

摘要：具有 ESD 保护功能的耗尽型 MOSFET 代替 JFET 器件和普通耗尽型 MOSFET，能有效抑制各种干扰，极大提高整个系统的稳定性和安全性。由于智能变送器在工业控制、物联网、轨道交通、航空航天等领域的广泛应用，特别是近年自动驾驶汽车、医疗仪器和能源环境控制系统应用的日益普及，系统智能化、集成化、小型化的发展趋势对智能变送器的性能、品质要求不断提高，关键模块 DAC 在恶劣环境下有效的抗干扰能力是整个变送器工作稳定、系统安全的重要保障。传统的 JFET 器件能实现稳定供电，但不能起到有效的抗干扰作用。普通耗尽型 MOSFET 器件替代传统的 JFET 器件，能稳定供电，并能有效抑制浪涌、瞬态电流、电压干扰，但没有静电防护功能。为更有效解决系统电路保护的问题，通过对器件本身结构进行研究，开发自带 ESD 保护功能的耗尽型 MOSFET。在实际测试和使用中有效验证了该器件对 DAC 模块的供电，不仅能稳定供电，抑制浪涌、瞬态电流、电压干扰，而且能有效消除静电对器件的损坏可能性。该器件的应用大大提高了智能变送器的稳定性，对自动驾驶汽车和医疗仪器的安全性有重要作用。

关键词：智能变送器；DAC 模块；供电与保护；耗尽型 MOSFET；ESD 保护

中图分类号：TP212 文献标识码：B 文章编号：1006-883X(2022)07-0031-07

收稿日期：2022-05-23

浅析耗尽型 MOSFET 对智能变送器中 DAC 的供电与保护

何锋¹ 窦文²

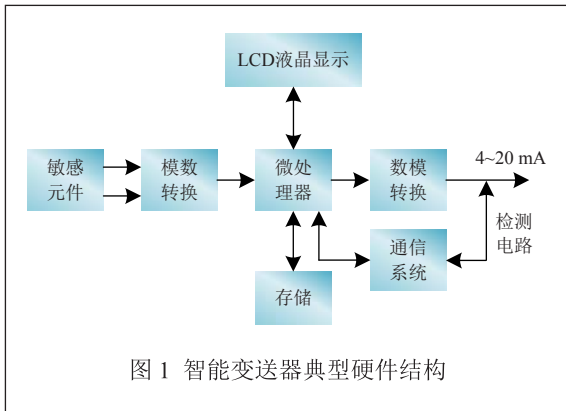
1. 成都方舟微电子有限公司，四川成都 610200；2. 成都信息工程大学工程实践中心，四川成都 610200

0 前言

随着智能变送器在工业控制、物联网、轨道交通、航空航天等领域的广泛应用，特别是近年自动驾驶汽车、医疗仪器和能源环境控制系统应用的日益普及，市场增量的急剧增长，未来其趋势必然是向具有自动补偿、通讯、自诊断、逻辑判断等功能的智能化、测量和控制系统一体的集成化、特殊环境应用的小型化、设计与生产标准化以及应用广泛化等方向发展，同时对智能变送器的性能、品质要求不断提高。

传统变送器仅提供标准的模拟 4~20 mA 二线制信号传送，随着微电子技术发展，HART 协议下出现功能更强大的智能变送器，其特点是用微处理芯片完成信号的探测、变换、逻辑判断、计算，实现自检、自校正、自补偿、自诊断，直接与计算机进行数字通信，低功耗电路中采用信道复用技术，在传输数字信号的

同时，保留 4~20 mA 电流环信号，数模兼容，共用一条总线进行双向通信。智能变送器具有抗干扰能力强、传输距离远、高精度、多功能的特点，是传感器领域的一次技术飞跃，正逐步替代传统变送器。因此，组成智能变送器硬件系统的低功耗、高精度元器件的选用是研制高性能智能变送器安全稳定工作的关键。其中，DAC 模块采用智能元件单点和多点的校准、零点补偿以及时漂在线修正等手段，大大提高了智能变送器的精度，DAC 模块自身在恶劣环境下的供电及对浪涌、瞬态干扰的抑制是整个传感器系统安全、工作稳定的关键保障。本文以行业中普遍使用的 DAC 模块 AD421 为例，分析耗尽型 MOSFET 对 DAC 的供电与保护的原理及优劣势，给出了实际应用需要注意的问题及解决方案。



