

# 相依网络理论在船舶等级修理工期管理中的应用

覃海波<sup>1,2</sup>, 金家善<sup>1,3</sup>, 陈砚桥<sup>1,2</sup>

(1. 海军工程大学舰船动力工程军队重点实验室, 武汉 430033; 2. 海军工程大学动力工程学院, 武汉 430033;  
3. 海军工程大学科研部, 武汉 430033)

**[摘要]** 在简要介绍相依网络理论的基本概念、基本原理和主要应用方法及成果的基础上,以修理专业网络、修理环节网络、管理层次网络等,解释了船舶等级修理工期的多网络特点,分别以修理网络、器材采购网络、装卸搬运网络和技术指导网络为基准网络,分析了与其他网络之间的相依性,并以算例验证了研究的必要性及方法的可行性。本文为运用相依网络理论分析查找船舶等级修理工期管理中的薄弱环节提供了方法支撑,对于提高船舶等级修理工期的工时强度,确保等级修理计划按期完成等,具有重要意义。

**[关键词]** 相依网络;船舶;等级修理;计划管理

**[中图分类号]** E925 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)05-0090-06

## 1 前言

坞修、小修、中修等船舶等级修理是一项涉及到不同专业、不同环节和不同层次的复杂系统工程。由于各专业、各环节、各层次在其内部都已经是自成体系、运行有序的系统,而围绕具体船舶的等级修理工程,相互之间通过协调,又形成了一个更加庞大的、相互依存的网络。由于相互之间关系密切,因而任何一个节点的功能失常,都有可能影响到周边其他相关节点的正常运行,继而发散至整个网络,最终影响整个等级修理工程的按计划完成。观察以往船舶等级修理的过程,由于备件、技术、设备、场地、牵连工程等客观因素和计划安排不周全等主观因素而被动或主动停工等待的现象比比皆是。这主要是由于船舶等级修理工程十分复杂、修理计划网络编制中需要考虑的因素多、整体优化的难度大。

针对这一难点,本文引用相依网络<sup>[1]</sup>的基本理

论与方法,借鉴相依网络理论在其他领域中推广应用的技术途径,在分析船舶等级修理网络的结构组成及各网络之间的相依性的基础上,探索开展网络分析并发现网络薄弱环节的方法,以期通过相依网络理论在船舶等级修理中的广泛应用,在提高船舶等级修理计划管理能力、缩短船舶等级修理时间、提高船舶的在航率等方面发挥重要的支撑作用。

## 2 相依网络理论的基本要点

相依网络的本质特征就是,网络中的某些节点失效,可能会导致其他网络中与之相依的节点失效,反之亦然<sup>[2]</sup>;失效的节点又会引发新的节点失效,如此反复下去,就像多米诺骨牌一样,会对整个网络系统造成极大的影响<sup>[3]</sup>。现实生活中存有这种“网络的网络”,如电力传输网络和计算机网络,一方面,前者保证后者正常运行的能量供应;另一方面,后者可以对前者进行管理控制,任一网络

**[收稿日期]** 2015-03-05

**[基金项目]** 中国博士后科学基金项目(2013T60921)

**[作者简介]** 覃海波,1991年出生,男,湖北宜昌市人,硕士研究生,研究方向为可靠性、维修性和保障性工程;E-mail:450163133@qq.com

金家善,1962年出生,男,山东青岛市人,教授,博士生导师,主要研究方向为舰船综合保障工程;E-mail:jinjiashan401@163.com

功能的失效都会导致另一个网络的非正常发挥。类似的情况还有电力系统和铁路交通系统,铁路交通系统需要电力系统提供电力支持,而一些火电厂又需要铁路交通系统输送能源与物资。它们既为对方的正常运行提供保障,又受限制于对方。由于网络复杂性不断增长,网络变得越来越脆弱,一个网络受到自身或者外界的扰动可能会导致与之相关的网络失效,进而又会波及到自身,从而会给整个社会带来灾难性的后果。

网络是复杂工程管理的有效手段,在工程项目管控中发挥着重要作用。在所有按照标准化要求管理的工程项目中,无一例外地都会找到工程的计划网络图。使管理者可以从中一目了然地掌握工程的主要工作项目、重要的子工作项目、各工作项目的进度要求和工作项目之间的先后关系等工程的全貌,对工程实施有效的指挥和控制。

