

# 基于星间网络拓扑技术的星间链路优化设计

贺瑜飞

(榆林学院 数学与统计学院, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** 在星间网络环境中, 全链路生命周期达不到预期标准数值, 进而导致拓扑信道传输特性不能得到满足, 基于此现状, 设计星间网络拓扑技术支持下的星间链路优化方法; 在网络拓扑框架中, 规划星间传感器节点的具体位置, 推导拓扑演化所需的机制条件, 提升全链路组织中数据信息的理想生命周期数值, 完成星间网络的拓扑结构设计; 在此基础上, 研究星间链路的基本结构形式, 判断处理优化流程的合理性, 根据具体的优化设计建立条件, 完成静态与动态链路的优化设计, 实现星间链路优化设计的条件与流程完善; 联合 LDPC 码, 构造标准的星间校验矩阵, 并处理信道中编码数据的译码形态, 满足拓扑信道的传输特性, 完成星间信道的 LDPC 编码, 实现基于星间网络拓扑技术的星间链路优化设计; 建立星间网络环境进行比对性实验, 数据结果显示优化后星间链路生命周期最大值提升至 135 ms, WIT 指标数值始终保持在 70% 左右, 拓扑信道传输特性得到满足。

**关键词:** 网络拓扑; 星间链路; 传感器节点; LDPC 编码; 校验矩阵; 生命周期

## Inter-satellite Link Optimization Design Based on Inter-Satellite Network Topology Technology

He Yufei

(School of Mathematics and Statistics, Yulin University, Yulin 719000, China)

**Abstract:** In the inter-satellite network environment, the life cycle of the full link is not up to the expected standard value, and thus the transmission characteristics of the topology channel cannot be satisfied. Based on this situation, the inter-satellite link optimization method supported by the inter-satellite network topology technology is designed. In the network topology framework, the specific location of inter-satellite sensor nodes is planned, the mechanism conditions necessary for topology evolution are deduced, the ideal life cycle value of data information in the all-link organization is promoted, and the topology structure design of inter-satellite network is completed. On this basis, the basic structural form of inter-satellite link is studied, and the rationality of the processing optimization process is judged. Based on the specific optimization design, the conditions are established to complete the optimal design of static and dynamic links, and the conditions and processes of the optimal design of inter-satellite links are improved. Combine LDPC codes, construct standard inter-satellite check matrix, and process the decoding form of encoded data in the channel, so as to meet the transmission characteristics of topology channel, complete the LDPC coding of inter-satellite channel, and realize the optimal design of inter-satellite link based on inter-satellite network topology technology. The inter-satellite network environment was established for comparison experiments, and the data results showed that the maximum life cycle of inter-satellite link was increased to 135ms after optimization, WIT index value was always kept at about 70%, and the transmission characteristics of topological channel were satisfied.

**Keywords:** network topology; inter-satellite link; sensor node; LDPC codes; check matrix; life cycle

## 0 引言

星间链路是用于实现卫星间传输通信的链路组织, 与普通上、下行链路不同的是, 这种结构的两端传输组织全部为卫星。因此, 也被认为是一种特殊的卫星链路连接形式。星间链路也叫交叉链路或星际链路, 可用于实现不相邻卫星之间通信链路的构建, 进而促进拓扑信息的交流的互换。在特定情况下, 星间链路可连接不处于同一轨道的多颗卫星结构体, 形成一个以卫星组织作为圆心节点的空

间通信网络主体<sup>[1-2]</sup>。根据所承担传输任务的不同, 可将星间链路分为同种轨道、不同轨道和复合轨道三种类型。其中, 同种轨道星间链路的网络位置相对固定, 但节点所覆盖的星间区域面积较小, 拓扑传输受到较强的限制作用; 不同轨道星间链路的网络位置极难固定, 节点所覆盖的星间区域面积分布广泛, 拓扑传输能够保持自由应用状态; 复合轨道星间链路的网络位置呈现嵌套状态, 节点所覆盖的星间区域面积出现部分重叠, 拓扑传输很难一次达到目的位置。

