

# LEO/MEO 卫星网络动态多径路由协议

唐 剑<sup>1,2</sup> 余春东<sup>3</sup> 徐志明<sup>1</sup>

(中国科学院光电研究院 北京 100080)<sup>1</sup> (中国科学院研究生院 北京 100049)<sup>2</sup>

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)<sup>3</sup>

**摘 要** 针对 LEO/MEO 卫星网络的特点,提出了快速、自重构且支持多径的空间信息网络路由协议,并进行了仿真和性能分析。该协议不仅大大降低了端到端路由建立的时间,同时多径路由也为实现网络可靠性传输、负载均衡等提供了条件。

**关键词** 空间信息网络,路由协议,扩散机制,多径

**中图分类号** TN927 **文献标识码** A

## Dynamic Multi-path Routing Protocol for LEO/MEO Satellite Networks

TANG Jian<sup>1,2</sup> SHE Chun-dong<sup>3</sup> XU Zhi-ming<sup>1</sup>

(Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)<sup>1</sup>

(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)<sup>2</sup>

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)<sup>3</sup>

**Abstract** According to the characteristic of LEO/MEO satellite constellation, a rapid and reconstructable routing protocol was proposed. At the same time, the model of the algorithm was simulated and features were analyzed. This protocol not only reduces the duration for end-to-end path establishment significantly, but also the multi-path capability provides the flexibility for reliable transmission and load balance in satellite networks.

**Keywords** Spatial information networks, Routing protocol, Diffusion mechanism, Multi-path

随着通信技术的不断发展,卫星通信因其特有的优势成为地面各种传输手段必不可少的支持和补充,利用星间链路 ISL 进行组网的中、低轨道卫星可以为地面用户提供方便快捷的全球性通信服务,成为未来卫星通信的重要发展方向。目前,较为通用的路由算法依赖于卫星运行的周期性和可预知性<sup>[1]</sup>,绝大多数或者全部的路由计算都是在离线的状态下事先计算好的,但也导致了在某些特殊情况下,卫星可能因各种原因而没能遵守事先的规律,如敌方干扰攻击或出现故障等,这种情况下卫星网络的拓扑将出现无法预料的变化。此时,离线算法由于依赖于规律性,不能对网络拓扑进行探测,因此无法绕开故障链路,快速建立新的链路,从而导致连接中断和数据丢失,网络性能显著下降。

基于自组织重构的思想<sup>[2]</sup>,本文提出了一种基于扩散机制的动态的多径路由协议 DMRP(Dynamic Multi-path Routing Protocol),针对以往的路由协议自适应能力差的缺点,该协议的动态性不仅大大降低了端到端路由建立的时间,同时多径能力也为实现网络可靠传输、负载均衡提供了条件。

## 1 DMRP 协议

LEO/MEO 双层卫星网络动态多径路由协议是由源节点

来发起路由的按需路由算法。协议的主要运行机制分为探测机制和应答机制,借鉴自组织重构的路由协议的思想,协议不要求节点知道整个网络的拓扑结构,只需要感知其与邻居节点之间的连接状态就可以建立起路由,从而缩短了协议收敛时间,并提高了协议运行效率。

### 1.1 双层星座结构

LEO/MEO 星座中,借鉴 Akyildiz 等人提出的一种基于分层分群结构的多层卫星网及多层卫星网络路由 MLSR(Multilayered Satellite networks Routing)算法<sup>[3,4]</sup>,将低轨卫星分成“群”,对中轨来说,一个 LEO 群就相当于一个节点,从而减少了网络中的数据交换,减轻了计算量及网络的通信负担。每颗 LEO 卫星  $i$  除与同轨道前后相邻的卫星、相邻轨道左右相邻的卫星相连接之外,还要根据一定的接入策略被某颗 MEO 卫星所覆盖,如图 1 所示,与同一个 MEO 卫星相连的 LEO 卫星组成一个 LEO 群,而该 MEO 卫星将覆盖此 LEO 群。

在双层星座中,一颗 MEO 卫星要覆盖多颗 LEO 卫星,即一个 MEO 节点有多个 LEO 邻居节点,且随着时间的变化,邻居节点的个数在不断地变化。这一特点增加了路由探测过程的复杂度,导致路由探测报文个数的显著增加。因此,

