

1. 特性

- 低噪声可编程增益放大器 (PGA) 和高分辨率 24 位模数转换器 (ADC)
 - 可编程增益: 1/2/3/4/6/8/12/24/48
 - 4 路差分输入
 - 积分非线性: 2 PPM/FS
- 脑电图/心电图测量 (EEG/ECG)
 - 输入参考噪声: 2.9 μVpp (250 SPS, 增益 6)
 - ECG 通道输入偏置电流: 200pA
 - 数据速率: 125SPS 至 8kSPS
 - 共模抑制比 (CMRR): 117dB
 - 内置右腿驱动放大器、连续断线检测、测试信号
- 内置振荡器和参考电压
- 待机模式
 - 电流 0.2 μA
- 电源
 - 模拟: 2.4V 至 3.6V
 - 数字: 1.7V 至 3.6V

- 内置集成激励电流源
- 4 线 SPI 接口
- 工作温度范围: $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$
- 40 脚, 5mm x5mm QFN 封装
- 30 球, 2.95mm x2.95mm WLCSP 封装

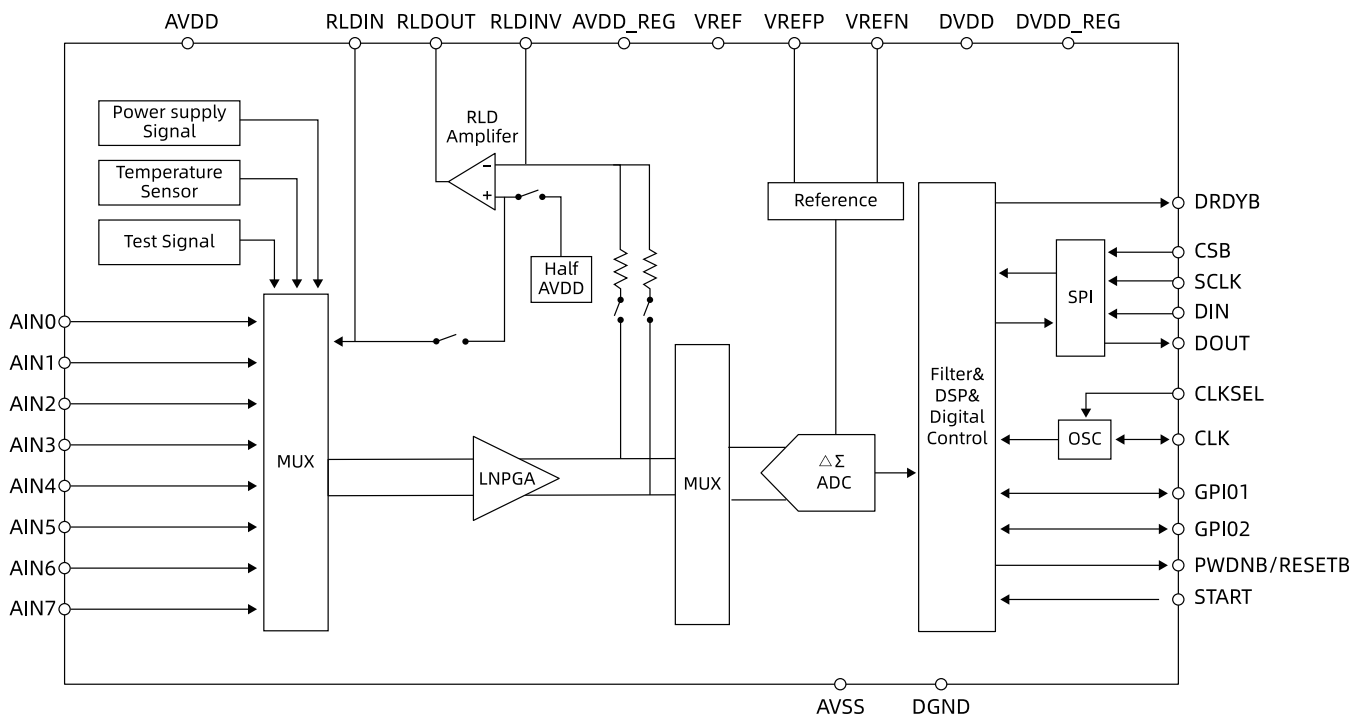
2. 应用

- 脑电图(EEG)
- 生物安全认证和特定 ECG 应用,包括:
 - 穿戴式心率监测仪
 - 单导联事件监护, 心律不齐检测
 - 单导联无线贴片, 住院/门诊监护

3. 功能描述

LH001-91 是一款高精度低成本模拟前端: 支持脑电图、心电图测量等功能, 片上集成了低噪声 PGA 和 24 位, 8kSPS 模数转换器。片上集成了信号源可以进行导联持续断线检测、信道通路测试和温度测量。此外片上还集成了可以实现闭环控制的右腿驱动输出功能进而提高环路 CMRR。

4. 结构框图



目录

1. 特性	- 1 -
2. 应用	- 1 -
3. 功能描述	- 1 -
4. 结构框图	1
5. 版本历史	4
6. 管脚定义和功能描述	5
7. 性能规格	7
7.1. 绝对最大额定值	7
7.2. ESD 额定值	7
7.3. 建议工作条件	7
7.4. 热性能信息	7
7.5. 电气特性	8
7.6. 典型特性	10
8. 噪声特性	11
9. 详细描述	13
10. 模拟功能模块详细介绍	13
10.1. 输入选择器 (MUX)	13
10.2. 导联脱落	15
10.2.1. 直流导联脱落	15
10.2.2. 交流导联脱落	15
10.2.3. 右腿驱动导联脱落	16
10.3. 右腿驱动提高 CMRR	16
10.4. PGA 及 ADC	17
10.5. 温度传感器	18
10.6. 参考电压	18
11. 数字功能模块介绍	19

11.1. 时钟.....	19
11.2. SPI	20
11.2.1. 时序需求	20
11.2.2. SPI 接口	21
11.2.3. 数据检索	22
11.2.4. 数据就绪引脚 (DRDYn)	23
11.2.5. 启动模式	23
11.2.6. 建立时间	24
11.2.7. 连续转换模式.....	24
11.2.8. 单次转换模式.....	25
11.2.9. 多器件配置	26
11.2.10. SPI 命令定义.....	28
11.3. 中断.....	32
11.3.1. 寄存器列表	33
11.4. FIFO	34
11.5. GPIO	35
11.6. Power down 模式.....	35
12. 寄存器描述.....	35
13. 封装类型和丝印	45
13.1. QFN 封装: QFN-40,5 x 5mm, 0.4 pitch	45
13.2. WLCSP 封装: WLCSP-30,2.950 x 2.950mm, 0.500mm pitch	45
13.3. 订购信息	46
13.3.1. 编带规格	错误!未定义书签。
13.3.2. 包装规格	46

5. 版本历史

版本号	发布时间	变更说明
PreA	2022 年 4 月 7 日	初版
PreB	2022 年 7 月 1 日	增加封装丝印信息
Rev.A	2023 年 3 月 23 日	量产
Rev.B	2023 年 10 月 24 日	首页增加 PGA=3
Rev.C	2023 年 11 月 10 日	更正 11.3.1 INT_OEN,FIFO_STA 偏移地址
Rev.D	2023 年 11 月 29 日	增加 DACON 寄存器: 电阻型导联脱落
	2024 年 4 月 3 日	增加小包装规格
Rev.E	2024 年 6 月 12 日	增加 PLTFMPD 寄存器
Rev.F	2024 年 8 月 23 日	管脚描述中增加上下拉说明, 增加 GPIO 寄存器描述

6. 管脚定义和功能描述

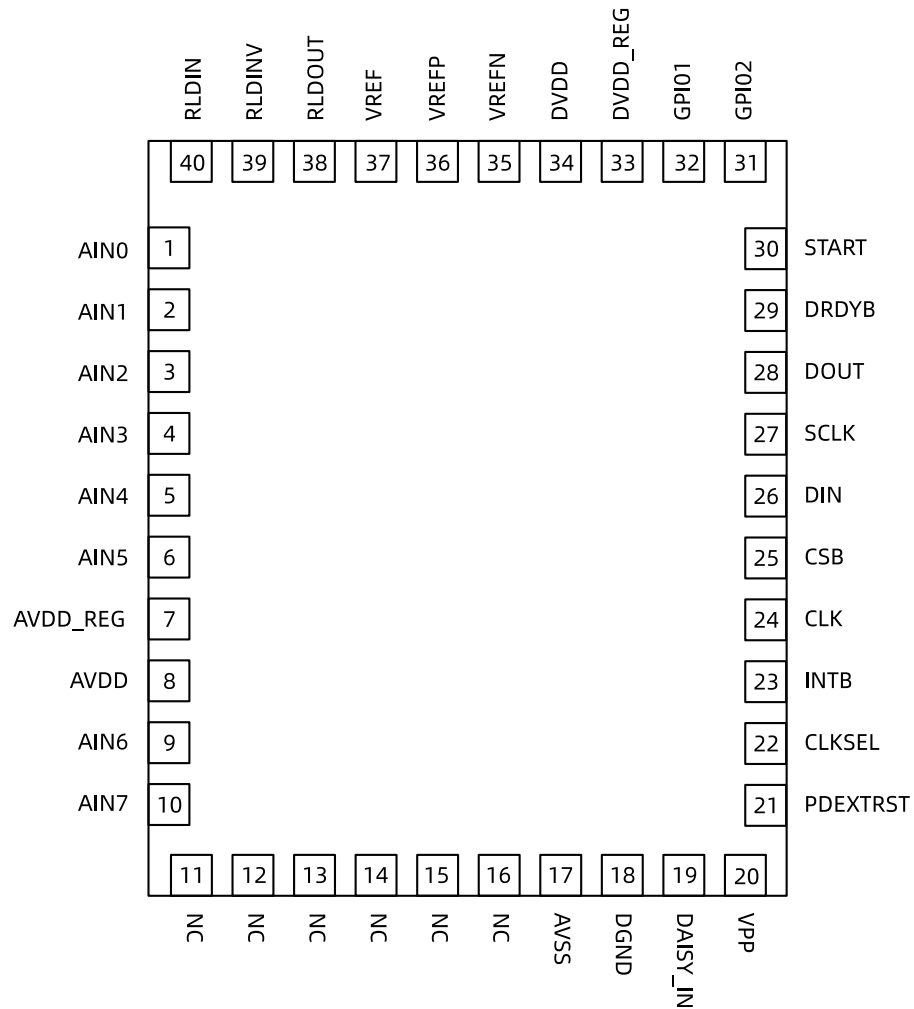


图1.40 脚 QFN 管脚图

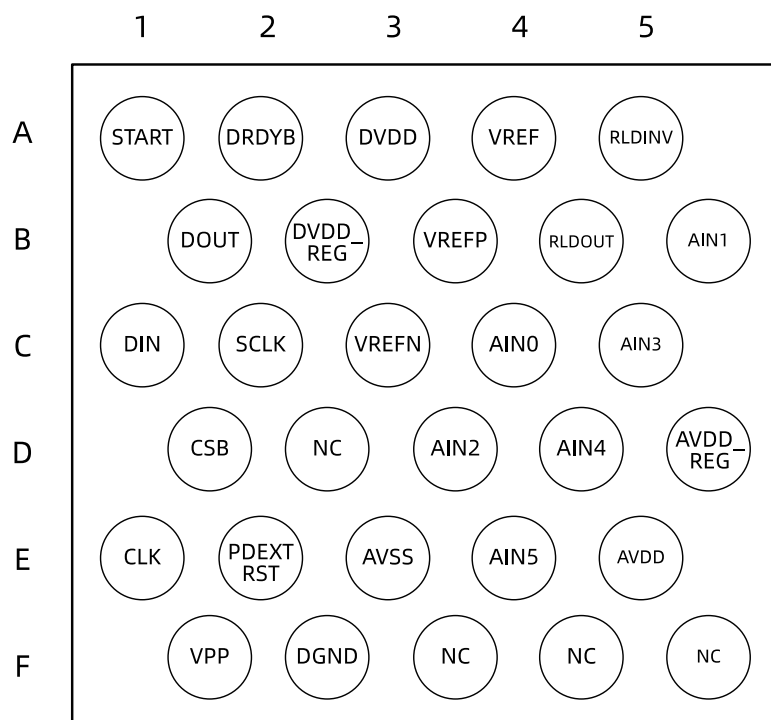


图2. WLCSP 管脚布局(Top View)

表1. 管脚描述

WLCSP	QFN40	名称	类型	说明
C4	1	AIN0	模拟输入	ADC 模拟输入 AIN0
B5	2	AIN1	模拟输入	ADC 模拟输入 AIN1
D3	3	AIN2	模拟输入	ADC 模拟输入 AIN2
C5	4	AIN3	模拟输入	ADC 模拟输入 AIN3
D4	5	AIN4	模拟输入	ADC 模拟输入 AIN4
E4	6	AIN5	模拟输入	ADC 模拟输入 AIN5
D5	7	AVDD_REG	模拟输出	模拟 1.8V LDO 输出, 外接对地 AVSS 1μF 电容
E5	8	AVDD	电源	模拟电源
	9	AIN6	模拟输入	ADC 模拟输入 AIN6
	10	AIN7	模拟输入	ADC 模拟输入 AIN7
	11	NC		
	12	NC		
F5	13	NC		
F4	14	NC		
D2	15	NC		
F3	16	NC		
E3	17	AVSS	电源	模拟地
F2	18	DGND	电源	数字地
	19	DAISY_IN	数字输入	菊花链输入; 内部有弱上拉, 不使用时悬空。
F1	20	VPP	电源	OTP 编程电源; 用户模式建议接地
E2	21	PDEXTRST	数字输入	关掉或者系统复位; 低电平有效, 内部有弱上拉。
	22	CLKSEL	数字输入	选择主时钟, 内部有弱上拉
	23	INTB	数字输出	数字中断指示信号; 低电平有效, 内部有弱上拉
E1	24	CLK	数字输入/输出	外部主时钟输入或内部时钟输出
D1	25	CSB	数字输入	SPI 片选; 低电平有效
C1	26	DIN	数字输入	SPI 数据输入
C2	27	SCLK	数字输入	SPI 时钟
B1	28	DOUT	数字输出	SPI 数据输出
A2	29	DRDYB	数字输出	数据准备好指示; 低电平有效, 内部有弱上拉
A1	30	START	数字输入	控制 ADC 开始转换
	31	GPIO0	数字输入/输出	通用输入输出引脚 0
	32	GPIO1	数字输入/输出	通用输入输出引脚 1
B2	33	DVDD_REG	数字输出	数字 1.8V LDO 输出, 外接对 DGND 1μF 电容
A3	34	DVDD	电源	数字电源
C3	35	VREFN	模拟输入	ADC 模拟参考地, 必须接 AVSS
B3	36	VREFP	模拟输入/输出	ADC 正端参考电压, 外接 10μF 电容到 VREFN
A4	37	VREF	模拟输出	内置参考电压, 外接 1μF 电容到 AVSS
B4	38	RLDOUT	模拟输出	右腿驱动输出端
A5	39	RLDINV	模拟输入	右腿驱动反向端, 如果不用, 建议接地
	40	RLDIN	模拟输入	右腿驱动输入到 MUX 或者右腿驱动运放同相端, 不用时建议接 AVDD

7. 性能规格

7.1. 绝对最大额定值

在自然通风温度范围内测得（除非另有说明）。

表2. 额定电压值

	最小值	最大值	单位
AVDD 至 AVSS	-0.3	3.9	V
DVDD 至 DGND	-0.3	3.9	V
AVSS 至 DGND	-0.3	0.3	V
AVSS 的 VREFP 输入	AVSS-0.3	AVDD+0.3	V
模拟输入电压	AVSS-0.3	AVDD+0.3	V
数字输入电压	DGND-0.3	DVDD+0.3	V
数字输出电压 DGND	DGND-0.3	DVDD+0.3	V
输入电流（瞬时）		100	mA

7.2. ESD 额定值

表3. ESD 额定值

V(ESD) 静电释放	人体放电模式(HBM), 符合 ANSI/ESDA/JEDEC JS-001, 所有引脚	±8000	V
V(ESD) 静电释放	充电器件模型(CDM), 符合 JEDEC 规范 JESD22-C101, 所有引脚	±2000	V

7.3. 建议工作条件

表4. 工作条件

	最小值	典型值	最大值	单位
电源				
模拟电源(AVDD-AVSS)	2.4	3.3	3.6	V
数字电源(DVDD)	1.7	3.3	3.6	V
模拟输入				
满标量程差分输入电压范围		±VREF/增益		V
共模输入电压	请参阅 <i>PGA</i> 设置和输入范围部分的输入共模范围小节			
电压基准输入				
差分基准电压	AVDD ≥ 2.4V, V _{REF} = (VREFP – VREFN)	2		V
	AVDD ≥ 2.7V, V _{REF} = (VREFP – VREFN)	2.5		V
负输入(VREFN)		AVSS		V
正输入(VREFP)		AVSS+2.5		V
时钟输入				
外部时钟输入频率 CLKSEL 引脚=0	1.94	2.048	2.25	MHz
数字输入				
输入电压	DGND		DVDD	V
工作温度范围	–40		85	°C

7.4. 热性能信息

表5. 热性能

R _{θJA} 结至环境热阻	35 °C/W
-------------------------	---------

$R_{\theta JC}(\text{top})$ 结至外壳 (顶部) 热阻	31 °C/W
$R_{\theta JB}$ 结至电路板热阻	26 °C/W
ψ_{JT} 结至顶部特征参数	0.1 °C/W

7.5. 电气特性

最小和最大规格适用于 $T_A = 0^\circ\text{C}$ 至 85°C ; 所有规格的适用条件为: $DVDD = 3V$, $AVDD - AVSS = 3V$, $VREF = 2.5V$, 内部振荡器 $F_{CLK} = 2.048\text{MHz}$, $ADC \text{ Fmodclk} = 128\text{KHz}$, 数据速率 (F_{DR}) = 500SPS, 以及增益 = 6 (除非另有说明)。

表6. 电气特性

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
模拟输入					
输入电容			20		pF
输入电流(chop=8K)	T _A = -40°C 至 85°C, 输入= 1.5V			±200	pA
	其他 chop 频率			参考典型特性	
直流输入阻抗	无导联脱落	1000			MΩ
	电流源导联脱落检测 (ILEADOFF = 6 nA)			500	MΩ
	上拉电阻器导联脱落检测		10		MΩ
PGA 性能					
增益设置		1,2,3,4,6,8,12,24,48			
ADC 性能					
分辨率	数据速率高达 8kSPS, 无丢失码 24 位	24			Bits
数据速率	F _{CLK} =2.048MHz	128		8096	SPS
直流通道性能					
输入参考噪声	增益= 6, 2500 点, 10 秒的数据(250SPS)		2.9		μV _{PP}
	增益, 数据速率等其他条件	参考噪声特性			
积分非线性	满标量程, 最佳拟合		±2		ppm
失调误差	校正前, PGA gain=1		15		μV
	校正后, PGA gain=1		noise level		μV
失调误差漂移			30		nV/°C
增益误差	不包括电压基准误差, PGA gain= 1		0.1	±0.5	% of FS
	校正后, PGA gain= 1		±0.005		% of FS
增益漂移	不包括电压基准漂移		3		ppm/°C
交流通道性能					
CMRR 共模抑制比	F _{CM} = 50Hz、60Hz	-110	-117		dB
PSRR 电源抑制比	F _{PS} = 50Hz、60Hz		96		dB
串扰	F _{IN} = 50Hz、60Hz		-110		dB
SNR 信噪比	F _{IN} = 10Hz 输入, 增益= 12		110		dB
真(THD) 总谐波失真	10Hz, -0.5dBfs		-102		dB
右腿驱动(RLD) 放大器					
RLD 积分噪声	BW = 150Hz		2		μVRMS
增益带宽积	50kΩ 10pF 负载, 增益= 1		100		kHz
压摆率增益= 1	50kΩ 10pF 负载,		0.07		V/μs
RLD 放大器驱动强度	对 AGND 短路(AVDD = 3V)				
	对电源短路(AVDD = 3V)				
RLD 电流	峰值摆幅 (AVSS + 0.3V 至 AVDD + 0.3V) ,				

