

DOI:10.11918/202103087

面向任务的载人潜水器人机交互信息结构分析

王卉¹,余隋怀¹,陈登凯¹,叶聪²,张伟²,朱梦雅¹

(1. 工业设计与人机工效工业和信息化部重点实验室(西北工业大学),西安 710072;
2. 中国船舶科学研究中心,江苏 无锡 214000)

摘要: 为构建复杂任务下的载人潜水器人机交互信息结构模型,提高潜器驾驶舱设计人员对潜航员视角下任务信息认知过程的理解,将决策阶梯模型与 DEMATEL-ISM 方法相结合,提出一种含影响因子的全要素层级结构模型构建方法。以载人潜水器某近底作业为对象,运用决策阶梯模型分析潜航员任务信息需求及处理过程,识别人机交互信息要素及关系。基于 DEMATEL 计算综合影响矩阵及属性特征值,结合研究目的改进整体影响矩阵阈值计算方法及可达矩阵判别式,得到含影响因子的可达矩阵。通过对抗轮换层级抽取方法,抽取原因-效应属性稳定的层级结构,引入模糊算子对计算影响值骨架矩阵,结合层级结构构建含影响值人机交互信息结构模型。结果表明:研究得到由 31 项交互信息要素及关系构成的 6 层有向加权结构模型,并通过方案对比证明所提方法在保证节点完整、优化层级结构及量化要素关系方面的有效性;所得模型明确了人机交互信息要素属性特征、致因关系及致因程度,对复杂任务下基于潜航员认知的人机交互信息处理过程具有较好的解释力,能够为载人潜水器驾驶舱人机交互信息设计提供理论依据。

关键词: 载人潜水器;人机交互;信息结构;决策阶梯;DEMATEL-ISM

中图分类号: TB18

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)12-0055-10

Mission-oriented human-machine interaction information structure analysis of manned submersible

WANG Hui¹, YU Suihuai¹, CHEN Dengkai¹, YE Cong², ZHANG Wei², ZHU Mengya¹

(1. Key Laboratory for Industrial Design and Ergonomics of Ministry of Industry and Information Technology (Northwestern Polytechnical University), Xi'an 710072, China; 2. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214000, Jiangsu, China)

Abstract: To construct a human-machine interaction (HMI) information structure model of manned submersible under complex tasks and improve the understanding of submersible cockpit designers on the cognitive process of oceanauts for mission information, this paper proposes a construction method of all elements hierarchical structure model with impact factors based on decision ladder (DL) and DEMATEL-ISM method. Taking a near-bottom operation of a manned submersible as the object, DL was used to analyze the task information demand and processing process of the oceanaut, and identify the elements and relations of HMI information. The comprehensive impact matrix and attribute eigenvalues were calculated based on DEMATEL. Combined with the research purpose, the threshold calculation method of the overall impact matrix and the discriminant formula of the reachability matrix were improved to obtain the reachability matrix containing impact factors. Then, a stable cause-effect hierarchy structure was extracted by the method of anti-rotation hierarchy extraction, and a fuzzy operator pair was introduced to calculate the skeleton matrix with influence value. The HMI information structure model containing influence value was constructed by combining the hierarchical structure. Results show that a six-layer directed weighted structure model consisting of 31 interactive information elements and their relations was obtained, and the effectiveness of the proposed method in ensuring node integrity, optimizing the hierarchical structure, and quantifying factor relations was proved through scheme comparison. The obtained model defines the attribute characteristics, causative relationship, and causative degree of HMI information elements, which has good explanatory power for the HMI information processing process based on the cognition of the oceanaut under complex tasks and can provide theoretical basis for the design of HMI information of manned submersible cabin.

Keywords: manned submersible; human-machine interaction; information structure; decision ladder; DEMATEL-ISM

收稿日期: 2021-03-22

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0300600)

作者简介: 王卉(1991—),女,博士研究生;

余隋怀(1962—),男,教授,博士生导师;

陈登凯(1975—),男,教授,博士生导师

通信作者: 陈登凯, chendengkai@nwpu.edu.cn

载人潜水器驾驶舱系统结构复杂,各子系统相互关联,潜器驾驶作业过程中潜航员除机械操纵外,还要对舱室内任务相关各类信息资源进行管理与监控,是一个密集人机交互过程^[1]。由于长久的地面

生活,人们习惯相对于水平面的视距判断,在视域有限、地况复杂的深海环境下进行立体空间航向、航距、避碰等信息的准确判断较为困难,为潜航员任务信息处理带来了风险与挑战^[2]。因此研究载人潜水器潜航员认知内面向任务的人机交互信息结构,对优化人机交互过程具有重要意义。

目前载人潜水器相关研究多侧重于材料、结构及机械性能等方面^[3-5],在人因效能方面,有研究从生理舒适性角度,通过优化舱内物理环境来提升人因效能,例如张帅等^[6]针对深海载人潜水器强约束条件下舱室空间舒适性,提出基于虚拟仿真技术的舱室可视化空间舒适性多源复合评估方法。李洋洋等^[7]对人员下肢循环与肌肉疲劳展开研究,以改善潜航员生理舒适性;或从潜航员脑力负荷与信息认知角度出发,设计实验研究不同任务环境下潜航员脑力负荷。例如石路等^[8]通过分析不同界面位置下人员行为学指标和眼动数据,为舱室界面设计提供参考。殷昊翔等^[9]模拟驾驶作业对潜航员脑力负荷影响,为潜航员的实际训练提供参考。但较少有研究从引起潜航员认知负荷的根源,即实际任务过程中潜航员对交互信息的认知与处理的角度开展人因相关研究。

因此本文从多要素复杂系统分析的角度,提出面向任务的载人潜水面交互信息结构分析方法,构建潜航员认知基础上的载人潜水面交互信息系统多层递阶结构模型,从模型结构特征、要素层级关系、影响脉络及权重等方面进行讨论,为深入分析潜航员对任务相关交互信息的认知与处理,合理化人机交互过程提供理论依据。