到稿日期:2008-12-04 返修日期:2009-08-05 本文受国家高技术研究发展计划(863)(No. 2008AA01Z208, 2008AA021103),国家自然科学基金(No. 60772150)资助。

唐 剑(1981-),男,博士生,主要研究方向为空间信息网和无线通信, E-mail: jian\_tang@126.com; 余春东(1971-),男,教授,主要研究方向为无线通信与数据挖掘; 徐志明(1971-),男,博士生,主要研究方向为网络体系结构。

路由协议应充分针对此特点进行设计,在不影响性能的前提下,不给网络带来过多额外的负担。

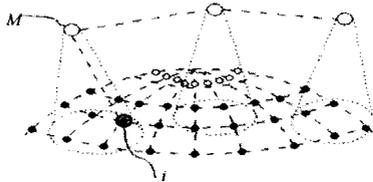


图1 LEO/MEO星座结构示意图

## 1.2 路由更新机制

同地面网络相比,卫星网络路由协议的更新要复杂得多。地面网络相对固定,网络拓扑结构变化很小,因此,路由更新频率较小。然而,对卫星网络而言,其路由更新频率要大得多,这是由卫星的高速运动导致的<sup>[5]</sup>,在DMRP协议中,为了提高协议的收敛速度,路由将在以下两种情况下更新:

(1) 链路失效:一旦节点*i*检测到链路失效,它就会向源节点发送 *failure* 报文,无论此时是否正在传输数据包。源节点收到 *failure* 报文后,就会将路由表中相应的路由信息删除。

(2) 周期更新:为了使节点路由信息保持相对准确,DMRP协议采取一种周期更新的策略。每个卫星节点保持一个 *alive* 计时器。一旦 *alive* 超时,节点就清空路由表。如果此时,仍然有数据要发送,则重新启动路由探测过程去建立新的路由。

## 1.3 路由寻径

当路由更新启动后,*S*向它所有的邻居节点(包括LEO节点和MEO节点)广播一个探测报文。*S*维持一个 *Timeout* 计时器,如果网络发生拥塞或链路失效,在 *Timeout* 时间内,*S*没有收到 *T*的应答信息,那么它将发起一次新的探测。当邻居节点 *N* 接收到探测报文后做如下处理:

1) 如果 *N* 是LEO节点( $N=i$ ),则 *N* 按照如下的方法处理探测报文:记录发送该报文的邻居节点  $N_k (1 \leq k \leq 4)$  以及接收到该报文的时刻  $t_{det action}^i$ ;如果  $N \neq T$  且 *N* 是第一次收到探测报文,则 *N* 将该探测报文继续广播给它的邻居节点;如果  $N \neq T$  但 *N* 不是第一次收到探测报文,则 *N* 将丢弃该探测报文;如果  $N=T$ ,它将启动应答过程。

2) 如果 *N* 是MEO节点( $N=M$ ),则 *N* 按照如下的方法处理探测报文:记录发送该报文的邻居节点以及接收到该报文的时刻  $t_{det action}^M$ ,如果 *N* 是第一次收到探测报文,则 *N* 将判断 *T* 是否在覆盖区域内,若 *N* 覆盖 *T*,如图2(a)所示,那么 *N* 将该探测报文直接发送给 *T*;若 *N* 不覆盖 *T*,如图2(b)所示,则 *N* 只将该探测报文发送给其MEO邻居节点  $M'$ 。

3) 每个节点都按上述机制将探测报文依次传递下去,直到 *T* 收到探测报文。

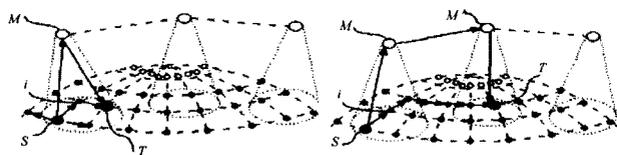


图2 路由正向探测过程  
(a) 双层星座路由探测过程 (源和目的在同一个MEO分组中)  
(b) 双层星座路由探测过程 (源和目的在不同的MEO分组中)