近年来随着星间拓扑信息总量的增加, 全链路组织面临的传输压力逐渐增大, 造成滞留于卫星组织中的交流数据持续累积, 对星间网络拓扑环境的构建造成极大压力。为解决上述问题, 普通星间链路结构通过调节节点位置的

收稿日期: 2019-09-04; 修回日期: 2019-09-26。

基金项目: 榆林学院高层次人才科研启动资金项(3GK39)。

作者简介: 贺瑜飞(1987-), 女, 陕西佳县人, 硕士, 讲师, 主要从事小波分析方向的研究。

方式，提升全生命周期的承载能力，并以此达到支持卫星单跳通信、双跳通信同时存在的目的，为保持拓扑信道的传输特性能力提供保障。但根据过往应用经验来看，这种方法的处理效果始终不能达到预期标准程度。为解决此问题，提出一种基于星间网络拓扑技术的星间链路优化方法，首先在传感器节点的支持下，建立完善的拓扑演化机制，再以此为基础，判断链路优化设计条件与流程的合理性。最后设计独立性的对比实验，突出说明优化后处理方法的实用性能力。

### 1 星间网络拓扑体系结构

星间网络拓扑体系结构搭建是星间链路优化设计的基础环节，在网络框架、拓扑演化机制等结构的支持下，其搭建操作可按如下流程进行。

#### 1.1 网络拓扑框架

星间网络拓扑架构采取树形连接形式，每个链路交换机可匹配到 1 或 2 层体系网络（如图 1 所示），且所有交换机都可以在保持传输特性的基础上，与传感器节点保持互连关系。对于星间链路的子网体来说，网络拓扑结构是具有稳定性能的真实体系组织。满足星间传输关系的网络拓扑框架具有核心交换层、服务器层、数据链路层三级组织实体。其中，核心交换层中包含一定数量的传感器节点，可实现星间网络数据的定向交换，在拓扑设备保持全连接的情况下，该层组织可形成一个相对完善的小型星间链路体系<sup>[3-4]</sup>。服务器层由一台星间链路信息中心组成，可最大限度调节网络环境中的传感器节点，使其逐渐趋于一种全覆盖的分布趋势。数据链路层是网络结构的集合平台，作为拓扑框架的末级执行结构，具备整合卫星交换信息的能力，可按照星间网络的拓扑要求，将信息数据传输至各级链路结构中。

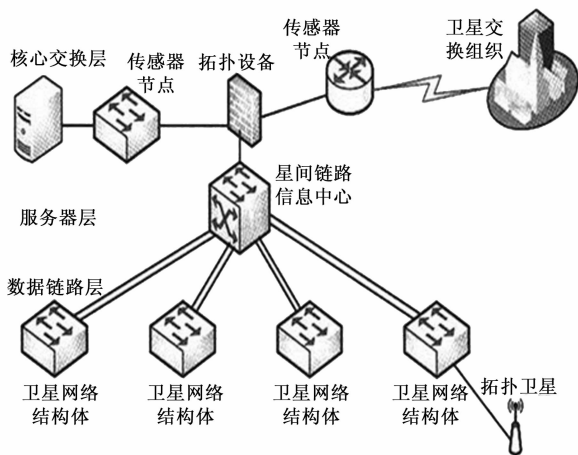


图 1 网络拓扑框架结构图

#### 1.2 星间传感器节点结构

星间传感器节点包含链路传感模块、拓扑处理模块、

连接通信模块、能量传输模块共 4 个物理组成部分，具体结构如图 2 所示。链路传感模块负责监测网络拓扑区域内卫星之间信息的采集及数据转换情况，是数/模转换传感器单元的重要表现形式。拓扑处理模块主要负责协调或控制各级星间结构组织间的信息传输工作，在存储常规链路组织数据的同时，妥善分配其它节点结构发来的卫星数据信息。连接通信模块只负责与其它节点建立传输信道，用以实现星间网络中的信息收发与交换转存。能量供应模块利用微型电池作为电能输出装置，可在规定传输时间内，提供星间传感器节点所需的一切物理能量。由于节点组织始终应用电池供电的输出方式，一旦总储能量枯竭，节点也就失去了最初的拓扑传输能力。为节约链路优化过程中的电能消耗量，所有星间网络拓扑体系的硬件设备都保持有限度的耗能水平，例如 CC2431 芯片、A/D 结构等。

