

基于状态转移图的虚拟集群节点可用性分析

车建华¹ 任守纲¹ 余 勇² 徐焕良¹

(南京农业大学信息科技学院 南京 210095)¹ (全球能源互联网研究院 南京 210003)²

摘 要 针对虚拟集群节点的可用性评价,提出了一种基于状态转移图的虚拟集群节点可用性模型。首先,通过分析虚拟集群节点的部署方式和运行过程,确立了虚拟集群节点的 5 种生命周期状态,并阐明了 5 种生命周期状态之间的转移关系;然后,对于无备用节点和有备用节点两种情况下的虚拟集群节点,分别给出了相应的状态转移图,并建立了一系列的可用性模型。根据实际虚拟集群系统的运行日志,设定所提出的虚拟集群节点可用性模型的参数值,然后进行了多次数值模拟实验。实验结果表明,所提出的虚拟集群节点可用性模型的分析结果与实际可用性水平一致,能够正确地反映虚拟集群节点的可用性规律。

关键词 虚拟机,虚拟集群节点,状态转移图,可用性模型,集群系统

中图分类号 TP302.7 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.05.055

Availability Analyzing of Virtual Cluster Nodes Based on State Transition Diagram

CHE Jian-hua¹ REN Shou-gang¹ YU Yong² XU Huan-liang¹

(College of Information Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)¹

(Global Energy Interconnection Research Institute, Nanjing 210003, China)²

Abstract Aiming at the availability evaluation of virtual cluster nodes, a state transition diagram-based virtual cluster node availability model was proposed. First, five lifecycle states of virtual cluster nodes are established by analyzing the deployment mode and running process of virtual cluster nodes, and the transition relations between five lifecycle states are expounded. Then, the state transition diagrams of a virtual cluster node without a standby node and with a standby node are respectively presented, and the corresponding availability models of virtual cluster nodes are proposed based on the above state transition diagrams. Many numerical simulation experiments were conducted after setting the parameter values of the proposed availability models according to the running log of a real virtual cluster system. The experimental results show that the analytical results of the proposed availability models are in accordance with the real availability level and they are able to reflect the availability law of virtual cluster nodes properly.

Keywords Virtual machine, Virtual cluster node, State transition diagram, Availability model, Cluster system

1 引言

虚拟机(Virtual Machine)技术的不断成熟为诸多 IT 服务需求和商业应用提供了高效的解决方案,如云数据中心等^[1]。虚拟机由于在操作系统与底层硬件之间具备逻辑去耦合能力,因此被引入传统集群系统中,从而促进了虚拟集群系统的产生。在传统集群系统中,所有节点都由物理机构成;同时,为了提高可用性,几乎所有的活跃节点(Active Node)都配备有相应的备用节点(Standby Node)。虚拟集群系统是一种将节点服务安装于虚拟机中的集群系统,包括活跃节点和备用节点在内的很多节点,甚至所有节点,都由虚拟机构成,

即采用虚拟机作为虚拟集群系统的节点^[2]。虚拟集群系统具有资源利用率高、系统维护容易和备份成本低等优势,但也存在一些不足,如虚拟机管理器(Virtual Machine Monitor)给虚拟集群系统带来了不稳定因素^[4]、容纳多个虚拟集群节点的服务器存在“单点故障”等问题,影响了虚拟集群系统的可用性。

可用性一直是评价集群系统优劣的重要指标,如何分析虚拟集群系统的可用性成为了众多研究者的关注热点。虚拟集群系统的可用性建立在虚拟集群节点的可用性基础之上,因此分析虚拟集群系统的可用性时,首先需要分析虚拟集群节点的可用性。本文针对虚拟集群节点的无备用节点和有备用节点两种情况,利用马尔可夫链理论分别设计相应的状态

收稿日期:2017-04-24 返修日期:2017-07-08 本文受国家科技支撑计划项目(2015BAK36B05),江苏省重点研发计划项目(BE2016803),国家自然科学基金项目(71303120),南京农业大学青年科创基金项目(KJ2013033)资助。

车建华(1979—),男,博士,讲师,主要研究方向为云计算、大数据;任守纲(1977—),男,博士,副教授,主要研究方向为物联网、大数据;余 勇(1966—),男,博士,研究员级高级工程师,主要研究方向为云计算、信息安全;徐焕良(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为物联网、大数据,E-mail: huanliangxu@njau.edu.cn(通信作者)。

