

# ADI面向高性能伺服驱动器的 可持续运动控制解决方案

智能运动控制是高度敏捷且可持续制造的核心，工业现场中从泵到传送带、挤压冲床再到机器人，电机及电机驱动器起到举足轻重的作用。电机在我们生活中已极其普遍，现安装电机约有上亿台，每年新增部署约千万台。

伺服系统在工业系统扮演着重要角色，电机驱动器通过收集和传输电机数据，有效的支持了数字化转型和敏捷生产，并且通过提高部署电机的能效以减少碳排放来对可持续发展产生重大影响。工业消耗的能源约占总能源的30%，而电机消耗了大约70%的工业能源，如果每台电机通过适当的负载匹配及电机驱动器都以尽可能高效的方式驱动，全球能源用量则有望减少10%。

## 一、工业电机控制系统

工业中绝大多数电机都直接连接到交流电网，并以固定转速运行，而电机变速运行可以节省大量系统能源。变速电机推动着逆变器驱动电机系统的转变：虽然开环逆变器系统控制精度有限且足以支持许多应用，但包含位置和电流控制器的变速驱动器可为要求更高的应用提供更佳的性能，也对电机速度和扭矩的精密控制有利。不同系统在控制性能方面差异较大，在复杂的工业机械中不同系统可组合使用并以同步方式运行。

变速驱动器和以此为基础的多轴机械的主要趋势是朝着更广泛、更透明的互联互通迈进，如今表现为在更广泛的工业系统中通过以太网进行连接，这给控制、实时洞察和生产力带来了巨大的优势，但也提出了与网络安全相关的新挑战。

