

Application Brief

采用 A2L 制冷剂：注意事项和要求



Brian Dempsey

摘要

本技术文章深入探讨了适用于住宅和商业 HVAC 系统的新 A2L 标准，并说明了为满足此标准而需要进行的一些系统更改。A2L 制冷剂是全球升温潜能值 (GWP) 较低的制冷剂。本文详细介绍了当前的相关立法、行业趋势、非色散红外 (NDIR) 和金属氧化物半导体 (MOS) 传感器的技术原理以及各种设计的可行性。

A2L 制冷剂概述

A2L 制冷剂是根据 ASHRAE 安全分类命名的物质，具有轻度易燃性、低毒性和低全球升温潜能值 (GWP)。这些制冷剂也具有零消耗臭氧潜能值 (ODP)。就这些制冷剂的化学成分而言，A2L 制冷剂是氢氟烯烃 (HFO) 或 HFO 混合物。与以前在 HVAC 系统中使用的 HFC 和 HCFC 制冷剂 (即 R-410A 和 R-22 等) 相比，A2L 制冷剂更节能，同时也更符合全球绿色能源倡议。下面的表 1 展示了一些常见的 HVAC 制冷剂以及相应的 GWP/ODP 值。

表 1. HVAC 制冷剂比较表

制冷剂	类型	GWP	ODP
R-22	HCFC	1820	0.055
R-410A	HFC	2088	0
R-134A	HFC	1430	0
R-1234YF	HFO	4	0
R-1234ZE	HFO	6	0
R-32	HFC	675	0
R-454B	HFC	466	0

A2L 制冷剂的缺点是与其化学成分相关的固有轻度可燃性，这意味着需要制定设备制造商法规，以减轻制冷剂在有点火源的情况下可能发生燃烧的危险情况。下面的图 1 详细显示了这些制冷剂的不同类型以及点火和燃烧数据。

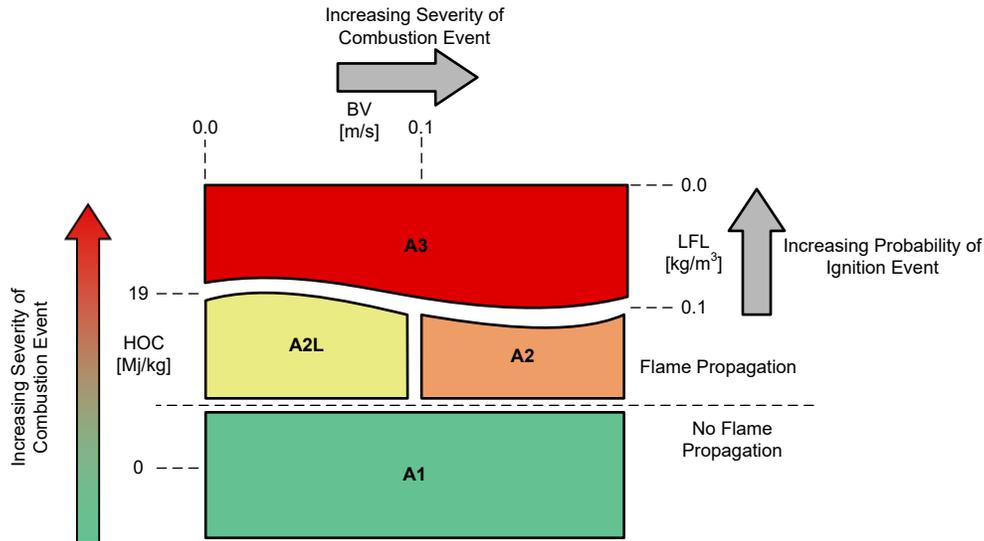


图 1. HVAC 制冷剂燃烧和传播图

基于 A2L 的系统以及符合 UL 60335-2-40 标准的其他必要电子元件

为了保持安全运行，空调设备采用了特殊组件，例如符合安全标准 UL 60335-2-40 的制冷剂检测系统 (RDS)。RDS 可以检测具体制冷剂，在超过预定义阈值时会触发缓解措施，例如激活风扇以稀释制冷剂浓度。RDS 的要求包括：