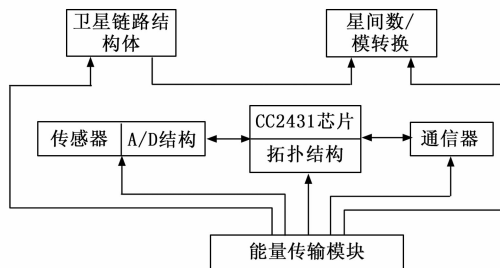


图 2 星间传感器节点结构图

#### 1.3 拓扑演化机制

在真实的星间网络环境中，拓扑演化机制采用 BA 无标度的搭建方式，是全局择优算法的缩略表达形式，可通过安排星间链路结构体随机行走的方式，确定相邻传感器节点的位置信息。所谓 BA 无标度是指一个全新的星间传感器节点可能以任意一个随机位置作为起始点，通过面状铺开的方式，使链路结构体对不同卫星交流信息进行浏览，进而将所有性能相似节点归结到相同的链路组织中，以建立能够满足所有星间传感器节点的超级链接<sup>[5]</sup>。根据作用效应原理不同，可将星间链路的拓扑演化机制分为发散状、圆环状、线状、树状 4 大类（如图 3 所示）。

其中，发散状拓扑演化机制具备一个独立的星间链路指挥结构，即星间网络中心；圆环状与线状拓扑演化机制都只包含星间结构体，但二者的基本分布排列方式不同；树状拓扑演化机制以一个网络中心为主要结构，向下施行分级递增的体结构排列方式，且下一级结构中星间结构体的无理数量通常为上一级的整数倍。

### 2 星间链路优化设计的条件和流程

在星间网络拓扑体系结构的支持下，利用基本链路结构，建立应用性优化条件，实现星间链路优化设计的条件与流程完善。

#### 2.1 最基本的星间链路结构

在星间拓扑网络环境中，两颗卫星体之前的物理链路

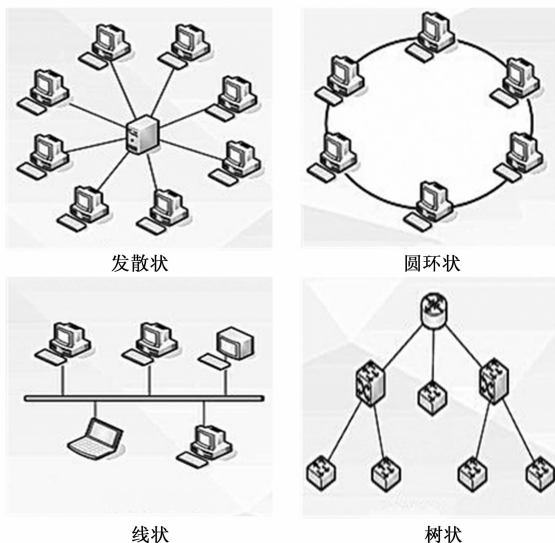


图 3 拓扑演化机制分类

是最基本的星间链路结构。假设位于星间网络拓扑结构中的两颗卫星 A、B 始终处于统一轨道，且都依靠无线电波覆盖角宽度为  $\beta$  的同类型链路天线指向对方。在地球半径保持为  $R$  的情况下，设卫星 A、卫星 B 之间的物理链路距离为  $\hat{d}$ ，两颗星体间的最大可见距离  $\hat{d}_{\max}$ ，已知两颗星间结构体之间的地心夹角度数为  $\omega$ ，链路组织内部的平均轨道高度为  $|h|$ ，则利用上述变量，可将星间链路结构化距离和两颗星体间的最大可见距离表示为：

$$\begin{cases} \hat{d} = 2(R + |h|) \sin(\frac{\omega}{2}) \\ \hat{d}_{\max} = 2 \sqrt{[(R + |h|)^2 - R^2]} \end{cases} \quad (1)$$