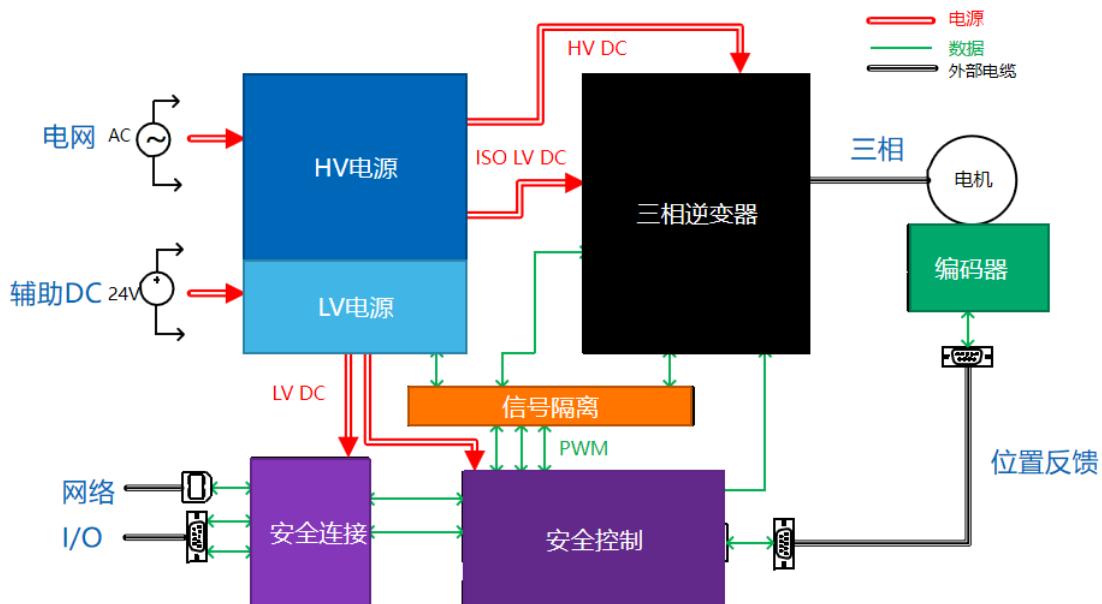


图1. 变速电机驱动器架构

## 变速电机驱动器系统框架概述

图1框图示例了中高性能变速驱动器的典型信号链，大体有几大主要模块：

- ▶ **高压电源：**此模块由三相整流器组成，整流器可以是无源整流也可以是基于二极管的或自带控制系统的完全再生式整流，同时这部分电路还包含滤波和保护元件；高压电源模块的输入来自交流电网，输出高压直流母线为三相逆变器级供电。
- ▶ **控制电源：**大多数控制电源在交流电网中断或移除的情况下，可以让控制电子设备保持正常的运行，以便主电源恢复后，驱动器能够快速重新启动。24V直流辅助电源作为控制电源的输入，产生的电压保持控制电子设备的正常运行且作为低压电源的输入轨，5V以下低压电源轨用于控制电子设备。另外，辅助控制电源必须确保电路的保护功能，例如过流、过压保护和电源轨的“或”运算
- ▶ **编码器：**位置编码器附在电机本身上，主要负责电机旋转位置的测量并将此信息反馈到控制器。电机和编码器通常紧密耦合再通过电缆将它们接回到驱动器。近年来，更多的振动测量功能也被添加到编码器中以帮助监控机器的整体健康状况，这些信号通常通过基于RS485的协议传输到控制器芯片；
- ▶ **控制器：**使用来自逆变器的电压和电流信息以及编码器的位置信息，实现电机控制算法并向逆变器输出更新的PWM值；
- ▶ **三相逆变器：**包括主要功率电子器件模块，将高压直流母线转换为频率可变、电压可变的三相交流电供给电机。除了主要功率晶体管外，逆变器中的关键电子电路还有隔离式栅极驱动器以及电压和电流反馈电路；
- ▶ **信号隔离：**驱动器架构中的不同点都需要数字隔离器，为可接触到的外部连接器、接口和以不安全电压水平运行的逆变器的输出和输入级之间提供安全隔离；
- ▶ **安全控制：**实现电机控制算法，接收来自编码器、逆变器和安全连接接口的信号，并将脉宽调制或PWM信号输出回到逆变器；
- ▶ **安全连接：**与外界的通信至关重要，实现用户和网络接口与驱动器交互，进行数据交换、配置、固件更新等；

## 逆变器及控制信号关键元件概述

在逆变和控制信号链中，ADI拥有广泛的产品线且提供了系统鲁棒性，图2示出了信号链中的若干关键器件：

**电流检测：**ADuM770X系列，适用于高压系统的电流测试隔离式 $\Sigma$ - $\Delta$ ADC，可进一步提高和增强系统电流测量精度，尤其是针对失调误差和失调误差漂移；AD8410A高电压、高带宽高共模电流检测放大器，可与在线高精度分流电阻配合使用。对于隔离式

电流检测，同步采样ADC与隔离传感器的结合使用是一种出色选择；

- ▶ **编码器：**ADA4571是使用磁技术的AMR 180度位置编码传感器；针对光学和磁检测技术，可以采用同步采样模数转换器AD7380对编码器信号处理进行优化；编码器中也采用ADXL100X或ADXL35X单轴和三轴加速度计系列提供振动监测；
- ▶ **编码器RS485接口：**全双工ADM3067E系列产品内置ESD保护并支持高达50Mbps的比特率；
- ▶ **控制器：**TMC4671磁场定向控制器芯片产品提供内置的位置、速度和扭矩控制器，可由用户轻松配置，极大简化了开发任务；
- ▶ **工业以太网连接：**FID05000多协议交换芯片和ADIN1300千兆位PHY等产品组合为使用者提供便利；MAXQ1065加密控制器帮助用户实现安全启动、安全固件更新和安全连接；
- ▶ **电源：**集成了摆率控制的栅极驱动器ADuM4122，对来自电机控制器的PWM信号进行放大和电平转换，从而高效地接通和关断功率晶体管并保护它们免受任何故障情况的影响；LTC7060是用于低压系统的非隔离式电桥驱动器。

## 二、工业电机控制中的电流反馈

电流反馈是伺服驱动器整体控制性能的基本组成部分，在进行电流反馈路径的设计时，需要注意几个部分：1) 电流测量需要与PWM周期同步，尽量不将高频开关电流纹波引入反馈路径，通常采用14至16位测量分辨率对至少两个电机相位同时采样，延迟低至微秒级以便控制环路能够在电流PWM周期内做出响应；2) 低失调漂移是一个重要特性，这有助于尽可能地减少由相间偏移引起的任何扭矩纹波；3) 电流测量需要被隔离或在较低的电压系统中进行且具有高共模能力。