- 泄漏气体不得超过 LFL 的 25%。
- 在 RDS 复位后的 5 分钟内，泄漏气体不得超过 LFL 的 15%。
- 制冷剂检测系统应在直接暴露于 25% LFL 后 30 秒内输出。

RDS 器件通常包含检测元件、具体制冷剂的校准元件和用于与 HVAC 设备通信的接口。这些系统由工厂预装，设计寿命为 10 到 15 年，需定期进行自检以保持可靠性。这些 RDS 器件对于防止危险的制冷剂泄漏至关重要，并重点采用了各种检测技术，如 A2L 检测中使用的非色散红外传感器、紧凑型金属氧化物传感器和分子特性光谱仪。部署 RDS 和遵守安全标准是业界应对法规变化的重要举措。

检测的易燃性下限必须达到或保持表 2 第二行所示的值以下。

表 2. 常见 A2L 制冷剂 LFL 检测要求和燃烧特性

制冷剂	R-32	R-454B	R-1234YF
安全组	A2L	A2L	A2L
LFL	14.4%	11.8%	6.2%
自动点火温度	648°C 1198.4°F	496°C 924.8°F	405°C 761°F
最小点火能量	30-100mJ	100-300mJ	5000-10000mJ
燃烧速度	6.7cm/s	5.2cm/s	1.5cm/s
燃烧热	3869Btu/lb	4420Btu/lb	4408Btu/lb

A2L 制冷剂泄漏传感器技术概述

目前市场上有多种符合 UL 60335-2-40 标准的 A2L 制冷剂泄漏检测传感器。这些传感器通常采用 NDIR 或 MOS 技术实现，每种技术都有各自的优缺点。下一节概述了这些技术以及每种技术的优缺点。

NDIR 气体传感器概述

NDIR 传感器（或非色散红外光谱法）根据气体对红外光的独特吸收情况来分析目标气体的浓度。这些传感器通常具有与其关联的某种模拟前端，为所选气体提供带通滤波器。当红外光通过采样的气体时，气体会吸收特定的红外光频带，同时允许其他波长通过。然后，检测器分析剩余的光量，并根据缺少的红外频带与检测器处红外频带之间的匹配情况，传感器可以辨别是否存在该气体。此技术的优点是高选择性和检测精度，但对于这种特定的传感器类型而言，这些传感器的尺寸及其相关成本可能会成为一个缺点。这些传感器还容易受到机械振动的影响，因为机械振动会导致传感器输出发生变化，如果长时间暴露在被污染的环境中，这会导致颗粒在光学元件上累积，使得传感器在这种环境下的响应会降低。

基本结构：NDIR 传感器包含红外光源，通常为小灯或 LED，这些光源可发出广谱红外辐射。红外光将穿过充满气体样本的采样室。有一个光学滤波器位于采样室后面，仅允许目标气体吸收红外光后的特定波长通过。然后，检测器（热电堆）在红外光穿过气体样本后测量经滤波的红外光的强度。

NDIR 传感器通常还包含一个参考热电堆。此参考热电堆用于监测红外光源输出因光源老化和功率变化而产生的任何变化，从而实现更精确的气体检测。下面的图 2 展示了基本的 NDIR 传感器，此外还有一个 AFE，用于在到达 ADC 供进一步处理之前进行信号调节。

