

# FSRU改装应急关断系统设计分析

郑志峰 汪丹萍

上海中远船务工程有限公司 上海 200231

**摘要:** FSRU是浮式储存及再气化装置,也称LNG-FSRU,是把LNG接收终端从陆上搬到水上。与传统的陆上LNG接收终端相比,FSRU具有投资小、建设周期短、受地理条件限制少等优点,受到越来越多的用户关注。因为是可燃气体作业装置,它的安全性倍受重视,结合塞浦路斯FSRU改装项目的特点,文章从应急关断的级别,逻辑简图等各方面进行分析,归纳总结了典型FSRU改装项目的应急关断设计的理念和方法,并为其他同类型项目设计提供参考。

**关键词:** 应急关断系统层级; 关断逻辑

**引言:** 国内某型FSRU改装项目是将现有液化天然气运输船改造为浮式储存和再气化装置(Floating Storage and Regasification Unit)。

该运输船配备有一个Moss型货舱系统,五个货舱中的储存容量为137000 m<sup>3</sup>。改装后,FSRU仍能够作为LNG运输船运行,保持其自身的推进装置、现有蒸汽锅炉和推进涡轮机,具备自航能力包括在恶劣天气条件下,自航离开码头。

无论是作为运输船还是作为FSRU,在工作过程中,

均容易产生因火警、可燃气体泄漏而引起爆炸等严重危害装置和人命安全的事故。为了在第一时间阻断危害事故持续扩大,最大限度地保证人命和设备的安全,最大程度的减少对环境的损害,该FSRU需要设置相应等级应急关断系统(ESD&PSD)。应急关断系统(ESD&PSD)是FSRU最为重要的系统之一,必须具有可靠性、故障安全型等原则。

## 1 FSRU 典型应急关断系统层级图

如图1:

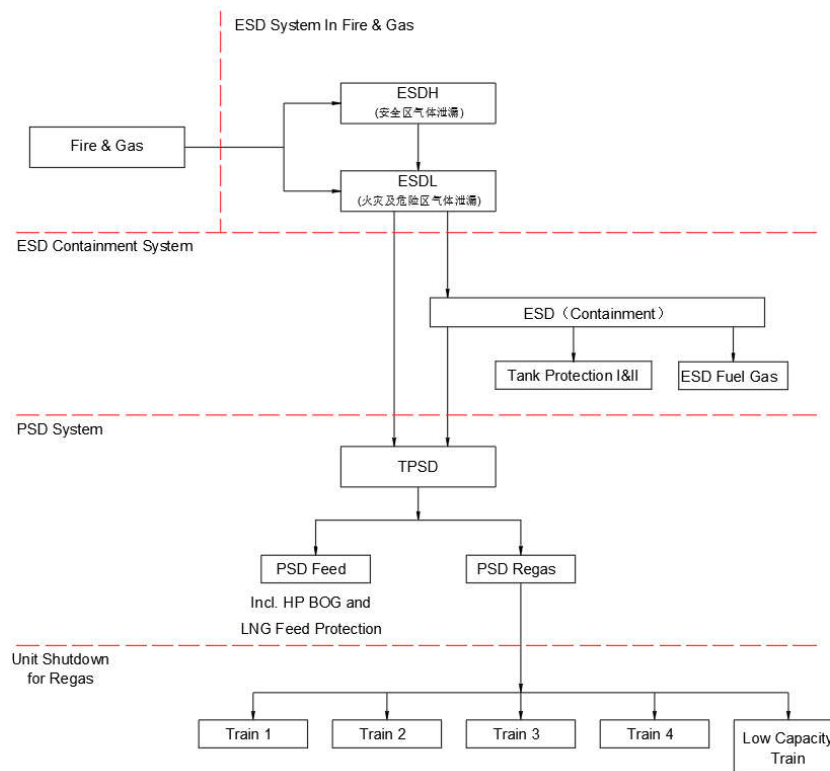


图1 FSRU 典型应急关断系统层级图

## 2 FSRU 典型关断层级图级别剖析

### 2.1 火气关断 (Fire& Gas) :

在火警或者气体泄漏时, 分区域应急关断, 可以在操作员视情况手动关断, 也可以由火气系统控制逻辑自动触发关断。

在本项目中, 火气关断根据不同区域又分为两个级别

#### 2.1.1 ESDH 在安全区域检测到可燃气体

所谓的安全区, 就是是住人或者有重要设备的场所, 如控制室和机舱等。这些区域关系到整个项目的人命安全和中央控制, 电力系统, 属于火气关断中高级别关断。当在这些区域探测到可燃气体时, 采取适当措施及时关断该区域相关的通风系统和正常用电设备, 以隔离可能发生的火花, 并防止气体进入内部安全区域。