### 电流反馈实现的几种不同方法

电流反馈的实现方法并非唯一，大致可以概括为如下几种：

1. **串联分流器检测：**此方法使用串联分流器并结合高共模电流检测放大器和ADC或直接使用隔离式 $\Sigma$ - $\Delta$ ADC进行。通常使用隔离放大器的性能会稍低一点。推荐产品有ADuM770x、AD841x和AD738x；
2. **隔离电流检测：**对于100A+级别的电流实施隔离检测，可以使用基于AMR的电流传感器ADAF1080，这是一款模拟输出器件，可以连接到信号调理电路并直接进入ADC。推荐产品有ADAF1080和AD738x；
3. **类相分流电阻检测：**这是一种不太准确的电流反馈方法，如图3标记为④处所示，信号被调理后直接传送至ADC，通常使用AD8515这种相对快速的运算放大器。

## 电流电压反馈主要器件及规格

下面列出了伺服电机电流和电压反馈设计中若干器件的重要规格：

1.**ADuM770x**：隔离式Σ-Δ ADC，超低失调漂移有助于减少扭矩纹波。小型8引脚封装并具有集成LDO，有助于简化PCB板设计；

2.**ADuM4195-1**：用于电压和电流反馈的新型隔离放大器。通常，直流母线电压作为输入提供给控制算法以便设置增益。可以直接测量分压后的直流母线电压并将其转换到系统的安全端，以便将其馈入ADC或直接馈入控制器中的集成ADC。

**ADuM4195-1**具有高达5V的宽输入范围并具有整个温度范围内0.5%的超低增益误差；

3.**AD7380**：先进的双通道同步16位或14位SAR ADC，片内过采样功能有助于提高分辨率，4MSPS的吞吐速率有利于来自电机相位的两相反馈的电流反馈，极小的3x3mm封装对于位置反馈应用较为便利；

4.**AD8411**：适用于较低电压系统的高共模电流检测放大器，具有一系列增益选项和相对较低的失调漂移，提供行业优异的高带宽，可实现出色的高性能电流控制。高达2MHz的带宽，在电流反馈控制器上实现较好的精度。

