

ATEX SIL

张伟 郝光建

(上海恩德斯豪斯自动化设备有限公司¹, 上海 200241)

摘要: 着重介绍了新的欧洲防爆标准 ATEX 和功能安全等级认证 SIL, 并就这两个标准在恩德斯豪斯公司的仪表产品中的应用作了说明。

关键词: 防爆标准 ATEX 功能安全 等级认证 应用

0 引言

仪表认证在众多领域有着广泛的应用。在爆炸性环境主要应用的认证包含 FM, CSA, ATEX, TIIS 等防爆认证; 在电气方面的认证包含 EMC, CE 等; 在食品制药行业主要应用的认证包含 FDA, 3A 等卫生认证。

本文将着重介绍近几年流行的 ATEX 防爆认证和 SIL 安全认证, 以及它们在恩德斯豪斯公司 (Endress+Hauser) 仪表中的应用。

1 新的欧洲防爆标准 ATEX

ATEX 是以 “ATmosphere EXplosible” (爆炸性环境) 命名的标准, 由两个欧盟指令组成: 欧洲 94/9/EC 标准和 1999/92/EC 标准。1999/92/EC 是针对具有潜在爆炸性气体环境的公司, 而 94/9/EC 是针对前者的仪表供应商的。

ATEX 认证是防爆电气产品在欧洲市场的强制认证, 其严格规定了防爆产品的特性和使用操作规范, 自 2003 年 7 月 1 日起, 只有拥有 ATEX 认证的产品, 才可以在欧盟国家内被生产、制造、销售、并应用于易燃易爆危险区域。也就是说, 任何在欧盟国家内销售同时在易燃易爆危险区域内应用的防爆产品必须通过 ATEX 的认证。该认证取代了欧盟各国的地方认证。

1.1 “ATEX 137 (ATEX 1999/92/EC art.137) directive” 标准

“ATEX 137 (ATEX 1999/92/EC art.137) directive” 标准于 2000 年 1 月 28 日生效, 2003 年 7 月 1 日起强制执行。该标准对气体和粉尘的爆炸性环境进行了风险评估, 定义了“区”的概念。

1.1.1 爆炸性混合物

爆炸性混合物是指在大气条件下 ($-20^{\circ}\text{C} < \text{温度} < +60^{\circ}\text{C}$, $0.8\text{ bar} < \text{压力} < 1.1\text{ bar}$), 气体、蒸汽、薄雾、粉尘或纤维状的易燃物质与空气混合, 点燃后燃烧将在整个范围内传播的混合物。

1.1.2 “区” (Zone)

“区”是指爆炸危险场所的全部或部分。“区”的分类是根据爆炸性混合物的发生概率来划分的, 按照爆炸性混合物出现的频率和持续时间可分为不同危险程度的若干区, 如表 1 所示。

表 1

爆炸性混合物的发生概率	气体混合物	粉尘混合物
不大可能发生, 或只发生短暂的一段时间($t < 10$ 小时/年)	2 区 (Zone 2)	22 区 (Zone 22)
很可能偶尔发生 ($10 < t < 1000$ 小时/年)	1 区 (Zone 1)	21 区 (Zone 21)
连续发生, 或发生很长一段时间, 或经常发生 ($t > 1000$ 小时/年)	0 区 (Zone 0)	20 区 (Zone 20)

1.2 “ATEX 95 (ATEX 94/9/EC) directive” 标准

“ATEX 95 (ATEX 94/9/EC) directive” 标准于 1996 年 3 月生效, 2003 年 7 月 1 日起强制执行。该标准的推广使用提高了仪表的安全性能, 保护了现场工人的安全与健康; 使得各国的取证程序一致化; 方便了各国仪表的自由贸易。ATEX 95 标准与 ATEX 137 标准相匹配, 定义了与“区”相对应的防护方式。

列举一台符合 ATEX 95 安全标准的, 恩德斯豪斯公司的杆式雷达液位计铭牌上的安全标示如下:

ATEX II 2 (1) G EEx d [ia] IIC T6

这表明该仪表遵循 ATEX 标准, 可用于常规行业 1 区的气体防爆, 防爆型式为 EEx d [ia], 易燃气体类别为 IIC, 温度组别为 T6。下面将分别介绍爆炸性环境类别/级别、易燃气体类别、温度组别、防爆型式等几个概念。