当  $\omega$  的物理数值条件等于  $1^\circ$  时，通过计算所得的  $\hat{d}_{\max}$  数值就是两颗星体间的最小可见距离，即  $\hat{d}_{\max} = \hat{d}_{\min}$  成立。

表 1 不同星间轨道链路卫星间的距离 km

星间轨道	平均链路高度	最小可见距离	最大可见距离
GPS	22 010	2 350.0	51 670.0
GEO	35 748	736.8	83 354.1
MEO	18 010	463.5	47 750.9
LEO	1 670	167.6	9 535.8

由表 1 可知，GPS 链路卫星之间的可见距离变化范围最大，从最小值几千公里到最大值几万公里，始终保持相对灵活的拓扑变化状态。为在这样的星间网络拓扑结构中实现卫星链路信息的准确传输，必须要对能进行拓扑转变的链路结构体进行详细分析，进而满足所有链路环节的基本传输性能要求。

### 2.2 星间链路的优化判断流程

构建星间卫星系统的拓扑链路大多是在满足网络动态搜索条件的前提下，能够特性化符合空间几何条件的最好卫星结构体。通常情况下，选择一颗状态良好的星间网络

卫星需要综合考虑多方面因素，但因拓扑结构体的空间分布条件相对不受限，故整个星间网络中链路及卫星的选择可以是多样性的，即任意一颗链路卫星结构体都可能作为整个星间网络环境中的目标连接对象<sup>[6-7]</sup>。事实上星间链路结构的优化设计受到多方条件的限制和影响，在一条随机拓扑轨道运行周期内，与任意一颗链路卫星保持可见关系的卫星集合并不一定包含在相邻星间组织体系中，同时由于链路影响因素的存在，在与星间网络中心相邻的拓扑空间内，星间链路卫星的几何特性能够在短时间内得到满足。

其次，即使星间网络拓扑体系中，所有卫星结构体的存在条件都能得到满足，也不能使链路组织的几何特性约束条件时刻保持不变，但随着卫星运行时间的延长，遵照此法建立的星间链路优化结构可抑制其它闭合网络拓扑环的出现，而这些拓扑环之间却并不存在明显的交集节点位置，不能在空间网络环境中形成交互性环节，这也是导致星间链路体不会出现全连通传输状态的主要原因。此外，星间链路中所有卫星结构的传输性能都不能一直维持，为促进网络结构的快速成型，链路体需要不断的重复动态连接与动态断开操作，直至网络链路中心能够准确掌握星间链路卫星的装备性传输需求。

为清晰反应星间链路的优化判断流程，可将其总结为如下几个关键步骤：

- 1) 利用网络链路中心计算星间网络环境下的卫星体的传输轨道周期；
- 2) 通过节点分布条件判断星间网络中的链路结构是否满足卫星连接需求；
- 3) 在已成型的卫星传输轨道周期性集合内，搜索满足星间网络拓扑连接标准的数据信息结构体；
- 4) 判断并检查集合中是否有满足多项星间链路传输需求的物理结构项；
- 5) 统一星间网络中链路结构体的轨道拓扑周期，并根据卫星体的相对传输条件，确定连接角速度、线速度等具体指标的数值结果；
- 6) 最后整合上述所有数值计算结果，完成星间链路的优化判断。

### 2.3 优化设计的建立条件

星间链路优化设计的建立条件主要围绕消除对流层与电离层间的延迟影响进行。对于轨道高度基本持平的卫星结构体来说，星间链路组织的构建必须考虑地球的物理遮挡作用。常规情况下，地球对星间链路结构体的遮挡原理如图 4 所示。

如图 4 所示， $K、K'$  是星间网络中存在的两颗任意链路卫星， $o$  为地球的球心所在， $r$  为地球的体半径  $|KK'|$  代表两颗卫星之间的物理距离，过球心  $o$  作连接  $|KK'|$  的垂线，垂足所在位置为  $E$ 。为满足星间链路组织中数据传输通信的

