# 基于复杂网络理论的运载器产品装配过程资源 可靠性分析

檀甜甜1,季一伟2,于 硕1,隗功正1,刘群利1

<sup>1</sup>首都航天机械有限公司,北京 <sup>2</sup>火箭军装备部驻北京地区第一军事代表室,北京

收稿日期: 2023年10月22日; 录用日期: 2023年11月20日; 发布日期: 2023年11月28日

### 摘要

航天运载器产品的装配过程是一个复杂的系统工程,某一个制造资源的冗余或缺失有可能会对系统的效能造成严重影响。本文对运载器产品的制造过程进行分解,引入复杂网络理论,将制造资源节点抽象为网络节点,建立以制造资源为主体的复杂网络模型,并对制造资源网络的复杂网络特性,包括节点的度及其分布、负载的情况及鲁棒性进行分析。并以实际制造任务为模型进行探索,研究结果对制造任务的分解、制造资源节点的选择、资源节点的全局优化调度、制造资源网络的鲁棒性和可靠性等的研究提供理论依据。

## 关键词

复杂网络,运载器,制造资源,可靠性分析

## Reliability Analysis of the Assembly Process of Launch Vehicle Based on Complex Network Theory

#### Tiantian Tan<sup>1</sup>, Yiwei Ji<sup>2</sup>, Shuo Yu<sup>1</sup>, Gongzheng Wei<sup>1</sup>, Qunli Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Aerospace Machinery Corporation Limited, Beijing <sup>2</sup>The First Military Representative Office of The Rocket Force Equipment Department in Beijing, Beijing

Received: Oct. 22<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Nov. 20<sup>th</sup>, 2023; published: Nov. 28<sup>th</sup>, 2023

#### Abstract

The assembly process of Launch Vehicle products is extremely complex. The redundant or dele-

**文章引用:** 檀甜甜, 季一伟, 于硕, 隗功正, 刘群利. 基于复杂网络理论的运载器产品装配过程资源可靠性分析[J]. 计算机科学与应用, 2023, 13(11): 2146-2154. DOI: 10.12677/csa.2023.1311214

tion of a vertex in manufacturing resource network may have a serious impact on the effectiveness of the system. Based on complex network theory, this article decomposed the manufacturing process of Launch Vehicle to abstract manufacturing resource as network vertex, thereby established complex network models with manufacturing resources. The complex network characteristics of the manufacturing resource network, including the degree, distribution of degree, load conditions of degree, robustness of the network are analyzed. A model based on the practical manufacturing tasks was constituted. The research results can support the decomposition of manufacturing tasks, the selection of manufacturing resource, the global optimization scheduling of resource, and the robustness analyses of the manufacturing resource network.

#### **Keywords**

Complex Network, Carrier, Manufacturing Resources, Reliability Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u> COPEN Access

## 1. 引言

航天领域运载器的装配是根据尺寸协调原则,采用装配工具、工装和设备等将各种零件或组件按照 设计和技术要求,并按一定的方法和顺序进行组合、连接的过程。以运载器舱段为例,其结构一般为铝 合金薄蒙皮、周向按角度分布桁条、大梁,航向分布中间框、端框等组成的半硬壳结构,涉及零部件数 量庞大、结构复杂、工序流程长,且由于其对接协调性、互换性要求,装配过程中引入大量工艺装备, 使得舱段的装配工艺过程极其复杂[1];为适应航天产品小批量多品种的订单需求,实现快速响应,降低 生产成本,提高生产效率,众多的制造企业构建了柔性化混流生产线或柔性制造系统以实现制造资源的 快速重组和复用。围绕运载器装配过程,形成了大规模的、极其复杂的制造资源集合。如何发掘单点失 效资源,并根据资源的关重程度进行扩能建设,在降低成本的同时又能保证制造系统的鲁棒性和可靠性, 是众多航天产品装配企业关注的问题之一。

复杂网络是由大量的节点和节点之间的连接构成的复杂拓扑结构,随着其理论的发展,小世界网络和无标度网络[2][3]相继出现,扩展了解决现实问题复杂性的新途径,并为制造过程复杂性问题探索了新的方向。Hu等通过建立制造复杂性指标,采用熵函数描述装配过程及装配供应链的复杂性[4];孙惠斌等将复杂网络理论引入多工序加工过程中,揭示了多工序加工过程中的工件误差传递机理[5];祁国宁等研究了大规模定制中的零部件关系网络特性[6][7];从以上文献可知,复杂网络理论在解决复杂系统建模和优化问题上具有天然优势,适用于制造系统复杂性问题的研究与分析。

本文从全局视角出发,将其复杂网络应用到运载器装配过程的制造资源网络建模与分析中,通过建模和分析研究网络的结构和物理特性,为制造资源的重构和再优化及网络可靠性提升提供支持。

