

# 基于耦合矩阵分解体系的海底沉管隧道施工 HSE 风险评价方法

由金<sup>1</sup>, 王春利<sup>2</sup>, 李文斌<sup>3</sup>

(1. 中交一航局第三工程有限公司, 辽宁 大连 116083; 2. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461;  
3. 大连市城市管理局, 辽宁 大连 116011)

**摘要:** 海底沉管隧道工程建设规模大、结构形式多、环保要求高、施工管理难度大, 项目施工全阶段存在较多安全风险。以大连湾海底隧道工程施工全过程为研究背景, 根据项目施工特点, 采用基于耦合矩阵分解体系的工程施工 HSE 管理方法, 建立了海底沉管隧道工程施工风险评价模型, 对施工风险源及因素进行了分析, 从系统角度出发, 构建沉管隧道工程项目 HSE 风险综合评价指标体系, 并与模糊数学相结合, 提出模糊综合评判方法, 能够综合评价沉管隧道工程项目 HSE 风险。从根源上进一步探讨海底沉管隧道工程项目 HSE 风险的产生原因, 进一步深入认识和把握海底沉管隧道工程项目施工 HSE 风险的内涵, 从而提升海底隧道项目的施工管理水平。

**关键词:** 耦合矩阵; 风险评估; 沉管隧道; HSE 风险

中图分类号: U612.334 文献标志码: B 文章编号: 2095-7874(2024)04-0104-05

doi: 10.7640/zggwjs202404022

## Evaluation method of HSE risks in construction of subsea immersed tunnel based on coupled matrix decomposition system

YOU Jin<sup>1</sup>, WANG Chun-li<sup>2</sup>, LI Wen-bin<sup>3</sup>

(1. No.3 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbour Engineering Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116083, China; 2. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 3. Dalian City Administration Bureau, Dalian, Liaoning 116011, China)

**Abstract:** Subsea immersed tunnels, have large construction scale, multiple structural types, high environmental requirements, and difficult construction management. There are many safety risks throughout the entire construction phase of the project. Taking the entire construction process of the Dalian Bay Immersed Tunnel Project as the research background, based on the characteristics of project construction, the HSE management method for engineering construction based on coupled matrix decomposition system was adopted to establish a risk assessment model for subsea immersed tunnel construction. The construction risk sources and factors were analyzed in detail and depth. From the perspective of system, a comprehensive evaluation index system for HSE risks in immersed tunnel engineering project was constructed, and the fuzzy comprehensive evaluation method was put forward by combining with fuzzy mathematics, which can comprehensively evaluate the HSE risk of immersed tunnel engineering project. Further explore the causes of HSE risks of subsea immersed tunnel engineering projects from the root, and gain a deeper understanding and grasp of the connotation of HSE risks in construction of subsea immersed tunnel engineering projects. So as to improve the construction management level of subsea tunnel projects.

**Key words:** coupled matrix; risk evaluation; immersed tunnel; HSE risk

### 1 工程概况

大连湾海底沉管隧道建设工程施工内容包括沉管主体、隧道工程(暗埋段)、临时围堰(止水功

能)、市政工程及管网、道路工程、交叉隧道(地上及地下)、各类其他管网等, 本工程包含港航专业、市政专业、工民建专业、道路工程、机电安

收稿日期: 2023-11-06

作者简介: 由金 (1987—), 男, 辽宁大连人, 硕士, 高级工程师, 主要从事港航工程、市政工程、海底沉管隧道施工工作。E-mail: 641416140@qq.com

装等多个专业,依照本工程规模、结构形式和分部分项工程的特点,将本项目划分为4大施工区域:沉管预制存储区域、北岸施工区域、南岸施工区域、海上施工区域,如图1所示。

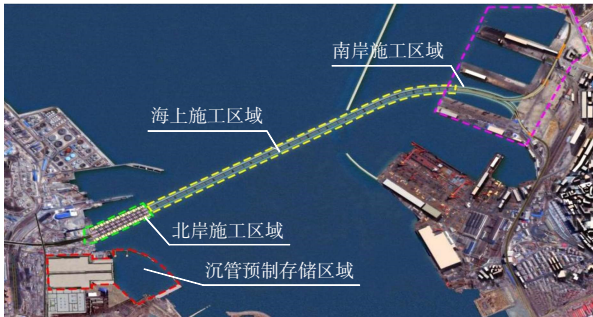


图1 施工总平面布置

Fig. 1 Construction general layout

## 2 工程特点

工程工期为50个月,项目结构复杂,交叉施工较多,总体调度难度高。安全管理重点涉及港航工程(海底沉管隧道、船坞、码头、防波堤、止水围堰、水下挖泥、爆破等)、市政工程、房屋建

