

多卫星—地面站系统的 Petri 网模型研究

王远振^{1,2}, 赵 坚², 聂 成¹

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 总装备部航天装备总体研究发展中心, 北京 100094)

摘 要:提出一种新的扩展 Petri 网模型——时间约束着色 Petri 网, 并对其进行了研究。然后, 在对多卫星—地面站系统中的服务类型、资源类型及性能、设备调度规则等进行分析的基础上, 建立了多卫星—地面站设备调度的时间约束着色 Petri 网模型, 为整个星地系统的动态性能分析、设备配置方案优化提供了方法途径。

关键词: 卫星; Petri 网; 着色 Petri 网; 调度策略

中图分类号: V474; T9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2003)02-0007-05

随着航天技术和应用的发展, 越来越多的长寿命航天器同时在轨运行使得为其提供测控和数据接收支持服务的地面站设备的负担越来越繁重。在这种情况下, 根据卫星的需求对地面站设备资源进行效能评价、配置优化、统筹规划, 是十分必要的。为此, 要建立多卫星—地面站这一星地系统运行的模型。

1 多卫星—地面站支持服务系统

卫星—地面站这一星地系统的元素包括: 若干颗按自己的轨道运行的卫星; 若干地理上分布的卫星地面站; 配置于各地面站的不同类型的地面设备若干套。

这些卫星的应用目的不同, 因此它们申请服务的类型(测控和数据接收)和服务时间长度不同。同时由于这些卫星各自按照不同的轨道运行, 因此它们过各地面站的时间长度和进入时刻不同, 即各地面站对不同卫星的可视时间和可视时刻不同。关于各地面站对各卫星的可视时间可根据卫星轨道和地面站位置通过解析计算或仿真计算得到。本文中将卫星申请服务的类型、时间长度以及地面站对卫星的可视时间等视为整个星地系统运行模型的已知输入条件。配置于各地面站的不同类型的地面设备, 在无故障或故障修复后, 在满足对卫星可视的条件下可以向申请相应类型服务的卫星提供服务, 直至服务申请得到满足或设备不再满足对卫星的可视条件, 或根据设备对卫星的服务规则需要中止对该卫星的服务而为更高优先级的卫星提供服务, 不考虑设备在服务过程中发生故障的情况。

在多颗卫星地面站设备的调度过程中存在以下几种情况:

- 1) 并发, 不同类型的服务申请之间没有时间上的先后之分和资源的共享存在, 因此对它们的服务可以由相应类型的设备同时提供、发生;
- 2) 冲突, 若干任务在申请同一设备时, 由于申请的服务时间有重叠而产生的设备冲突;
- 3) 竞争, 若干设备在某一卫星过境的同一圈次内都具备对该卫星的一个任务申请提供服务的能力。

在调度过程中, 对于并发的情况只要按照任务到达的时间先后顺序依次进行即可, 不需要特殊的调度策略去解决, 但对于冲突和竞争两种情况都需要有相应的解决策略来排除冲突和竞争。

对于冲突采取如下的解决策略:

收稿日期: 2002-07-02

基金项目: 国家“863”高技术(863-701-Z99-02)、国防预研基金(11301-01-01)资助项目

作者简介: 王远振(1975-), 男, 安徽宿州人, 博士生, 主要从事军事优化理论与作战决策分析研究;

赵 坚(1964-), 男, 四川通江人, 高级工程师, 国家“863-701”主题专家组专家, 主要从事航天装备总体与发展战略研究;

聂 成(1942-), 男, 安徽淮南人, 教授, 博士生导师, 主要从事军事优化理论与作战决策分析研究。

1) 优先级原则,即调度开始前为每类卫星的每种服务申请评定一个优先级,当发生设备冲突时,按优先级顺序从高到低依次进行任务调度;

2) 当同优先级任务发生冲突时,先对服务柔性差的任务申请进行调度。

对于竞争采取如下的解决策略:

1) 若存在能够提供满意服务的设备,则为当前任务申请选择最能满意为其提供服务的设备;

