

用于家用制冷系统解决方案的低成本数字信号控制器

作者：吴崇理

飞思卡尔半导体微控制器事业部

高级系统应用工程师

2007年7月18日

简介

电机及其控制存在于许多常用的家用电器（包括微波炉、洗衣机、空调和冰箱）应用中。随着更多复杂应用的出现以及节约能量和降低成本要求，目前市场上已经开发出了许多更为先进的控制技术，如磁场定向控制技术或电机的负载自适应控制技术。由于缺少信号处理能力或合适的外围设备，一般的 8 位微控制器(MCU)通常无法实现这些先进的控制性能。然而，通过利用基于 DSP 内核的控制器，这种情况最近发生了引人注目的变化。数字信号控制器（Digital Signal Controller, DSC）体系结构旨在减少外围器件的使用、降低系统成本和具有在短时间内处理大量数据的能力，它具备 DSP 和 MCU 的双重功能，且具有先进的片上智能化的外设接口。

如今，空调制冷系统通常消耗了住宅和办公楼中的大部分电能。过去 10 年，设备安装的数量一直在稳定增长，特别是在亚洲一些国家和地区。这些设备中的大部分都是采用开关控制的方法，将温度保持在设定的范围内。在重载情况下，定速压缩机的运行效率是较高的。但在负载较轻的情况下，这种压缩机将会低效运行。在正常操作情况，最高负载出现在压缩机启动时，因为需要从制冷区域抽取热量，以便把温度保持在理想的范围内。但是要想把温度保持在想要的范围内，压缩机大部份时间会在较轻的负载情况下运行。

为了减少对全球气候变暖的间接影响，设计人员一直致力于在压缩机设计和复杂电子控制实施方面提高制冷系统的效率。为了同时达到安静平稳运行和节约能量的目的，制冷系统中越来越多地使用了变容压缩机，以根据需要改变制冷能力。变容压缩机的输出可以通过电子调频来控制。

制。由于消费类制冷系统是成本敏感型和劳动力密集型产业，所以低成本、高集成度、可实施复杂控制算法的控制器将使制造商和消费者同时获益。提高系统运行效率的一种方法是通过实施输入功率因数校正（PFC）来减少无功能量的使用，这将节约 15% 以上的能量。如今，在许多国家和地区都要求家用电器必须具有 PFC，因为电子负载引起的无功电流和高次谐波电流将需要额外的电网容量，这可能会影响电网的稳定性。