1 系统结构

1.1 智能变送器与 DAC 模块

智能变送器以低功耗微控制器为中心，包含4个主要功能模块：传感器信号调理与ADC检测模块、人机交互、Hart通信、DAC模块。典型硬件设计如图1所示。

其中，DAC选型上采用较普及的是AD421。AD421是美国ADI公司推出的一种单片高性能数模转换器，它由电流环路供电，16位数字信号串行输入，4~20 mA电流输出，完全符合设计智能变送器的工业控制标准信号输出要求，可实现远程智能工业控制。AD421主要具有3个功能：将微处理器的数字数据转换成模拟格式信号；环路电流的放大；从环路电源获取稳定的工作电压。AD421引脚及功能如图2所示^[1]。

1.2 DAC 供电与保护

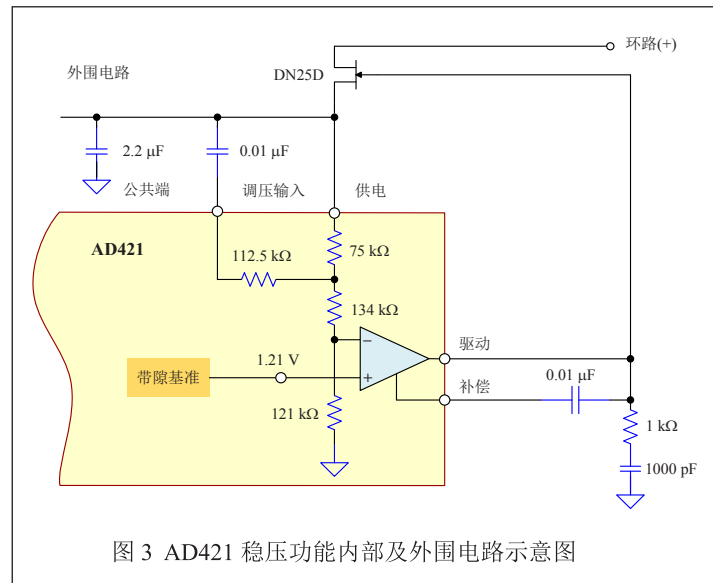
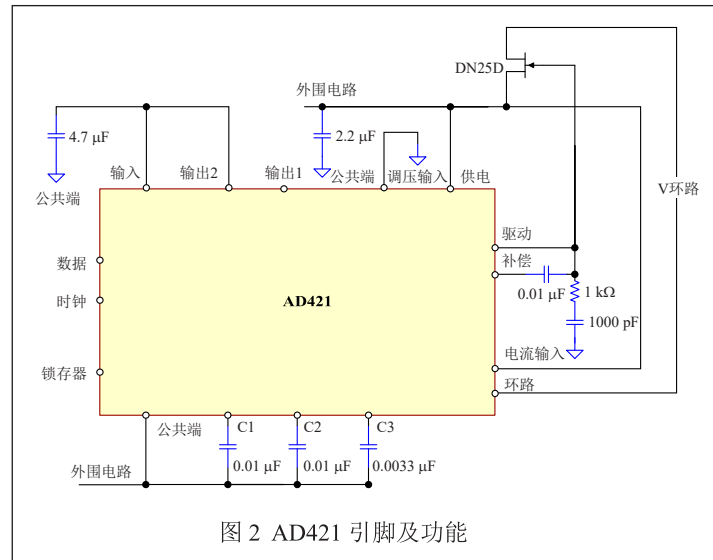
DAC从环路电源获取稳定的工作电压，为稳定AD421自身电压及发射电路其余部分供电的环路电压，系统稳压器由一个运算放大器、一个带隙基准电压源和一个外部耗尽型FET调整管组成。稳压器结构功能如图3所示。

LV引脚信号通过更改运算放大器反相输入端和 V_{CC} 引脚之间电阻分压器的增益来选择 V_{CC} 稳定的目标值。随着LV引脚在COM和 V_{CC} 之间变化，稳压器环路的电压输出标称值会在3V和5V之间变化：LV连接到COM调节电压为5V；LV通过一个电容连接到 V_{CC} 调节电压为3.3V；LV连接到 V_{CC} 调节电压为3V。如图3配置，可以使用的环路电压范围是由FET击穿电压和饱和电压确定的，必须选择外部FET的