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
	AVDD = 3V				
总谐波失真	$F_{IN} = 10\text{Hz}$, 增益 = 1		-80		dB
共模输入范围					
共模电阻器匹配	内部 200k Ω 电阻器匹配	AVSS + 0.3		AVDD - 0.3	V
短路电流			1.1		mA
导联脱落检测					
频率有关设置	连续	DC, $F_{DR}/4$			Hz
电流有关设置	LOCON1. LO_CURRENT = 0x0		5		nA
	LOCON1. LO_CURRENT = 0x1		10		nA
	LOCON1. LO_CURRENT = 0x2		25		nA
	LOCON1. LO_CURRENT = 0x3		50		nA
	LOCON1. LO_CURRENT = 0x4		100		nA
电流精度			$\pm 20\%$		
比较器阈值精度			± 30		mV
外部基准					
输入阻抗			5.6		k Ω
参考输入电压 (VREFP)		0.5	2.5	2.6	V
内部基准					
输出电压	寄存器位 BUFCON[5] = 0, AVDD $\geq$ 2.4V		2		V
	寄存器位 BUFCON[1] = 1, AVDD $\geq$ 2.7V		2.5		V
VREF 精度			± 0.2		%
内部基准漂移	0°C 至 85°C		16		ppm
系统监控					
模拟电源读数误差			2		%
数字电源读数误差			2		%
器件唤醒	从上电到 DRDY 为低电平		150		mS
	待机模式		31.25		μ S
温度传感器读数, 电压	温度传感器读数, 电压 TA = 25°C		145300		μ mV
温度传感器读数, 系数			490		μ V/°C
测试信号频率		$F_{CLK} / 2^{21}$, $F_{CLK} / 2^{20}$			Hz
测试信号电压		± 2.5			mV
测试信号精度			± 2		%
时钟					
内部振荡器时钟频率	标称频率		2.048/16.3 84		MHz
内部时钟频率	TA = 25°C			± 0.5	%
	0°C $\leq$ TA $\leq$ 70°C				
	-40°C $\leq$ TA $\leq$ 85°C			± 3	%
内部振荡器启动时间			20		μ s
内部振荡器功耗			120		μ W
数字输入/输出 (DVDD = 1.7V 至 3.6V)					
VIH 高电平输入电压		0.8 DVDD		DVDD + 0.1	V
VIL 低电平输入电压		-0.1		0.2 DVDD	V
VOH 高电平输出电压	I _{OH} = -500 μ A	0.9 DVDD			V

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
VOL 低电平输出电压	$I_{OL} = +500 \mu A$			0.1 DVDD	V
IIN 输入电流	$0 V < V_{DigitalInput} < DVDD$	-10		10	μA
EEG/ECG 模式 (RLD 关闭)					
唤醒时间	从休眠到 ADC Start	10			ms
AVDD 电流	AVDD = 3.3V		190		μA
DVDD 电流	DVDD = 3.3V		100		μA
工作功耗	DVDD = 3.3V, AVDD = 3.3V		950		μW
休眠功耗			0.2		μA

7.6. 典型特性

测试条件: $T_A = +25^\circ C$, AVDD = 3.3V, AVSS = 0V, DVDD = 3.3V, 内部参考电压 VREFP = 2.5V, VREFN = AVSS, 内部时钟振荡器 2.048MHz, ADC modclk 时钟=128KHz, Data rate = 500 SPS, PGA chop 时钟 = 8KHz, PGA Gain = 6 (其他条件见特殊说明)。

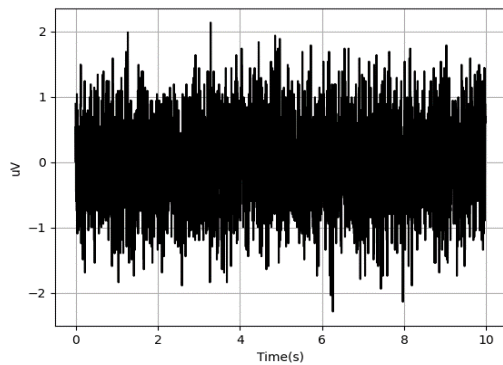


图3. 10 秒等效输入噪声

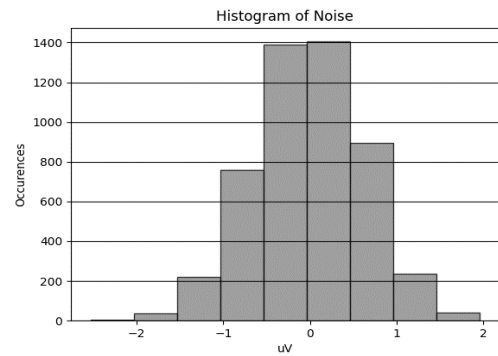


图4. 噪声直方图

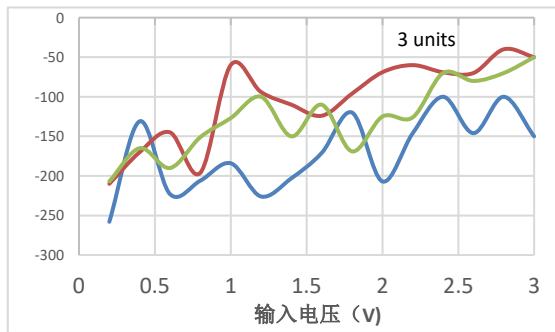


图5. 输入偏置电流 Vs 输入电压

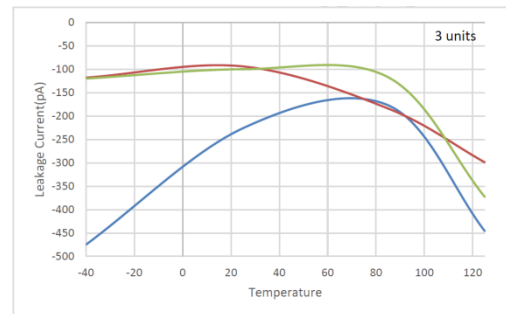


图6. 输入偏置电流 Vs 温度

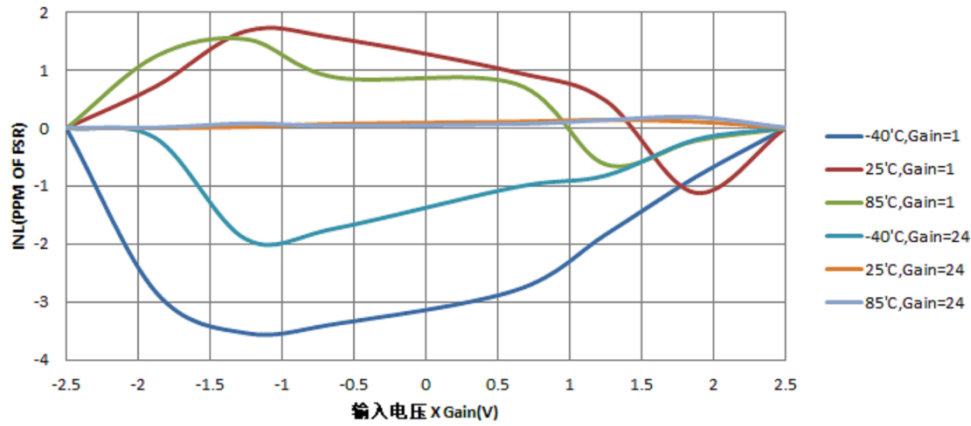


图7. 温度和 PGA Gain 对 INL 的影响

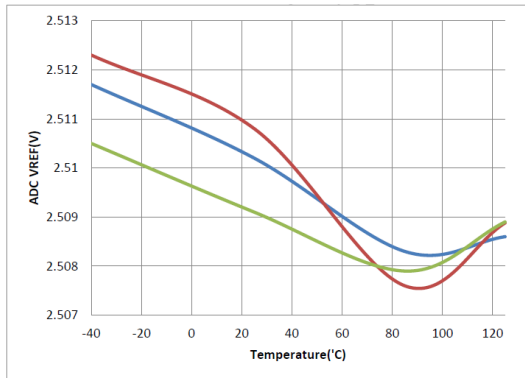


图8. 内部参考电压温漂

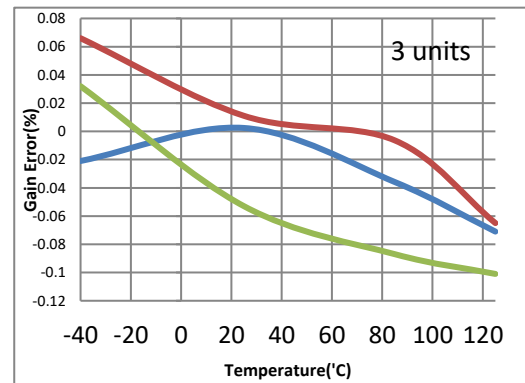


图9. 增益误差温漂

8. 噪声特性

LH001-91 的等效输入噪声与 PGA 增益和 ADC 的输出数据速率相关, PGA 增益越大等效输入噪声越小, ADC 对噪声的贡献也越小; ADC 的输出速率越慢, 过采样则越高, 等效输入噪声就越小。

本节表格显示了不同输出速率, 增益条件下的等效输入噪声特性。所有测试基于 2.5V 内部参考电压和 3.3V 模拟电源, ADC Fmodclk=128KHz, PGA chop 时钟=8K。测量时输入 mux 选择内部短路通道。

表格中的 RMS 噪声和峰峰值噪声是实测的结果, 测量至少包括 2500 个数据点, SNR, Noise-Free Bits 以及 ENOB 是根据 RMS 或者峰峰值计算得到的。

表7. 等效输入噪声有效值 (uRMS)、峰峰值 (uVpp) 与增益, 输出数据速率的关系

数据速率 (SPS)	PGA 增益=1					PGA 增益=2				
	μV_{RMS}	μV_{PP}	SNR	Noise FreeBits	ENOB	μV_{RMS}	μV_{PP}	SNR	Noise FreeBits	ENOB
125	1.3	8.35	122.66	19.19	20.37	0.67	4.43	122.39	19.11	20.33
250	1.9	12.54	119.36	18.61	19.83	0.94	6.7	119.45	18.51	19.84
500	2.6	18.78	116.64	18.02	19.37	1.38	9.108	116.12	18.07	19.29
1000	4.15	34.6	112.58	17.14	18.70	2.13	15.1	112.35	17.34	18.66
2000	11	88.6	104.11	15.78	17.29	5.54	40.1	104.05	15.93	17.28
4000	53.6	381.5	90.36	13.68	15.01	26.1	190.8	90.59	13.68	15.05
8000	289.4	2238	75.71	11.13	12.58	146	1056	75.63	11.21	12.56

数据速率	PGA 增益=3					PGA 增益=4				
------	----------	--	--	--	--	----------	--	--	--	--

(SPS)	μV_{RMS}	μV_{PP}	SNR	Noise FreeBits	ENOB	μV_{RMS}	μV_{PP}	SNR	Noise FreeBits	ENOB
125	0.46	3.04	122.14	19.06	20.29	0.38	2.51	121.30	18.93	20.15
250	0.66	4.36	119.00	18.54	19.77	0.53	3.5	118.41	18.45	19.67
500	0.96	7.36	115.75	17.79	19.23	0.78	5.148	115.05	17.89	19.11
1000	1.54	10.9	111.64	17.22	18.55	1.26	8.5	110.89	17.17	18.42
2000	3.96	31.8	103.44	15.68	17.18	3.17	24.3	102.88	15.65	17.09
4000	18	130.4	90.29	13.64	15.00	13.8	108.9	90.10	13.49	14.97
8000	99.8	729.1	75.42	11.16	12.53	74.2	604	75.49	11.02	12.54

数据速率 (SPS)	PGA 增益=6					PGA 增益=8				
	μV_{RMS}	μV_{PP}	SNR	Noise FreeBits	ENOB	μV_{RMS}	μV_{PP}	SNR	Noise FreeBits	ENOB
125	0.29	1.92	120.13	18.73	19.95	0.26	1.72	118.58	18.47	19.70
250	0.43	2.84	116.70	18.16	19.39	0.37	2.45	115.51	17.96	19.19
500	0.63	4.43	113.39	17.52	18.84	0.55	4.36	112.07	17.13	18.62
1000	1.04	7.6	109.03	16.74	18.11	0.94	6.75	107.41	16.50	17.84
2000	2.5	16.7	101.42	15.61	16.85	2.17	15.6	100.15	15.29	16.64
4000	9.77	78.5	89.58	13.37	14.88	7.96	58.1	88.86	13.39	14.76
8000	50.7	360.4	75.28	11.18	12.50	38.8	321.1	75.10	10.93	12.48

数据速率 (SPS)	PGA 增益=12					PGA 增益=24				
	μV_{RMS}	μV_{PP}	SNR	Noise FreeBits	ENOB	μV_{RMS}	μV_{PP}	SNR	Noise FreeBits	ENOB
125	0.23	1.52	116.12	18.06	19.29	0.2	1.32	111.31	17.27	18.49
250	0.32	2.13	113.25	17.58	18.81	0.29	1.92	108.09	16.73	17.95
500	0.49	3.26	109.55	16.96	18.20	0.44	3	104.46	16.08	17.35
1000	0.83	6.44	104.97	15.98	17.44	0.77	5.8	99.60	15.13	16.55
2000	1.9	15	97.78	14.76	16.24	1.71	13.9	92.68	13.87	15.39
4000	6.23	48.5	87.47	13.07	14.53	4.8	43.9	83.71	12.21	13.91
8000	28	195	74.41	11.06	12.36	18	124	72.23	10.71	12.00

数据速率 (SPS)	PGA 增益=48				
	μV_{RMS}	μV_{PP}	SNR	Noise FreeBits	ENOB
125	0.18	1.19	106.21	16.42	17.64
250	0.27	1.79	102.69	15.83	17.06
500	0.41	2.81	99.06	15.18	16.45
1000	0.73	5.54	94.05	14.20	15.62
2000	1.62	12.7	87.12	13.00	14.47
4000	4.39	31.9	78.47	11.67	13.03
8000	14	105	68.39	9.95	11.36

9. 详细描述

LH001-91 是具有集成式可编程增益放大器(PGA) 的低功耗、24 位 Δ - Σ 模数转换器(ADC)。这些器件包含各种 ECG 专用功能, 使其非常适用于可扩展心电图(ECG)、脑电图(EEG) 和肌电图(EMG) 应用。通过关闭 ECG 专用电路, 这些器件还可用于高性能数据采集系统。

LH001-91 ECG 具有高度可编程的多路复用器(MUX), 用于实现温度、电源、输入短路和 RLD 测量。此外。可以从以下七种设置中选择 PGA 增益: 1、2、3、4、6、8、12、24 或 48。器件中的 ADC 提供 125SPS 至 8kSPS 的数据速率。

内部基准可以编程为 2V 或 2.5V。内部振荡器会产生 2.048MHz 时钟。多功能右腿驱动(RLD) 模块用于提高信号通道的 CMRR。可通过使用上拉或下拉电阻器或者电流源或电流沉来完成导联脱落检测, 同时还提供内部交流导联脱落检测功能。

使用与 SPI 兼容的接口与器件进行通信。该器件提供 2 个通用 GPIO 引脚。可使用 START 引脚同步多个器件。

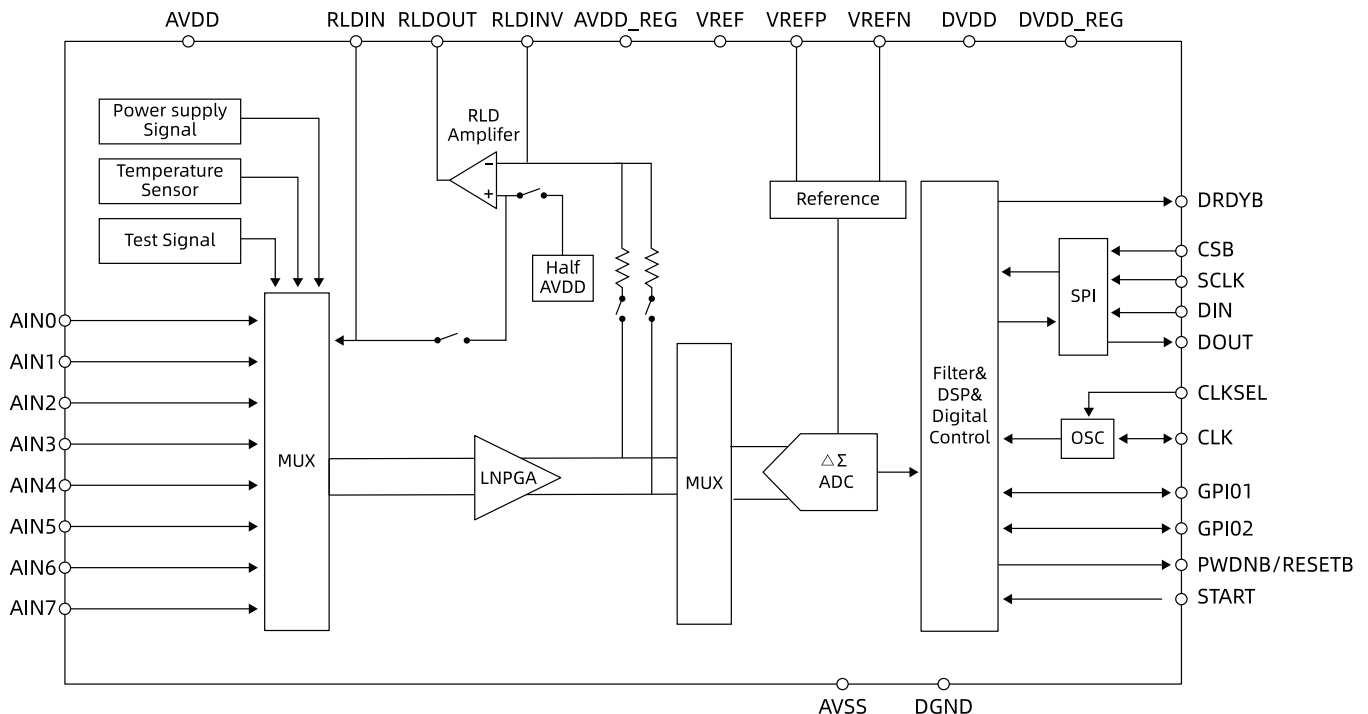


图10. 顶层结构框图

10. 模拟功能模块详细介绍

10.1. 输入选择器 (MUX)

