



## 产品简介

YFC9653 是一款 4 通道 16位 125MSPS 采样率的模数转换器 (Analog-to-Digital Converter, ADC)，专门针对低功耗、小尺寸和使用灵活性进行开发设计。该产品最高转换速率可以达到 125MSPS，具有优异的动态性能和超低功耗特性，适用于多种应用场景。

本产品采用 1.8V 单电源供电和 LVPECL/CMOS/LVDS 兼容型采样时钟信号，无需外部基准电压源和驱动器即可满足多种应用需求。

本产品采用高可靠 48 引脚封装 (QFN48)，用于特种或国产化要求的应用场景，额定工作温度范围为-55~125℃。兼容型号：AD9653。

## 应用场合

- 特种成像设备
- 特种高速成像
- 抗干扰接收机
- 特种测试设备

## 技术特点

- 信噪比 (SNR)：77dBFS  
(9.7MHz,  $V_{REF}=1.3V$ )
- 信噪比 (SNR)：75dBFS  
(9.7MHz,  $V_{REF}=1.0V$ )
- 无杂散动态范围 (SFDR)：85dBc  
(至奈奎斯特频率,  $V_{REF}=1.3V$ )
- 无杂散动态范围 (SFDR)：91dBc  
(至奈奎斯特频率,  $V_{REF}=1.0V$ )
- 串行 LVDS 输出
- 模拟输入范围 (可调)：  
2.0Vp-p / 2.6Vp-p
- 1.8V 电源供电
- 低功耗：125MHz 模式每通道功耗  $\leq 165mW$
- 微分非线性 (DNL)： $\pm 0.6LSB$
- 积分非线性 (INL)： $\pm 5.0LSB$
- 650MHz 全功率模拟输入带宽
- 串行端口控制：  
全芯片、独立通道省电模式  
(Power Down)  
内建、用户自定义测试模式  
多芯片同步和时钟分频功能  
待机模式



## 功能框图

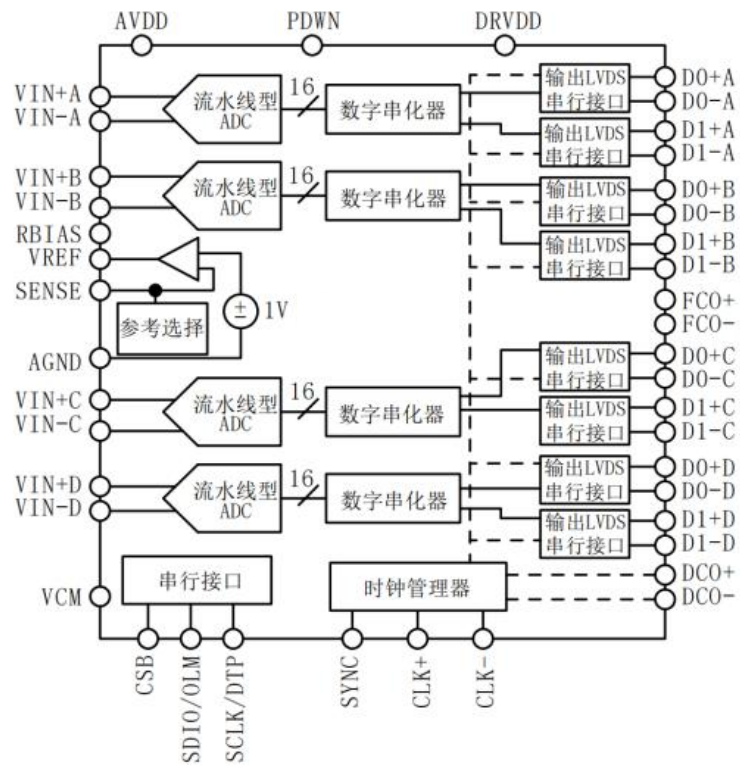


图1 YFC9653功能框图



## 引脚定义

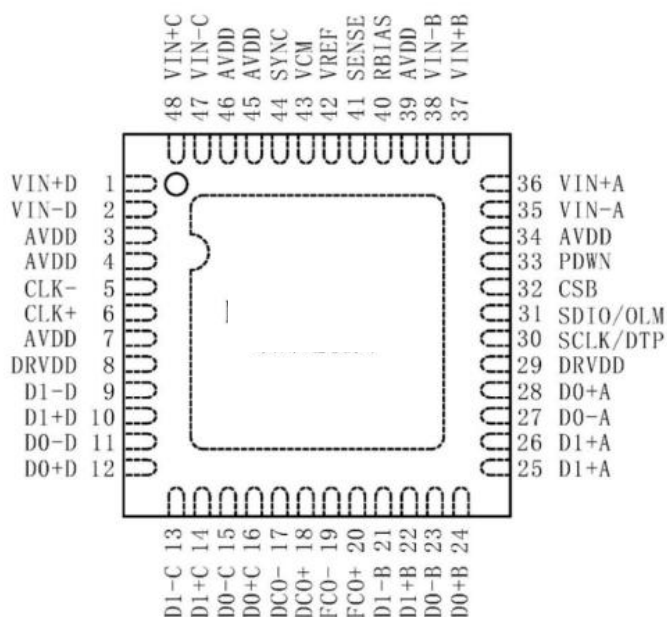


图2 YFC9653引脚示意图

表1 引脚定义

| 引出端号 | 符号               | 名称             | 引出端号 | 符号       | 名称                                    |
|------|------------------|----------------|------|----------|---------------------------------------|
| 0    | GND <sub>A</sub> | 模拟地            |      |          |                                       |
| 1    | VIN+D            | ADC D通道模拟输入(+) | 25   | D1-A     | A通道输出1(-)                             |
| 2    | VIN-D            | ADC D通道模拟输入(-) | 26   | D1+A     | A通道输出1(+)                             |
| 3    | AVDD             | 1.8V模拟电源引脚     | 27   | D0-A     | A通道输出0(-)                             |
| 4    | AVDD             | 1.8V模拟电源引脚     | 28   | D0+A     | A通道输出0(+)                             |
| 5    | CLK-             | 差分时钟(-)        | 29   | DRVDD    | 数字输出驱动电源引脚                            |
| 6    | CLK+             | 差分时钟(+)        | 30   | SCLK/DTP | SPI时钟输入                               |
| 7    | AVDD             | 1.8V模拟电源引脚     | 31   | SDIO/OLM | SPI数据输入和输出                            |
| 8    | DRVDD            | 数字输出驱动电源引脚     | 32   | CSB      | SPI片选信号, 低电平有效使能, 内置30k $\Omega$ 上拉电阻 |
| 9    | D1-D             | D通道输出1(-)      | 33   | PDWN     | 数字输入(高电平=关断; 低电平=工作)                  |
| 10   | D1+D             | D通道输出1(+)      | 34   | AVDD     | 1.8V模拟电源引脚                            |
| 11   | D0-D             | D通道输出0(-)      | 35   | VIN-A    | ADC A通道模拟输入(-)                        |
| 12   | D0+D             | D通道输出0(+)      | 36   | VIN+A    | ADC A通道模拟输入(+)                        |
| 13   | D1-C             | C通道输出1(-)      | 37   | VIN+B    | ADC B通道模拟输入(+)                        |
| 14   | D1+C             | C通道输出1(+)      | 38   | VIN-B    | ADC B通道模拟输入(-)                        |
| 15   | D0-C             | C通道输出0(-)      | 39   | AVDD     | 1.8V模拟电源引脚                            |
| 16   | D0+C             | C通道输出0(+)      | 40   | RBIAS    | 模拟电路偏置                                |
| 17   | DCO-             | 数据时钟输出(-)      | 41   | SENSE    | 基准电压模式选择                              |
| 18   | DCO+             | 数据时钟输出(+)      | 42   | VREF     | 基准电压输入和输出引脚                           |
| 19   | FCO-             | 帧时钟输出(-)       | 43   | VCM      | 模拟输入共模电压                              |



|    |      |           |    |       |                 |
|----|------|-----------|----|-------|-----------------|
| 20 | FCO+ | 帧时钟输出(+)  | 44 | SYNC  | 数字输入，时钟分频器的同步输入 |
| 21 | D1-B | B通道输出1(-) | 45 | AVDD  | 1.8V模拟电源引脚      |
| 22 | D1+B | B通道输出1(+) | 46 | AVDD  | 1.8V模拟电源引脚      |
| 23 | D0-B | B通道输出0(-) | 47 | VIN-C | ADC C通道模拟输入(-)  |
| 24 | D0+B | B通道输出0(+) | 48 | VIN+C | ADC C通道模拟输入(+)  |



## 推荐工作条件

- 工作频率 ( $f_{CLK}$ ) :  $\leq 125\text{MHz}$
- 模拟电源电压 (AVDD) :  $1.75\text{V} \sim 1.9\text{V}$
- 数字电源电压 (DVDD) :  $1.75\text{V} \sim 1.9\text{V}$
- 模拟输入共模电压 ( $V_{CM}$ ) :  $0.7\text{V} \sim 1.1\text{V}$
- 工作环境温度 ( $T_A$ ) :  $-55^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$
- 输入信号幅度范围 (峰峰值) :  $V_{IN(P-P)} \leq 2\text{V} \sim 2.6\text{V}$

## 绝对最大额定值

表2 绝对最大额定值

| 参数                                              | 额定值                                         |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 电气                                              |                                             |
| AVDD至AGND                                       | $-0.3\text{V} \sim +2.0\text{V}$            |
| DRVDD至AGND                                      | $-0.3\text{V} \sim +2.0\text{V}$            |
| 数字输出 (D0±x, D1±x, DCO+, DCO-, FCO+, FCO-) 至AGND | $-0.3\text{V} \sim +2.0\text{V}$            |
| CLK_P、CLK_N至AGND                                | $-0.3\text{V} \sim +2.0\text{V}$            |
| VINx+, VINx-至AGND                               | $-0.3\text{V} \sim +2.0\text{V}$            |
| SCLK/DTP、SDIO/OLM、CSB至AGND                      | $-0.3\text{V} \sim +2.0\text{V}$            |
| SYNC、PDWN至AGND                                  | $-0.3\text{V} \sim +2.0\text{V}$            |
| RBIAS、VCM至AGND                                  | $-0.3\text{V} \sim +2.0\text{V}$            |
| VREF、SENSE至AGND                                 | $-0.3\text{V} \sim +2.0\text{V}$            |
| 环境                                              |                                             |
| 工作温度范围 (环境温度, $V_{REF} = 1.0\text{V}$ )         | $-55^\circ\text{C} \sim +125^\circ\text{C}$ |
| 工作温度范围 (环境温度, $V_{REF} = 1.3\text{V}$ )         | $-55^\circ\text{C} \sim +125^\circ\text{C}$ |
| 最高结温                                            | $150^\circ\text{C}$                         |
| 引脚温度 (焊接, 10秒)                                  | $280^\circ\text{C}$                         |
| 存储温度范围 (环境温度)                                   | $-65^\circ\text{C} \sim +150^\circ\text{C}$ |

注意：超出表2所述绝对最大额定值可能会导致器件永久性损坏，长期在绝对最大额定值条件下工作会影响器件可靠性。



---

## ESD敏感器件

本产品为ESD敏感器件，实验室条件下人体模型可以满足2000V ESD防护要求。由于带电器件、电路板可能会在没有察觉情况下放电，尽管本产品具有专利或专有保护电路，但在遇到高能量ESD时可能会引发器件损坏。因此，应当采取适当的ESD防范措施避免器件性能下降或功能丧失。



## 性能指标

### 直流规格

除非另外说明， $AVDD = 1.8V$ ， $DRVDD = 1.8V$ ， $2.0V_{p-p}$ 满量程差分输入，幅度 $-1.0dBFS$ ， $V_{REF} = 1.0V$ ，DCS关闭。

表3 直流性能规格

| 参数                              | 温度   | 最小值   | 典型值  | 最大值  | 单位               |
|---------------------------------|------|-------|------|------|------------------|
| 分辨率                             | 25°C |       | 16   |      | Bits             |
| 精度                              |      |       |      |      |                  |
| 无失码                             | 全温   |       | 设计保证 |      |                  |
| 失调误差                            | 全温   |       | -0.3 |      | %FSR             |
| 失调匹配                            | 全温   |       | +0.2 |      | %FSR             |
| 增益误差                            | 全温   |       | -5   |      | %FSR             |
| 增益匹配                            | 全温   |       | 1.1  |      | %FSR             |
| 微分非线性 (DNL)                     | 全温   | -0.99 |      | +1.5 | LSB              |
|                                 | 25°C |       | ±0.7 |      | LSB              |
| 积分非线性 (INL)                     | 25°C |       | ±5.0 |      | LSB              |
|                                 | 全温   | -15   |      | 15   | LSB              |
| 温度漂移                            |      |       |      |      |                  |
| 失调误差                            | 全温   |       | 3.5  |      | ppm/°C           |
| 内部基准电压                          |      |       |      |      |                  |
| 输出电压 (1.0V模式)                   | 全温   | 0.95  | 1.0  | 1.05 | V                |
| 负载调整1.0mA ( $V_{REF} = 1.0V$ )  | 全温   |       | 2    |      | mV               |
| 输入电阻                            | 25°C |       | 7.5  |      | kΩ               |
| 输入等效噪声                          |      |       |      |      |                  |
| $V_{REF} = 1.0V$                | 25°C |       | 2.7  |      | LSB rms          |
| 模拟输入                            |      |       |      |      |                  |
| 差分输入电压 ( $V_{REF} = 1.0V$ )     | 全温   |       | 2    |      | V <sub>p-p</sub> |
| 共模电压                            | 全温   |       | 0.9  |      | V                |
| 共模范围                            | 25°C | 0.7   |      | 1.1  | V                |
| 差分输入电压                          | 25°C |       | 2.6  |      | kΩ               |
| 差分输入电容                          | 25°C |       | 7    |      | pF               |
| 电源                              |      |       |      |      |                  |
| AVDD                            | 全温   |       | 1.8  |      | V                |
| DRVDD                           | 全温   |       | 1.8  |      | V                |
| I <sub>AVDD</sub>               | 全温   |       | 303  |      | mA               |
| I <sub>DRVDD</sub> (ANSI-644模式) | 全温   |       | 61   |      | mA               |
| I <sub>DRVDD</sub> (缩小范围模式)     | 25°C |       | 46   |      | mA               |
| 总功耗                             |      |       |      |      |                  |
| 直流输入                            | 全温   |       | 600  |      | mW               |
| 正弦输入 (四通道，包括输出驱动器，ANSI-644模式)   | 全温   |       | 660  |      | mW               |



|                          |      |  |     |  |    |
|--------------------------|------|--|-----|--|----|
| 正弦输入（四通道，包括输出驱动器，缩小范围模式） | 25°C |  | 630 |  | mW |
| 省电模式                     | 25°C |  | 8   |  | mW |
| 待机模式                     | 全温   |  | 360 |  | mW |