1.2.1 爆炸性环境类别/级别

ATEX 95 标准根据仪表使用的爆炸性环境划分类别, 类别可再划分为级别, 如表 2 所示。

表 2

采矿行业	类别 I (Group I)		
	级别 M1 (Category M1)		级别 M2 (Category M2)
	在危险环境下运行 (IM1)		在危险环境下关闭 (IM2)
常规行业	类别 II (Group II)		
	级别 1 (Category 1)	级别 2 (Category 2)	级别 3 (Category 3)
气体 (Gas-Ex)	Zone 0 (II 1G)	Zone 1 (II 2G)	Zone 2 (II 3G)
粉尘 (Dust-Ex)	Zone 20 (II 1D)	Zone 21 (II 2D)	Zone 22 (II 3D)
	资质第三方授予证书		制造商授予证书

1.2.2 易燃气体类别

在爆炸性环境里, 可以引起爆炸的引燃源包括热表面、火焰、机械摩擦火花、静电火花、闪电、电磁辐射、超声波辐射等。ATEX95 标准按照热表面的引燃温度和电火花的引燃能量, 对易燃气体或蒸汽进行了分类, 如表 3 所示。

表 3

类别 (Group)	最小引燃能量 (本安)	最大试验安全间隙 (隔爆)
I 采矿行业	甲烷	
II 常规行业	A $>160 \mu J$ (如丙烷等)	0.4mm
	B $>60 \mu J$ (如乙烯等)	0.2mm
	C $>20 \mu J$ (如氢气/乙炔等)	0.15mm

1.2.3 温度组别

温度组别是按仪表最高表面温度划分的组别。温度组别划分方法如表 4 所示。

表 4

温度组别	最高表面温度	注释
T1	450℃	环境温度：40℃
T2	300℃	
T3	200℃	
T4	135℃	
T5	100℃	
T6	85℃	

在表 4 中，最高表面温度指仪表在允许范围内的最不利条件下运行时，暴露于爆炸性混合物的任何表面的任何部分，不可能引起仪表周围爆炸性混合物爆炸的最高温度。

为了防止非导电($RS > 1 \text{ G}\Omega$) 塑料表面所积聚的静电可能使爆炸性混合物引燃，ATEX95 标准还对非导电表面需满足的条件做出了规定，如表 5 所示。

表 5

	暴露的塑料外壳面积		杆、缆的最大直径		金属表面上塑料衬里的最大厚度
类别(Group)	0 区	1 区	0 区	1 区	0+1 区
II A	50cm ²	100cm ²	3mm	30mm	2mm
II B	25cm ²	100cm ²	3mm	30mm	2mm
II C	4cm ²	20cm ²	1mm	20mm	0.2mm

1.2.4 防爆型式

为防止点燃周围爆炸性混合物需对仪表采取各种特定措施的防爆型式。“ATEX 95 (ATEX 94/9/EC) directive” 标准所划分防爆型式包括：本安 EEx ia/ib，隔爆 Ex d，增安 Ex e，填充 Ex q（电子部分浸没于石英粉中），正压 Ex p（空气或惰性气体加压于电子部分），浸油 Ex o（电子部分浸没于油中），封装 Ex m（电子部分封装在环氧树脂中），粉尘隔爆 Ex tD，粉尘本安 Ex iD，粉尘封装 Ex mD 等。

归纳起来，这些防爆型式主要从以下 3 个方面采取安全防护措施：①避免爆炸性环境的产生和扩散；②避免在爆炸危险场所出现潜在引燃源；③减少爆炸所带来的危害。下面将主要介绍本安 EEx ia/ib、隔爆 Ex d、增安 Ex e 和隔爆增安 Ex de 这 4 种防爆型式。

1.2.4.1 本安 EEx ia/ib (intrinsic safety EEx ia/ib)

在有关标准规定的试验条件下，正常工作或规定故障状态下产生的电火花和热效应均不能点燃规定爆炸性气体的电路称为本质安全电路；全部电路为本质安全电路的仪表称为本安型仪表。

本安仪表必须连接在本安电路中。整个电路的本安是通过如下 3 个方面实现的：①本安型仪表；②电源的能量限制，如安全栅（使电源的电流、电压指标低于本安仪表的指标）；③整个电路的低电容、电感以防止能量的储存。