1 面向任务的载人潜水面交互信息结构分析方法

从直观角度看,复杂系统可划分为复杂拓扑网络系统,如电网系统^[10]、交通运输网^[11]等,和可用拓扑结构描述的无显著网络特征复杂系统,即载人潜水器驾驶舱一类的舱室人机交互信息系统^[12]。从多要素复杂系统的视角审视驾驶舱人机交互信息空间为载人潜水面交互信息处理过程研究提供了更多的研究方法途径。

载人潜水器驾驶舱任务相关人机交互信息要素繁多且要素间关系复杂多变,为尽可能还原实际任务中潜航员信息处理过程,克服因缺乏客观理论依据带来的信息获取偏差,本文引入决策阶梯模型(Decision ladder, DL)作为获取任务信息要素及关系的模板。DL 是认知任务分析(Cognitive work analysis, CWA)方法中的重要模型,它将用户对任务

信息的处理视为一个建设性过程^[13],并被广泛应用于潜艇、飞机、汽车等驾驶舱等安全关键人机系统决策任务分析中,被作为记录决策任务信息认知序列的工具^[14]。因此,本文借助 DL 识别决策任务相关信息的优势,依据实际任务流程规范获取载人潜水器任务相关人机交互信息要素及要素关系。

复杂系统要素定量分析主要有因子分析法、层次分析法、主成分分析法、实验室决策分析方法(Decision-making trial and evaluation laboratory, DEMATEL)、解释结构模型(Interpretative structural modeling method, ISM)法等,与其他方法相比,DEMATEL-ISM 方法结合了 DEMATEL 在区分要素属性特征、计算要素间综合影响关系方面的优势及 ISM 层次划分功能,可有效依据要素间关系^[15],得到结构明确,脉络清晰的层级结构^[16],满足本文对人机交互信息结构的分析需求。由已有 DEMATEL-ISM 相关研究可以看出,该方法在可达矩阵计算中,较多的可达矩阵判别式模糊了要素间的影响程度,且其修正因子的计算,在简化结构的同时导致了系统要素及关系的缺失,无法体现出各系统组成要素间因果影响脉络及致因程度。

因此,本文深入挖掘 DL、DEMATEL 及 ISM 方法在处理复杂系统要素及要素间关系的优势,提出基于 DL-DEMATEL-ISM 集成方法的载人潜水面交互信息结构研究架构,以某任务中海底环境信息、潜器状态信息及任务相关信息为输入,运用决策阶梯模型结合潜航员实际任务过程中的信息需求与处理过程,建立载人潜水面交互信息要素关系矩阵,基于 DEMATEL-ISM 方法,改进整体影响矩阵阈值计算及可达矩阵判别式,运用对抗轮层级抽取方法,并引入模糊算子对计算影响值骨架矩阵,最终得到面向任务的载人潜水面交互信息多层递阶结构模型,具体研究架构如图 1 所示。

2 面向任务的载人潜水面交互信息结构分析过程

依据载人潜水面交互信息结构分析架构,结合 DL、DEMATEL-ISM 方法计算过程,得到本文研究流程,如图 2 所示。

2.1 基于 DL 获取人机交互信息要素及关系

2.1.1 人机交互信息要素获取

DL 反映了专家用户执行任务时基于规则的行为过程,由任务活动(矩形)及活动信息结果(椭圆形)组成^[17],可分为 8 项任务信息处理活动阶段:任务激活、环境观察、系统状态判断、系统备选状态评估、系统选择状态评估、目标状态确认、任务定义、任务流程^[18],如图 3 所示。

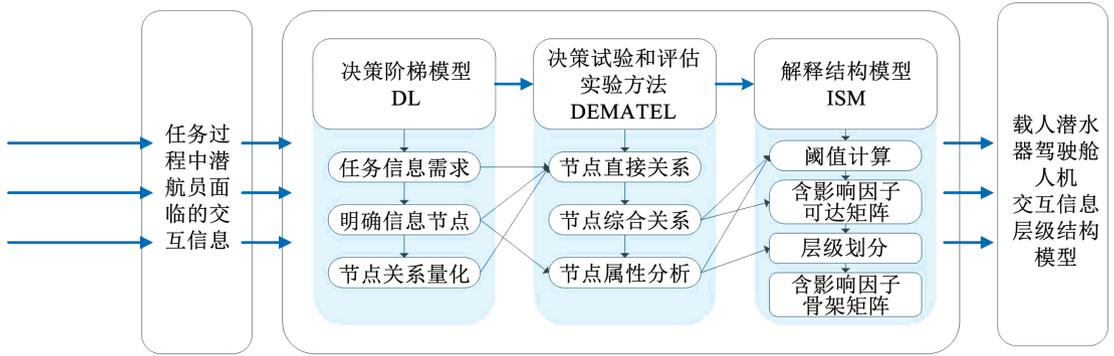


图 1 面向任务的载人潜水器人机交互信息系统结构分析架构

Fig. 1 Analysis framework of structure of mission-oriented manned submersible HMI information system

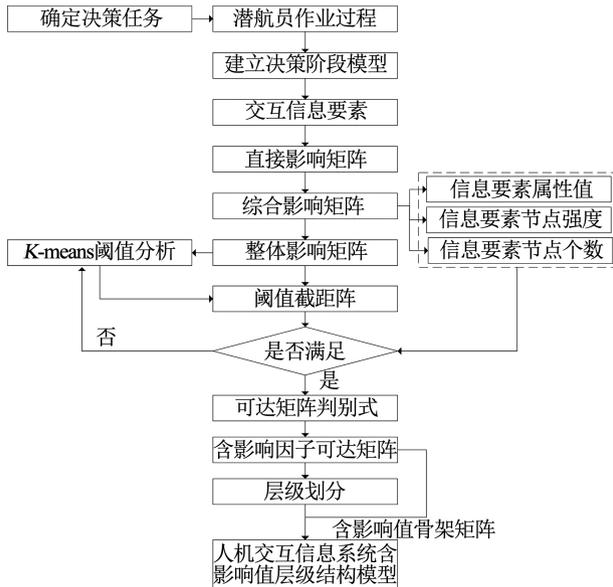


图 2 载人潜水器人机交互信息系统结构分析流程

Fig. 2 Analysis process of structure of mission-oriented manned submersible HMI information system