## 交流规格

除非另外说明，AVDD = 1.8V，DRVDD = 1.8V，2.0V<sub>p-p</sub>满量程差分输入，幅度-1.0dBFS，V<sub>REF</sub> = 1.0V，DCS关闭。

表4 交流性能规格

| 参数                       | 温度   | 最小值  | 典型值  | 最大值 | 单位   |
|--------------------------|------|------|------|-----|------|
| 信噪比（SNR）                 |      |      |      |     |      |
| f <sub>IN</sub> = 9.7MHz | 25°C |      | 76   |     | dBFS |
| f <sub>IN</sub> = 15MHz  | 25°C |      | 75   |     | dBFS |
| f <sub>IN</sub> = 70MHz  | 全温   | 70   | 73   |     | dBFS |
| f <sub>IN</sub> = 128MHz | 25°C |      | 70   |     | dBFS |
| f <sub>IN</sub> = 200MHz | 25°C |      | 68   |     | dBFS |
| 信噪失真比（SINAD）             |      |      |      |     |      |
| f <sub>IN</sub> = 9.7MHz | 25°C |      | 75   |     | dBFS |
| f <sub>IN</sub> = 15MHz  | 25°C |      | 74   |     | dBFS |
| f <sub>IN</sub> = 70MHz  | 全温   | 69   | 72   |     | dBFS |
| f <sub>IN</sub> = 128MHz | 25°C |      | 69   |     | dBFS |
| f <sub>IN</sub> = 200MHz | 25°C |      | 67   |     | dBFS |
| 有效位数（ENOB）               |      |      |      |     |      |
| f <sub>IN</sub> = 9.7MHz | 25°C |      | 12.3 |     | Bits |
| f <sub>IN</sub> = 15MHz  | 25°C |      | 12.1 |     | Bits |
| f <sub>IN</sub> = 70MHz  | 全温   | 11.3 | 11.8 |     | Bits |
| f <sub>IN</sub> = 128MHz | 25°C |      | 11.3 |     | Bits |
| f <sub>IN</sub> = 200MHz | 25°C |      | 11.0 |     | Bits |
| 无杂散动态范围（SFDR）            |      |      |      |     |      |
| f <sub>IN</sub> = 9.7MHz | 25°C |      | 90   |     | dBc  |
| f <sub>IN</sub> = 15MHz  | 25°C |      | 84   |     | dBc  |
| f <sub>IN</sub> = 70MHz  | 全温   | 80   | 83   |     | dBc  |
| f <sub>IN</sub> = 128MHz | 25°C |      | 81   |     | dBc  |
| f <sub>IN</sub> = 200MHz | 25°C |      | 78   |     | dBc  |
| 最差谐波（二阶或三阶）              |      |      |      |     |      |
| f <sub>IN</sub> = 9.7MHz | 25°C |      | -90  |     | dBc  |
| f <sub>IN</sub> = 15MHz  | 25°C |      | -84  |     | dBc  |
| f <sub>IN</sub> = 70MHz  | 全温   | -80  | -83  |     | dBc  |
| f <sub>IN</sub> = 128MHz | 25°C |      | -81  |     | dBc  |
| f <sub>IN</sub> = 200MHz | 25°C |      | -78  |     | dBc  |
| 最差其他谐波（二阶三阶除外）           |      |      |      |     |      |
| f <sub>IN</sub> = 9.7MHz | 25°C |      | -88  |     | dBc  |
| f <sub>IN</sub> = 15MHz  | 25°C |      | -86  |     | dBc  |
| f <sub>IN</sub> = 70MHz  | 全温   |      | -84  | -81 | dBc  |
| f <sub>IN</sub> = 128MHz | 25°C |      | -82  |     | dBc  |



|                          |      |  |     |  |     |
|--------------------------|------|--|-----|--|-----|
| $f_{IN} = 200\text{MHz}$ | 25°C |  | -80 |  | dBc |
| 串扰                       | 25°C |  | -80 |  | dB  |
| 串扰（超量程情况）                | 25°C |  | -77 |  | dB  |
| 全功率模拟输入带宽                | 25°C |  | 650 |  | MHz |

## 数字规格

除非另外说明，AVDD = 1.8V，DRVDD = 1.8V

表5 数字规格

| 参数                             | 温度   | 最小值      | 典型值                      | 最大值          | 单位               |
|--------------------------------|------|----------|--------------------------|--------------|------------------|
| 时钟输入（CLK+、CLK-）                |      |          |                          |              |                  |
| 逻辑兼容                           |      |          | CMOS/<br>LVDS/<br>LVPECL |              |                  |
| 差分输入电压范围                       | 全温   | 0.2      |                          | 3.6          | V <sub>p-p</sub> |
| 输入电压范围                         | 全温   | AGND-0.2 |                          | AVDD+<br>0.2 | V                |
| 输入共模电压                         | 全温   |          | 0.9                      |              | V                |
| 输入电阻（差分）                       | 25°C |          | 15                       |              | kΩ               |
| 输入电容                           | 25°C |          | 4                        |              | pF               |
| 逻辑输入（PDWN、SYNC、SCLK）           |      |          |                          |              |                  |
| 逻辑1电压范围                        | 全温   | 1.2      |                          | AVDD+<br>0.2 | V                |
| 逻辑0电压范围                        | 全温   | 0        |                          | 0.75         | V                |
| 输入电阻                           | 25°C |          | 30                       |              | kΩ               |
| 输入电容                           | 25°C |          | 2                        |              | pF               |
| 逻辑输入（CSB）                      |      |          |                          |              |                  |
| 逻辑1电压范围                        | 全温   | 1.2      |                          | AVDD+<br>0.2 | V                |
| 逻辑0电压范围                        | 全温   | 0        |                          | 0.75         | V                |
| 输入电阻                           | 25°C |          | 26                       |              | kΩ               |
| 输入电容                           | 25°C |          | 2                        |              | pF               |
| 逻辑输入（SDIO）                     |      |          |                          |              |                  |
| 逻辑1电压范围                        | 全温   | 1.2      |                          | AVDD+<br>0.2 | V                |
| 逻辑0电压范围                        | 全温   | 0        |                          | 0.75         | V                |
| 输入电阻                           | 25°C |          | 26                       |              | kΩ               |
| 输入电容                           | 25°C |          | 5                        |              | pF               |
| 逻辑输出（SDIO）                     |      |          |                          |              |                  |
| 逻辑1电压（I <sub>OH</sub> = 800μA） | 全温   |          | 1.79                     |              | mV               |
| 逻辑0电压（I <sub>OL</sub> = 50 μA） | 全温   |          |                          | 0.05         | V                |
| 数字输出（D0±x、D1±x），ANSI-644       |      |          |                          |              |                  |
| 逻辑兼容                           |      |          | LVDS                     |              |                  |
| 差分输出电压（V <sub>OD</sub> ）       | 全温   | 290      | 345                      | 400          | mV               |
| 输出失调电压（V <sub>OS</sub> ）       | 全温   | 1.15     | 1.25                     | 1.35         | V                |
| 输出码值（默认值）                      |      |          | 二进制<br>补码                |              |                  |



| 数字输出（D0±x、D1±x），低功耗，减少信号选项 |    |      |       |      |    |
|----------------------------|----|------|-------|------|----|
| 逻辑兼容                       |    |      | LVDS  |      |    |
| 差分输出电压（V <sub>OD</sub> ）   | 全温 | 160  | 200   | 230  | mV |
| 输出失调电压（V <sub>OS</sub> ）   | 全温 | 1.15 | 1.25  | 1.35 | V  |
| 输出码值（默认值）                  |    |      | 二进制补码 |      |    |

## 开关规格

除非另外说明，AVDD = 1.8V，DRVDD = 1.8V

表6 开关规格

| 参数                                                   | 温度   | 最小值                             | 典型值                                          | 最大值                             | 单位     |
|------------------------------------------------------|------|---------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------|--------|
| 时钟参数                                                 |      |                                 |                                              |                                 |        |
| 输入时钟速率                                               | 全温   | 20                              |                                              | 1000                            | MHz    |
| 转换速率                                                 | 全温   | 40                              |                                              | 125                             | MSPS   |
| 时钟高电平脉冲宽度（t <sub>EH</sub> ）                          | 全温   |                                 | 4                                            |                                 | ns     |
| 时钟低电平脉冲宽度（t <sub>EL</sub> ）                          | 全温   |                                 | 4                                            |                                 | ns     |
| 数据输出参数                                               |      |                                 |                                              |                                 |        |
| 传输延迟（t <sub>PD</sub> ）                               |      | 1.5                             | 2.3                                          | 3.1                             | ns     |
| 输出上升时间（t <sub>R</sub> ）（20%~80%）                     | 全温   |                                 | 300                                          |                                 | ps     |
| 输出下降时间（t <sub>F</sub> ）（20%~80%）                     | 全温   |                                 | 300                                          |                                 | ps     |
| FCO传输延迟（t <sub>FCO</sub> ）                           | 全温   | 1.5                             | 2.3                                          | 3.1                             | ns     |
| DCO传输延迟（t <sub>CPD</sub> ）                           | 全温   |                                 | t <sub>FCO</sub> + (t <sub>SAMPLE/16</sub> ) |                                 | ns     |
| DCO与数据之间延迟（t <sub>DATA</sub> ）                       | 全温   | (t <sub>SAMPLE/16</sub> ) - 300 | (t <sub>SAMPLE/16</sub> )                    | (t <sub>SAMPLE/16</sub> ) + 300 | ps     |
| DCO与FCO之间延迟（t <sub>FRAME</sub> ）                     | 全温   | (t <sub>SAMPLE/16</sub> ) - 300 | (t <sub>SAMPLE/16</sub> )                    | (t <sub>SAMPLE/16</sub> ) + 300 | ps     |
| 通道延迟（t <sub>LD</sub> ）                               | 全温   |                                 | 90                                           |                                 | ps     |
| 数据偏移（t <sub>DATA-MAX</sub> - t <sub>DATA-MIN</sub> ） |      |                                 | ±50                                          | ±200                            | ps     |
| 唤醒时间（待机模式）                                           | 全温   |                                 | 250                                          |                                 | ns     |
| 唤醒时间（低功耗模式）                                          | 25°C |                                 | 375                                          |                                 | μs     |
| 流水线延迟                                                | 25°C |                                 | 16                                           |                                 | 时钟周期   |
| 孔径参数                                                 |      |                                 |                                              |                                 |        |
| 孔径延迟（t <sub>A</sub> ）                                | 25°C |                                 | 1                                            |                                 | ns     |
| 孔径不确定性(抖动, t <sub>j</sub> )                          | 25°C |                                 | 135                                          |                                 | fs rms |
| 超范围恢复时间                                              | 25°C |                                 | 1                                            |                                 | 时钟周期   |

注：t<sub>SAMPLE/16</sub>是基于双通道LVDS数据输出的位数。t<sub>SAMPLE</sub> = 1/f<sub>s</sub>。



## 时序规格

表7 时序规格

| 参数              | 说明                               | 限值 | 单位       |
|-----------------|----------------------------------|----|----------|
| SPI时序要求         |                                  |    |          |
| $t_{DS}$        | 数据与SCLK上升沿之间的建立时间                | 2  | ns (最小值) |
| $t_{DH}$        | 数据与SCLK上升沿之间的保持时间                | 2  | ns (最小值) |
| $t_{CLK}$       | SCLK周期                           | 40 | ns (最小值) |
| $t_S$           | CSB与SCLK之间的建立时间                  | 2  | ns (最小值) |
| $t_H$           | CSB与SCLK之间的保持时间                  | 2  | ns (最小值) |
| $t_{HIGH}$      | SCLK高电平脉冲宽度                      | 10 | ns (最小值) |
| $t_{LOW}$       | SCLK低电平脉冲宽度                      | 10 | ns (最小值) |
| $t_{EN\_SDIO}$  | 相对SCLK下降沿，SDIO引脚从输入状态切换到输出状态需要时间 | 10 | ns (最小值) |
| $t_{DIS\_SDIO}$ | 相对SCLK下降沿，SDIO引脚从输出状态切换到输入状态需要时间 | 10 | ns (最小值) |