转移图,以建立虚拟集群节点的可用性模型。

2 相关研究

虚拟集群系统的可用性分析可以基于很多模型,如故障树、可靠性框图、马尔可夫链和随机 Petri 网等^[3]。故障树和可靠性框图采用事件符号、逻辑门符号和转移符号来描述计算机系统中各种事件之间的因果关系,适用于单计算机系统的可靠性分析,在分析虚拟集群系统的可用性时会变得非常复杂^[4]。马尔可夫链和随机 Petri 网是使用得比较广泛的两种模型。Zheng 等人研究了具有动态迁移功能的虚拟机系统中的组件可用性对系统可用性的权重问题,并定量分析了建模虚拟机系统的连续时间马尔可夫链模型中的组件可用性权重^[5]。Manel 等人利用随机回报网实现了虚拟机系统基于时间的修复,并针对虚拟机迁移修复和虚拟机在线修复两种情况提出了优化修复过程和提高系统可用性的算法^[6]。Thein 等人利用虚拟化和软件修复技术设计了一个能够延长虚拟机系统生命周期的框架,针对虚拟机系统可用性与备份虚拟机数目之间的关系给出了定量描述^[7-8]。

利用马尔可夫链和随机 Petri 网分析虚拟集群节点的可用性离不开对节点状态和状态转移的描述。根据 DMTF 规范,虚拟机的状态分为两种:激活与静寂。其中,激活状态又分为运转和热备两种状态;静寂状态又分为计划内和计划外两种情况。Farr 等人对上述状态进行了扩展,将虚拟机的状态分为运转、 α 状态、 Δ 状态、暂停、挂起和休眠 6 种类型^[9]。这些状态适用于描述单台虚拟机的存活情况,却不能反映虚拟集群节点中活跃节点与备用节点之间的状态切换。

此外,Che 等人研究了故障插入在虚拟机系统可用性评测中的应用^[10],为获取虚拟集群节点可用性模型的参数值提供了方法。Cully 等人设计了利用虚拟机异步复制技术来构建透明、高可用性服务框架的方案,并开发了一个原型系统 Remus^[11]。总体而言,这些研究作为虚拟集群节点的可用性分析奠定了坚实的基础。

与上述研究工作相比,本文通过分析虚拟集群节点的部署方式和运行过程,明确地给出了虚拟集群节点的 5 种生命周期状态,并详细地阐述了这 5 种生命周期状态之间的转移关系。在此基础上,针对虚拟集群节点的无备用节点和有备用节点两种情况,基于状态转移图建立了虚拟集群节点可用性分析的形式化模型。

3 基于状态转移图的虚拟集群节点的可用性模型

利用状态转移图分析虚拟集群节点的可用性时,需要确定虚拟集群节点的生命周期状态以及各种状态之间的转移关系。

3.1 模型的参数定义和前提条件

为了分析虚拟集群节点的可用性,将虚拟集群节点的生命周期分为正常(normal)、非稳(unsteady)、修复(rejuvenation)、切换(switchover)和失效(failure) 5 种状态,如图 1 所示。其中,正常状态是指虚拟集群节点处于正常运行的阶段;非稳状态是指虚拟集群节点处于异常不稳定的阶段;修复状态是指虚拟集群节点处于由非稳状态向正常状态修复的阶段;切换状态是指处于非稳状态的虚拟集群节点因无法修复

到正常状态而切换至备用节点的阶段;失效状态是指虚拟集群节点处于停止运行的状态。在非稳状态和修复状态中,虚拟集群节点的性能可能有所下降,但是仍可访问其服务;而在切换状态和失效状态中,不可访问虚拟集群节点的服务。

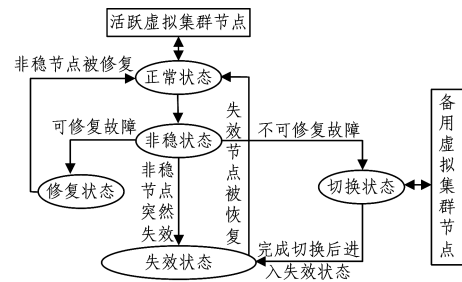


图 1 虚拟集群节点的 5 种生命周期状态

Fig. 1 Five lifecycle states of virtual cluster nodes

处于正常状态的虚拟集群节点在运行若干时间后可能进入非稳状态,处于非稳状态的虚拟集群节点可能进入 3 种状态:修复状态、切换状态和失效状态。其中,可修复的虚拟集群节点进入修复状态;不可修复的虚拟集群节点进入切换状态,在将运行状态和工作负载转移到备用节点后进入失效状态,因突然因素来不及转移运行状态和工作负载的虚拟集群节点将直接进入失效状态。处于修复状态的虚拟集群节点经过软件修复后进入正常状态,而处于切换状态的虚拟集群节点最终失效,相关服务由备用节点提供。备用节点同样具有上述状态和状态转移规律。