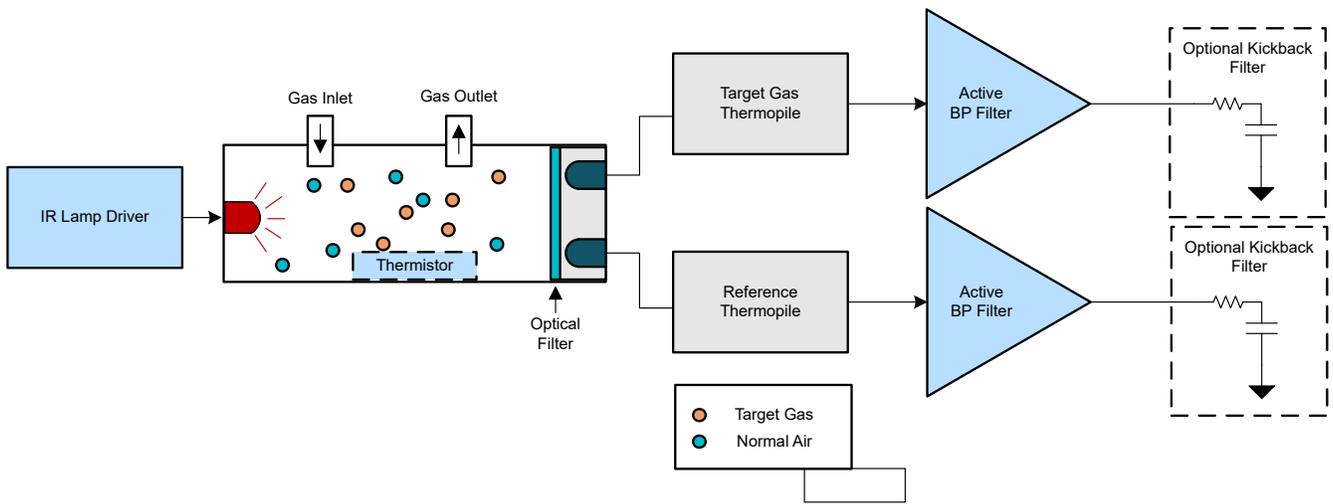


图 2. 基本 NDIR 传感器架构示例

工作原理：每种类型的气体会吸收特定波长的红外光。当红外光穿过气体样本时，目标气体的分子会吸收这些特征波长的光。采样室内的气体越多，吸收的红外光就越多，从而降低到达检测器的光强度。

检测器会测量通过气体的红外光强度。该强度与目标气体的浓度成反比；到达检测器的光越少，气体浓度就越高。

ADC 采集到信号后，MCU 便开始执行后处理，以提取特定样本的目标气体浓度。传感器电子元件会处理来自检测器的信号，利用比尔-朗伯定律计算气体浓度。如图 3 所示，比尔-朗伯定律将气体浓度与所需气体在峰值吸收频率下的摩尔光吸收率以及光通过气体的路径长度相关联。公式的左侧是 NDIR 灯的强度与热电堆感测到的强度之比。右侧包括衰减、长度和最终浓度的常数。

$$\log_{10}(I_0/I) = A = \epsilon l c \quad (1)$$

一旦针对浓度 (c) 排列公式后，即可将该值输入气体定律以输出 ppm 值。根据设计人员设定的所需阈值以及相关法规，在需要执行缓解任务时，传感器模块 MCU 会向缓解电路板发出警报。

从目标气体热电堆中减去参考热电堆输出，当不存在目标气体时，读数相同，输出为零。采用 2000 的放大系数将毫伏信号放大到 +/-2 伏范围。然后，逆向比尔-朗伯定律使用根据热电堆数据表转换为强度值的电压。利用长度和衰减常数等物理属性和几何形状，可以得出浓度。最佳气体定律会考虑压力和温度，以给定热电堆读数的百万分率进行最终计算。

MOS 气体传感器概述

MOS 传感器 (即金属氧化物半导体传感器) 的工作原理是: 某些半导体的电阻率会随着半导体和特定气体之间的表面相互作用而增加或减少。这些传感器不仅可以检测目标气体, 还可以估算该气体的浓度。这些传感器的缺点是容易出现与各种化学品 (例如汽油尾气、丙烷和其他化学品) 的交叉敏感现象。这些传感器也会出现与环境条件相关的漂移, 因此需要定期重新校准。