图2 路由正向探测过程

当 *T* 接收到探测报文后启动应答过程,建立一条到 *S* 的

当前业务下的最优路径。同时也会选择一条备选路径,这样做是考虑到负载均衡以及可靠性传输,源和目的间的数据可以在多条路径上发送并降低丢包率。选择一条与最优路径有交叉的备选路径,能在一定程度上满足负载均衡和可靠性传输,又在地理上紧邻最优路径。主路径主要通过MEO节点进行传送数据,备选路径则只通过LEO节点传送数据。这样,可以保证在MEO节点失效的情况下,源和目的还可以通过备选路径进行数据传输。

完整的过程如图3所示,将分别建立以MEO节点为主的主路径和以LEO节点为主的备选路径。

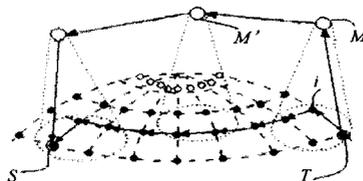


图3 路由应答过程

1) 主路径的建立:节点 *T* 向管理其所在群的MEO节点 *M* 发送一个 *primary* 应答报文。当节点 *M* 接收到 *primary* 报文后将向它的最优MEO邻居节点  $M'$  发送此报文,根据之前正向探测所记录的  $t_{det action}^M$ ,  $M'$  是距离 *T* 最近的邻居节点,当且仅当:  $t_{det action}^{M'} = \min\{t_{det action}^M\}$ , 因为节点接收探测报文的时刻越小,它距离当前节点越近。  $M'$  接到报文后将判断 *S* 是否在覆盖区域内,若  $M'$  覆盖 *S*, 那么  $M'$  将 *primary* 报文直接发送给 *S*; 若  $M'$  不覆盖 *S*, 则  $M'$  将 *primary* 报文发送给下一个最优MEO邻居节点。

2) 备选路径的建立: *S* 向其最优的LEO邻居节点 *i* 发送一个 *alternative* 应答报文, *i* 是距离 *S* 最近的LEO邻居节点,当且仅当:  $t_{det action}^i = \min\{t_{det action}^i\}$ 。某LEO节点 *K* 接收到应答报文后,记录下发送该报文的邻居节点以及收到该报文的时刻  $t_{det action}^k$ , 当  $k \neq S$  时, *k* 将该 *alternative* 报文发送给最近的LEO邻居节点 *l*; 当  $k=S$  时, *S* 到 *T* 的最优路径建立完毕。

## 1.4 数据通信过程

*S* 收到应答信息后,就建立起从 *S* 到 *T* 的路由,路由协议的寻径过程结束。*S* 首先沿着最优路径发送数据。如果在发送数据时最优路径失效, *i* 首先会检查自身的路由表,看是否存在一条到 *T* 的备选路径,如果存在, *i* 将此数据包沿该备选路径发送出去,如果不存在, *i* 将数据包丢弃。 *i* 处理完该数据包后,发送一个 *failure* 报文给 *S*, 通知 *S* 最优路径失效。*S* 收到 *failure* 报文后将使用备选路径发送其余的数据。如果备选路径也失效,那么 *S* 需要重新路由。

这只是备选路径的一种使用方法。为了达到负载均衡, *S* 可以将要发送的数据分成两部分,分别从最优路径和备选路径发送出去;为了提高可靠性传输, *S* 可以将一个数据包的两个拷贝分别从两条路径上发送出去。因此,对于备选路径的使用方法是灵活的。可以视不同的业务类型及需求而采取不同的策略。

## 2 仿真结果分析

仿真所用星座方案参数如表1所列。

表 1 双层极轨星座 LEO6x8/MEO2x4 的基本参数

状态	功能描述
LEO 星座卫星轨道平面个数	6(个)
LEO 星座每个轨道内卫星的数目	8(颗)
LEO 星座的卫星运行角速度	$2\pi/6627$ (弧度/秒)
LEO 星座卫星轨道的倾角	$90^\circ$
LEO 星座卫星轨道的高度	1248(千米)
LEO 星座的运行周期	6627(秒)
LEO 极区范围的纬度	$70^\circ$
MEO 星座卫星轨道平面个数	2(个)
MEO 星座每个轨道内卫星的数目	4(颗)
MEO 星座的卫星运行角速度	$2\pi/18978$ (弧度/秒)
MEO 星座卫星轨道的倾角	$90^\circ$
MEO 星座卫星轨道的高度	9000(千米)
MEO 星座的运行周期	18978(秒)