早期的网络图主要是针对一个组织机构承担一项复杂工程的情形,按照系统工程领域的工作分解结构的相关要求,先将整个工程项目分解为多个工作项目,再依据各工作项目所需的时间和各工作项目之间的相互依存关系,建立工作项目顺序,形成计划网络。现代大型复杂工程往往是多专业集成的结果,工程的参与者不再是一个具体的工艺要素,而是以独立的组织机构出现在管理者的面前。由于每一个组织机构内部都已经形成了固定的运行机制,在组织管理和业务执行层面上都已经形成了有序的网络,不可能因为参与一艘船舶的等级修理而改变原先的网络结构,只能按照等级修理的总体要求,通过明确各组织机构的任务和时限及与其他组织机构的接口要求,在各组织之间建立起相互支撑和依存的关系。因此,船舶等级修理的网络结构,只能是包含诸多子网络的大型复杂相依网络。

### 3 相依网络理论的主要应用

近几年,在相依网络技术应用方面,在相依网络鲁棒性研究领域、社会基础设施领域中,可以见诸大量的报道,在组织管理领域中,也可以见到一些报道,说明该理论和技术正在不断成熟和推广应用。

1)在相依网络鲁棒性研究领域,刘润然<sup>[9]</sup>和 Cheng Zunshui 等<sup>[9]</sup>对相依网络在几种不同的蓄意攻击策略下的级联失效过程进行了研究,通过分析不同攻击策略的特征,为有效保护相依网络免遭受攻

击提供了思路。文献[6]通过分析由无标度网络组成的相依网络,发现网络度分布越宽,则渗流阈值  $p_c$  就越大,即度分布越宽,网络鲁棒性越高。文献[7]也证明了当相依网络中相依节点的度分布相同时,网络度分布越宽,网络鲁棒性越高,由此可知相依网络之间的相依关系与网络节点的度有关,这也为人们建立相依网络理论分析模型提供了一种方法——基于度的耦合方法。

2)在社会基础设施领域,Wang Shuliang<sup>[8]</sup>等以电力-供水网络为对象,提出了4种不同的耦合方法,采用3种不同的攻击方式建立相依网络理论分析模型,证明基于介数耦合的方法使得网络的鲁棒性最佳,并提出了一种新的度量网络关键节点的测度。在此基础上,文献[9]以电力-燃气管道网络为例,采用类似的方法研究了最小化级联失效的耦合方法,发现基于度耦合时网络鲁棒性最佳,且网络攻击强度与容忍参数有关。陈军<sup>[10]</sup>依据交通网络模型提出了一种多层矢量评价方法,并对网络抗毁性和鲁棒性进行了分析。文献[11]针对弹性需求下路段相互影响的交通配流问题进行了研究,通过分析网络均衡条件,建立了与均衡条件等价的不等式模型。

3)在组织管理领域中,杨婧<sup>[12]</sup>等针对工程项目管理中未将组织和项目结合考虑的问题,提出了考虑工程项目组织-任务相互作用关系的网络模型,首次在项目组织管理领域中应用了相依网络抗毁性分析方法,为项目管理中的组织结构设计,以及项目的时间/成本风险管理等提供了新的思路。文献[13]基于指挥控制网络的级联失效特点和拓扑特征,提出了一种带有可调节参数的指挥控制网络级联失效模型。莫俊文<sup>[14]</sup>通过对工时变量相依关系的调查分析,构建能描述工时变量之间相依结构的图形模型,建立合理的相依性预测指标体系,并在工时相依的情形下研究工期问题及进度计划的动态更新。

## 4 船舶等级修理中的主要网络及其相依性分析

### 4.1 船舶等级修理中所遇到的主要网络

#### 4.1.1 修理专业网络

首先,由于船舶等级修理涉及到船体水下部件修理、船体结构修理、船舶管系和线缆修理、机械设备修理、电气设备修理、电子设备修理、武器装备修理等不同专业,且各专业之间必须协调有序,因而