$V_{GS(OFF)}$ 、 I_{DSS} 和跨导等参数，以便DRIVE引脚上的运算放大器输出在 V_{CC} 至COM的范围摆动时可正确控制FET工作点，FET选型时主要特性参数要求如表1所示^[2]。

表1 AD421 外围稳压与保护功能 FET 特性要求

FET 类型	N 沟道耗尽型
I_{DSS}	24 mA (最小值)
BV_{DS}	$(V_{LOOP}-V_{CC})$ (最小值)
$V_{PINCHOFF}$	V_{CC} (最大值)
Power Dissipation	$24\text{ mA} \times (V_{LOOP}-V_{CC})$ (最小值)



关于 FET 选型，由于要求耗尽型模式（Depletion-Mode），理论上可以采用 JFET，且业界对 JFET 的 Normally-On 特性比较熟悉，故一些文章推荐采用 JFET。由于 JFET 结构的特性，耐压一般最高 50 V，虽然 JFET 器件能起到稳压作用，但不能有效抑制较高的浪涌或瞬态干扰，在实际电路中并不能达到电路保护需求。ADI 公司推荐的 FET 型号是 Supertex 制造的 DN2530、DN2540、DN3545 等，均是 BV_{DSX} 在 350 V、450 V 的 N 沟道耗尽型 MOSFET（Depletion-Mode MOSFET）。

提到 MOSFET，工程师想到和用到的都是 Normally-Off 的增强型 MOSFET，耗尽型 MOSFET 由于型号较少，在过去电路设计工程师对其的了解和应用经验较少，但在智能变送器 DAC 的稳压和保护中，耗尽型 MOSFET 是理想的选择。

2 耗尽型 MOSFET 对 DAC 的供电与保护功能

2.1 耗尽型 MOSFET 工作原理

近年来，耗尽型 MOSFET（Depletion-Mode MOSFET）日益受到重视，广泛应用于固态继电器（NC 继电器）、“常闭”开关、恒流源、恒压源和开关电源等设备中，用户涵盖了家用电器、消费电子、工业控制、汽车电子、物联网、电信设施和航空航天等领域。

耗尽型 MOSFET 分为 2 种类型：N 沟道耗尽型 MOSFET，即导电沟道为 N 型，参与导电的是电子；P 沟道耗尽型 MOSFET，即导电沟道为 P 型，参与导电的是空穴。由于电子的迁移率远高于空穴，N 沟道耗尽型 MOSFET 具有更强的电流处理能力，得到了更广泛地运用。近年，随着第三代半导体的发展，开始出现少数 1,300 V 以上耐压的 SiC 基的耗尽型 MOSFET，但成熟的产品还是 Si 基耗尽型 MOSFET。以下就 N 沟道 Si 基耗尽型 MOSFET 为例，简要说明其原理和应用。

当栅极-源极电压 $V_{GS}=0$ V 时，其导电沟道即已存在，器件处于开通状态，因此耗尽型器件又称为“常开”（Normally-on）器件。当栅极-源极电压 $|V_{GS}| < |V_{GS(OFF)}|$ 时（N 沟道）或 $|V_{GS}| > |V_{GS(OFF)}|$ （P 沟道），其导电沟道因沟道中的载流子耗尽而消失，器件处于

关断状态。在 V_{GS} 接近 $V_{GS(OFF)}$ 时，沟道部分开启，工作在亚阈值状态，利用这一特性，我们可以很方便地建立一个简单的电压调节器，具有高电压调节范围和稳定的电压输出，耗尽型 MOSFET 组成的高电压调节器如图 4 所示。也可以组成一个稳定的恒流源。同时，这种电压源或电流源具有极佳的抗干扰能力，能有效地抑制瞬态电压或浪涌电流^[3-4]。