初始拓扑结构及节点分布如图 4 所示。

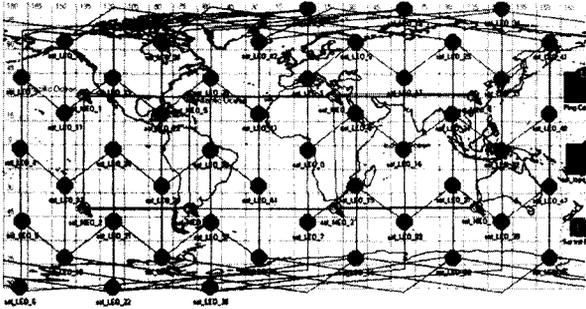


图 4 双层极轨星座 LEO6x8/MEO2x4 初始拓扑结构

为了验证 DMRP 协议的性能,将在仿真环境中考察以下几个指标:

1) 路由收敛速度:路由收敛速度反映网络变化后路由协议重新计算最优路径所需要的时间。由于卫星的快速移动会带来网络拓扑的剧烈变化,如果网络路由收敛速度慢于拓扑变化速度,那么路由协议实际上完全无效。因此在卫星网络中,路由收敛速度是重要的研究参数。

2) 端到端时延:即网络收发一个完整报文或一段信息的时间。端到端时延被分为 3 个主要部分:处理时延,传输时延和传播时延。传播时延与链路固有性质有关;传输时延与数据包长度、数目和传输带宽有关;处理时延与网络设备处理性能、数据包排队时间、转发时间、存储时间等参数有关。传播时延为链路特性所决定,无法改变。传输时延和处理时延可通过采取合理的技术和协议尽可能地降低。

3) 丢包率:即传输中所丢失数据包数量占所发送数据包的比率。造成网络丢包的因素主要有:网络传输中丢包;网络拥塞时网关设备主动丢包;发生错误丢包。本文主要考虑网络传输中丢包,特别是在传输过程中由于网络拓扑结构发生变化而导致当前路径失效的情况下,考察网络的丢包率。

为了简单而又不失一般性,在仿真中,仅选取一对业务。仿真时间为 6 个小时。仿真时间的选取要稍大于星座的周期,从而可以较完整地得到协议在一个周期内的运行结果。

源端 S 发起路由探测后,只要收到目的端 T 的应答,就立即发送数据,不需要等到获得全网的拓扑信息,建立起全网的路由表后再发送数据。因此,收敛时间实际上就是建立起从 S 到 T 的路径所需要的时间。这个时间要远远小于建立全局路由表所需要的时间。图 5 给出了 DMRP 协议的收敛时间。

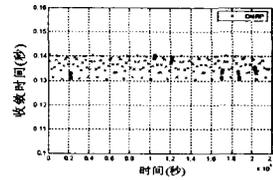


图 5 双层极轨星座中 DMRP 协议收敛时间

图 6 和图 7 给出应用服务所关心的两个典型性能指标——端到端时延和丢包率的仿真结果,DMRP 协议是以“时延最小”作为选路标准,因此,端到端时延在一定程度上反映了路由选择的正确与否。如果以  $RTT$  表示源、目的间的往返时延,那么单向端到端时延就是  $RTT/2$ 。如果在数据传输过程中由于某种原因导致重新路由,那么在计算数据包端到端时延的时候,还要加上路由的时间  $RTT$ ,因此总的时延就是  $RTT+RTT/2$ ,为正常状态下时延的 3 倍。如图 6 所示,在本文采用的星座结构中,时延主要分布在 80 毫秒左右。图 6 中还有一些较为集中的“离群点”,它们的时延值大多分布在 200 毫秒左右。产生“离群点”的时刻就是重新路由的时刻,“离群点”的值约为正常值的 3 倍。仿真结果符合理论分析,证明 DMRP 协议选择的路径是正确且符合规律的。