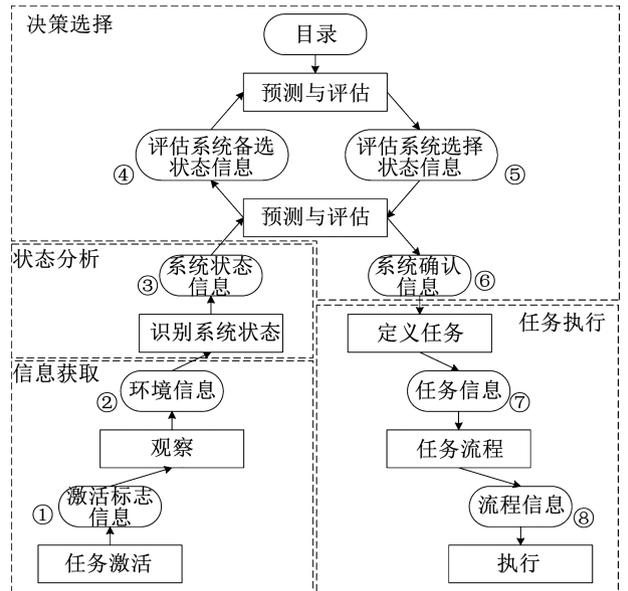


图 3 决策阶梯

Fig. 3 Decision ladder

依据 DL 模型,邀请潜航员综合任务操作规则及实际任务流程,构建某任务决策阶梯,明确任务活动相关信息需求,将信息处理阶段记为 P_k ($k = 1, 2, \dots, 8$),共 8 个阶段。结合载人潜水器舱室人机

交互面板及相关文件,将信息要素名称修正为专业表达,得到面向任务的载人潜水器人机交互信息要素集 $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_{31}\}$,见表 1。

表 1 任务环境下载人潜水器舱室人机交互信息要素

Tab. 1 HMI information elements of mission-oriented manned submersible

编号	信息要素	符号	编号	信息要素	符号
1	大地坐标	Z_1	17	潜器航向	Z_{17}
2	深度	Z_2	18	潜器航速	Z_{18}
3	高度	Z_3	19	横、纵倾参数	Z_{19}
4	避碰(观察窗)	Z_4	20	潜器姿态	Z_{20}
5	避碰(水声通信 PC)	Z_5	21	推进器状态	Z_{21}
6	深海温度、盐度	Z_6	22	电气设备状态	Z_{22}
7	海底地貌(成像声呐 PC)	Z_7	23	液压系统状态	Z_{23}
8	海底地貌(观察窗)	Z_8	24	机械手控制	Z_{24}
9	海底暗流	Z_9	25	机械手运转状态	Z_{25}
10	与作业目标相对位置	Z_{10}	26	压载	Z_{26}
11	航行控制	Z_{11}	27	左右舷云台控制	Z_{27}
12	发现作业样本	Z_{12}	28	灯光调节	Z_{28}
13	观察作业目标(观察窗)	Z_{13}	29	水声通信信息	Z_{29}
14	观察作业目标(舱内显示器)	Z_{14}	30	生命支持系统信息	Z_{30}
15	母船位置、速度	Z_{15}	31	故障检测与报警信息	Z_{31}
16	潜器相对母船位置	Z_{16}			

2.1.2 建立直接影响矩阵

基于信息要素集 Z ,邀请潜航员根据实际任务操作流程中的信息需求,确定 P_k 阶段任意两要素间的逻辑关系,以 $a_{ij}^k (i=1,2,\dots,31; j=1,2,\dots,31)$ 表示任务阶段 P_k 内 Z_i 对 Z_j 的逻辑影响关系,定义如下:

$$a_{ij}^k = \begin{cases} 1, Z_i \text{ 对 } Z_j \text{ 存在逻辑影响关系} \\ 0, Z_i \text{ 对 } Z_j \text{ 不存在逻辑影响关系} \end{cases} \quad (1)$$

遍历阶段 P_k 所有信息要素,依据式(2)得到该阶段信息要素直接影响判断矩阵 A^k ,即

$$A^k = (a_{ij}^k)_{31 \times 31} \quad (2)$$

式中,当 $i=j$ 时, $a_{ij}^k=0$,表示指标对自身无影响。

综合各阶段要素影响关系,依据式(3)得到整个任务中信息要素直接影响矩阵 A ,即

$$A = \sum_{k=1}^8 A^k = (a_{ij})_{31 \times 31} \quad (3)$$

式中, a_{ij} 为 Z_i 对 Z_j 的直接影响值。

对直接影响矩阵 A 进行规范化处理得到规范化直接影响矩阵 C ,即

$$c_{ij} = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq 31} \sum_{j=1}^{31} a_{ij}} a_{ij} \quad (4)$$

式中: c_{ij} 为该任务下 Z_i 对 Z_j 的直接影响程度规范值, $\max_{1 \leq i \leq 31} \sum_{j=1}^{31} a_{ij}$ 为矩阵 A 各行之和最大值, $0 \leq c_{ij} < 1$,

且 $i=j$ 时, $c_{ij}=0$ 。

2.2 基于 DI-DEMATEL-ISM 的人机交互信息综合影响矩阵计算及分析

2.2.1 计算综合影响矩阵

在复杂系统中,各要素间除直接影响外还存在相互波及等间接影响,结合 DEMATEL-ISM 集成方法,依据式(5),即

$$T = C(I - C)^{-1} \quad (5)$$

得到人机交互信息综合影响矩阵 T ,式中 I 为单位矩阵。

2.2.2 信息要素属性分析

根据式(6)~(9)计算出该任务下信息要素 Z_i 的原因度 m_i 和中心度 n_i ,即:

$$f_i = \sum_{j=1}^{31} t_{ij}, (i = 1, 2, \dots, 31) \quad (6)$$

$$e_i = \sum_{j=1}^{31} t_{ji}, (i = 1, 2, \dots, 31) \quad (7)$$

$$m_i = f_i + e_i, (i = 1, 2, \dots, 31) \quad (8)$$

$$n_i = f_i - e_i, (i = 1, 2, \dots, 31) \quad (9)$$

式中:影响度 f_i 为综合影响矩阵 T 中 Z_i 所在行行和,被影响度 e_i 为矩阵 T 中 Z_i 所在列列和,信息要素特征值计算结果见表 2。

表 2 载人潜水器人机交互信息要素 DEMATEL 分析结果

Tab.2 DEMATEL analysis results of HMI information elements of manned submersible

信息要素	影响度	被影响度	中心度	原因度	信息要素	影响度	被影响度	中心度	原因度
Z_1	0.123 4	0.111 1	0.234 6	0.012 3	Z_{17}	0.123 4	0.680 0	0.803 4	-0.556 5
Z_2	0.358 0	0.111 1	0.469 1	0.246 9	Z_{18}	0.123 4	0.411 2	0.534 7	-0.287 7
Z_3	0	0.124 8	0.124 8	-0.124 8	Z_{19}	0.123 4	0.642 9	0.766 4	-0.519 5
Z_4	0.989 5	0.333 3	1.322 8	0.656 2	Z_{20}	1.684 2	0	1.684 2	1.684 2
Z_5	0.470 6	1.418 8	1.889 4	-0.948 2	Z_{21}	0.111 1	0.606 5	0.717 6	-0.495 4
Z_6	0	0.123 4	0.123 5	-0.123 5	Z_{22}	0	0.178 5	0.178 5	-0.178 5
Z_7	0.111 1	0.123 4	0.234 6	-0.012 3	Z_{23}	0	0.300 1	0.300 1	-0.300 1
Z_8	0.234 5	0.111 1	0.345 7	0.123 5	Z_{24}	0.222 2	0.395 0	0.617 3	-0.172 8
Z_9	0.441 8	0.111 1	0.552 9	0.330 7	Z_{25}	0.111 1	0.155 0	0.155 0	-0.155 0
Z_{10}	0.827 2	0.333 3	1.160 6	0.493 9	Z_{26}	0	0.306 0	0.417 1	-0.194 9
Z_{11}	0.988 1	1.367 5	2.355 7	-0.379 4	Z_{27}	0	0.135 8	0.135 8	-0.135 8
Z_{12}	0.776 1	0	0.776 1	0.776 1	Z_{28}	0	0.234 6	0.234 6	-0.234 6
Z_{13}	0.744 9	0	0.744 9	0.744 9	Z_{29}	0	0	0	0
Z_{14}	0.246 9	0.222 2	0.469 1	0.024 7	Z_{30}	0	0	0	0
Z_{15}	0	0.138 6	0.138 5	-0.138 5	Z_{31}	0	0	0	0
Z_{16}	0.111 1	0.246 9	0.358 0	-0.138 5					

2.3 人机交互信息关系的可达矩阵计算及层级划分

2.3.1 可达矩阵计算

在综合影响矩阵 T 基础上,依据式(10)得到整体影响矩阵 H ,即

$$H = I + T \quad (10)$$

式中, I 为单位矩阵。

基于整体影响矩阵 H ,确定修正因子 λ ,以舍去指标间影响程度较小的值,简化系统结构。

λ 若取值过大,导致系统结构过于简单,若取值过小,指标间关系过于复杂,结构表达不清晰。因

此,为不影响信息要素完整性并保证系统结构清晰,运用无监督学习算法 K -means 对 λ 阈值集合进行聚类分析,参照李克特量级确定 K 均值聚类计算质心数 $k=5$,依照“小、较小、一般、较大、大”5 个等级进行组别划分,得到阈值集合的类别预测及聚类中心值。依据聚类计算结果,确定修正因子 λ 取值为 0.000 4、0.076 9、0.188 0、0.333 3、0.478 6,见表 3。

表 3 可达矩阵修正因子计算结果

Tab.3 Calculation results of reachable matrix correction factor

类别	影响度	质心	λ 值
1	小	0.016 7	0.000 4
2	较小	0.113 9	0.076 9
3	一般	0.218 0	0.188 0
4	较大	0.349 4	0.333 3
5	大	0.478 6	0.478 6

将修正因子带入整体影响矩阵 H ,得到不同 λ 对应截距阵($\lambda=0$ 时,截距阵为矩阵 H)绘制各截距阵节点强度变化趋势图(图 4(a))及信息要素衰减图(图 4(b)),如图 4 所示。

由图 4 可知,当 λ 为 0.000 4 时,其对应截距阵节点强度变化趋势与 $\lambda=0$ 时最为接近,当 $\lambda=0.076 9$ 时二者极为接近,同时确保了信息要素的完整性,因此确定修正因子为 0.076 9,通过式(11)计算得可达矩阵 $R=(r_{ij})_{31 \times 31}$,即

$$r_{ij} = \begin{cases} h_{ij}, & h_{ij} > 0.076 9 \\ 0, & h_{ij} \leq 0.076 9 \end{cases} \quad (i=1,2,\dots,31; j=1,2,\dots,31) \quad (11)$$

式中, h_{ij} 、 r_{ij} 分别为整体影响矩阵 H 及可达矩阵 R 中 Z_i 对 Z_j 的影响程度。

2.3.2 人机交互信息要素层级划分

按照式(12)~(14)求出信息要素的可达集 $M(Z_i)$ 、先行集 $N(Z_i)$ 和共同集 $O(Z_i)$,即:

$$M(Z_i) = \{Z_j | a_{ij} \neq 0\} \quad (12)$$

$$N(Z_i) = \{Z_j | a_{ji} \neq 0\} \quad (13)$$

$$O(Z_i) = M(Z_i) \cap N(Z_i) \quad (14)$$

式中: $M(Z_i)$ 为 Z_i 直接或间接影响的信息要素集,

$N(Z_i)$ 为直接或间接影响 Z_i 的信息要素集。

为均衡层级结构,识别人机交互过程中的关键要素,提出综合对抗轮换层级要素抽取方法,即:

$$l_i = \{Z_j | Z_j \in Z - l_1 - \dots - l_{i-1}, M(Z_j) = O(Z_j)\} \quad (15)$$

$$l_i = \{Z_j | Z_j \in Z - l_1 - \dots - l_{i-1}, N(Z_j) = O(Z_j)\} \quad (16)$$