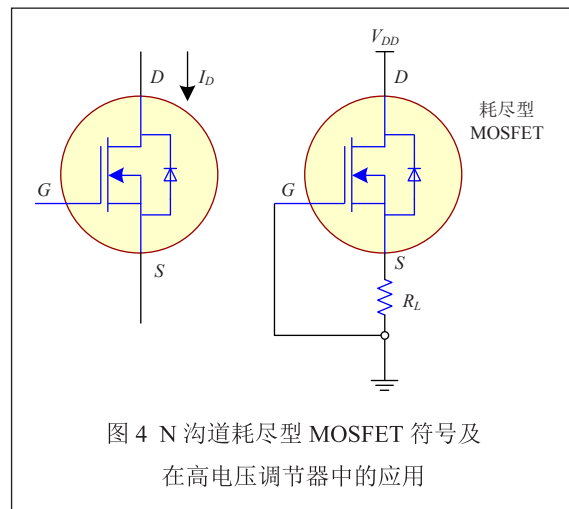


图 4 N 沟道耗尽型 MOSFET 符号及在高电压调节器中的应用

如图 4 所示，当 V_{DD} 增加时，流过电路的电流 I_{DS} 增加，导致耗尽型 MOSFET 源极电位 V_S 升高，即 V_{GS} 绝对值增加，并引起器件导电沟道变窄，电流增加减缓。在此过程中负载 R_L 两端的电压 V_S 无限接近器件的关断电压 $|V_{GS(OFF)}|$ ， $V_S \approx |V_{GS(OFF)}|$ ，即 V_S 钳位在 $|V_{GS(OFF)}|$ 处，不再随输入电压 V_{DD} 的增加而变化。负载 R_L 流过的电流 I_L ($I_L = V_S / R_L$) 也不随输入电压 V_{DD} 的增加而变化。

$$V_{DD,MAX} = BV_{DSX} + |V_{GS(OFF)}| \quad (1)$$

其中， BV_{DSX} ——耗尽型 MOSFET 漏源极之间的击穿电压；

$V_{GS(OFF)}$ ——耗尽型 MOSFET 的关断电压；

V_{DD} ——漏极电压。

由此看出，利用耗尽型 MOSFET 可以组成一个简单稳定的高电压输入的电压调节器或电流源，同时具有极佳的瞬态抑制能力。

进一步利用运算放大器或电压基准源，易实现指定的输出电压。运算放大器使用示意图如图 5 所示。

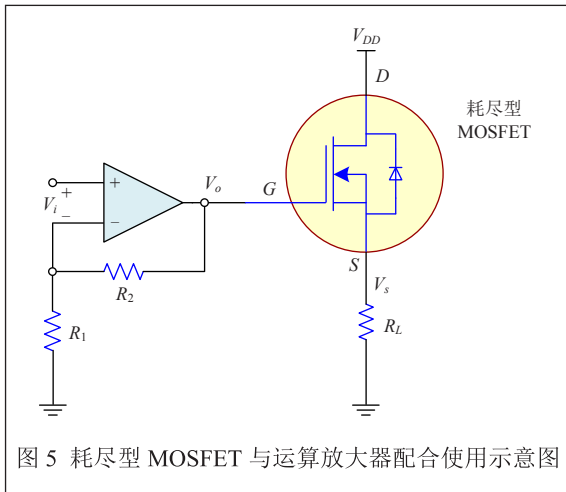


图 5 耗尽型 MOSFET 与运算放大器配合使用示意图

V_o 与 V_i 具有如下关系:

$$V_o = V_i \times (1 + R_2/R_1) \quad (2)$$

其中, V_i ——运算放大器输入电压;

V_o ——运算放大器输出电压。

因此, 通过配置 R_2 和 R_1 的组合, 在负载电流较小时, 可确定负载的工作电压 V_s 大约为:

$$V_s = V_o + |V_{GS(OFF)}| \quad (3)$$

在零栅偏即 $V_{GS}=0$ V 时, 器件处于导通状态, 当栅极-源极电压 $|V_{GS}| < |V_{GS(OFF)}|$ 时, 器件处于关断状态。

2.2 耗尽型 MOSFET 与 JFET 的比较

耗尽型 MOSFET 与耗尽型 JFET 器件具备相同的 Normally-On 特性, 是其可以在变送器的 AD421 供电与保护中替代 JFET 的基础。同时将 2 种器件工作中的电性特性比较, MOSFET 的优势在于:

首先, Si 基 JFET 器件耐压一般在 10~50 V, 更高耐压的 JFET 器件只能用 Sic 基实现 (目前不普及), 限制了绝大多数 JFET 的应用, 而 Si 基耗尽型 MOSFET 的耐压参数可以做到从 10~1,700 V 任意值。对于常用的 220 V 市电和 380 V 工业用电, 在 Normally On 应用中, 耐压为 600 V 和 1,000 V 的这 2 个系列产品需求广泛, JFET 器件无法满足, 耗尽型 MOSFET 是唯一的选择。一般浪涌或瞬态干扰达到 100 V, 此时 JFET 已被击穿, 无法达到保护功能;

