

# 发布/订阅通信模式的实时性能分析与评估

刘旭军<sup>1,2</sup>, 马跃<sup>2</sup>, 于东<sup>2</sup>

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 2. 中国科学院沈阳计算技术研究所高档数控国家工程研究中心, 沈阳 110171)

**摘要:** 运用成熟的队列理论知识, 通过 PRISM 模型验证工具, 对发布/订阅模式的实时性能进行形式化分析。实验结果表明, 发布/订阅模式在消息响应时间及消息传输可靠性两方面比传统的通信模式表现出更良好的性能, 该实验模型和实验方法对于优化发布/订阅模式及调整实际发布/订阅系统中的参数配置都有一定的帮助。

**关键词:** 发布/订阅; 队列理论; 实时性; 形式化分析

## Analysis and Evaluation of Real-time Performance of Publish/Subscribe Communication Mode

LIU Xu-jun<sup>1,2</sup>, MA Yue<sup>2</sup>, YU Dong<sup>2</sup>

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 2. National Engineering Research Center for High-end Computer Numerical Control, Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110171, China)

**【Abstract】** This paper uses a formal analysis method to analyze the publish/subscribe real-time performance by PRISM model checker, which is based on the queuing theory. Experimental results show that publish/subscribe has better performance compared with traditional communication mode in terms of message response time and message transmission reliability. The experimental model and method not only can help improve publish/subscribe, but also have effect on adjusting publish/subscribe system parameter configuration.

**【Key words】** publish/subscribe; queuing theory; real-time; formal analysis

### 1 概述

近年来,发布/订阅通信模式在分布式系统中的应用越来越广泛。发布/订阅通信模式实现了时间、空间和同步关系3个方面的完全解耦<sup>[1]</sup>,使得它成为现代分布式计算环境的理想选择。发布/订阅通信模式大多是通过消息中间件来实现的,图1为一个典型的发布/订阅系统框架。首先每个发布者通过消息中间件通知系统中其他所有中间件它拥有的事件(消息)主题。随后订阅者通过中间件可以去订阅它所感兴趣的事件(消息)主题。系统内各个发布者和各个订阅者之间的通信完全通过中间件完成。各个发布者和订阅者之间是完全透明的,它们各自并不知道对方的存在。发布者发布消息时,订阅者可以处于断开连接的状态,此时如果有发布者发布此订阅者订阅的消息,中间件将负责存储此消息,直至此订阅者重新连接上系统,中间件将存储的消息发送出去并删除此消息的存储副本。由于它们之间的这种透明性,发布/订阅系统可以动态改变发布者和订阅者数量。这种可扩展特性使得发布/订阅通信模式能更好地适应现代大型分布式系统的要求。

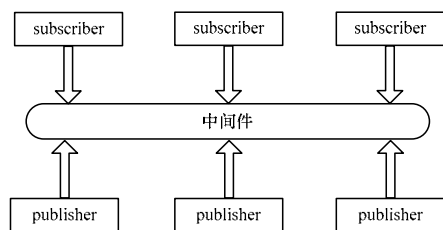


图1 发布/订阅系统结构

发布/订阅通信模式不仅在分布式系统中应用广泛,它在分布式实时系统中的作用也正逐渐被挖掘出来。它在现有应用中表现出来的实时性,已经能够满足部分工业系统的要求<sup>[2]</sup>。然而现有研究对发布/订阅通信模式实时性能分析得还不够深入全面,文献[3]使用一种称为成本模型(Cost Model)的方法对发布/订阅通信模式实时性能进行了深入分析,它主要侧重于分析发布/订阅通信模式与请求/回应通信模式在实时性方面表现出来的差异,对发布/订阅通信模式的可靠性分析还不够。

本文首先建立发布/订阅的抽象模型,然后通过模型检测工具 PRISM 的程序语言把此抽象模型转化为相应的 PRISM 程序,最后运用队列理论并借助 PRISM 提供的工具对发布/订阅通信模式的实时性能进行形式化分析。

### 2 队列理论

本节简单介绍一些队列理论的重要概念,文献[4]对队列理论进行了详细说明。

#### 2.1 关联参数

每个队列都关联以下一些参数:

(1)入队速度(A):新消息到达本队列的平均速度。

**基金项目:**科技部国家科技支撑计划基金资助重点项目(2007BAP20 B01);中国科学院知识创新工程重要方向基金资助项目(KGCX2-YW-119)

**作者简介:**刘旭军(1985-),男,硕士研究生,主研方向:工业控制网络,实时通信机制;马跃,研究员、硕士;于东,研究员、博士、博士生导师

**收稿日期:**2010-04-04 **E-mail:** netnoah@sina.com

(2)服务时间( $T_s$ ):服务器处理一个消息所花费的平均时间。

(3)缓存时间( $T_q$ ):每个消息在队列中所停留的平均时间。

(4)响应时间( $T$ ):服务时间与缓存时间之和即为服务器对消息的响应时间。

如果一个队列系统的入队速度小于服务速度( $1/T_s$ ),称这个队列系统是一个稳定队列系统。对于一个稳定队列系统,系统中所有消息都可以得到处理,系统中所有队列都有界。否则,如果系统入队速度大于服务速度,就是不稳定队列系统。

## 2.2 M/M/C 队列

如果一个队列系统的入队时间( $1/\lambda$ )是随机而不可预测的,那么这个系统的入队时间就呈现出一种指数分布或者叫无记忆分布。这种分布对于队列理论具有重要意义,一个入队时间和服务时间都服从指数分布的队列系统被称为是M/M/C队列,其中,M代表的是入队时间以及服务时间都具有马尔可夫性质;而C指明了有多少个服务器和这个队列相关联。一个随机过程具有马尔可夫性质是指在给定现在状态及所有过去状态情况下,其未来状态的条件概率分布仅依赖于当前状态。这个性质可使随机过程的相关数学运算大大简化。例如,M/M/1队列的响应时间就可以简单地表示为 $T = T_s / (1 - U)$ 。图2为M/M/1队列响应时间随利用率而变化的曲线,可见,随着利用率的提升,响应时间也在逐渐增大。

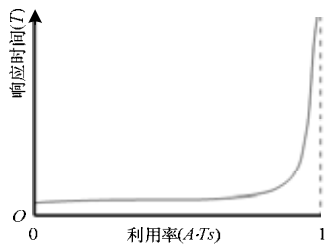


图2 M/M/1 队列响应时间

## 2.3 little 定律

little 定律:一个队列系统中消息的平均数目等于消息的平均入队速度乘上消息的平均响应时间。little 定律很通用,它可以运用于所有的稳定队列系统中。本文消息响应时间的计算基于此定律。

一般来说,一个简单队列系统是不足以模拟一个像发布/订阅这样的复杂系统的。本文把这些复杂系统模拟成一个网络队列模型,每个结点单独用一个队列来模拟。

## 3 发布/订阅抽象模型

### 3.1 网络队列模型

图3为一个发布/订阅的抽象模型,这个抽象模型的主要部分是一个网络队列模型。本模型抽象了一个发布者和一个订阅者之间的通信过程,多个发布者与多个订阅者之间的通信过程与此相似。为了清楚地描述发布/订阅通信过程,本文着重分析一对一的情况。首先,当发布者有新的消息需要发布时,它将此消息放入相应的优先级中间件队列中,本文使用了多个队列是为了模拟优先级队列的情况,这在实时系统中很常见。优先级更低的队列中的消息只有等到比它优先级更高的队列为空时才能发送出去。然后,从队列中取出一个消息并与订阅表中的信息进行匹配,找出此消息所有的订阅者,最后通过相应的路由机制把此消息送到相应的订阅