选择控制系统

有多种类型的压缩机可用于制冷应用，包括单转子压缩机（SRC）、双转子压缩机（TRC）、涡旋压缩机和直线式压缩机等。

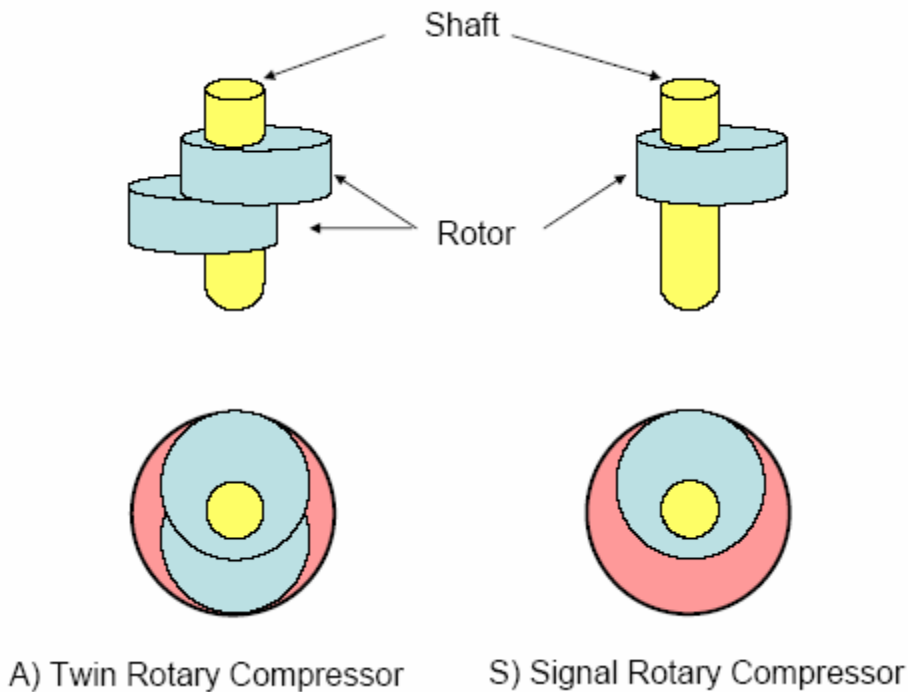


图 1：单转子压缩机和双转子压缩机的内视图

单转子压缩机是一种低成本的压缩机，它由一个较大的圆形空腔和其内部象偏心圆凸轮一样的转子构成。在运行中，由于压力循环和转子重心偏移将会产生较大的机械震动，驱动电机的负载是非均衡的循环变动的。双转子压缩机由两个对称的偏心圆凸轮转子组成。它的优势在于效率更高，且电机转子负载更加均衡。尽管单转子压缩机的运行效率相对较低，负载也不均衡，但因为其简单的机械结构，在低成本制冷系统中仍得到广泛采用。

制冷系统的最新趋势是逐渐减少异步交流感应电机的使用，而增加使用永磁同步电机

（PMSM），这包括无刷直流电机（BLDC）和高效的内置式永磁电机。这些电机由于外形紧凑、效率高、扭矩性能良好等特点而受到用户的广泛好评。

在当今的制冷电机控制应用中，我们正面对四个关键问题：安静运行、低成本、高能效系统以及去除高成本的速度传感器。在大多数压缩机设计中，电机都被封装在一个具有良好的冷却和润滑性能材料的密封单元内，且在高温环境下运行。这样就不用使用转子位置传感器（设计中必须考虑的部分），因此使机械设计更为简单和可靠。无传感器控制方法可以在不使用转子位置传感器的情况下实现电机变速，从而消除了人们对成本、可靠性和系统功效方面的顾虑。

如今，压缩机控制已经开始采用磁场定向控制。但无刷直流电机（BLDC）控制方案仍然具备一定的吸引力，因为它的控制可非常容易地使用低成本的控制器和普通的三相桥式变换器来实现，从电机模型的角度看，它非常类似于直流有刷电机，不同之处在于，无刷直流电机（BLDC）控制采用电子控制换相方法，而不同于直流有刷电机的机械换相方法。采用矩形波直流电压供电使得无刷直流电机的控制变得相对简单。为了保证电机的平稳运行，正确的换相时刻与电机转子的位置是密切相关的，当两者协调时，对无刷直流电机的控制可看成对直流有刷电机的控制。因此，控制的简单性和较高的性能使无刷直流电机成为低成本高效应用的最佳选择。

当无刷直流电机运行时，三相中只有两相通电，在任一瞬间都有一相没有通电。电机绕组将成对选择，产生一个六步换相序列，这样在通电的绕组内产生矩形直流电流，而在没有通电的绕组内产生梯形反向感应电动势。无速度传感器无刷直流电机控制通过测量未通电绕组上的反向电动势来推断转子位置，从而省去了转子位置传感器。最普通的低成本转子位置检测方法是反向电动势电压的过零检测方法。无速度传感器无刷直流电机控制的主要优势就是简单和对电机参数的依赖较少。尽管这种控制方法可以通过 8 位 MCU 来实现，但如果使用低成本单转子压缩机，噪音问题从来都没有得到较好的解决。噪音源主要来自负载不平衡造成的机械震动，这表现为电机轴上的负载转矩波动和绕组电流换相延时而带来的转矩毛刺。由于无刷直流电机的输出转矩直接与其电机绕组中的电流成正比。电流控制回路和适当转矩补偿可有效的消除由转矩波动引起的噪声。由于这些算法需要大量的数学计算和高控制带宽，要将电流控制回路加入到由 8 位 MCU 控制的系统中具有一定的难度。但是通过使用高度集成的数字信号控制器（DSC）这些问题可以得到有效地解决。。

采用数字信号控制器

对于许多价格敏感型制冷系统而言，成本低廉的单转子压缩机和无刷直流电机仍然是一个不错的选择。设计人员可以利用 DSC 的优势，在不显著增加系统成本前提下，通过实施电流反馈和前向负载补偿，来提高驱动器的整体性能。