## 时序图

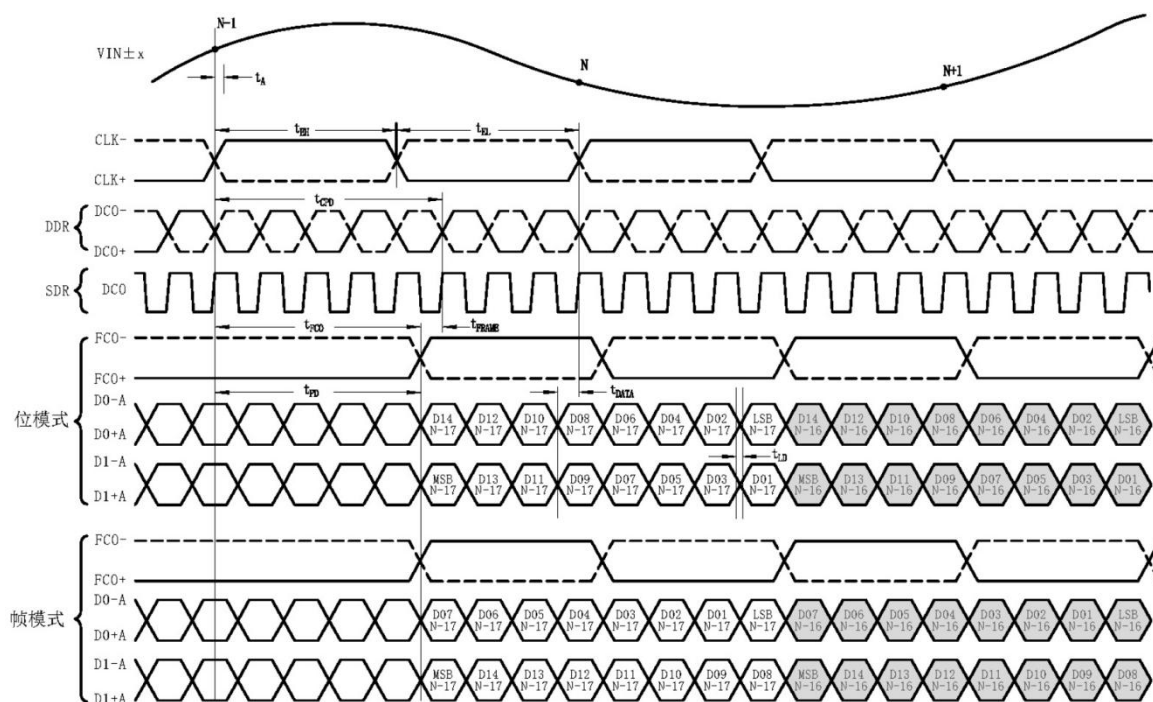


图3 16-Bit DDR/SDR、双通道、1×帧模式（默认）

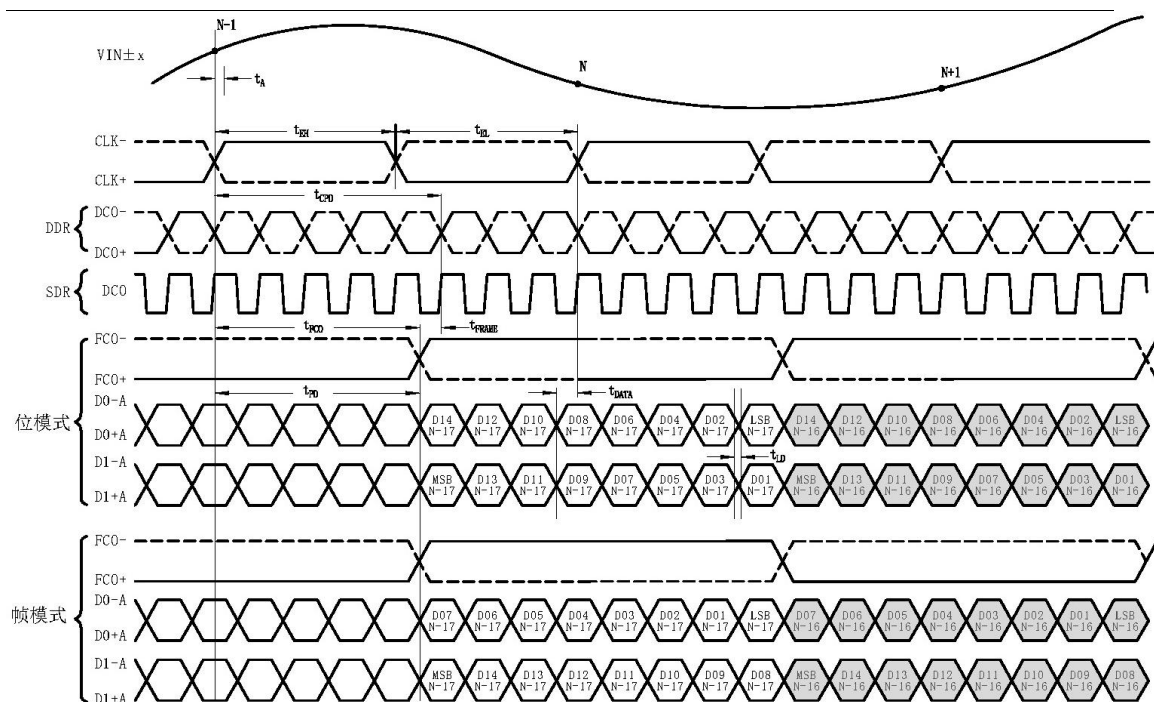


图4 16-Bit DDR、双通道、2×帧模式

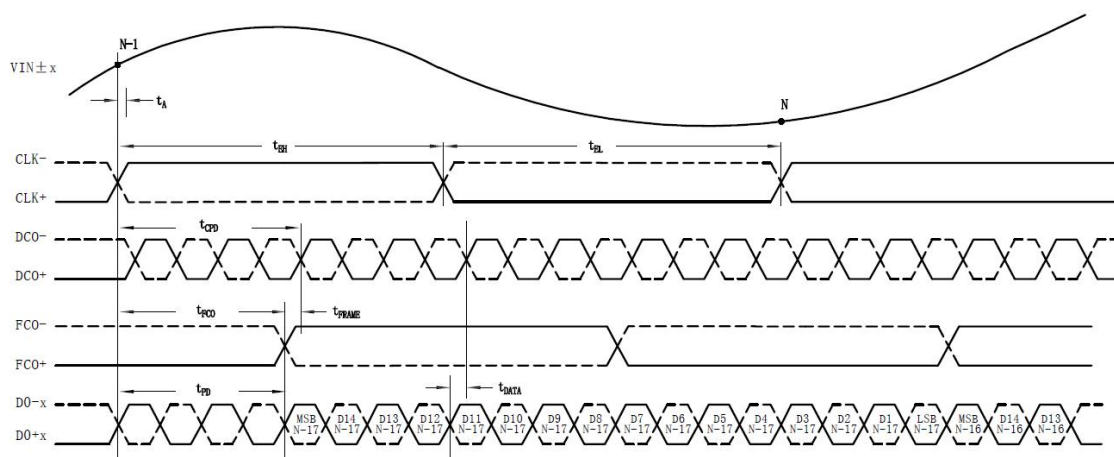


图5 逐字DDR、单通道、1×帧、16-Bit输出模式

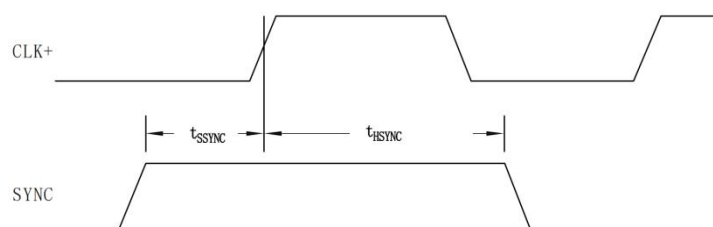


图6 SYNC输入时序要求



## 典型性能参数

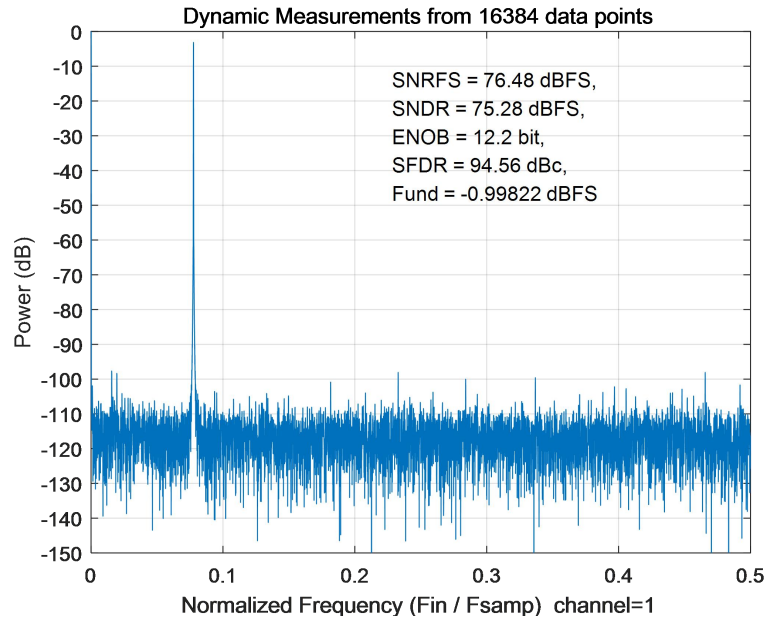


图7  $V_{AVDD} = V_{DRVDD} = 1.8V$ ,  $f_{IN} = 9.7MHz$ ,  $f_{SAMPLE} = 125MSPS$ ,  $T_A = 25^\circ C$   
FFT

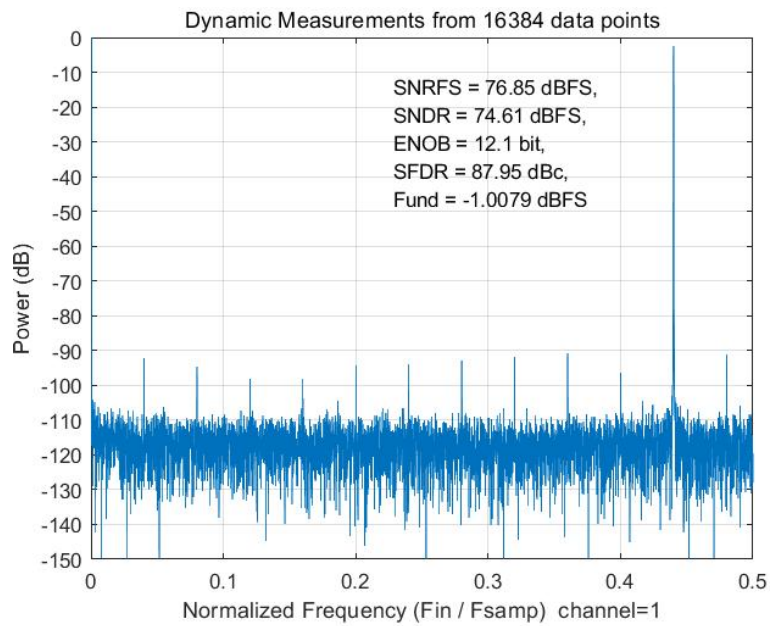


图8  $V_{AVDD} = V_{DRVDD} = 1.8V$ ,  $f_{IN} = 70MHz$ ,  $f_{SAMPLE} = 125MSPS$ ,  $T_A = 25^\circ C$   
FFT

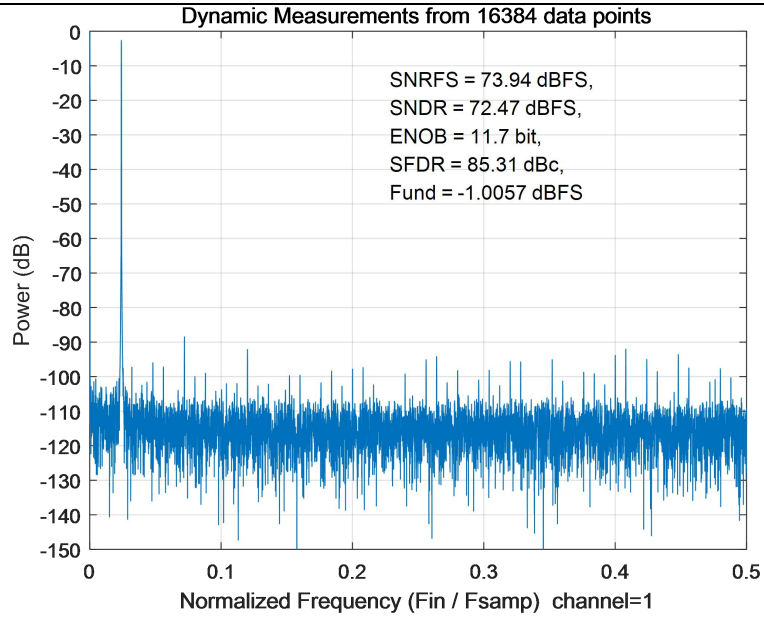


图9  $V_{AVDD} = V_{DRVDD} = 1.8V$ ,  $f_{IN} = 128MHz$ ,  $f_{SAMPLE} = 125MSPS$ ,  $T_A = 25^{\circ}C$   
FFT

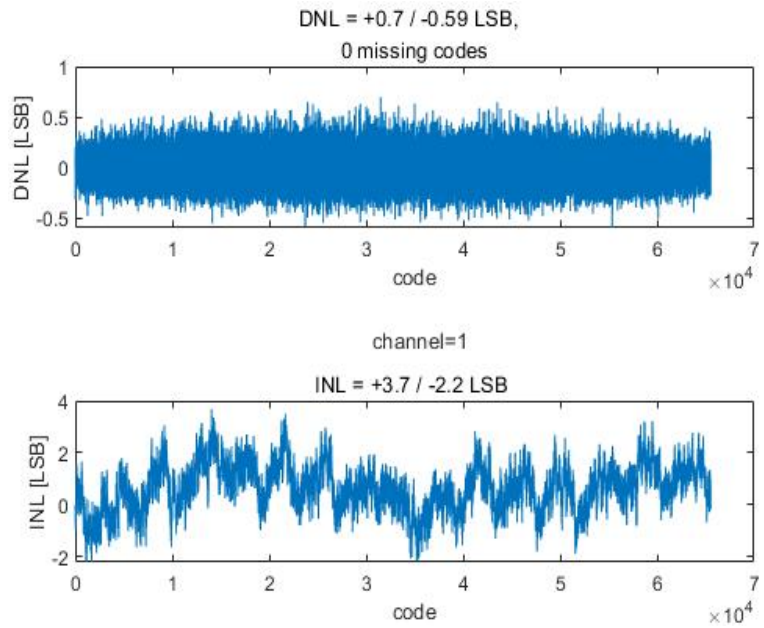


图10  $V_{AVDD} = V_{DRVDD} = 1.8V$ ,  $f_{IN} = 9.7MHz$ ,  $f_{SAMPLE} = 125MSPS$ ,  $T_A = 25^{\circ}C$   
静态指标



