lambda t) \sum_{l \in K} (-1)^{|l|} - (-1)^p \lambda t \sum_{l \in K} (-1)^{|l|} \sum_{\{k \in K | \forall i, k_i \leq l_i\}} N(k)$$

注意到:

$$\sum_{l \in K} (-1)^{|l|} = \sum_{i=0}^p C_p^i (-1)^i = (1-1)^p = 0$$

$$\sum_{l \in K} (-1)^{|l|} \sum_{\{k \in K | \forall i, k_i \leq l_i\}} N(k)$$

$$= \sum_{n=0}^p S(n) (-1)^n \sum_{x=0}^{p-n} ((-1)^x C_{p-n}^x) = S(p) (-1)^p$$

结合上述二式可知:

$$R_1(N) = 1 - 0 - (-1)^p \lambda t S(p) (-1)^p = 1 - \lambda t S(p)$$

证毕。

由定理 1 可知  $R_1(N)$  随  $S(p)$  减小而增大。

可以证明  $S(p) \geq p/r - p + 1$ 。同时易证当  $p > q$  时有  $p/r - p + 1 \leq 0$ 。

从上面的分析可知,可靠性一阶近似最优化的充分必要条件为:

$$S(p) = \begin{cases} 0 & q < p \\ p/r - p + 1 & q = p \end{cases} \quad (6)$$

可以证明,一阶近似最优化充要条件与展开点的位置无关。虽然这一条件不足以确定使得可靠性最大的划分方案,但是对于减少搜索空间有重要的意义。

#### 4.2 二阶近似模型

将  $R(N)$  及 MTTF 在  $x=x_0$  点附近二阶展开,可得:

$$R_2(N) = 1 - e^{x_0} ((1 - \lambda t - x_0) \lambda t S(p) + \lambda^2 t^2 Y/2)$$

其中  $Y = \sum_{l \in K} (-1)^{|l|} + p (\sum_{\{k \in K | \forall i, k_i \leq l_i\}} N(k))^2$ ,  $x_0$  的取值满足  $x_0 \in [-\lambda t, 0]$  时近似效果较好。

$$MTTF_2 = \lambda^{-1} (3x_0^{-1} - (3x_0 - 2)x_0^{-3} S(p) - x_0^{-3} Y)$$

其中  $x_0$  的取值满足  $x_0 \in (0, 1]$  时近似效果较好。

此外为了减少搜索空间,文献[9]引入了下面的假定。

假定 1 假定  $S$  的可靠性最优解满足  $S(q-1) = q - p/r$  且  $S(q) = 1 - q + p/r$ ,其中  $q$  表示不小于  $p/r$  的最小整数。

根据式(1)和式(2),易证满足假定 1 的解一定是可靠性一阶近似最优的。

根据假定 1,要使得  $R_2(N)$  和  $MTTF_2$  最大,只需使  $Y$  尽量小。从而,给定余度以及给定配置数量下,可靠性及 MTTF 最优化问题近似转换为下面的二次规划问题:

问题 1 寻找适当的划分  $\tilde{N}$ :

$$\text{Min } Y = \sum_{\{l \in K | |l| \geq q-1\}} (-1)^{|l|} + p (\sum_{\{k \in K^* | \forall i, k_i \leq l_i\}} \tilde{N}(k))^2,$$

$$\text{s. t. } \tilde{N}(k) \geq 0 \quad (k \in K^*) \quad (7)$$

$$\sum_{\{k \in K^* | |k| = q-1\}} \tilde{N}(k) = q - p/r \quad (8)$$

$$\sum_{\{k \in K^* | |k| = q\}} \tilde{N}(k) = 1 - q + p/r \quad (9)$$

$$\sum_{\{k \in K^* | k_i = 1\}} \tilde{N}(k) = 1/r \quad (1 \leq i \leq p) \quad (10)$$

其中  $K^* = \{k \in K \mid |k| = q \vee |k| = q-1\}$ 。

问题 1 的目标函数是二次函数,所有等式约束都是线性函数,所需求解的变量共有  $C_p^q + C_p^{q-1}$  个。使用数据工具可以很便利地求出问题 1 的解,具体实施细节见本文第 5 节。

## 5 二阶近似模型的求解

### 5.1 二次规划问题的矩阵表示

为了使用 MATLAB 等数据工具对问题 1 中的二次规划问题进行求解,需要把目标函数  $Y$ 、不等式约束式(7)以及等式约束式(8)、式(9)、式(10)均转换为矩阵形式。为此,先进行下面的论证。