需要使用网络将各专业之间的工作关系表述清楚。

其次,由于各不同专业的修理任务可以按照本专业装备及其所在的部位划分为多个具体的修理项目,而一些修理项目可能允许独立施工,但更多的修理项目可能必须与其他的修理项目之间有个先后的顺序,因此,为了安排好专业内部的所有修理活动,必须形成施工网络。

最后,在每个具体的修理项目中,需要按照维修所规定的技术要求划分为多个修理步骤。在所有步骤中,有些步骤可以独立开展,有些在某种条件下允许平行开展,但大部分步骤存在先后关系。为了使一个维修项目的工作安排有序,就需要形成具体的工艺网络。例如,先拆卸端盖并打开壳体,然后有顺序地取出需要修理或更换的每一个零部件,继而分头开展故障零部件的修理或加工制作,最后按顺序回装各零部件、装复壳体与端盖,这个过程就是一个典型的工艺网络。

#### 4.1.2 修理环节网络

孤立观察每一项具体的专业修理任务,往往都涉及到现场修理施工、车间修理施工、维修器材筹措、施工场地保障、装卸搬运保障、能源和排放保障等多个环节。这些环节有时存在先后顺序,有时需要同时进行,从修理的过程上也形成一个网络。

#### 4.1.3 管理层次网络

无论从整体、系统、设备还是一项具体的维修任务,无论是现场施工、车间施工还是器材筹措等,都可能涉及到指挥管理、技术指导、现场施工等多个层次。因为没有指挥管理层的决策、没有技术指导层提出明确的技术要求和把关,无论是修理操作还是器材采购,现场施工层不可能擅自行动;没有现场的反馈和指挥管理层的指令,技术指导层也无需漫无目的开展工作。因此,这一套行动指令、技术方法、现场情况等信息传输的过程也形成了网络。

### 4.2 船舶等级修理网络的相依性分析

实际上,在分析前述3类网络时,已经看到了各修理网络之间的相依性。由于相依性的内容非常多,无法枚举,因而以如下的典型情况说明相依性。

1)以修理网络为基准,首先,每一项维修任务都与执行者自身体上层的组织管理网、技术指导网密切相关,因为缺少了指令和指示,执行层无法开展工作;其次,各项维修活动还可能与维修器材保障网、施工场地保障网、装卸搬运保障网、能源和排放保障网等网络之间具有相关性,例如,在修理网络

中的某项修理任务从自身进度和技术难度上讲可能不是关键的,但如果所需更换的器材由于种种原因而不及及时到货,就有可能转化为关键任务;再次,除了与外部网络的相关性之外,在修理网络内部,也由于相同或不同专业的不同任务之间存在保障或约束关系而具有相关性。例如,由于空间的限制,类似于拆检齿轮箱等对环境要求严格的修理项目,可能要求其他修理项目全部完工后才能开展;而由于保障条件的要求,一些需要消防保障的动火修理项目,可能要求消防系统的所有修理工程恢复后才能开展。

2)以器材采购网络为基准,同样,每一项采购任务必须与执行者自身体上层的组织管理网、技术指导网密切相关,因为缺少了指令和指示,执行层得不到经费保障和技术支持,无法与外部签订采购合同;其次,与修理网络密切相关,因为需要修理网络为之提供器材的种类、数量和到货时间等信息;再次,与外部的器材库存网络、生产销售网络、运输网络等密切相关,他们是采购合同的接收方、也是器材的供应的执行方。

3)以装卸搬运保障网络为基准,除了与指挥管理网络相关外,还与修理网络的执行层相关,因为只有在修理网络的执行层需要时,装卸搬运保障网络的执行层才需要行动。

4)以技术指导机构网络为基准,首先,技术指导机构的执行层网络需要得到本机构的管理层网络的指令才能开展工作,因而在机构网络内部便是相依网络;其次,管理层需要依据外部的需求和执行层的状态才能做出指令,因而与外部机构的管理层相依;再次,执行层需要得到修理作业等机构执行层的现场帮助才能做出技术指导意见,因而与外部机构的执行层相关。