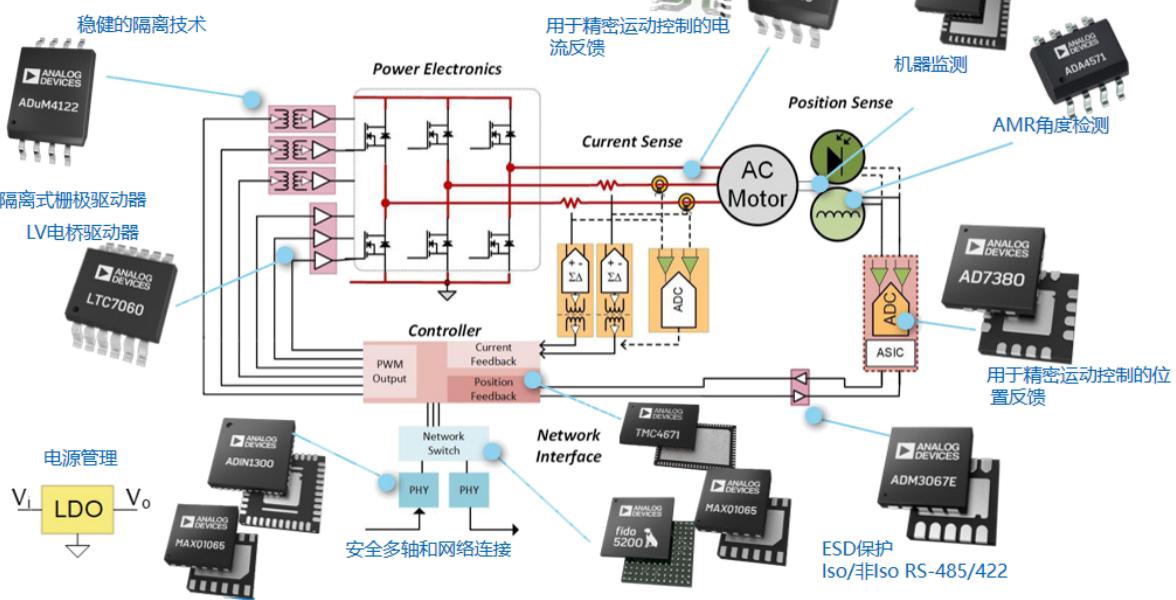


图2. 逆变器及控制信号链关键元件示例

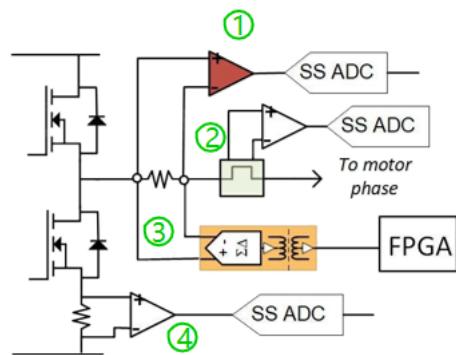
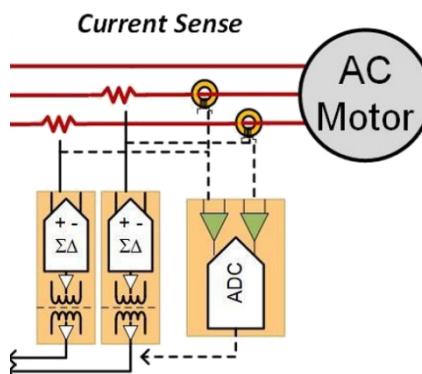


图3. 电流反馈方案示例

### 三、工业以太网连接

工业以太网是工业自动化系统转变中的关键推动因素，使得每个伺服驱动器都可以连上IP网络，发送和接收数据并接收来自整个系统的命令。因此，整个生产系统具有更大的透明度和洞察力，有助于提高生产力和效率。

伺服驱动器是硬实时设备，需要确保确定性操作，因此需要工业以太网具有协议能力，也就是说能够覆盖不同供应商的各种协议。展望未来，系统将转向融合度更高的时间敏感网络，能够管理和控制不同流量类型，包括带宽流量要求极高的视频流量，并在此过程中维持亚毫秒周期时间，有时可能存在非关键流量。

ADI拥有广泛的工业以太网产品组合来满足伺服驱动器的这些需求，适用于确定性应用的可扩展以太网解决方案细分如下：

1. 10/100Mb工业以太网技术：出色的工业以太网解决方案当今工业以太网市场的大部分驱动器和伺服系统仍然使用100Mb以太网，ADI的100Mb PHY提供业界出色的低延迟和功耗。位于第二层双端口多协议交换芯片[FID05000](#)系列支持所有主要的传统协议，如PROFINET、EtherCAT、Modbus、EtherNet IP。[ADIN2299](#)是一款多协议平台，集成了[FID05000](#)系列嵌入式交换芯片和PHY，该平台利用预认证的工业协议帮助使用者减少系统开发时间和风险。

2. TSN技术：业界出色的以太网交换芯片和PHY解决方案面向未来的TSN技术（时间敏感网络）包括以太网TSN交换芯片和1000BASE-T PHY。下一代可扩展的3端口和6端口第二层交换芯片已有样片可供申请，完全符合TSN标准，具有10、100和千兆位吞吐能力，可以级联以应对具有更高端口数要求的使用场景。[ADIN1300](#)，千兆PHY芯片，提供出色的低延迟和低功耗特性且封装尺寸非常小。

3. 单对以太网技术：业界功耗超低的10BASE-T1L解决方案单对以太网技术包括10BASE-T1L MAC-PHY和PHY产品，适用于10Mb单对接口。其中MAC-PHY可与任何微控制器配对，简化了现场总线的迁移；PHY产品带有标准xMII接口，可以连接任何处理器。

以上三种解决方案稳健灵活，可连接各种微控制器和/或处理器。

### 四、网络安全

联网的电机驱动器更加智能，但也会比传统电机驱动器遭受更多的网络攻击，在网络安全方面存在极大隐患的同时，系统也可能面临不同类型的威胁：

1. 第一类威胁可能是恶意软件的威胁：病毒或蠕虫可能会被注入电机驱动器的固件中，导致电机驱动器拒绝服务或发生意外行为；
2. 第二类威胁可能是来自不可信来源的命令：这种情况下，电机驱动器可能会接收一些错误的速度设定值命令，导致进程命令被错误地执行；
3. 第三类威胁可能是窃听威胁：这种情况下，攻击者会监视网络链路并窃取所传输的信息；
4. 最新的一类威胁是窃取知识产权：这种情况可能会对电机驱动设备制造商造成损害广为人知的网络病毒是Stuxnet病毒，这是一种专门感染浓缩铀工厂的病毒。此病毒通过USB密钥注入后再通过互联网传播，感染特定类型的PLC。值得注意的是，Stuxnet只能感染特定类型的PLC，因此，没有人可以预料到这些PLC会被感染，导致病毒控制PLC向电机驱动器发送超出范围的速度设定命令。一般而言，电机驱动器的设计工作速度范围是800-1200Hz，低于2Hz和高于1400Hz的范围会导致离心机发送错误，而导致铀浓缩无法运行。Stuxnet的设计目的非常明确，就是使这些电机驱动器在运行时发生故障。因此，电机驱动器如何被保护是一个需要被关注的问题。

