

ARINC 659 背板数据总线协议初探

张喜民

(中国航空工业计算技术研究所,西安 710068)

摘要: ARINC 659 背板数据总线是一种高可靠的容错数据总线,是 ARINC 651 标准定义的综合模块化航空电子系统的关键组件。探讨了综合模块化航空电子系统对背板总线的要求,阐述了 ARINC 659 背板数据总线的体系结构、介质访问机制、同步机制、总线编码等,并对 ARINC 659 背板数据总线的确定性、容错性、编码特性、扩展性进行了深入分析。ARINC 659 背板数据总线支持时间和空间分区,具有完备的容错性能,对降低机架式综合模块化航空电子系统开发与认证风险有积极作用。

关键词: 航空电子系统; ARINC 659; 背板数据总线; 容错; 规范

中图分类号: V271.4; TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)03-0093-05

On Protocol of the ARINC 659 Backplane Data Bus

ZHANG Ximin

(Aeronautics Computing Technique Research Institute, Xi'an 710068, China)

Abstract: ARINC 659 backplane data bus is a fault tolerant cabinet backplane bus with high level reliability. It is a key component of the integrated modular avionics as defined in ARINC Report 651. The requirements of the integrated modular avionics to the backplane data bus are presented. The ARINC Specification 659 is expatiated, including the system architecture, the media access protocol, synchronization and bus coding. The analysis of the determinism, the fault tolerance and the coding characteristics are given. ARINC 659 supports robust time and space partition, and has perfect fault tolerant performance. It is of great benefit for the development and the certification of the integrated modular avionics.

Key words: avionic system; ARINC 659; backplane data bus; fault tolerance; specification

0 引言

随着电子技术、计算机技术的发展,航空电子系统结构发生了重大变革,综合模块化航空电子系统(Integrated Modular Avionics, IMA)被广泛采用^[1-3]。采用 IMA 可提高飞机的性能、可靠性、维修性,增强系统的灵活性,减小系统的重量、体积、功耗,布线的复杂性,降低系统维修和全寿命周期费用等^[4]。ARINC 659 背板数据总线(简称 ARINC 659 总线)是 ARINC 651 标准定义的 IMA 的关键组件^[5],它源于 Honeywell 公司的 SAFE-Bus™ 总线。1993 年,SAFEBus™ 总线被美国航空电子工程师协会(AEEC)采纳,作为标准发布:ARINC 659 背板数据总线规范。ARINC 659 总线是一种基于时间触发

架构的半双工串行数据通信总线^[5],总线拓扑为双-双冗余容错配置的线性多点结构,ARINC 659 总线时钟频率为 30 MHz,通信速率为 60 Mb/s,它支持鲁棒的时间分区和空间分区,具有容错性、高可用性和高完整性。

国外,ARINC 659 总线已用于波音 777 的飞机信息管理系统(Airplane Information Management System, AIMS)^[6-7],波音 717N、MD-10、KC-130 等飞机的 Versatile Integrated Avionics (VIA)系统^[8]和 NASA 下一代空间探索的 Highly Reliable Layered System 系统中^[9]。国内目前未见 ARINC 659 总线应用的报道。本文从 IMA 的要求出发,探讨了 IMA 对背板总线的要求,阐述了 ARINC 659 总线的主要工作机制,分析了 ARINC 659 总线的主要特性,希望有助于 ARINC 659 总线的应用推广和我国新型机架式 IMA 的开发。

1 综合化与背板总线要求

航空电子系统的综合化具有许多优点:降低系统的重量、体积、功耗,改善系统维修性,降低系统布线的

收稿日期:2011-12-29

修回日期:2012-02-27

基金项目:航空科学基金(20101931004);总装预研项目(513160403)

作者简介:张喜民(1973—),男,甘肃陇南人,博士,高工,研究方向为分布式计算技术、机载数据总线技术。

复杂性,降低系统全寿命周期费用等,但综合化在技术上存在着巨大挑战与风险。综合化分为物理综合与功能综合两种^[1],其中,功能综合是指通过信息与控制信号的交换把多个子系统任务互连起来^[1],是综合化的更高层次和核心,更具有风险与挑战性。功能综合的系统不仅需要高性能的微处理器,高密度的存储器和高性能的数据通信总线,更主要的是系统中多个子系统任务(“功能”)共享资源,增大了各“功能”互相影响的几率,可能导致不可预见的故障,由此增加了 IMA 开发与认证的复杂度^[5]。