其次, 由于 JFET 允许栅极泄漏电流为比 MOSFET 的栅极泄漏电流高出 3 个数量级, MOSFET 极低的漏电流, 大大降低了静态功耗, 也就极大地降

低整机功耗。同时, MOSFET 极低的漏电流, 反应速度更快, 对浪涌或瞬态干扰的保护更灵敏有效;

再次, JFET 的输入阻抗远低于 MOSFET 输入阻抗, 因为 MOSFET 金属氧化物绝缘体, 使得其在栅极端的电阻更高。对于电压驱动的 FET 器件, 输入阻抗越大, 对电压源的负载就越轻, 因而就越容易驱动, 也不会对信号源有影响, MOSFET 比 JFET 更具备易于驱动、对栅极影响极小的优势。

MOSFET 的缺点在于: 由于其本身的输入阻抗高, 对 ESD 静电敏感, 而栅-源极间电容又很小, 所以极易受外界电磁场或静电的感应而带电, 又因在静电较强的场合难于泄放电荷, 容易引起静电击穿。所以, 克服耗尽型 MOSFET 缺点, 带防静电的 ESD 保护功能在耗尽型 MOSFET 的设计和生产中尤为重要, 是器件能否正常使用的关键指标。

耗尽型 MOSFET 具备与 JFET 相同的电性特点, 但各方面性能更优, 是未来电路升级换代的理想器件。

2.3 带 ESD 静电保护功能的耗尽型 MOSFET 与普通耗尽型 MOSFET 保护功能的比较

智能变送器作为传感器系统中的重要组成部分, 在恶劣环境中, 除了一般浪涌或瞬态干扰外, 静电干扰也是不容忽视的造成系统损坏的因素。由于 MOSFET 属于静电放电敏感度低的元器件, 较易被静电击穿而损坏, 在操作时稍有不慎, 该 MOSFET 就会由于静电损坏而失效, 直接影响稳定供电。在 AD421 的使用中, ADI 公司特别提出 DN25N 使用中极易失效, 需谨慎操作, 做好严格静电防护, 所以自身带静电保护功能的耗尽型 MOSFET 在电路中特别重要。

3 实际应用案例

3.1 实际电路与参数说明

以一款常用的国产耗尽型 MOSFET 为例, 简要说明其在智能变送器典型电路中为 DAC 模块 AD421 供电, 其不仅具有高电压稳压和有效抑制浪涌或瞬态干扰能力, 并对静电防护具有很好的防护作用, 保证系统安全、正常工作。

DMX1072 (DMS1072) / DMS4022E (DMX4022E) 耗尽型 MOSFET 给环路供电型 4~20 mA 数模转换电

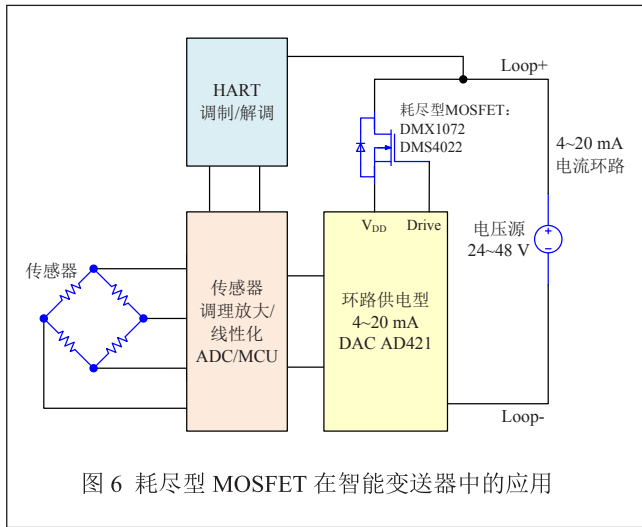


图 6 耗尽型 MOSFET 在智能变送器中的应用

现场、电机控制、变频调速等复杂电磁环境的应用尤为重要。汽车中有许多电机，这些感性负载可能产生高达 300 V 的电压瞬态，因此选择 DMS4022E 能有效地防止瞬态干扰和破坏。

3.2 国产器件与进口器件 ESD 能力比较

AD421 应用手册上推荐的 DN3545、DN2540、DN3525 等 DN25D 系列，不带 ESD 保护功能，而 DMX1072 (DMS1072) / DMS4022E (DMX4022E) 的 ESD 保护测试标准采用通用的美国电子工业协会 JEDEC EIA / JESD22-A114 (HBM)，人体放电模式的 $ESD V_{ESD(G-S)}$ 分别达到 1,700/3,500 V，可以对各种环境下的静电干扰起到很好的防护作用，大大增加了系统的安全性和稳定性。

