

# LOPA在SIL定级中的应用

Application of LOPA in SIL Determination

---

员文权| 技术总监 | 上海翊员科技有限公司

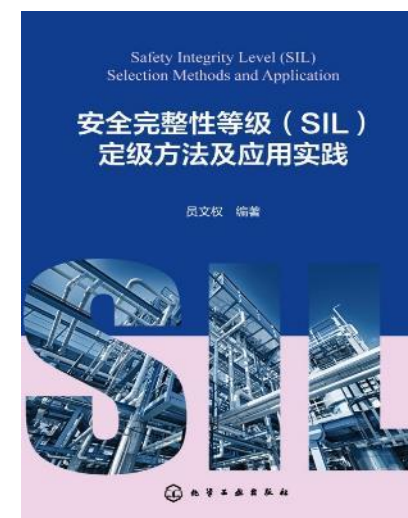
Roderick Yuan| Technical Director| Shanghai STRM Technology Co., Ltd.

# 嘉宾介绍 Speaker Bio

- 姓名：员文权(Roderick Yuan)
- 职位：技术总监
- 公司：上海翊员科技有限公司
- 联系方式：15921404040



- 
- 背景：擅长工艺安全、HAZOP、SIL、粉尘爆炸、静电危害控制、业务连续性管理等。
  - 资质证书
    - 美国注册安全工程师(CSP)
    - 美国CCPS认证工艺安全专家
    - 注册功能安全专家(CFSE)
    - 美国注册工业卫生师(CIH)
    - 美国注册危险物质管理师(CHMM)
    - 注册业务连续性专家(CBCP)



# 议程 Agenda

## LOPA在SIL定级中的应用

HAZOP、LOPA及SIL定级之间的关系

LOPA的基本原则及分析流程

SIL定级举例

SIL定级中的常见应用误区

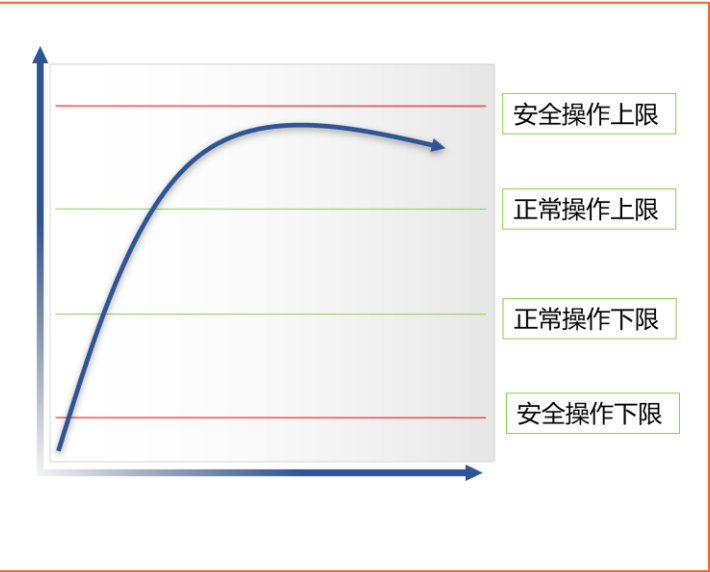


# 术语

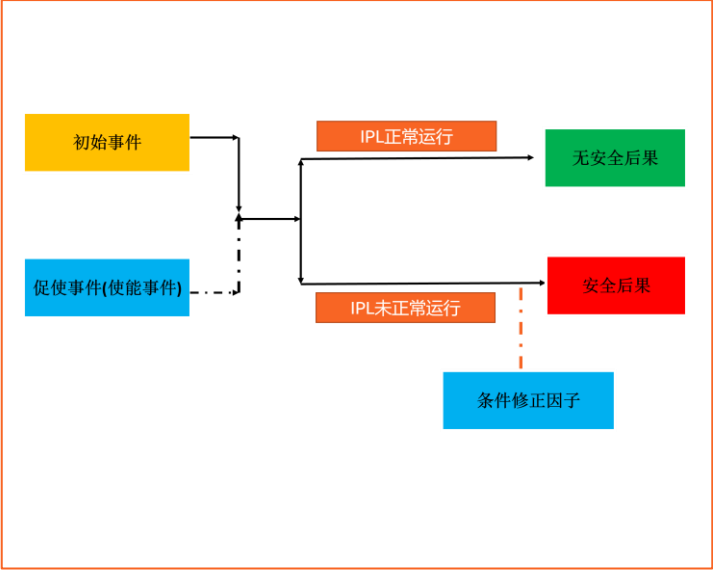
- HAZOP: Hazard and Operability Study 危险与可操作性分析
- LOPA: Layer of Protection Analysis 保护层分析
- SIF: Safety Instrumented Function 安全仪表功能
- SIL: Safety Integrity Level 安全完整性等级
- RRF: Risk Reduction Factor 风险降低因子
- PFD: Probability of Failure on Demand 需求时的失效概率