基本逻辑如下, 见表 1:

触发原因: 安全区域检测到可燃气体	触发关断产生的结果:
<ul style="list-style-type: none"> <li>● EH 1.1原机舱和生活区进风口 (手动触发)</li> <li>● EH 1.3艙部新机舱进风口 (手动触发)</li> <li>● EH 1.4艙部艙室进风口 (手动或自动触发)</li> </ul> <p>备注: 在安全区探测到气体时, 除了艙部艙室自动触发应急关断, 其余区域均为手动, 由人为判断是否需要触发。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 低级别应急关断 ESDL</li> <li>EH 1.1 → EL 2.1</li> <li>EH 1.3 → EL 2.3 &amp; 2.4</li> <li>EH 1.4 → EL 2.7</li> <li>- 声光报警</li> <li>- 应急关停对应区域通风系统 (风机和风闸)</li> <li>- 启动应急发电机</li> <li>- 启动LNG安全系统 (ESD-Containment)</li> <li>- 触发全工艺流程关断TPSD</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● EH 1.2应急发电机房进风口 (手动触发)</li> </ul> <p>备注: 应急发电机房属于应急供电的局部区域, 不触发下一级ESDL关断</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 声光报警</li> <li>- 低级别应急关断 ESDL EL2.2</li> <li>- 应急关停应急发电机房通风系统 (风机和风闸)</li> <li>- 抑制应急发电机启动, 应急配电板进线开关跳闸</li> </ul>

表1 ESDH 逻辑关系简表

上述逻辑表可以看出, 根据火区划分了四个区域, EH 1.1/ EH 1.2/ EH 1.3/ EH 1.4

EH 1.1/1.2/1.3三个区域重要设备多, 执行关断动作需谨慎, 故该级别关断在中央控制室设置了手动触发按钮, 需操作人员确认后触发, 防止误报警自动触发产生不必要的经济损失。

EH 1.4 艙部安全区靠近再汽化模块, 可燃气体泄露风险大且无太多重要的控制和供电设备, 关断后不会影响太多经济损失。故此处关断采用了手动和自动两种模

式, 可以第一时间关断危险, 减少操作人员工作量。

#### 2.1.2 ESDL监测到火警或者在危险区域检测到气体火气关断中低级别的关断, 根据区域分以下三种情况

➤ 安全区检测到火警:

➤ 货舱区Cargo area (危险区) 检测到火警& 可燃气体:

➤ 再汽化模块Ragas area和气体外输区域Gas export area (危险区) 检测到火警&可燃气体:

基本逻辑如下, 见表 2:

触发原因 1: 安全区检测到火警	触发关断产生的结果:
<ul style="list-style-type: none"> <li>● EL 2.1艙部新机舱发生火警 (手动触发)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 声光报警</li> <li>- 应急关停对应区域通风系统 (风机, 空调和风闸)</li> <li>- 应急关停油泵</li> <li>- 30S内关闭LNG管汇区的供气阀组</li> <li>- 启动LNG安全系统 (ESD-Containment)</li> <li>- 触发全工艺流程关断TPSD</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● EL 2.2应急发电机房发生火警 (手动触发)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 声光报警</li> <li>- 应急关停对应区域通风系统 (风机, 空调和风闸)</li> <li>- 应急关停应急发电机</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● EL 2.3原机舱发生火警 (手动触发)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 声光报警</li> <li>- 应急关停对应区域通风系统 (风机, 空调和风闸)</li> <li>- 应急关停油泵</li> <li>- 30S内关闭LNG管汇区的对应的供气阀组</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● EL 2.4生活楼发生火警 (手动触发)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 声光报警</li> <li>- 应急关停对应区域通风系统 (风机, 空调和风闸)</li> <li>- 应急关停相关燃油设备</li> </ul>

续表:

触发原因 1: 安全区检测到火警	触发关断产生的结果:
● EL 2.7 艙部艙室发生火警(手动触发)	- 声光报警 - 应急关停对应区域通风系统(风机, 空调和风闸) - 应急关停相关燃油设备
备注: EL 2.2/2.3/2.4/2.7 没有自动触发安全工艺流程关断和启动LNG安全系统, 原因这些火警发生的区域没有给货舱和工艺流程模块供电, 火警不会很快传输到货舱和工艺模块。所以这些区域在应急关断后, 先消防视火情发展考虑是否关断货舱和工艺流程模块, 最大限度减少经济损失。	
触发原因 2: 货舱区(危险区)检测到火警& 可燃气体	触发关断产生的结果:
● EL 2.6货舱区检测到可燃气体(手动触发) ● EL 2.6货舱区确认火警(自动触发)	- 声光报警 - 应急关停对应区域通风系统(风机, 空调和风闸) - 应急关停油泵, LNG气泵 - 30S内关闭相应区域所有的电磁阀组 - 启动LNG安全系统(ESD-Containment) - 触发安全工艺流程关断TPSD
触发原因 3: 再气化模块和气体外输区域(危险区)检测到火警&可燃气体	触发关断产生的结果:
● EL2.8再气化模块和气体外输区域(危险区)确认火警(自动触发) 备注: 泄放(blowdown)系统亦可手动触发。	- 声光报警 - 应急关停对应区域通风系统(风机, 空调和风闸) - 应急关停油泵, LNG气泵 - 30S内关闭相应区域所有的电磁阀组 - 启动LNG安全系统(ESD-Containment) - 触发安全工艺流程关断 - 延迟3分钟启动泄放(blowdown)系统, 以确保人员安全疏散
● EL 2.9再气化模块和气体外输区域(危险区)检测到可燃气体(手动触发)	- 声光报警 - 应急关停对应区域通风系统(风机, 空调和风闸) - 应急关停油泵, LNG气泵 - 30S内关闭相应区域所有的电磁阀组 - 启动LNG安全系统(ESD-Containment) - 触发安全工艺流程关断TPSD
备注: 危险区域发生火灾是非常危险的, 所以在火警探测确认火警后, 第一时间自动触发关断, 并启动blowdown, 将管路中的气体及时释放出去。而危险区域发生气体泄漏是较大概率的时间, 为了防止工艺流程频繁关断, 设为手动, 由操作人员视情况触发。	

表2 ESDL逻辑关系简表

2.2 ESD-Containment

LNG安全系统(ESD-Containment)是LNGC/FSRU非常重要的系统之一, 主要是为LNG在装卸或使用过程中, 因为故障而引发更大的危险

该层级包含两级子层级:

1) LNG货舱罐的保护:

在LNG货舱装卸过程中, 当货舱压力过低/货舱隔

舱压差过高; 货舱液位过高时需要紧急关断LNG装卸系统, 防止故障导致LNG罐体因为LNG存储的变化产生变形, 引发重大经济损失。

2) 双燃料机组/推进主锅炉供气安全系统:

根据 IGF CODE<sup>[3]</sup>, 当出现在双壁管内探测到气体、双壁管风机失效, 以及双燃料机组/推进主锅炉供气单元的风机失效等故障, 立即关断供气系统进口阀, 同时相关设备由燃气模式自动切换为燃油模式, 保持电力正常供应。因为这些故障发生, 极大增加了可燃气体扩散到安全区的风险, 第一时间关断供气主阀, 可以有效降低这些风险, 避免更大范围的应急关断。

**作者简介:** 郑志峰(1977), 男, 大专, 工程师, 从事船舶与海洋工程电气专业设计工作

汪丹萍(1982), 女, 本科, 助理工程师, 从事船舶与海洋工程轮机专业设计工作

基本逻辑如下,见表3:

触发原因: ESD-Containment	触发关断产生的结果:
<ul style="list-style-type: none"> <li>● ESDH/ESDL</li> <li>● ESD/F&amp;G系统故障</li> <li>● 电源故障</li> <li>● 船岸连接系统SSL</li> <li>● 控制空气,仪表空气,液压/介质压力过低</li> <li>● 货舱液位过高(99.6%)</li> <li>● 货舱压力低/压差高</li> </ul> 探测到一个舱触发货舱罐保护功能,2个及以上舱出现问题,触发TPSD	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 启动LNG安全系统(ESD-Containment)</li> <li>- 触发全工艺流程关断TPSD</li> </ul>
触发原因: LNG货舱罐的保护	触发关断产生的结果:
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 货舱压力低/压差高</li> </ul> 仅探测到一个舱	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 关闭相应货舱的LNG泵</li> <li>- 关闭LNG压缩机</li> <li>- 关闭相应货舱的LNG喷淋阀</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 货舱液位高(99%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 关闭相应货舱的LNG再气化供给泵</li> <li>- 关闭相应货舱的LNG注入阀</li> <li>- 关闭再气化装置LNG回流阀</li> <li>- 关闭LNG顶部注入阀</li> </ul>
触发原因: 供气安全系统	触发关断产生的结果:
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 供气系统手动关闭</li> <li>● 主供气阀上方探测到可燃气体</li> <li>● 燃气发电机/GCU/燃气锅炉双臂管内探测到可燃气体</li> <li>● 燃气发电机/燃气锅炉双臂管风机失效</li> <li>● 燃气发电机/GCU/燃气锅炉周边探测到可燃气体</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 关闭相应设备的供气主阀</li> <li>- 相应设备自动由气转油(发电机或锅炉)或者关闭(GCU)</li> </ul>