## 5 案例分析

### 5.1 维修网络图

本维修案例基于船舶汽轮机中修工程,选取了前机炉舱部分机械装置维修过程,具体涉及到轴系附件、减速器、自控系统、操作装置、汽轮机组等子工程以及器材采购过程。

各子工程的网络图如图1~图5所示,器材采购过程如图6所示。各图中的实线表示子工程内的具体施工过程,线边的数字表示工期期望值;点划线表示子工程内的等待关系;虚线则表示相依关系;

网络图中节点表示与之相连的前一工序结束和  
后一工序开始的时间临界点;节点编号前两位数字代

表维修机械编号,三四位为维修工序编号,若有五  
六位数字,则表示相应的并行工序。

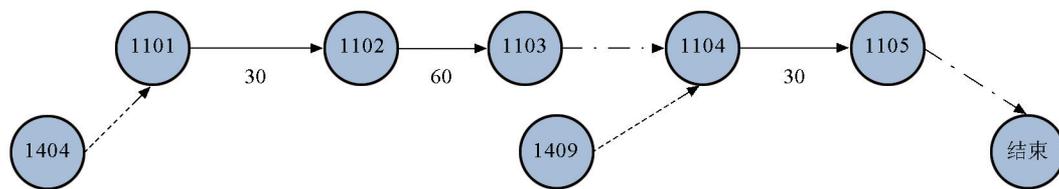


图1 减速度器维修网络图

Fig. 1 Network chart of repairing of the reducer

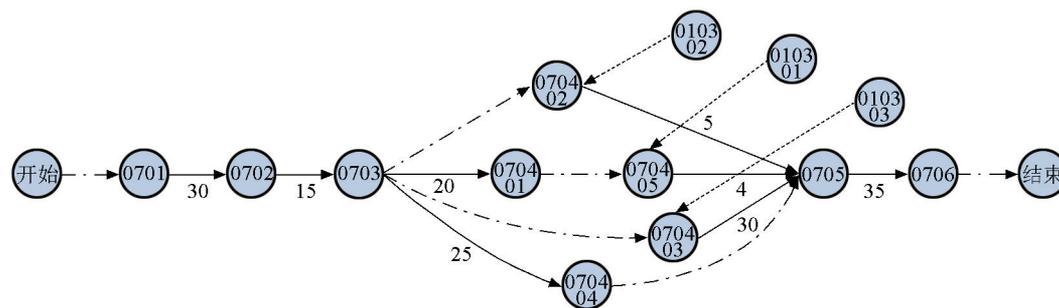


图2 轴系附件维修网络图

Fig. 2 Network chart of repairing of the attachments to set of axes

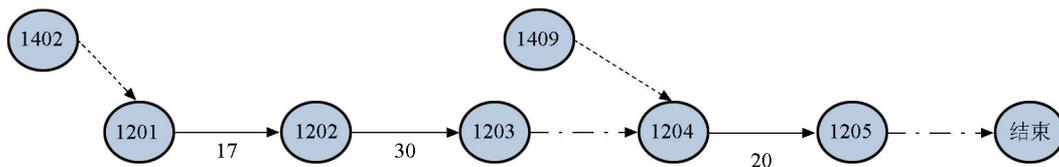


图3 操作装置维修网络图

Fig. 3 Network chart of repairing of the operating equipment

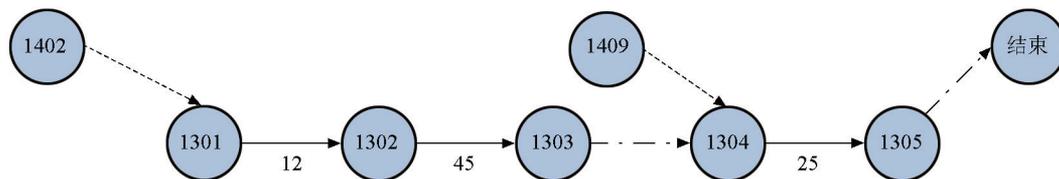


图4 自控系统维修网络图

Fig. 4 Network chart of repairing of the automatic control system

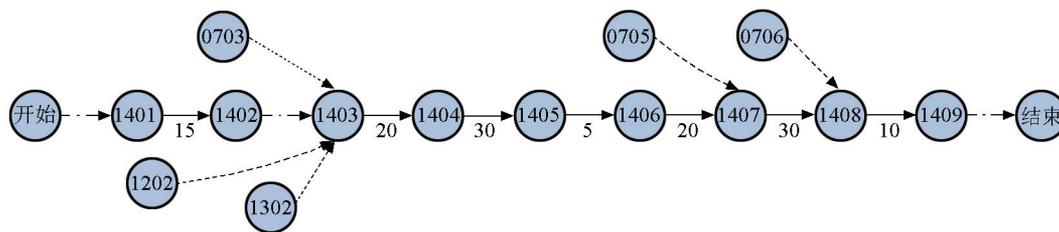


图5 汽轮机组维修网络图

Fig. 5 Network chart of repairing of the turbine set

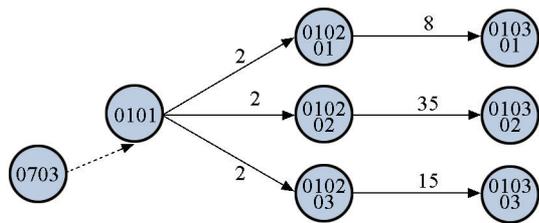


图6 备件采购供应网络图

Fig. 6 Network chart of spare parts purchasing and supply

以图1减速器维修网络图为例。拆解低压汽轮机结束(节点1404)后,开始拆解减速器(节点1101),由于机械构造原因,使节点1404至节点1101存在维修场地相依,箭线为虚线;节点1101至减速器拆解结束(节点1102)为具体的施工过程,箭线为实线,工期期望值为30;同理,开始修理减速器(节点1102)至减速器修理结束(节点1103)工期期望值为60;节点1103至开始装配减速器(节点1104)之间为子工程内的等待关系,为点划线,因为在高压汽轮机装配结束(节点1409)之前,由于机械构造原因,无法开始装配减速器(节点1104),因而节点1409至节点1104为维修场地相依,为虚线;节点1404至减速器装配结束(节点1405)为具体施工过程,工期期望值为10。