式中, l_i 为第 i 次抽取所得要素集合,以结果-原因轮换抽取方法为例,首先依据式(15),抽取 l_1 要素做为结果属性第 1 层指标,从可达矩阵中划除 l_1 指标,依据式(16),抽取 l_2 要素作为原因属性第 1 层指标,以此轮换顺序,直至所有要素被删除,由底至顶依次记为 L_1, L_2, L_3, \dots 。同理,以相反的轮换抽取顺序求得原因-结果轮换层级划分结果,见表 4。

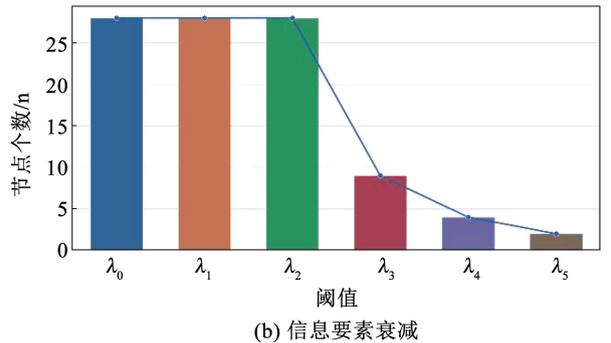
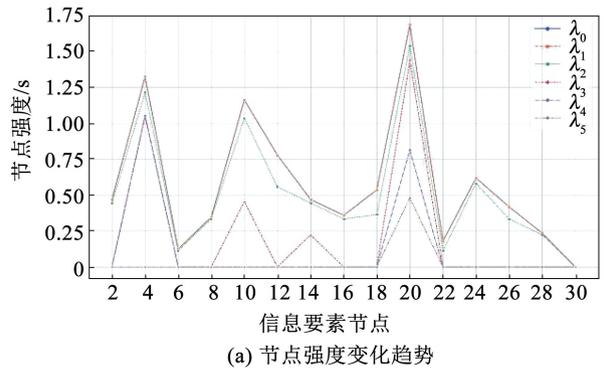


图 4 不同 λ 下的交互信息系统节点数与节点度计算结果
Fig.4 Calculation results of node number and node degree of interactive information system under different λ

表 4 载人潜水器人机交互信息层级划分

Tab.4 Hierarchical division of HMI information for manned submersible

层级	抽取顺序	结果-原因优先抽取方法	原因-结果优先抽取方法	综合抽取层级划分
L_6	$l_{1/2}$	$Z_3, Z_6, Z_{15}, Z_{22}, Z_{23}, Z_{25}, Z_{27}, Z_{28}, Z_{29}, Z_{30}, Z_{31}$	$Z_3, Z_6, Z_{15}, Z_{22}, Z_{23}, Z_{25}, Z_{27}, Z_{28}$	$Z_3, Z_6, Z_{15}, Z_{22}, Z_{23}, Z_{25}, Z_{27}, Z_{28}$
L_5	$l_{3/4}$	$Z_7, Z_{16}, Z_{21}, Z_{24}, Z_{26}$	$Z_7, Z_{16}, Z_{21}, Z_{24}, Z_{26}$	$Z_7, Z_{16}, Z_{21}, Z_{24}, Z_{26}$
L_4	$l_{5/6}$	Z_{17}, Z_{18}, Z_{19}	Z_{17}, Z_{18}, Z_{19}	Z_{17}, Z_{18}, Z_{19}
L_3	$l_{6/5}$	Z_{11}, Z_5	Z_{11}, Z_5	Z_{11}, Z_5
L_2	$l_{4/3}$	$Z_1, Z_2, Z_4, Z_8, Z_9, Z_{10}, Z_{14}$	$Z_1, Z_2, Z_4, Z_8, Z_9, Z_{10}, Z_{14}$	$Z_1, Z_2, Z_4, Z_8, Z_9, Z_{10}, Z_{14}$
L_1	$l_{2/1}$	Z_{12}, Z_{13}, Z_{20}	$Z_{12}, Z_{13}, Z_{20}, Z_{29}, Z_{30}, Z_{31}$	Z_{12}, Z_{13}, Z_{20}
活动要素				Z_{29}, Z_{30}, Z_{31}

整体影响矩阵节点强度变化趋势非常接近,可保证节点相对影响关系的稳定,且对于加权网络,节点强

度相较于节点度更能体现节点相对影响关系,一定程度上体现出本文阈值计算方法的可行性及优势。

表 5 整体影响矩阵阈值截距阵特点对比

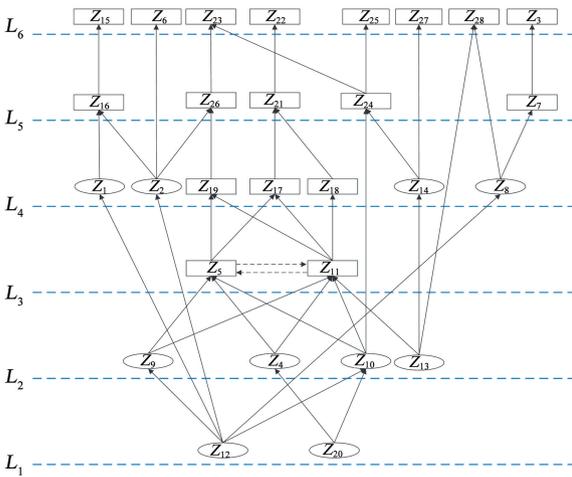
Tab. 5 Comparison of threshold calculation methods of overall impact matrix

方法	计算方法	阈值	分析对象	所得整体影响矩阵阈值截距阵特点			文献
				节点数	强度变化	度	
①	$\lambda \sum_{i=1}^n m_i/n$	0.431 7 ~ 0.575 6	节点中心度值	保留中心度较高节点	+	+	[19]
②	$\lambda = \alpha + \beta$	0.160 1	节点间关系权重	保留部分节点	-	-	[20 - 21]
③	建议及经验		节点间关系权重	保留中心度较高节点	-	+	[22 - 24]
本文	K-means	0.076 9	节点间关系权重	节点完整	+	-	