## 等效电路

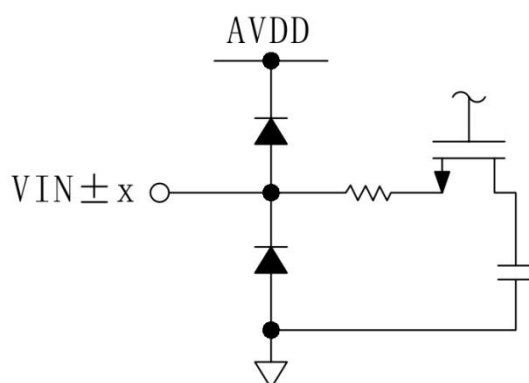


图11 等效模拟输入电路

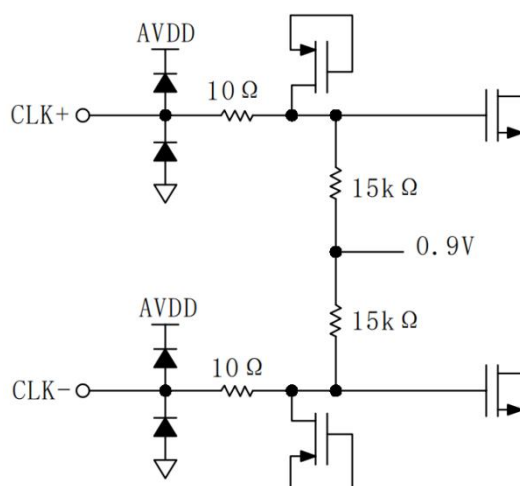


图12 等效时钟输入电路

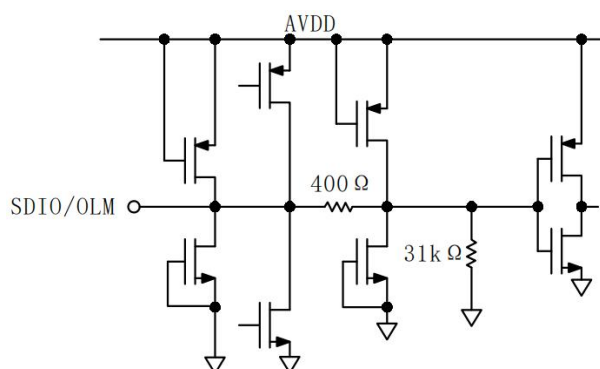


图13 等效SDIO/OLM输入电路

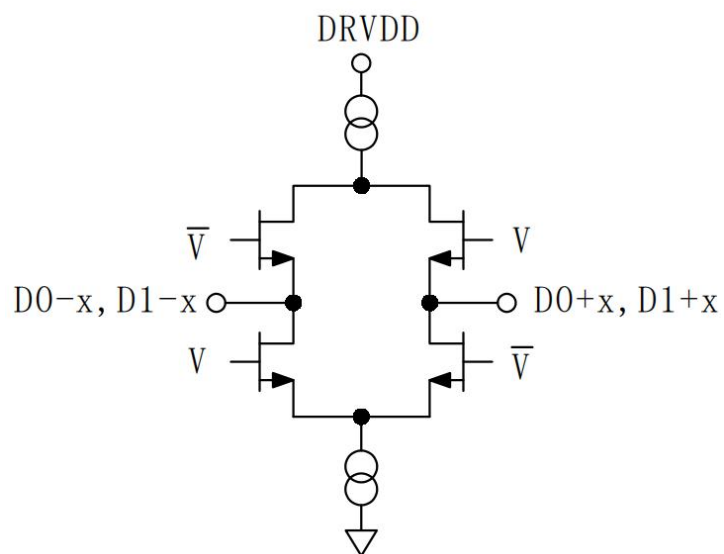


图14 等效数字输出电路

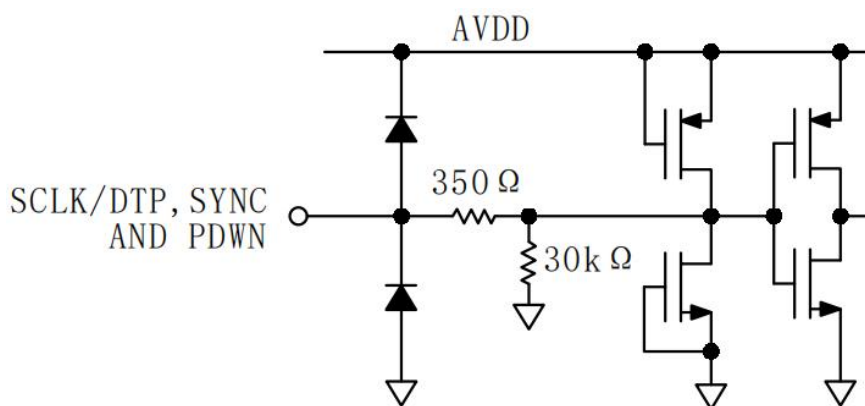


图15 等效数字输出电路

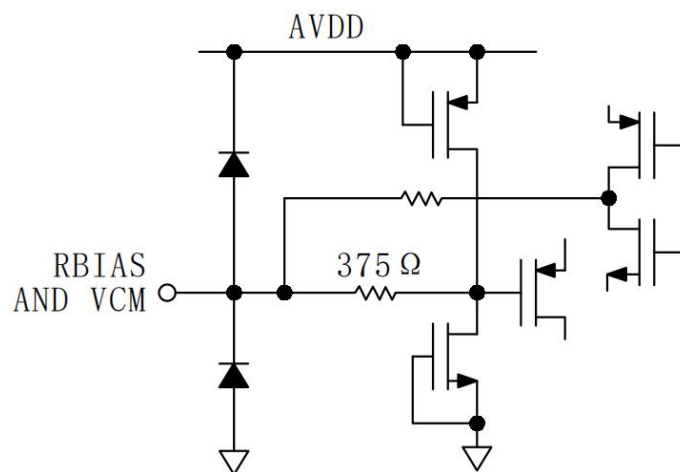


图16 等效RBIAS和VCM电路

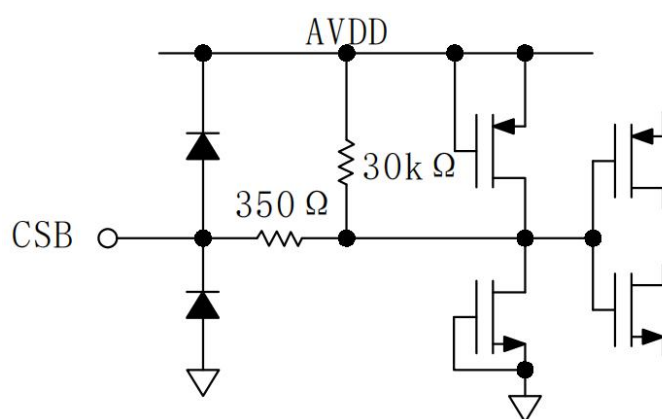


图17 等效CS输入电路

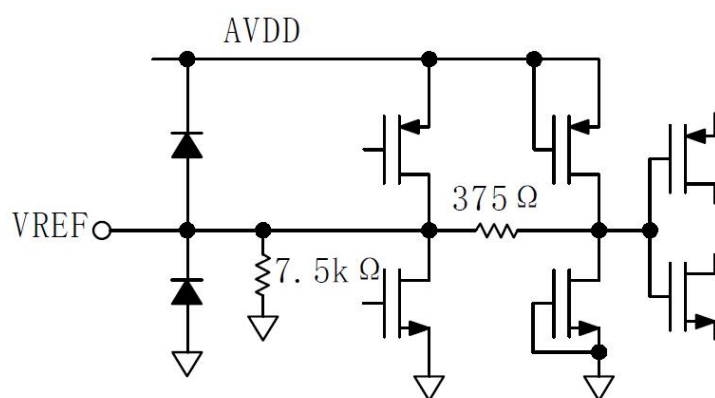


图18 等效VREF电路



## 工作原理

YFC9653是一款采用多级流水线式架构的模数转换器，其中每一级都具备充分的重叠，以确保对上一级的Flash型ADC的误差进行校正。各级量化输出结果组合后，通过数字校正逻辑处理，最终形成一个16位转换结果。该转换数据以16位输出格式由串行器发送。流水线式设计允许第一级在处理新输入样本同时，其他各级继续处理之前样本。采样操作在时钟信号上升沿进行。

流水线中每一级（最后一级除外）都由一个低分辨率Flash型ADC、一个与之相连的开关电容DAC和一个级间余量放大器组成。余量放大器负责放大重构DAC的输出与Flash型ADC的输入差值并提供给流水线下一级。为了便于对Flash型ADC误差进行数字校正，每一级设定了一位冗余量。最后一级仅由一个Flash型ADC组成。输出级模块可以实现数据对准、错误校正，并将数据传输到输出缓冲器，之后对数据进行串行化处理并确保其与帧和数据时钟对齐。

## 模拟输入

YFC9653的模拟输入端采用了差分开关电容电路设计，专门用于处理差分输入信号。这种电路支持较宽的共模范围，同时仍能保持出色的性能。当输入共模电压为中间电源电压时，信号相关误差最小并能实现最佳性能。

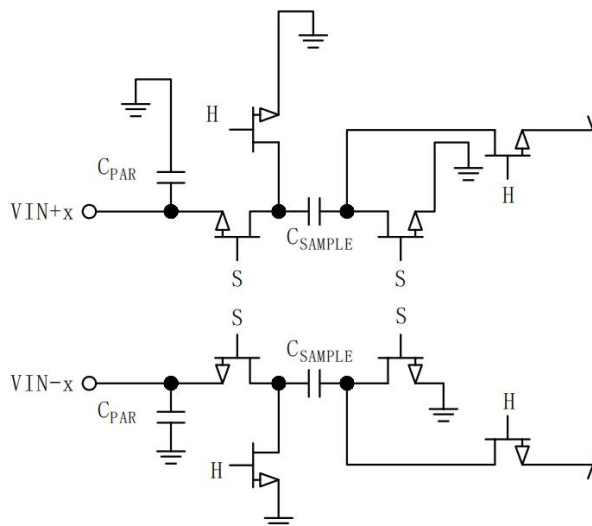


图19 开关电容输入电路



输入电路依据时钟信号在采样与保持模式之间互相切换（参考图19）。在采样模式下，信号源须对采样电容充电并在半个时钟周期内完成建立。每个输入端都串联了一个小电阻，有助于减少从驱动源输出级注入的瞬态峰值电流。除此之外，输入端每一侧可以使用低Q电感或铁氧体磁珠以减小模拟输入端高差分电容，从而实现ADC最大带宽。在高中频（IF）下驱动转换器前端时，必须使用低Q电感或铁氧体磁珠。输入端可以使用一个差分电容或两个单端电容，以提供匹配的无源网络。这样会在输入端形成一个低通滤波器，用于抑制无用的宽带噪声。

## 输入共模电平

YFC9653的模拟输入端无内部直流偏置，用户在交流耦合应用中必须为该产品模拟输入端提供外部直流偏置。为了达到最佳效果，建议用户将输入共模电平设置为 $AVDD/2$ 。该器件在更宽共模电压范围内也能表现出良好的性能。YFC9653通过引脚VCM提供片内基准电压，必须使用一个 $0.1\mu F$ 的电容将VCM引脚旁路到地。在差分配置中，将器件输入设置为最大范围可实现最高SNR性能。

## 差分输入配置

实现对YFC9653的驱动分为有源、无源等多种方式，通过差分方式驱动模拟输入可以获得最佳性能。在基带应用中，利用差分巴伦配置驱动YFC9653能够为ADC提供出色的性能和灵活的接口（参考图20）。在以SNR 为关键参数的应用中，由于绝大部分放大器噪声性能不足实现YFC9653的真实性能，输入配置需采用差分变压器耦合（参考图21）。对于以上应用配置，分流电容值C需要和输入频谱配合使用，在转换高频模拟输入信号时，建议减小该电容容值或者移除该电容。不建议单端输入方式驱动本产品。

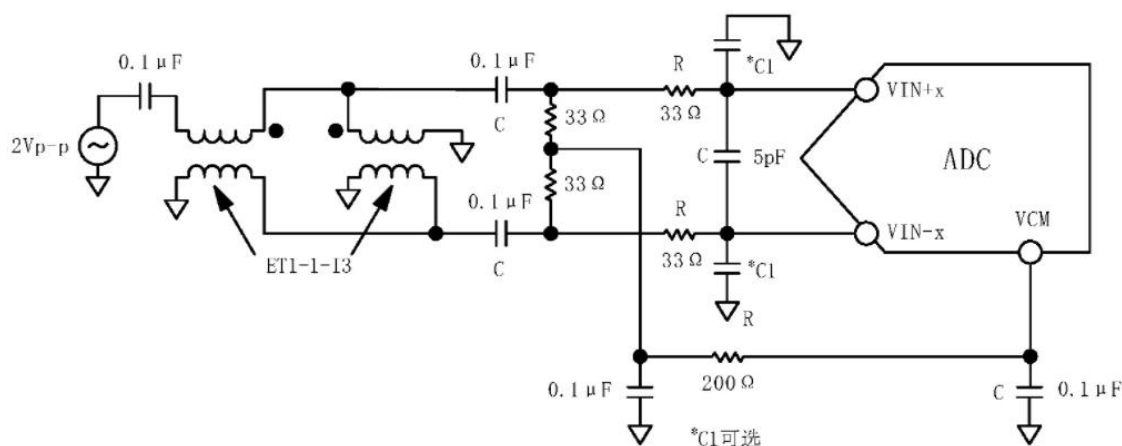


图20 针对基带应用的差分双巴伦输入配置

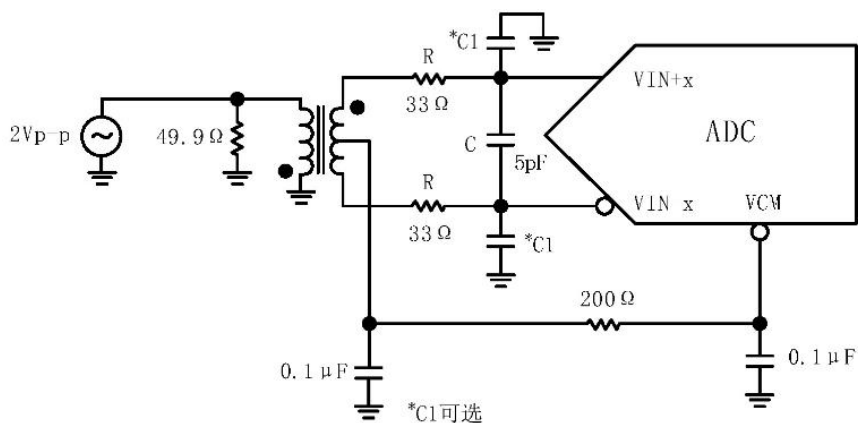


图21 针对基带应用的差分变压器耦合配置

## 基准电压

YFC9653内部具有稳定、精确的基准电压源，可通过以下方式配置产生用户选择的基准电压：利用内部1.0V基准电压、外部施加的1.0V至1.3V基准电压或施加到内部基准电压的外部电阻分压器。基准电压源模式说明可参考下文“内部基准电压连接”和“外部基准电压”等章节。VREF引脚应通过外部一个低等效串联电阻（ESR）1.0μF电容和一个低ESR 0.1μF陶瓷电容的并联旁路至地。