为了解决“功能”间故障蔓延问题,降低 IMA 的开发与认证风险,分区技术被提出,即通过对共享的计算资源(时间)、存储资源(空间)的严格划分,实现在任何操作条件下各“功能”相互独立、互不影响,使 IMA 中每个“功能”的执行环境尽可能像分散的联合式航空电子系统^[3]。

背板总线是机架式 IMA 的基础框架,是关键的共享资源^[3,5]。为了支持航空电子系统的综合化,背板总

线要满足以下主要要求:1)支持鲁棒分区功能,具有空间和时间的隔离能力,便于系统综合与认证^[5];2)能高覆盖率地检测故障,能有效抑制故障蔓延,数据的高完整性不低于 $10^{-9}/h$ ^[3,10];3)支持冗余度配置,提供故障容错能力,具有高可用性;4)硬件逻辑和外部连线数量少、复杂性低、具有高可靠性;5)提供足够的有效数据通信吞吐量^[3];6)具有确定性通信能力,数据丢失、时延、抖动可预知,满足实时性要求。

2 ARINC 659 总线协议

2.1 体系结构

对应于 ISO/OSI 开放系统互连七层模型, ARINC 659 总线协议只定义了其中的物理层和数据链路层, ARINC 659 总线体系结构如图 1 所示,采用“双-双”冗余度配置的结构。机架式 IMA 的现场可更换模块(LRM)的 ARINC 659 总线接口成对配置,包括总线接口单元(Bus Interface Unit, BIU)、表存储器、模块内存储器、背板收发器和模块测试与维护接口(IEEE P1149.5)。

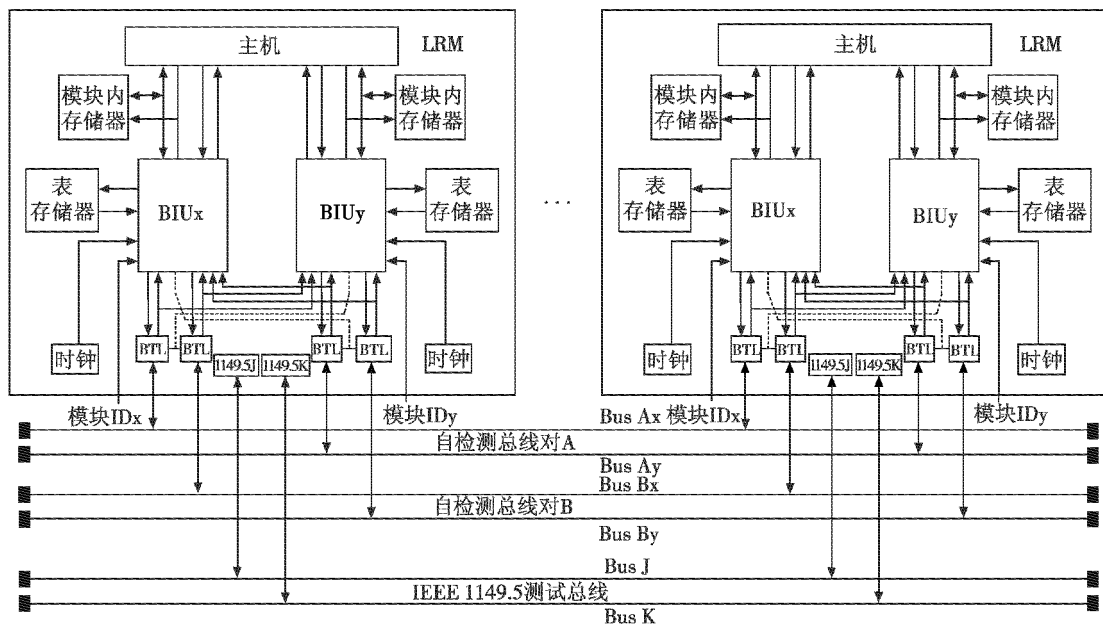


图 1 ARINC 659 总线体系结构

Fig. 1 ARINC 659 backplane data bus architecture

ARINC 659 总线也成对配置,包括两个自检总线对:A 总线对和 B 总线对, A 对和 B 对都有“x”和“y”两路总线, ARINC 659 总线共有 Ax、Ay、Bx 和 By 四路总线。BIUx 经 x 总线发送, BIUy 经 y 总线发送,每个 BIU 接收所有四路总线上的信号。四路总线使用独立的收发器,每路总线有 1 条时钟线和 2 条数据线,总线每时刻传输 2 位数据。