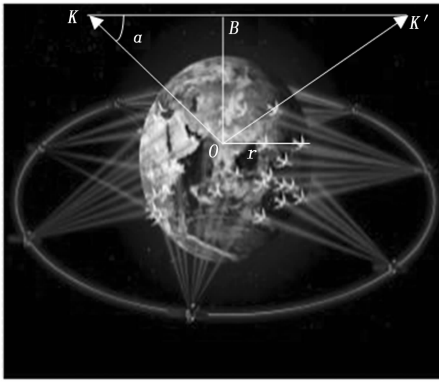


图 4 星间链路结构体遮挡原理示意图

顺利进行,应消除对流层、电离层间遮挡影响在卫星轨道高度的基本关系可表示为:

$$\frac{|\vec{e}_K \times \vec{e}_{K'}|}{\|\vec{e}_K - \vec{e}_{K'}\|} > |oE| \quad (2)$$

其中:  $\vec{e}_K$  代表卫星 K 在地心惯性坐标系下的位置矢量条件,  $\vec{e}_{K'}$  代表卫星 K' 在地心惯性坐标系下的位置矢量条件,  $|oE|$  代表地心 o 到垂足 E 间物理距离的长度。

### 2.4 星间链路的优化设计

#### 2.4.1 静态链路优化设计

假设星间网络拓扑结构中所有卫星体都保持不动,而相对于地球而存在的空间结构始终保持运动状态,在此条件下,对星间链路结构起到传输影响的固态组织即为静态链路。从功能性角度来看,静态链路必须具备匹配调节的能力,可根据空间结构的运动情况,调节网络轨道中卫星数据的传输速度,以保证整个星间链路体系中不出现明显的信息或条件堆积行为,进而保证卫星体能够长时间维持相对稳定的航行状态。

#### 2.4.2 动态链路优化设计

假设星间网络拓扑结构中所有卫星体都保持连续运动,而相对于地球而存在的空间结构始终保持不动,在此条件下,对星间链路结构起到传输影响的固态组织即为动态链路<sup>[8]</sup>。相较于静态链路结构,动态链路则不对节点的匹配调节能力设限,反而需要结构体自身能够适应卫星的旋转运行状态。在轨道夹角、线速度、角速度等物理条件均发生改变的情况下,处于动态链路中的卫星体会随空间结构继续保持原有传输状态,进而保证通信数据的稳定传输。

## 3 星间信道的 LDPC 编码

星间信道 LDPC 编码是实现星间链路优化的关键操作,在 LDPC 码表示、矩阵构造、译码处理三个流程的支持下,其具体处理方法可按如下步骤进行。

### 3.1 LDPC 码表示

LDPC 码是一种具备线性拓扑功能的链路分组码,可用于获取与星间校验矩阵构造相关物理数值条件。简单来说,在星间网络环境中,每一个链路结构体都相当于一个拓扑

头结点,随着卫星传输时间的增加,每个头结点的传输趋势都可由“一对一”逐渐转变成“一对多”,即一个头结点具备面向多个次级卫星节点的疏导性传输能力,而这种单级面向多级的星间链路传输形式就是 LDPC 编码<sup>[9]</sup>。当拓扑头结点(链路结构体)进入星间网络拓扑结构时,网络链路中心会为其分配一个唯一的记录方式,即 LDPC 头结点,从该组织衍生出的编码体会按照相互匹配要求,寻找次级节点(卫星结构体)所在位置。多次重复上述操作,直至星间网络拓扑环境中再也不存在独立的节点条件为止,完成一次 LDPC 的编码表示处理。