#### 加密

既然联网的电机驱动器易于受到威胁，那需要采取哪些技术来保护设备免受网络攻击？

方法之一就是通过加密来保护数据安全。一般采用对称加密，这是保护数据的最快方式。高级加密标准（AES）是一种对称加密算法，使用相同的密钥来加密和解密消息，因此只有被授权的人员（即知道密钥的人）才可以读取消息。加密可以选择使用会话密钥执行，会话密钥是双方在相互验证之后共同商定的密钥。会话密钥的计算采用椭圆曲线Diffie-Hellman算法实现，通过动态创建会话密钥的方法解决密钥配送的问题。

另一个重要加密技术是身份验证，与对称加密相反，非对称加密可以更好地实现身份验证，采用ECDSA P256机制进行。

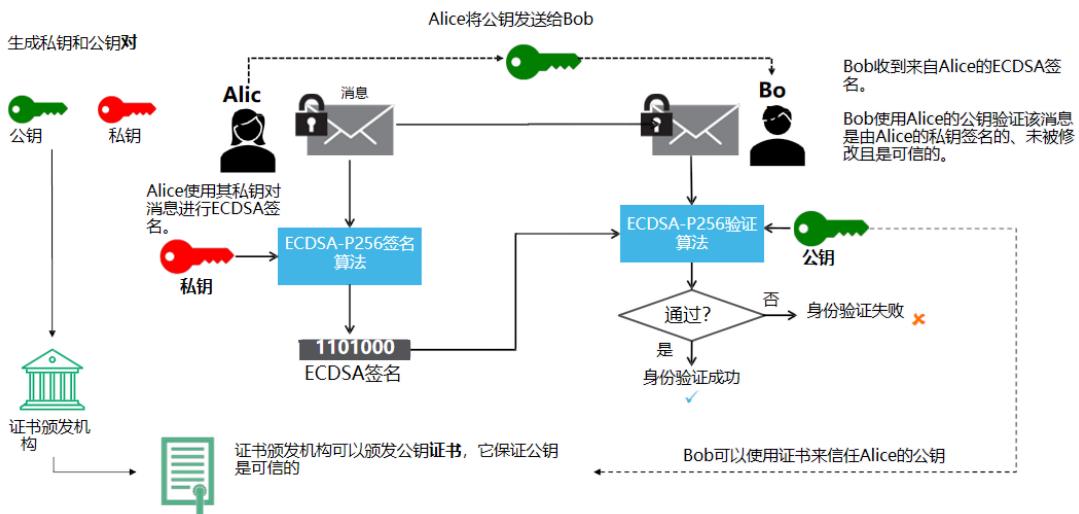


图4. 使用非对称密钥进行身份验证ECDSA-P256案例

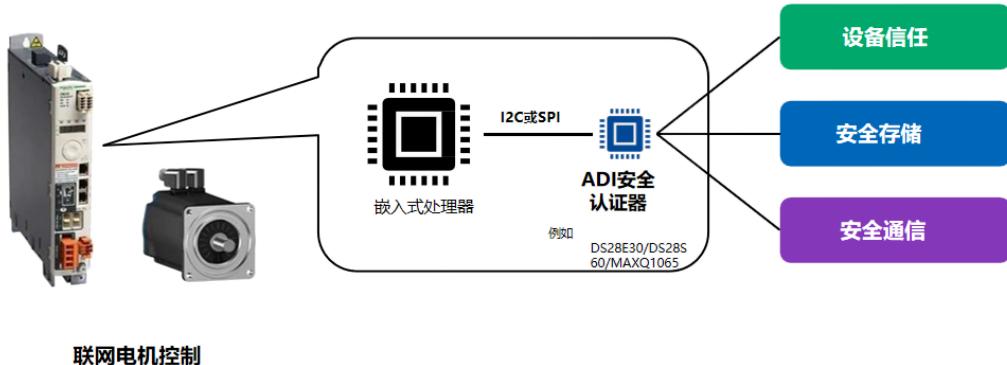


图5. 安全认证器可确保电机驱动器安全

### 非对称密钥案例说明

为了清晰的了解身份验证，图4案例形象的示出了流程过程。

Alice和Bob希望安全通信，Bob需要确保他从Alice那里收到的消息确实来自于Alice，为了实现这一目标需要检查Alice是否对她发送的消息进行了数字签名：