## 内部基准电压连接

YFC9653内置比较器可检测出SENSE引脚电压，从而将基准电压配置成三种可能模式之一（参考表8）。如果SENSE引脚接地，则基准电压放大器



开关与内部电阻分压器相连（参考图22），因而可将VREF引脚电压设为1.0V。

如果SENSE引脚连接到外部电阻分压器（参考图23），则VREF定义为：

$$V_{REF} = 0.5 \times \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)$$

其中：  $7k\Omega \leq (R1+R2) \leq 10k\Omega$

表8 基准电压配置表

| 选择模式       | SENSE电压（V）          | 相应的VREF（V）               | 相应差分范围（V <sub>p-p</sub> ） |
|------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|
| 固定内部基准电压   | AGND至0.2            | 1.0，内部                   | 2.0                       |
| 可编程内部基准电压源 | 连接外部R分压器<br>（参考图23） | $0.5 \times (1 + R2/R1)$ | $2 \times V_{REF}$        |
| 固定外部基准电压   | AVDD                | 1.0至1.3，施加于外部VREF<br>引脚  | 2.0至2.6                   |

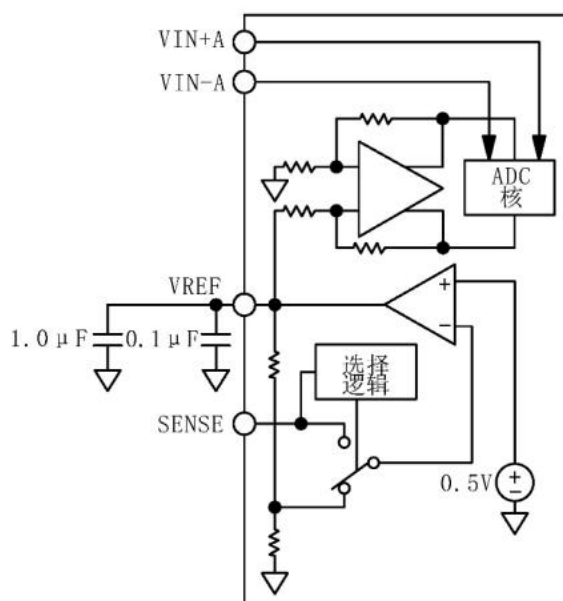


图22 1.0V内部基准电压配置

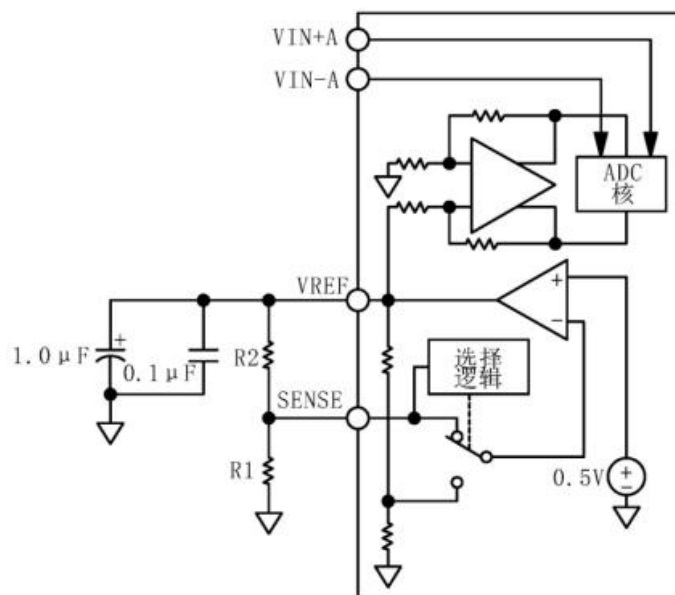


图23 可编程内部基准电压配置

## 外部基准电压

使用外部基准电压可以进一步提高ADC的增益精度或改善热漂移特性。当SENSE引脚与AVDD相连时，内部基准电压源可以禁用，从而允许使用外部基准电压源。内部基准电压缓冲器对外部基准电压源的负载相当于 $7.5\text{k}\Omega$ 的负载。内部缓冲器为ADC内核生成正、负满量程基准电压。不建议将SENSE引脚悬空。

## 时钟输入

YFC9653利用一个差分信号作为采样时钟输入端（CLK+和CLK-）的时钟信号，因此可充分发挥芯片性能。该信号通常使用变压器或电容器交流耦合到CLK+和CLK-引脚内，这两个引脚有内部偏置（参考图12），无需外部偏置。

## 时钟输入选项

YFC9653具有灵活的时钟输入结构。CMOS、LVDS、LVPECL或正弦波信号均可作为其时钟输入信号。但是，无论使用哪种信号都需考虑时钟源的抖动（详见“抖动”章节说明）。利用射频变压器或射频巴伦可将低抖动时钟源的单端信号转换成差分信号。对于 $125\text{MHz} \sim 1\text{GHz}$ 时钟频率建议使用射频巴



伦配置，20MHz~200MHz时钟频率建议使用射频变压器配置。跨接在变压器/巴伦次级绕组上的肖特基二极管可以将输入到本产品中的时钟信号限制为约差分0.8V峰峰值（参考图24、25），这样既可以防止时钟大电压摆幅馈通至本产品其它部分，还可以保持信号快速上升和下降时间，这对实现低抖动性能来说非常重要。然而，当频率高于500MHz时，二极管电容会产生影响，因此必须谨慎选择适当的信号限幅二极管。

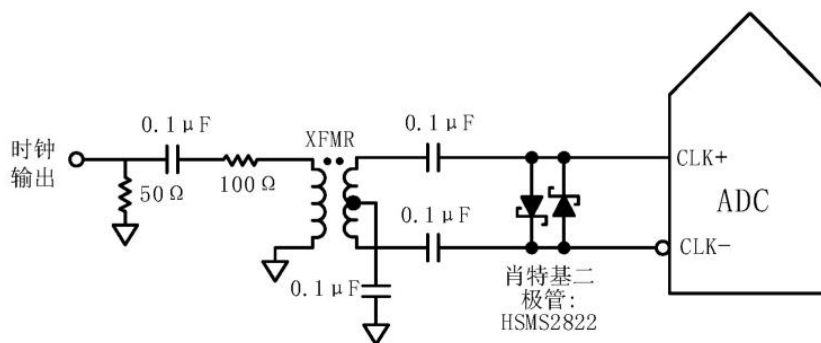


图24 变压器耦合差分时钟（频率可达200MHz）

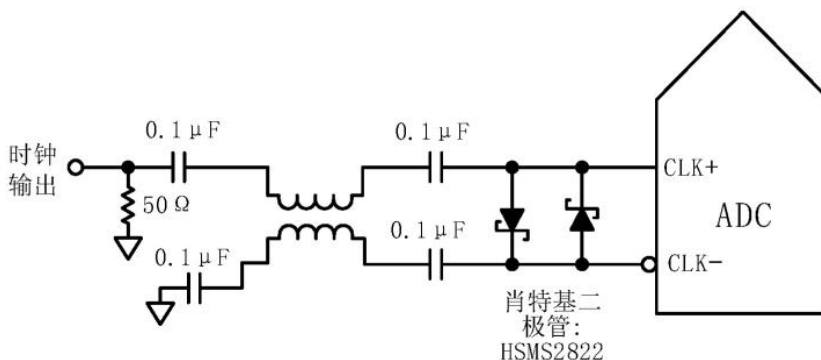


图25 巴伦耦合差分时钟（频率可达1GHz）

如果没有低抖动的时钟源，可对差分PECL信号进行交流耦合，并传输至采样时钟输入引脚（参考图26），另一种方法是将差分LVDS信号交流耦合至采样时钟输入引脚（参考图27）。

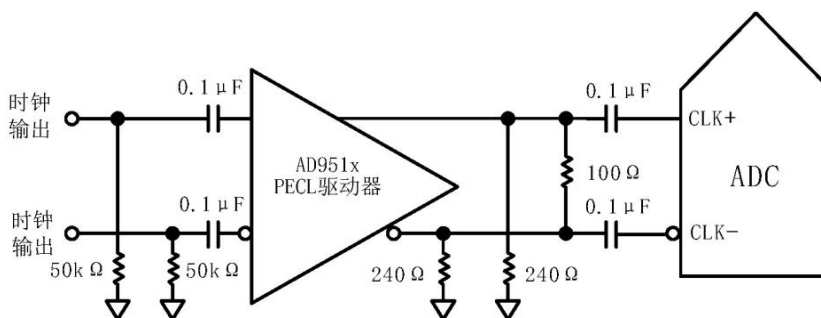




图26 差分PECL采样时钟（频率可达1GHz）

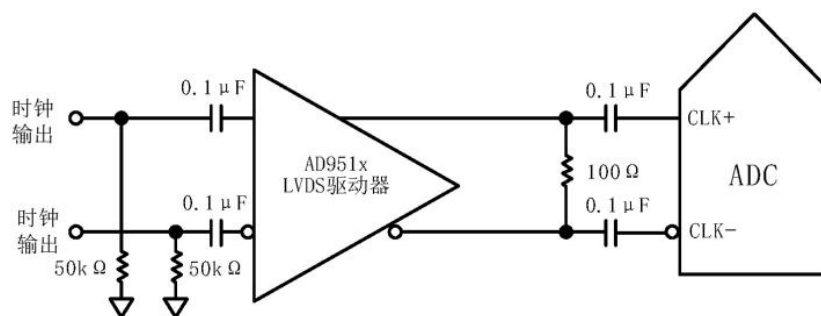


图27 差分LVDS采样时钟（频率可达1GHz）

在某些应用中，可以采用单端1.8V CMOS信号来驱动采样时钟输入。在此类应用中，CLK+引脚直接由CMOS门电路驱动，CLK-引脚则通过一个0.1μF电容旁路至地（参考图28）。

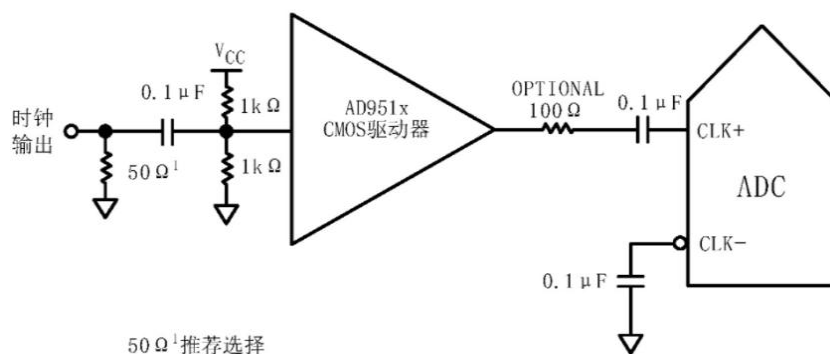


图28 单端1.8V CMOS输入时钟（频率可达200MHz）

## 输入时钟分频器

YFC9653内置一个输入时钟分频器，可对输入时钟进行1至8整数倍分频。利用外部SYNC输入信号可同步YFC9653时钟分频器。通过对寄存器0x109的位0和位1进行写操作，可以设置每次收到SYNC信号或者仅第一次收到SYNC信号后对时钟分频器再同步。有效SYNC可使分频器复位至初始状态。该同步特性可让多个器件时钟分频器对准，从而保证同时进行输入采样。

## 时钟占空比

由于典型高速ADC利用两个时钟边沿产生不同的内部定时信号，它对时钟占空比非常敏感。为保持ADC的动态性能，通常时钟占空比容差应为±5%。



YFC9653内置一个占空比稳定器（DCS），可对非采样边沿（下降沿）进行重新定时，并提供标称占空比为50%的内部时钟信号。当时钟输入占空比偏离额定50%占空比的幅度大于±5%时，该特性可最大程度减少性能的下降。当DCS处于开启状态时，在更宽的占空比范围内，噪声和失真性能几乎是平坦的。输入上升沿抖动仍然需要关注，无法轻易地通过内部稳定电路来减少这种抖动。在时钟速率动态变化的应用中，必须考虑与该环路相关的时间常数。在DCS环路重新锁定输入信号之前需要1.5μs ~ 5μs等待时间。

## 抖动

高速高精度ADC对时钟输入信号质量非常敏感。在给定输入频率（ $f_A$ ）下，仅由孔径抖动（ $t_j$ ）造成的信噪比下降由下面公式计算得出：

$$SNR \text{ 下降幅度} = 20 \log_{10} \left( \frac{1}{2\pi \times f_A \times t_j} \right)$$

其中，均方根孔径抖动表示所有抖动源（包括时钟输入信号、模拟输入信号和ADC孔径抖动规格等）的均方根。中频欠采样应用对抖动尤其敏感（参考图29）。

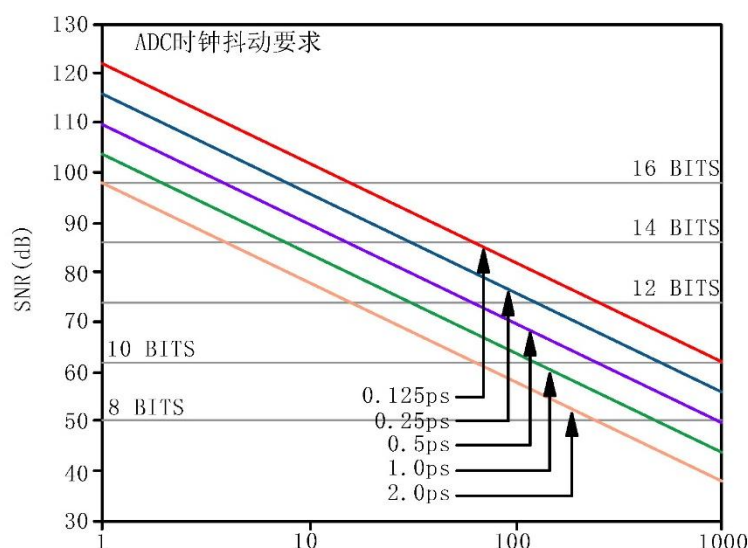


图29 理想信噪比与模拟输入频率和抖动的关系

当孔径抖动可能对YFC9653动态范围产生影响时，应将时钟输入信号视为模拟信号。此外，为避免时钟信号中混入数字噪声，应将时钟驱动器电



源与ADC输出驱动器电源分开。低抖动的晶体控制振荡器可以提供最佳时钟源。如果时钟信号来自其他类型时钟源（如门控、分频或其他方法），那么在最后一步中需要利用原始时钟进行重新定时。