DSC 是一种专用的微处理器，它的体系结构中包含了能够执行微控制器（MCU）和数字信号处理器（DSP）功能的内核引擎，它的特点包括：

- I 适用于多种系统解决方案的高性能内核
- I 常见的基本功能：
 - > 单指令周期乘-累加指令(MAC)，允许单指令周期内对若干内存访问，地址生成单元和高效循环算法
- I 用于嵌入式控制应用中的专用的低成本高性能片内接口：
 - > PWM、多功能计时器、高速 ADC、DAC、比较器、SCI（UART）、SPI、CAN 和 I2C 等等。
- I 嵌入式非易失性内存：
 - > 闪存、ROM 或 EEPROM

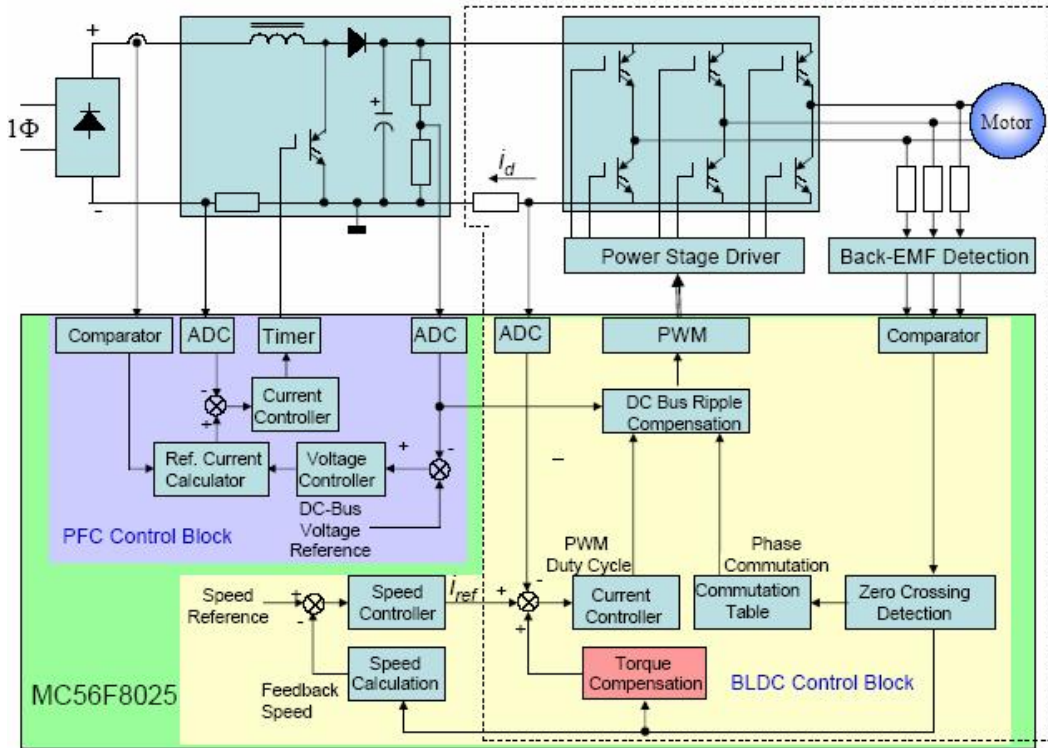


图 2 – 具有 PFC 的无传感器 BLDC 压缩机控制

图 2 显示了单转子压缩机的控制框图，该压缩机由梯形反向电动势无刷直流电机驱动，可由飞思卡尔 56F8000 系列中的成员 MC56F8025 DSC 进行控制。