## 5.2 工期仿真及结果分析

采用随机仿真的办法实施修理工期的仿真分析。首先,以工期均值的15%作为工期的方差,采用随机抽样的方法,确定每一个施工过程或器材采购过程所需的具体时间;然后按照网络的逻辑关系并考虑网络之间的相依性,从第一个环节开始,逐次计算后续环节的具体工期,直至结束,从而得到总工期。

以图1减速器维修网络图为例,介绍考虑相依性的减速器维修工期的计算方法。令总维修工作开始到某工序结束的维修时间为 $T$ ,某单步工序的维修时间为 $t$ 。

1)节点1404至节点1101为场地相依,属于不消耗时间的虚工序,因此 $T_{1101} = T_{1404}$ 。

2)由节点1101至节点1103两个工序均为具体施工过程,因此 $T_{1103} = T_{1101} + t_{1101} + t_{1102}$ 。

3)由节点1103至节点1104为子工程内的等待关系,节点1104后续工序的开始需要节点1409完成后才能进行,因此 $T_{1104} = \max\{T_{1103}, T_{1409}\}$ 。

4)由节点1104至节点1105为具体施工过程,因此 $T_{1105} = T_{1104} + t_{1104}$ ;且 $T_{1105}$ 即为减速器维修的工期。

采用相同的方法可以计算图2~图6所示其他单维修网络的维修工期。本案例中各个单维修网络之间为并行关系,因此总维修工期为各个单网维修工期的最大取值。通过分析各个网络之间的整体相依性,可确定总工期在169~217,均值为191,关键工程是减速器维修。

不考虑相关性的总工期在111~146,均值为127,关键工程是轴系附件维修。两者的对比结果说明,等级修理中工序之间的相依性对整个维修工程的工期影响是显著的,在进行等级修理工期优化研究时,考虑工期之间的相依性是必要的。

## 6 结语

船舶等级修理工作内容多、工作环节多、专业类型多、参与机构多、组织管理复杂,极有可能因为网络计划安排不当而影响施工进度,继而影响到船舶的修理工期和在航率。由于问题的复杂性,要全面、正确地绘制出包括场地保障、器材保障、修理施工、组织管理等所有要素和环节的修理计划管理网络,并在网络上开展工期分析和优化等,需要各不同专业与职能的大量人员参与其中进行协调,不仅投入时间很多,且易出差错。