外部输入通道既可以配置成差分, 也可以配置成单端, 既可以配置与 ADC 的正输入端, 也可以配置到 ADC 的负输入端, 由寄存器 ADCCHCON 控制实现上述功能。

LH001-91 提供了 8 个输入, 可以配置成 4 对差分输入和可以配成 8 路单端输入。差分通道建议配置相邻通道, 比如 AIN0/AIN1。单端配置建议将 RLDIN 配置成共模输入, AIN0~7 位单端输入通道。不使用的通道建议浮空, 从而减少输入漏电, RLDIN 可以连接到地或者 VREFP。

如果测量 ADC 信号链的噪声, 可以通过配置寄存器 ADCCHCON.PSEL=0xb, ADCCHCON.NSEL=0xf 将输入短接到共模电平。

如果上电做子系统验证, 可以设置 ADCCHCON.PSEL=0xd, ADCCHCON.NSEL=0xf 提供内部生成的测试信号

利用该功能测试整个信号链。该信号幅度固定为 $\pm 2.5\text{mV}$, LOCON3.TEST_FREQ 控制该信号的频率。注意, 虽然测试信号类似于 IEC60601-2-51 规范中所述的 CAL 信号, 但该功能不适用于合规性测试。

如果测试片内电压源, 可以设置 $\text{ADCCHCON.PSEL} = 0x9$ 或者 $0xa$, $\text{ADCCHCON.NSEL} = 0xf$, 选择 AVDD, 但实际测量的电压值为: $(\text{MAVDDP} - \text{MAVDDN}) = 0.5 \times (\text{AVDD} - \text{AVSS})$ 。同理测量 DVDD, 实际测量的电压值为: $(\text{MDVDDP} - \text{MDVDDN}) = 0.5 \times (\text{DVDD} - \text{DVSS})$ 。为避免在测量电源时使 PGA 饱和, 请将增益 PGA_GAIN.GAIN 设置为 1。

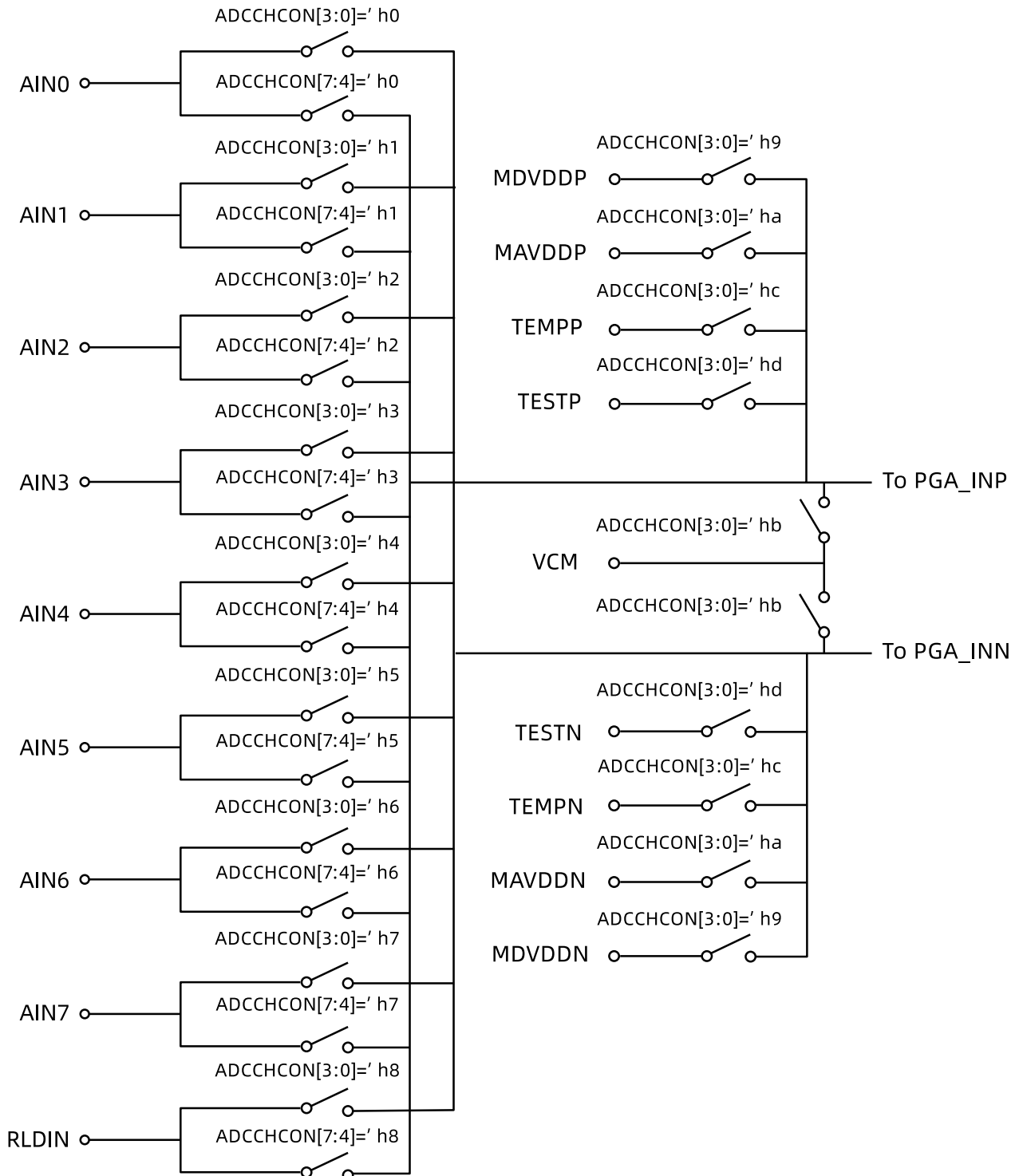


图11. 输入选择结构框图

10.2. 导联脱落

良好的电极连接才能够获得可靠的测量结果，所以必须监控这些电极连接，以验证是否存在合适的连接。LH001-91 导联脱落检测功能块为从各种导联脱落检测策略中进行选择提供了极大的灵活性。尽管该功能称为导联脱落检测，但它实际上是电极脱落检测。基本原理是注入激励信号并测量响应以确定电极是否脱落。如图 12 中的导联脱落检测功能方框图所示，该电路提供两种不同的电极状态确定方法。这些方法具有不同的激励信号频率成分。可以使用 LOCON1~3 寄存器在每个通道的基础上选择性地完成导联脱落。可以在检测电路启用时禁用内部激励电路。

10.2.1. 直流导联脱落

在该方法中，导联脱落激励是使用直流信号完成的。检测管脚 AIN0, AIN1 和 RLDOUT 的导联脱落，参考 LOCON3.DCLO_EN 使能检测的管脚。从拉电流或灌电流系统中选择一个直流激励信号。通过设置 LOCON2 寄存器进行选择。使用 LOCON1.LO_CURRENT 寄存器设置电流的幅度。通过配置寄存器 DACCON.LEADOFF_RES 也可以上拉或者下拉电阻。通道的一侧被拉至电源，另一侧被拉至接地。与 10MΩ 上拉或下拉电阻器相比，拉电流或灌电流可提供更大的输入阻抗。

可通过查看器件的数字输出代码或通过片上比较器监视输入电压来实现响应检测。如果任一电极关闭，那么上拉或下拉电流会使通道饱和。查看输出代码以确定 P 侧或 N 侧是否关闭。要查明哪一侧关闭，请检查比较器输出，比较器输出存储在 LOFF_STAT 寄存器中，读 ADC 数据时自动读走 LOFF_STAT 寄存器，参考 SPI 章节获得如何读 LOFF_STAT。在转换期间，通过使用比较器和 4 位 DAC（其电平由 LOCON1.LOTHRSHOLD 寄存器中设置）同时监视输入电压。

10.2.2. 交流导联脱落

该方法使用带外交流信号进行激励。通过在输入端以固定频率提供上拉和下拉电阻器来产生交流信号。交流信号会通过抗混叠滤波器以防止混叠。使用 LOCON2.ACLO_EN 开启。激励频率是输出数据速率的函数，即 FDR/4，注意 SINC filter 不同的 OSR（参考 CONFIG1.DR）对应不同的 FDR。该带外激励信号会通过通道并在输出端测量。交流激励信号以高于目标频带的频率引入，会产生一个带外差分信号，该信号可以单独滤除并进行处理。通过测量输出频谱处激励信号的幅度，可以计算导联脱落状态。因此，交流导联检测与 ECG 信号采集同时完成。

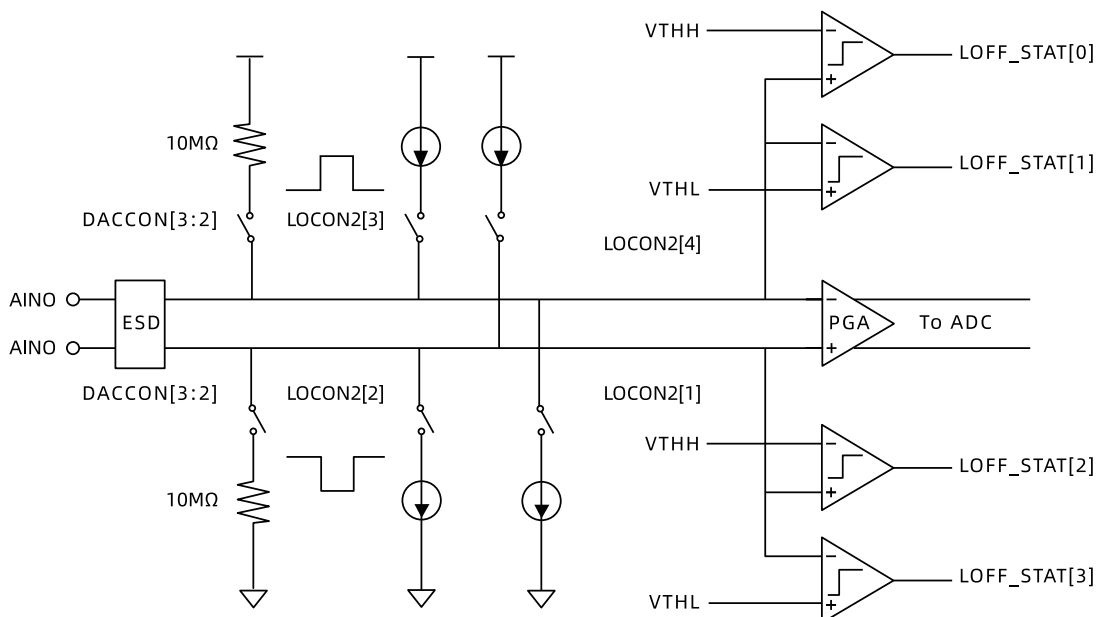


图12. AIN0/AIN1 导联脱落

10.2.3. 右腿驱动导联脱落

通过将 RLD 放大器断电来确定 LH001-91 中是否连接了 RLD 电极。断电后, 通过两种测量程序来确定 RLD 电极连接状态: 拉电流, 如下图所示。设置比较器的基准电平, 以确定可接受的 RLD 阻抗阈值。

当 RLD 放大器通电时, 电流源不起作用。可使用比较器来检测 RLD 放大器输出端的电压。比较器阈值由用于设置其他负输入阈值的相同 LOCON1.LOTHRSHOLD] 位进行设置。

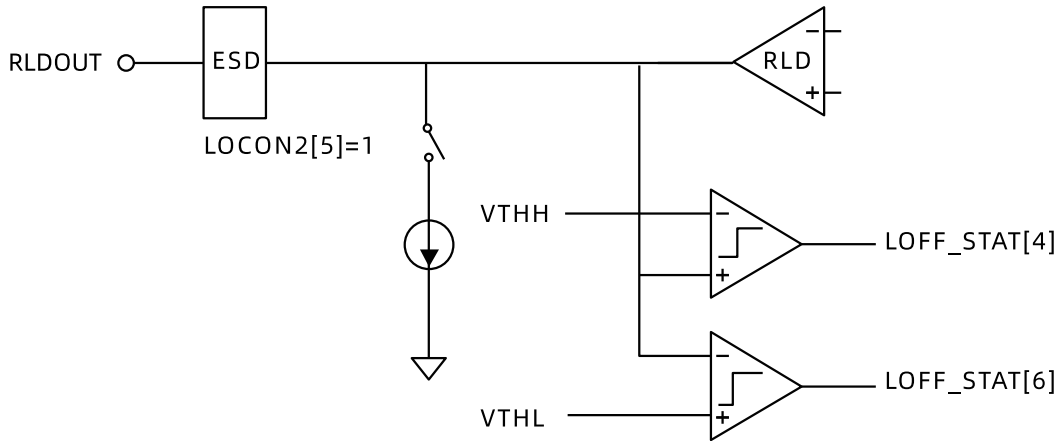
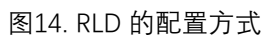


图13. RLD 导联脱落

10.3. 右腿驱动提高 CMRR

可使用右腿驱动 (RLD) 电路来抵消 ECG 系统中由于电源线和其他源 (包括荧光灯) 导致的共模干扰。RLD 电路检测所选电极组的共模电压, 并通过使用反相共模信号驱动人体来创建负反馈环路。负反馈环路将共模波动限制在较窄的范围内, 具体取决于环路增益。

可通过寄存器 RLDCON.RLDREFSEL 设置内部生成的 RLD 基准电压 ($(AVDD + AVSS)/2$), 也可以通过电阻分压器在外部提供该基准电压。如果未使用 RLD 功能, 则使用 RLDCON.EN 使放大器断电, 该位还用于菊花链模式, 以使除一个 RLD 放大器之外的所有 RLD 放大器断电。



低噪声可编程增益放大器 (PGA) 主要测试高精度低速信号如 DC, ECG, EEG。外部模拟输入 AIN0~AIN7 通过 mux 选通, 参考寄存器 ADCCHCON。PGA 对于全差分输入, 输入电压的范围是 $\pm V_{REF}/Gain$ 。增益可以配置为 1,2,3,4,6,8,12,24,48, 参考寄存器 PGA_GAIN。PGA 的输入如系统图所示包含两个 buffer, buffer 输出驱动主 PGA 增益放大部分。输入 buffer 输出有两个大电阻, 如果开关选通(PGA_CTRL.CMSENSE_EN=1), 可以得到输入信号的共模电压 VCM。此共模电压可以用于 ECG, EEG 的右腿驱动电压回路。因为输入 Buffer 的使用, 平均输入电流可以限制在 300pA 范围, 适合外部阻抗比较大的应用。基于图中的电路结构, 输入电压的绝对值可以在{AVSS+100mV, AVDD-100mV}范围, 共模电压灵活变化, 差分电压不超过满幅电压。

Δ - Σ 转换器的这一特性可极大地降低奈奎斯特 ADC 通常所需的抗混叠滤波器的复杂性。

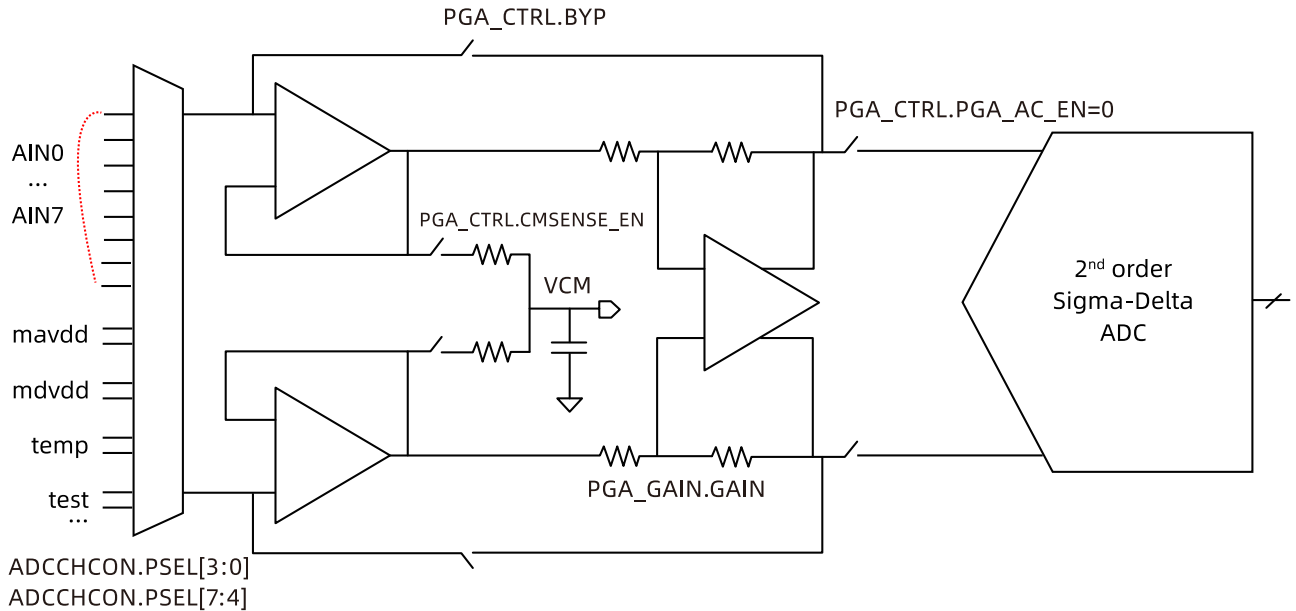


图15. 高精度 PGA 及 ADC 信号链路

10.5. 温度传感器

LH001-91 包含一个片上温度传感器, 该传感器使用两个内部二极管, 其中一个二极管的电流密度是另一个二极管的 16 倍。二极管的电流密度的差异可产生与绝对温度成比例的电压差。

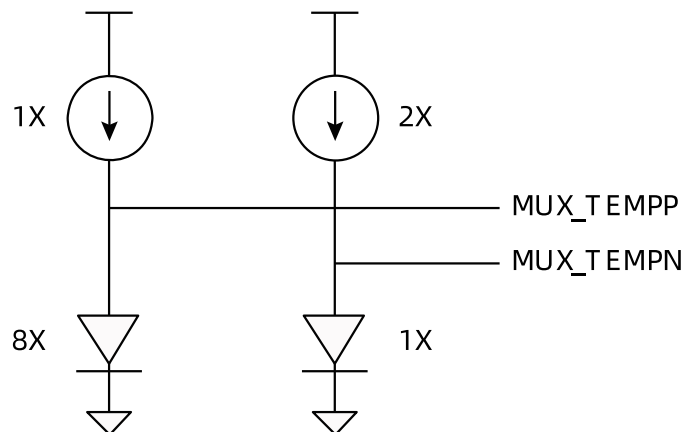


图16. 温度传感器

由于封装到印刷电路板(PCB) 的低热阻, 内部传感器可密切跟踪 PCB 温度。LH001-91 的自发热会导致读数高于周围 PCB 的温度。等式的比例因子可将温度读数转换为°C。在使用该公式之前, 应将温度读数代码转换 μV 。

$$\text{Temperature (}^{\circ}\text{C)} = \left[\frac{\text{Temperature Reading (}\mu\text{V)} - 145,300 \mu\text{V}}{490 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}} \right] + 25^{\circ}\text{C}$$