本文所定义的模型参数如表 1 所列,模型参数遵循如下前提条件:

- 1) 活跃节点和备用节点具有一致的模型参数;
- 2) 与其他概率相比,虚拟集群节点从正常状态直接进入失效状态的概率可以忽略不计。

表 1 基于状态转移图的可用性模型的参数定义

Table 1 Parameter definition of STD-based availability models

参数符号	参数的定义描述
π_N	虚拟集群节点处于正常状态的概率
π_U	虚拟集群节点处于非稳状态的概率
π_R	虚拟集群节点处于修复状态的概率
π_S	虚拟集群节点处于切换状态的概率
π_F	虚拟集群节点处于失效状态的概率
η	虚拟集群节点从正常状态转变为非稳状态的频率
ϵ	虚拟集群节点从非稳状态转变为修复状态的概率
γ	虚拟集群节点从修复状态转变为正常状态所用的时间
λ	虚拟集群节点从非稳状态转变为失效状态的频率
μ	虚拟集群节点从失效状态转变为正常状态的频率
τ	虚拟集群节点从非稳状态转变为切换状态的概率
δ	虚拟集群节点从切换状态迁移到备用节点所用的时间

3.2 状态转移图和可用性模型

在虚拟集群系统中,虚拟集群节点分为两种情况:无备用节点和有备用节点。

3.2.1 无备用节点情况下虚拟集群节点的状态转移图

对于无备用节点的虚拟集群节点,不存在活跃节点与备用节点之间的切换,一旦发生不可修复故障即进入失效状态,此时,虚拟集群节点的状态转移图如图 2 所示。其中, N 代表正常状态, U 代表非稳状态, R 代表修复状态, F 代表失效状态。

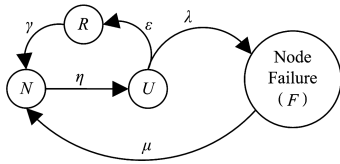


图 2 无备用节点情况下虚拟集群节点的状态转移图

Fig. 2 State transition diagram of VCN without standby node

在 3.1 节的前提条件下,可以得到图 2 的平衡方程:

$$\eta\pi_N = \gamma\pi_R + \mu\pi_F \quad (1)$$

$$\gamma\pi_N = \varepsilon\pi_U + \lambda\pi_U \quad (2)$$

$$\varepsilon\pi_U = \gamma\pi_R \quad (3)$$

$$\lambda\pi_U = \mu\pi_F \quad (4)$$

通过求解所有状态概率的和,可以得到图 2 的守恒方程:

$$\pi_N + \pi_U + \pi_R + \pi_F = 1 \quad (5)$$

结合上述平衡方程与守恒方程,可以得到如下状态概率表达式:

$$\pi_N = \frac{\lambda + \varepsilon}{\eta} \pi_U \quad (6)$$

$$\pi_R = \frac{\varepsilon}{\gamma} \pi_U \quad (7)$$

$$\pi_F = \frac{\lambda}{\mu} \pi_U \quad (8)$$

进一步求解,可得到无备用节点情况下虚拟集群节点可用性模型的封闭解形式:

$$\pi_U = \left[1 + \frac{\varepsilon}{\gamma} + \frac{\lambda}{\mu} + \frac{\lambda + \varepsilon}{\eta} \right]^{-1} \quad (9)$$

由于在此种情况下虚拟集群节点在失效状态(F)中是不可用的,因此无备用节点情况下的虚拟集群节点的稳态可用性为:

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = 1 - \pi_F$$

在给定的时间段 L 中,对应的故障停机时间为 $DT(L) = \pi_F \times L$,对应的故障停机成本为 $C(L) = \pi_F \times L \times C_F$ 。