## 功耗和省电模式

YFC9653功耗与采样速率成正比。将SPI接口或将PDWN引脚设置为高电平时可让YFC9653进入节能模式。在节能模式下，ADC典型功耗为8mW，输出驱动器处于高阻抗状态。当PDWN引脚设置为低电平时，YFC9653恢复为正常工作模式。注意，PDWN应以数据输出驱动器电源电压（DRVDD）为基准，且不得高于该电源电压。在节能模式下，通过关闭基准电压源、基准电压缓冲器、偏置网络以及时钟可实现低功耗模式。进入节能模式时内部电容会放电，返回正常工作模式时内部电容需重新充电。因此，唤醒时间与处于节能模式的时间有关，节能模式时间越短，唤醒时间也越短。使用SPI接口时，用户可将ADC置于节能或待机模式。若需要较短唤醒时间，可以使用待机模式，在该模式下内部基准电压电路处于通电状态。有关使用这些功能的更多信息详见“存储器映射”章节。

## 数字输出和时序

当采用默认设置上电时，YFC9653差分输出符合ANSI-644 LVDS标准。通过SPI接口，可以将YFC9653更改为低功耗模式并减少工作通道数量。LVDS驱动器电流来自芯片，并将各输出端输出电流设置为标称值3.5mA。由于LVDS接收器输入端有一个100Ω差分端接电阻，因此接收器摆幅标称值为350mV（或700mV<sub>p-p</sub>差分）。当YFC9653在缩小范围模式下工作时，输出电流降低至2mA，接收器在100Ω端接电阻上摆幅降低至200mV（或400mV<sub>p-p</sub>差分）。YFC9653的LVDS输出便于与定制ASIC和FPGA中的LVDS接收器连接，以保证在高噪声环境中实现良好的开关性能。在应用中推荐使用单一点到点网络拓扑结构，并将100Ω端接电阻尽可能设置在靠近接收器的位置。如果没有远端接收器端接电阻或者差分走线布线不佳，可能会导致时序错误的情况。为避免产生时序错误，建议走线长度不要超过24英寸，差分输出走线应尽可能靠近且长度相等。当走线长度超过24英寸时，用户应确定波形是否满足设



计的时序预算要求。附加SPI选项允许用户进一步提高所有四路输出的内部端接电阻（提高电流）从而驱动更长的走线。这可以通过设置寄存器0x15实现。虽然这会在数据边沿上产生更陡的上升和下降时间，并且更不容易发生比特错误，但使用此选项会提高DRVDD电源的功耗。

默认的输出数据格式为二进制补码。表9给出了一个输出编码格式示例。如果要将输出数据格式变为失调二进制，请参考“存储器映射”章节。在DDR模式下，来自各ADC的数据经过串行化后，通过不同的通道提供。每个串行流的数据速率等于16位乘以采样时钟速率，最大值为每通道500Mbps  $[(16 \text{ 位} \times 125 \text{ MSPS}) / (2 \times 2) = 500 \text{ Mbps/通道}]$ 。典型最低转换速率为20MSPS。有关该功能使用更多信息请参考“存储器映射”章节。

YFC9653提供了两个输出时钟用于捕捉数据。如采用DCO为输出数据定时，在默认工作模式下，它等于采样时钟（CLK）速率的4倍。数据逐个从YFC9653输出，必须在DCO的上升沿和下降沿进行捕捉；DCO支持双倍数据速率

（DDR）捕捉。FCO用于指示新输出字节的开始，在1×帧模式下，它与采样时钟速率相等。更多信息请参考时序图。在使用SPI时，DCO相位可以相对于数据边沿以60°增量进行调整。这样用户可根据需求优化系统时序余量。DCO+和DCO-默认时序相对于输出数据边沿为90°（参考图3）。在默认模式下（参考图3），数据输出串行流首先输出MSB，但可以利用SPI将其反转使数据输出串行流首先输出LSB。

通过SPI启动的数字输出测试码选项有12个。当验证接收器捕捉和时序时，这个功能很有用，可用的输出位序列选项参见表10。一些测试码有两个串行序列字，可以通过各种方式进行交替，具体取决于所选的测试码。注意，有些测试码可能并不遵守数据格式选择选项。此外，可以在0x19、0x1A、0x1B和0x1C寄存器地址中指定用户定义的测试码。

**表9 数字输出编码**

| 输入 (V)      | 条件 (V)                         | 偏移二进制输出模式           | 二进制补码模式             |
|-------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|
| VIN+ – VIN– | $< -V_{REF} - 0.5 \text{ LSB}$ | 0000 0000 0000 0000 | 1000 0000 0000 0000 |
| VIN+ – VIN– | $-V_{REF}$                     | 0000 0000 0000 0000 | 1000 0000 0000 0000 |
| VIN+ – VIN– | 0V                             | 1000 0000 0000 0000 | 0000 0000 0000 0000 |
| VIN+ – VIN– | $+V_{REF} - 1.0 \text{ LSB}$   | 1111 1111 1111 1111 | 0111 1111 1111 1111 |



|             |                  |                     |                     |
|-------------|------------------|---------------------|---------------------|
| VIN+ – VIN– | >+VREF – 0.5 LSB | 1111 1111 1111 1111 | 0111 1111 1111 1111 |
|-------------|------------------|---------------------|---------------------|

表10 输出测试模式

| 输出测试模式位序列 | 测试码名称  | 数字输出字1                    | 数字输出字2                   | 接受数据格式选择 | 注释                                     |
|-----------|--------|---------------------------|--------------------------|----------|----------------------------------------|
| 0000      | 关闭(默认) | N/A                       | N/A                      | N/A      |                                        |
| 0001      | 中间电平短码 | 1000 0000 0000 0000 (16位) | N/A                      | 是        | 所示为偏移二进制码                              |
| 0010      | +满量程短码 | 1000 0000 0000 0000 (16位) | N/A                      | 是        | 所示为偏移二进制码                              |
| 0011      | –满量程短码 | 1000 0000 0000 0000 (16位) | N/A                      | 是        | 所示为偏移二进制码                              |
| 0100      | 棋盘形式   | 1010 1010 1010 1010 (16位) | 0101 0101 0101 0100(16位) | 否        |                                        |
| 0101      | PN长序列  | N/A                       | N/A                      | 是        | PN23<br>ITU 0.150<br>$X^{23}+X^{18}+1$ |
| 0110      | PN短序列  | N/A                       | N/A                      | 是        | PN9<br>ITU 0.150<br>$X^9+X^5+1$        |
| 0111      | 1/0字反转 | 111 1111 1111 1100 (16位)  | 0000 0000 0000 0000(16位) | 否        |                                        |
| 1000      | 用户输入   | 寄存器0x19至寄存器0x1A           | 寄存器0x1B至寄存器0x1C          | 否        |                                        |
| 1001      | 1/0位反转 | 1010 1010 1010 1000 (16位) | N/A                      | 否        |                                        |
| 1010      | 1×同步   | 0000 0001 1111 1100 (16位) | N/A                      | 否        |                                        |
| 1011      | 1位高电平  | 1000 0000 0000 0000 (16位) | N/A                      | 否        | 与外部引脚相关的测试码                            |
| 1100      | 混合频率   | 1010 0001 1001 1100 (16位) | N/A                      | 否        |                                        |

PN短序列测试码产生一个伪随机位序列，每隔 $2^9 - 1$ 或511位重复一次。种子值为全1（初始值参考表11）。输出为串行PN9序列的并行表示（MSB优先格式）。第一个输出字是PN9序列MSB对齐形式的前14位。PN长序列测试码产生一个伪随机位序列，每隔 $2^{23} - 1$ 或8,388,607位重复一次。种子值为全1（初始值参考表11），YFC9653的位流与ITU标准相反。输出为串行PN23序列的并行表示（MSB优先格式）。第一个输出字是PN23序列MSB对齐形式的前14位。有关如何通过SPI更改这些附加数字输出时序特性的信息，请参考“存储器映射”部分。

表11 PN序列

| 序列 | 初始值 | 前三个采样输出（MSB优先）二进制补码 |
|----|-----|---------------------|
|----|-----|---------------------|



|       |        |                        |
|-------|--------|------------------------|
| PN短序列 | 0x1FE0 | 0x1DF1, 0x3CC8, 0x294E |
| PN长序列 | 0x1FFF | 0x1FE0, 0x2001, 0x1C00 |

## SDIO/OLM引脚

不需要SPI工作模式时，可将CSB引脚连接到AVDD，SDIO/OLM引脚依据表12控制输出通道模式。当CSB引脚连接AVDD时，YFC9653 DCS默认开启并且保持开启状态，直到器件进入SPI模式并通过SPI控制。关于DCS更多信息请参考“时钟占空比”章节。如果不使用SDIO/OLM引脚，CSB应连接AVDD。使用单通道模式时，转换速率不应超过62.5MSPS以满足1Gbps的最大输出速率要求。

**表12 输出通道模式引脚设置**

| OLM引脚电压  | 输出模式           |
|----------|----------------|
| AVDD（默认） | 双通道1x帧，16位串行输出 |
| GND      | 单通道1x帧，16位串行输出 |

## SCLK/DTP引脚

不需要SPI工作模式时，SCLK/DTP引脚可用于选择数字测试码（DTP）。如果在器件上电期间此引脚和CSB引脚保持高电平，则它可以使能一个数字测试码。当SCLK/DTP连接到AVDD时，ADC通道输出移出以下测试码：1000 0000 0000 0000。FCO和DCO正常工作，同时所有通道移出重复测试码。利用此测试码，用户可以对FCO、DCO和输出数据执行时序对齐。此引脚通过一个内部10kΩ电阻连接到GND，可将其断开。

**表13 数字测试码引脚设置**

| 所选DTP | DTP电压     | D0±x和D1±x情况         |
|-------|-----------|---------------------|
| 正常工作  | 10kΩ至AGND | 正常工作                |
| DTP   | AVDD      | 1000 0000 0000 0000 |

当从SPI端口发出命令时，也可以观察到额外的和自定义的测试码。有关可用选项的信息，请参考“存储器映射”章节。

## CSB引脚



---

不需要SPI工作模式时，CSB引脚应连接到AVDD。将CSB接高电平后，所有SCLK和SDIO信息都会被忽略。当CSB引脚连接AVDD时，YFC9653 DCS默认开启并且保持开启状态，直到器件进入SPI模式并通过SPI控制。有关DCS的更多信息，请参考“时钟占空比”章节。

### **RBIAS 引脚**

为了设置ADC的内核偏置电流，应在RBIAS引脚上串联一个10.0k $\Omega$ 、1%容差接地电阻。

### **输出测试模式**

输出测试选项参考表10，由地址0x0D的输出测试模式位控制。当使能输出测试模式时，ADC模拟部分与数字后端模块断开，测试码经过输出格式化模块。有些测试码需要进行输出格式化，有些则不需要。将寄存器0x0D的位4或位5置1，可以将PN序列测试的PN发生器复位。执行这些测试时，可以没有模拟信号但编码时钟必不可少。



## 串行端口接口（SPI）

YFC9653的串行端口接口（SPI）允许用户利用ADC内部一个结构化寄存器空间来配置转换器以满足特定功能和操作的需要。SPI具有灵活性，可根据具体的应用进行定制。通过串行端口，可访问地址空间以及对地址空间进行读写。存储空间以字节为单位进行组织，并且可以进一步细分成多个区域。

### SPI使用配置

YFC9653的SPI由SCLK、SDIO和CSB三个引脚组成（参考表14）。其中，SCLK（串行时钟）引脚用于同步ADC的读取和写入数据，SDIO（串行数据输入/输出）双功能引脚允许将数据发送至内部ADC存储器映射寄存器或从该寄存器中读取数据，CSB（片选信号）引脚是低电平有效控制引脚，它能够使能或者禁用读写周期。

表14 串行端口接口引脚

| 引脚   | 功能                                              |
|------|-------------------------------------------------|
| SCLK | 串行时钟。串行移位时钟输入，用来同步串行接口的读写操作。                    |
| SDIO | 串行数据输入/输出。双功能引脚，通常用作输入或输出，具体取决于发送的指令和时序帧中的相对位置。 |
| CSB  | 片选信号。低电平有效控制引脚，用来选通读写周期。                        |

CSB下降沿与SCLK上升沿共同确定帧的起始。图30为串行时序图示例，相应定义可参考表7。CSB可在多种模式下运行。一种模式是，CSB始终维持在低电平状态，使器件一直处于使能状态。另一种模式是，CSB在字节之间停留在高电平，以允许其他外部时序。当CSB引脚连接到高电平时，SPI功能会处于高阻抗模式，此模式下可启动SPI引脚第二功能。在每个指令周期内会传输一条16位指令，在指令传输后将进行数据传输，数据长度由W0和W1位决定。除了数据长度，指令周期还决定串行帧是读操作还是写操作，这样可以通过串行端口对芯片进行编程并读取存储器中的数据。多字节串行数据传输帧中首字节第一位表示是发送读命令还是写命令。如果指令是回读操作，则执行回读操作会使串行数据输入/输出（SDIO）引脚数据传输方向在串行帧特定位置从输入改为输出。所有数据均由8位字组成，数据可通过MSB优先模式或LSB优先模式发送。