10.6. 参考电压

下图显示了 LH001-91 内部基准的简化方框图。该基准电压是相对于 AVSS 生成的。在使用内部电压基准时, 需要将 VREFN 连接到 AVSS。

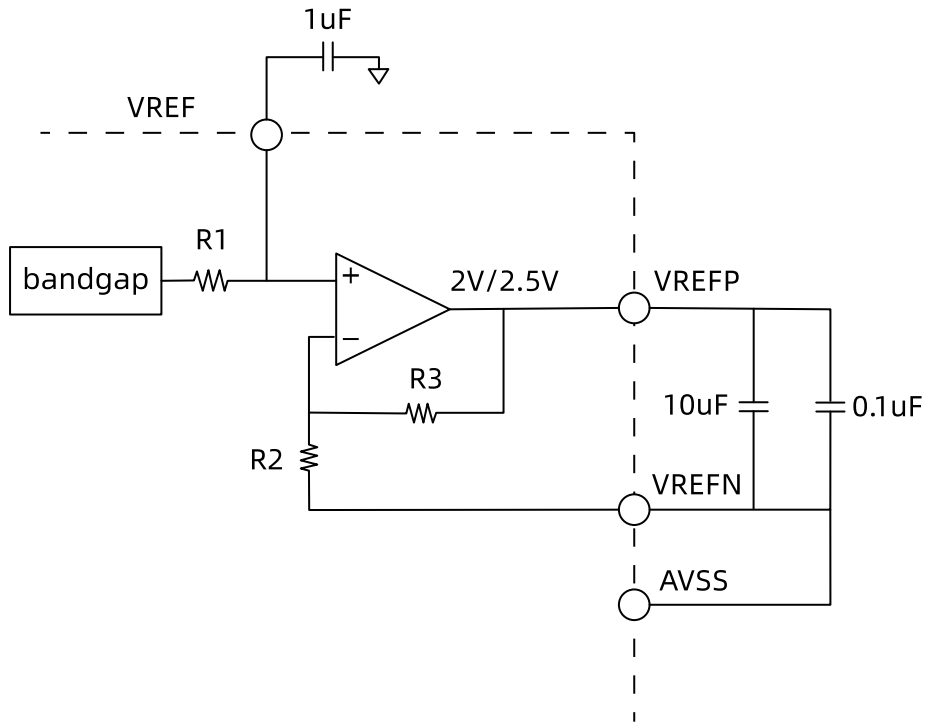


图17. 内部基准

11. 数字功能模块介绍

11.1. 时钟

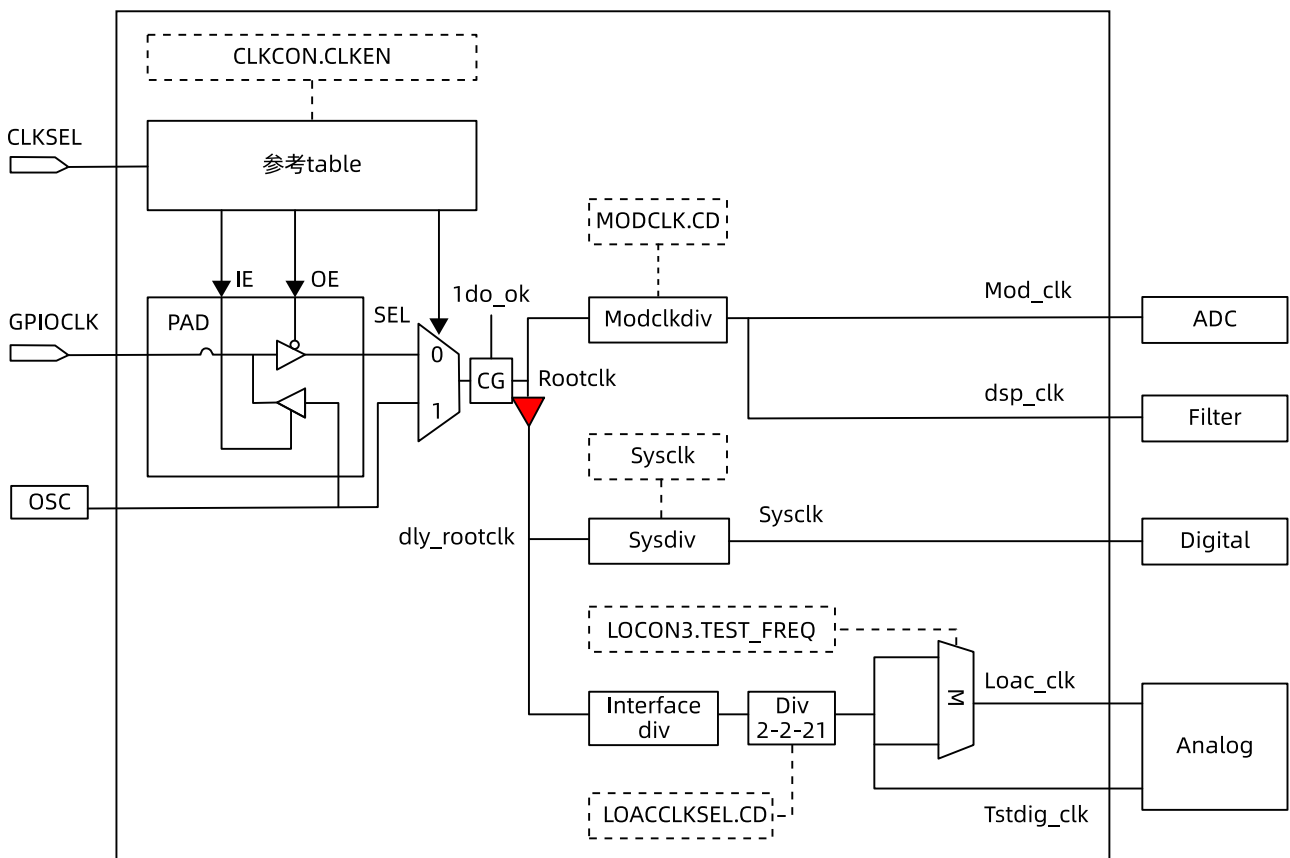


图18. 时钟架构

- 1) clock 源来自内部的 OSC 和外部 PAD CLK
- 2) OSC 频率 2.048Mhz

- 3) 外部输入 CLK
如不使用 PAD 时钟, PAD 时钟源必须接低, 如果使用外部输入 CLK, 确保上电期间时钟为固定电平
- 4) CLKSEL 和 CLKCON.CLKEN 配合实现选择 (表格 8)
内部 OSC 作为系统主时钟
外部输入 CLK 时钟作为主时钟

表8. clock 配置

CLKSEL PAD	CLKCON.CLKEN	CLOCK SOURCE	CLK PAD status	IE	OE
0	x	外部时钟	输入外部时钟	1	0
1	0	内部时钟	三态 (default)	0	0
1	1	内部时钟	输出内部时钟	0	1

11.2. SPI

11.2.1. 时序需求

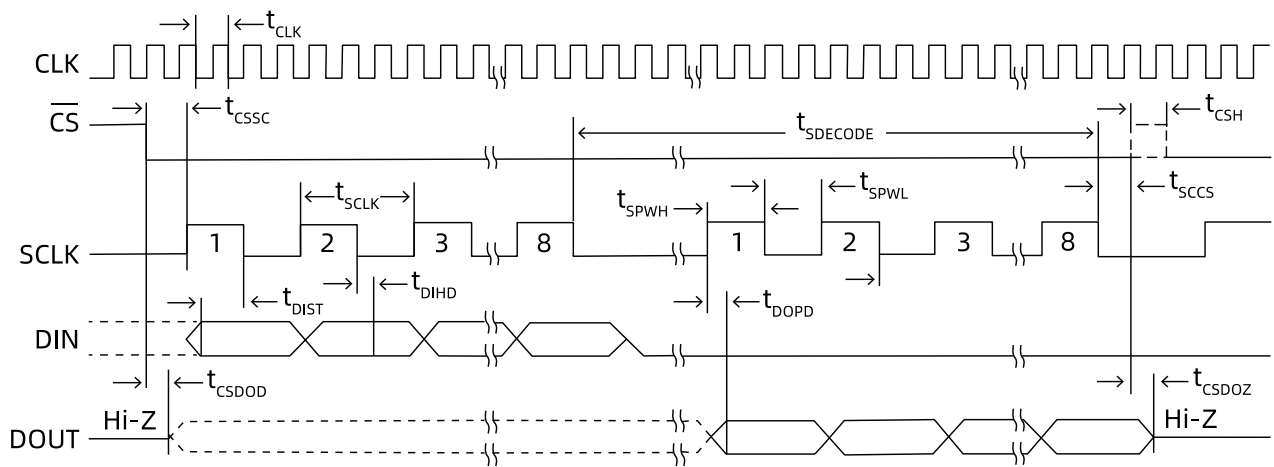


图19. SPI 接口时序

注意: SPI 设置为 CPOL = 0 且 CPHA = 1。

表9. 上图的时序要求

参数	说明	MIN	TYP	MAX	单位
tCLK	主时钟周期	62.5		500	ns
tCSSC	$\overline{CS}$ 低电平至第一个 SCLK, 建立时间	6			ns
tSCLK	SCLK 周期	50			ns
tSPWH, L	SCLK 脉冲宽度, 高电平和低电平	15			ns
tDIST	DIN 有效至 SCLK 下降沿: 建立时间	10			ns
tDIHD	SCLK 下降沿之后的有效 DIN: 保持时间	10			ns
tDOPD	SCLK 上升沿至 DOUT 有效: 建立时间			12	ns
tCSH	$\overline{CS}$ 高电平脉冲	2			tCLKs
tCSDOD	$\overline{CS}$ 低电平至 DOUT 驱动	10			ns
tSCCS	第八个 SCLK 下降沿至 $\overline{CS}$ 高电平	3			tCLKs
tSDECODE	命令解码时间	4			tCLKs
tCSDOZ	$\overline{CS}$ 高电平至 DOUT Hi-Z			10	ns

规格适用于 TA = -40°C 至 +85°C (除非另外说明)。DOUT 上的负载 = 20pF || 100kΩ。

11.2.2. SPI 接口

SPI 兼容串行接口包含四个信号: $\overline{\text{CS}}$ 、SCLK、DIN 和 DOUT。该接口读取转换数据, 对寄存器进行读取和写入, 并控制 LH001-91 的运行。 $\overline{\text{DRDY}}$ 输出用作状态信号, 以指示数据何时就绪。当新数据可用时, $\overline{\text{DRDY}}$ 变为低电平。

片选引脚 (CSn)

片选 (CSn) 可选择用于 SPI 通信的 LH001-91 器件。当 CSn 处于低电平时, 串行接口处于活动状态。在整个串行通信过程中, CSn 必须保持低电平。串行通信完成后, 始终等待四个或更多 t_{CLK} 周期, 然后再将 CSn 置于高电平。当 CSn 置于高电平时, 串行接口复位, SCLK 和 DIN 被忽略, DOUT 进入高阻抗状态。无论 CSn 处于高电平还是低电平, 当数据转换完成时, $\overline{\text{DRDY}}$ 都会变为有效。选择 LH001-91 后, 器件会尝试每八个串行时钟解码并执行一次命令。如果器件停止执行串行命令, 则可能出现了额外的时钟脉冲, 使串行接口进入未知状态。要将串行接口重置为已知状态, 请将 CSn 置为高电平, 然后再次置为低电平。

串行时钟 (SCLK)

SCLK 是串行外设接口 (SPI) 串行时钟。它用于移入命令并从器件中移出数据。串行时钟 (SCLK) 在 DIN 和 DOUT 引脚上按照时钟脉冲将数据移入和移出 LH001-91。尽管输入存在迟滞, 仍应尽可能保持 SCLK 的纯净, 以防因干扰而意外强制执行时钟事件。时序要求: 串行接口表中指定了 SCLK 的绝对最大限制。

选择 LH001-91 (CSn = low) 后, 器件会尝试每八个串行时钟解码并执行一次命令。因此, 在每次串行传输时提供八个 SCLK 的倍数, 以使接口保持正常工作模式。如果接口由于额外的串行时钟而停止工作, 则通过将 $\overline{\text{CS}}$ 切换为高电平并重新切换为低电平进行复位。

对于单个器件, SCLK 所需的最低速度取决于通道数、分辨率位数和输出数据速率。有关多个级联器件, 请参阅级联配置部分。Equation 1, 2 显示了最低 SCLK 速度的计算方法。

$$\text{DC mode} = 0 : t_{\text{SCLK}} < (t_{\text{DR}} - 4t_{\text{CLK}}) / (\text{NBITS} \times \text{NCHANNELS} + 24) \quad (1)$$

$$\text{DC mode} = 1 : t_{\text{SCLK}} < (t_{\text{DR}} - 4t_{\text{CLK}}) / (\text{NBITS} \times \text{NCHANNELS}) \quad (2)$$

例如, 在直流模式关闭情况下, 根据公式 1 如果以 500SPS 的数据速率使用 LH001-91 (一个通道, 24 位分辨率, 系统时钟 16.384MHz), 则最小 SCLK 速度为 41.66kHz。

可通过将器件置于 RDATA 模式或针对数据按需发送 RDATA 命令来检索数据。Equation 1, 2 的 SCLK 速率限制也适用于 RDATA。对于 RDATA 命令, 如果必须在两个连续的 $\overline{\text{DRDY}}$ 信号之间读取数据, 那么该限制适用。Equation 1, 2 假设在数据捕获之间没有发出其他命令。

数据输入引脚 (DIN)

数据输入引脚 (DIN) 与 SCLK 一起用于与 LH001-91 通信 (操作码命令和寄存器数据)。该器件在 SCLK 的下降沿锁存 DIN 中的数据。

数据输出引脚 (DOUT)

数据输出引脚 (DOUT) 与 SCLK 一起用于从 LH001-91 中读取转换和寄存器数据。DOUT 中的数据在 SCLK

的上升沿移出。DOUT 在 $\overline{CS}$ 处于高电平时进入高阻抗状态。下图中表示 LH001-91 的 DOUT 时序, 如果是 DC mode 打开的情况下没有图中的 24bit 的 STAT, 只输出 24bits 的数据。

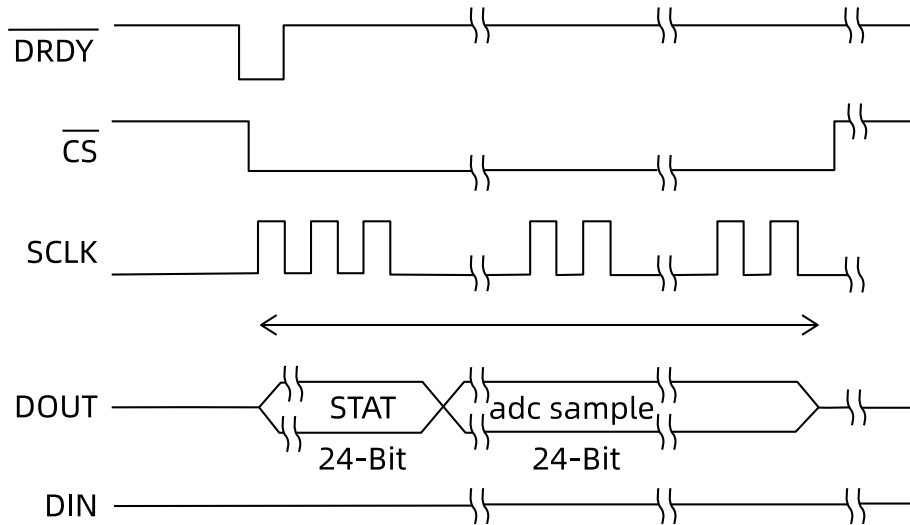


图20. SPI 总线数据输出

11.2.3. 数据检索

可通过以下两种方法之一完成数据检索:

1. RDATA: 连续读取数据命令设置在不发送操作码的情况下连续读取数据的器件模式。有关更多详细信息, 请参阅 RDATA: 连续读取数据 部分。
2. RDATA: 读取数据命令仅从器件中读取一个数据输出。有关更多详细信息, 请参阅 RDATA: 读取数据 部分。

有关更多详细信息, 请参阅 SPI 命令定义 部分。

可通过在 DOUT 上移出数据来读取转换数据。DOUT 上数据的 MSB 在第一个 SCLK 上升沿随时钟输出。

$\overline{DRDY}$ 会在第一个 SCLK 下降沿返回至高电平。在整个读取操作期间将 DIN 保持为低电平。

数据输出中的位数取决于通道数和每个通道的位数。每个通道数据的数据格式是二进制补码, MSB 在前。对于 DC 模式关闭的 LH001-91 来说数据位数为 24 个状态位 + 每个通道 24 位 $\times$ 1 个通道 = 48 位。对于 DC 模式开启的 LH001-91 来说数据位数只包含每个通道 24 位 $\times$ 1 个通道 = 24 位。24 个状态位的格式为: (1100 + LOFF_STAT[4:0] + GPIO[1:0] + 13 '0's)。

LH001-91 还提供多回读功能。将寄存器中的 DAISY_EN 位设置为 0(即关闭菊花链功能)可实现多回读功能。只需提供额外的 SCLK 即可多次读取数据; 读取最后一个字节后 MSB 数据字节会重复。

通道数据格式

LH001-91 会以二进制补码格式在输出一个通道的 24 位的数据, MSB 在前。LSB 具有 $V_{REF}/(2^{23} - 1)$ 的权重。正满量程输入可生成输出代码 7FFFFFFh, 负满量程输入可生成输出代码 800000h。输出在这些代码处针对超出满量程的信号进行削波。下表总结了不同输入信号的理想输出代码。

表10. 通道数据格式

理想输出代码与输入信号间的关系

输入信号, V_{IN} ($IN_{xP}-IN_{xN}$)	理想输出代码
$\geq V_{REF}$	7FFFFFFh
$V_{REF}/(2^{23}-1)$	000001h
0	000000h
$-V_{REF}/(2^{23}-1)$	FFFFFFh
$\leq -V_{REF}/(2^{23}/(2^{23}-1))$	800000h

11.2.4. 数据就绪引脚 (DRDYn)

DRDYn 是输出。当 DRDYn 转换为低电平时, 新转换数据就绪。CSn 信号对数据就绪信号没有任何影响。无论 CSn 信号的状态如何, SCLK 上的上升沿都会将 DRDYn 拉至高电平。因此, 在 SPI 总线中使用多个器件时, 使用 CSn 来选通 SCLK。DRDYn 的行为取决于器件是否处于 RDATA 模式或是否使用 RDATA 命令按需读取数据。有关更多详细信息, 请参阅 RDATA: 连续读取数据和 RDATA: 读取数据 部分。

使用 RDATA 命令读取数据时, 读取操作可能与出现的下一个 $\overline{DRDY}$ 重叠, 但不会导致数据损坏。

使用 START 引脚或 START 命令将器件置于正常数据捕获模式或脉冲数据捕获模式。下图显示了数据检索期间 $\overline{DRDY}$ 、DOUT 和 SCLK 之间的关系。DOUT 在 SCLK 的上升沿锁存。无论是从器件检索数据还是通过 DIN 引脚发送命令, 器件都会在 SCLK 的第一个下降沿将 DRDYn 拉为高电平。数据从状态字的 MSB 开始, 然后再读取 ADC 通道数据。断电的通道仍然在数据流中有一个位置; 但是数据无效, 可以将其忽略。