对于  $K^*$  的子集  $L$ ,定义它的定义向量  $v(L) = (v_1, \dots, v_{C_p^q + C_p^{q-1}})$ ,满足:

$$v_i = \begin{cases} 1 & K^*[i] \in L \\ 0 & K^*[i] \notin L \end{cases}, 1 \leq i \leq C_p^q + C_p^{q-1};$$

其中  $K^*[i]$  表示  $K^*$  的第  $i$  个元素。

令矩阵  $H(L) = v(L)' \cdot v(L)$ ,易证:对于  $K^*$  的任意子集  $K_1$  和  $K_2$ ,下式成立:

$$\left( \sum_{k \in K_1} \tilde{N}(k) \right)^2 \pm \left( \sum_{k \in K_2} \tilde{N}(k) \right)^2 = \tilde{N}' \cdot (H(K_1) \pm H(K_2)) \cdot \tilde{N}'$$

可知,  $Y$  的矩阵表示可以通过下面的过程来求得:

1. 初始化  $H^*$  为  $C_p^q + C_p^{q-1}$  阶全 0 方阵。
2. 对于每个  $l \in K, |l| \geq q-1$ ,执行下面的赋值:  
 $H^* = H^* + (-1)^{|l|+\rho} \cdot H(L)$

其中  $L = \{k \in K^* \mid \forall i, k_i \leq l_i\}$ 。

步骤 2 运行结束后  $H^*$  即为所求的矩阵,目标函数  $Y$  可以表述为矩阵形式:

$$Y = \tilde{N}' \cdot H^* \cdot \tilde{N}'$$

式(9)可以表述为  $E \cdot \tilde{N}' \geq 0$ ,其中  $E$  为  $C_p^q + C_p^{q-1}$  阶单位矩阵。

问题 1 的各个等式约束式都是线性函数,不难表达为  $A \cdot \tilde{N}' = b$  的形式,其中  $A$  为  $p+2$  行  $C_p^q + C_p^{q-1}$  列方阵,各行分别对应式(8)、式(9)和式(10)的系数; $b$  为向量  $b = (q-p/r, 1-q+p/r, 1/r, 1/r, \dots)'$ 。

使用上述矩阵表示后,问题 1 可以很方便地使用各种数据工具进行求解。

### 5.2 案例分析

$H$  矩阵的规模通常随  $p$  和  $q$  值增大而急剧增加。为便于展示本节仅以一个假想的简单电路为例进行介绍。使用 ITC99 基准电路<sup>[7]</sup>进行的比较实验将在第 6 节给出。

假想一个容错的可重构计算系统,它在 1.2 倍的可用资源上实现,具有 4 个替换配置。即  $p=4, r=1.2$ 。按照 5.1 节所述,以可靠性和 MTTF 为优化目标,近似的二次规划问题如下:

$$\begin{aligned} \text{Min } Y &= x' H x \\ \text{s. t. } A x &= b \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

其中:

$$b = (0.6667 \quad 0.3333 \quad 0.8333 \quad 0.8333 \quad 0.8333);$$

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}; A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

其中待求解的向量  $x$  的含义为:

$$x = (\tilde{N}(1111) \quad \tilde{N}(1110) \quad \tilde{N}(1101) \quad \tilde{N}(1011) \quad \tilde{N}(0111))$$

使用 MATLAB 对上面的二次规划问题求解得:

$$x = (0.3333 \quad 0.1667 \quad 0.1667 \quad 0.1667 \quad 0.1667)'$$

按此求解结果,各替换配置的资源分配方案如图 1 所示,空白部分表示配置中未占用的区域。

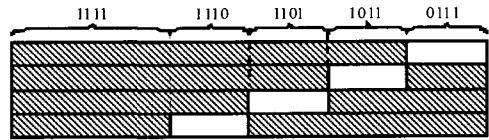


图 1 资源分配方案示意图 ( $p=4, r=1.2$ )

## 6 实验及分析

为了评估本方法带来的可靠性提升,选择 ITC99 中的部分基准电路进行了实验。所选择的各实验电路参数如表 1 所列。

表 1 实验电路的关键参数

电路	所用 slice	器件	总 slice	r	m	k
b22	3035	2v1000	5120	1.69	2	3
b21	1927	2v500	3072	1.59	1	2
		2v1000	5120	2.66	3	2
b14	942	2v250	1536	1.63	1	2
		2v500	3072	3.26	2	1