筑工程、机电安装、混凝土成品预制、现浇钢筋混凝土结构等部分,包含深基坑分项、构件预制、码头工程、附属建筑物拆除工程、水下爆破施工等危险性较大的分部分项工程,材料管理与调配、工期控制、施工安全与质量控制都有较大难度。

## 3 耦合矩阵分解体系对海底沉管隧道工程施工HSE风险的评价

### 3.1 构建耦合矩阵

耦合矩阵(WBS-RBS)是一种能够细化到建设工程详细分部分项的识别风险的方法<sup>[1]</sup>,同时也能够对工程项目的总体情况进行把控。识别风险因素<sup>[2]</sup>,首先从作业活动的划分入手,并建立海底沉管隧道工程WBS工作分解结构,借助WBS来沟通和界定项目的界限范围。将本工程作为一项独立的评价单元,采用WBS工作分解功能,将作业单元依据分部分项工程分解为各个独立的子系统。

针对本项目特点,根据施工工艺技术、施工顺序、现场布置、施工方法,将详细的分部分项工程进行分解,如图2所示,总计有11个作业活动。



图2 大连湾海底沉管隧道工程分项工程分解

Fig. 2 Breakdown of subdivisional works for the Dalian Bay Immersed Tunnel Project

所分解的11个作业活动均为海底沉管隧道工程所含的主要分项,涉及沉管预制、基础施工、航道疏浚等方面,具体内容为:

- 1) 参建员工生活区  $W_1$ : 包括参建的施工人员的日常生活、宿舍、膳食、水电、午休等。
- 2) 沉管预制  $W_2$ : 包括沉管施工及安装工序。
- 3) 基础施工  $W_3$ : 本内容涵盖基础开挖、换填、夯实平整以及基床整平。
- 4) 航道疏浚  $W_4$ : 本内容涵盖浮运航道的基槽开挖与清淤、设计航道规划的局部区域开挖及清淤以及临时通航的航道开挖及清淤。
- 5) 沉管安装  $W_5$ : 管节施工预制完工后,进入下一道施工工序,即一次舾装施工,施工流程包括沉管浮起、运输至临时区域存储,然后进入下一道施工工序,即二次舾装施工,最后分节浮起运输至安装现场。
- 6) 最终接头安装  $W_6$ : 顶进节段的施工场地设在南岸围堰施工区域中,安装钢封门结构,通

过顶推功能将沉管预制节段顶推至指定的扩大区域处,然后安装可伸缩式止水带等结构。预制管节下沉并顺利安装后,施工顶推结构,借助牛腿结构完成顶推施工及回拉过程的施工,使最终接头主体结构顶推至设计要求的区域。

7) 沉管回填  $W_7$ : 本工程由海床段露出部分和海中段组成,涵盖一般回填、回填、管顶回填等分项工程,沉管回填的施工流程要依据沉管浮运和沉管安装的总施工流程确定。

8) 北岸工程  $W_8$ : 主体部分的混凝土结构使用陆上现浇技术。为使现场场地为干地,将新建沉箱防护部分同时作为围堰,陆上区域与海上区域通过止水结构形成完美闭合。

9) 南岸工程  $W_9$ : 南岸工程位于大连港3号码头和4号码头之间,由港池、陆域、防波堤组成。

10) 管内作业  $W_{10}$ : 本工程涵盖管内舾装、舾装相关构件的拆除、压舱混凝土等,以及管内交通的临时封闭、通电排水、通讯通风等措施。

11) 机电安装  $W_{11}$ : 此部分涵盖隧道管理中心、隧道主体结构(主线部分)和雨水泵房、风塔结构、南岸北岸的设备区域、供电和照明系统工程、工程给水排水等。

12) 本工程 RBS 第 1 个层次包含安全风险、职业健康危害风险以及环境风险, 将其分解为 22 个指标层, 其中职业健康部分 12 个, 安全部分 5 个, 环境保护部分 5 个, 22 个指标层同时构成海底沉管隧道的 RBS 分解结构。

### 3.2 耦合形成海底沉管隧道施工 WBS-RBS 矩阵

以 22 个风险因素组成 RBS 分解体系, 以 11 个作业单元构成的 WBS 分解体系为列, 形成 WBS-RBS 体系的耦合矩阵, 见表 1。表中的数字“1”说明固定的作业单元存在与其对应的风险源,