无论 CSn 的状态如何, 都会在第一个 SCLK 下降沿清除 DRDYn 信号。即使没有数据随时钟输出, 也仍然会清除 DRDYn 信号。如果使用 SPI 总线与同一总线上的其他器件进行通信, 请考虑此情况。

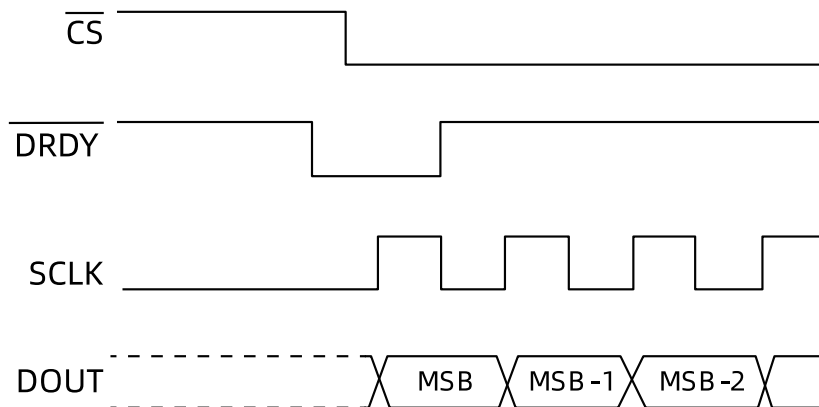


图21. 有数据检索时的 $\overline{DRDY}$ ($CS = 0$)

11.2.5. 启动模式

将 START 引脚拉为高电平并至少持续 2 个 t_{CLK} 周期, 或者发送 START 命令以开始转换。当 START 引脚为低电平或未发送 START 命令时, 器件不会发出 $\overline{DRDY}$ 信号 (转换停止)。

使用 START 操作码开始转换时, 将 START 引脚保持为低电平。LH001-91 具有两种控制转换的模式: 连续和单冲。可通过 SINGLE_SHOT (CONFIG1 寄存器的位 3) 选择模式。在多器件配置中, START 引脚用于同步器件 (有关更多详细信息, 请参阅多器件配置部分)。

11.2.6. 建立时间

建立时间 (t_{SETTLE}) 是当 START 信号被拉为高电平时转换器输出完全稳定的数据所需的时间。

当 START 引脚被拉为高电平或发送 START 命令时, 器件 ADC 会转换输入信号并且 $\overline{DRDY}$ 被拉为高电平。 $\overline{DRDY}$ 的下一个下降沿指示数据是可读的。图 22 显示了时序图, 数据 settle 时间显示了不同数据速率下作为 t_{CLK} 的函数的建立时间。建立时间取决于 f_{CLK} 和抽取率 (由 CONFIG1 寄存器中的 DR[2:0] 位进行控制)。

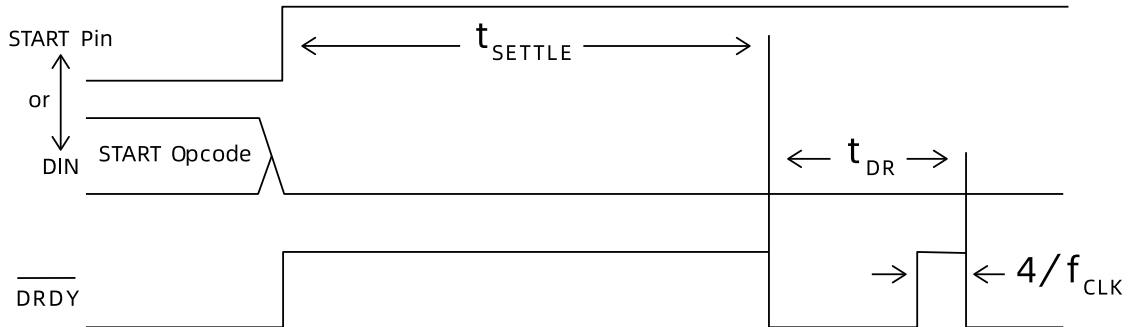


图22. 转换建立时间

表11. 数据 settle 时间

DR[2:0]	SETTLING TIME ⁽¹⁾	UNIT ⁽²⁾
000	4100	t_{MOD}
001	2052	t_{MOD}
010	1028	t_{MOD}
011	516	t_{MOD}
100	260	t_{MOD}
101	132	t_{MOD}
110	68	t_{MOD}
111	—	—

当 START 引脚保持高电平且输入信号发生阶跃变化时, 滤波器需要 3 个 t_{DR} 转换周期才能稳定到新值, 可在发送第四个 $\overline{DRDY}$ 脉冲时提供稳定的数据。在尝试测量用于起搏信号检测的窄起搏信号脉冲时, 必须考虑该建立时间。在每个 $\overline{DRDY}$ 高/低转换时可读取数据, 但可以将其忽略。

11.2.7. 连续转换模式

当 START 引脚被置于高电平并至少保持两个 t_{CLK} 或发送 START 操作码命令时, 将开始进行转换。如下图所示, $DRDY_n$ 会在转换开始后变为高电平, 并在数据就绪后变为低电平。转换会无限期地持续下去, 直到 START 引脚被置为低电平或发送 STOP 操作码命令。当 START 引脚被拉为低电平或发出停止命令时, 允许完成正在进行的转换。图和显示了在该模式下控制转换时 START 引脚以及 START 和 STOP 操作码命令所需的 $DRDY_n$ 时序。要使转换器保持连续运行, 应将 START 引脚永久固定在高电平。从单冲模式切换到连续转换模式时, 发送 START 脉冲信号, 或发出 STOP 命令并后跟 START 命令。该转换模式非常适用于需要连续转换结果流的应用。

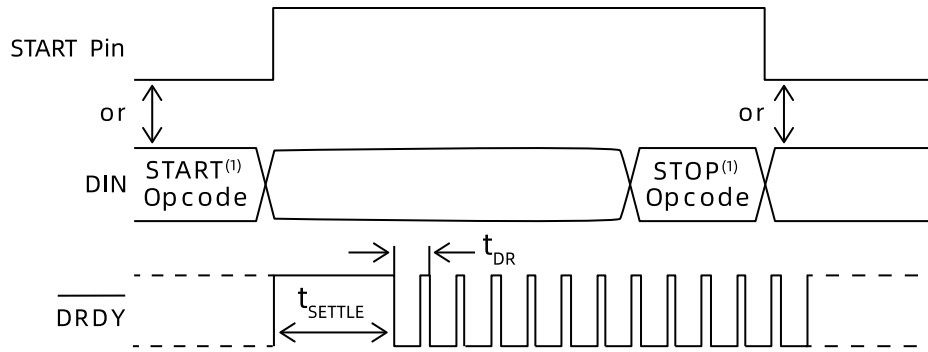


图23. 连续转换模式

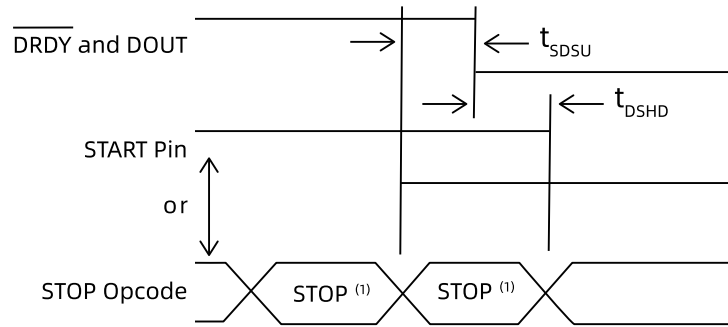


图24. START 至 DRDYN 时序

表12. 上图的时序要求

		最小值	最大值	单位
t_{DSU}	START 引脚置于低电平或向 DRDY 发送 STOP 操作码以中止进一步转换的设置时间	16		t_{CLK}
t_{DSHD}	START 引脚置于低电平或发送 STOP 操作码以完成当前转换	16		t_{CLK}

11.2.8. 单次转换模式

可通过将 CONFIG1 寄存器中的 SINGLE_SHOT 位设置为 1 来启用单冲模式。在单次转换模式下，当 START 引脚被置于高电平或发送 START 操作码命令时，LH001-91 会执行单次转换。如下图所示，当转换完成时，DRDY 会变为低电平，进一步的转换停止。无论是否读取转换数据，DRDY 都保持低电平。要开始新的转换，请将 START 引脚置为低电平，然后再重新置为高电平并至少保持两个 t_{CLK} ，或再次发送 START 操作码。从连续转换模式切换到单冲模式时，要确保发送 START 脉冲信号，或发出 STOP 命令并后跟 START 命令。

为需要非标准或非连续数据速率的应用提供了单冲转换模式。发出 START 命令或将 START 引脚切换为高电平可重置数字滤波器，从而有效地将数据速率降低为原来的四分之一。该模式使系统更容易受到混叠效应的影响，因此需要更复杂的模拟或数字滤波。主机处理器上的负载会增加，因为它必须切换 START 引脚或发送 START 命令以启动新的转换周期。

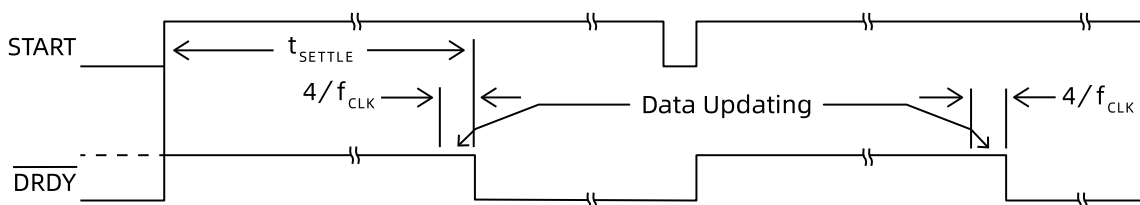


图25. 无数据检索时的 DRDYN (单冲模式)

11.2.9. 多器件配置

当系统中连接多个器件时, LH001-91 可提供配置灵活性。串行接口通常需要四个信号: DIN、DOUT、SCLK 和 CS。通过在每个器件上添加一个额外的片选信号, 可以将多个器件连接在一起。连接 n 个器件所需的信号数量为 $3 + n$ 。

如以菊花链方式连接多个器件。要以菊花链配置使用内部振荡器, 请将其中一个器件设置为时钟源的主器件并启用内部振荡器 (CLKSEL 引脚 = 1), 并通过将 CLK_EN 寄存器位设置为 1 从器件获取内部振荡器时钟。使用该主器件时钟作为其他器件的外部时钟源。在使用多个器件时, 将这些器件与 START 信号同步。从 START 信号到 $\overline{\text{DRDY}}$ 信号的延迟对于固定数据速率是固定的 (有关建立时间的更多详细信息, 请参阅启动模式部分)。作为一个示例, 下图显示了两个器件与 START 信号同步时的行为。可使用两种配置以最佳接口引脚数来连接多个器件: 级联或菊花链。

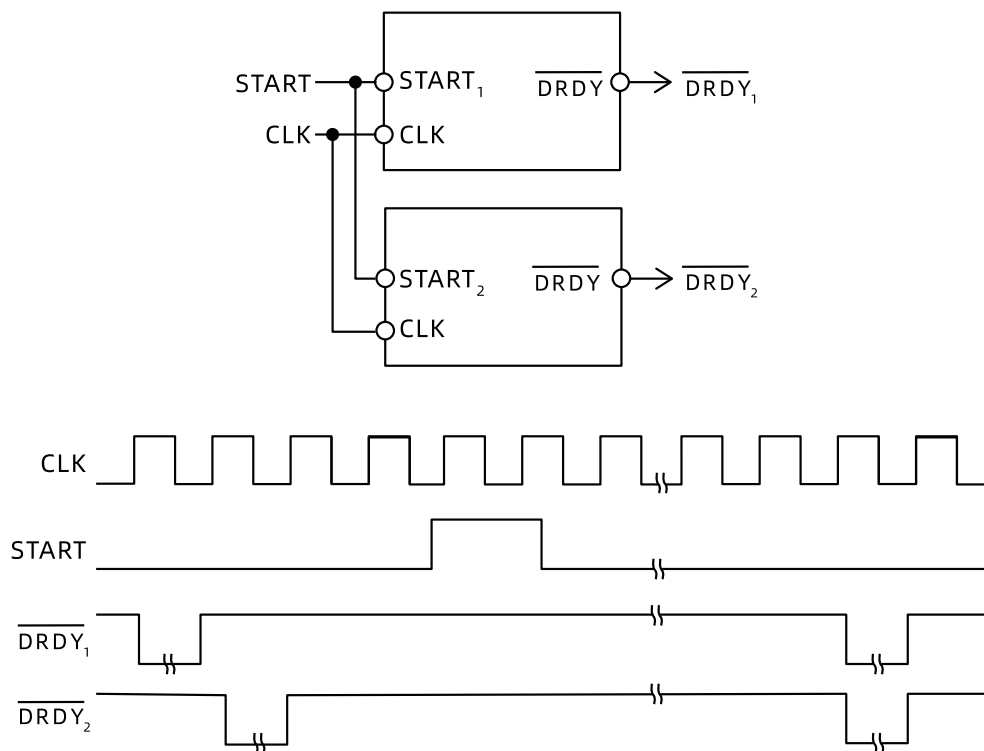


图26. 同步多个转换器

级联配置

图 27 (a) 显示了两个器件级联在一起的配置。DOUT、SCLK 和 DIN 是共享的。每个器件都具有其自己的片选引脚。如果没有选择某个器件 (通过将相应的 CS_n 驱动为逻辑 1), 则该器件的 DOUT 处于高阻抗。该结构允许其他器件控制 DOUT 总线。该配置方法适用于大多数应用。

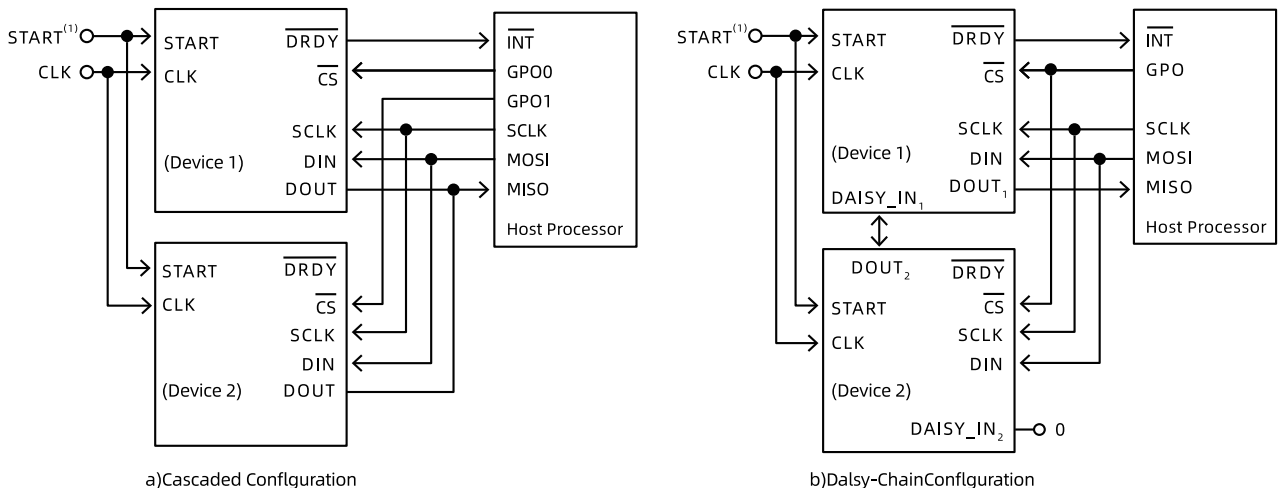
菊花链配置

可通过设置 SPI_CTRL 寄存器中的 DAISY_EN 位来启用菊花链模式; 并且将第一个器件的 CLKSEL PAD 上拉为 1, 配置寄存器 CLKCON 的 CLKEN 位为 1 以便输出内部时钟; 其他器件的 CLKSEL PAD 下拉为 0 以便把第一个器件的输出时钟作为时钟源 (详见如下表)。

CLKCON	0x16	8	RW	0x6	Yes	clock control register						
Bit-Name	Bit-Position	Width	Access	Default Value	Which Key	Description	Document	From	To	Scan Value	Retain	Visibility
CLKEN	[0:0]	1	RW	0x0	USERKEYH	enable osc or external clock						
Description	enable osc or external clock											
0x0	osc clock											
0x1	based clkse pin select clock											
F2M	[1:1]	1	RW	0x1	USEKEY	configure OSC frequency						
Description	select OSC output, 2Mhz or 16Mhz with 0x58 userkey											
0x0	2Mhz											
0x1	16Mhz											
CLKSEL_PU_EN	[2:2]	1	RW	0x1	USEKEY	Enable clk sel pin pull-up resistor						
Description	configure pull-up resistor for CLKSEL pin											
0x0	enable pull up resistor											
0x1	disabel pull-up resistor											
SPICTRL	0x17	8	RW	0x0	No	spi interface control						
Bit-Name	Bit-Position	Width	Access	Default Value	Which Key	Description	Document	From	To	Scan Value	Retain	Visibility
DAISY_EN	[0:0]	1	RW	0x0	NONE	Enable daisy chain						
Description	Enable daisy chain											
0x0	disabel daisy chain											
0x1	enable daisy chain											
FIFO_SEL	[1:1]	1	RW	0x0	NONE	Enable FIFO mode						
Description	Enable FIFO mode											
0x0	disabel FIFO mode											
0x1	enable FIFO mode											
DC_MODE	[2:2]	1	RW	0x0	NONE	Enable dc mode						
Description	Enable dc mode											
0x0	disabel dc mode											
0x1	enable dc mode											

下图显示了菊花链配置。在该配置中，SCLK、DIN 和 $\overline{CS}$ 在多个器件之间共享。将第一个器件的 DOUT 引脚连接到下一个器件的 DAISY_IN 引脚，从而创建一个链。在每个数据集之间发出一个额外的 SCLK。请注意，在使用菊花链模式时，多读回功能不可用。

如果未使用 DAISY_IN 引脚，则将其与数字地短接。图 23 介绍了图 22 所示的 LH001-91 所需的时序。来自 LH001-91 器件 1 的状态字和数据字首先出现在 DOUT 上，最后是来自 LH001-91 器件 2 的状态字和数据字。该时序图是针对 DC 模式关闭时，如果打开 DC 模式，时序图中只包含数据字而没有状态字。