无刷直流电机由一个电压型三相桥式变换器驱动。普通的无刷直流电机的动态表达式显示如下：

$$u_a = R_a i_d + L_a \frac{di_a}{dt} + E_a \quad - (1)$$

$$E_a = C_e \Phi_e w \quad - (2)$$

$$T_m - T_L = J \frac{dw}{dt} + T_r \quad - (3)$$

$$T_m = C_m \Phi_e i_d \quad - (4)$$

其中：

u_a 表示电机端子上的外加电压

i_d 表示直流母线电流（等于电机绕组电流）

E_a 表示反向电动势

F_a 表示磁通量

ω 表示角频率

T_m 表示电机输出转矩

T_L 表示负载电阻转矩

T_r 表示寄生阻尼转矩

J 表示转动惯量

R_a , L_a 表示 绕组电阻和电感

C_e , C_m 表示相关系数

系统的核心是图中虚线框内的一个闭环电流控制器，或者说电流控制环。该电流控制环的用途是使流入电机端子的实际电流（它的大小 i_d 与电机轴转矩成正比）与闭环速度控制器的输出电流参考信号（ i_{ref} ）相等。因为在任一瞬间都只对电机端子的三相中的两相通电，所以电机端子中的电流就等于直流母线电流 i_d 。因此，电流检测采用对直流母线中串联电阻压降进行采样来测量电流。因为电机输出转矩与电流直接成比例，如等式 4 中所示。因此电流控制器实际上就是一个转矩控制器。从等式 2 中可以看到，由于负载和转子惯性，转子的速度在受负载转矩的影响后要经一定的延时才能发生变化。因此，对于没有电流控制环的系统而言，电机对转矩变动的反应将缓慢得多。

想要实时响应转矩变动，必须在少于几毫秒的时间内完成电流控制环路计算。由于单转子压缩机的负载不平衡性，转矩补偿功能将根据反向电动势检测电路所检测到的转子位置估算出偏心轮的位置，从而根据偏心轮的位置估算出负载转矩，并向电流参考信号增加一定的附加值。这样，负载的不平衡就可以在影响转子速度之前通过内部电流控制环路获得补偿。电路控制环路还有一个重要作用，就是它可以将电流限制在最大的允许范围内。只要电流控制环路正常运行，电机电流就永远不会超出参考值，电机可以在输出最大转矩情况下，而不会导致三相桥式变换器和电机过电流。

