



# 应用笔记

ACM32H5 系列芯片  
CORDIC 模块应用笔记

版本: V1.0

日期: 2024-11-19

**上海航芯电子科技股份有限公司**

## 1. 概述

本应用手册适用于 ACM32H5 系列芯片 CORDIC 模块配置。它描述了 CORDIC 模块中不同算法在具体使用中的相关配置，以便在应用程序中进行优化设计。

本应用说明应与相关的用户手册、数据手册一同阅读。

## 2. CORDIC 简介

CORDIC (Coordinate Rotation Digital Computer) 坐标旋转数字计算模块, 提供  $\sin/\cos/\text{atan2}/\sinh/\cosh/$

$\text{atanh}/\ln/\sqrt{\quad}$  等数学运算的硬件加速。CORDIC 可以用于加速指纹算法也可以用于电机控制、测量、信号处理等 (主要是三角函数) 应用。

CORDIC 算法是 J.D.Volder<sup>1</sup> 于 1959 年首次提出, 主要用于三角函数、双曲线、指数、对数的计算。该算法通过基本的加和移位运算代替乘法运算, 使得矢量的旋转和定向的计算不再需要三角函数、乘法、开方、反三角、指数等函数。与软件实现相比, 它加快了这些函数的计算速度, 从而允许处理器用较低的频率工作, 或者减少 CPU 占用时间, 以便处理器执行其他任务。

### 3. 主要特性

- 24 位 CORDIC 旋转引擎;
- 支持圆形和双曲线模式;
- 支持 sin/cos/atan2/sinh/cosh/atanh/ln/sqrt 等函数;
- 支持 1~8 轮可编程精度

CORDIC 是一种高效的连续逐次逼近算法，其核心是利用加法和移位的迭代操作去替代复杂的乘法运算，从而非常有利于硬件实现。

CORDIC 算法一般用于计算三角和双曲线函数。在三角（圆）模式中，不断旋转单位矢量[1,0]，并减小旋转角度直到旋转角度的累积和等于输入角度 $\theta$ ，从而得到输入角度 $\theta$ 的正弦和余弦值(旋转矢量的 x 和 y 笛卡尔分量分别对应于 $\theta$ 的余弦和正弦)。反过来，可以通过不断地减小角度并旋转矢量[x,y]，直到得到单位矢量[1,0]，旋转角度的累积和等于向量[x,y]的角度值（对应于 y/x 的反正切值）。CORDIC 算法也可以用沿着双曲线的步长代替连续的圆形旋转用于计算双曲函数（sinh/cosh/atanh）。其他函数可以从上述基本函数导出。

下表列出了 CORDIC 模块支持的函数。

函数	参数 1	参数 2	结果 1	结果 2
CosineSin	$\theta$	--	$\cos\theta$	$\sin\theta$
AtanSqrt	x	y	$\text{atan2}(y,x)$	$\sqrt{x^2 + y^2}$
CoshSinh	$\theta$	--	$\cosh\theta$	$\sinh\theta$
Atanh	$\theta$	--	$\text{atanh}\theta$	--
Ln	x	--	$\text{Ln}(x)$	--
Sqrt	x	--	$\sqrt{x}$	--

有些函数同时产生两个输出。这是因为这两个结果是在同一个计算过程中同步生成的。

指数函数  $\exp(x)$  可以由  $\sinh(x)$  和  $\cosh(x)$  的和来获得。以 N 为基数的对数  $\log_N(x)$  可以通过将  $\ln(x)$  乘以常数 K 来导出，其中  $K = \frac{1}{\ln(N)}$ 。

对于某些函数（Ln、Sqrt），可应用比例因子（scale）将函数的输入范围扩展到 Q31 格式支持的最大值[-1, 1]之外。对于所有三角（圆）函数，缩放因子必须设置为 0，对于双曲函数缩放因子必须设置为为 1，具体参数设置请参考每个函数的参数说明。

## 4. 数据格式

### 4.1. Q31 定点表示法

CORDIC 模块统一采用 Q31 格式输入输出。Q31 数据格式是一种定点表示法。Q31 格式中，数字由 1 个符号位和 31 个二进制小数位表示，因此数字范围是  $-1(0x80000000)$  到  $1-2^{-31}(0x7FFFFFFF)$ 。