# HAZOP、LOPA及SIL定级之间的关系

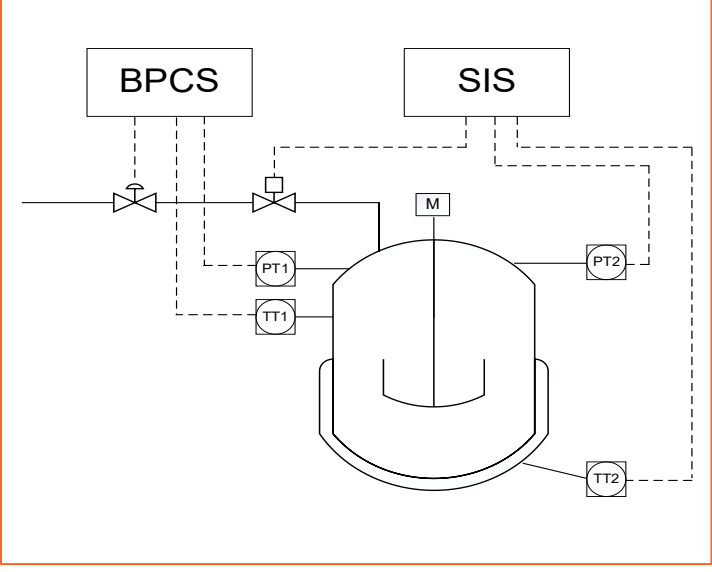
HAZOP分析



保护层分析(LOPA)