实验结果以平均失效时间(MTTF)为指标。各个实验电路的结果比较如表 2 所列,其中  $\lambda$  为相应器件的故障率。

表 2 实验电路在 3 种方案下的 MTTF 比较

		MTTF ( $\times 1/\lambda$ 小时)			
		p=3	p=6	p=8	p=10
b22	二阶近似解	2.8269	3.4743	3.8264	3.9614
	POGA 解	2.8269	3.4253	3.7161	3.9471
	“m+k”方案	-	-	-	3.9167
r=1.69	二阶近似解	2.6524	3.1830	3.4844	3.7315
	POGA 解	2.6524	3.1604	3.4243	3.6102
	“m+k”方案	2.5000	-	-	-
b21	二阶近似解	4.7503	5.9963	6.5649	6.9620
	POGA 解	4.7503	5.9963	6.5649	6.9620
	“m+k”方案	-	-	-	6.4167
r=1.59	二阶近似解	2.7215	3.2863	3.6191	3.8306
	POGA 解	2.7215	3.2653	3.5435	3.7480
	“m+k”方案	2.5000	-	-	-
b14	二阶近似解	-	7.5680	8.2348	8.8121
	POGA 解	-	7.5680	8.2348	8.8121
	“m+k”方案	5.5000	-	-	-
r=3.26	二阶近似解	-	-	-	-
	POGA 解	-	-	-	-
	“m+k”方案	5.5000	-	-	-

如表 2 所列,在  $r$  较小 ( $r < 2$ ) 的情况下本文提出的二阶近似解方案的 MTTF 指标均优于或等于以往的研究。

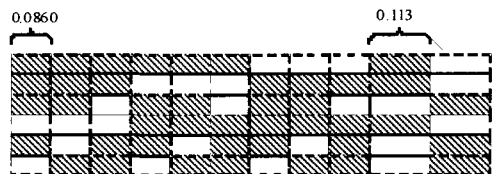


图 2 电路 b21 的二阶近似解划分方案 ( $p=6, r=1.59$ )

从实验现象中可以观察到,相对于 POGA 解而言,二阶  
(下转第 298 页)

表1 模拟值与实测值对照表

T	实测值	模拟值	差值	误差
480	0.568966	0.636115	0.067149	11.80%
510	0.543103	0.573380	0.030276	5.57%
540	0.487069	0.506702	0.019633	4.03%
570	0.474138	0.486206	0.012068	2.55%
600	0.400862	0.404685	0.003823	0.95%
630	0.375000	0.308612	0.066388	17.70%
660	0.418103	0.304799	0.113305	27.10%
690	0.405172	0.290681	0.114491	28.26%
720	0.456897	0.395223	0.061673	13.50%
750	0.487069	0.524844	0.037775	7.76%
780	0.469828	0.531866	0.062038	13.20%
810	0.452586	0.489484	0.036898	8.15%
840	0.448276	0.448133	0.000143	0.03%
870	0.443966	0.408159	0.035807	8.07%
900	0.474138	0.460587	0.013551	2.86%
930	0.461207	0.431451	0.029756	6.45%
960	0.478448	0.463714	0.014734	3.08%
990	0.525862	0.497247	0.028615	5.44%
1020	0.534483	0.533204	0.001279	0.24%
1050	0.573276	0.586150	0.012874	2.25%
1080	0.586207	0.574411	0.011796	2.01%

(上接第 295 页)

近似解方案总是将电路划分成数量更少面积更大的“块”。这可能是二阶近似解优于 POGA 解的原因。以电路 b21 为例,当  $p=6, r=1.59$  时二阶近似解划分方案与 POGA 解划分方案分别如图 2 和图 3 所示,其中  $C_1$  至  $C_6$  分别表示 6 个替换配置,空白方框表示配置中未使用的区域。

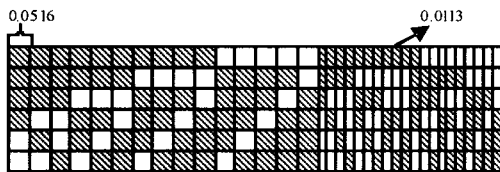


图3 电路 b21 的 POGA 解划分方案( $p=6, r=1.59$ )