2.2 数据链路层协议

1) 介质访问。

ARINC 659 总线介质访问采用表驱动访问(Table

Driven Proportional Access, TDPA) 协议^[4]。如图 2 所示, ARINC 659 总线时间被预先划分为一系列窗口,窗口分为消息或空闲。消息窗口包含一个长度从 32 位到 8192 位的信息或者一个大约 5 位时长的同步脉冲,没有分配的总线时间段将为空闲。窗口间由时间间隔隔开。时间间隔参数可根据总线长度和机架中 LRM 的位置间隔设定。

ARINC 659 总线以周期帧形式工作,帧由窗口组成,帧的时长为各组成窗口长度之和。帧由帧描述语言(Frame Description Language, FDL)定义的指令表规

定,指令表定义了帧中每个窗口的长度以及各 LRM 在该窗口的总线操作(发送、接收或者忽略总线信号)。表存储器中可定义多个帧的指令表,帧间可互相切换。BIU 严格按照指令表进行总线操作。指令表由专用通道加载,软件出错和通信错误不会影响指令表^[5]。

2) 数据传输。

ARINC 659 总线有两种类型的消息完成数据传输功能:基本消息和主/后备消息。基本消息用于 LRM 到 LRM(点到点)的数据传输或单 LRM 到一组 LRM 的数据传输,基本消息的数据结构如图 2 所示。

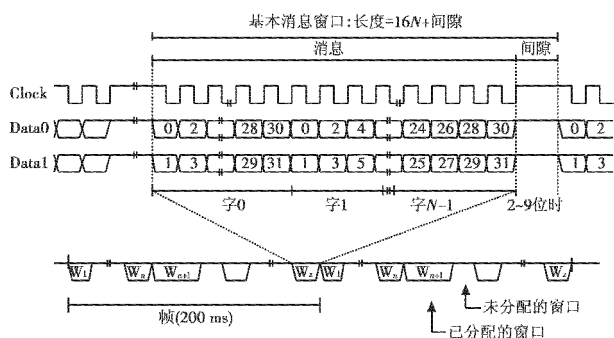


图 2 ARINC 659 总线介质访问机制

Fig. 2 ARINC 659 backplane data bus media access protocol

基本消息在窗口一开始就传输数据。主/后备消息用于 LRM 和其多个备用 LRM(最多 3 个)到单个或一组 LRM 的数据传输,主/后备消息的数据结构如图 3 所示。

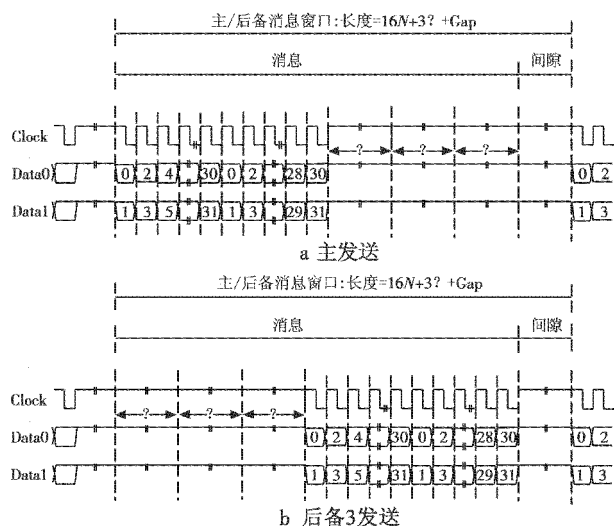


图 3 主/后备消息数据结构

Fig. 3 Master/shadow message structure

主/后备消息的发送采用一种简单的仲裁机制:只有当主 LRM 以及其他高优先级的后备 LRM 在预定的时间期间(n 个 Δ 位时)内保持静默时,低优先级的后备 LRM 才在该窗口的 $n \times \Delta$ 位时开始向总线发送数据。对于一个 ARINC 659 总线消息窗口,只有一个 LRM 在该窗口发送数据。