2) 否则,在这些设备中,按卫星过设备所在站的先后顺序依次提供服务。

2 Petri 网

Petri 网以研究系统模型的组织结构和动态行为为目标,按照同数学规划模型、排队论方法等常用方法比较,采用 Petri 模型具有以下特点:

1) Petri 模型与工程实际情况最为接近,可直接反映出系统中的并发、资源共享冲突、调度规则等对系统特性的影响,所需假设条件较少;

2) 分析结果可信度高,直观性强,利于决策者与一般工程技术人员理解和模型正确性的确认与验证;

3) 所建模型可操作性强,至少可获得一个满意解。采用数学规划模型,当问题规模可能太大时无法求出可行解。排队网络模型虽可能求出解析解,但模型条件苛刻,难以反映实际;

4) 运行模型获得分析信息多,可以通过仿真统计分析出所需的多种系统信息。

2.1 基本 Petri 网

基本 Petri 网可以表示为六元组 $\Sigma = (P, T, F, K, W, M_0)$, 其中三元组 $N = (P, T, F)$ 构成了 Petri 网的静态结构, (K, W, M_0) 包含了 Petri 网的动态特征,各元素的含义、定义及要满足的条件详见文献[1][4]。

2.2 时间约束 Petri 网(Timing Constraint Petri nets)

时间约束 Petri 网是一个七元组 $TCPN = (\Sigma, LT)$, 其中六元组 Σ 是前面定义的基本 Petri 网。 $LT: P \cup T \rightarrow (R^+ \cup \{0\}) \times (R^+ \cup \{0\}) \times (R^+ \cup \{0\})$, $LT(pt) = (T_{\min}(pt), (T_{\max}(pt)), (T_{\text{dur}}(pt)))$ 是一个三维向量,称为网 TCRN 的时间约束函数。当 $pt \in P$, 如果 pt 的令牌到达时刻为 $T_{\text{tokenarr}}(pt)$, $LT(pt)$ 表示库所 pt 的输出变迁 t 只能在 $(T_{\text{tokenarr}}(pt) + T_{\min}(pt), T_{\text{tokenarr}}(pt) + T_{\max}(pt))$ 内实施且必须在其期间实施结束, $T_{\text{dur}}(pt)$ 表示库所 pt 的输出变迁的执行时间;当 $pt \in T$, $T_{\min}(pt)$ 表示 pt 的相对最早触发时刻,即开始时间, $T_{\max}(pt)$ 表示 pt 的相对最迟结束时刻,即截止时间, $T_{\text{dur}}(pt)$ 表示 pt 的执行时间。

TCPN 既具有基本 Petri 网的理论基础,又具有自身特有的时间约束能力,这使得 TCPN 的使能变迁可实施也可不实施。这就产生了 TCPN 的可调度分析问题,文献[1]给出了其可调度分析。

2.3 着色 Petri 网(Colored Petri nets)

着色 Petri 网在基本 Petri 网的基础上增加表示令牌和变迁颜色的颜色集,同时将基本 Petri 网中弧权函数 W 变为着色 Petri 网的输入函数 I_- 和输出函数 I_+ 。因此其定义是如下的一个七元组 $ColPN = (P, T, F, C, I_-, I_+, M_0)$, 其中 P, T, F 同基本 Petri 网中的定义, C 是 $P \cup T$ 上的颜色集合,对于 $p \in P$, $C(p)$ 是 p 上所有可能的令牌颜色之集合,对于 $t \in T$, $C(t)$ 是 t 上所有可能的出现色之集合; I_- 和 I_+ 是用来在确定了变迁的发生方式后规定库所中令牌的变化,它们分别称作 $P \times T$ 上的输入函数和输出函数, $I_-(p, t)$ 表示变迁 t 实施后,其输入库所 p 失去的各色令牌数量, $I_+(p, t)$ 表示变迁 t 实施后,其输出库所 p 得到的各色令牌数量;初始标识 M_0 为 $(P, C(p))$ 上的多重集向量。