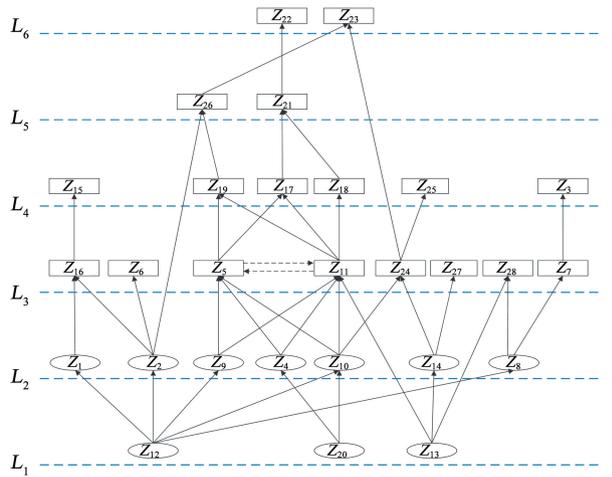
注:表中“+”为满足指标,“-”为无法满足对应指标。

2) 含有影响程度权重值的层级模型构建。由人机交互信息关系的可达矩阵计算及层级划分及载人潜水器人机交互信息层级结构模型构建对层级结构模型计算与构建过程可知,本文改进基于阈值的可达矩阵判别式,得到保留整体影响矩阵截距阵元素值的可达矩阵;依据所得可达矩阵,分析各节点的

可达集与先行集,提出对抗轮换层级抽取方法进行要素层级划分;最后采用适用于含影响值可达矩阵的最大、最小模糊算子,依据缩边公式计算得到影响值骨架矩阵,构建出含影响因子层级结构模型。依据已有文献^[19,23]绘制未改进计算方法的层级结构模型,如图 6 所示。



(a) 结果优先抽取-无影响因子层级结构图



(b) 原因优先抽取-无影响因子层级结构图

图 6 无影响因子层级结构模型图

Fig. 6 Hierarchical model without impact factors

由上述结构模型与本文所得含影响因子层级结构模型对比可知,本文所得层级结构可很好的将更多的原因属性要素至于底层,将结果属性要素置于顶层,将关键过渡要素置于中间层,并识别出活动要素,同时保留整体影响矩阵中要素间影响值。所构建含影响权重层级结构模型赋予 DEMATEL-ISM 模型更多实践意义,例如用于分析要素间存在的致因关系强度,识别要素间最短致因路径等,更好地为指导交互信息界面设计提供理论依据。

3 载人潜水器人机交互信息层级结构模型分析

依据本文研究所得面向任务的载人潜水器人机交互信息系统层级结构模型,如图 5 所示,对面向任务的载人潜水器人机交互信息层级结构的层级结构特征及要素间致因关系进行分析。

3.1 载人潜水器人机交互信息模型层级结构特征 结合各层级要素 DEMATEL 属性值,可以看出,

原因属性信息要素主要分布于结构模型底端第 L_1 、 L_2 层,结果属性要素主要分布于模型顶端 $L_3 \sim L_6$ 层。所得交互信息层级结构由底至顶层原因属性逐渐减弱,结果属性逐渐增强。

结合各层级要素在实际任务中的语义特征, L_1 为激活交互过程的信息,如 Z_{12} 发现作业样本、 Z_{13} 作业目标观察及 Z_{20} 潜器的姿态感知,可作为层级结构中的根本原因层; L_2 为引起潜器状态发生变化外部情景信息,包含 Z_1 潜器大地坐标、 Z_4 避碰、 Z_8 海底地貌、 Z_9 海底暗流、 Z_{10} 与作业目标相对位置、 Z_{14} 作业目标观察,为直接原因层; L_3 为潜航员为应对潜器系统外部环境而做出的行为反馈,如 Z_{11} 航行控制, L_3 中信息要素 Z_5 与 Z_{11} 形成环路,为层级结构中所属信息要素中心度均值最大的层级 ($m_{i_3} > m_{i_1} > m_{i_4} > m_{i_2} > m_{i_5} > m_{i_6}$),作为原因属性要素层级最直接行为反馈,是介于原因属性层级及效应属性层级之间的关键过渡信息层; $L_4 \sim L_6$ 主要为航控引起的系统状态变化参数信息,如 Z_{17} 潜器航向、 Z_{18} 航速、 Z_{19} 横、纵倾参数、 Z_{21} 推进器状态、 Z_{22} 电气设备参数等,可分为直接效应层 L_4 以及终端效应层 L_5 、 L_6 。

综上所述可知, L_1 、 L_2 层级信息要素在交互信息系统中为主变因素,是潜航员交互行为发生的前因信息,在实际任务信息处理过程中,当前因信息的变化超出安全范围时,则可能从根本上改变任务目标优先级,例如紧急情况下,由海底暗流等因素引起的避碰信息的突然变化,可能会直接中止当前任务的执行,改为确保人机系统安全为优先目标,潜航员对前因信息的及时感知,可以在一定程度上避免因“人为忽视”导致的紧急情况的发生;同理, $L_3 \sim L_6$ 层层级信息要素在交互信息系统中作为因变要素,是潜航员交互行为发生的效应信息,对此类信息的掌握,可以使潜航员能够及时感知行为反馈,提高察觉操作相关潜器系统及设备故障的概率,可在一定程度上避免因“操作不当”或“没有及时察觉设备故障”导致的紧急情况发生,降低人机系统作业风险。

因此,从信息要素在潜航员任务信息认知处理过程所体现的原因-效应属性的角度,提出对人机交互界面信息要素区分化显示的建议,使潜航员在任务过程中及时定位引起系统状态变化的原因所在,积极采取应对措施,同时及时捕捉到操作反馈信息,提高人机系统的安全及作业效能。