芯片上电后，默认模式为MSB优先，可以通过SPI端口配置寄存器来更改数据发送方式。

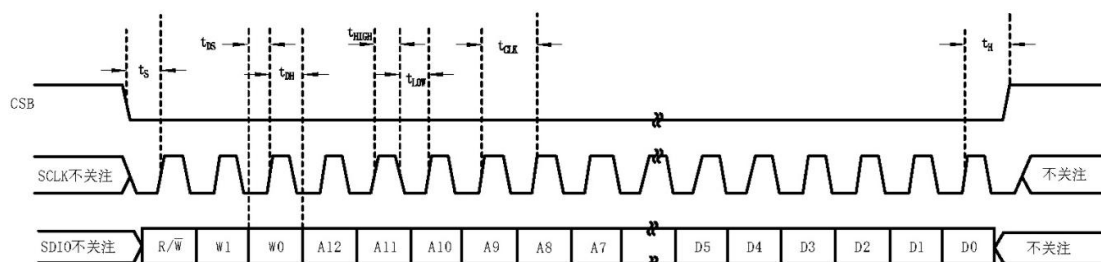


图30 串行端口接口时序图

## 硬件接口

表14中描述的引脚是用户编程器件与YFC9653串行端口之间的物理接口。使用SPI接口时，SCLK和CSB引脚作为输入引脚。SDIO引脚是双向引脚，在写入阶段用作输入引脚，在回读阶段用作输出引脚。当需要充分发挥转换器全部动态性能时应禁用SPI端口。通常，SCLK、CSB和SDIO信号与YFC9653的时钟是异步的，因此这些信号中的噪声会降低转换器性能。如果其他器件使用板上的SPI总线，需要在该总线和YFC9653之间连接缓冲器，以防止这些信号在关键采样周期内在转换器输入端发生变化。在不使用SPI接口时有些引脚用作第二功能。在器件上电期间，当这些引脚与DRVDD或地连接时，这些引脚可起到特定的作用。表12和表13说明了YFC9653支持的绑定功能。

## 不使用SPI的配置

在不使用SPI控制寄存器接口情况下，SDIO/OLM、SCLK/DTP和PDWN引脚被用作独立的CMOS兼容控制引脚。当器件上电后，如将这些引脚用作静态控制线，分别控制输出通道模式、数字测试码和断电特性。在此模式下，CSB应与AVDD相连以禁用串行端口接口。当CSB引脚连接AVDD时，YFC9653的DCS默认开启并保持开启状态，直至器件进入SPI模式并通过SPI控制。有关DCS的更多信息，请参考“时钟占空比”章节。当器件处于SPI模式时，PDWN引脚（若使能）仍然有效。为通过SPI控制省电，应将PDWN引脚设为默认状态。



## SPI访问特性

可通过SPI访问的一般特性参考表15。

表15 可通过SPI访问的特性列表

| 特性名称  | 说明                           |
|-------|------------------------------|
| 功耗模式  | 允许用户设置省电或待机模式                |
| 时钟    | 允许用户设置时钟分频器，设置时钟分频器相位，以及使能同步 |
| 失调    | 允许用户以数字方式调整转换器失调             |
| 测试I/O | 允许用户设置测试模式以便在输出位上获得已知数据      |
| 输出模式  | 允许用户设置输出模式                   |
| 输出相位  | 允许用户设置输出时钟极性                 |



## 存储器映射

### 读取存储器映射寄存器表

存储器映射寄存器表每一行有8位。存储器映射主要分为三个部分：芯片配置寄存器（地址0x00至0x02）、通道索引和传送寄存器（地址0x05和0xFF），以及ADC功能寄存器，包括设置、控制和测试（地址0x08至0x10A）。表16列出了每个十六进制地址及其十六进制默认值。位7（MSB）栏为给定十六进制默认值起始位。

### 禁用位置

YFC9653不支持表16中未包括的所有地址和位，应向有效地址中未使用位写入0。在一个地址仅有部分位处于禁用状态时，才可以对这些位置进行写操作。如果整个地址禁用或未在表16中列出，则不应对该地址进行写操作。

### 默认值

YFC9653复位后，关键寄存器将载入默认值。表16（存储器映像寄存器表）列出了各寄存器默认值。

### 逻辑电平

关于逻辑电平术语说明如下：

“置位”指将某位设置为逻辑1或向某位写入逻辑1；

“清除位”指将某位设置为逻辑0或向某位写入逻辑0。

### 特定通道寄存器

每个通道的某些功能可通过编程设置为不同的值。在此情况下，可在内部为每个通道复制通道地址位置。如表16，这些寄存器和相应的位被称为局部寄存器。通过设置寄存器0x05的相应数据通道位（A、B、C或D）时钟通道DCO位（位5）和FCO位（位4），可访问这些局部寄存器及相应位。如果这四个位都被置位，后续写操作将影响所有通道及DCO/FCO的寄存器。在一个读周期内，



仅设置一个通道（A、B、C或D），对4个寄存器中的1个执行读操作。如果在一个SPI读周期内置位所有位，则器件返回通道A的值。表16给出的全局寄存器及相应位会影响整个器件和通道的特性，不允许分别设置每个通道。寄存器0x05中的设置不影响全局寄存器及相应位的值。

## 存储器映射寄存器表

YFC9653采用3线接口和16位寻址方式。寄存器0x00的位0和位7置0，位3和位4置1。当寄存器0x00的位5置1时，SPI进入软复位，所有用户寄存器恢复默认值，位2自动清0。



表16 存储器映射寄存器

| 地址<br>(十六进制) | 寄存器名称         | 位7<br>(MSB) | 位6                      | 位5                                  | 位4          | 位3        | 位2                                                             | 位1                                                          | 位0<br>(LSB)          | 默认值<br>(十六进制) | 备注       |
|--------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------|-----------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------|---------------|----------|
| 芯片配置寄存器      |               |             |                         |                                     |             |           |                                                                |                                                             |                      |               |          |
| 0x00         | SPI端口配置       | 0:SDO激活     | LSB先输出                  | 软复位                                 | 1           | 1         | 软复位                                                            | LSB先输出                                                      | 0:SDO激活              | 0x18          |          |
| 0x01         | 芯片ID          |             |                         |                                     |             |           |                                                                |                                                             |                      | 0xB5          | 只读       |
| 0x02         | 芯片级别          | 禁用          | 速度等级ID<br>110 = 125M采样率 |                                     |             | 禁用        | 禁用                                                             | 禁用                                                          | 禁用                   |               | 只读       |
| 设备索引和传输寄存器   |               |             |                         |                                     |             |           |                                                                |                                                             |                      |               |          |
| 0x05         | 设备索引          | 禁用          | 禁用                      | 时钟通道<br>DCO                         | 时钟通道<br>FCO | 数据通道<br>D | 数据通道<br>C                                                      | 数据通道<br>B                                                   | 数据通道<br>A            | 0x3F          |          |
| 0xFF         | 传输            | 禁用          | 禁用                      | 禁用                                  | 禁用          | 禁用        | 禁用                                                             | 禁用                                                          | 启动覆盖                 | 0x00          |          |
| 全芯片功能寄存器     |               |             |                         |                                     |             |           |                                                                |                                                             |                      |               |          |
| 0x08         | 低功耗模式<br>(全局) | 禁用          | 禁用                      | 外部管脚低功耗模式：<br>0 = 全关断模式<br>1 = 待机模式 | 禁用          | 禁用        | 禁用                                                             | 功耗模式：<br>00 = 正常芯片工作<br>01 = 全关断模式、<br>10 = 待机模式<br>11 = 复位 |                      | 0x00          | 决定芯片工作模式 |
| 0x09         | 时钟<br>(全局)    | 禁用          | 禁用                      | 禁用                                  | 禁用          | 禁用        | 禁用                                                             | 禁用                                                          | 占空比稳定器<br>0=开<br>1=关 | 0x01          |          |
| 0x0B         | 时钟分频<br>(全局)  | 禁用          | 禁用                      | 禁用                                  | 禁用          | 禁用        | 时钟分频比[2:0]<br>000 = 1分频<br>001 = 2分频<br>010 = 3分频<br>011 = 4分频 |                                                             |                      | 0x00          |          |



|      |                    |                                                                                                  |                                                                     |           |           |                                                                                                                                                                                                                                            |                                                  |    |                              |      |        |
|------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----|------------------------------|------|--------|
|      |                    |                                                                                                  |                                                                     |           |           |                                                                                                                                                                                                                                            | 100 = 5分频<br>101 = 6分频<br>110 = 7分频<br>111 = 8分频 |    |                              |      |        |
| 0x0C | 增强控制               | 禁用                                                                                               | 禁用                                                                  | 禁用        | 禁用        | 禁用                                                                                                                                                                                                                                         | 斩波时钟<br>模式<br>0 = 关<br>1 = 开                     | 禁用 | 禁用                           | 0x00 |        |
| 0x0D | 测试模式<br>（除了PN序列复位） | 用户输入测试模式<br>00 = 单一输入<br>01 = 交替输入<br>10 = 单一输入一次<br>11 = 交替输入一次<br>（仅影响用户输入测试模式, 位[3:0] = 1000） |                                                                     | 产生复位PN长序列 | 产生复位PN短序列 | 输出测试模式[3:0]（局部）<br>0000 = 关（默认值）<br>0001 = 中间电平短序列<br>0010 = 正端满量程<br>0011 = 负端满量程<br>0100 = 交替棋盘式<br>0101 = PN 23序列<br>0110 = PN 9序列<br>0111 = 1/0字切换<br>1000 = 用户输入<br>1001 = 1/0位切换<br>1010 = 1× sync<br>1011 = 1bit高电平<br>1100 = 混合位频率 |                                                  |    |                              | 0x00 |        |
| 0x10 | 失调调整               | 8位器件失调调整[7:0]<br>失调调整从+127LSB 到-128LSB（补码格式）                                                     |                                                                     |           |           |                                                                                                                                                                                                                                            |                                                  |    |                              | 0x00 | 器件失调调整 |
| 0x14 | 输出模式               | 禁用                                                                                               | LVDS-ANSI/LVDS-IEEE选择<br>0 = LVDS-ANSI<br>1 = LVDS-IEEE<br>缩小连接线电压范 | 禁用        | 禁用        | 禁用                                                                                                                                                                                                                                         | 输出反相                                             | 禁用 | 输出格式<br>0 = 原码格式<br>1 = 补码格式 | 0x03 |        |



|      |                     |                 |                                                                                                  |                                                               |     |                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                              |      |                          |
|------|---------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------|------|--------------------------|
|      |                     |                 | 围                                                                                                |                                                               |     |                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                              |      |                          |
| 0x15 | 输出调整                | 禁用              | 禁用                                                                                               | 输出驱动器端接[1:0]<br>00 = 无<br>01 = 200Ω<br>10 = 100Ω<br>11 = 100Ω |     | 禁用                                 | 禁用                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 禁用                 | 输出驱动<br>0 = 1x驱动<br>1 = 2x驱动 | 0x00 |                          |
| 0x16 | 输出相位                | 禁用              | 输入时钟相位调整[6:4]，参考表20<br>（数值为相位延迟的输入时钟周期数）                                                         |                                                               |     | 输出时钟相位调整[3:0]，（0000到1011）<br>参考表21 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                              | 0x03 |                          |
| 0x18 | V <sub>REF</sub>    | 禁用              | 禁用                                                                                               | 禁用                                                            | 禁用  | 禁用                                 | V <sub>REF</sub> 调整数字方案[2:0]<br>000 = 1.0V <sub>p-p</sub> (1.3V <sub>p-p</sub> )<br>001 = 1.14V <sub>p-p</sub> (1.48V <sub>p-p</sub> )<br>010 = 1.33V <sub>p-p</sub> (1.73V <sub>p-p</sub> )<br>011 = 1.6V <sub>p-p</sub> (2.08V <sub>p-p</sub> )<br>100 = 2.0V <sub>p-p</sub> (2.6V <sub>p-p</sub> ) |                    |                              | 0x04 | 选择内部<br>V <sub>REF</sub> |
| 0x19 | 用户使用模式1 LSB<br>（全局） | B7              | B6                                                                                               | B5                                                            | B4  | B3                                 | B2                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | B1                 | B0                           | 0x00 |                          |
| 0x1A | 用户使用模式1 MSB<br>（全局） | B15             | B14                                                                                              | B13                                                           | B12 | B11                                | B10                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | B9                 | B8                           | 0x00 |                          |
| 0x1B | 用户使用模式2 LSB<br>（全局） | B7              | B6                                                                                               | B5                                                            | B4  | B3                                 | B2                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | B1                 | B0                           | 0x00 |                          |
| 0x1C | 用户使用模式2 MSB<br>（全局） | B15             | B14                                                                                              | B13                                                           | B12 | B11                                | B10                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | B9                 | B8                           | 0x00 |                          |
| 0x21 | 串行输出数据控制<br>（全局）    | LVDS输出<br>LSB优先 | SDR/DDR单通道/双通道，逐位/逐字节[6:4]<br>000：SDR双通道、逐位<br>001：SDR双通道、逐字节<br>010：DDR双通道、逐位<br>011：DDR双通道、逐字节 |                                                               |     | 禁用                                 | 选择2x<br>frame                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 串行输出位数<br>00 = 16位 |                              | 0x30 |                          |



|       |            |    |                 |    |    |       |                                                                                                                       |            |          |      |  |
|-------|------------|----|-----------------|----|----|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------|------|--|
|       |            |    | 100: DDR单通道、逐字节 |    |    |       |                                                                                                                       |            |          |      |  |
| 0x22  | 串行通道状态（局部） | 禁用 | 禁用              | 禁用 | 禁用 | 禁用    | 禁用                                                                                                                    | 通道输出复位     | 通道关断     | 0x00 |  |
| 0x100 | 采样率覆盖      | 禁用 | 采样率覆盖使能         | 0  | 0  | 禁用    | 采样率<br>000 = 20MSPS<br>001 = 40MSPS<br>010 = 50MSPS<br>011 = 65MSPS<br>100 = 80MSPS<br>101 = 105MSPS<br>110 = 125MSPS |            |          | 0x00 |  |
| 0x101 | 用户输入/输出控制2 | 禁用 | 禁用              | 禁用 | 禁用 | 禁用    | 禁用                                                                                                                    | 禁用         | SDIO下拉控制 | 0x00 |  |
| 0x102 | 用户输入/输出控制3 | 禁用 | 禁用              | 禁用 | 禁用 | VCM关闭 | 禁用                                                                                                                    | 禁用         | 禁用       | 0x00 |  |
| 0x109 | 同步功能       | 禁用 | 禁用              | 禁用 | 禁用 | 禁用    | 禁用                                                                                                                    | 仅下一个SYNC同步 | 同步功能使能   | 0x00 |  |