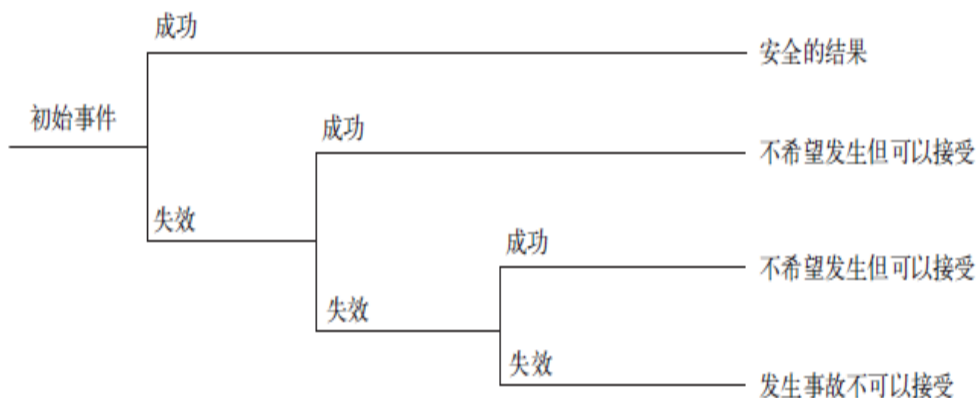


SIL定级



# LOPA的应用场景

保护层分析：一种有效的、基于风险的半定量风险评估工具。

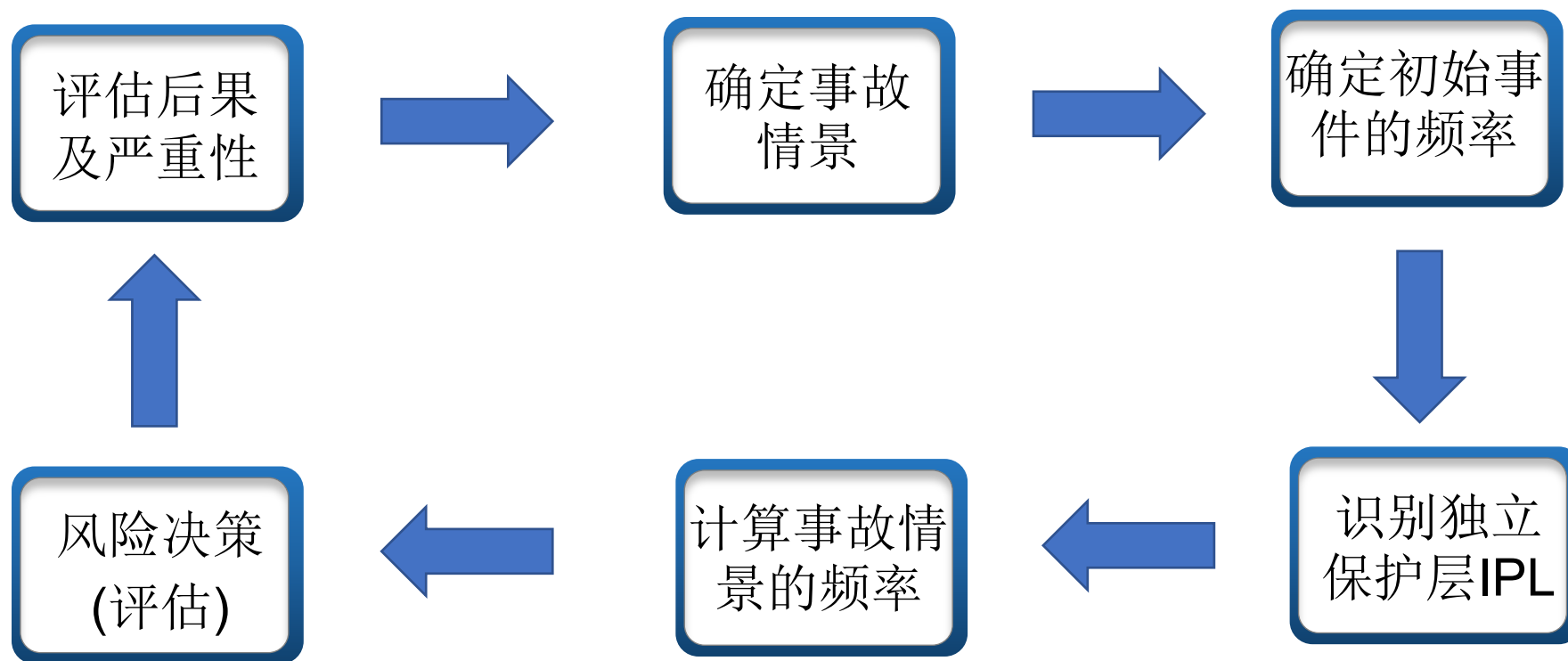


安全完整性(SIL)定级。

假想事故情景的后果特别严重或风险较高。

事故情景太过复杂，定性方法难以评估。

# LOPA分析流程



# 事故情景的组成要素



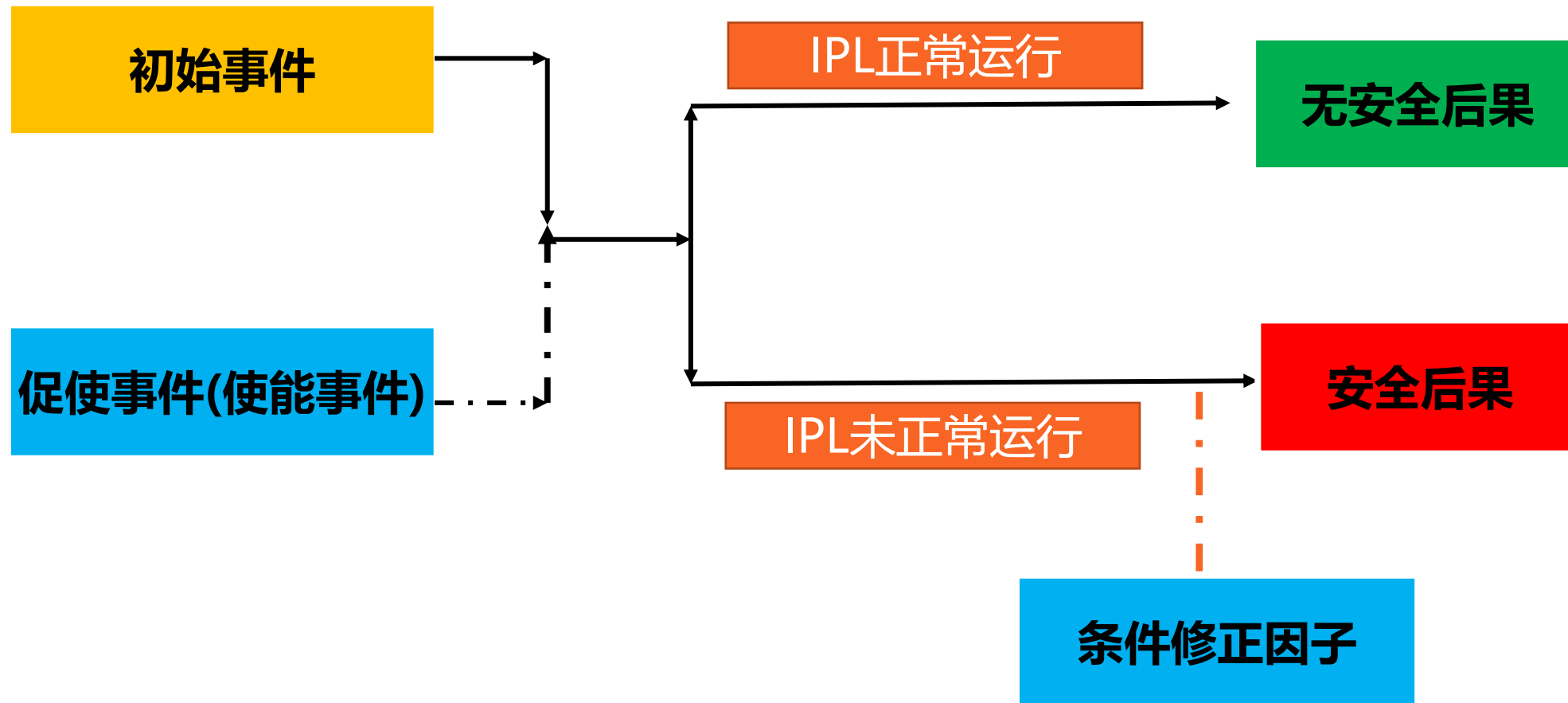
单一初始事件



后果



# 事故情景的组成要素

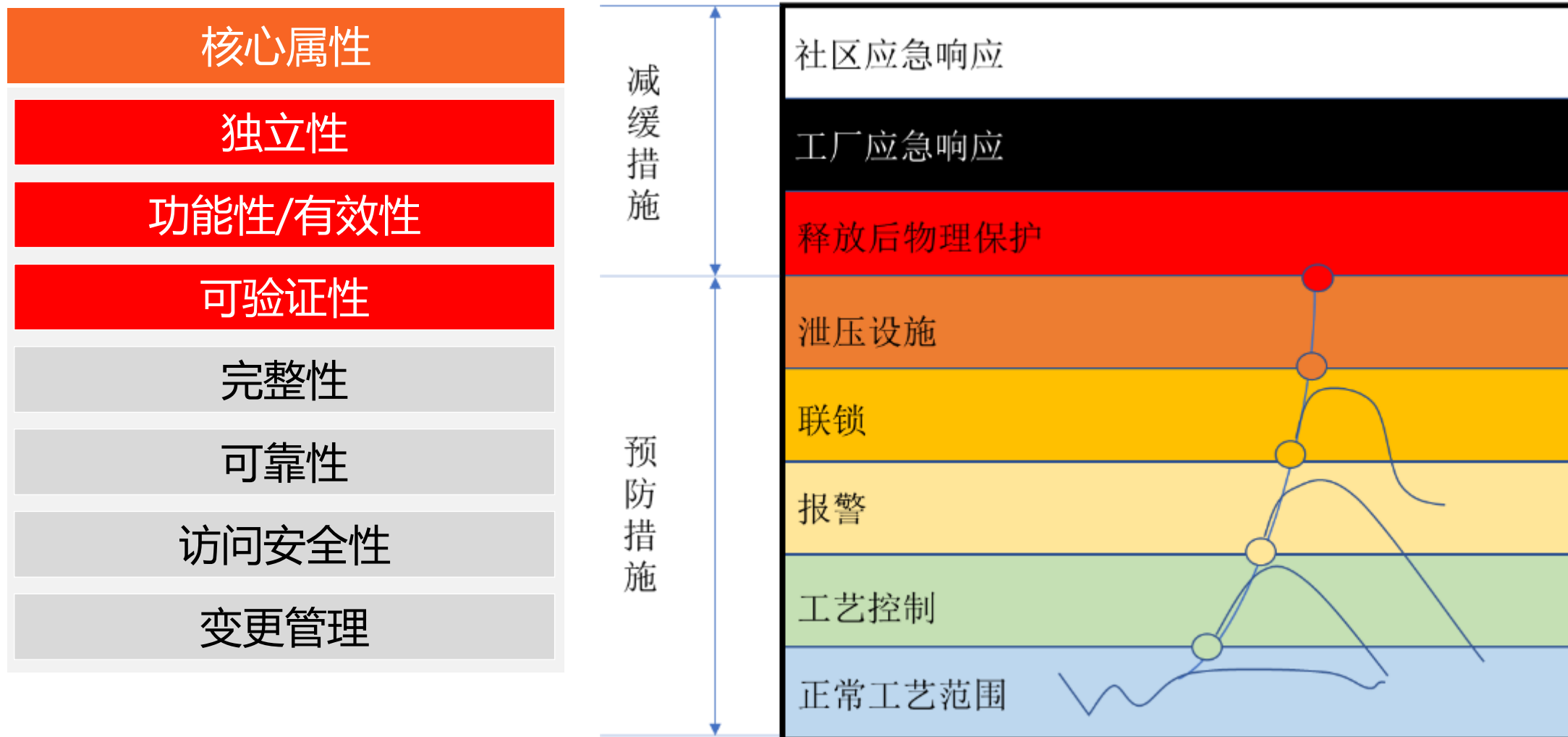


# 初始事件

序号	原因	频率(/年)
1	基本过程控制系统(BPCS)控制回路失效	$1 \times 10^{-1}$
2	安全控制、报警及联锁系统(SCAI)误动作	$1 \times 10^{-1}$

序号	原因	频率(/年)
1	在执行常规作业时操作人员失误(1次/每周操作)	1