在着色 Petri 网中,通过为每个令牌赋予不同的颜色扩大了令牌所代表的信息量,合并了某些相似的库所和变迁,减少了网系统中的节点数目,提高了 Petri 网的描述能力。

3 时间约束着色 Petri 网

时间约束着色 Petri 网(Timing Constraint Colored Petri nets)综合了时间约束 Petri 网的时间约束能力和着色 Petri 网的描述能力。其变迁的实施规则也要同时满足时间的约束和令牌颜色的限制。

TCCPN 是一个九元组 $TCCPN = (P, T, F, C, I_-, I_+, LT, K, M_0)$, 其中 P, T, F, C, I_-, I_+ 和 M_0 同着色 Petri 网中的定义, LT 同 TCPN 中的定义, K 为容量函数,是 $(P, C(p))$ 上的多重集函数向量。关于 TCCPN

有如下的定义。

定义1 [TCCPN 中变迁 t 的使能] 对 $\forall t \in T$, 称变迁 t 在标识 M 下是使能的, 若满足条件: $\forall p \in T$, 有 $M(p) \geq I_-(p, t)$; $\forall p \in T$, 有 $M(p) + I_+(p, t) \leq K(p)$ 。这里的 $+$ 、 \geq 、 \leq 运算是多重集运算, 关于多重集的运算参见文献[3]94~95页。变迁 t 在标识 M 下使能简记为 $t \in EN(M)$, 若此时时刻为 TM , 则变迁 t 在时刻 TM 是使能的, 记为 $t \in EN(TM)$ 。

定义2 [TCCPN 中变迁 t 可发生] $\forall t \in T$, 若满足 $t \in EN(TM)$, 且 $T_{\max}(*t) - T_{\min}(*t) \geq 0$, 则称在时间区间 $[TM + T_{\min}(*t) - T_{\min}(*t)]$ 上 t 可发生, 简称变迁 t 在时刻 TM 可发生, 记为 $t \in EN(TM)$ 。

由定义2可知: 一个变迁 t 在 M 下使能, 则其可发生。但由于变迁 T 有一个执行时间 $T_{dur}(t)$, 使得其不一定能够成功地实施。因此 TCCPN 中变迁 t 有定义3中的发生规则。

定义3 [TCCPN 中变迁 t 的发生规则] $\forall t \in T$, 若 $t \in FREN(TM)$, 则: 1) t 不一定要立即发生, t 可在 $[TM + T_{\min}(*t) - T_{\min}(*t)]$ 上任意时刻发生; 2) t 发生后, 对 $\forall t \in *t$, 按到达时刻的先后顺序保持 $I_-(p, t)$ 描述的相应令牌不得为其它变迁使用, 经过执行时间 $T_{dur}(t)$ 后 t 实施完毕, 此时, p 被保持的令牌被释放, 同时对 $\forall p \in t^*$, 在其中增加 $I_+(t, p)$ 描述的相应令牌。设 t 实施完毕前后的标识分别为 M 和 M' , 则有:

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) - I_-(p, t) & \text{当 } p \in *t - t^* \\ M(p) - I_+(t, p) & \text{当 } p \in t^* - t^* \\ M(p) - I_-(p, t) + I_+(t, p) & \text{当 } p \in *t \cap t^* \\ M(p) & \text{当 } p \notin *t \cup t^* \end{cases}$$

这里的 运算均是多重集运算。

定义4 [TCCPN 中变迁 t 的可调度] $\forall t \in T$, 称 t 在时刻 TM 可调度, 若满足: $t \in FREN(TM)$, 且 $T_{\max}(*t) - T_{\min}(*t) \geq T_{dur}(t)$ 。简记为 $t \in SCHD(TM)$ 。