本安型仪表主要用于 1 区和 0 区。通过使用本安电路整个电路得到了保护，不再需要额外的机械保护。另外本安型仪表可以在现场带电打开。

依据 EN 50020 标准，EEx ia 和 EEx ib 的完整解决方案如图 1 所示（注：图中 Cerabar S

为本安型压力变送器)。由图 2 可知 EEx ia 电路具有两个故障的安全裕度, 而 EEx ib 电路只有 1 个故障的安全裕度。EEx ia 仪表可以用于 0 区, 而 EEx ib 仪表只能用于 1 区。

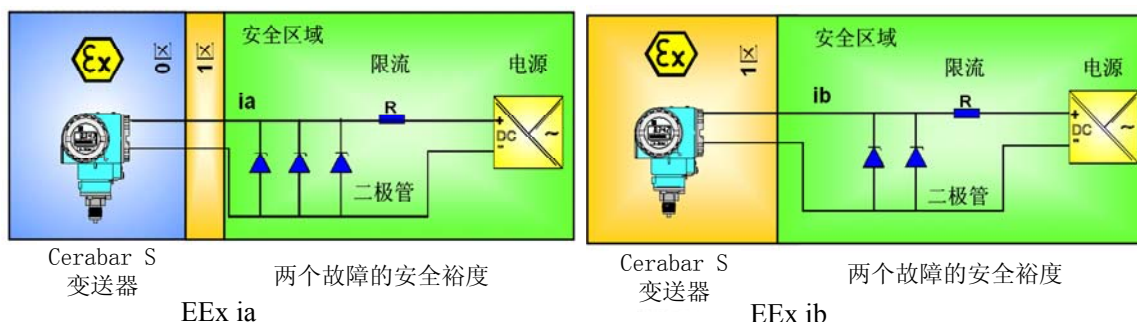


图 1

1.2.4.2 隔爆 Ex d (flame proof Ex d)

内置能点燃爆炸性气体的部件的一种防护外壳称为隔爆外壳。隔爆外壳能承受内部爆炸性混合物所产生的压力, 防止内部爆炸向外壳周围的爆炸性气体传播。具有隔爆外壳的仪表称为隔爆型仪表。隔爆型仪表通过隔爆穿线接头、导线管系统 (Conduit system) 或增安接线端子来实现隔爆。

1.2.4.3 增安 Ex e (increased safety Ex e)

增安专门为用于爆炸性气体而设计, 在正常工作条件下不会产生可能导致点燃爆炸性气体的电弧、火花或高温, 且在仪表的结构上采取措施提高了安全程度, 以避免在正常工作状态或认可的过载状态下出现这些现象。增安型仪表通过增安缆塞和自动防故障装置实现防爆。

1.2.4.4 隔爆增安 Ex de

如果在隔爆型仪表的电子腔室与接线腔室之间额外增加安全措施 (例如隔爆穿线接头), 则这样的仪表就称为隔爆增安型仪表 (Ex de)。

1.3 ATEX 防爆标准在恩德斯豪斯 (Endress+Hauser) 仪表上的应用

根据 ATEX 标准的要求, E+H 公司所有防爆仪表的供货范围内都包含一份“安全手册”(Safety instruction)。

1.3.1 Micropilot 雷达物位计

如图 2 所示, 恩德斯豪斯公司的 Micropilot 喇叭口雷达物位计的插拔式操作模块具有 EEx ia 安全防护, 电子插件部分具有 EEx d 安全防护, 接线腔室具有 EEx e 安全防护。整台物位计可选 EEx ia 或 EEx e 防爆证书 (美式标准亦可选)。

1.3.2 Promass 一体式质量流量计

如图 3 所示, E+H 公司的 Promass 质量流量计的变送器外壳具有 2G EEx d IIC 或 EEx de IIC 安全防护, 变送器电子模块具有 [EEx ib] IIC/IIB 安全防护, 传感器具有 EEx ib IIC T2-T6 安全防护。整台流量计可选 SYST EEx ib/ia IIB/IIC, EEx de ib IIC T2-T6 或 EEx d ib IIC T2-T6 防爆证书 (美式标准亦可选)。