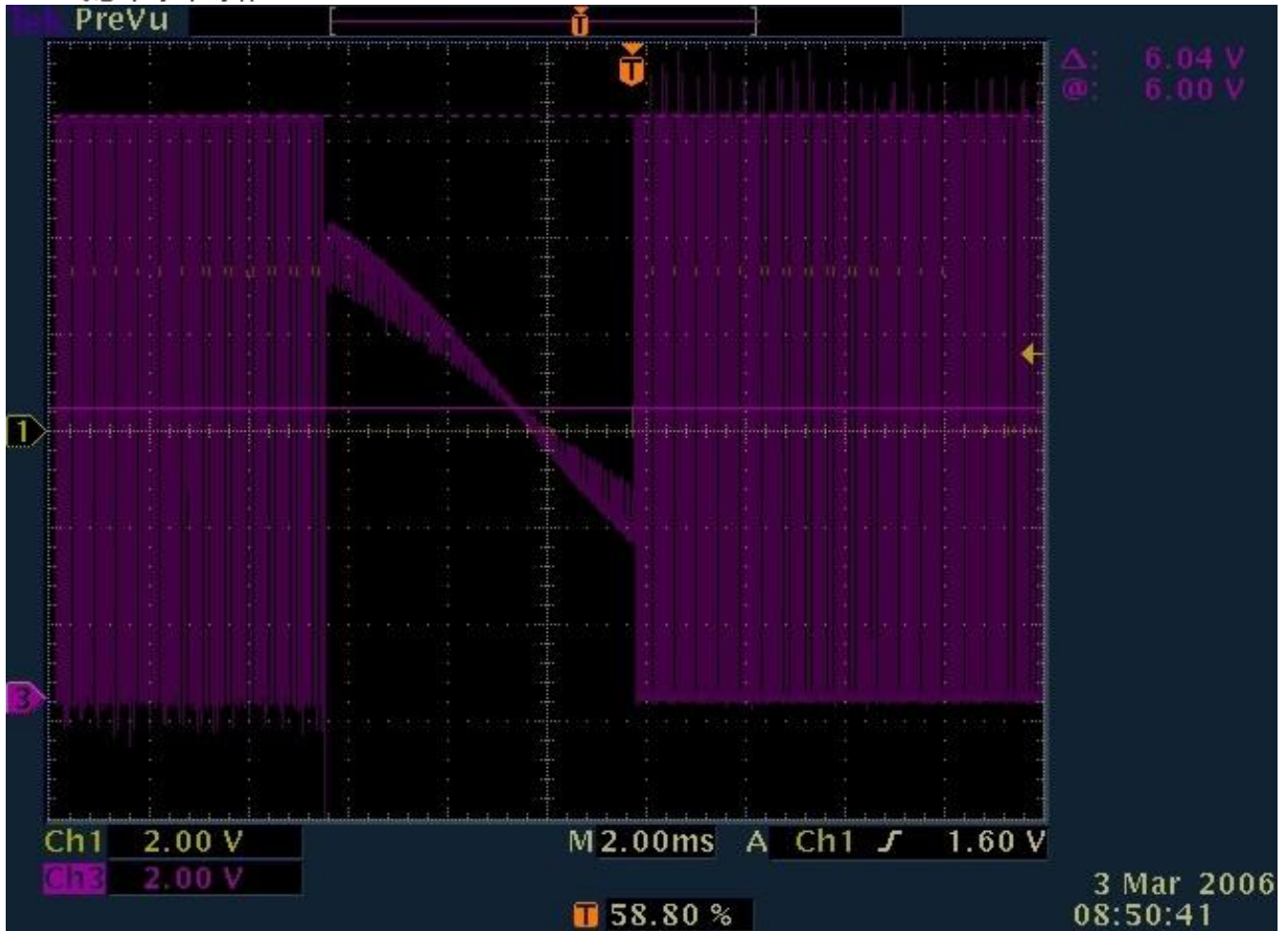


图 3: 电机端子电压波形

转子位置信号源自未通电的电机绕组中反向电动势电压的过零点。连接到电机端子的电阻网络将获取反向电动势电压并将其输入到片上比较器。只有一个比较器用来检测过零信号。内部的模拟多路转换开关只将未通电的绕组通过信号衰减电阻网络连接到比较器的输入端，顺序由换相表决定。内部的 12 位 DAC 作为比较器的参考电压。对检测到的相邻过零信号进行计算，从而得到电机的实际转速和相对应的换相信息，实际转速信号作为速度控制器的速度反馈用于速度控制器的计算中。另外三相桥式变换器采用单极 PWM 开关模式将极大地降低开关损失和电流波动，从而有助于进一步降低噪音。

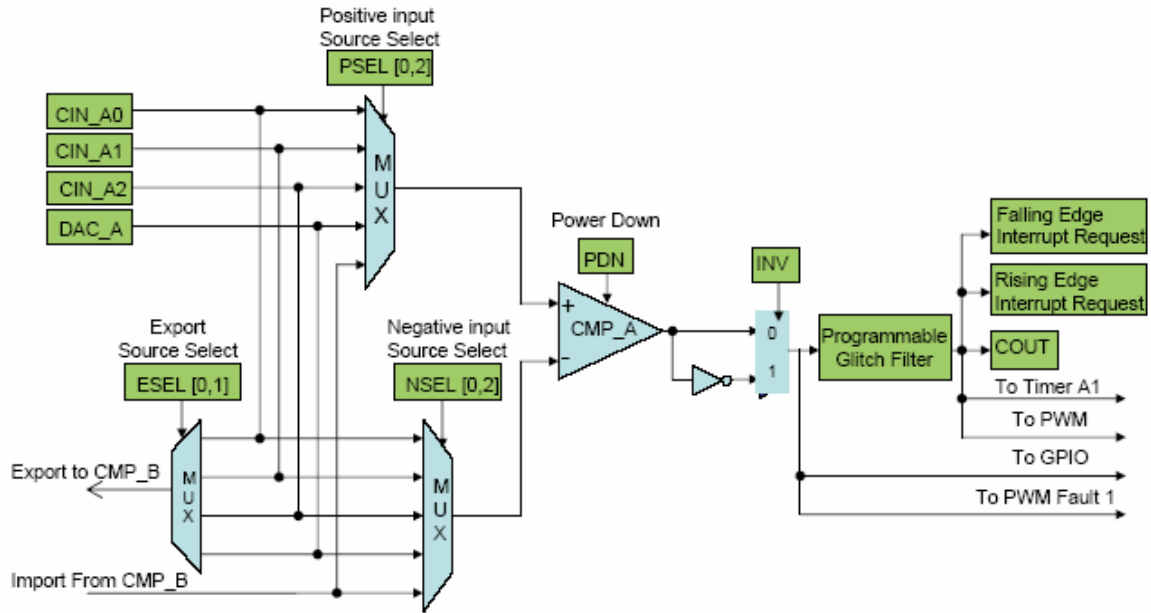


图 4：片上比较器

输入功率因数校正电路 (PFC)