## 存储器映射寄存器描述

### 器件索引（寄存器0x05）

对于映射中某些特性各通道可独立设置，其它特性则是全局适用。寄存器0x05前4位可以用来选择哪个数据通道受影响，输出时钟通道也可通过寄存器0x05选择，可以让独立特性的一个较小子集适用于该器件。

### 传输（寄存器0xFF）

除寄存器0x100外所有其它寄存器都在写入时立刻更新，传送寄存器的位0置1时，分辨率/采样速率覆盖寄存器（地址0x100）的设置初始化。

### 功耗模式（寄存器0x08）

位[7:6] – 禁用

位5 – 外部PDWN引脚功能

置1时外部PDWN引脚启动待机模式，清零时PDWN引脚启动完全掉电模式。

位[4:2] – 禁用

位[1:0] – 功耗模式

正常工作（位[1:0] = 00）时所有ADC通道均启用；

掉电模式（位[1:0] = 01）下所有ADC通道均掉电，数字数据路径时钟禁用，数字数据路径复位，输出禁用；

待机模式（位[1:0] = 10）下数字数据路径时钟和输出禁用；

数字复位（位[1:0] = 11）期间除SPI端口外，芯片所有其它数字数据路径时钟和输出（适用时）均复位。注意SPI始终受用户控制，从不会自动禁用或复位（除非上电复位）。

### 时钟控制（寄存器0x09）

位[7:1] – 禁用

位0 – 占空比稳定器

默认配置下位0置1，占空比稳定器关闭，注意当器件不处于SPI模式时占空比稳定器将打开。



## 增强控制（寄存器0x0C）

位[7:3] – 禁用

位2 – 斩波模式

对于对失调电压、低频噪声敏感的应用，可以设置位2来使能YFC9653第一级斩波特性。在频域中斩波将失调和其它低频噪声转换为 $f_{CLK}/2$ ，可以通过滤波器进行滤除。

位[1:0] – 禁用

## 输出模式（寄存器0x14）

位[7] – 禁用

位6 – LVDS-ANSI/LVDS-IEEE选择

此位置1时，选择LVDS-IEEE缩小范围选项，默认设置为LVDS-ANSI。如表17所示，选择LVDS-ANSI或LVDS-IEEE缩小范围链路时，用户可以选择驱动器端接。器件自动选择驱动器电流，以提供适当的输出摆幅。

表17 LVDS-ANSI/LVDS-IEEE选项

| 输出模式，位60 | 输出模式                | 输出驱动器端接 | 输出驱动器电流      |
|----------|---------------------|---------|--------------|
| 0        | LVDS-ANSI           | 用户可选    | 自动选择以提供适当的摆幅 |
| 1        | LVDS-IEEE<br>缩小范围链路 | 用户可选    | 自动选择以提供适当的摆幅 |

位[5:3] – 禁用

位2 – 输出反相

此位置1时，输出位流反转。

位1 – 禁用

位0 – 输出格式

默认情况下此位置1，数据以二进制补码格式输出。此位复位时，输出模式变为偏移二进制。

## 输出控制（寄存器0x15）

位[7:6] – 禁用

位[5:4] – 输出驱动器端接



此位可让用户选择内部端接电阻值。

#### 位[3:1] – 禁用

#### 位0 – 输出驱动

此位仅控制DCO和FCO的LVDS输出驱动强度。默认状态下为1×驱动，而通过设置寄存器0x05中适当通道位可以增加到2×驱动强度。这些功能不能与输出驱动器端接选择功能一起使用。输出驱动端接和输出驱动同时选择时，端接选择优先于驱动强度选择。

### 输出时钟相位控制（寄存器0x16）

#### 位7 – 禁用

#### 位[6:4] – 输入时钟相位调整

输入时钟相位控制参考表18。

表18 输入时钟相位控制

| 参数              | 说明           |
|-----------------|--------------|
| 输入时钟相位控制，位[6:4] | 相位延迟的输入时钟周期数 |
| 000（默认值）        | 0            |
| 001             | 1            |
| 010             | 2            |
| 011             | 3            |
| 100             | 4            |
| 101             | 5            |
| 110             | 6            |
| 111             | 7            |

#### 位[3:0] – 输出时钟相位调整

表19 输出时钟相位控制（DCO）

| 参数              | 说明                         |
|-----------------|----------------------------|
| 输出时钟相位控制，位[3:0] | DCO相位控制（度数相对于D0±x/D1±x的边缘） |
| 0000            | 0                          |
| 0001            | 60                         |
| 0010            | 120                        |
| 0011（默认值）       | 180                        |
| 0100            | 240                        |
| 0101            | 300                        |
| 0110            | 360                        |
| 0111            | 420                        |
| 1000            | 480                        |
| 1001            | 540                        |



| 参数   | 说明  |
|------|-----|
| 1010 | 600 |
| 1011 | 660 |

## 串行输出控制（寄存器0x21）

该寄存器用于设置YFC9653各种输出数据模式，具体依据数据采集方案而定，各种串行化选项参考表20。

## 采样率覆盖（寄存器0x100）

利用该寄存器用户可以降低采样率的性能，此寄存器的设置在传送寄存器（寄存器0xFF）的位0写入高电平后初始化。

## 用户输入/输出控制2（寄存器0x101）

位[7:1] – 禁用

位0 – SDIO下拉

可以将位0置1以禁用SDIO引脚内置的30k $\Omega$ 下拉电阻。当许多器件连接到SPI总线时，此设置可用来限制负载。

## 用户I/O控制3（寄存器0x102）

位[7:4] – 禁用

位3 – VCM掉电

通过将位3设置为高电平可关断内部VCM发生器，使用外部基准电压源时使用此功能。

位[2:0] – 禁用

表20 SPI寄存器选项

| 寄存器0x21<br>内容 | 选择的串行化选项 |            |           | DCO倍频器                    | 时序图      |
|---------------|----------|------------|-----------|---------------------------|----------|
|               | 串行输出位数   | 帧模式        | 串行数据模式    |                           |          |
| 0x30          | 16位      | 1 $\times$ | DDR双通道逐字节 | 4 $\times$ f <sub>S</sub> | 图3（默认设置） |
| 0x20          | 16位      | 1 $\times$ | DDR双通道逐位  | 4 $\times$ f <sub>S</sub> | 图3       |
| 0x10          | 16位      | 1 $\times$ | SDR双通道逐字节 | 8 $\times$ f <sub>S</sub> | 图3       |
| 0x00          | 16位      | 1 $\times$ | SDR双通道逐位  | 8 $\times$ f <sub>S</sub> | 图3       |
| 0x34          | 16位      | 2 $\times$ | DDR双通道逐字节 | 4 $\times$ f <sub>S</sub> | 图4       |
| 0x24          | 16位      | 2 $\times$ | DDR双通道逐位  | 4 $\times$ f <sub>S</sub> | 图4       |



|      |     |    |          |                |    |
|------|-----|----|----------|----------------|----|
| 0x40 | 16位 | 1× | DDR单通道逐字 | $8 \times f_s$ | 图5 |
|------|-----|----|----------|----------------|----|



## 应用指南

在YFC9653产品应用、系统设计和布局布线等方面应着重考虑以下因素：

### 产品烘焙与焊接

由于YFC9653湿敏等级为MSL3，在使用中烘焙与焊接要求如下：

- 贴片前需进行烘焙处理，烘焙条件为 $125^{+10}_{0}^{\circ}\text{C}$ , 8H, <5%RH;
- 烘焙后应在168小时内完成贴片及回流焊作业，注意该时限对应包装开封后作业环境条件 $\leq 30^{\circ}\text{C} / 60\%\text{RH}$ ;
- 168小时内未完成贴片及回流焊作业时，应重新进行烘焙处理;
- 贴片后严禁手动返修，需采用专门返修装置进行拆除。

未按照以上烘焙与焊接要求进行作业的，可能会导致本产品由于焊接分层引发产品失效。

### 电源和接地

当连接电源至YFC9653时建议使用两个独立的1.8V电源，一个电源用于模拟输出（AVDD），另一个电源用于数字输出（DRVDD）。对于AVDD和DRVDD，设计人员可以使用多个不同的去耦电容以适用于高频和低频。去耦电容应放置在接近印刷电路板（PCB）入口点和器件引脚的位置，并尽可能缩短走线长度。YFC9653仅需要一个PCB接地层。对PCB模拟、数字和时钟模块进行合理去耦和巧妙分隔，可以获得最佳性能。

### 裸露焊盘散热块

为了获得最佳电气和热性能，YFC9653底部的裸露焊盘必须连接到模拟地（AGND）。PCB上裸露的连续铜平面应与产品裸露焊盘匹配。铜平面上应有多个通孔以实现尽可能低的热阻路径，便于通过PCB底部进行散热。为了最大化实现YFC9653与PCB之间覆盖连接，应在PCB上覆盖一个丝印层，以便将PCB上的连续铜平面划分为多个均等的部分。这样，在回流焊过程中可以防止焊料堆积，并在芯片和PCB之间提供多个连接点。如果使用一个连续无分割的平面，则仅能保证在芯片和PCB之间有一个连接点。有关PCB布局范例请参考评估板。



## VCM

应用一个 $0.1\mu\text{F}$ 电容将VCM引脚去耦至地。

## 基准电压源去耦

VREF引脚应通过外部一个低ESR  $0.1\mu\text{F}$ 陶瓷电容和一个低ESR  $1.0\mu\text{F}$ 电容的并联组合旁路置地。

## SPI端口

当需要YFC9653充分发挥其全部动态性能时应禁用SPI端口。通常SCLK、CSB和SDIO信号与本产品时钟是异步的，因此，这些信号中的噪声会降低ADC性能。如果其它器件使用板上SPI总线，则可能需要在该总线与YFC9653之间连接缓冲器，以防止这些信号在关键采样周期内，在本产品输入引脚端发生变化。

## 串扰性能

YFC9653采用QFN48封装，芯片每个角落都有输入对。引脚配置参考图2。如要最大程度提升电路板的串扰性能，可在相邻通道之间加入接地填充过孔（参考图31）。

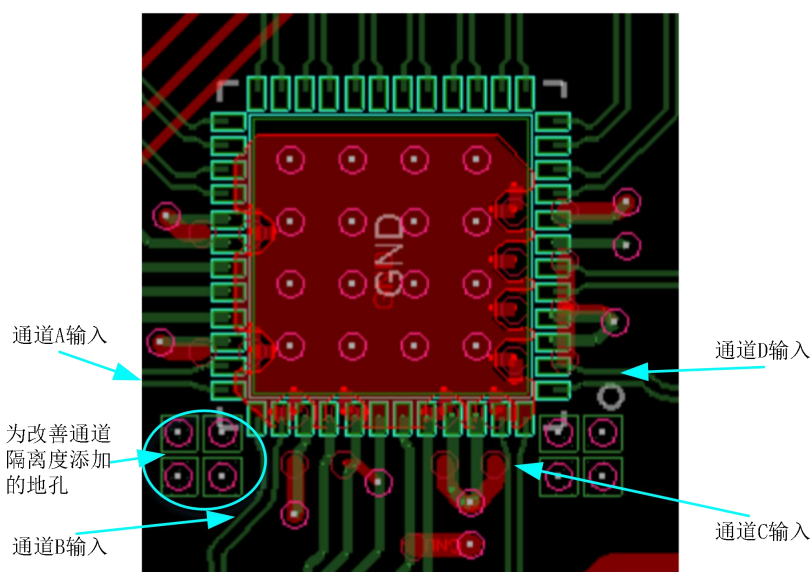


图31 提升串扰性能的布局技巧



## 外形图和尺寸

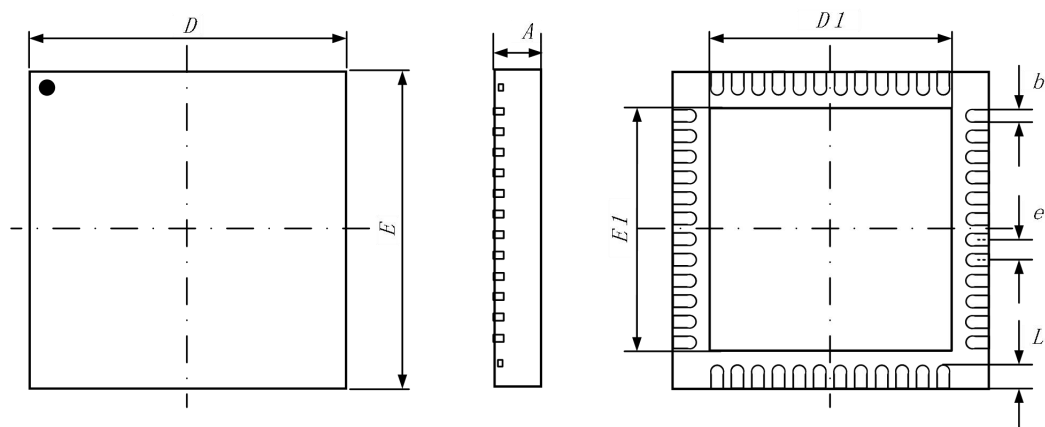


图32 YFC9653封装外形图 (QFN48)

表21 YFC9653封装尺寸表 (QFN48)

| 尺寸符号 | 数值 (mm) |      |      | 尺寸符号 | 数值 (mm) |      |      |
|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|      | 最小      | 公称   | 最大   |      | 最小      | 公称   | 最大   |
| A    | 0.70    | 0.75 | 0.80 | D    | 6.90    | 7.00 | 7.10 |
| b    | 0.20    | 0.25 | 0.30 | D1   | 5.50    | 5.60 | 5.70 |
| e    | —       | 0.50 | —    | E    | 6.90    | 7.00 | 7.10 |
| L    | 0.30    | 0.40 | 0.50 | E1   | 5.50    | 5.60 | 5.70 |