1. 创建一个密钥对，密钥对由公钥和私钥组成

2. Alice将她的公钥发给Bob，同时保存她的私钥。为了提高安全性，公钥可以由认证机构进行公钥认证。这样，Bob可以信任该公钥确实是由Alice发送的

3. 需要确保Bob拥有来自Alice的可信公钥，Alice用她的私钥对消息签名，此消息生成ECDSA数字签名后发送给Bob；Bob使用Alice的公钥来检查消息是否是由Alice的私钥签名

若验证成功，则消息通过身份认证；若验证失败，则身份认证失败，意味着该消息不是由Alice生成的。

要求	特性	DS28C39	DS28S60	MAXQ1065
安全启动	ECDSA签名验证		固件哈希和签名验证	固件哈希和签名验证 限制对凭证的访问
安全部件更新	SHA-256			
平台配置	SHA-256 安全存储		平台参数哈希和存储	

表1. 可信任的设备

要求	特性	DS28C39	DS28S60	MAXQ1065
密钥存储	受保护存储器	• 存储器页面自定义属性 • ChipDNA™	• 具有自定义访问权限的安全闪存 • ChipDNA™	• 灵活的安全文件系统 • ChipDNA™
证书存储	受保护存储器	• 存储器页面自定义属性 • ChipDNA™		X.509证书, 证书树

表2. 安全通信

要求	特性	DS28C39	DS28S60	MAXQ1065
身份验证	• ECDSA • 公钥证书	基于公钥证书的电机驱动器和服务器相互认证		
加密	AES	-	AES 128和256位	
TLS协议	• AES、ECDSA、ECDH • 证书管理和存储	-	• 会话密钥建立 • AES加密 • 定制证书	• 完全支持TLS并提供软件协议栈 • ChipDNA™

表3. 安全通信

## 安全认证器

ADI提供的安全认证器保障了电机驱动器的安全性，认证器通过I<sup>2</sup>C或SPI接口连接到微控制器。这些认证器是预编程设备，其功能对任何联网设备的安全性都至关重要。认证器需要达到三个关键的安全目标（图5形象地给出了说明）：

- 1.设备信任：确保设备是正品并运行正确的配置后才可连接到网络；
- 2.安全存储：确保连接时所需的凭据得到适当的保护，如密钥或数字证书等；
- 3.安全通信：确保通信本身的安全。

### 安全认证器——设备信任

为何需要设备信任，如何实现设备信任？

电机驱动器是连接到网络的边缘设备，这可能成为任何类型威胁的入口，从而将整个网络置于风险之中。若电机驱动器（边缘设备）运行了不受信任的软件，则它的行为不可预测，处于不安全状态中。最坏的情况是不受信任的软件泄露密钥等重要秘密。通常可以采取三个步骤避免风险：

1.安全启动：启动时保证软件是正品、无恶意的，在每次设备启动时都进行验证。为实现安全启动使用的身份验证技术基于非对称数字签名算法ECDSA实现。

2.安全更新：保证与安全启动具有相同的安全级别。新固件每次发送到电机驱动器时，必须检验其真实性，这通过验证数字签名来实现；

3.平台配置：确保设备以可信的配置运行，并且所有参数均按预期方式设置，确保可预测的操作

综上所述，安全启动、安全部件更新和平台配置共同构建了可信任的设备。

表1列出了DS28C39、DS28S60和MAXQ1065实现可信设备所具有的特征，三款认证器均可以计算并存储固件哈希值、验证数字签名。MAXQ1065还可通过增强特性验证签名，该特性会限制对凭据的访问。

为了支持正确配置平台，我们的认证器提供了SHA-256的安全存储能力。表2列出的三个认证器可以计算并存储哈希值，以便根据计算结果防止对平台参数及配置的未经授权的修改。

安全认证器支持通过使用ECDSA私钥对发布的固件进行签名、通过ECDSA公钥对被部署到现场的设备固件进行验证。最好使用非对称加密来实现安全启动从而避免在现场部署密钥，因为