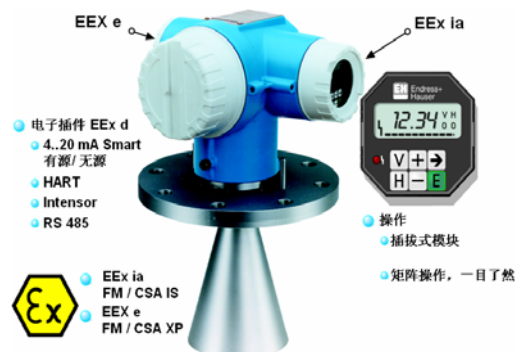


图 2

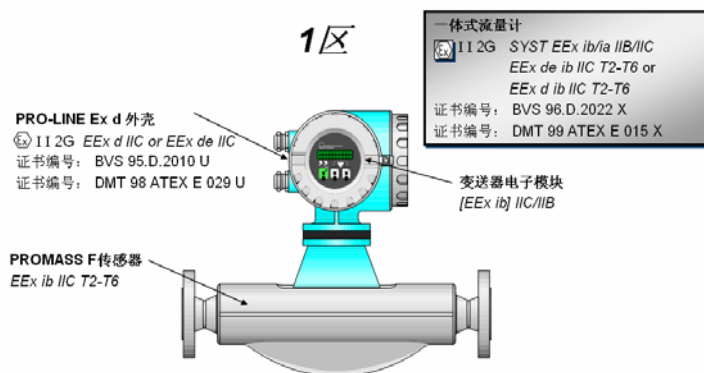


图 3

2 “功能安全”等级认证 SIL

SIL 是为工厂安全 (Plant Safety) 而引入的一个仪表“功能安全”等级的概念。在阐述这个概念以前先阐述仪表的“功能安全” (Function Safety) 和“安全性仪表系统” (SIS: Safety Instrumented System) 的含义。

2.1 SIL 的含义

2.1.1 “功能安全”

仪表的“功能安全”旨在预防和处理由于控制系统或仪表的故障，或人员的误操作而引起的风险。这些风险包括对人员健康的伤害，对环境的污染，及对仪表的破坏。

为了达到“功能安全”的要求，必须控制随机故障的发生，消除和控制系统故障的发生；而且当某个故障发生时，整个系统必须处于安全环境下，或转入安全状态 (safe state)。

以前，“功能安全”主要通过用户的“使用经验总结” (proven-in-use) 来实现。即用户通过对仪表长时间的应用，总结出仪表可能发生故障的间隔并因此确定维护间隔，防止故障发生。这种“功能安全”的实现方法有很多弊端，用户需要花费很多精力和时间，并使用正确的方法论来进行“使用经验总结”；而且如果仪表软件更新或者功能扩展，则需要重新进行“使用经验总结”。

2.1.2 “安全性仪表系统”

仪表用户根据一系列的条件 (如危害程度、危害发生概率) 对工厂整个系统的风险进行评估，

然后确定其所使用的仪表所需的“功能安全”等级，即 SIL 等级。如果整个系统的仪表都满足所要求的“功能安全”等级，那么我们就称这个系统为“安全仪表系统”。整个风险评估过程如图 4 所示。



图 4

图 5 为一例由恩德斯豪斯公司仪表组成的“安全仪表系统”。

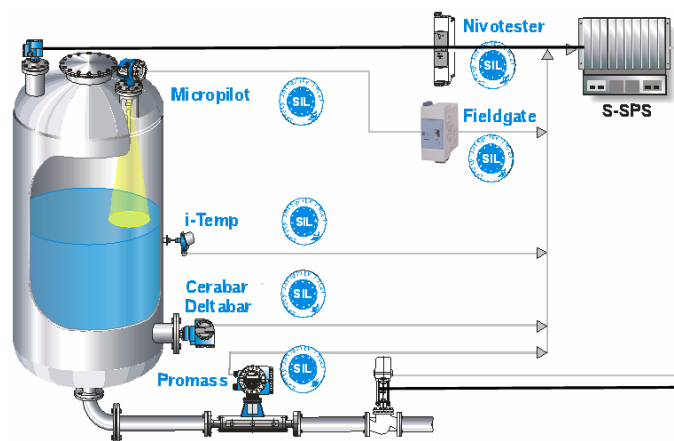


图 5

使用 SIL 标准以后，仪表制造商或认证机构（approval agency）将对出厂仪表的“功能安全”进行检验，并根据其可靠性来划分等级，如 SIL1，SIL2，SIL3（参照 IEC 61508/61511 标准）。使用带有 SIL 认证的仪表节省了用户的时间，而且软件更新后的 SIL 认证也将由仪表制造商完成，节省了用户的精力。当前各国法规以及仪表购买合同中对 SIL 认证的需求越来越多，SIL 认证已成为一种趋势。