表3 ESD-Containment 逻辑关系简表

2.3 Level2生产工艺流程关断PSD(Process Shutdown):  
FSRU的生产工艺流程主要有两类构成:

1)再气化模块Regas module:将液态LNG再气化后输送到岸上

2)再气化模块供气流程LNG FEED:将舱内的液态LNG输送到再气化模块。

HPC BOG高压压缩机:在装载过程中,货舱内产生的大量气态LNG通过高压压缩机压缩后直接输送到岸上。

这些工艺流程生产过程中,因为设备故障,管路泄

露等造成气体泄漏或液态LNG泄露,从而损失主船体或造成设备进一步破坏,甚至更大的危险。故而根据HAZOP分析后,一个可靠的PSD应急关断系统是保证设备安全运行的保障。

根据上述两种生产流程,PSD设计成下列三种状态。

1)全工艺流程关断TPSD:同时关断所有工艺流程。

2)再气化流程关断(PSD Regas)。

3)再气化模块供气流程关断(PSD Feed)。

基本逻辑如下,见表4:

触发原因:全工艺流程关断TPSD	触发关断产生的结果:
<ul style="list-style-type: none"> <li>● ESDH/ESDL</li> <li>● TPSD手动按钮(中控室)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 触发全工艺流程关断TPSD</li> <li>- 声光报警</li> </ul>
触发原因:再气化流程关断(PSD Regas)	触发关断产生的结果:
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 全工艺流程关断(TPSD)</li> <li>● 手动按钮(分布在再气化模块)</li> <li>● 从岸方来的关断指令</li> <li>● 工艺流程故障</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 再气化装置关断</li> <li>- 再气化生产线关断(USD)</li> <li>- 向岸输气系统脱扣</li> </ul>
触发原因:再气化模块供气流程关断(PSD Feed)	触发关断产生的结果:
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 全工艺流程关断(TPSD)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 关闭高低压压缩机</li> <li>- 关闭去压缩机的电磁阀</li> <li>- 关闭regas供气泵</li> <li>- 关闭气体外输阀等</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Regas供气泵出口压力过高/过低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 关闭regas供气泵</li> </ul>

续表

触发原因：全工艺流程关断TPSD	触发关断产生的结果：
● 来自高压压缩机本地控制板的停止信号	- 关闭高压压缩机 - 关闭去压缩机的电磁阀

表4 工艺流程关断逻辑关系简表

2.4 Level 1单元关断USD (Unit Shutdown) :

这个级别可以分别关断如下每一条生产线：

- 1) 1号再气化生产线关断
- 2) 2号再气化生产线关断
- 3) 3号再气化生产线关断
- 4) 4号再气化生产线关断
- 5) 低容量再气化生产线关断

该级关断为最低级级别设备本地关断，保护本地设备，设备厂家提供关断逻辑。

结论

本文通过对典型FSRU改装项目应急关断系统进行研究，在FSRU关断级别，关断逻辑等几个方面进行了重点

分析，比较全面的阐述了典型FSRU改装项目应急关断的特点及设计要点，为同类型项目应急关断系统设计提供了参考依据。

参考文献

[1]中国船级社.钢质海船入级规范，北京:人民交通出版社，2018.

[2]美国船级社.GUIDE FOR BUILDING AND CLASSING FACILITIES ON OFFSHORE INSTALLATIONS，2000

[3]使用气体或其他低闪点燃料的船舶国际安全规范.INTERNATIONAL CODE OF SAFETY FOR SHIPS USING GASES OR OTHER LOW-FLASHPOINT FUELS