3) 时钟同步。

同步是 TDPA 协议实现的前提和关键。ARINC 659 总线采用 3 种独特的同步方式实现总线上各 BIU 的紧同步:“初始化同步”消息结构如图 4a 所示,用于在系统上电或由于“故障”引起整个总线失步时初始化总线;“短同步”消息结构如图 4b 所示,用于同步状态的 BIU 修正其时钟振荡器的漂移、维持总线上所有 BIU 间的紧同步;“长同步”消息结构如图 4c 所示,用于失去同步的 BIU 再次与总线同步。

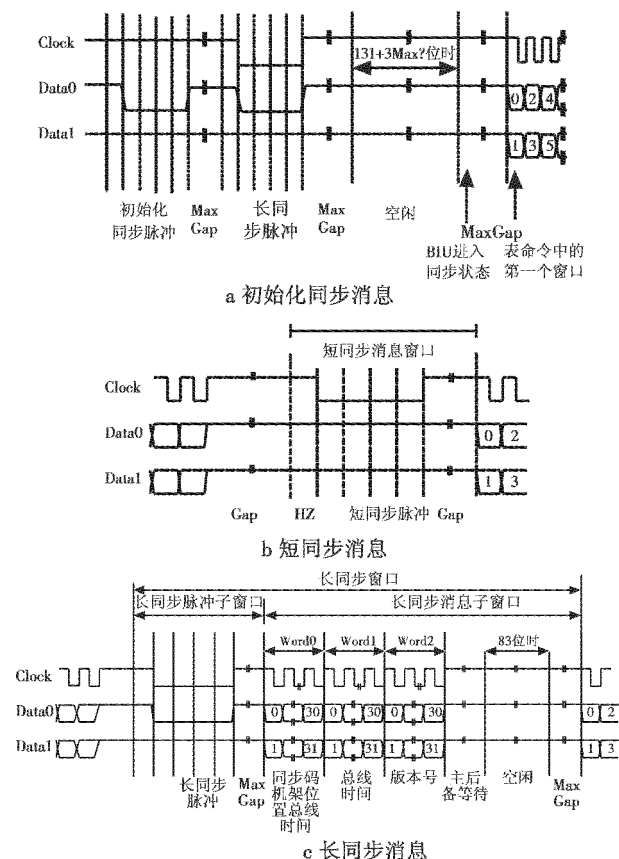


图 4 同步消息结构

Fig. 4 Synchronization message structure

相对于每个“短同步”消息窗口,所有表存储器中有相应的指令,所有处于同步状态的 BIU 在此窗口同时发送短同步脉冲信号。各同步状态的 BIU 根据背板传输逻辑(BTL)信号线上唯一线或信号的脉冲沿调整自己的时钟,实现 BIU 间的紧同步。ARINC 659 总线上的 BIU 间的同步误差小于两个位时(66 ns)。“长同步”消息分为两种:一种为切入同步;另一种为帧切换。同步状态的 BIU 执行指令表规定的帧切换消息操作可切换到表存储器中预编程的新帧。失步的 BIU 可根据两种同步消息中同步代码实现与总线的再次同步。“初始化同步”消息相当于同步代码为 0 的“长同步”消息,使初始化完成后进入非同步状态的 BIU 同步到初始帧的帧头。

2.3 物理层数据编码

ARINC 659 总线上传输的信息是有效数据,没有地址等信息头数据,数据的校验和纠错通过其独特的总线编码实现。ARINC 659 总线的 4 路总线同时传输相同的信息。但 4 路总线信号编码不同,编码规则如图 5 所示,具体如下^[13]:

1) Ax 总线的 Data0、Data1 信号,正常数据电平(总线上高电平表示逻辑“1”);

2) Ay 总线的 Data0、Data1 信号,正常数据与{010101...}异或(每隔一位翻转);

3) Bx 总线的 Data0、Data1 信号,数据电平翻转(总线上低电平表示逻辑“1”);