3.2.2 有备用节点情况下虚拟集群节点的状态转移图

对于有备用节点的虚拟集群节点,当活跃节点发生不可修复的故障时,虚拟集群管理软件将启动备用节点,并把活跃节点的运行状态和工作负载转移到备用节点以继续提供服务。同样,当备用节点进入非稳状态并无法修复为正常状态时,将检测原活跃节点是否已恢复为正常状态,如果原活跃节点已经完全恢复,则将相应运行状态和工作负载从备用节点转回原活跃节点,否则备用节点进入失效状态。活跃节点和备用节点全部失效时代表整个虚拟集群节点失效,此时,虚拟集群节点的状态转移图如图 3 所示。其中,N 代表正常状态,U 代表非稳状态,R 代表修复状态,S 代表切换状态,F 代表失效状态,下标 A 代表该虚拟集群节点为活跃节点,下标 S 代表该虚拟集群节点为备用节点。

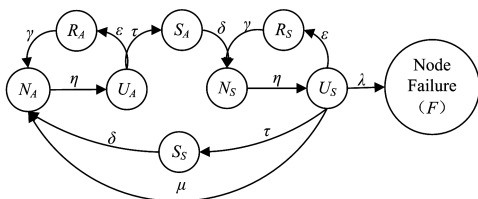


图 3 有备用节点情况下虚拟集群节点的状态转移图

Fig. 3 State transition diagram of VCN with standby node

在 3.1 节的前提条件下,可以得到图 3 的平衡方程:

$$\eta\pi_{N_A} = \gamma\pi_{R_A} + \delta\pi_{S_A} + \mu\pi_F \quad (10)$$

$$\eta\pi_{N_A} = \varepsilon\pi_{U_A} + \tau\pi_{U_A} \quad (11)$$

$$\varepsilon\pi_{U_A} = \gamma\pi_{R_A} \quad (12)$$

$$\tau\pi_{U_A} = \delta\pi_{S_A} \quad (13)$$

$$\eta\pi_{N_S} = \gamma\pi_{R_S} + \delta\pi_{S_S} \quad (14)$$

$$\eta\pi_{N_S} = \varepsilon\pi_{U_S} + \tau\pi_{U_S} + \lambda\pi_{U_S} \quad (15)$$

$$\varepsilon\pi_{U_S} = \gamma\pi_{R_S} \quad (16)$$

$$\tau\pi_{U_S} = \delta\pi_{S_S} \quad (17)$$

$$\lambda\pi_{U_S} = \mu\pi_F \quad (18)$$

通过求解所有状态概率的和,可以得到图 3 的守恒方程:

$$\pi_{N_A} + \pi_{U_A} + \pi_{R_A} + \pi_{S_A} + \pi_{N_S} + \pi_{U_S} + \pi_{R_S} + \pi_{S_S} + \pi_F = 1 \quad (19)$$

结合上述平衡方程与守恒方程,可以得到如下状态概率

表达式:

$$\pi_{N_A} = \frac{\varepsilon + \tau}{\eta} \pi_{U_A} \quad (20)$$

$$\pi_{R_A} = \frac{\varepsilon}{\gamma} \pi_{U_A} \quad (21)$$

$$\pi_{S_A} = \frac{\tau}{\delta} \pi_{U_A} \quad (22)$$

$$\pi_{N_S} = \frac{\varepsilon + \tau + \lambda}{\eta} \pi_{U_S} \quad (23)$$

$$\pi_{R_S} = \frac{\varepsilon}{\gamma} \pi_{U_S} \quad (24)$$

$$\pi_{S_S} = \frac{\tau}{\delta} \pi_{U_S} \quad (25)$$

$$\pi_F = \frac{\lambda}{\mu} \pi_{U_S} \quad (26)$$

进一步求解,可得到有备用节点情况下虚拟集群节点可用性模型的封闭解形式:

$$\pi_{U_S} = \left[\begin{matrix} 1 + \frac{\varepsilon}{\gamma} + \frac{\lambda}{\mu} + \frac{\lambda + 2\tau}{\delta} \\ + \frac{\lambda + \tau + \varepsilon}{\eta} + \frac{\lambda + \tau}{\tau} \\ (1 + \frac{\varepsilon}{\gamma} + \frac{\varepsilon + \tau}{\eta}) \end{matrix} \right]^{-1} \quad (27)$$