在研发过程中保护私钥比在现场设备中做起来更容易。同理，安全认证器以相同技术来确保更新安全。

ECDSA签名验证支持安全启动和安全固件更新，安全哈希算法(SHA)计算消息的唯一的、无法伪造的摘要。

### 安全认证器——安全存储

表2列出了三款认证器实现可以实现安全存储所的特性。

密码、密钥和证书三者需要共同使用，它们都是宝贵资产，需要得到强有力的保护，DS28E39、DS28S60和MAXQ1065旨在存储和管理此类宝贵的凭据。

ChipDNA是一种物理不可克隆功能技术，提供对物理攻击的超强防御能力；X.509是公钥证书的标准化格式。MAXQ1065能够存储此类证书并管理证书树。

### 安全认证器——安全通信

安全通信的三大支柱是真实性、完整性和保密性，TLS协议是支持这三大支柱的常用协议，代表传输层的安全：

1. 真实性：确保内容是由受信任的实体发布或确保设备是正品，使用ECDSA算法的数字签名来保证真实性
2. 完整性：确保内容在传输时未被修改，数字签名同时可以保证真实性和完整性
3. 保密性：确保只有授权的用户才能访问内容，通过AES算法等加密技术实现

表3列出的三款认证器均可实现安全通信所具有的特性。

DS28C39、DS28S60和MAXQ1065均支持身份验证，具体地说，支持ECDSA数字签名算法并能存储和管理公钥证书。

DS28S60和MAXQ1065支持长度为128或256位的AES加密；DS28S60和MAXQ1065支持TLS协议；DS28S60支持会话密钥的建立和AES加密；MAXQ1065具备完整的TLS软件协议栈并支持X.509证书。

因此，ADI提供的安全认证器支持安全通信的实施。

### 安全认证器：MAXQ1065

MAXQ1065是一款深受欢迎的联网对象安全产品，是通过SPI或I<sup>2</sup>C接口连接到主微控制器的协处理器。产品内含8kB的安全灵活的文件系统用于保护和存储密钥或证书，该系统受到ChipDNA物理不可克隆技术的保护，具有通过内部传感器检测篡改和异常工作状况的能力。

MAXQ1065配备硬件加密引擎以便能够运行AES加密、SHA-256哈希或ECDSA相互认证，具有强大的真随机数生成能力，支持TLS密钥交换以便进一步处理批量加密或解密，能执行TLS 1.3身份验证。

MAXQ1065经过现场认证，能够提高未来的安全性或修复未来的安全缺陷。在同类产品中功耗很低，在关断或休眠模式下功耗为100nA。

为了支持MAXQ1065安全认证器的使用，ADI配备了全面的软件协议栈支持客户的开发。与MAXQ1065安全认证器的通信可以使用现有的系统驱动程序来建立，其上运行的是ADI库，通过适配层与现有I<sup>2</sup>C或SPI驱动程序进行连接。除此之外，ADI还提供完整的TLS软件协议栈，即MBTLS，也可以使用Wolf SSL协议栈。客户可以利用这些构建模块完成开发及其应用。



图6. MAXQ1065综合性软件产品

## 五、小结

智能运动是工业自动化系统的核心，电机及其电机驱动器在信号链中处于重要地位。任何解决方案都要确保电机可以精准、可靠、安全地工作。ADI凭借深厚的技术积累，针对伺服驱动信号链，就精密电流和位置反馈、信号和栅极驱动隔离、电源管理、机器健康和数字安全，提供了完整的全套解决方案，助力客户解决复杂多样的系统难题。

**ADI智库**

一站式电子技术宝库



关注ADI智库

ADI智库是ADI公司面向中国工程师打造的一站式资源分享平台，

除了汇聚ADI官网的海量技术资料、视频外，还有大量首发的、

免费的培训课程、视频直播等。九大领域、  
十项技术，加入ADI智库，您可以尽情的浏览收藏、下载相关资源。此外，您还可一键报名线上线下会议活动，更有参会提醒等贴心服务。

在线支持社区

**ADI EngineerZone™**

中文技术论坛

访问ADI在线支持社区，

与ADI技术专家互动。提出您的

棘手设计问题、浏览常见问题

解答，或参与讨论。

请访问 [ez.analog.com/cn](http://ez.analog.com/cn)