路 AD421 供电，如图 6 所示。

DMX1072 采用 SOT-89 封装，主要参数为：耗散功率 1 W，耐压 100 V，饱和电流大于 0.7 A，导通电阻最大值 2 Ω ，如果直接用在 4~20 mA 供电环路中，可支持高达 24 V 的电压输入。电性特征曲线如图 7 所示^[5]。

DMS4022E 采用 SOT-223 封装，主要参数为：耗散功率 1.5 W，耐压 400 V，饱和电流大于 200 mA，导通电阻最大值 20 Ω 左右。电性曲线如图 8 所示^[6]。

采用 DMS4022E，支持高达 48 V 的高电压输入，并同时抑制高达 400 V 的瞬态浪涌，对系统实行有效的过压、过流保护，这对于诸如工业

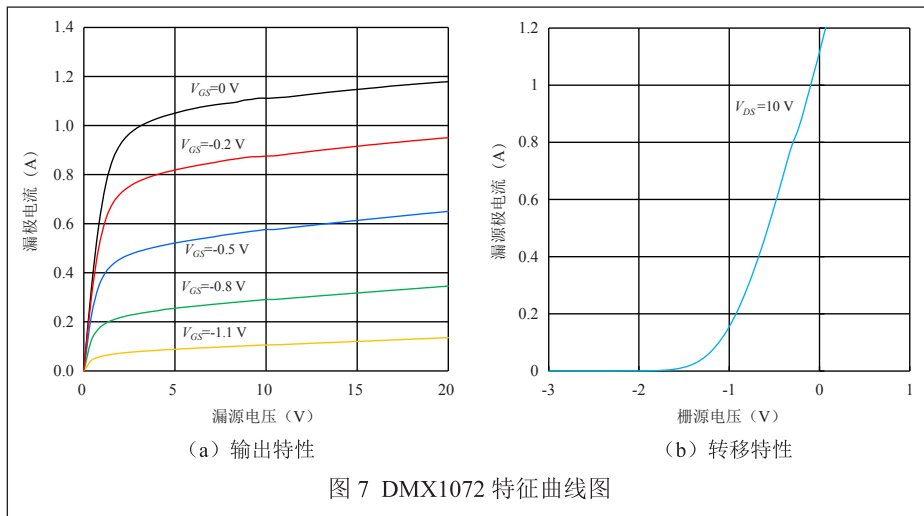


图 7 DMX1072 特征曲线图

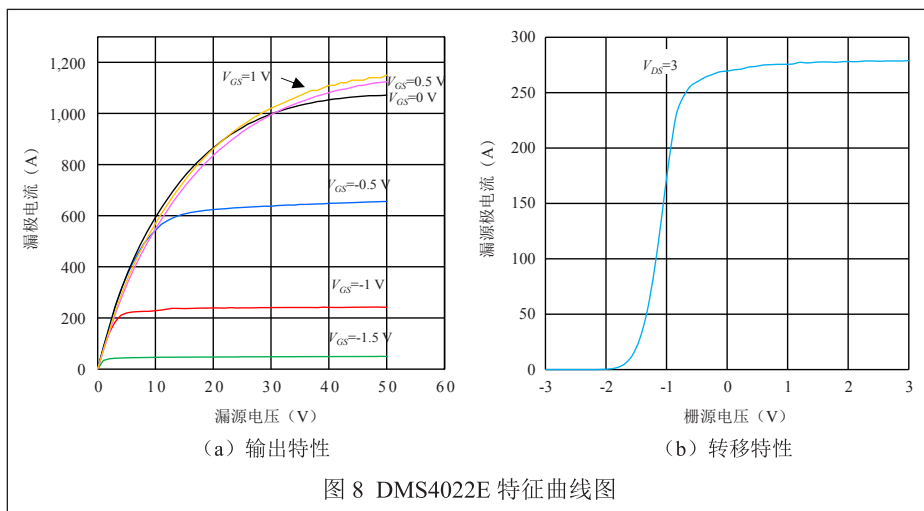


图 8 DMS4022E 特征曲线图

3.2.1 产品设计比较

从 DN2540 产品和 DMS4022E 产品的规格书上可知，2 款产品的结构如图 9 所示^[6-7]。

从各自的结构示意图上可以明显看出，在 DMS4022E 的栅-源两端并联有双向 ESD 保护二极管，而 DN2540 的栅-源结构上没有 ESD 保护设计。

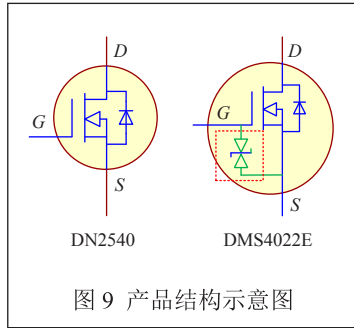


图 9 产品结构示意图

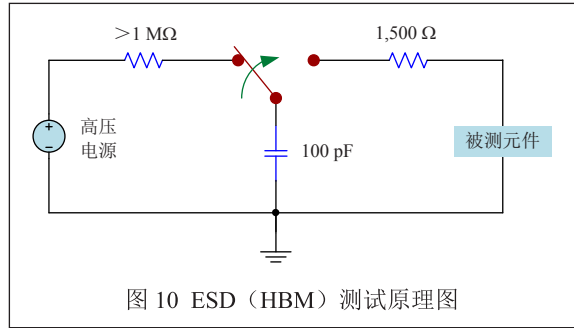


图 10 ESD (HBM) 测试原理图

3.2.2 实际 ESD (HBM) 测试结果比较

为进一步验证国产器件 DMS4022E 和进口器件 DN2540 的 ESD 功能，分别各抽样 20 颗，采用美国电子工业协会关于防静电干扰的测试标准：JEDEC EIA/JESD22-A114，采用 HBM 模型进行测试，测试电路原理图如图 10 所示。

表 2 DMS4022E、DN2540 人体模型下 ESD 失效数据

ESD 模型：人体模型	测试标准：JEDEC EIA/JESD22-A114			
	DN2540		DMS4022E	
测试条件	测试数量	最低失效电压	测试数量	最低失效电压
G TO S (+) 初始电压：200 V 步长：100 V	20 颗	200 V	20 颗	3,600 V