(1) 要减少引脚数，请将 START 引脚设置为低电平并使用 START 操作码命令来同步和启动转换。

图27. 多器件配置

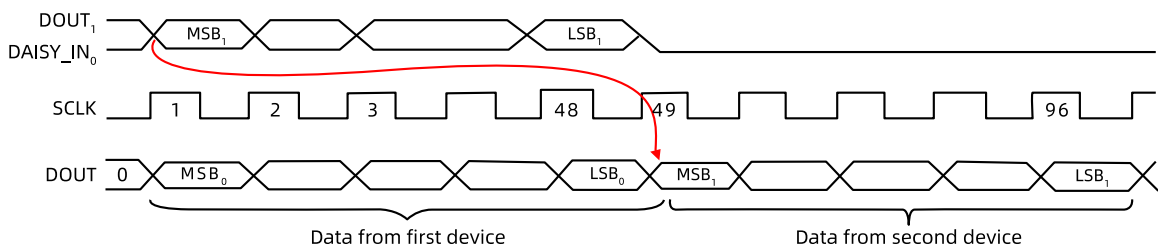


图28. 菊花链时序

使用菊花链模式时的重要提醒：

1. 所有器件都配置为相同的寄存器值，因为 CSn 是共享的。

2. 器件寄存器读回 (RREG) 仅对菊花链中的器件 0 有效。只能从器件 1 到器件 N 读取转换数据，其中 N 是链中的最后一个器件；无法读取寄存器数据。

如果链中的所有器件都在相同的寄存器设置下运行，则可以共享 DIN，从而将 SPI 通信信号数量减少为 4，无论器件数量如何都是如此。不过，无法对单个器件进行编程；因此，无法在多个器件之间共享 RLD 驱动程序。此外，所有器件需要共享一个 CLK 时钟。

SCLK 上升沿会在 DOUT 上将数据从 LH001-91 移出。SCLK 下降沿还用于将数据锁存到链中的器件 DAISY_IN 引脚。此外请注意，菊花链模式需要一些软件开销来重新组合跨字节边界的数据位。

菊花链器件的最大数量取决于器件运行的数据速率。可以使用 Equation 3 来估算 DC 模式关闭时最大器件数，使用 Equation 4 来估算 DC 模式打开时最大器件数：

$$N_{DEVICES} = \frac{f_{SCLK}}{f_{DR} * N_{BITS} * N_{CHANNELS} + 24} \quad (3)$$

$$N_{DEVICES} = \frac{f_{SCLK}}{f_{DR} * N_{BITS} * N_{CHANNELS}} \quad (4)$$

其中

- NBITS = 器件分辨率，LH001-91 取 24
- NCHANNELS = 器件中的通道数，LH001-91 取 1

例如，当 LH001-91 在 DC 模式关闭时以 2kSPS 数据速率和 4MHz fSCLK 运行时，最多能够以菊花链方式连接 83 个器件。

11.2.10. SPI 命令定义

LH001-91 可提供灵活的配置控制。下表中总结的操作码命令可控制和配置 LH001-91 的运行。操作码命令是独立的，但需要第二个命令字节加数据的寄存器读取和寄存器写入操作除外。可以将 CSn 在操作码命令之间置于高电平或保持在低电平，但在整个命令操作期间必须保持低电平（尤其是对于多字节命令）。所有操作码在第八个 SCLK 下降沿进行解码。发出命令后，将 CSn 拉为高电平时，确保遵循 SPI 时序要求。

表13. 操作码命令定义

命令	说明	第一个字节	第二个字节	第三个字节
系统命令				
RESET	复位器件	0000 0110 (06h)	--	--
START	启动/重新启动（同步）转换	0000 1000 (08h)	--	--
STOP	停止转换	0000 1010 (0Ah)	--	--
RST_FIFO	复位 FIFO	0000 1100 (0Ch)	--	--
数据读取命令				
RDATAC	启用连续读取数据模式。该模式是上电时的默认模式。	0001 0000 (10h)	--	--
SDATAC	停止连续读取数据模式	0001 0001 (11h)	--	--
RDATA	通过命令读取数据；支持多个读回。	0001 0010 (12h)	--	--
寄存器读写命令				
RREG	从地址 r rrrr 开始读取 n nnnn 个寄存器	001r rrrr (2xh)	000n nnnn	--
WREG	从地址 r rrrr 开始写入 n nnnn 个寄存器	010r rrrr (4xh)	000n nnnn	--

RREG_BK1	从地址 $r\ rrrr+32$ 开始读取 n $nnnn$ 个寄存器	101r rrrr (2xh)	000n nnnn	如果 $r\ rrrr+32$ 等于 63, 该字节需要输入 72h。否则无该字节。
WREG_BK1	从地址 $r\ rrrr+32$ 开始写入 n $nnnn$ 个寄存器	110r rrrr (4xh)	000n nnnn	如果 $r\ rrrr+32$ 等于 63, 该字节需要输入 72h。否则无该字节。

$n\ nnnn$ = 要读取/写入的寄存器数量 - 1。例如, 要读取/写入三个寄存器, 请设置 $n\ nnnn = 0\ 0010$ 。 $r\ rrrr$ = 读取/写入操作码的起始寄存器地址。

RESET: 将寄存器重置为默认值

RESET 命令可重置数字滤波器周期并将所有寄存器设置恢复至相应的默认值。有关更多详细信息, 请参阅复位 (RESET 引脚和复位命令) 部分。对于该命令, SCLK 速率没有限制; 可以随时发出该命令。执行 RESET 命令需要 18 个 t_{CLK} 周期。请勿在此期间发送任何命令。

START: 开始转换

该操作码可启动数据转换。将 START 引脚保持在低电平可通过命令控制转换。如果转换正在进行, 那么该命令无效。STOP 操作码命令用于停止转换。如果 START 命令后紧跟 STOP 命令, 那么这两个命令之间必须有 4 个 t_{CLK} 周期的间隔。将 START 操作码发送到器件时, 将 START 引脚保持为低电平, 直到发出 STOP 命令。(有关更多详细信息, 请参阅 SPI 接口 部分的启动模式小节。) 对于该命令, SCLK 速率没有限制, 可以随时发出该命令。

STOP: 停止转换

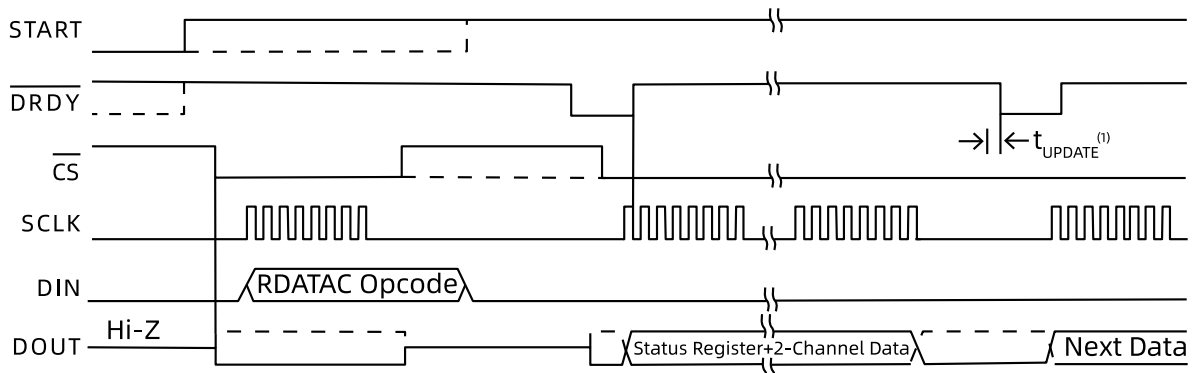
STOP 操作码可停止转换。将 START 引脚保持在低电平可通过命令控制转换。发送 STOP 命令后, 正在进行的转换将完成, 并且进一步的转换也会停止。如果转换已经停止, 那么该命令无效。对于该命令, SCLK 速率没有限制; 可以随时发出该命令。

RDATAC: 连续读取数据

RDATAC 操作码可以在每个 $\overline{DRDY}$ 上实现转换数据输出, 而无需发出后续读取数据操作码。该操作码可将转换数据放置在输出寄存器中, 可以直接将其移出。连续读取数据模式是该器件的默认模式, 该器件在上电和复位时默认采用该模式。

停止连续读取数据命令 (SDATAC) 可取消 RDATAC 模式。如果器件处于 RDATAC 模式, 则必须先发出 SDATAC 命令, 然后才能将任何其他命令发送到器件中。对于该命令, SCLK 速率没有限制。不过, 后续数据检索 SCLK 或 SDATAC 操作码命令必须至少等待 4 个 t_{CLK} 周期。如下图所示, RDATAC 的时序说明了 $\overline{DRDY}$

周围 4 个 t_{CLK} 周期的阻止区域, 此时无法发出该命令。要在发出 RDATAC 命令后从器件检索数据, 请确保 START 引脚处于高电平或发出 START 命令。图 30 显示了使用 RDATAC 命令的建议方法。RDATAC 非常适合数据记录器等应用, 其中只需设置寄存器一次, 无需重新配置。



(1) $t_{UPDATE} = 4 \times t_{CLK}$ Do not read data during this time.

图29. RDATAC 用法

SDATAC: 停止连续读取数据

该 SDATAC 操作码命令可取消连续读取数据 (RDATAC) 模式。对于该命令, SCLK 速率没有限制, 但下一条命令必须等待 4 个 t_{CLK} 周期。

RDATA: 读取数据

在 DRDY 变为低电平后发出 RDATA 命令, 以读取转换结果 (在 SDATAC 模式下)。对于该命令, SCLK 速率没有限制, 后续命令或数据检索 SCLK 不需要等待时间。要在发出 RDATA 命令后从器件检索数据, 请确保 START 引脚处于高电平或发出 START 命令。使用 RDATA 命令读取数据时, 读取操作可能与出现的下一个 DRDY 重叠, 但不会导致数据损坏。

显示了使用 RDATA 命令的建议方法。RDATA 最适合 ECG 和 EEG 型系统, 其中必须经常在转换周期之间读取或更改寄存器设置。

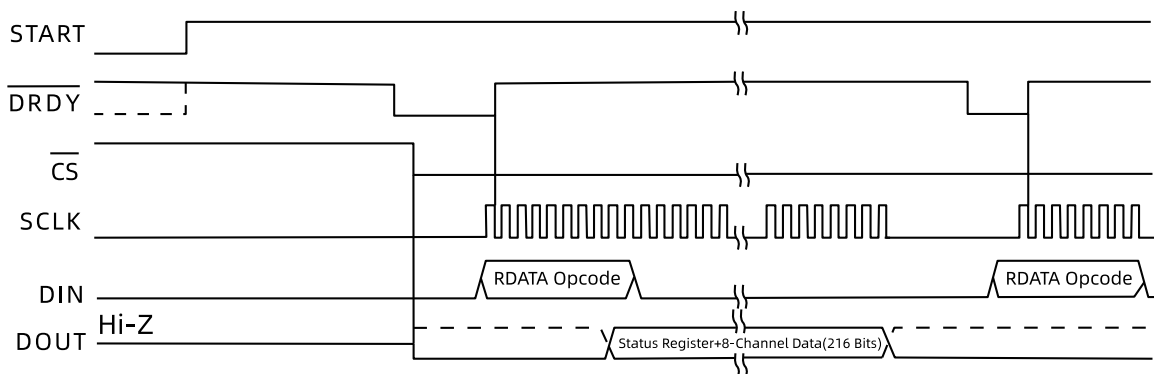


图30. RDATA 用法

发送多字节命令

LH001-91 串行接口以字节为单位对命令进行解码, 需要 4 个 t_{CLK} 周期进行解码和执行。因此, 在发送多字节命令时, 4 个 t_{CLK} 周期必须将一个字节 (或操作码) 的末尾与下一个字节 (或操作码) 分开。

例如, 如果 CLK 为 2.048MHz, 那么 $t_{SDECODE}$ ($4 \times t_{CLK}$) 为 1.96 μ s。当 SCLK 为 16.384MHz 时, 一个字节的最大传输速度为 500ns。该字节传输时间不符合 $t_{SDECODE}$ 规格; 因此, 必须插入一个延迟, 以便第二个字节的末尾在 1.46 μ s 后到达。不过, 如果 SCLK 为 4MHz, 那么将在 2 μ s 后传输一个字节。由于该传输时间超出了 $t_{SDECODE}$ 规格, 因此处理器可以无延迟地发送后续字节。在第二种情形下, 可以将串行端口编程为使用多字节传输, 而不是满足第一种情形的时序所需的单字节传输。

RREG: 从地址 0 到 31 的寄存器进行读取

RREG 操作码命令可读取寄存器数据。RREG 命令是两字节操作码, 后跟寄存器数据输出。第一个字节包含命令操作码和寄存器地址。操作码的第二个字节指定要读取的寄存器数量 - 1。

第一个操作码字节: 001r rrrr, 其中 r rrrr 是起始寄存器地址。

第二个操作码字节: 000n nnnn, 其中 n nnnn 是要读取的寄存器数量 - 1。

运行的第 17 个 SCLK 上升沿输出第一个寄存器的 MSB, 如下图所示。当器件处于连续读数据模式时, 必须首先发出 SDATAC 命令, 然后才能发出 RREG 命令。可以随时发出 RREG 命令。不过, 由于该命令是多字节命令, 因此 SCLK 速率受到限制, 具体取决于发出 SCLK 的方式。有关更多详细信息, 请参阅串行时钟 (SCLK) 部分。CS 必须在整个命令操作期间处于低电平。

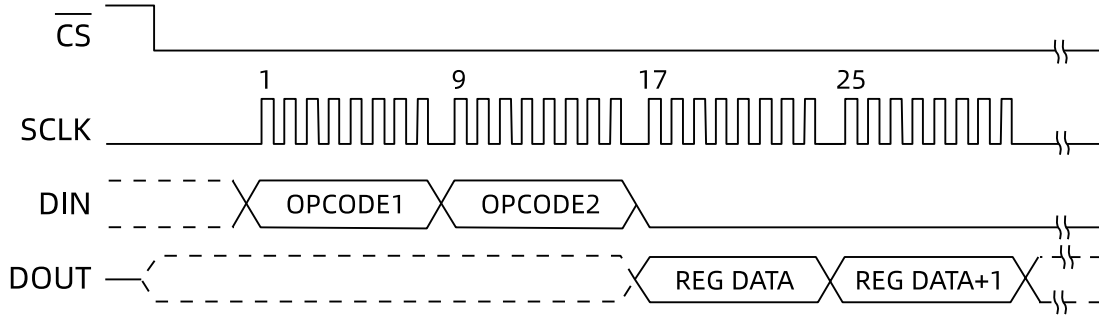


图31. RREG 命令示例: 从寄存器 00h 开始读取两个寄存器
(OPCODE 1 = 0010 0000, OPCODE 2 = 0000 0001)

WREG : 对地址 0 到 31 的寄存器进行写入

WREG 操作码命令可写入寄存器数据。WREG 命令是两字节操作码, 后跟寄存器数据输入。第一个字节包含命令操作码和寄存器地址。操作码的第二个字节指定要写入的寄存器数量 - 1。

第一个操作码字节: 010r rrrr, 其中 r rrrr 是起始寄存器地址。

第二个操作码字节: 000n nnnn, 其中 n nnnn 是要写入的寄存器数量 - 1。

操作码字节后跟寄存器数据 (采用 MSB 在前的格式), 如下图所示。可以随时发出 WREG 命令。不过, 由于该命令是多字节命令, 因此 SCLK 速率受到限制, 具体取决于发出 SCLK 的方式。有关更多详细信息, 请参阅串行时钟 (SCLK) 部分。 $\overline{\text{CS}}$ 必须在整个命令操作期间处于低电平。

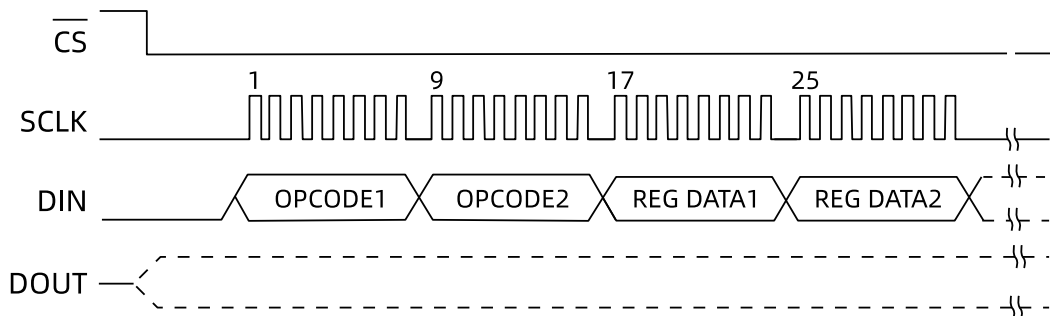


图32. WREG 命令示例: 从寄存器 00h 开始对两个寄存器进行写入
(OPCODE 1 = 0100 0000, OPCODE 2 = 0000 0001)

RREG_BK1: 从地址 32 到 63 的寄存器进行读取

RREG_BK1 用来读地址 32 到 63 的寄存器, RREG_BK1 的格式如下, 第一个字节表示寄存器的起始地址为 rrrrr+32, 第二个字节的 n_nnnn 表示要读的寄存器数目减一 (可配从 0 到 31), 只有当起始地址为 63 即 rrrrr 等于 31 时才需要输入第三个字节的码字 72h:

1st byte---101r rrrr 2nd byte---000n nnnn 3rd byte---72h

当起始地址在 32 到 62 之间, 时序图和图 32 相同。当起始地址为 63 时, 时序图需要在第 17 个周期到第 24 个周期给 DIN 输入第三个字节 72h, 而后从第 25 个周期再开始从 DOUT 输出寄存器的值。

WREG_BK1: 对地址 32 到 63 的寄存器进行写入

WREG_BK1 用来写地址 32 到 63 的寄存器, WREG_BK1 的格式如下, 第一个字节表示寄存器的起始地址为 rrrrr+32, 第二个字节的 n_nnnn 表示要写的寄存器数目减一 (可配从 0 到 31), 只有当起始地址为 63 即 rrrrr 等于 31 时才需要输入第三个字节的码字 72h:

1st byte----110r rrrr 2nd byte---000n nnnn 3rd byte---72h

当起始地址在 32 到 62 之间, 时序图和图 32 相同。当起始地址为 63 时, 时序图需要在第 17 个周期到第 24 个周期给 DIN 输入第三个字节 72h, 而后从第 25 个周期再开始给 DIN 输入要写入的寄存器值。

对地址大于 63 的寄存器进行读写的方法

如果需要访问地址为 64~127 的寄存器, 这个地址范围的寄存器必须用地址为 63 的寄存器 bit0 来进行地址总线的扩充, 所以必须先用 WREG_BK1 命令来给地址 63 的 bit0 写 1, 以后如果执行 WREG/RREG/WREG_BK1/WREG_BK1 命令, 读写地址都是和地址 63 的 bit0 拼接的, 地址 63 的 bit0 相当于地址的 bit6, 即最终 WREG/RREG 的读写地址为 [bit0, 0rrrr], 最终 WREG_BK1/RREG_BK1 的读写地址为 [bit0, 1rrrr]。这样后续的寄存器读写访问都是在地址 63 以后。想读地址 63 去查看扩展地址的具体值, 就用 RREG_BK1 命令, 推荐固定 nnnnn 为 1, 相当于只读地址 63。如要再次改写地址 63 的 bit0 为 0, 就用 WREG_BK1 再次写地址 63 为 0, 这样以后的寄存器读写就是在地址 0 到 63 之间。

RST_FIFO:复位 FIFO

该命令用来在 FIFO 被使能时复位 FIFO 的读写指针以及内容。具体参考 FIFO 模式 部分。

编程步骤举例

- 1) 保持 START 引脚是拉低的状态
- 2) 如果使用外部时钟, 保持 CLKSEL=0 并从管脚 CLK 输入外部 2.048M 时钟; 如果使用内部晶振则保持 CLKSEL=1
- 3) 等待 2.5ms 使得上电过程完成, 上电过程中保持 PDEXTRST 引脚为 1。

- 4) 发送 RESET 命令或者 toggle PDEXTRST 引脚复位器件, 等待 10us 使得复位过程完成

```
cmd_drv(INSTR_RESET, 0, data_array);
```

- 5) 发送 SRATAC 命令退出 RDATAAC 状态

```
cmd_drv(INSTR_SDATAAC, 0, data_array);
```

- 6) 根据应用需求配置时钟、系统、ADC、PGA 等相关寄存器, 例如:

```
write_reg(ADDR_CLKCON, 7);
```

```
write_reg(ADDR_SPI_CTRL, 1);
```

```
write_reg(ADDR_ADCCTRL, 'h3);
```

```
write_reg(ADDR_PGAGAIN, 'h1);
```

```
write_reg(ADDR_PGACTRL, 'h8);
```

.....