4 卫星—地面站系统的时间约束着色 Petri 网

通过对卫星种类及其任务申请类型、地面站设备类型及性能、设备调度规则等系统要素进行分析, 用时间约束着色 Petri 网建立了多卫星—地面站系统的运行模型。模型中, 建立一个统一的地面站设备库所和一个等候服务卫星库所, 分别对整个系统的地面设备资源按类型着色和每颗卫星着色, 通过一张反映设备配置方案的表与该设备库所关联或增加一个方案库所。这种方法建立的模型结构简单, 并且模型的通用性强, 即当地面站的数量增加时不用对模型进行修改。所建立的卫星—地面站系统的时间约束着色 Petri 网模型如图1所示。

对模型的解释和运行分析:

系统中共有 x 颗不同的卫星, 在系统模型中用 x 种不同颜色的卫星令牌表示, 令牌的颜色用自然数表示; l 种类型的地面站设备 y 个, 其中第 i 型设备数量为 y_i 个, 在模型中用 l 种不同颜色的设备令牌表示, 令牌的颜色也用自然数表示; l 种服务类型, 每种类型的服务要占用一套相应类型地面站设备资源和一

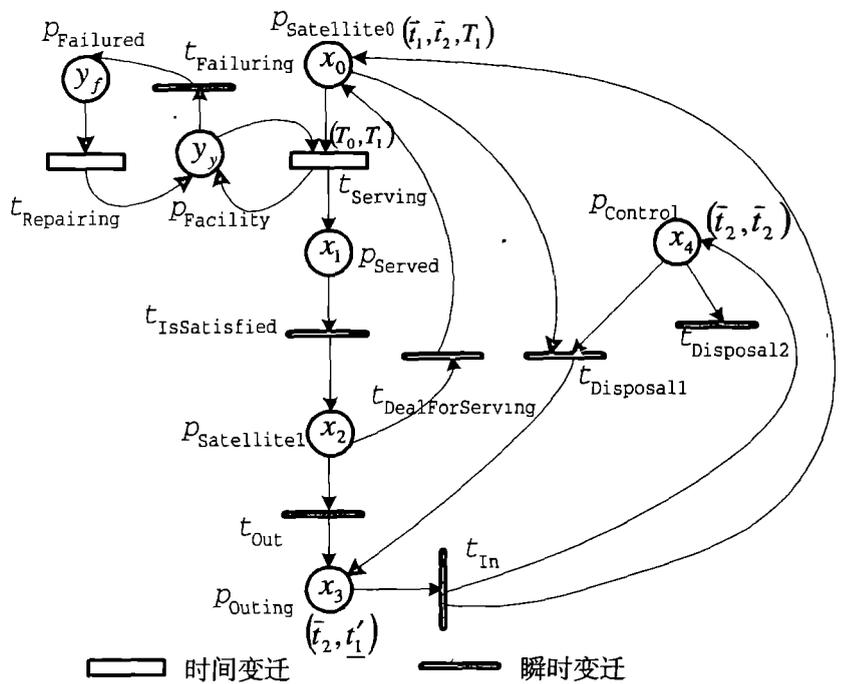


图1 卫星—地面站系统的时间约束着色 Petri 网模型

颗卫星,服务后设备和卫星都将被释放,因此,提供 l 种类型服务的时间变迁 $t_{\text{Servicing}}$ 的出现色中包括 x 种不同颜色的卫星令牌和 l 种不同颜色的设备令牌。模型各库所中令牌存在如下关系: $y_y + y_f = y$, $x_0 + x_1 + x_3 = x$, 这里的 $+$ 运算是多重集运算。

$p_{\text{Satellite0}}$ 为 0 号卫星库所,其中令牌为等待服务的卫星,令牌带有自身的颜色标识和对应于约束时间 $(\bar{t}_1, \bar{t}_2, T_1)$ 的时间约束, \bar{t}_1 为卫星到达系统中各设备所在地面站的到达时间 $T_{\text{lokenarr}}(pt)$ 所组成的向量, \bar{t}_2 为卫星出系统中各设备所在地面站的可视范围时间 $T_{\text{max}}(pt)$ 所组成的向量, T_1 对应于 $T_{\text{dur}}(pt)$, 对应于时间约束 Petri 网中最小约束时间 $T_{\text{min}}(pt)$ 的时间约束取 0, 即到达即可用;

p_{Facility} 为处于正常状态的设备库所,从变迁 $t_{\text{Servicing}}$ 开始实施起被使用设备即被标记处于占用状态直至 $t_{\text{Servicing}}$ 实施结束始得释放;

p_{Failed} 为处于故障状态的设备库所;

p_{Served} 为服务过的卫星库所,其中令牌为已经提供过服务的卫星,但其服务申请是否已经得到满足还有待判断;