2	在执行常规作业时操作人员失误(1次/周-1次/月操作)	$1 \times 10^{-1}$
3	在执行非常规作业时操作人员失误(1次/每月操作)	$1 \times 10^{-2}$

# 独立保护层(IPL)



# 独立保护层

## 主动型

- BPCS
- 安全仪表系统(SIS)
- 泄压设施

## 被动型

- 阻火器
- 溢流管线
- 围堰

## 人员响应

- 操作人员对报警的响应动作

# 独立保护层

序号	独立保护层	响应失效概率(PFD)	风险降低因子(RRF)
1	基本过程控制系统(BPCS)	$1 \times 10^{-1}$	10
2	SIL-1安全仪表功能	$\geq 10^{-2} \sim < 10^{-1}$	$> 10 \sim \leq 100$
3	SIL-2安全仪表功能	$\geq 10^{-3} \sim < 10^{-2}$	$> 100 \sim \leq 1000$
4	SIL-3安全仪表功能	$\geq 10^{-4} \sim < 10^{-3}$	$> 1000 \sim \leq 10000$
5	SIL-4安全仪表功能	$\geq 10^{-5} \sim < 10^{-4}$	$> 10000 \sim \leq 100000$
6	泄压设施	$1 \times 10^{-2}$	100
7	防爆隔离阀	$1 \times 10^{-1}$	10
8	止回阀	$1 \times 10^{-1}$	10
9	压力调节阀	$1 \times 10^{-1}$	10
10	限流孔板	$1 \times 10^{-2}$	100
11	机械锁定装置	$1 \times 10^{-2}$	100
12	连续排风系统(无运行检测)	$1 \times 10^{-1}$	10
13	连续排风系统(有运行检测)	$1 \times 10^{-2}$	100
14	紧急排风系统	$1 \times 10^{-1}$	10
15	自动灭火系统	$1 \times 10^{-1}$	10
16	工艺设备自动抑爆系统	$1 \times 10^{-1}$	10