数字“0”说明没有与其对应的风险源。从矩阵的横向观察, 如果该作业单元的数字“1”相对较多, 说明此风险源对工程施工影响较为明显。以纵向方向来看, 如果该作业单元的数字“1”比较多, 说明该风险源存在于本单元的概率比较大。但无论从横向看还是纵向看, 虽然能够得出存在较多和较少的风险, 但风险的大小和权重系数仍然需要进一步通过定量评价模型进行计算, 才能将所得值进行量化。利用 WBS-RBS 耦合矩阵, 不仅可从整体工程角度掌控总体的风险状况, 又能从每一个细节详细了解每一个分解出来的作业单元对风险的影响状况, 最后得出海底沉管隧道工程的施工作业风险分析更加清楚明了, 且符合逻辑, 进而说明本 HSE 风险管理<sup>[3]</sup>非常具有参考性。

表 1 海底沉管隧道工程施工 WBS-RBS 耦合矩阵(无定量值)

Table 1 WBS-RBS coupling matrix for construction of subsea immersed tunnels(No quantitative values)

RBS 分解体系			WBS 分解体系										
			大连湾海底沉管隧道工程施工作业 W										
			$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$W_5$	$W_6$	$W_7$	$W_8$	$W_9$	$W_{10}$	$W_{11}$
海底沉管隧道工程施工作业风险(R)	职业健康危害风险分解( $R_H$ )	施工噪音	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		施工粉尘扬尘	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
		高温低温环境	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		有害气体及化学毒物	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
		爆破冲击波及振动	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1
	安全风险分解( $R_S$ )	物体打击	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		临水临边防护不当	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		机械设备故障或操作不当	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		平台、模板加固不牢固	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1
		临时用电使用不当	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		焊接作业操作不当	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1
		船舶舷外作业不当	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
		爆破警戒不当	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
		材料设备摆放不当	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
		封闭舱室或空间作业不当	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1
		船舶、车辆运输作业不当	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
		不利气象、高低温	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	环境风险( $R_E$ )	爆破产生冲击波、噪声	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1
		弃渣(弃泥)悬浮淤泥	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
		船舶产生含油废水	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0
		办公生活产生垃圾、废水	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
		船机设备产生尾气、烟尘	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

### 3.3 施工作业单元定量评价

#### 3.3.1 作业风险衡量

想要获得不同作业单元的风险值, 则需对其风险进行定量。通过大量查阅资料<sup>[4]</sup>, 定量计算方法可参考 K.J.格雷厄姆和 K.F.金尼提出的 LEC 施工风险定量级别标准方法, 分别对事故产生的概

率、处于危险区域的状况、事故发生可能导致的危害进行取值。对于大连湾海底沉管隧道工程, 为了使得计算结果更加准确, 需要进一步考虑海上施工的各项影响因素, 进而细化 C 的取值范围。经专家咨询, 影响因素<sup>[5]</sup>主要从工期的滞后与否、施工过程中人员受伤及死亡情况、事故可能造成

经济损失以及施工对环境的影响(以斑海豹的生活状况为参考)4 个方面指标对其进行细化,这样 C 值的评定具有客观性和真实性。最后,不同作业单元的风险值大小以 L、E、C 三个数的乘积进行计算并得出结果。事故发生可能导致的危害评分值见表 2。

表 2 事故发生可能导致的危害评分值  
Table 2 Risk rating values for potential hazards caused by accidents

C 值	影响因素指标			
	人员伤亡或死亡/人	经济损失/万元	对工期的影响	施工对周边环境影响
100	死亡人数>10 或重伤人数>100	10 000<经济损失	工期延误超过 1 a	导致十几只斑海豹死亡,海上环境严重受损,或海洋水体受到严重破坏
40	3<死亡人数≤10 或重伤人数>20	10 000≥经济损失>5 000	1 a≥工期延误>0.5 a	导致 3 只以上、10 只以下斑海豹死亡,海上环境破坏进一步扩大
15	10<中毒或重伤人数≤20 或 1<死亡人数≤3	5 000≥经济损失>1 000	0.5 a≥工期延误>3 个月	导致 1 只以上斑海豹死亡,海洋环境破坏程度较大
7	5<中毒或重伤人数≤10	1 000≥经济损失>500	3 个月≥工期延误>30 d	造成斑海豹 1 只死亡的或对斑海豹的正常生存破坏大
3	3<受伤人数≤5	500≥经济损失>100	30 d≥工期延误>10 d	对斑海豹的正常生存影响较弱,海洋环境破坏区域小
1	受伤人数≥3	100≥经济损失	10 d≥工期延误	会对斑海豹的正常生活造成不利影响但不是很明显,破坏海洋环境程度极小