3.2 载人潜水器人机交互信息要素致因关系分析

在层间关系分析的基础上,依据层级结构模型

中要素间影响权重,结合各信息要素实际任务语义,分析各层级信息要素致因性及要素间的致因关系。

在 L_1 信息要素中, Z_{20} 潜器姿态感知的出度权重和最大,其次为 Z_{12} 发现作业样本,其中, Z_{12} 标志着决策任务的开始,而 Z_{20} 的重要致因性在于若潜航员感知到潜器姿态发生改变,则需将注意力从样本观察或其他当前任务中转移至潜器姿态调整中,以确认潜器与外部环境相对距离稳定安全,是信息系统中最重要的致因要素; L_2 信息要素中, Z_4 避碰(观察窗)出入度权重最高, Z_4 与出度信息 Z_5 结合,指导潜航员掌握潜器避碰状态,进一步影响航控。要素 Z_{10} 与作业目标相对位置出入度值最大,决定着采样任务的顺利执行,是该层重要的致因要素。 L_3 信息要素 Z_{11} 出入度要素个数及权重皆为最高,是人机交互信息系统内最重要的致因信息要素,其出度信息为 L_4 层要素 Z_{17} 潜器航向、 Z_{18} 潜器航速、 Z_{19} 横纵倾,是潜器系统实现精准航控,安全高效作业的保障。 L_5 、 L_6 中各要素出入度权重及度值较为均衡,为致因性较弱的效应要素。此外,对于出现于任务过程中,但没有存在于信息要素致因关系中的活动要素 Z_{29} 、 Z_{30} 、 Z_{31} ,是任务中必不可少但可以独立于任务流程的存在,即当故障检测与报警、水声通信、生命支持系统状态正常时,不会对原任务产生影响,若此类信息发生变化并超出安全阈值,会直接改变系统目标优先级。

对于含影响因子的层级结构模型,要素间的权重值代表了潜航员视角下任务信息要素间逻辑相关影响程度,即当信息要素 A 和 B 之间的权重大于 A 和 C 时,意味着信息要素 A 的变化会更多的引起 B 的变化,基于此思想,可识别出层级结构模型中目标信息的主要致因路径,以关键信息要素 Z_{11} 为例,其主要致因路径为 Z_{20} 潜器姿态 $\rightarrow Z_4$ 避碰(观察窗)/ Z_{10} 与作业目标相对位置 $\rightarrow Z_{11}$ 航行控制/ Z_5 避碰(水声通信 PC) $\rightarrow Z_{17}$ 潜器航向/ Z_{18} 潜器航速/ Z_{19} 横、纵倾 $\rightarrow Z_{26}$ 压载/ Z_{21} 推进器状态 $\rightarrow Z_{22}$ 电气设备状态/ Z_{23} 液压系统状态。主要致因路径的识别,体现出致因路径内信息要素在潜航员认知内的相关性关系,可用于指导人机交互界面信息元素相关性设计,例如,当任意信息要素发生变化时,可通过交互界面突出显示其主要前因及后果信息要素,使潜航员能够快速捕捉人机系统状态或外部环境状态的变化,以帮助潜航员快速理解所处情境,及时做出正确的操作反馈。

因此,从信息要素间存在的认知内逻辑影响相关性关系的角度,在以上提出的对原因-效应信息要素区分化显示的基础上,提出增强交互信息界面中处于同一因路径内原因-效应信息要素共现概率,增强潜航员对目标信息相关的前因及效应信息的监控程度,降低潜航员情境信息感知及搜寻成本,在一定程度上降低潜航员的信息认知处理负荷。

4 结 论

1) 本文运用决策阶梯 DL,以潜航员实际任务信息处理过程为基础建立人机交互信息要素初始关系矩阵,基于改进 DEMATEL-ISM 方法,进行一系列计算与分析,最终得到能够定性表示交互信息要素相对逻辑位置、定量表示交互信息要素逻辑相关性的有向加权层级结构模型,并通过案例对比,证明了本文所提交交互信息层级结构模型构建方法的合理性及优势。

2) 针对所得有向加权层级结构模型,结合潜航员实际任务信息处理过程,对人机交互信息系统中的信息要素及所属层级的原因-效应属性特征进行分析,识别出关键信息要素及层间致因关系。在此基础上,进一步分析了各层级信息要素间的致因路径。从层级信息属性及层间信息致因性的角度,提出了相应的设计建议,为理解潜航员认知基础上的人机交互信息处理过程,合理化载人潜水器驾驶舱人机交互信息界面设计提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] 丁忠军, 高翔, 刘保华. 蛟龙号载人潜水器驾驶与操纵训练模拟系统[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(3): 440
DING Zhongjun, GAO Xiang, LIU Baohua. Diving and operation training simulation system for JIAOLONG manned submersible[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(3): 440. DOI: 10.11990/jheu.201803090
- [2] BENYON D, HÖÖK K. Navigation in information space: Supporting the individual[M]. Sydney: Chapman & Hall, 1997: 284
- [3] 赵庆新, 张奕, 丁忠军, 等. 深海载人潜水器浮力材料损伤机理研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(10): 104
ZHAO Qingxin, ZHANG Yi, DING Zhongjun, et al. Research on damage mechanism of buoyancy materials for deep sea manned submersibles[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(10): 104. DOI: 10.13245/j. hust. 201018
- [4] 胡中惠, 曲文新, 刘帅, 等. 载人潜水器无动力潜浮运动压载匹配方法研究[J]. 船舶力学, 2020, 24(11): 1422
HU Zhonghui, QU Wenxin, LIU Shuai, et al. Payload calculation for unpowered ascent & descent of manned vehicles[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(11): 1422. DOI:10.3969/j. issn. 1007-7294. 2020. 11. 006
- [5] 杜青海, 高睿, 崔维成. 全海深载人潜水器厚观察窗结构的强度研究[J]. 中国造船, 2019, 60(2): 1
DU Qinghai, GAO Rui, CUI Weicheng. Strength analysis of thick conical window for full ocean deep manned submersible[J]. Shipbuilding of China, 2019, 60(2): 1. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-4882. 2019. 02. 001
- [6] 张帅, 何卫平, 陈登凯, 等. 载人潜水器舱室空间舒适性复合评估方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(10): 83
ZHANG Shuai, HE Weiping, CHEN Dengkai, et al. Compound evaluation method for the space comfort of manned submersible[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(10): 83. DOI: 10.11918/j. issn. 0367-6234. 201810148
- [7] 李洋洋, 石路, 叶聪, 等. 全海深载人潜水器不同驾驶位人员的下肢循环和肌肉疲劳分析[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志, 2020, 27(1): 6
LI Yangyang, SHI Lu, YE Cong, et al. Analysis of lower limb circulation and muscle fatigue of divers at different crew positions in full ocean depth manned submersible[J]. Chinese Journal of Nautical Medicine and Hyperbaric Medicine, 2020, 27(1): 6. DOI:10.3760/cma. j. issn. 1009-6906. 2020. 01. 003
- [8] 石路, 徐伟哲, 李洋洋, 等. 基于行为学和眼动数据的全海深载人潜水器人机交互界面评估[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志, 2020, 27(1): 3
SHI Lu, XU Weizhe, LI Yangyang, et al. Evaluation on man-machine interface in full ocean depth manned submersible based on behaviorism and eye movement data[J]. Chinese Journal of Nautical Medicine and Hyperbaric Medicine, 2020, 27(1): 3. DOI:10.3760/cma. j. issn. 1009-6906. 2020. 01. 002
- [9] 殷昊翔, 石路, 李洋洋, 等. 认知训练对“蛟龙号”模拟驾驶作业脑力负荷影响评估[J]. 航天医学与医学工程, 2020, 33(4): 313
YIN Haoxiang, SHI Lu, LI Yangyang, et al. Effects of cognitive training on mental workload of simulated driving of “Jiaolong” manned submersible[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2020, 33(4): 313. DOI:10.16289/j. cnki. 1002-0837. 2020. 04. 005
- [10] 李洋, 王栋, 李刚, 等. 基于复杂网络理论的智能电网信息系统可靠性分析[J]. 华北电力大学学报, 2018, 45(6): 59
LI Yang, WANG Dong, LI Gang, et al. Reliability analysis of smart grid communication network based on complex network theory[J]. Journal of North China Electric Power University, 2018, 45(6): 59. DOI:10.3969/j. ISSN. 1007-2691. 2018. 06. 09
- [11] 李宁. 复杂网络理论的城市轨道交通网络连通可靠性研究[J]. 工程建设与设计, 2019(18): 80
LI Ning. Study on connectivity reliability of urban rail transit network based on complex network theory[J]. Construction & Design for Project, 2019(18): 80. DOI: 10.13616/j. cnki. gcjsysj. 2019. 09. 239
- [12] 郑冬英. 复杂任务环境下的人机交互信息网络拓扑结构研究[D]. 南京: 东南大学, 2019
ZHENG Dongying. Research on Topological structure of human-computer interactive information network in complex task environment[D]. Nanjing: Southeast University, 2019