由于在此种情况下虚拟集群节点在切换状态(S)和失效状态(F)中都是不可用的,因此有备用节点情况下的虚拟集群节点的稳态可用性为:

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = 1 - (\pi_{S_A} + \pi_{S_S} + \pi_F)$$

在给定时间段 L 中,对应的故障停机时间为 $DT(L) = (\pi_{S_A} + \pi_{S_S} + \pi_F) \times L$,对应的故障停机成本为 $C(L) = (\pi_{S_A} \times C_{S_A} + \pi_{S_S} \times C_{S_S} + \pi_F \times C_F) \times L$ 。

4 实验分析

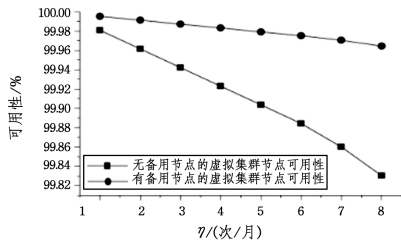
为了验证上述可用性模型,使用 VisualBasic 6.0 编程对其进行实现,并基于 Hadoop2.7.1 稳定版搭建了一个虚拟集群系统来获取模型的参数值。所搭建的虚拟集群系统包括 4 个控制节点和 32 个计算节点,每个节点都安装有 64 位 Ubuntu 14.04 LTS 主机操作系统、Xen 4.4 虚拟机管理器和 64 位 Ubuntu 14.04 LTS 客户操作系统,并选取 2 个控制节点和 16 个计算节点作为另外 2 个控制节点和 16 个计算节点的备用节点。通过分析整个虚拟集群系统的运行日志得到模型参数的设定数值,如表 2 所列。

表2 基于状态转移图的可用性模型的参数值

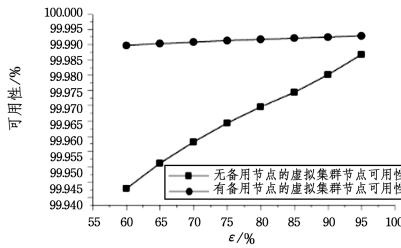
Table 2 Parameter values of STD-based availability models

模型参数	实验次数		设定数值							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
η /(次/月)	1	2	3	4	5	6	7	8		
ϵ /%	60	65	70	75	80	85	90	95		
γ /s	6	10	12	15	20	30	45	60		
λ /(次/年)	1	2	3	4	5	6	7	8		
μ /(次/月)	1	2	4	8	30	60	120	240		
τ /%	40	35	30	25	20	15	10	5		
δ /s	4	6	10	30	60	300	600	900		

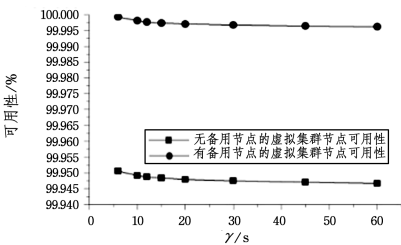
数值模拟实验的结果如图4—图6所示。



(a)



(b)

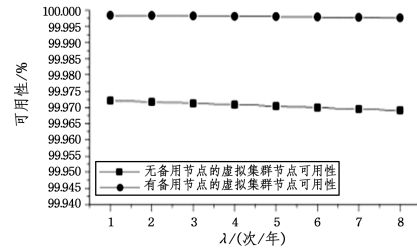


(c)

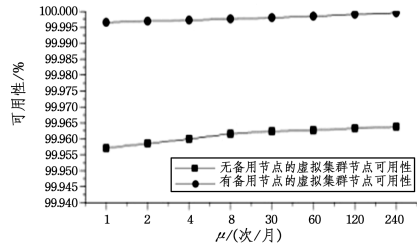
图4 虚拟集群节点可用性与模型参数 η, ϵ, γ 的变化关系

Fig. 4 Relation between availability of VCN and η, ϵ, γ

图4给出了无备用节点和有备用节点两种情况下虚拟集群节点的可用性与模型参数 η, ϵ, γ 之间的变化关系。从图4(a)可以看到,两种情况下虚拟集群节点的可用性随着 η 的增加而降低,而且无备用节点的虚拟集群节点的可用性降幅更大,这是因为 η 对无备用节点的虚拟集群节点的可用性影响更大。从图4(b)可以看到,虚拟集群节点的可用性随着 ϵ 的增加而增加,其中无备用节点的虚拟集群节点的可用性增幅更大,这是因为 ϵ 的增加意味着在相同时间内,虚拟集群节点进入修复状态的概率增加,而进入切换状态和失效状态的概率相应减少,对无备用节点的虚拟集群节点的可用性影响较大。从图4(c)可以看到,虚拟集群节点的可用性随着 γ 的增加而降低,并且在无备用节点和有备用节点两种情况下,虚拟集群节点的可用性降幅相近。由于 γ 为处于修复状态的虚拟集群节点的修复时间,因此其值越大代表虚拟集群节点的可用性越低。