参与海底沉管隧道工程项目施工或参加方案评审会议的专家对 L、E、C 打分进行研究讨论,分别得出 3 个数值,最终根据 3 个数值相乘,得出海底沉管隧道施工过程中不同作业单元风险数值的大小,把计算所得数值列入表格内,如表 3 所示,基于耦合矩阵分解体系 WBS-RBS 中的数值大小就表示了指定工作单元中高风险事件产生的风险值高低。

表 3 大连湾海底沉管隧道工程施工 WBS-RBS 耦合矩阵定量值  
Table 3 Quantitative value of WBS-RBS coupled matrix for construction of Dalian Bay Immersed Tunnel Project

RBS 分解体系			WBS 分解体系											纵向 累计	纵向 排序	
			大连湾海底沉管隧道工程施工作业 W													
			W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>4</sub>	W <sub>5</sub>	W <sub>6</sub>	W <sub>7</sub>	W <sub>8</sub>	W <sub>9</sub>	W <sub>10</sub>	W <sub>11</sub>			
大连 湾海 底隧 道施 工作 业风 险 R	职业健 康危害 风险 R <sub>11</sub>	施工噪音 R <sub>1</sub>	18	108	18	54	54	54	36	36	36	36	486	9		
		施工扬尘粉尘 R <sub>2</sub>	18	54	18	0	0	0	36	54	54	54	36	324	15	
		高温低温环境 R <sub>3</sub>	18	36	36	18	18	18	18	18	18	36	252	19		
		有害气体及化学毒物 R <sub>4</sub>	0	108	0	0	0	0	54	54	108	54	378	14		
		爆破冲击波及振动 R <sub>5</sub>	9	0	108	18	0	0	0	36	36	36	36	279	17	
	安全风险 R <sub>5</sub>	物体打击 R <sub>6</sub>	18	54	36	36	54	54	54	108	108	54	108	684	6	
		临水临边防护措施不当 R <sub>7</sub>	0	36	108	108	108	108	108	54	54	36	108	828	3	
		机械设备故障或操作不当 R <sub>8</sub>	0	126	126	126	126	126	126	126	126	126	1 260	2		
		平台、模板加固不牢固 R <sub>9</sub>	0	54	0	0	0	36	0	54	54	54	306	16		
		临时用电使用不当 R <sub>10</sub>	54	108	36	36	36	36	36	108	108	108	54	720	5	
		焊接作业操作不当 R <sub>11</sub>	0	126	0	0	108	0	36	54	54	36	126	540	8	
		船舶舷外作业区域不当 R <sub>12</sub>	0	0	108	108	126	108	108	0	0	0	0	558	7	
		爆破警戒不当 R <sub>13</sub>	0	0	36	36	0	0	0	0	0	0	0	72	22	
		材料设备摆放不当 R <sub>14</sub>	108	108	54	54	0	0	0	108	108	108	108	756	4	
		空间作业不当 R <sub>15</sub> 或封闭舱室	0	54	0	0	54	54	0	0	0	54	54	270	18	
		船舶、车辆运输过程不当 R <sub>16</sub>	0	54	54	54	0	54	54	54	54	36	54	468	10	
		不利气象、高低温 R <sub>17</sub>	54	108	126	126	126	126	126	126	126	126	108	1 278	1	
		环境风 险 R <sub>E</sub>	爆破产生冲击波、噪声 R <sub>18</sub>	36	0	108	108	0	0	0	54	54	36	54	450	11
			弃泥(弃渣)悬浮淤泥 R <sub>19</sub>	18	0	54	108	54	54	108	0	0	0	0	396	12
			船舶产生含油废水 R <sub>20</sub>	0	0	36	36	36	36	36	36	36	0	0	252	19
			办公生活产生垃圾、废水 R <sub>21</sub>	18	18	18	18	18	18	18	18	18	0	0	162	21
			船机设备产生尾气、烟尘 R <sub>22</sub>	0	42	36	36	36	36	36	36	36	54	36	384	13
纵向求和	369		1 194	1 116	1 080	954	918	936	1 134	1 134	1 008	1 188				
纵向排序		11	1	5	6	8	10	9	3	3	7	2				

### 3.3.2 风险评价结果

通过把计算所得数值列入计算表格内并整理后,从横向及纵向排序结果可得出如下分析结果:

1) 从 WBS-RBS 耦合矩阵定量值表的横向方向的结果能够看出,不利气象、高低温( $R_{17}$ )求和后的数值是最大的,说明不利气象、高低温促使安全风险发生的可能性极大,对海底沉管隧道施工安全事故的发生的影响也是最大的,因此将其定为关键性风险影响因素,提前采取必要的管控措施对其可能产生的影响进行防范,并对不利影响的后果进行评估,编制应急预案。临近因素 $R_{17}$ 之后的是临水临边防护不当 $R_7$ 、机械设备操作不当或发生故障 $R_8$ 、材料设备存放不当 $R_{14}$ 、临时用电操作不当 $R_{10}$ 等,是相对关键性的风险因素,在施工过程中 $R_8$ 由于机械设备故障或不当操作很容易导致机械伤害事故, $R_7$ 防护不当极易引起落水或高处坠落事故, $R_{14}$ 材料设备摆放不当极易造成的坠落或坍塌事故,而因临电问题 $R_{10}$ 引起的触电事故可能性也是较大的,以上几项需要作为重点进行预防并制定相应措施。办公生活区域的垃圾、废水 $R_{21}$ 、爆破警戒不当 $R_{13}$ 等因素排在后面,相对数值较小,则说明这几项风险因素相对于上述不利气象、高低温等为相对次要的因素,施工过程中需要稍加注意即可。

2) 从 WBS-RBS 耦合矩阵定量值表的纵向方向计算求和和排序结果可得,沉管预制( $W_2$ )、机电设备组装( $W_{11}$ )、北岸工程( $W_8$ )、南岸工程( $W_9$ )等排在靠前的位置,此4个作业单元根据计算结果风险相对于其它作业单元是相对较大的,应作为重点进行管控,数值较小也就是风险不大的2个是生活区( $W_1$ )和最终接头安装( $W_6$ )。根据以上矩阵的纵向求和结果,就可以明显地区分作业工序风险值的相对重要性。

## 4 结语

本文以大连湾海底沉管隧道工程为研究对象,以基于耦合矩阵分解体系的工程施工 HSE 管理模式,从职业健康、安全、环境3个方面考虑,提取了22个指标因素,建立了海底沉管隧道风险评价模型,进一步通过所构建的评价模型算出各作业单元的风险度并确定了风险等级,对海底沉管

隧道施工风险进行了综合评价,根据分析结果,给出相关的建议和措施,规避风险事故的发生,为工程的安全施工提供了有力保障。

### 参考文献:

- [1] 李宗坤,王特,葛巍,等.基于 WBS-RBS 和 AHP 的港珠澳大桥人工岛建设风险分析[J].郑州大学学报(工学版),2020,41(3): 62-66.  
LI Zong-kun, WANG Te, GE Wei, et al. Risk analysis of artificial island construction of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge based on WBS-RBS and AHP methods[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(3): 62-66.
- [2] 薛琳婧.基于 WBS-RBS 综合管廊 PPP 项目风险识别研究[J].科技风,2020(16):271.  
XUE Lin-jing. Research on risk identification of PPP project for comprehensive pipe corridor based on WBS-RBS[J]. Technology Wind, 2020(16): 271.
- [3] 郑甲.兰州轨道交通地铁车站深基坑施工安全风险管理研究[D].兰州:兰州交通大学,2020.  
ZHENG Jia. Research on safety risk management on deep pit excavation of subway station of Lanzhou rail transit[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [4] 赵晋.基于 WBS-RBS 与故障树耦合的煤矿开采风险辨识与评价[J].科技视界,2019(19):211-212,201.  
ZHAO Jin. Risk identification and evaluation of coal mining based on the coupling of WBS-RBS and fault tree[J]. Science & Technology Vision, 2019(19): 211-212, 201.
- [5] 句秋月,常春光.装配式建筑安全风险影响因素研究[J].沈阳建筑大学学报(社会科学版),2019,21(4):360-364.  
JU Qiu-yue, CHANG Chun-guang. Study on security risk influencing factors of prefabricated building projects[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Social Science Edition), 2019, 21(4): 360-364.
- [6] 李晓聪.基于 HSE 与 WBS-RBS 青岛海天中心超高层项目主体施工风险评价研究[D].青岛:青岛理工大学,2019.  
LI Xiao-cong. Research on construction risk evaluation of HSE and WBS-RBS super high-rise project subject[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2019.
- [7] 甄奕婷.基于 WBS-RBS 法的我国医疗领域廉洁风险识别与防控对策研究[D].天津:天津大学,2018.  
ZHEN Yi-ting. Study on identification and control measures of integrity risk in China's medical field based on WBS-RBS method [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [8] 刘婷.桥梁工程施工过程 HSE 风险评价研究[D].武汉:武汉工程大学,2017.  
LIU Ting. Research on HSE risk assessment of bridge construction [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2017.