$p_{\text{Satellite1}}$ 为 1 号卫星库所,其中令牌为已经提供过服务并且已经进行了服务满足判断的卫星,对于服务已经满足的卫星则准备出“站”,对于服务未满足的卫星经对其相应参数处理后再次申请服务;

p_{Outing} 为“站”外运行卫星库所,其时间约束对 (\bar{t}_2, \bar{t}_1) 表示卫星的“站”外运行时间段, \bar{t}_2 是 \bar{t}_2 的最大分量; \bar{t}_1 是卫星下一圈次进“站”时间,它是卫星下一圈次 \bar{t}_1 的最小分量;

p_{Control} 为控制库所,其中令牌记录进“站”的每个卫星的下次出“站”时间,以便在卫星得不到服务但出“站”时间已到,的情况下,通过控制变迁强行其出“站”,从其约束时间对 (\bar{t}_2, \bar{t}_2) 可以看出该控制库所中的令牌只能在 \bar{t}_2 时刻使其输出变迁;

$t_{\text{Servicing}}$ 为对卫星进行服务的时间变迁,其时间约束对 (T_0, T_1) 中, T_0 规定了 $t_{\text{Servicing}}$ 执行的最短时间,根据服务优先级和设备调度规则 $t_{\text{Servicing}}$ 的可实施时间可能会小于 T_0 , 此时 $t_{\text{Servicing}}$ 将放弃实施。 T_1 来自于 $p_{\text{Satellite0}}$, 表示令牌所对应卫星的申请服务时间,是 $p_{\text{Satellite0}}$ 中令牌的函数;

t_{Failing} 为设备按照自身的故障特性发生故障的瞬时变迁,这里采取概率发生规则;

$t_{\text{Repairing}}$ 为设备按照自身的可维修性进行维修的随机时间变迁,延迟时间服从均值等于平均故障修复时间的指数分布;

$t_{\text{IsSatisfied}}$ 为进行服务是否已经满足判断的瞬时变迁,变迁实施后对 p_{Served} 中的令牌分别作上服务是否已经满足的标记;

t_{Out} 为服务已经满足卫星的出“站”变迁,变迁的实施主要是做相关的统计,统计结果将用于系统运行结束后的性能评价;

t_{In} 为“站”外运行卫星进“站”变迁,主要是对进“站”卫星做上相应的时间约束标记、服务类型标记等;

$t_{\text{DealForServicing}}$ 为再次申请服务前对卫星处理的瞬时变迁,主要是在前次服务的基础上对卫星的各种时间约束和服务类型作相应的调整;

$t_{\text{Disposal1}}$ 为控制变迁,主要是对已到出“站”时间的令牌,不论其服务满足与否都予以强行出站,这样才能符合实际系统中卫星运行和接受服务的真实情况,该控制变迁实施时也将进行相关的统计,统计结果将用于系统运行结束后的性能评价;

$t_{\text{Disposal2}}$ 为控制变迁,该控制变迁主要功能是释放 p_{Control} 中已到约束时间的令牌, $t_{\text{Disposal1}}$ 与 $t_{\text{Disposal2}}$ 同为控制变迁,但前者的优先级高,故当 p_{Control} 中存在有效令牌时,若 $t_{\text{Disposal1}}$ 具备实施条件则其得到实施,只有 $t_{\text{Disposal1}}$ 不具备实施条件时 $t_{\text{Disposal2}}$ 才实施;