2.2 SIL 认证的实现方法

SIL 认证的实现方法有两种：①新产品的 SIL 认证由仪表制造商或认证机构根据 IEC 61508 标准来实现；②对于已经应用于市场上的仪表，按照 IEC 61511 标准在经过“使用经验总结”（proven-in-use）并符合一定条件后，也可以实现 SIL 认证。整个 SIL 认证过程如图 6 所示。

2.2.1 IEC 61508

根据 IEC 61508 标准，仪表的整个 R&D 过程都有严格的规定。仪表制造商必须对产品的整个系统进行安全评估，具体而言：

- ① 必须验证整个软件系统运行的可靠性。通过系统开发、系统检测确认、质量管理体系、

文档管理等手段来减少系统故障的发生概率。

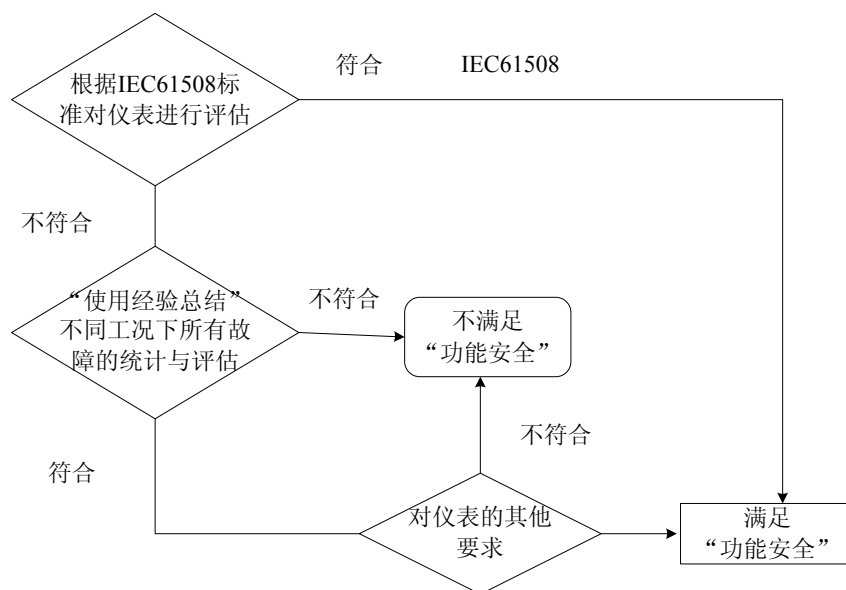


图 6

② 必须对整个电路板上的电子元件逐一进行 FMEA 分析，计算 MTBF、故障率等。在硬件上采取冗余、多样化、自诊断、功能定时检测等手段来减少随机故障的发生概率。

③ 必须根据传感器的返修统计评估其故障率。

④ 对于压力仪表还要满足其他的一些额外要求，如 KTA 认证。

2.2.2 IEC 61511

根据 IEC 61511 标准，已经应用于市场上的仪表如果要取得 SIL 认证，需经过“使用经验总结”，并满足一些其他要求，例如：

① 仪表必须应用于在 10 个典型工况下，连续运行 100,000 个小时，并提供 1 年的服务历史纪录。

② 仪表必须只能设置，无法编程。

③ 仪表最多只能获得 SIL3 认证。

2.3 SIL 等级的划分

IEC 61508 标准对仪表“功能安全”的等级进行了划分，划分的依据如图 7 所示。

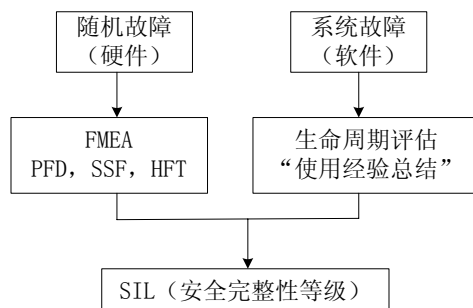


图 7

2.3.1 故障模式影响分析 (FMEA: Failure Mode Effect Analysis)

FMEA 首先把仪表故障分类，共分 4 种模式：①显性安全故障（如：雷达物位计高频模块故障）；②隐性安全故障（如：电流输出短路）；③显性危险故障（如：压力传感器损坏）；④隐性危险故障（如：电流输出“冻结”）。然后评估各类故障的发生概率，如表 6 所示。再根据 4 个概率计算出 PFD 和 SFF。