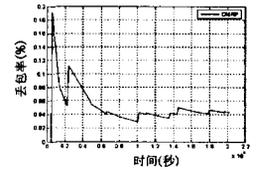
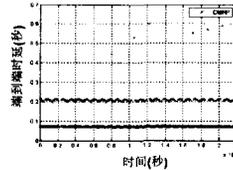


图 6 双层极轨星座中 DMRP 协议端到端时延 图 7 双层极轨星座中 DMRP 协议丢包率

仿真结果符合理论分析,证明 DMRP 协议选择的路径是正确的。同其他现有的常用双层星座路由协议相比,在大部分时间内,DMRP 协议的表现更具有规律性。

结束语 本文提出了一种适用于 LEO/MEO 双层卫星网络的动态多径路由协议 DMRP,针对普通离线协议过于依赖卫星运动的规律性而导致自适应能力差的特点,该协议运用了自组织网络的思想,协议不要求节点知道整个网络的拓扑结构,只需要感知其与邻居节点之间的连接状态就可以建立起路由,经过扩展,还可以在一路由探测过程中,建立源节点到网络中所有其它节点的路由。对源节点同时发起多个连接,可大大减少路由开销,从而可有效地缩短协议收敛时间,提高协议运行效率。该协议在系统仿真中体现了较好的时延性能,有较快的收敛速度且易于实现。

### 参考文献

[1] 余春东,王俊峰,刘立祥,等. Walker 星座卫星网络拓扑结构动态性分析[J]. 通信学报,2006,27(8):45-51

[2] Royer E M,Toh C K. A review of current routing protocols for ad-hoc mobile networks[J]. IEEE Personal Communications, 1999,6(2):46-55

[3] Akyildiz I F,Ekici E,Benderm D. MLSP: A Novel Routing Algorithm for Multilayered Satellite IP Networks[J]. IEEE /ACM Transactions On Networking,2002,10(3):411-424

[4] Chen C,Ekici E,Akyildiz I F. Satellite Grouping and Routing Protocol for LEO/MEO Satellite IP Networks[C]// WoW-MOM'02. 2002:109-116

- [5] Wang Junfeng, Zhou Mingtian, Li Lei. Topological dynamics characterization for LEO satellite networks. Elsevier Science [J]. Computer Networks, 2007, 51(1): 43-53
- [6] Wang Junfeng, Hu Yuemei, Zhou Hongxia, et al. Topological

- Dynamics Characterization for Layered Satellite Networks[C] // Proceedings of IEEE IPCCC 06. Phoenix, Arizona, USA, 2006
- [7] 张民, 罗光春, 王俊峰, 等. 空间信息网络可靠传输协议研究[J]. 通信学报, 2008, 29(6): 63-68

(上接第 26 页)

步中, 神经学习与代谢控制也是互为反馈的过程。人工神经网络控制代谢因子(平衡因子和抑制因子)的训练过程, 而代谢又影响神经学习的进度和权值的更新速率。需要说明的是, 为了与真实的生理现象更好地吻合, 这些互为反馈进程的智能算法并不一定代表同一个对象。举例而言, 控制代谢过程 A 的训练可能由神经网络 B 完成, 而该代谢过程 A 所影响的神经学习的参数又可能是神经网络 C 的参数, 而不一定是神经网络 B 的参数。

#### 4 多元智能算法的切换和集成

智能算法的多元化意味着算法复杂度的上升, 同时也意味着编程难度和软件潜在故障率的上升。因此在通常情况下, 不是所有的算法都需要用到的。算法设计者完全可以根据优化目标的需要和自身成本的评估来选择单一算法和若干算法的组合<sup>[21]</sup>。在很多情况下不会将本文所罗列的算法全部用到。这其中可以通过“算法开关”对控制对象进行变算法选择和集成, 通过算法的切换达到降低系统复杂度的目的<sup>[22]</sup>。这种思想也就是“软件模块化”思想的最好体现。其切换示意图如图 3 所示。