4) By 总线的 Data0、Data1 信号,正常数据与{101010...}异或(Ay 线翻转)。

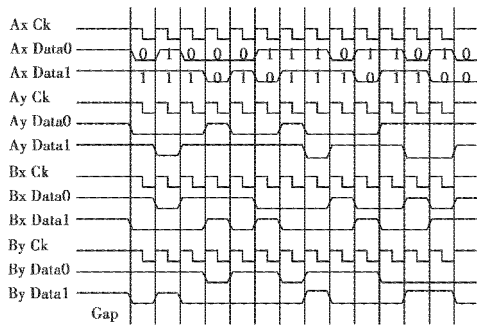


图 5 总线编码示例

Fig. 5 Bus encoding example

ARINC 659 总线的信号线介质可采用印制线或电缆,物理层规范对信号线的物理隔离、阻抗、容抗、感抗等电气特性有严格规定,保证信号的可靠传输。

3 ARINC 659 总线特性分析

3.1 确定性

ARINC 659 总线在时间和空间上提供鲁棒的分区,通过在指令表中规定总线操作时序和数据通信地址保证了时间确定性和空间的确定性。

指令表预先规定 ARINC 659 总线上各消息的发送数据和接收数据在内部存储器中的存放地址,实现了一“功能”通过一窗口传输数据到分离的指定存储空间,从而不影响其他功能在其他窗口传输的数据,保证了空间的确定性。此机制具有以下优点:1) 地址信息无需在总线传输,节省有限带宽;2) 便于主机对不同分区应用的数据进行保护;3) 为解决多处理器间存储器的强制鲁棒分区难题提供了很大便利^[5]。

ARINC 659 总线上的各 BIU 严格按照指令表进行总线操作,不会发生通信冲突,保证了时间的确定性。ARINC 659 总线指令表可预先嵌入自定义的中断指令,总线中断将代替系统硬件时钟中断^[3],处理器根据

此中断进行应用程序的调度,保证了任务执行的确定性。处理器还可利用此中断实现功能软件的执行和数据通信的同步。上述机制具有以下优点:1) 减少了消息延迟,输出结果产生后按照预先规定的时间传输,数据输出有更小的延迟抖动;2) 数据的传输预先确定,应用软件访问数据的时刻是确定的,没有必要使用双缓冲区防止数据丢失,可降低对缓冲区存取速度的要求;3) 便于系统范围内多分区“功能”的分配与调度。

3.2 容错性

ARINC 659 总线通过高故障检测覆盖、故障抑制和“双-双”余度配置实现了有效容错。

ARINC 659 总线的容错性具有以下特点:1) 所有事务采用双重互监控操作,同时在多点进行双重检测,故障检测率几乎为 100%^[6];2) 发送 BIU 对,从总线上检测自己实际发送的内容,有效抑制了“胡说”(babbling)的 LRM 发送信息^[5];3) 将来自不同硬件源的信号组合成 4 对(Ax = Ay、Bx = By、Ax = By、Bx = Ay),进行校验和纠错,总线能纠正一路故障并能检测出所有的两路故障,既达到故障-安全(fail-safe),又保证数据的高完整性;4) 总线接口提供与总线的“故障消极”(fail-passive)连接,即故障 BIU 脱离总线,便于整个综合化系统的容错重构。

ARINC 659 总线容错性优于传统的双余度,而复杂性小于传统的 4 余度^[5],是目前提供可靠性、完整性和余度等级最好的总线^[14]。

3.3 编码特性

ARINC 659 总线的信息编码效率很高,具有较高的通信吞吐量。除消息间隙和同步脉冲外,所有时钟周期均传输有效数据。航空电子应用产生的典型消息都比较短,对于短消息通信,大多数串行通信总线的编码效率较差,约为 10% ~ 30%^[3],而 ARINC 659 总线对于连续的 32 位消息流的信息编码高于 89%^[3,5]。虽然,ARINC 659 总线的通信速率为 60 Mb/s,但对于短消息,它实际通信容量高于 100 Mb/s 的以太网。

ARINC 659 总线的信号采用独有编码,具有以下特性:1) 对于所有数据传输,总线的平均直流和交流功耗恒定,利于供电电源的设计,对瞬态干扰具有很强的抗扰性;2) 提供了额外的故障检测能力,此编码机制可检测总线开路、短路(包括线到线短路)以及固定电平故障;3) B 总线对与 A 总线对信号反相、具有差分驱动特性,提供良好的 EMC 特性;4) 可防止长“1”或长“0”串导致的直流电平漂移而引发的抖动差错。ARINC 659 总线的专有信号编码的错误检测覆盖率高于 CRC 校验码^[3]。

3.4 复杂性与扩展性

ARINC 659 总线通过采用串行通信方式减少了总

线连线数、简化了数据处理所需逻辑,提高了可靠性。ARINC 659 总线信号线共 12 个,信号线引脚数目需求远小于同类的背板总线(如 PI 总线、PCI 总线等),这大幅度降低了布线复杂性,简化了全并发监控,也减少了对硬件的需求^[5]。ARINC 659 总线各接口都有同步的全局时钟,就消除了消息中用于锁相环的前文;采用双总线比较差错控制机制,消除了用于 CRC 和其他差错控制的字段,不仅减少消息结构的复杂性和硬件开销,还提高了通信效率^[10]。