- [13] MULVIHILL C M, SALMON P M, BEANLAND V, et al. Using the decision ladder to understand road user decision making at actively controlled rail level crossings [J]. *Applied Ergonomics*, 2016, 56: 1. DOI: 10.1016/j.apergo.2016.02.013
- [14] STANTON N A, BESSELL K. How a submarine returns to periscope depth: Analysing complex socio-technical systems using Cognitive Work Analysis [J]. *Applied Ergonomics*, 2014, 45(1): 110. DOI: 10.1016/j.apergo.2013.04.022
- [15] 江芙蓉, 李翔. 基于 DEMATEL-ISM 的飞行学员训练应激结构模型研究[J]. *航天医学与医学工程*, 2020, 33(1): 19
Jiang Furong, LI Xiang. Study on structural modeling of stressors for student pilot in flight training based on DEMATELISM [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2020, 33(1): 19. DOI: 10.16289/j.cnki.1002-0837.2020.01.003
- [16] 杨姝, 李俊龙. 基于 DEMATEL-ISM 法的民航飞行员综合能力结构模型研究[J]. *安全与环境工程*, 2018, 25(4): 169
YANG Shu, LI Junlong. Comprehensive safety capability structure model of civil aviation pilots based on DEMATEL-ISM method [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2018, 25(4): 169. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2018.04.030
- [17] JENKINS D P, STANTON N A, SALMON P M, et al. Using the decision-ladder to add a formative element to naturalistic decision-making research [J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2010, 26(2/3): 132. DOI: 10.1080/10447310903498700
- [18] LI Y, BURNS C M. Modeling automation with cognitive work analysis to support human-automation coordination [J]. *Journal of Cognitive Engineering & Decision Making*, 2017, 11(4): 299. DOI: 10.1177/1555343417709669
- [19] 李明辉, 夏靖波, 陈才强, 等. 一种新的含可达影响因子的系统结构分析算法[J]. *北京理工大学学报*, 2012, 32(2): 135
LI Minghui, XIA Jingbo, CHEN Caiqiang, et al. A new system structure analysis arithmetic with reachable effect factor [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(2): 135. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2012.02.006
- [20] 李辉山, 蒋倩倩. 基于 DEMATEL-ISM 的建筑工人不安全行为影响因素研究[J]. *工程管理学报*, 2019, 33(4): 143
LI Huishan, JIANG Qianqian. Research on the influencing factors of construction workers' unsafe behaviors based on DEMATEL-ISM [J]. *Journal of Engineering Management*, 2019, 33(4): 143. DOI: 10.13991/j.cnki.jem.2019.04.027
- [21] 张勇, 王祥宇. 基于 DEMATEL-ISM-BN 的施工人员不安全行为致因研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(11): 110
ZHANG Yong, WANG Xiangyu. Study on causes of unsafe behaviors of construction workers based on DEMATEL-ISM-BN [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(11): 110. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2020.11.017
- [22] WANG Linlin, CAO Qinggui, ZHOU Lujie. Research on the influencing factors in coal mine production safety based on the combination of DEMATEL and ISM [J]. *Safety Science*, 2018, 103: 51. DOI: 10.1016/j.ssci.2017.11.007
- [23] LI Feng, WANG Wenhe, DUBLJEVIC S, et al. Analysis on accident-causing factors of urban buried gas pipeline network by combining DEMATEL, ISM and BN methods [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019, 61: 49. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.06.001
- [24] 刘明菲, 陈威. 基于集成 DEMATEL-ISM 的生鲜冷链前置仓物流服务质量风险影响因素研究[J]. *安全与环境工程*, 2020, 27(1): 118
LIU Mingfei, CHEN Wei. Research on risk impacting factors of logistics service quality of fresh cold chain front warehouse based on DEMATEL-ISM method [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2020, 27(1): 118. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2020.01.018

(编辑 张红)