基本结构: MOS 气体传感器的核心是一层金属氧化物的薄膜, 例如二氧化锡 (SnO_2)、氧化锌 (ZnO) 或二氧化钛 (TiO_2) 氧化物。这种材料用作检测层。检测层通常沉积在基板上, 而基板可以是硅或陶瓷材料。检测层上放置两个电极以根据气体分子反应测量电阻。图 3 展示了基于 MOS 的气体传感器的结构示例。

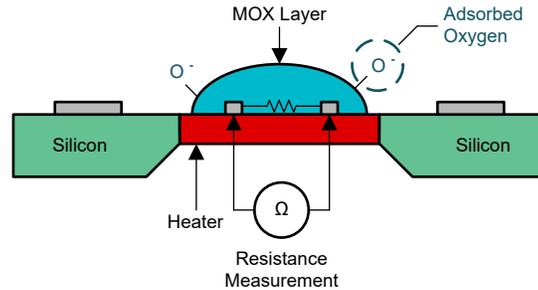


图 3. MOS 气体传感器图

工作原理: 在特定温度下, 传感器中的金属氧化物具有基线电阻, 该电阻受到金属氧化物表面吸附的氧分子的影响。这些氧分子从金属氧化物的传导带中捕获自由电子, 形成一个会增加电阻的耗尽层。

当传感器暴露于目标气体中时, 气体分子与表面吸附的氧分子相互作用。这种相互作用可引起以下两种主要反应之一:

1. 还原性气体 (如 CO 、 H_2 、 CH_4) 向金属氧化物表面提供电子, 这样可以减少吸附的氧量, 从而降低传感器的电阻。
2. 氧化性气体 (例如 NO_2 、 O_2) 会增加吸附的氧量, 从而增加电阻。

传感器通常在由集成加热器实现的高温条件 (200°C 至 400°C) 下运行, 旨在促进必要的化学反应。

A2L 气体检测技术比较表

下面的表 2 总结了每种传感器的主要特性以及两种实现方案的优缺点。上文未详述的其他实现方案包括加热二极管和 MPS 检测。

表 3. A2L 气体检测技术比较表

规格	NDIR 传感器	MOS 传感器
检测到的制冷剂	CFC、HFC、HCFC、HFO	CFC、HFC、HCFC、HFO
测量范围	0 至 10,000ppm	20 至 10,000ppm
响应时间	< 10 秒	15 至 90 秒
湿度范围	0 至 100% RH	0 至 95%
使用寿命	大约 10 至 15 年	大约 3 至 5 年
优势	高选择性、检测精度	成本更低
劣势	尺寸和成本	汽油、柴油、丙烷的一些误触发

适用于 A2L 制冷剂泄漏检测应用的传感器模块设计示例

对于传感器模块，为了符合 UL 60335-2-40，必须满足几个关键系统要求。下一节概述了这些主要特性，以及 TI 为满足这些要求而提供的一些器件和系统设计。

制冷剂泄漏检测传感器模块设计示例：

对于该传感器模块示例，之所以选择基于 NDIR 的技术，是因为该技术在市场上很受欢迎，并且使用该技术具有优势。

图 4 所示的 A2L 传感器模块示例使用的是封装式 NDIR 传感器，其中还包含热电堆、气室和 NDIR 灯。通过参考侧和目标气体热电堆侧的有源滤波器创建模拟前端。MCU 上的软件共同使用气体定律和比尔-朗伯定律来根据给定的热电堆值定义浓度。对应于 UL 标准的阈值决定了是否需要采取缓解措施