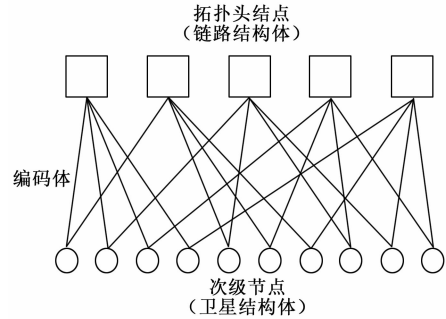


图 5 LDPC 编码表示原理

### 3.2 星间校验矩阵构造

星间校验矩阵中包含完整的链路卫星位置信息,是对 LDPC 编码方法进行的深入阐释。设标准的矩阵体为一个三行三列的不重复物理数据包,拓扑头结点的下角标为  $t$ ,次级节点的下角标为  $c$ ,在公式(2)恒成立的情况下,有  $\hat{d}_{\max} = \hat{d}_{\min}$ ,则可将完整的星间校验矩阵表示为:

$$f_d = \begin{pmatrix} i_{s_1} u_{c_1} & i_{s_2} u_{c_1} & i_{s_3} u_{c_1} \\ i_{s_1} u_{c_2} & i_{s_2} u_{c_2} & i_{s_3} u_{c_2} \\ i_{s_1} u_{c_3} & i_{s_2} u_{c_3} & i_{s_3} u_{c_3} \end{pmatrix} \quad (3)$$

### 3.3 信道编码的译码处理

信道编码的译码处理是实现星间链路优化设计的末尾环节。人为规定在无限大的星间网络拓扑结构中,地球作为参考系原点位置信息始终保持不变,其它星间链路在收到空间外力的作用下,可能会出现一定程度的偏移变化,而确定具体偏移数量值的过程就是信道编码的译码处理<sup>[10]</sup>。在星间校验矩阵  $f_d$  中随机挑选一个物理数值作为待用对象,再根据卫星信息的通信需求,对该数据进行加工处理,当数值前、后尾缀的数字参量都不再发生改变时,即完成一次链路信道编码的译码处理。

## 4 优化链路的仿真与应用

在 Linux 环境中,利用模拟主机建立星间网络环境设计对比实验,分别记录应用星间网络拓扑技术支持下的星间链路优化方法前、后,相关数据指标参量的变化情况。

### 4.1 星间网络环境构建

在两台相同的物理计算机中装载相同的 Linux 虚拟系

统，控制接入时间，使两台主机保持相同的工作状态，如图 6 所示。



图 6 星间网络环境检测目标

当操作人员执行变动指令时，计算机显示器中的星间链路图像发生改变，多次调节直至图像完全信息后，打开 makeagif 软件，将各项指标数据导入，生成与测试结果相关的数值曲线图。

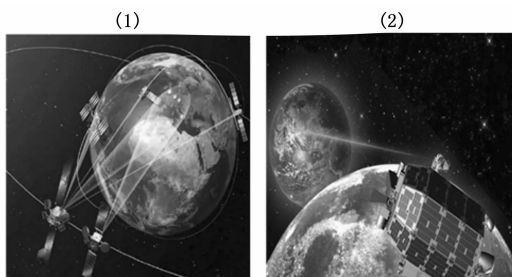


图 7 链路卫星运行图

### 4.2 全链路生命周期值

图 8 反应了规定时间内，应用星间网络拓扑技术支持下的星间链路优化方法前、后，卫星体全链路生命周期数值的变化情况。

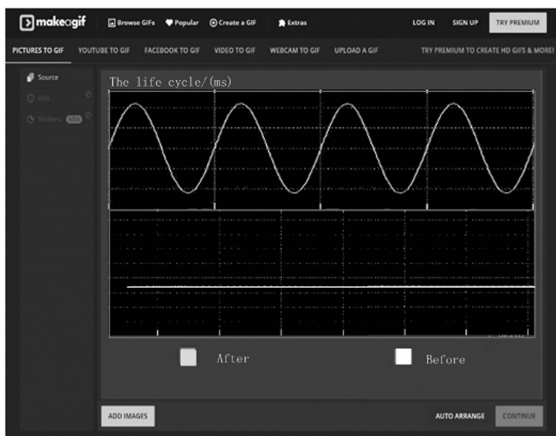


图 8 全链路生命周期对比

分析图 8 可知，随实验时间的增加，应用优化方法前、后，卫星全链路生命周期呈现完全不同的变化趋势。应用

优化方法前，卫星全链路生命周期在实验前期出现小幅度上升，实验中后期达到最大值，且能够基本维持稳定，稳定最大值达到 64 ms；应用优化方法后，卫星全链路生命周期呈现下降、上升交替出现的变化趋势，最大值达到 135 ms，其出现时间远早于应用优化方法前。由此可证，应用优化方法提升星间链路卫星全链路生命周期的假设成立。