(a)



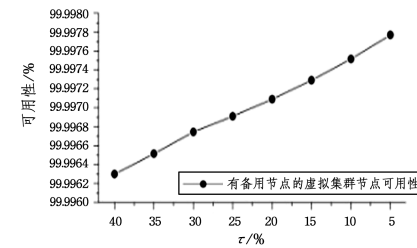
(b)

图5 虚拟集群节点可用性与模型参数 λ, μ 之间的变化关系

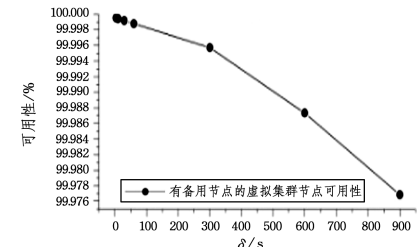
Fig. 5 Relation between availability of VCN and λ, μ

图5显示了无备用节点和有备用节点两种情况下虚拟集群节点的可用性与模型参数 λ, μ 之间的变化关系。从图5(a)中可以看出,虚拟集群节点的可用性随着每年失效次数 λ 的增加而降低,其中无备用节点的虚拟集群节点的可用性降幅稍大,这是因为发生无法修复的故障时对无备用节点的虚拟集群节点的可用性影响更大。从图5(b)中可以看出,虚拟集群节点的可用性随着 μ 的增加而增加,而且无备用节点的虚拟集群节点的可用性增幅更大。

图6显示了有备用节点的虚拟集群节点的可用性与模型参数 τ, δ 之间的变化关系,无备用节点的虚拟集群节点由于不存在切换状态而没有相应的规律。



(a)



(b)

图6 虚拟集群节点可用性与模型参数 τ, δ 的变化关系

Fig. 6 Relation between availability of VCN and τ, δ

从图6(a)可以看到,有备用节点的虚拟集群节点的可用性随着 τ 的减小而增加,这是因为 τ 的减小意味着处于非稳状态下的虚拟集群节点进入切换状态的概率降低,而进入修复状态的概率增加。从图6(b)可以看到,有备用节点的虚拟集群节点的可用性随着 δ 的增加而降低,因为 δ 的增加意味

着虚拟集群节点迁移到备用节点所需的时间变长,从而导致虚拟集群节点服务的不可访问时间增加。

从上述实验可知,基于状态转移图的虚拟集群节点可用性模型的计算结果符合虚拟集群节点实际运行情况,能够刻画虚拟集群节点的可用性变化规律。

结束语 虚拟集群节点的可用性分析是虚拟集群系统可用性分析的基础,而状态转移图是虚拟集群节点可用性分析的一种重要工具。本文首先通过分析虚拟集群节点的部署方式和运行过程,确立了虚拟集群节点的 5 种生命周期状态,并阐明了这 5 种生命周期状态之间的转移关系;然后针对无备用节点和有备用节点两种情况下的虚拟集群节点给出了相应的状态转移图,并建立了一系列的模型来分析它们的可用性,为虚拟集群节点的可用性分析提供了一种途径。后期将进一步研究虚拟集群节点与虚拟集群系统之间的可用性映射关系。

参 考 文 献

- [1] ARMBRUST M, FOX A, GRIFFITH R, et al. A view of cloud computing[J]. *Communications of the ACM*, 2010, 53(4): 50-58.
- [2] NISHIMURA H, MARUYAMA N, MATSUOKA S. Virtual Clusters on the Fly-Fast, Scalable, and Flexible Installation[C]// *The 7th IEEE International Symposium on CLUSTER Computing and the Grid*. Rio de Janeiro, Brazil, 2007: 549-556.
- [3] JOHNSON J A M, MALEK M. Survey of software tools for evaluating reliability, availability, and serviceability[J]. *ACM Computing Surveys(CSUR)*, 1988, 20(4): 227-269.
- [4] HUANG M Y, WEI O, HU J. Fault Tree Generation Based on Fault Configuration[J]. *Computer Science*, 2017, 44(2): 182-191. (in Chinese)