为此设计选择的器件型号如下所示：

- MSPM0L1106 - MCU
- TLV2387 - AFE 放大器
- THVD1500 - RS-485 收发器

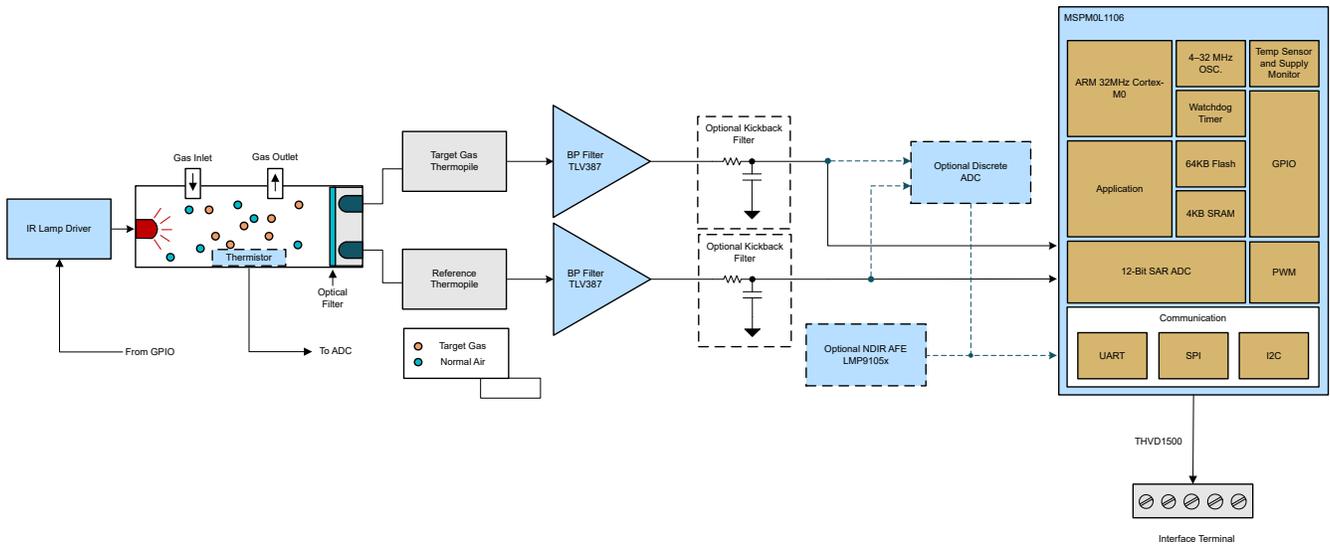


图 4. A2L 气体传感器模块方框图

NDIR 灯由 MCU 的 GPIO 引脚控制，通过简单的低成本方法启用和禁用该灯。这两个热电堆读数接入到微控制器的 ADC，如果需要，可以选择使用外部 ADC 来实现更高的分辨率。此外，还可以使用可选的 LMP9105x AFE 器件来进一步简化模拟前端。

传感器模块器件选择指南

NDIR 传感器 AFE : NDIR 型传感器使用带通滤波器将检测频带调整到适合目标气体范围。MOS 传感器还可以使用某种类型的模拟前端在进入 ADC 之前对传感器的输出进行缓冲。TI 拥有多个专用于 NDIR 等气体检测应用的模拟前端。

- **完全集成式 AFE 器件选择** : LMP9105x 系列是一款适用于 NDIR 检测应用的 1-2 通道可配置 AFE。LMP9105x 器件是一款专为热电堆传感器而精心优化的可编程集成传感器模拟前端 (AFE)，通常用于 NDIR 应用。LMP9105x 可在传感器与微控制器之间提供完整的信号路径设计，能够生成与热电堆电压成正比的输出电压。LMP9105x 器件的可编程性使该器件能通过统一的设计支持多种热电堆传感器，而不需要多个不同的分立式设计。