### 4.3 WIT 指标数值

提取 makeagif 软件中有关卫星 WIT 数值的具体参数，将其输入至 SpreadJS 软件绘制全新的参数表格（如图 9 所示）。已知 WIT 指标是反应星间网络拓扑信道传输特性的重要物理量，常规情况下二者保持相同的变化趋势。

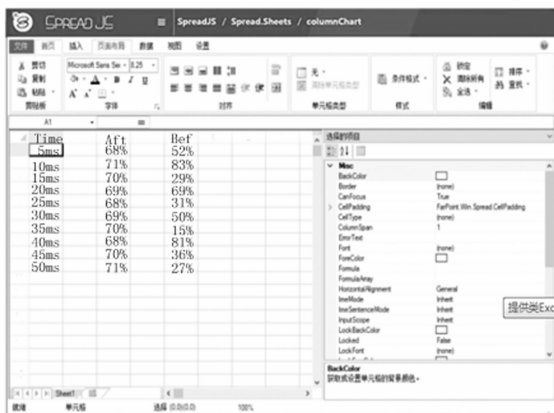


图 9 WIT 指标数值对比

分析图 9 可知，随着实验时间的增加，应用优化方法后卫星 WIT 指标始终一直相对稳定的波动状态，且始终以 70% 作为变化中心值；应用优化方法后卫星 WIT 指标不具备明显的变化趋势，整个实验过程中数值结果的极端差较大，缺乏良性规划的能力。由此可证，应用优化方法稳定 WIT 指标，满足星间链路信道传输特性的假设成立。

## 5 结束语

在不发生明显外力作用的情况下，星间网络始终维持相对稳定的拓扑状态，但随着地球引力作用程度的增加，链路卫星体开始出现明显的波动行为，进而导致星间信道传输特性难以得到满足。针对此问题，设计星间网络拓扑技术支持下的星间链路优化方法，从体系结构、信道编码等多个角度达到提升卫星全链路生命周期的目的，进而促进 WIT 指标快速区域稳定，满足星间链路信道组织的传输特性。

### 参考文献：

[1] 潘军洋, 胡小工, 唐成盼, 等. 北斗新一代卫星时分体制星间链路测量的系统误差标定 [J]. 科学通报, 2017, 19 (23): 2671 - 2679.

[2] 龚晓颖, 徐韶光, 冯 威. 星间链路构型对自主导航精度的影响分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37 (11): 1161

- 1165.

[3] 尹 卿, 于 澎, 白力舸. 应用时变拓扑动态模型的星间网络性能测试系统设计 [J]. 航天器工程, 2018, 27 (6): 122 - 129.

[4] 王星宇, 李勇军, 赵尚弘, 等. 基于 IEEE802.11 的星间链路最短接入时延退避算法 [J]. 电子学报, 2018, 46 (12): 122 - 127.

[5] 齐小刚, 马久龙, 刘立芳. 基于拓扑控制的卫星网络路由优化 [J]. 通信学报, 2018, 39 (2): 11 - 20.

[6] 潘军洋, 胡小工, 唐成盼, 等. 北斗新一代卫星时分体制星间链路测量的系统误差标定 [J]. 科学通报, 2017 (23): 2671

- 2679.

[7] 温旭峰, 郝金明, 胡小公. 基于星间链路体制的北斗卫星时间同步可行性分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38 (12): 1274 - 1279.