## 2. 制造资源网络的拓扑模型

#### 2.1. 制造资源网络的定义

从装配工艺角度分析, 舱段产品在装配过程中体现出工序流转关系, 不同工序之间存在串行或者并 行的关联特性, 随着装配过程的进行形成有向的工序流或网络, 如图1。



工序流是一种网络,而运载器舱段由于特殊的装配过程和冗长的装配流程,其工序流相比一般的装 配件会复杂的多。各级工序内容需要依靠各种制造资源完成,如:某零件制孔需要制造资源包括:钻孔 机、钻头、定位卡块,某组件铆接组合需要的制造资源包括:定位螺钉、夹紧钳、压铆机、铆模等;制 造资源形成制造工位,众多的制造工位随着任务的迁移串联起来,最终形成以工序流组织的制造资源链 条,由于制造资源的重复引用,单向链条充分耦合形成制造资源网络,成形过程如图 2。



Figure 2. The evolution process of manufacturing resource network 图 2. 制造资源网络的演化过程

本文把复杂网络相关理论引入复杂产品装配过程,采用图论的方法建立制造内容的有向图模型,据 此对形成的制造资源网络进行特性分析。

现将制造资源网络的拓扑模型定义如下:

$$G^{smn} = \left( V^{smn}, E^{smn}, W^{smn} \right) \tag{1}$$

式中 $V^{smn} = \{v_1, v_2, \dots v_N\}$  ——制造资源节点集,可以是钻头、机加工中心,也可以是制造系统,如某零件 加工中心、某组件装配单元、某部段装配系统; $v_i(i=1,2,\dots,N)$  ——制造资源网络中的第i节点;  $E^{smn} = \{e_{ij}\}(i, j=1,2,\dots,n)$  ——制造资源网络的边集,其中 $e_{ij}$ 表示 $v_i$ 向 $v_j$ 提供制造资源;  $W^{smn} = \{w_{ij}\}(i, j=1,2,\dots,n)$  ——网络的边权重,表示不同层级制造资源之间关系强度; $\omega_{ij} = \sum_{r\in M} \omega_{r,ij}$  —— 表示 $v_i$ 向 $v_j$ 提供的制造资源总量;M——表示 $v_i$ 向 $v_j$ 提供制造资源次数; $\omega_{r,ij}$  ——第r个制造任务执行过 程中, $v_i$ 向 $v_j$ 提供的制造资源量,为制造资源使用时长乘以制造资源提供数量。 邻接矩阵定义如下:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$
(2)

式中:  $a_{ij}$ ——制造资源 i, j之间的有无提供关系;  $a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{other} \\ 0 & w_j = 0 \end{cases}$ , N——网络节点的规模。

#### 2.2. 制造资源网络的构建

由制造资源网络的特点可知,基于产品制造工序流的制造资源网络创成方式,是在以制造任务为核 心的星型结构基础上进一步分解,将星型结构扩展开来形成的组织架构。首先,对动制造资源节点的基 本阶段组织结构进行划分。按制造服务资源节点内容的层级结构,将制造资源分为核心结构、次级结构 和三级结构三个阶段。定义如下表1。

Table	e 1. Basic elements of manufacturing resour	ce networks
表 1.	制造资源网络的基本元素	

阶段	描述
核心结构	以复杂制造系统(如部段装配生产线等)节点为核心,以关键组件(如壁板组件 等)装配系统为制造资源提供方的星型结构
次级结构	以核心网络中的关键组件装配系统节点为核心,以次级零部件(如对接桁条 组件等)装配工位为制造资源提供方的星型结构
三级结构	以次级零部件的外围制造资源提供方节点为核心,以零件级、工序级制造资 源提供为主要手段的星型结构

各围绕某产品 BOM 制造过程形成的星型网络,通过子网络合并形成制造资源网络。

$$G = (V, E) = G^{(1)} \cup G^{(2)} \cup \dots \cup G^{(k)}$$
(3)

式中: k——星型结构的数量。

该合并过程算法可由两个基本步骤完成:

步骤 1: 将  $G^{(1)}$ 中的所有节点 $v_j(j=1,2,\dots,N)$ 逐个加入到网络 G 中,如果某个节点在多个  $G^{(i)}$ 中都有出现,仅保留一次。

**步骤 2:** 将  $G^{(i)}$ 中的所有向边  $e_{ij}^{(i)}$  逐个加入到网络 G 中,如果某条边在多个  $G^{(i)}$ 中都有出现,仅保留一次。

本部分通过采用 3.1 节中的决策方法,提取了某航天产品铆接舱段 1 个重点部件的 20 个制造资源关系。在此基础上将实际的制造关系抽象成为虚拟网络模型,并分类建立了如表 1 所示的 3 种基本的核心结构、次级结构和三级结构关系。通过上文提出的网络组织及创成方法,将 4 个基本的星型结构网络合并成了一个制造资源网络,如下图 3 所示。