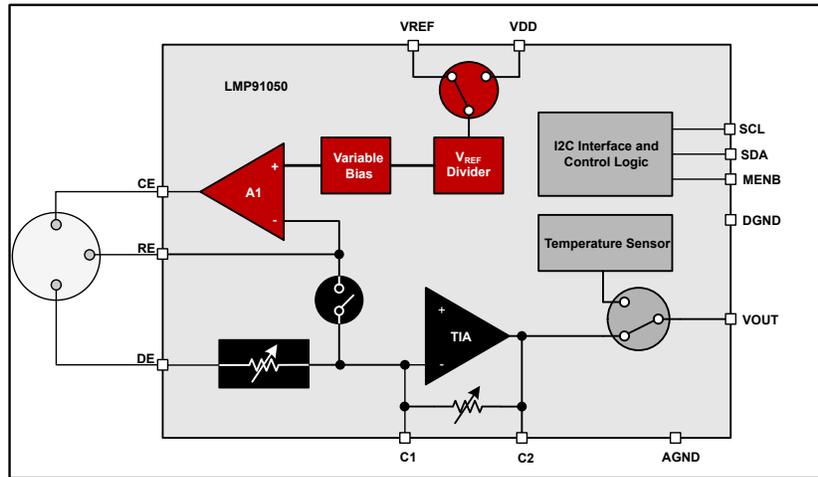


图 5. LMP91050 方框图

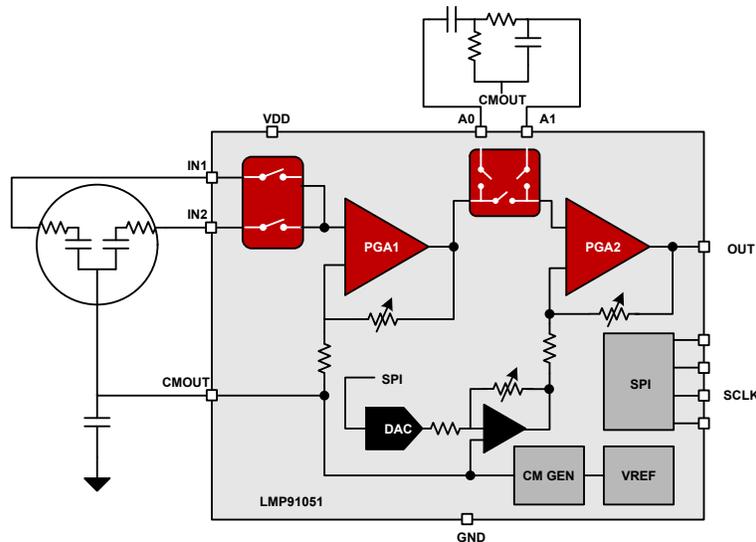


图 6. LMP91051 方框图

LMP9105x 系列器件还具有随附 EVM GUI 的优点，设计人员可以使用该 GUI 来即时评估 AFE 的性能。可从 TI.com 上的[此处](#)获取此软件。

- **分立式 AFE 器件选择**：如果设计人员选择为 AFE 采用成本更低的分立式设计，则放大器的选择对于传感器模块的整体性能至关重要。因此，为分立式 AFE 选项选择一个低噪声、高精度精密放大器。TLVx387 精密放大器系列提供许多适用于传感器 AFE 放大器的关键特性。通过零漂移技术，TLVx387 的失调电压和温漂可提供出色的长期稳定性。仅凭借 570 μ A 的静态电流，TLVx387 就能实现 5.7MHz 的带宽、8.5nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的宽带噪声和 177nV_{PP} 的 1/f 噪声。这些规格对于实现超高精度和连接到 ADC 时不降低线性度至关重要。TLVx387 在温度范围内具有平坦的偏置电流；因此，高输入阻抗应用在温度范围内几乎不需校准。

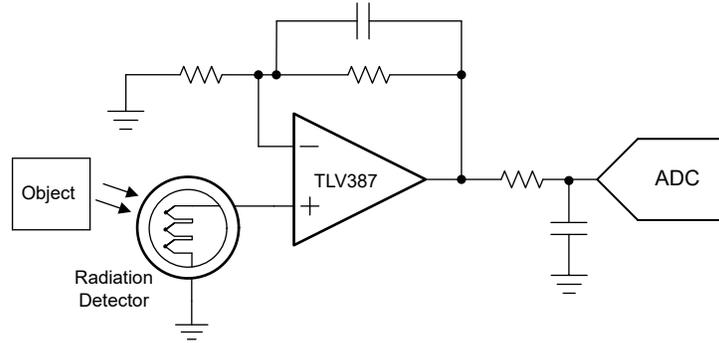


图 7. TLV387 精密低噪声 ADC 驱动器电路示例

传感器模块 MCU 选择

传感器模块的 MCU 负责 RDS 内的多个关键过程。这些过程包括定期测试传感器以确保传感器按预期运行、AFE 信号聚合（连接到内部 ADC，或在分立式 ADC 应用中通过 I2C/SPI 进行此操作）、后处理以及与缓解电路板进行通信。