- 7) 发送 START 命令或者拉高 START 引脚, ADC sample 开始转换

```
set_digout(PIN_START, 1, 1); 或者
```

```
cmd_drv(INSTR_START, 0, data_array);
```

- 8) 发送 RDATAAC 命令进入连续读取数据模式

```
cmd_drv(INSTR_RDATAAC, 0, data_array);
```

- 9) 每等待一次 DRDYn 变低电平, 可使用 SCLK 的下降沿捕获一个 adc sample 和状态字

11.3. 中断

芯片内部共有 5 个中断源:

data_rdy_n: 表示 adc 每成功转换完一次数据就拉低一次, 拉低之后遇到第一个 sclk 下降沿就立刻拉高, 详细信息见数据就绪引脚 (DRDYn) 部分。

enough_int_n, full_int_n, overflow_int_n: 只有在 FIFO 模式下才会使用, 详细信息参考 FIFO 模式部分。

5 个中断源可以通过中断使能寄存器引出到两个中断引脚 DRDYn 和 INTB 输出具体如下图所示。

DRDYn 使用寄存器 INTB_EN 的 bit3~0 来配置, INTB 使用寄存器 INTB_EN 的 bit7~4 来配。

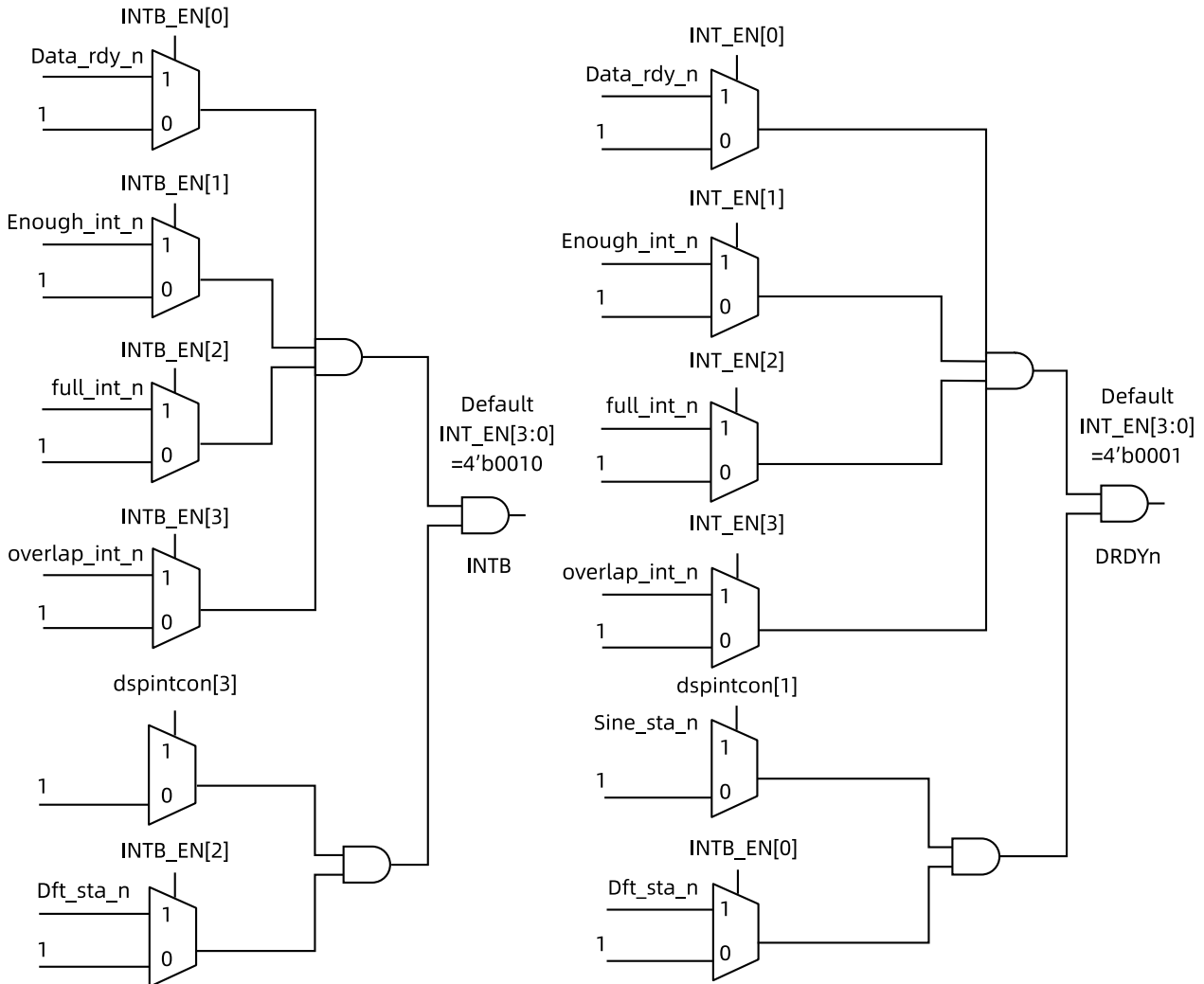


图33. 中断结构图

11.3.1. 寄存器列表

INT_OEN_REG（用户可访问，无需输入 key）中断输出使能寄存器

偏移地址：8'h18 复位值：8'h21

表14. 中断使能

Bit 位	名称	r/w	说明
7	INTB_EN3	RW	INTB 管脚的 Overflow_int_n 中断使能
6	INTB_EN2	RW	INTB 管脚的 full_int_n 中断使能
5	INTB_EN1	RW	INTB 管脚的 enough_int_n 中断使能
4	INTB_EN0	RW	INTB 管脚的 data_rdy_n 中断使能
3	INT_EN3	RW	INT 管脚的 Overflow_int_n 中断使能
2	INT_EN2	RW	INT 管脚的 full_int_n 中断使能
1	INT_EN1	RW	INT 管脚的 enough_int_n 中断使能
0	INT_EN0	RW	INT 管脚的 data_rdy_n 中断使能

每个中断的状态也可以通过寄存器 FIFO_STA_REG 读出，具体见下表。

FIFO_STA_REG（用户可访问，无需输入 key） Fifo 状态寄存器

偏移地址：8'h19 复位值：8'hF

表15. 中断标记

Bit 位	名称	r/w	说明
7	Overflow_int_flag	RO	Fifo 溢出中断标记
6	Full_int_flag	RO	Fifo 满中断标记
5	Enough_int_flag	RO	Fifo 有足够的数中断标记
4:0	Enough_Int_threshold	RW	当 fifo 未读的数据达到数目 Enough_Int_threshold+1 时就产生 Enough_int_flag

11.4. FIFO

如果想使用 ECG 功能, 可以使能异步 FIFO 以达到更好 ECG 方案的功能需求, 即写寄存器位 FIFO_SEL = 1. 如果寄存器位 FIFO_SEL=1 则自动使用连续转换模式 (SINGLE_SHOT 被硬件强制置为 0), 且 ADC 数据先要进入深度为 32 的异步 FIFO 缓存起来。当 DRDYn 每拉低一次就向 FIFO 写入一个 ADC 数据, 当 FIFO 中未读的数据数目到达预先设定的值 (由寄存器位 Enough_Int_threshold 设置, 可设置为 1~32) 时可产生 enough_int_n 的低电平中断。SPI 就可以通过 RDATA 或者 RDATA_C 命令来读取数据, 若 FIFO 写满了则会产生一个 full_int_n 的低电平中断, 写满后如果继续写则会产生一个 overflow_int_n 的低电平中断。中断清除的条件如下表:

表16. FIFO 中断清除的方法

中断名	清除方法
enough_int_n	读 FIFO 只要未读数据的数目小于设定值就自动清除。或者发送 RST_FIFO 命令, 或者将 START 管脚拉低再拉高, 或者先发送 STOP 命令再发送 START 命令
full_int_n	发送 RST_FIFO 命令, 或者将 START 管脚拉低再拉高, 或者先发送 STOP 命令再发送 START 命令
overflow_int_n	发送 RST_FIFO 命令, 或者将 START 管脚拉低再拉高, 或者先发送 STOP 命令再发送 START 命令

RST_FIFO 命令只复位 FIFO, 而 START 管脚跳变或者 START/STOP 命令不仅复位 FIFO 还会复位数字滤波器。所以 RST_FIFO 命令能更快地使 FIFO 从异常情况恢复, 在使用单器件或者单通道时比较适用。在使用多器件或者多通道情况下 FIFO 发生的异常, 推荐使用 START 管脚跳变或者 START/STOP 命令重新同步多器件多通道。

FIFO 模式下数据检索的格式如下, 和非 FIFO 模式的区别是多了 2bits 的 tail bits 域:

表17. FIFO 模式数据检索格式

bit47					bit0
1100	LOFF_STAT[4:0]	GPIO[1:0]	11 '0's	adc sample[23:0]	tail bits[1:0]

表18. 非 FIFO 模式数据检索格式

bit47				bit0
1100	LOFF_STAT[4:0]	GPIO[1:0]	13 '0's	adc sample[23:0]

每个 adc sample 都对应 2bits 的 tail bits, tail bits 反映了当前 FIFO 的状态。对应关系如下表所示。

表19. tail bits 说明

2'b00	正常数据
2'b01	当前读出的数据是 FIFO 的最后一个正常数据
2'b10	FIFO 读空, 当前读出的数据无效
2'b11	FIFO 写满, adc 采样数据丢失

11.5. GPIO

LH001-91 在正常工作时总共有 2 个通用数字输入/输出 (GPIO) 引脚。数字 I/O 引脚可通过 GPIO 寄存器的 GPIOC 位单独配置为输入、输出、上拉或下拉。GPIO 寄存器中的 GPIOD 位控制引脚的电平。在读取 GPIOD 位时, 返回的数据是引脚的逻辑电平, 无论它们是编程为输入还是输出都是如此。当 GPIO 引脚配置为输入时, 对相应 GPIOD 位的写入无效。当配置为输出时, 对 GPIOD 位的写入会设置输出值。

如果配置为输入, 如果没有设置为上拉或者下拉则必须驱动这些引脚; 请勿将这些引脚悬空。在上电或复位之后, GPIO 引脚会设置为输入。下图显示了 GPIO 端口结构。如果未使用这些引脚, 则将其与 DGND 短接。

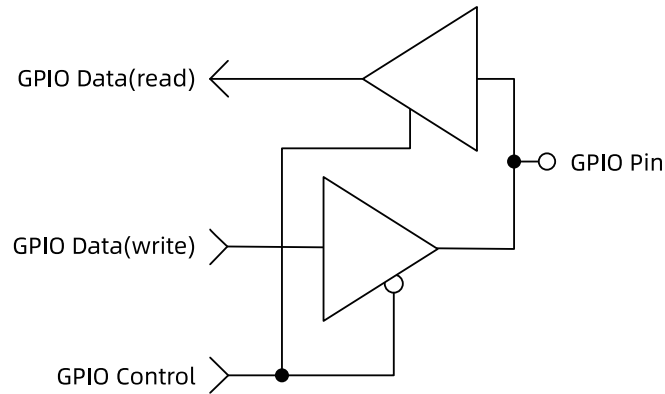


图34. GPIO 端口引脚

11.6. Power down 模式

参考 PLTFMPD, 当 PLTFMPD.ALL 为 1 时, 芯片进入低功耗模式, 待机功耗 0.1μA。

12. 寄存器描述

表20. 寄存器汇总

Address s (hex)	Name	Reset value (hex)	BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
40	CHIPID	12			ID					
1	CONF1 G1	6					SINGLE _SHOT	DR		
3	LOC0 N1	F		CURRENT			THRSHOLD			
4	LOC0 N2	18			RLD_L OEN	SOURCE_ENB		SINK_EN		ACLO_EN
5	LOC0 N3	0	TEST_FREQ					DCLO_EN		
6	LOFFST AT	0			RLD_O FFL		INN_O FFL	INN_O FFH	INP_OF FL	INP_OFFH
7	RLDCO N	0					RLDRE FSEL	EN	CHOP_FREQ	

0A	BUFCO N	11			EN_2P5 MOD	EN_REF BUF		EN_HA LFAVD D		ENB_TEMP
0B	ADCC HCON	10	NSEL	NSEL	NSEL	NSEL	PSEL	PSEL	PSEL	PSEL
0C	ADCCT RL	0							PDB	PDB_AMP
0D	PGAGA IN	0			GAIN					GAIN
0E	PGACT RL	0D					LP_EN		BYP	PD
0F	PGACT RL1	1						CMSEN SE_EN		
11	GAIN	800000	GAIN(24bit)							
12	OFFSET	0	OFFSET(24bit)							
14	SYSCLK	1	CD							
15	MODC LK	8	CD							
16	CLKCO N	6						CLKSEL _PU_E N	F2M	CLKEN
17	SPICTR L	0							FIFO_S EL	DAISY_EN
18	INTOE N	21	INTB_EN				INT_EN			
19	FIFOST A	F	OVERF LOW	FULL	ENOUG H	ENOUGH_THRESHOLD				
1A	LOACC LKSEL	0				WR_EN	CD			CD
1C	OUTCL K	0				EN	EN	SEL		SEL
1E	USERK EY	0	KEY							KEY
1F	GPIO0	0								
20	GPIO1	0								

CHIPID 寄存器

Address: 0x40, 复位值: 0x12

表21.

位	名称	描述	读/写
5:0	ID	芯片 ID	只读

CONFIG1 寄存器

Address: 0x01, 复位值: 0x36, 配置数据输出速率

表22.

位	名称	描述	读/写
---	----	----	-----

2:0	DR	SINC3 滤波器的过采样率 0:Fmodclk/1024 1:Fmodclk/512 2:Fmodclk/256 3:Fmodclk/128 4:Fmodclk/64 5:Fmodclk/32 6:Fmodclk/16 7:Fmodclk/1024	读写
3	SINGLE_SHOT	ADC 转换模式 0: 连续转换。停止条件: SPI Stop 命令或者CS为高 1: 单次转换。转换完成即停止	读写
7:4	RESERVED	RESERVED	读

LOCON1 寄存器

Address: 0x03, 复位值: 0x0F, 配置 ECG 导联脱落检测功能

表23.

位	名称	描述	读/写
3:0	THRESHOLD	直流导联脱落检测的阈值设置。高阈值(VTHH)和低阈值(VTHL)电压的配置如下, 其中 $V_{cm} = AVDD/2$, $\Delta = 0.81 \times V_{cm}/16$, 迟滞电压为 $0.25 \times \Delta$ 0: $V_{THH} = V_{cm} + \Delta$; $V_{THL} = V_{cm} - \Delta$ 1: $V_{THH} = V_{cm} + 2 \times \Delta$; $V_{THL} = V_{cm} - 2 \times \Delta$ 2: $V_{THH} = V_{cm} + 3 \times \Delta$; $V_{THL} = V_{cm} - 3 \times \Delta$ 3: $V_{THH} = V_{cm} + 4 \times \Delta$; $V_{THL} = V_{cm} - 4 \times \Delta$ 4: $V_{THH} = V_{cm} + 5 \times \Delta$; $V_{THL} = V_{cm} - 5 \times \Delta$ 5: $V_{THH} = V_{cm} + 6 \times \Delta$; $V_{THL} = V_{cm} - 6 \times \Delta$ 6: $V_{THH} = V_{cm} + 7 \times \Delta$; $V_{THL} = V_{cm} - 7 \times \Delta$ 7: $V_{THH} = V_{cm} + 8 \times \Delta$; $V_{THL} = V_{cm} - 8 \times \Delta$ 8: $V_{THH} = V_{cm} + 9 \times \Delta$; $V_{THL} = V_{cm} - 9 \times \Delta$ 9: $V_{THH} = V_{cm} + 10 \times \Delta$; $V_{THL} = V_{cm} - 10 \times \Delta$ A: $V_{THH} = V_{cm} + 11 \times \Delta$; $V_{THL} = V_{cm} - 11 \times \Delta$ B: $V_{THH} = V_{cm} + 12 \times \Delta$; $V_{THL} = V_{cm} - 12 \times \Delta$ C: $V_{THH} = V_{cm} + 13 \times \Delta$; $V_{THL} = V_{cm} - 13 \times \Delta$ D: $V_{THH} = V_{cm} + 14 \times \Delta$; $V_{THL} = V_{cm} - 14 \times \Delta$ E: $V_{THH} = V_{cm} + 15 \times \Delta$; $V_{THL} = V_{cm} - 15 \times \Delta$ F: $V_{THH} = V_{cm} + 16 \times \Delta$; $V_{THL} = V_{cm} - 16 \times \Delta$	读写
6:4	CURRENT	直流导联脱落检测的电流源配置 0: 5nA 1: 10nA 2: 25nA 3: 50nA 4: 100nA	读写

LOCON2 寄存器

Address: 0x04, 复位值: 0x18, 配置 ECG 导联脱落检测功能

表24.

位	名称	描述	读/写
---	----	----	-----

0	ACLO_EN	AIN0 和 AIN1 上的交流导联脱落检测使能 0: Disable 1: Enable	读写
2:1	SINK_EN	SINK 电流功能使能, 导联脱落时引脚电压为 GND 0: 关闭 AIN0 和 AIN1 SINK 电流功能 1: 只使能 AIN0 SINK 电流功能 2: 只使能 AIN1 SINK 电流功能 3: 使能 AIN0 和 AIN1 SINK 电流功能	
4:3	SOURCE_ENB	SOURCE 电流功能使能, 导联脱落时引脚电压为 VDD 0:使能 AIN0 和 AIN1 SOURCE 电流功能 1:只使能 AIN1 的 SOURCE 电流功能 2:只使能 AIN0 的 SOURCE 电流功能 3:关闭 AIN0 和 AIN1 的 SOURCE 电流功能	
5	RLD_LOEN	右腿驱动电极脱落检测, 脱落时引脚电压为 GND 0: 关闭右腿驱动 SINK 电流 1: 使能右腿驱动 SINK 电流	读写

LOCON3 寄存器

Address: 0x05,复位值: 0x0, 配置 ECG 导联脱落检测功能

表25.