当  $r$  较大时( $r=2.66$  或  $3.26$ ),二阶近似解划分方案在同等配置数量下的 MTTF 优于“ $m+k$ ”方案,但并不比 POGA 解划分方案更优。值得注意的是,实验中通过随机搜索也发现了一些 MTTF 略低于 POGA 解,然而在指定的时间段内可靠性  $R(t)$  高于 POGA 解的方案。这一特点对于某些以故障恢复为主要容错手段的系统而言很重要。

仍以电路 b21 为例,当  $p=6, r=2.66$  时二阶近似解对应的  $MTTF=5.9723$  低于 POGA 解。但在  $t=0.5 \times 10^6$  小时附近二阶近似解方案的可靠性为 0.99820,而 POGA 解仅为 0.99796。

此外,实验表明,在某些情况下将假定 1 的约束适当放宽有助于发现比原近似最优解更优的解。例如当  $p=6, r=1.63$  时,在放宽假定 1 为  $S(q)+S(q-1)=1$  时可发现  $MTTF=3.2924/\lambda$  的划分。此时在原假定 1 下发现的近似最优解仅能达到  $MTTF=3.2863/\lambda$ 。

**结束语** 本文研究给定冗余和给定替换配置数量的约束下可重构系统的可靠性问题。给出了以可靠性及 MTTF 为优化目标的一阶近似最优化模型及可靠性一阶近似最优化的充要条件;提出了通过二阶近似模型将可重构器件的替换配

**结束语** 本文对主机 CPU 在每日各个时刻的可用性进行了较为精细的模拟。实验表明,模拟结果具有较高的精度。根据研究结果,我们将开发主机 CPU 可用性模拟器,来随机产生 CPU 的可用序列,用来对 XtremWeb 系统的整体性能进行评测。

## 参考文献

- [1] Milojicic D S, Kalogeraki V, Lukose R, et al. Peer-to-Peer Computing. HP Laboratories Palo Alto, HPL-2002-57. 2002
- [2] Fedak V N G, Germain C, Cappello F. XW: a generic global computing platform-ccgrid'2001 special session global computing on personal devices. IEEE press, 2000
- [3] Dirida, DO'Halloran. The statistical properties of host load. Scientific Programming, Also available as CMU Technical Report CMN-CS-TR-98-175. 1999
- [4] Crovella M E, Lipsky L. Simulations with Heavy-Tailed Workloads. Self-similar Network Traffic and Performance Evaluation, 2000

置资源分配问题转换为二次规划问题进行求解的方法与实施流程。实验表明大多数情况下本方法在可靠性及 MTTF 指标上优于以往的研究。

## 参考文献

- [1] Lach J, Mangione S W H, Potkonjak M. Low overhead fault-tolerant FPGA systems[C]. Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 1998; 212-221
- [2] Wei J H. Dependable computing techniques for reconfigurable hardware[D]. UMI Microform 3026836, 2001
- [3] Kening Z, Bedette G, Demara R F. Triple Modular Redundancy with Standby (TMRSB) Supporting Dynamic Resource Reconfiguration[C] // Systems Readiness Technology Conference, 2006; 690-696
- [4] Emmert J, Stroud C, Skaggs B, et al. Dynamic fault tolerance in FPGAs via partial reconfiguration[C]. Field-Programmable Custom Computing Machines, 2000; 165-174
- [5] Gericota M G, Alves G R, Ferreira J M. A self-healing real-time system based on run-time self-reconfiguration [C]. Emerging Technologies and Factory Automation, 2005
- [6] Wei J H, McCluskey E J. Column-based Precompiled Configuration Techniques for FPGA Fault Tolerance[C]. Field-Programmable Custom Computing Machines, 2001; 137-146
- [7] Subhasish M, Huang W J, Saxena N R, et al. Reconfigurable architecture for autonomous self-repair [C]. Design & Test of Computers, 2004; 228-240
- [8] Elshafey K. Embedding fault tolerance via reconfiguration in configurable systems[C]. Microelectronics, 2003; 370-373
- [9] Morinaga S. A general model for reliability maximization problem under given redundancy [C]. Fault-Tolerant Computing, 1997; 363-372
- [10] Constantinidesz K, Plazaz S, Blomez J, et al. BulletProof: A Defect-Tolerant CMP Switch Architecture[C]. High-Performance Computer Architecture, 2006; 5-16
- [11] Basto L. First results of ITC'99 benchmark circuits[C]. Design & Test of Computers, 2000; 54-59