# 促使事件

- 某一类条件：不是事件链的初始事件也不是保护措施
- 初始事件持续发展的必要条件
- 影响导致最终后果的频率
- LOPA过程中，与初始事件一起考虑，修正频率

季节、天气

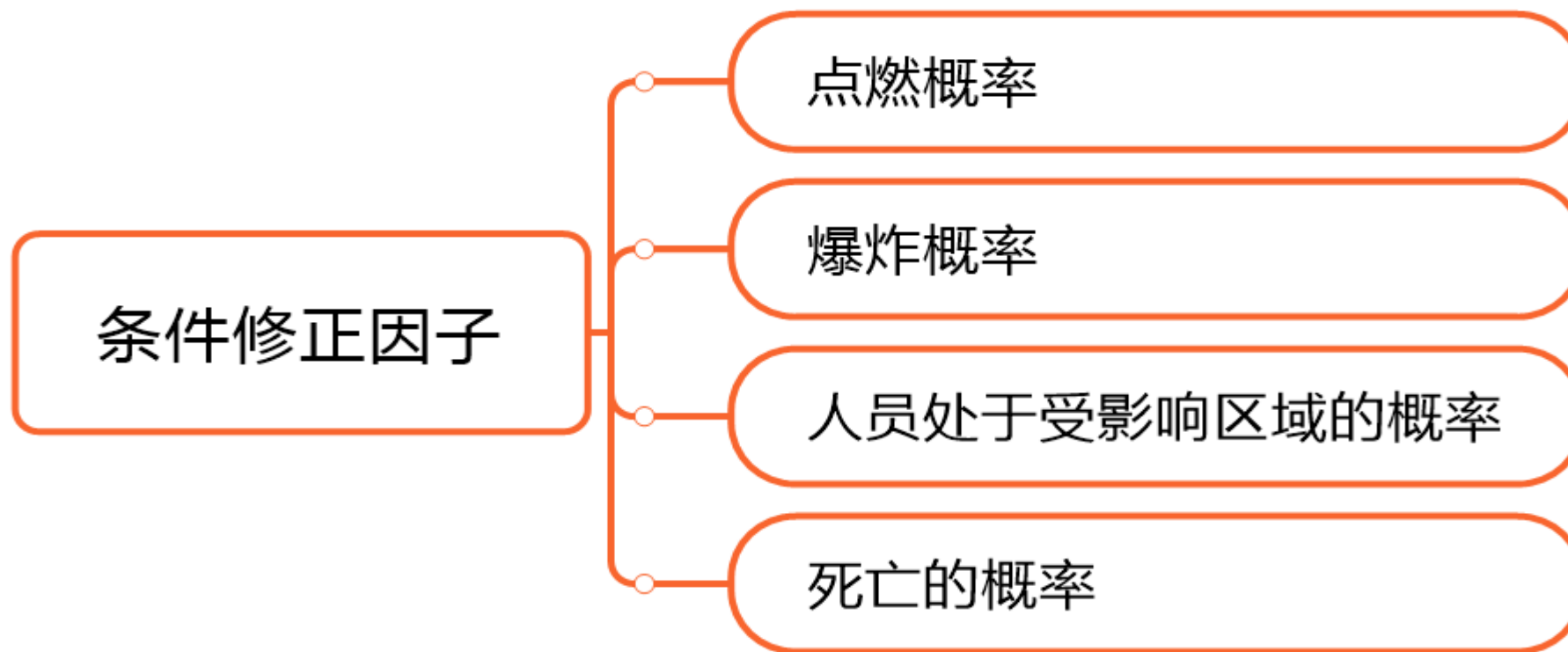
生产模式或者  
特定阶段

生产及产品周  
期

$$P = \frac{\text{处于危险的时间}}{\text{总时间}}$$

# 条件修正因子

Conditional Modifiers(条件修正因子): 可以理解为某一初始事件需要导致最终事故后果(如人员死亡、着火爆炸)必须同时具备的一些条件因素。



# 人员处于影响区域的概率

$$P = \frac{\text{人员处于受影响区域的时间}}{\text{总时间}}$$

## 概率

- 如果现场人员很少出现在现场，只有当巡检时才会出现，如储罐区，人员处于受影响区域的概率取0.1。
- 一般作业区域中现场人员通常情况下出现的可能性较大，因此人员处于受影响区域的可能性取0.5。

## 注意事项

- 在事故后果分析中已经考虑了人员处于受影响区域的可能性。
- 初始事件为人员操作失误。
- 如果在事故情形发展过程中需要人员进行响应。



# 点燃概率

## 方法1

- 对于易燃气体:  $P=0.3$
- 对于易燃液体:  $P=0.1\sim0.3$ (根据易燃物质的挥发性确定)
- 对于可燃液体:  $P<0.1$

## 方法2

- 附近有明火设备, 如焚烧炉:  $P=1$
- 一般的工艺区域内:  $P=0.5$
- 远离工艺区域的位置, 如储罐区:  
 $P=0.1$

# 频率计算及SIL定级

$$f^c = f^I \times P^E \times \prod_{j=1}^J PFD_j \times \prod_{m=1}^M P^m$$

$f^c$ : 所讨论的单一事故情形的后果发生频率;