[8] 董明佑, 林宝军, 刘迎春. 基于多目标模拟退火算法的导航卫星激光星间链路拓扑动态优化 [J]. 中国激光, 2018, 499 (7): 217 - 228.

[9] 燕 威, 朱 岩. CCSDS 标准低并行度高速 LDPC 编码方案 [J]. 电子技术应用, 2017, 43 (7): 102 - 105.

[10] 赵文剑, 王竹刚. 符合 ccsds 标准的遥测同步和信道编码系统及 FPGA 实现 [J]. 电子设计工程, 2018, 26 (1): 89 - 92.

(上接第 196 页)

与虚拟调试对应的机器人仓库取件、数控车床上料、数控车床加工、加工中心上料、加工中心加工以及成品入库任务均能够完成, 没有发生异常, 验证了系统的稳定性与可靠性。



图 14 系统运行实验

### 5 结束语

本文设计并实现了面向智能制造加工的虚拟调试系统, 以 PLC 为中央控制器, 通过工业以太网与机器人控制器、数控车床及加工中心控制器进行通讯。交互控制软件采用插件化模式进行开发, 降低了设备驱动之间的耦合度, 每个设备插件能够被独立地开发、测试和部署。Redis 数据库实现了物理信号与虚拟信号的缓存, 保证了信号交互的实时性。在加工系统的虚拟调试的过程中发现并解决了 PLC 编程及信号匹配的问题, 避免了在现场调试中对设备的损害。通过现场的实验验证了加工系统方案的可行性。结果表明, 通过虚拟调试技术降低了智能制造加工系统的调试成本, 缩短了调试的周期, 并且给系统加工准备提供了有效的解决方案。

### 参考文献:

[1] 张新生. 基于数字孪生的车间管控系统的设计与实现 [D]. 郑州: 郑州大学, 2018.

[2] 张 强. 我国智能制造技术在工厂应用与思考 [J]. 山东工业技术, 2019 (15): 231.

[3] 薛加玉. 人工智能赋能制造业转型升级 [J]. 现代工业经济和信信息化, 2019 (3): 9 - 10, 16.

[4] 张 伟. 数字孪生在智能装备制造中的应用研究 [J]. 现代信息科技, 2019, 3 (8): 197 - 198.

[5] 陶 飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24 (1): 1 - 18.

[6] 时培昕. 数字孪生的概念、发展形态和意义 [J]. 软件和集成电路, 2018 (9): 30 - 33.

[7] Malik A A, Bilberg A. Digital twins of human robot collaboration in a production setting [J]. Procedia Manufacturing, 2018, 17: 278 - 285.

[8] Schamp M, Hoedt S, Claeys A, Aghezaf E H, Cottyn J. Impact of a virtual twin on commissioning time and quality [J]. IFAC PapersOnLine, 2018, 51 (11): 1047 - 1052.

[9] Mortensen S T, Madsen O. A Virtual Commissioning Learning Platform [J]. Procedia Manufacturing, 2018, 23: 93 - 98.

[10] Scheifele C, Verl A, Riedel O. Real-time co-simulation for the virtual commissioning of production systems [J]. Procedia CIRP, 2019, 79: 397 - 402.

[11] Koo L J, Park C M, Lee C H, et al. Simulation framework for the verification of PLC programs in automobile industries [J]. International Journal of Production Research, 2011, 49 (16): 4925 - 4943.

[12] 刘玉玲, 姚 屏, 袁桂琦, 等. 基于 Roboguide 平台的焊接机器人增材制造虚拟仿真研究与应用 [J]. 机械制造文摘 (焊接分册), 2018 (5): 21 - 24.

[13] 黄永飞. 面向三维虚拟生产线的 PLC 仿真控制 [D]. 广东工业大学, 2014.

[14] 杨大字, 陈玉全, 吴明阳, 等. 汽车覆盖件拉伸模具虚拟调试的研究 [J]. 制造技术与机床, 2007 (7): 26 - 29.

[15] 王春晓, 骆伟超, 刘日良, 等. 基于 Modelica 的数控机床多领域建模与虚拟调试 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018 (10): 102 - 105, 110.