G TO S (-) 初始电压：200 V 步长：100 V	20 颗	200 V	20 颗	3,500 V

测试结果如表 2 所示。在具体实验中，由于模拟的静电高压设备最低电压为 200 V，DN2540 在 200 V 模拟静电下，20 颗均失效，说明完全没有静电保护功能，在操作中稍有不慎，器件本身失效，对系统的稳定供电和抗瞬态干扰的目的均不能实现；而 DMS4022E 在 G TO S (+) 初始电压：200 V，步长：100 V 条件下，3,600 V 失效，G TO S (-) 初始电压：200 V，步长：100 V 条件下，3,500 V 失效。按照美国电子工业协会 JEDEC EIA/JESD22-A114 (HBM) 器件电压分类标准：2 级：2,000~3,999 V，3A 级：4,000~8,000 V，DMS4022E 完全达到 2 级 ESD 保护标准，接近 3A 级 ESD 保护标准，能够有效抑制静电干扰，全方位保护智能变送器的性能稳定和工作安全。

4 结束语

通过对智能变送器 DAC 供电与保护需求的分析，重点对传统 JET、普通耗尽型 MOSFET 和带 ESD 功能的耗尽型 MOSFET 从原理、应用和测试多角度比较，以应用实例说明带 ESD 功能的耗尽型 MOSFET 在变送器、接触器等领域应用的优势及未来发展趋势。

虽然增强型功率 MOSFET 作为主流的开关器件，占据了绝大部分市场份额，但耗尽型 MOSFET 作为一种特殊的器件，

在实现一些电路拓扑中具有无可比拟的优势，广泛应用于 NC 固态继电器、“常闭”开关、线形运放、恒流源、恒压源和开关电源等。近年来，随着电子电气系统电源电压的降低和绿色能源计划的实施，系统的功耗设计正面临着更加严苛的要求。耗尽型 MOSFET 由于其独特的性能，其应用的广度和深度都在不断地拓展。利用耗尽型 MOSFET，可以方便地实现零偏置放大器，不需要偏置电路，简化了电路设计，降低了系统成本，还大大降低了偏置电路的功耗；耗尽型 MOSFET 的亚阈值特性，可为负载提供稳定的供电，且输出电压可由内部钳位，无需稳压管，简化电路设计；如需要负电压开启，高频开关、开关电源启动等特定场合，耗尽型 MOSFET 是理想选择。目前，除智能变送器外，通信设备、物联网、汽车接触器、充电桩、BMS 系统、欧标节能 LED、PD3.0 充电器等逐步广泛应用。