$f^I$ : 初始事件的发生频率;

$P^E$ : 促使事件的发生概率;

$PFD_j$ : 第j个独立保护层的响应失效概率;

$P^m$ : 第m个条件修正因子的发生概率。

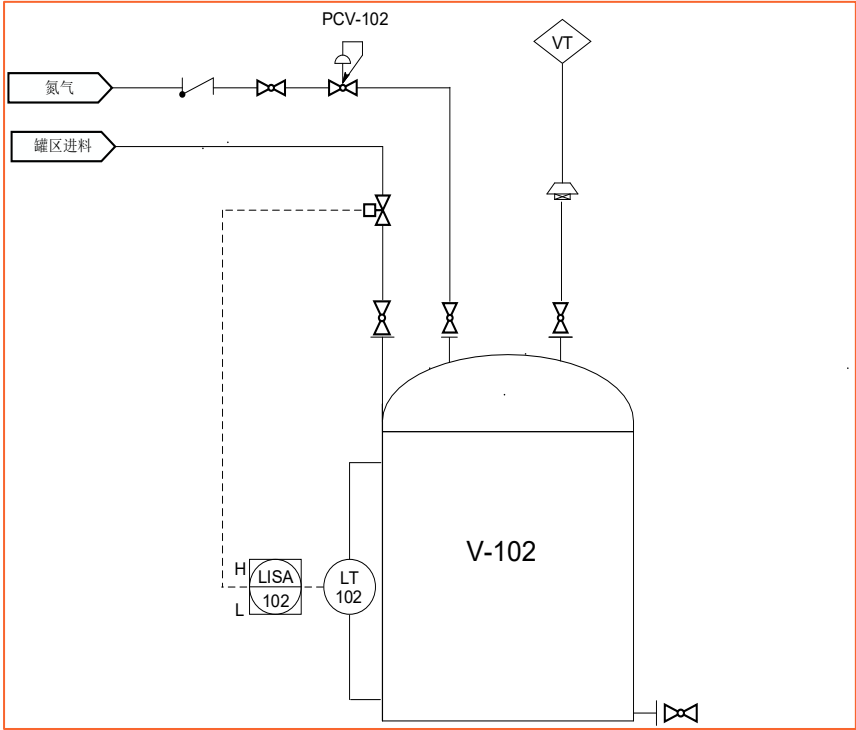
# 频率计算及SIL定级

$$PFD_{avg IPL} = \frac{f_{tolerable}}{f_C}$$

$$RRF = \frac{1}{PFD_{avg}}$$

安全完整性等级(SIL)	需求时的平均失效概率(PFDavg)	风险降低因子(RRF)
SIL4	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	$> 10000$ to $\leq 100000$
SIL3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	$> 1000$ to $\leq 10000$
SIL2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	$> 100$ to $\leq 1000$
SIL1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	$> 10$ to $\leq 100$

# SIL定级举例



要素	描述	值
原因	氮气管线上PCV-102故障(开度过大)	0.1/年
后果	缓冲罐V102超压，最高可以达到2barg，丙酮泄漏，潜在火灾爆炸风险。	-
促使条件	每年只生产6个月	=6/12=0.5
独立保护层	呼吸阀	0.1
修正因子	点燃概率	0.5
修正因子	人员处于受影响区域的概率	0.1
可接受标准		1E-5/年

$$fc = 0.1/\text{年} \times 1 \times 0.1 \times 0.5 \times 0.1 = 5E - 4/\text{年}$$