表 6

故障模式的发生概率（单位：次/年）	显性故障	隐性故障
安全故障	λ_{sd}	λ_{su}
危险故障	λ_{dd}	λ_{du}

2.3.1.1 要求的平均失效概率（PFD_{av}: Average Probability of Failure on Demand）

$$PFD_{av} \approx \frac{1}{2} \times \lambda_{du} \times T_i \quad \text{其中 } T_i = \text{检测间隔时间[年]}$$

2.3.1.2 安全失效分数（SFF: Safe Failure Fraction）

$$SFF = \frac{\lambda_{su} + \lambda_{sd} + \lambda_{dd}}{\lambda_{su} + \lambda_{sd} + \lambda_{dd} + \lambda_{du}}$$

2.3.1.3 硬件故障裕度（HFT: Hardware Fault Tolerance）

硬件故障容忍度是对冗余程度的一种描述。

仪表的“功能安全”等级（SIL 等级）由 PFD, SFF, HFT 这 3 个安全参数决定。表 7 指明了 SIL 与 PFD 的关系。

表 7

SIL	风险减少	危险故障的平均概率	
		低要求操作模式（Low Demand Mode） 要求的失效概率（PFD _{av} ）	连续操作模式（Continuous Mode） 每小时故障概率（PFH）
1	10 ⁻¹ ~10 ⁻²	$\geq 10^{-2}$ 且 $< 10^{-1}$	$\geq 10^{-6}$ 且 $< 10^{-5}$
2	10 ⁻² ~10 ⁻³	$\geq 10^{-3}$ 且 $< 10^{-2}$	$\geq 10^{-7}$ 且 $< 10^{-6}$
3	10 ⁻³ ~10 ⁻⁴	$\geq 10^{-4}$ 且 $< 10^{-3}$	$\geq 10^{-8}$ 且 $< 10^{-7}$
4	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁵	$\geq 10^{-5}$ 且 $< 10^{-4}$	$\geq 10^{-9}$ 且 $< 10^{-8}$

由表 7 可见，SIL 等级越高则该仪表的故障概率越小，风险减少程度越高。另外，SIL 等级还与 SFF 和 HFT 有关，如表 8 所示。

表 8

SIL	SFF(%)	注释
4	— — —	适用于 HFT=0 的情况。如果 SFF=1 或 2（冗余），则 SIL 等级相应越高。
3	$\geq 90\%$ 且 $< 99\%$	
2	$\geq 60\%$ 且 $< 90\%$	
1	$< 60\%$	

综合表 7，表 8 可知，PFD 越小，SFF 越大，HFT 越大，则所要求的 SIL 等级越高。另外需要说明的是，某通道上的 PFD 是这一通道上所有 PFD 之和。例如在图 8 所示的通道上，其总的 PFD 为

$$PFD_{avg} = PFD_{Sensor} + PFD_{Control} + PFD_{Actor}$$



图 8

2.4 SIL 在恩德斯豪斯 (E+H) 仪表上的应用

根据 IEC 61508/ IEC 61511 标准的要求, 恩德斯豪斯 (Endress+Hauser) 公司所有取得 SIL2 认证的仪表的供货范围内都包含一份“安全手册”(Safety instruction)。该手册中包含“仪表制造商声明”(Manufacturer Declaration) 和认证机构的“评估报告”(Assessment Report)。其中, “仪表制造商声明”指出了 SIS 系统中各安全参数值, 以及“使用经验总结”、应用信息、参数设置等。

所有取得 SIL3 认证的仪表的“安全手册”(Safety instruction) 中均包含认证机构的“评估报告”(Assessment Report) 和“认证证书”(Certificate)。

E+H 取得 SIL 认证的仪表如表 9 所示。

表 9

测量参数	仪表	认证机构	仪表实物图
温度	TMT 162, 182 温度变送器	Exida	
压力	Cerabar T 压力变送器	TÜV	
	Cerabar M 压力变送器		
	Cerabar S 压力变送器		
	Deltabar S 差压变送器		
物位	Micropilot M (HART) 非接触雷达物位计	Exida	
	Levelflex M 导波雷达物位计		
物位开关	Liquiphant M/S 音叉开关	TÜV	
	Liquiphant M/S (NAMUR) 音叉开关	Exida	
流量	Promass 质量流量计	Exida	
接口	Fieldgate FXA 520 接口	Exida	