ARINC 659 总线的通信速率具有一定扩展性。ARINC 659 总线物理层采用 IEEE 1194.1-1991 标准规定的背板传输逻辑(BTL)电气特性。BTL 适用于高速信号传输。BTL 实际最高传输速率主要取决于 LRM 的接入数目、LRM 的间隔、背板总线长度等相关物理特性的限制。在实验室条件下,42 英寸长的背板上,接入 10~15 个 LRM,ARINC 659 总线的时钟可提高到 50 MHz^[3],LRM 间可以 100 Mb/s 的速率进行通信。目前,ARINC 659 总线规范规定其时钟为 30 MHz。

4 结束语

随着技术的进步,航空电子系统将朝着更高综合化、更深模块化的方向发展,但是航空电子系统性能的提高不能牺牲高可靠性,任何 IMA 要被采用就必须证明其可靠性不低于它所替代的系统。特别是 IMA 要保证各功能间不存在无意的或未检测的故障影响。ARINC 659 总线通过确定性的时间空间分区、“双-双”冗余容错、专用信号编码等硬件机制满足这种要求,另外 ARINC 659 总线通信效率高、同步精度高、可扩展性强,应用 ARINC 659 总线能有效降低机架式 IMA 开发与认证的风险。波音 777 飞机的 AIMS 系统应用 ARINC 659 总线非常成功地实现了高度的功能综合化。ARINC 659 总线在新型航空电子、下一代空间飞行器、工业控制等

领域的安全关键系统中有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] RAMAKER R, KRUG W, PHEBUS W. Application of a civil integrated modular architecture to military transport aircraft [C]//The 26th Digital Avionics Systems Conference (DASC), IEEE, 2007; 2. A. 4-1-2. A. 4-10.
- [2] HOYME K, DRISCOLL K. SAFEbusTM [J]. IEEE AES Systems Magazine, 1993, 8(3): 34-39.
- [3] 张喜民,魏婷. ARINC 659 容错数据总线测试验证系统研制[J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38(6): 140-145.
- [4] Airlines Electronic Engineering Committee. ARINC report 651-1: Design guidance for integrated modular avionics [S]. USA: Aeronautical Radio, INC, 1999.
- [5] Airlines Electronic Engineering Committee. ARINC 659 specification 659 backplane data bus [S]. USA Aeronautical Radio, INC, 1993.
- [6] WITWER B. Systems integration of the 777 airplane information management system (AIMS) [J]. IEEE AES Systems Magazine, 1996, 11(4): 17-21.
- [7] PELTON S L. Boeing systems engineering experiences from the 777 AIMS program [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(2): 642-648.
- [8] STURDY J. An innovative commercial avionics architecture military tanker /transport platforms [J]. IEEE AES Systems Magazine, 2000, 15(7): 33-39.
- [9] BLACK R, FLETCHER M. Next generation space avionics: A highly reliable layered system implementation [J]. IEEE AES Systems Magazine, 2005, 20(12): 9-14.
- [10] RUSHBY J. CSL technical report: A comparison of bus architectures for safety critical embedded systems [R]. SRI International, Menlo Park, California, 2003.
- [6] SU A J, CHOFFNES D R, KUZMANOVIC A, et al. Drafting behind akamai (travelocity-based detouring) [C]//Proceedings of the Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM), ACM, 2006: 435-446.
- [7] CARLSSON N, EAGER D L. Server selection in large-scale video-on-demand systems [J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMCCAP), 2010, 6: 1-26.
- [8] LIU L, LU Y. Dynamic traffic controls for web-server networks [J]. Computer Networks, 2004, 45: 523-536.
- [9] CAI L, YE J, PAN J, et al. Dynamic server selection using fuzzy inference in content distribution networks [J]. Computer Communications, 2006, 29: 1026-1038.
- [10] Zongming FEI, AMMAR M H, ZEGURA E W. Optimal allocation of clients to replicated multicast servers [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Network Protocols (ICNP), IEEE, 1999: 69-76.
- [11] GIVAN R, LEACH S, DEAN T. Bounded-parameter Markov decision processes [J]. Artificial Intelligence, 2000, 122: 71-109.

(上接第 83 页)