# SIL定级举例

方法1

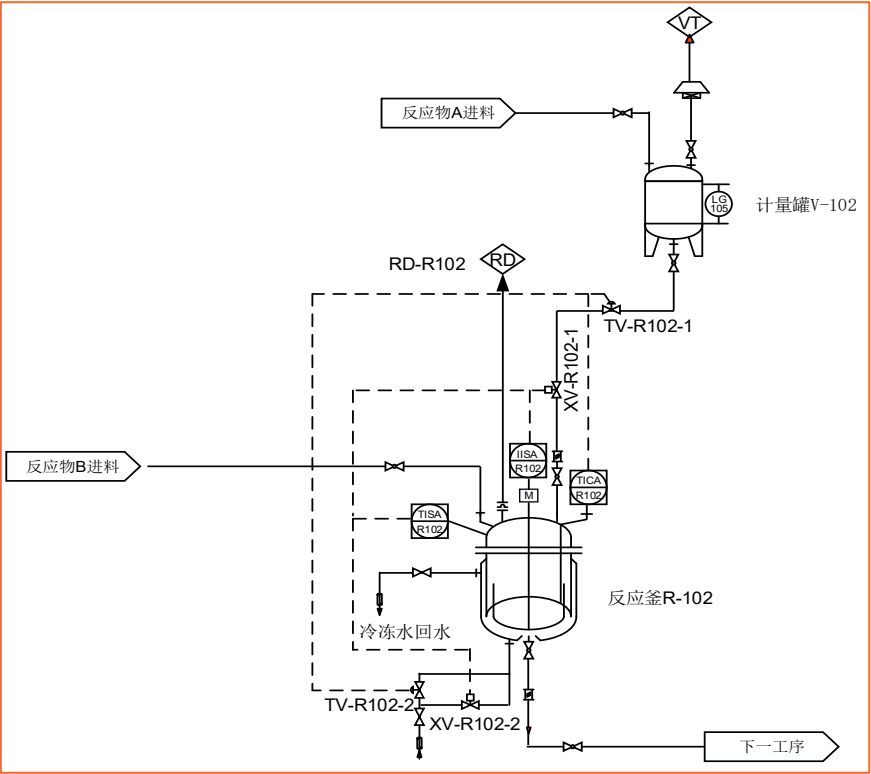
▪  $PFD\ avg = \frac{f_{tolerable}}{f_c} = \frac{1E-5/年}{5E-4/年} = 2 \times 10^{-2}$

方法2

▪  $RRF = \frac{f_c}{f_{tolerable}} = \frac{5E-4/年}{1E-5/年} = 50$

安全完整性等级(SIL)	需求时的平均失效概率(PFDavg)	风险降低因子(RRF)
SIL4	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	$> 10000$ to $\leq 100000$
SIL3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	$> 1000$ to $\leq 10000$
SIL2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	$> 100$ to $\leq 1000$
SIL1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	$> 10$ to $\leq 100$

# SIL定级举例



要素	描述	值
原因	温度控制回路TICA-R102失效(调节阀TV-R102-1开度过大)	0.1/年
后果	反应釜R102内反应失控，反应釜超压破裂，潜在人员伤害。	-
促使条件	每年只生产6个月	=6/12=0.5
独立保护层	爆破片(RD-R102)	0.01
修正因子	点燃概率	1
修正因子	人员处于受影响区域的概率	0.1
可接受标准		1E-5/年

$$fc = 0.1/\text{年} \times 1 \times 0.01 \times 1 \times 0.1 = 1E - 4/\text{年}$$

# SIL定级举例

## 方法1

▪  $PFD\ avg = \frac{f_{tolerable}}{f_c} = \frac{1E-5/年}{1E-4/年} = 10^{-1}$

## 方法2

▪  $RRF = \frac{f_c}{f_{tolerable}} = \frac{1E-4/年}{1E-5/年} = 10$

安全完整性等级(SIL)	需求时的平均失效概率(PFDavg)	风险降低因子(RRF)
SIL4	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	$> 10000$ to $\leq 100000$
SIL3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	$> 1000$ to $\leq 10000$
SIL2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	$> 100$ to $\leq 1000$
SIL1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	$> 10$ to $\leq 100$

# 常见应用误区





# CONTACT



[pscinitiative.org](https://pscinitiative.org)



[info@pscinitiative.org](mailto:info@pscinitiative.org)



**Rosie Towe:**  
**+44 (0) 7342 990241**



**PSCI**



**@PSCInitiative**

## For more information about the PSCI please contact:

### **PSCI Secretariat**

Carnstone Partners Ltd  
Durham House  
Durham House Street  
London  
WC2N 6HG

[info@pscinitiative.org](mailto:info@pscinitiative.org)

+44 (0) 7342 990241

### **About the Secretariat**

Carnstone Partners Ltd is an independent management consultancy, specialising in corporate responsibility and sustainability, with a long track record in furnishing industry groups.