#### 2.3. 制造资源网络的特性

为分析制造资源网络的拓扑和物理特性,本文定义了如下7种度量指标:

1) 节点度: 表示节点 v<sub>i</sub>的局部重要性, 记为 k<sub>i</sub>。由入度 k<sup>in</sup><sub>i</sub>和出度 k<sup>out</sup> 两部分组成。

$$k_{i} = k_{i}^{in} + k_{i}^{out} \tag{4}$$

式中,  $k_i^{out} = \sum_{j \in V(i)} a_{ij}$ 表示节点  $v_i$ 作为任务执行方与其他节点连接的数量;  $k_i^{in} = \sum_{j \in V(i)} a_{ij}$ 表示节点作为  $v_i$ 任务需求方与其他节点连接的数量。

2) 鲁棒性:制造资源网络鲁棒性表示该系统抵御风险和抗击破坏的能力,记为 *RB<sub>i</sub>*。代表 SMS 节点 *v<sub>i</sub>*对制造系统稳定性的影响程度,节点 *v<sub>i</sub>*被移除后的网络效率如下式所示:



Figure 3. Network organization and creation methods 图 3. 网络组织及创成方法

$$RB_{i} = \frac{100}{N(N-1)} \sum_{m,n \in N, m \neq n} \frac{1}{d_{mn}^{i}}$$
(5)

式中: d<sup>i</sup><sub>mn</sub> ——移除制造系统节点 v<sub>i</sub>及其关联边后, 节点 v<sub>m</sub>和节点 v<sub>n</sub>之间的最短路径。

**3) 负载系数和负载饱和度:**制造资源网络中,节点v<sub>i</sub>的节点制造任务负载系数记为LD<sub>i</sub>,负载饱和度记为LD<sub>i</sub>,表示节点v<sub>i</sub>向完成邻接节点下达的制造任务的能力。

$$\begin{cases} LD_{i} = \sum_{r \in M} \sum_{j \in N} \left( SC\_sup_{r,ij} \right) \cdot \omega_{r,ij} \cdot \alpha_{r,ij} \\ LD_{i}' = \sum_{r \in M} \sum_{j \in N} \frac{\left( SC\_sup_{r,ij} \right) \cdot \omega_{r,ij} \cdot \alpha_{r,ij}}{A_{r,ij}} \end{cases}$$
(6)

式中: *SC\_sup<sub>r,ij</sub>* ——在第*r*个制造任务执行过程中,制造系统*v<sub>i</sub>*完成*v<sub>j</sub>*下达的制造任务的总成本; *A<sub>r,ij</sub>*在 第*r*个制造任务过程中,制造系统*v<sub>i</sub>*完成*v<sub>j</sub>*下达的制造任务的成本阈值; *v<sub>i</sub>*——*v<sub>i</sub>*完成制造任务的能力阈 值,以制造成本表示(制造成本为时长\*数量); *M*——制造任务的总数。

## 3. 运载器舱段制造资源网络实例分析

## 3.1. 案例构建

以某航天运载器产品典型舱段的装配过程为案例,搜集整理其制造任务关系。提取该类产品的 3 个 重点部段 BOM,125 个对应的制造任务以及 150 个制造执行系统。在此基础上建立网络关系,将实际的 制造任务链条和制造资源服务关系抽象成为虚拟的制造资源网络模型。表 2 给出了部分制造执行系统的 制造资源需求信息及建立的任务链条信息。

为保证大数据量下计算的稳定性,本文采用了复杂网络分析软件 UCINET 进行节点建模和可视化分析。将邻接矩阵和权重矩阵以"节点 + 属性"的关系分别录入到复杂网络分析软件 UCINET 中,并在 NetDraw 可视化软件中显示其网络节点关系,如图 4 所示。红色节点代表制造系统,连线的粗细代表权重。

制造任务内容	边(制造资源需求)	任务执行时长	制造资源数量
	(V001, V010)	2	1
	(V002, V010)	2	1
文架组件制扎	(V003, V010)	2	1
	(V004, V010)	1	1
	(V001, V020)	2	1
	(V002, V020)	4	1
桁条组件制孔	(V005, V020)	4	1
	(V007, V020)	1	1
	(V002, V030)	2	1
	(V003, V030)	4	1
中框类组件制孔	(V004, V030)	4	1
	(V007, V030)	1	1
	(V030, V101)	8	6
	(V020, V101)	8	60
	(V001, V101)	18	1
	(V006, V101)	4	1
1#壁板组件装配	(V008, V101)	8	1
	(V002, V101)	2	1
	(V007, V101)	4	1
	(V0012, V101)	2	1
	(V040, V111)	4	6
	(V101, V111)	4	24
승규 디지 사람 포크	(V001, V111)	24	100
<b></b>	(V030, V111)	8	10
	(V020, V111)	12	22
	(V010, V111)	8	20