输入功率因数校正电路 (PFC) 也由 DSC 进行控制。PFC 电路的用途是：1) 强制输入电流波形接近正弦波形，并且相对于输入电压波形具有零相位移；2) 稳定直流母线电压。对于普通的模拟控制的 PFC，因为输入电压波形是 PFC 电流反馈环路的参考值，所以模拟 PFC 控制器只能强制输入电流符合输入电压的波形。输入电压波形上的任何毛刺或谐波都将在输入电流上反映为相同的毛刺或谐波形状。而数字 PFC 则通过使用一张表格来生成数字正弦波，很好地解决了这一问题。DSC 通过另一个片上比较器和另一个内置 DAC 作为参考电压来检测输入电压过零点。然后，通过锁相环的计算并运用查表法产生数字正弦波作为电流参考值输入到 PFC 电流控制器中，电流控制器的输出将用来控 PWM 占空比。PFC 的开关管通过使用计时器 PWM 输出功能来控制，PFC 的开关频率通常在 40 KHz - 75 KHz 之间。

飞思卡尔的 56F8000 16 位定点 DSC 系列是一款经济高效的控制器的典范，它内置片上 DAC、模拟比较器和弛张振荡器可减少外部器件的使用。它具有高性能的外围设备和 32MIPS 内核，该内核支持在每个指令周期中可以从片上数据 RAM 访问两个数据操作数。看门狗和 CPU 时钟可采用不同的时钟源，从而为电机控制应用又增加了另一层安全性。

56F8000 Series Feature Summary

| | 56F80 | 56F80 | 56F80 | 56F80 | 56F80 | 56F80 | 56F80 |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| Performan | 32MHz/MI | 32MHz/MI | 32MHz/MI | 32MHz/MI | 32MHz/MI | 32MHz/MI | 32MHz/MI |
| Temperature | -40C to | -40C to | -40C to | -40C to | -40C to | -40C to | -40C to |
| Voltage | 3.0V - | 3.0V - | 3.0V - | 3.0V - | 3.0V - | 3.0V - | 3.0V - |
| Voltage | On- | On- | On- | On- | On- | On- | On- |
| Program/Data | 12K | 16K | 16K | 32K | 32K | 64K | 64K |
| Program/Data | 2K | 4K | 4K | 4K | 4K | 8K | 8K |
| Program | Ye | Ye | Ye | Ye | Ye | Ye | Ye |
| On Chip Relaxation | Ye | Ye | Ye | Ye | Ye | Ye | Ye |
| PL | Ye | Ye | Ye | Ye | Ye | Ye | Ye |
| CO | Ye | Ye | Ye | Ye | Ye | Ye | Ye |
| PW | 1 x | 1 x | 1 x | 1 x | 1 x | 1 x | 1 x |
| PWM Fault | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 12-bit | 2 x | 2 x | 2 x | 2 x | 2 x | 2 x | 2 x |
| 12-bit | N | N | N | 2 | 2 | 2 | 2 (Pinned) |
| Analog | N | N | N | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 16-bit | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 8 |
| Prog. Interval | N | N | N | 1 | 3 | 3 | 3 |
| GPIO | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 5 |
| II | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| SCI (UART) / LIN | 1 - | 1 - | 1 - | 1 - | 1 - | 1 - | 2 - |
| SPI | 1 - | 1 - | 1 - | 1 - | 1 - | 1 - | 2 - |
| CA | | | | | | MSCA | MSCA |
| JTAG/EOn | JTAG/EOn | JTAG/EOn | JTAG/EOn | JTAG/EOn | JTAG/EOn | JTAG/EOn | JTAG/EOn |
| Package (V) - | 32LQFP | 32LQFP | 32LQFP | 32LQFP | 44LQFP | 48LQFP | 64LQFP |