(上接第 294 页)

的提升,这使得金融风险的实时监控在金融产品数量非常庞大时也可以实现。本文的工作也可以为其他计算量大且具有数据依赖的金融算法在 GPU 上的大规模并行计算提供参考。在目前的方案中,每个 block 内的线程数据交互还是基于共享存储器和全局存储器的,在下一步的工作计划中,我们将使用 Kepler 架构新引入的 shuffle 操作对寄存器进行通信以降低数据开销,从而实现单债券的性能提升。本文使用的双调并行排序对 250 个风险因子进行全排序,而 VaR 的计算只需要对最大的 25 个数据进行排序,后续我们也会改进双调排序算法,将全排改进为部分排序,以减少排序开销。同时,考虑到目前的多卡架构已经成为服务器主流,我们也将对程序进行多卡移植,以进一步提升程序的整体性能。

参 考 文 献

- [1] Group of Thirty. Derivatives: Practices and Principles[OL]. http://group30.org/images/uploads/publications/G30_Derivatives-PracticesandPrinciples.pdf.
- [2] ZHANG B, OOSTERLEE C W. Option pricing with COS method on graphics processing units[C]// *IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing*, 2009 (IPDPS 2009). IEEE, 2009: 1-8.
- [3] DANG D M, CHRISTARA C C, JACKSON K R. An efficient

黄鸣宇,魏欧,胡军.基于故障配置的故障树生成[J]. *计算机科学*, 2017, 44(2): 182-191.

- [5] ZHENG J, OKAMURA H, DOHI T. Availability Importance Measures for Virtualized System with Live Migration[J]. *Applied Mathematics*, 2015, 6(2): 359-372.
- [6] MANEL S, RIDHA A, ALIA M. Optimised Migrate Virtual Machine Rejuvenation[J]. *Journal of Computer & Communications*, 2015, 3(8): 33-40.
- [7] THEIN T, PARK J S. Availability analysis of application servers using software rejuvenation and virtualization[J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2009, 24(2): 339-346.
- [8] THEIN T, CHI S D, PARK J S. Availability modeling and analysis on virtualized clustering with rejuvenation[J]. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2008, 8(9): 72-80.
- [9] FARR E, HARPER R, SPAINHOWER L, et al. A Case for High Availability in a Virtualized Environment (HAVEN)[C]// *The 3rd International Conference on Availability, Reliability and Security*. Barcelona, Spain, 2008: 675-682.
- [10] CHE J H, HE Q M, CHEN J H, et al. A software simulation-based fault injection tool of virtual machine systems[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2011, 45(4): 614-620. (in Chinese)
- 车建华,何钦铭,陈建海,等.基于软件模拟的虚拟机系统故障插入工具[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2011, 45(4): 614-620.
- [11] CULLY B, LEFEBVRE G, MEYER D, et al. Remus: High availability via asynchronous virtual machine replication[C]// *The 5th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation*. San Francisco, California, 2008: 161-174.

graphics processing unit-based parallel algorithm for pricing multi-asset American options[J]. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2012, 24(8): 849-866.

- [4] BURKE N, RAU-CHAPLIN A, VARGHESE B. Computing probable maximum loss in catastrophe reinsurance portfolios on multi-core and many-core architectures[J]. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2016, 28(3): 836-847.
- [5] ABBAS-TURKI L A, VIALLE S, LAPEYRE B, et al. Pricing derivatives on graphics processing units using Monte Carlo simulation[J]. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2014, 26(9): 1679-1697.
- [6] FATICA M, PHILLIPS E. Pricing American bonds with least squares Monte Carlo on GPUs[C]// *Proceedings of the 6th Workshop on High Performance Computational Finance*. ACM, 2013: 5.
- [7] WESTON S, SPOONER J, RACANIÈRE S, et al. Rapid computation of value and risk for derivatives portfolios[J]. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2012, 24(8): 880-894.
- [8] ZHANG N, MAN K L, XIE D. Computing Value at Risk in OpenCL on the Graphics Processing Unit[J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2015, 329: 71-78.
- [9] WOOD T. Applications of GPUs in computational finance[D]. Amsterdam: Universiteit van Amsterdam, 2010.