成本是选择传感器模块 MCU 时的另一个关键考虑因素，因此对于此设计，选择了 MSPM0 器件。MSPM0G、MSPM0C 和 MSPM0L 系列中有许多器件适用于该应用。

- MSPM0G3507 具有两个 12 位 SAR ADC 可实现对目标和参考热电堆 AFE 输出的同步采样
- 成本较低的 MSPM0L110x 系列可用于仅需要单个 ADC 的检测架构
- 如果性能不是关键问题，则可以将 MSPM0C110x 用于成本甚至更低的传感器模块 MCU。

<p style="text-align: center;">CPU</p> <p>Arm Cortex-M0+ 32 MHz NVIC / 3-ch. DMA</p>	<p style="text-align: center;">Power & Clocking</p> <p>POR / BOR / SVS Internal LF 32 kHz (3%) Internal HF 4-32 MHz (1%)</p>	<p style="text-align: center;">Analog</p> <p>12-bit ADC 1.45MSPS (up to 10 channels) Comparator with 8-bit DAC × 1 Zero-drift chopper OPA × 2 GPA × 1 Internal ADC reference (1.5%) Temperature sensor</p>
<p style="text-align: center;">On-chip Memory</p> <p>8 / 16 / 32 / 64 KB Flash 2 / 4 KB SRAM</p>	<p style="text-align: center;">Communication</p> <p>UART × 2 (1 with LIN) SPI × 1 I2C × 2 (1 with FastMode+)</p>	
<p style="text-align: center;">Data Integrity & Security</p> <p>CRC accelerator (16 & 32 bit)</p>		
<p style="text-align: center;">Programming & Debug</p> <p>Arm SWD interface UART & I2C bootloader</p>	<p style="text-align: center;">IO</p> <p>Up to 28 GPIO Up to 2 low bias OPA inputs</p>	<p style="text-align: center;">Timer</p> <p>Low power 16-bit timer × 4 (CC × 2) Windowed watchdog</p>

图 8. MSPM0L1106 器件特性

此设计方案选择了 **MSPM0L1106** 以实现性能和成本之间的良好平衡。MSPM0L1106 提供 64KB 的嵌入式闪存程序存储器和 4KB 的 SRAM。这些 MCU 包含精度高达 $\pm 1.2\%$ 的高速片上振荡器，无需外部晶体。其他特性包括 3 通道 DMA、16 位和 32 位 CRC 加速器，以及各种高性能模拟外设，例如一个具有可配置内部电压基准的 12 位 1.68MSPS ADC、一个通用放大器和一个片上温度传感器。这些器件还提供智能数字外设，例如四个 16 位通用定时器、一个窗口化看门狗计时器和各种通信外设（包括两个 UART、一个 SPI 和一个 I2C）。这些通信外设为 LIN、IrDA、DALI、Manchester、Smart Card、SMBus 和 PMBus 提供协议支持。

传感器模块通信接口选择

传感器通信接口可能因产品而异，但 RS-485 是一个很常见的传感器模块输出，因此选择了 RS-485 作为目标通信协议。THVD1500 是一款适用于工业应用、经过成本优化且稳健的半双工 RS-485 收发器。这些总线引脚可耐受高级别的 IEC 接触放电 ESD 事件，从而无需使用其他系统级保护元件。该器件由 5V 单电源供电。总线引脚具备宽共模电压范围和低输入泄漏，从而使 THVD1500 非常适合用于长线缆上的多点应用。

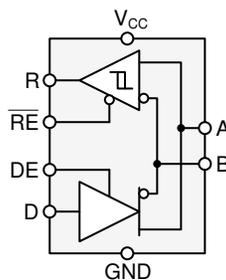


图 9. THVD1500 功能方框图

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司