模型中的“站”并不具体指某个地面站而是所有地面站的统称,其中任一卫星的出“站”定义为:1) 按卫星自身的轨道运行出“站”的可视范围,即正常运行出“站”;或 2) 虽然按轨道运行未到出“站”,但已经对其所有服务申请服务完毕,这种条件下该卫星不再占用任何系统资源,所以可以视其为出“站”。

设备调度规则存放于 $t_{\text{Servicing}}$ 中。当 p_{Facility} 中有令牌到达或 $p_{\text{Satellite0}}$ 中有令牌移出或 $t_{\text{Servicing}}$ 实施完成时,调用设备调度规则,按设备调度规则只对等候调度的任务申请进行调度,已经分配设备的任务申请不论其执行与否均不再参加统一调度。但对于已经调度仍未执行的任务申请,若在等待执行期间因设备故障而不可执行,则该任务申请重新进入等候调度状态,参加统一调度。

这里由于采用了着色 Petri 网技术,使网的结构得到了有效的压缩。同时,控制库所和控制变迁的设置使得网中不可能存在死锁节点,因此,网的可调度性是必然的,限于篇幅本文不再进行可调度性分析。

5 结论

本文结合着色 Petri 网和时间约束 Petri 网建立的多卫星—地面站系统时间约束着色 Petri 网模型,结构简单、通用性、直观性强,描述能力强。在模型仿真运行时,通过收集并处理系统的实际运转数据,可以对地面站设备利用率、空闲时间、对各卫星的服务时间、放弃服务圈次等作出统计并以此评价系统的性能。这些评价结果既可用于对设备配置方案进行优化,也可用于分析不同调度策略对系统性能的影响,从而为整个星地系统的静态、动态优化提供支持和依据。

参考文献:

- [1] Jeffrey J P. Tsai, Steve Jennhwa Yang. Timing Constraint Petri Nets and Their Application to Schedulability Analysis of Real - Time System Specifications[J]. IEEE TRANSACTIONS ON SOFTWARE ENGINEERING, 1995, 21(1): 32 - 49.
- [2] Euisu Park, Dawn M. Tilbury, Pramod P. Khargonekar. A Modeling and Analysis Methodology for Modular Logic Controllers of Machining Systems Using Petri Net Formalism[J]. IEEE TRANS. SYS, MAN AND CYBER - PART C, 2001, 31(2): 168 - 188.
- [3] 袁崇义. Petri 网[M]. 北京: 电子工业出版社. 1998.
- [4] 林 闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社. 2000.
- [5] 郑大钟, 赵千川. 离散事件动态系统[M]. 北京: 清华大学出版社. 2000.
- [6] 李全龙, 徐晓飞, 姜思杰. 一类资源组合问题的扩展参数 Petri 网建模与优化研究[J]. 计算机研究与发展. 2000, 37(3): 344 - 351.
- [7] 姜 浩, 罗军舟, 方宁生. 一种基于有色 Petri 网的知识库验证方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2000, 30(1): 77 - 83.
- [8] 李文波, 吴冲锋, 王意冈. 组织决策过程的随机有色 Petri 网模型[J]. 控制与决策. 2001, 16(1): 86 - 89.
- [9] 李慧芳, 李人厚, 陈浩勋. 受控赋时 Petri 网在批处理系统建模中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(4): 55 - 59.

(编辑: 田新华)

Study on Petri Net Model for Multi - Satellites - Ground Station System

WANG Yuan - zhen^{1,2}, ZHAO Jian², NIE Cheng¹

(1. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 2. Research Center of Aerospace Technology, General Arm Department of PLA)

Abstract: A new type of extended Petri net model - Timing Constraint Colored Petri Net is advanced and studied. Then the service types, resource types and performances, and the facility scheduling policies are analyzed within the multi - satellites - ground station system. Based on this, the system model is established, which provides ways and means for the optimization of facility development scheme and for the dynamic performance analyzing of the whole satellite - ground system.

Key words: satellite; Petri net; colored Petri net; scheduling policy