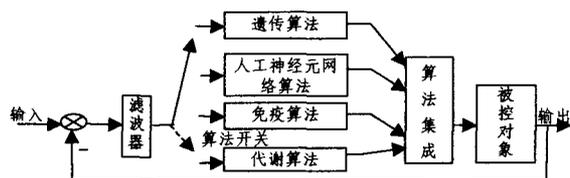


图 3 算法切换与集成示意图

滤波器根据需要对信号进行相关处理。通过性能指标的要求和各算法自身的特性选择合适的算法。选择过程由“算法开关”的程序实现。再对选择好的算法进行集成处理, 确立参数之间的相互关系, 对被控对象进行优化控制。

**结束语** 多元算法集成的思想很早就有相关的研究成果。随着人工智能科学的深入发展, 对智能控制的研究已演变成器官层次、细胞层次与分子层次递阶控制的模式。而随着对反应的催化机理的研究深入, 传统的智能算法已不再单纯是由人工设定参数的模式, 而逐渐变成由智能机制来进行自适应寻优的轨道。这意味着提高了人工智能与外界环境的交互性和自主性, 使得人工智能向智能化的方向又迈进了一步。但需要指出的是, 这种算法设计模式增加了系统的复杂性, 使系统故障概率提高, 同时提高了控制系统的设计成本。是否采用多元智能算法及如何采用多元智能算法, 需要根据系统性能要求和设计精度进行相关的评估。

拟人化控制是智能控制的发展趋势。如何实现控制指标和运行成本之间的协调, 将是智能控制需着重研究的课题。

#### 参考文献

- [1] 蔡自兴, 徐光佑. 人工智能及其应用(第 2 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996
- [2] 陈国良, 王煦法, 庄镇泉, 等. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996
- [3] 王凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003
- [4] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001
- [5] 肖人彬, 王磊. 人工免疫系统: 原理、模型、分析与展望[J]. 计算机学报, 2002, 25(2): 1281-1293
- [6] 焦李成, 杜海峰, 刘芳, 等. 免疫优化计算、学习与识别[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- [7] 张蓓. 代谢工程[M]. 天津: 天津大学出版社, 2003
- [8] 张纪会, 高齐圣, 徐心和. 自适应蚁群算法[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(1): 1-4
- [9] 孙新宇, 万筱宁, 孙林岩. 蚁群算法在混流装配线调度问题中的应用[J]. 信息与控制, 2002, 31(6): 486-490
- [10] 孟伟, 韩学东, 洪炳镛. 蜜蜂进化型遗传算法[J]. 电子学报, 2006, 34(7): 1294-1300
- [11] 阎志华, 丁秋林. 基于蜂群算法的车间作业调度研究[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(10): 1150-1152
- [12] 阎志华, 丁秋林. 用蜂群算法实现动态作业车间调度[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004, 2: 47-50
- [13] 王煦法, 张显俊, 曹先斌, 等. 一种基于免疫原理的遗传算法[J]. 小型微型计算机系统, 1999, 20(2): 117-120
- [14] Perrone G, Diega La N S. Fuzzy methods for analyzing fuzzy production environment[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 1998, 14: 465-474
- [15] Zeigler B P, Moon Y, Lopes V L, et al. DEVS Approximation of Infiltration Using Genetic Algorithm Optimization of a Fuzzy System[J]. MathL. Comput. Modelling, 1996, 23(11/12): 215-228
- [16] 胡汉平, 吴晓刚, 李德华, 等. 基于遗传算法的模糊控制系统[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 123-125
- [17] 丁永生, 任立红. 一种新颖的模糊自调整免疫反馈控制系统[J]. 控制与决策, 2000, 15(4): 443-446
- [18] 徐宁, 李春光, 张健, 等. 几种现代优化算法的比较研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(12): 100-103
- [19] 杨建国, 丁慧敏, 李蓓智. 解决多目标 Flow-shop 问题的生物免疫调度算法[J]. 机械设计与研究, 2002, 18(4): 28-30
- [20] Marangoni A G. 酶催化动力学-方法与应用[M]. 赵裕蓉, 张鹏, 译. 北京: 化学工业出版社, 2007
- [21] 张晓东, 严洪森. 一类 Job-shop 车间生产计划和调度的集成优化[J]. 控制与决策, 2003, 18(5): 581-584
- [22] 许华虎, 毛哲文, 林财兴, 等. CIMS 环境下网络综合管理的研究[J]. 小型微型计算机系统, 2003, 24(10): 1735-173