一直以来，仅有国外几家高端器件制造商：Infineon、Microchip、IXYS、Supertex 生产耗尽型 MOSFET，近年，国内半导体制造商也设计生产出耗尽型 MOSFET 系列产品，如 ARK 公司的 DMZ 系列，耐压从 60~1,000 V，且所有产品带 ESD 保护功能，弥补了国外同类产品极少带 ESD 保护的不足，性能更加稳定可靠，避免因静电对整个电路造成损坏。国产耗尽型 MOSFET 器件应用日益普及，产品成熟可靠，

性能、品质上都能达到进口同类产品水平。

参考文献

- [1] 孔祥伟, 周杏鹏. 基于 HART 协议的智能压力变送器的设计与实现 [J]. 仪表技术与传感器, 2010(2): 15-17.
- [2] Advanced Linear Devices, Inc. AD421 Datasheet. [EB/OL]. <https://www.Analog.com>
- [3] LINDEN HARRISON. An Introduction to Depletion-Mode MOSFETs [EB/OL]. <https://www.mikrocontroller.net/attachment/389314/IntroDepletionModeMOSFET.pdf>.
- [4] MIRSKY GREGORY. Depletion-Mode MOSFET Kick-Starts Power Supply [J]. Milavia International, Buffalo Grove, IL, Design Ideas in EDN, 2008, 53(1): 68.
- [5] ARK Microelectronics Co., Ltd.. DMZ 1072 Datasheet. [EB/OL]. <https://www.ark-micro.com/>
- [6] ARK Microelectronics Co., Ltd.. DMZ 4022E Datasheet. [EB/OL]. <https://www.ark-micro.com/>
- [7] Microchip Technology Incorporated. N-Channel Depletion-Mode Vertical DMOS FETs [EB/OL]. <https://www.microchip.com>

Analysis of Power Supply and Protection of Depletion MOSFET for DAC in Intelligent Transmitter

HE Feng¹, DOU Wen²

(1. ARK Micro-electronics Co., Ltd., Chengdu 610200, China; 2. Engineering practice center, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610200, China)

Abstract: The depletion MOSFET with ESD protection replaces the JFET devices and ordinary depletion MOSFET, effectively suppresses various interferences, and greatly improves the safety and stability of the whole system. Due to the wide application of intelligent transmitters in industrial control, Internet of things, rail transit, aerospace and other fields, especially the increasing popularity of the application of autonomous vehicle, medical instruments and energy and environmental control systems in recent years, the development trend of intelligent, integrated and miniaturized systems, and the continuous improvement of the performance and quality requirements of intelligent transmitters, The effective anti-interference ability of the key module DAC in harsh environment is an important

guarantee for the stability of the whole transmitter and the safety of the system. Traditional JFET devices can achieve stable power supply, but can not play an effective anti-interference role. Ordinary depletion MOSFET devices replace traditional JFET devices, which can stabilize power supply and effectively suppress surge, transient current and voltage interference, but have no ESD (Electro-Static discharge) protection function. In order to solve the problem of more effective protection of the system circuit, the structure of the device itself is studied and the depletion MOSFET with electrostatic discharge protection function is developed. In the actual test and use, it is effectively verified that the power supply of the device to the DAC module can not only stabilize the power supply, but also suppress the surge, transient current and voltage interference, and effectively eliminate the possibility of electrostatic damage to the device. The application of the device greatly improves the stability of intelligent transmitter and plays an important role in the safety of autopilot system vehicle and medical instruments.

Key words: intelligent transmitter; DAC module; power supply and protection; depletion-mode MOSFET; electrostatic discharge protection

作者简介

何锋: 成都方舟微电子有限公司, 博士, 副总经理, 研究方向为耗尽型 MOSFET 的设计与应用, 电路保护方案的设计与实现。

通信地址: 成都市双流双兴大道 1 号电子科大科技园 D26 栋

邮编: 610200

邮箱: hefeng@ark-micro.com

窦文: 成都信息工程大学工程实践中心, 高级工程师, 长期从事《模拟电子技术》理论教学和相关模电、电分实验教学工作。