位	名称	描述	读/写
2:0	DCLO_EN	AIN0 和 AIN1 上的直流导联脱落使能 DCLO_EN[0]: 0: 关闭 AIN0 上的直流检测 1: 使能 AIN0 上的直流检测 DCLO_EN[1]: 0: 关闭 AIN1 上的直流检测 1: 使能 AIN1 上的直流检测 DCLO_EN[2]: 0: 关闭右腿驱动上的直流检测 1: 使能右腿驱动上的直流检测	读写
3	保留	保留	
7:4	TEST_FREQ	信号链测试信号的频率 0: 直流 1: 0.5Hz 2: 1Hz 3: 2Hz	

LOFF_STAT 寄存器

Address: 0x06,复位值: 0x0, ECG 导联脱落状态

表26.

位	名称	描述	读/写
0	INP_OFFH	AIN0 source 电流脱落 0: 连接 1: 脱落	读写
1	INP_OFFL	AIN0 SINK 电流脱落 0: 连接 1: 脱落	

2	INN_OFFH	AIN1 source 电流脱落 0: 连接 1: 脱落	
3	INN_OFFL	AIN1 SINK 电流脱落 0: 连接 1: 脱落	
4	保留	保留	
5	RLD_OFFL	右腿驱动电极脱落 0: 连接 1: 脱落	

RLDCON 寄存器

Address: 0x07, 复位值: 0x0, 右腿驱动控制寄存器

表27.

位	名称	描述	读/写
1:0	CHOP_FREQ	右腿驱动斩波频率 0: 关闭斩波 1: Fmodclk/32 2: Fmodclk/64 3: Fmodclk/128 Fmodclk 为 ADC modulator 时钟	读写
2	EN	使能右腿驱动 0: 关闭 1: 使能	
3	RLDREFSEL	右腿驱动参考选择 0: AVDD/2 1: 外部参考源	

BUFCON 寄存器

Address: 0x0A, 复位值: 0x11, 内部 Buffer 控制寄存器

表28.

位	名称	描述	读/写
0	ENB_TEMP	温度传感器控制 0: 使能 1: 关闭	读写
1	保留	保留	
2	EN_HALFAVDD	AVDD/2 Buffer 0: 关闭 1: 使能	
3	保留	保留	
4	EN_REFBUF	ADC 参考 Buffer 0: 关闭 ADC 参考 Buffer 1: 使能 ADC 参考 Buffer	
5	EN_2P5MOD	ADC 参考选择 0: 2V 内部参考源, AVDD 低于 2.7V 时只能使用该选项 1: 2.5V 内部参考源	

ADCCHCON 寄存器

Address: 0x0B, 复位值: 0x10, ADC 通道选择寄存器

表29.

位	名称	描述	读/写
3:0	PSEL	ADC 正输入通道选择 0x0: AIN0 0x1: AIN1 0x2: AIN2 0x3: AIN3 0x4: AIN4 0x5: AIN5 0x6: AIN6 0x7: AIN7 0x8: RLDIN 0x9: DVDD/2, NSEL 设为 0xF 0xA: AVDD/2, NSEL 设为 0xF 0xB: VCM, 正负输入短路到 VCM, NSEL 设为 0xF 0xC: 片内温度传感器, NSEL 设为 0xF 0xD: 测试信号, NSEL 设为 0xF	读写
7: 4	NSEL	ADC 负输入通道选择 0x0: AIN0 0x1: AIN1 0x2: AIN2 0x3: AIN3 0x4: AIN4 0x5: AIN5 0x6: AIN6 0x7: AIN7 0x8: AIN8	

ADCCTRL 寄存器

Address: 0x0C, 复位值: 0x0, ADC 控制寄存器

表30.

位	名称	描述	读/写
0	MOD_PDB	0: 关闭 ADC 1: 使能 ADC	读写
1	MOD_PDB_AMP	0: 关闭 ADC 运放 1: 使能 ADC 运放	

PGAGAIN 寄存器

Address: 0x0D, 复位值: 0x0, PGA 增益选择寄存器

表31.

位	名称	描述	读/写
---	----	----	-----

5:0	GAIN	PGA 增益选项 0: 增益=1 1: 增益=2 2: 增益=3 3: 增益=4 4: 增益=6 5: 增益=8 6: 增益=12 7: 增益=24 8: 增益=48	读写
-----	------	--	----

PGACTRL 寄存器

Address: 0x0E, 复位值: 0x9, PGA 控制寄存器

表32.

位	名称	描述	读/写
0	PGA_PD	0: 使能 PGA 1: 关闭 PGA	读写
1	PGA_BYP	PGA 旁路设置 0: 使用 PGA 1: 旁路 PGA	
2	PGA_RESET	0: 不复位 PGA 1: 复位 PGA	
3	PGA_LP_EN	PGA 功耗模式 0: 正常模式 1: 低功耗模式	
7: 4	保留	保留	

PGACTRL1 寄存器

Address: 0x0F, 复位值: 0x1, PGA 控制寄存器

表33.

位	名称	描述	读/写
1:0	PGA_CHOP	PGA 斩波频率 0: Fmodclk/64 1: Fmodclk/32 2: Fmodclk/16 3: Fmodclk/8	读写
2	CMSENSE_EN	0: 关闭共模电压检测 1: 使能共模电压检测	
7: 3	保留	保留	

GAIN 寄存器

Address: 0x11 复位值: 0x800000, ADC gain 校准寄存器

表34.

位	名称	描述	读/写
23:0	GAIN	ADC GAIN 校准系数	读写

OFFSET 寄存器

Address: 0x12 复位值: 0x000000, ADC offset 校准寄存器

表35.

位	名称	描述	读/写
23:0	OFFSET	ADC offset 校准系数	读写

SYSCLK 寄存器

Address: 0x14 复位值: 0x01, 系统时钟寄存器

表36.

位	名称	描述	读/写
7:0	CD	系统时钟分频系数 0 - 3: OSC/2 4: OSC/4 ... 2^n : OSC/(2^n) 2^{n+1} : OSC/(2^n)	读写

MODCLK 寄存器

Address: 0x15 复位值: 0x10, ADC modulator 分频系数寄存器

表37.

位	名称	描述	读/写
7:0	CD	ADC modulator 时钟分频系数 0 - 3: OSC/2 4: OSC/4 ... 2^n : OSC/(2^n) 2^{n+1} : OSC/(2^n)	读写

CLKCON 寄存器

Address: 0x16 复位值: 0x06, 时钟控制寄存器, 需要先写 0x86 到 USERKEY

表38.

位	名称	描述	读/写
0	CLKEN	内部或外部时钟选择 0: 内部 OSC 1: 根据 CLKSEL pin 的状态选择时钟	
1	保留	保留	
2	CLKSEL_PU_EN	配置 CLKSEL pin 的上拉电阻 1: 使能上拉电阻 0: 断开上拉电阻	

SPICTRL 寄存器

Address: 0x17 复位值: 0x08, SPI 控制寄存器

表39.

位	名称	描述	读/写
0	DAISY_EN	SPI 菊花链使能 0: 不使能菊花链 1: 使能菊花链	读写
1	FIFO_SEL	0: 不使用 FIFO 1: 使能 FIFO	
7:2	保留	保留	

INTOEN 寄存器

Address: 0x18 复位值: 0x21, 中断输出控制寄存器

表40.

位	名称	描述	读/写
0	INT_EN0	$\overline{\text{DRDY}}$ 引脚 ADC 转换完成中断使能	读写
1	INT_EN1	$\overline{\text{DRDY}}$ 引脚 FIFO Enough 中断使能	
2	INT_EN2	$\overline{\text{DRDY}}$ 引脚 FIFO 满中断使能	
3	INT_EN3	$\overline{\text{DRDY}}$ 引脚 FIFO 溢出中断使能	
4	INT_EN4	INT 引脚 ADC 转换完成中断使能	读写
5	INT_EN5	INT 引脚 FIFO Enough 中断使能	
6	INT_EN6	INT 引脚 FIFO 满中断使能	
7	INT_EN7	INT 引脚 FIFO 溢出中断使能	

FIFOSTA 寄存器

Address: 0x19 复位值: 0x00, FIFO 状态寄存器

表41.

位	名称	描述	读/写
4:0	Enough_int_threshold	触发 FIFO Enough 标志的个数阈值	读写
5	Enough_int_flag	FIFO Enough 标志	读写
6	Full_int_flag	FIFO 满标志	读写
7	Overflow_int_flag	FIFO 溢出标志	读写

LOACCLKSEL 寄存器

Address: 0x1A 复位值: 0x00, 导联脱落检测交流时钟分频系数配置寄存器

表42.

位	名称	描述	读/写
3:0	CD	导联脱落检测交流时钟分频系数, WR_EN=1 时可写	读写
4	WR_EN	0: 写入 CD 无效 1: 允许写入 CD	读写

OUTCLK 寄存器

Address: 0x1C 复位值: 0x00, 时钟引出寄存器

表43.

位	名称	描述	读/写
2:0	SEL	选择时钟输出到引脚 0: 0 1: OSC 2: SYSCLK 3: Fmodclk 4: leadoff clk 5: chopclk	读写
4:3	EN	引脚选择 1: 时钟输出到 $\overline{\text{DRDY}}$ 引脚 2: 时钟输出到 INT 引脚	读写

USERKEY 寄存器

Address: 0x1E 复位值: 0x00, 用户 KEY 寄存器

表44.

位	名称	描述	读/写
7:0	KEY	用户 key 0x86: 普通用户 key	读写

GPIO0 寄存器

Address: 0x1F 复位值: 0x00, 通用 IO 寄存器 0

表45.

位	名称	描述	读/写
7	IN_INV	输入 BIT 的取反值	读写
6	IN	输入 BIT 值	读写
5	OUT	输出电平配置, 1:高电平, 0: 低电平	读写
4	SMT	斯密特输入使能	读写
3	PULL_UP	上拉电阻使能	读写
2	PULL_DOWN	下拉电阻使能	读写
1	OUT_EN	输出使能	读写
0	IN_EN	输入使能	读写

GPIO1 寄存器

Address: 0x20 复位值: 0x00, 通用 IO 寄存器 1

表46.

位	名称	描述	读/写
7	IN_INV	输入 BIT 的取反值	读写
6	IN	输入 BIT 值	读写
5	OUT	输出电平配置, 1:高电平, 0: 低电平	读写
4	SMT	斯密特输入使能	读写
3	PULL_UP	上拉电阻使能	读写
2	PULL_DOWN	下拉电阻使能	读写
1	OUT_EN	输出使能	读写
0	IN_EN	输入使能	读写

PLTFMPD 寄存器

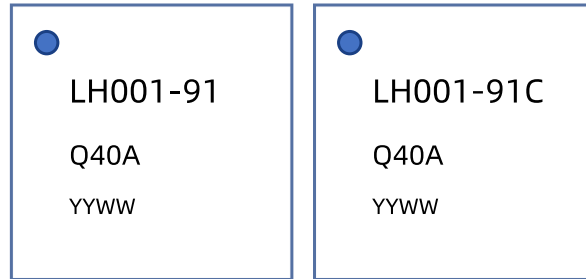
Address: 0x55 复位值: 0x00, 功耗模式

表1

位	名称	描述	读/写
6:0	RESERVED	RESERVED	读
7	PD_ALL	power down mode, write user key before write this register 0: normal mode 1: low power mode	写

13. 封装类型和丝印

13.1. QFN 封装: QFN-40,5 x 5mm, 0.4 pitch



注: LH001-91 为 QFN 金线封装, YYWW 为封装日期。

LH001-91C 为 QFN 铜线封装, YYWW 为封装日期。

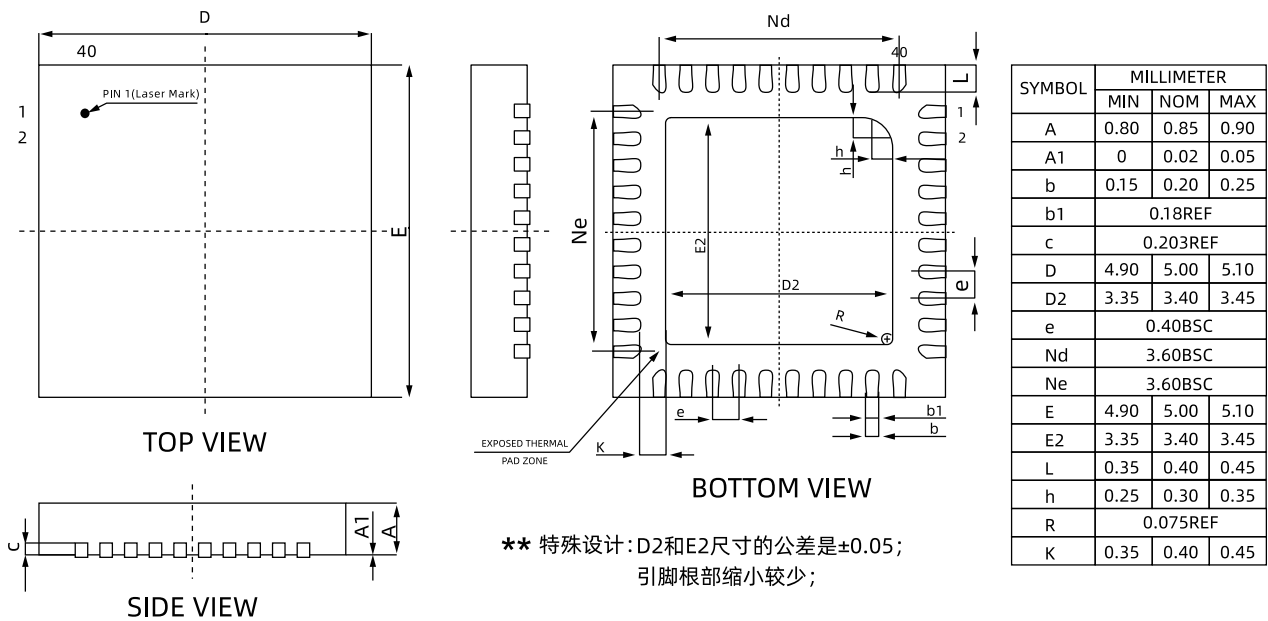
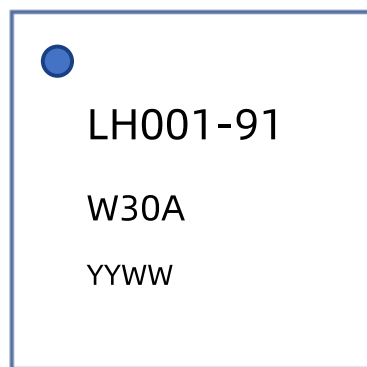


图35. QFN40 封装尺寸

13.2. WLCSP 封装: WLCSP-30,2.950 x 2.950mm, 0.500mm pitch



Top View

注: 上图为 WLCSP 封装, YYWW 为封装日期。

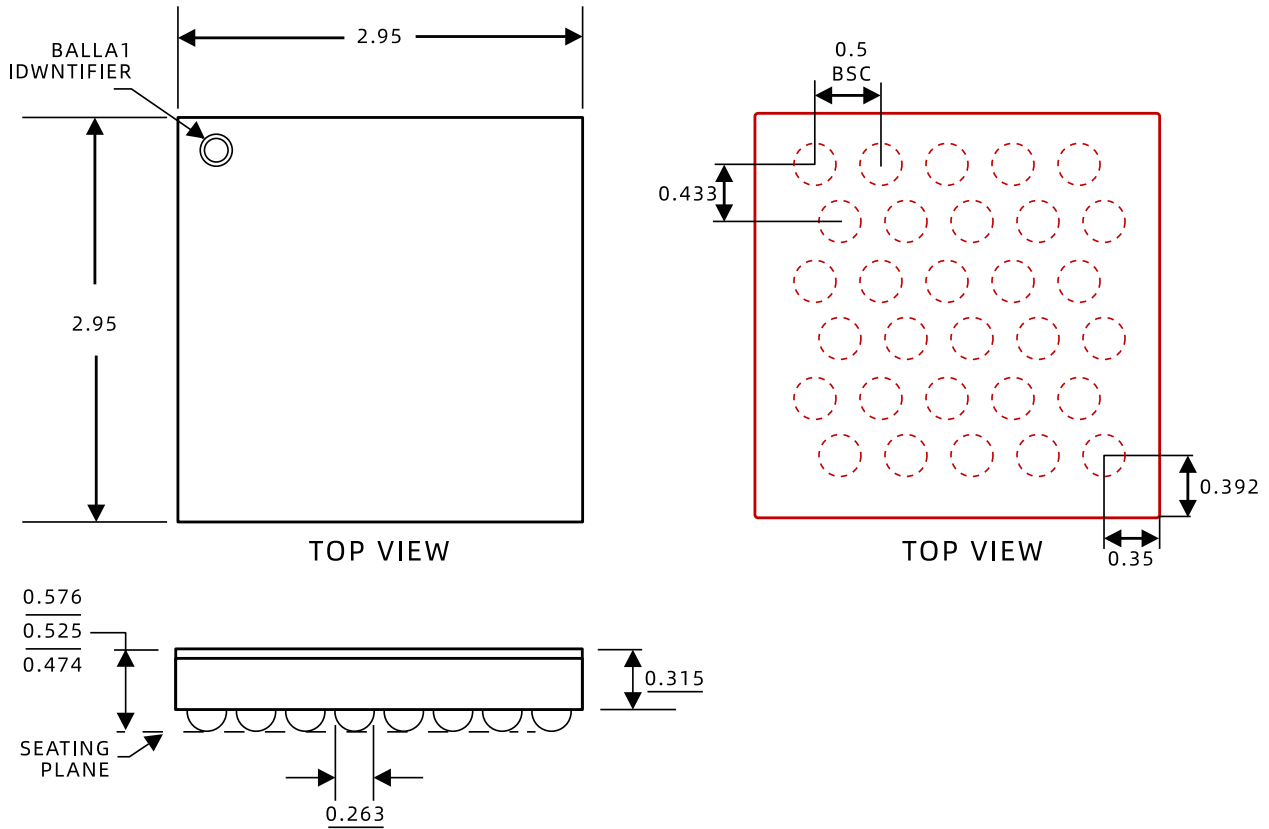


图36. WLCSP30 封装尺寸

13.3. 订购信息

表47.

Orderable Device	Status	Package Type	Pins	Package Qty	Eco Plan	Lead finish/Ball Material	MSL Peak Temp	Op Temp (°C)	Device Marking	Sample
LH001-91Q40AR2	ACTIVE	QFN	40	4000	RoHS & Green	Sn	Level-3-260C-168 HR	-40 to 85	LH001-91	Connect Sales
LH001-91CQ40AR2	ACTIVE	QFN	40	4000	RoHS & Green	Sn	Level-3-260C-168 HR	-40 to 85	LH001-91C	Connect Sales
LH001-91W30AR1	ACTIVE	WLCSP	30	3000	RoHS & Green	Sn	Level-1-260C-1000 HR	-40 to 85	LH001-91	Connect Sales

13.3.1. 包装规格

表48. 包装规格

订购型号	封装类型	引脚数	包装类型	大包装量	备注
LH001-91Q40AR2	QFN	40	REEL	4000 颗/卷	
LH001-91CQ40AR2	QFN	40	REEL	4000 颗/卷	
LH001-91W30AR1	WLCSP	30	REEL	3000 颗/卷	

注释: REEL: 卷带包装;
TRAY: 托盘包装;
TUBE: 管式包装;