## Table 2. Partial manufacturing resource demand and task chain 表 2. 部分制造资源需求及任务链条

## 3.2. 案例分析

1) 节点的度

制造资源网络各节点度如图 5 所示(前 70)。制造服务系统 ZY5002 节点度最高为 210,表示该节点是 核心制造资源。而实际上,该节点为承担舱段壁板组件装配任务的核心设备 - 壁板自动钻铆系统,与分 析结果相符。



**Figure 4.** Topological structure of typical cabin manufacturing resource network for carrier products 图 4. 运载器产品典型舱段制造资源网络拓扑结构



图 5. 节点度分布

2) 鲁棒性特征

制造资源网络中节点的破坏会影响整个网络和局部网络特性。若节点 v<sub>i</sub>被破坏,很可能造成以 v<sub>i</sub>为 集散节点的两个制造系统不能有效进行制造任务交互或使进行制造任务对接的路径增大。图 6 显示当节 点 v<sub>i</sub>失效时网络的鲁棒性曲线。与初始的网络最短路径相比较,节点 V0002,ZY1001,ZY5002 对网络 鲁棒性具有较大影响。结合图 5 中各节点度值分析可知其原因: V0002 是大型核心制造系统,向后续节 点发布大量的制造任务需求,ZY1001、ZY5002 是主要的制造资源。此二类节点在网络中有较大影响力, 要维持制造资源的整体性能,一方面需加强对此二类节点的防护,另一方面保障该类制造资源充足。



3) 负载系数和负载饱和度特性

制造资源网络各节点的负载系数、负载饱和度分别如图7、图8。

由图 7 可知,系统较多节点的负载量达到 2000 小时左右,其中 V3007、ZY1001、ZY7001 节点负载 接近或超过 2500 小时,说明其工作时间较长;结合负载饱和度分析该 3 个节点并未具有较大的负载系数, 说明其资源总量较为充裕; ZY5001、ZY9002 节点负载饱和度接近 1,已经接近饱和负载,不能再继续承 接制造任务。此时,任务下达方双方须适时调整制造任务匹配策略:一方面,下达方可考虑其他制造资 源来完成其制造任务,另一方面,可考虑增加节点资源数量,分摊制造压力。此外,达到饱和状态的节 点需尽量提高产能,降低任务工时损耗,实现降本增效。



Figure 7. Load factor 图 7. 负载系数





## 4. 结论

本文从网络构建与分析的角度,分析了制造资源网络的创成机理,并基于复杂网络理论建立了运载 器舱段制造资源网络模型,进而定义了其结构和物理特性指标。最后,结合某典型运载器舱段制造过程 案例进行抽象化建模与分析,验证了网络分析方法的有效性,并揭示了大型复杂产品装配资源控制的一 些现象与规律。综合本文分析结果,可得出以下结论:

 大量的、离散的制造执行系统通过制造任务关系建立连接,形成制造资源网络,对该网络的演化 过程分析和特性分析有助于制造企业进行制造资源的决策和配置优化;

2)将实际的制造资源集群映射为一个物理上的制造资源网络,并采用复杂网络分析方法研究该网络的整体和局部特性,有助于搜索关键资源节点和任务链接关系,有助于指导制造执行系统的规划,构建以及管控。

## 参考文献

- [1] 檀甜甜, 王贺. 容差分配技术在运载火箭壳段铆接装配中的应用分析[J]. 质量与可靠性, 2018(2): 45-48.
- [2] Watts, D.J. and Strogatz, S.H. (1998) Collective Dynamics of "Small-World" Networks. *Nature*, 393, 440-442. <u>https://doi.org/10.1038/30918</u>
- Barabasi, A.L. and Albert, R. (1999) Emergence of Scaling in Random Networks. Science, 286, 509-512. <u>https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509</u>
- [4] Hu, S.J., Zhu, X., Wang, H., et al. (2008) Product Variety and Manufacturing Complexity in Assembly Systems and Supply Chains. Crip Annals-Manufacturing Technology, 57, 45-48. <u>https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.138</u>
- [5] 孙惠斌, 江平宇. 移动制造协同网络的多要素复杂性分析[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(3): 403-408.
- [6] 刘夫云,祁国宁,杨青海.基于复杂网络的零部件用量预测方法[J]. 机械工程学报, 2006, 40(2): 1-6.
- [7] 何苗,杨海成,敬石开.基于产品分解结构的复杂产品工作分解技术研究[J].中国机械工程,2011,22(16): 1960-1964.