由于相依网络理论和方法具有先单专业或单事务独立建模、继而开展两两间相依性确认、最后以相依性为桥梁和约束开展全工程网络综合优化的优势,因此,针对船舶等级修理体系所存在的多专业、多环节和多层次特点和由此带来的工作内容多、协调要素多等计划安排工作难点,本文引入相依网络理论,介绍了在其他领域中的应用成果并以其作为范例,初步探索了在船舶等级修理中应用的网络建立与分析方法等问题,并以具体算例证明了开展相依网络理论及应用研究的必要性,为进一步的研究和应用奠定了基础。仅从说明相依网络理论及应用的层面上讲,文章达到了预期的目的。但从算例中可以发现,文章所开展的算例研究尚处于“强相关”阶段,而真正的相关性研究,将重点突破“部分相关”问题下的网络优化问题。

## 参考文献

- [1] 赵娟,郭平,邓宏钟,等.节点相依失效下的方格网络可靠性建模与分析[J].系统工程与电子技术,2013,35(7):1576-1583.
- [2] Wang Jianwei, Wu Yuedan, Li Yun. Attack robustness of cascad-

- ing load model in interdependent networks [J]. International Journal of Modern Physics C, 2014, 26(3): 155030.
- [3] Helbing D. Globally networked risks and how to respond [J]. Nature, 2013, 497(7447): 51–59.
- [4] 刘润然, 贾晓春, 章剑林, 等. 相依网络在不同攻击策略下的鲁棒性[J]. 上海理工大学学报, 2012, 34(3): 235–239.
- [5] Cheng Zunshui, Cao Jinde, Tasawar. Cascade of failures in interdependent networks with different average degree [J]. International Journal of Modern Physics C, 2014, 25(5): 1440006.
- [6] Buldyrev S V, Parshani R. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks [J]. Nature, 2010, 464(7291): 1025–1028.
- [7] Buldyrev S V, Shere N W. Interdependent networks with identical degrees of mutually dependent nodes [J]. Physical Review E, 2011, 83(1): 16112–16120.
- [8] Wang Shuliang, Liu Hong, Chen Xueguang. Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems under edge attack strategies [J]. Safety Science, 2013, 51(1): 328–337.
- [9] Wang Shuliang, Liu Hong, Chen Xueguang. Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems: A methodological framework [J]. Physica A, 2011, 391(11): 3323–3335.
- [10] 陈 军. 多层矢量物联网交通网络抗毁性及鲁棒性分析[J]. 科技通报, 2014, 30(8): 35–37.
- [11] 李学全, 郭 啸. 弹性需求下路段相互影响的交通网络均衡模型[J]. 数学理论与应用, 2007, 27(2): 115–117.
- [12] 杨 婧, 陈英武, 沈永平. 基于相互作用网络的大型工程项目组织结构风险分析[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(10): 1966–1973.
- [13] 张迎新, 陈 超, 徐成涛, 等. 指挥控制网络级联失效模型研究[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(90): 3245–3248.
- [14] 莫俊文. 工程进度网络中工时的相依性研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.

# Applications of interdependent networks theory in the schedule management of warship level repairing

Qin Haibo<sup>1,2</sup>, Jin Jiashan<sup>1,3</sup>, Chen Yanqiao<sup>1,2</sup>

(1. Military Key Laboratory for Naval Ship Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 3. Department of Researching, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**[Abstract]** After the basic concepts, the basic principles and the main application methods and achievements of interdependent networks theory were briefly introduced, the multi-network characteristics in ship level repairing were explained, with the professional repairing networks, the repairing link networks and the management level networks as the case. The repairing networks, the equipment purchasing networks, the loading and moving networks and the technical guidance networks were respectively taken as the standard networks, whose interdependency between other networks was analyzed. In addition, the necessity of the study and the feasibility of the methods were verified by an example. This paper might provide methodological support for analyzing and finding weak links in the schedule management of ship level repairing, which means a lot to improving work intensity of ship level repairing and ensuring the ship level repairing finished on schedule.

**[Key words]** interdependent networks; ship; level repairing; program management