者。值得注意的是,在实际的应用系统中,一个部件往往既是发布者又是订阅者,但是通信原理还是一样的,完全可以把这种部件分成2个部件来看待。

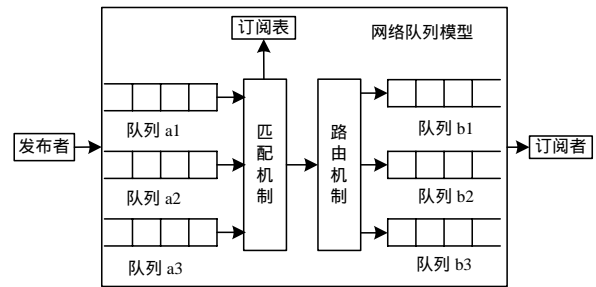


图3 发布/订阅的抽象模型

### 3.2 模型检测假设

P/S 通信模式通常应用于短距离的传输(如局域网),对于短距离的传输,通信信道通常可以认为是可靠的。此外 P/S 通信模式基于 UDP 协议,UDP 协议是一种不可靠的传输协议,它不支持消息重传机制。基于上述几点,本文对模型检测做出以下假设:(1)通信信道是可靠的,传输过程中消息不会丢失,只有当缓冲区溢出时消息才会丢失。(2)所有丢失的消息都不发生重传。

## 4 PRISM 模型

本节运用前面所介绍的理论来建立一个 PRISM 模型,模型系统由1个发布者、2个订阅者组成。其中,发布者会发布3种不同的消息 cmd1、cmd2、cmd3,3种消息所占比例各不相同,且 cmd3 的优先级要低于前两者的优先级。在这个系统中,一个订阅者订阅了 cmd1 和 cmd3 消息,另一个订阅者订阅了 cmd2 和 cmd3 消息。

### 4.1 参数说明

模型中涉及到的参数说明如下:

(1)消息产生速度(send\_speed):每秒钟发布者产生消息的包数,单位为(packets/s),此值的大小因系统的不同而不同,但是值介于1 000~2 500的较多<sup>[5]</sup>。

(2)消息包大小(message\_size):此值的最大值受网络最大传送单元(MTU)的限制,现在较多网络的 MTU 一般为1 500 Byte,因此本文取1 024 Byte 作为消息包大小的平均值。

(3)局域网传输速度(lan\_speed):现在的局域网已大多是快速以太网,即传输速度已达到100 Mb/s,换算成字节每秒即为 $100 \times 10^6 / 8 = 12\,500\,000$ 。

(4)消息初始化时间(init\_t):发布者在发送消息之前都要对消息进行初始化设置,此值即用来模拟初始化所耗时间,此值取值来源于文献[5]。

(5)消息处理时间(process\_t):订阅者处理消息所需时间,此值的大小一般都要比初始化时间大上一个数量级,此值取值来源于文献[5]。

### 4.2 模型解释

模型部分代码如下:

```
module Publisher_Middleware_Queue
//产生一个 cmd1,放入消息队列 1
[cmd1]cmd1_waiting<MAX_cmd->1:
cmd1_waiting'=cmd1_waiting+1;
...
//以算出的速率发送出消息 1
```

```

[forwardcmd1]cmd1_waiting>0->1/(init_t+message_size/lan_spe
d):(cmd1_waiting=cmd1_waiting-1);
//消息3的优先级低于消息1和消息2
[forwardcmd3](cmd1_waiting+cmd2_waiting=0)&
cmd3_waiting>0->1/(init_t+message_size/lan_speed):(cmd3_waiting'=
cmd3_waiting-1);
endmodule
module Subscriber1_Middleware_Queue
//接收消息1
[forwardcmd1]in_waiting_1<MAX_bout->1:(in_accepted_1'=true)
&(in_waiting_1'=in_waiting_1+1);
//处理队列中的消息
[done]in_waiting_1>0->(1/process_t):
(in_waiting_1'=in_waiting_1-1);
Endmodule

```

### 4.3 响应时间的计算

运用前面所述队列理论中的 little 定律,此模拟系统消息响应时间可表示如下:

$$Response\_time=(cmd1\_waiting+cmd2\_waiting+cmd3\_waiting+in\_waiting\_1+in\_waiting\_2)/send\_speed;$$

用 PRISM 提供的 Rewards 结构可帮助计算此值,相应的 Rewards 结构如下:

```

rewards "time"
true:(cmd1_waiting+cmd2_waiting+cmd3_waiting+in_waiting_1+
in_waiting_2)/send_speed;
endrewards

```

## 5 实验过程与结果分析

实验主要测试了通信信道中消息的响应时间及消息的接收率,反映出了消息传输的实时性和消息到达的可靠性。

### 5.1 实验结果

图 4 为消息响应时间随消息产生速度变化的曲线图,图 5 为订阅者消息接收率随消息产生速度变化的情况。

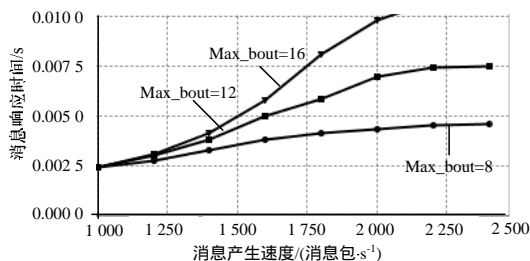


图 4 消息响应时间

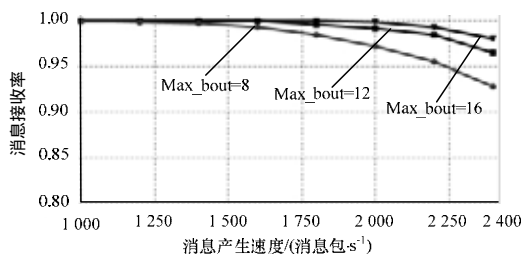


图 5 订阅者消息接收率

由图 4 可知,消息响应时间随消息产生速度的增加而增加,并且逐渐趋向于某一个值,而随着缓冲区的增大,响应时间也在增大。由图 5 可知,消息接收率随消息产生速度的增加而减小,随缓冲区的增大也呈现递减趋势。

### 5.2 实验结果分析

由实验结果可知,相对于某一个消息产生速度都能找出一个较优的缓冲区大小,为系统分配这样一个缓冲区将使得系统的丢包率和响应时间都处于较好的状况,而继续增加缓冲区大小并不能显著地提升系统的性能。通过多次实验,可以为各种系统找出它们所适应的缓冲区大小,为系统在实际应用中的设置提供理论参考值,有利于系统更好地分配资源。

系统的消息响应时间可以很好地反映系统的实时性能,而系统的丢包率可以反映出系统的可靠性。由实验结果可知,发布/订阅系统的消息响应时间随消息产生速度的变动率不大,这是因为消息被直接分发给各个订阅者,而不需要像客户/服务器模式那样经过服务器的处理再分发给各个客户。在控制好消息产生速度与缓冲区大小后,系统将可以较稳定地运行,实时性和可靠性都可以得到保证。

## 6 结束语

发布/订阅通信模式在通信领域占有重要的地位,它适用于计算机向实时、分布式发展的趋势,它在未来计算机领域将拥有更广阔的应用前景。本文运用成熟的队列理论,利用 PRISM 模型检测工具对发布/订阅模式进行了形式化分析,分析了其在实时性方面所表现出来的特性,对于改进发布/订阅模式的实时性具有一定的参考价值。

### 参考文献

- [1] Eugster P, Felber P, Guerraoui R. The Many Faces of Publish/Subscribe[J]. ACM Computing Survey, 2003, 35(2): 114-131.
- [2] Deng Gan, Xiong Ming, Gokhale A. Evaluating Real-time Publish/Subscribe Service Integration Approaches in QoS-enabled Component Middleware[C]//Proc. of the 10th IEEE International Symposium on Object-oriented Real-time Distributed Computing. Santorini Island, Greece: [s. n.], 2007.
- [3] Oh S, Pallickara S L. Cost Model and Adaptive Scheme for Publish/Subscribe Systems on Mobile Grid Environments[C]//Proc. of the 2nd International Workshop on Active and Programmable Grids Architectures and Components Computational Science. [S. l.]: Springer, 2005: 275-278.
- [4] Chang Wenkui, Hon S K. Evaluating the Performance of a Web Site via Queuing Theory[J]. Software Quality, 2006, 2349: 63-72.
- [5] Berczes T, Guta G, Kuspér G. Analyzing Web Server Performance Models with the Probabilistic Model Checker Prism[EB/OL]. (2008-11-14). <http://www.risc.jku.at/people/schreine/papers/TeT2008.pdf>.

编辑 任吉慧