如果应用中是使用 float 类型数据，那么在调用 Cordic 算法时需要将 float 类型转化成 Q31 格式数据进行运算，并将得到的 Q31 结果进行处理后，再转成 float 类型给应用程序使用，具体参数设置请参考每个函数的参数说明。

下面例子展示了浮点数和 Q31 格式相互转换的过程：

浮点数 0.5 转换成 Q31 格式            :  $0.5 * 2^{31} = 1073741824 = 0x40000000$ ,

Q31 格式  $0x40000000$  转换成浮点数 :  $0x40000000 / 2^{31} = 0.5$

### 4.2. Q31 格式与浮点数转换注意问题

由于浮点数的存储格式决定了其取值范围和精度，因此浮点数在转换为 Q31 格式数据时在计算过程中可能会出现舍入误差或者转换错误。

例如：整数 1 对应 Q31 格式数据为  $0x7FFFFFFF$ ，但是浮点数 1.0 在计算机中可能存储为  $1.000000 + \text{精度误差值}$ ，因此浮点数 1.0 在转换为 Q31 格式的数据时可能会产生由于数据溢出导致的转换错误。因此浮点数输入情况下，要特别注意  $\pm 1.0$  等边界值转换可能出现的错误，必要时可直接使用整数 1 值 ( $0x7FFFFFFF$ ) 或者浮点数  $\pm 0.999999$  代替。

## 5. 缩放因子

CORDIC 模块中的部分算法需要引入缩放因子(Scale)。缩放因子能够扩展输入参数范围以覆盖算法支持的范围，避免了输入、输出及内部寄存器饱和。

如果需要使用缩放因子，需要外部软件计算出相应缩放因子，并将输入参数完成相应缩放操作后再输入到算法模块中进行运算。相应地读出的计算结果也要根据缩放因子调整后才可以使⤵用。具体设置请参考每个函数的参数说明。

由于数值缩放过程中数据截断会引起部分数据信息丢失，因此缩放因子会引入精度损失。

## 6. 运算精度及运算时间

CORDIC 模块计算结果的精度取决于 CORDIC 算法的迭代次数。CORDIC 模块支持 1~8 次的精度(迭代次数)配置。每一次迭代运算需要 3 个周期。

## 7. 具体算法操作说明

### 7.1. CosineSine

函数功能	CosineSine 函数计算一个在 $\pi$ 到 $\pi$ 范围内的角度的正余弦 还可以用于极坐标到直角坐标的转换		
	参数	参数范围	参数描述
输入参数	$\theta$	[-1,1]	以弧度为单位的角度值, 需要除以 $\pi$ 以便将输入参数范围转换到[-1,1], Q31 格式
输出参数 1	$\cosh\theta$	[-1,1]	输入角度的余弦值, Q31 格式
输出参数 2	$\sin\theta$	[-1,1]	输入角度的正弦值, Q31 格式

CORDIC 驱动库中 Cosine/Sine 函数调用流程如下(以 float 型数据作为输入输出为例说明):

- 1) 将输入的 float 格式数据乘以  $2^{31}$ , 转化成 Q31 格式数据;
- 2) 调用 hal\_cordicu.lib 库的 HAL\_CORDIC\_CosSin\_x 函数(x 为计算精度, 范围[1~8]), 对 Q31 格式输入数据进行运算, 得到 Q31 格式的 Cosine/Sine 运算结果;
- 3) 将 Q31 格式的运算结果除以  $2^{31}$ , 得到对应 float 格式的 Cosine/Sine 运算结果;

### 7.2. AtanSqrt

函数功能	AtanSqrt 函数计算矢量 $v=[x,y]$ 在 $-\pi$ 到 $\pi$ 范围内的相位角,可参考函数 atan2(y,x), 还可以用于直角坐标到极坐标的转换		
	参数	参数范围	参数描述
输入参数 1	x	[-1,1]	x 坐标, 如果 $ x >1$ ,必须软件缩放以满足 Q31 格式的输入范围
输入参数 2	y	[-1,1]	y 坐标, 如果 $ y >1$ ,必须软件缩放以满足 Q31 格式的输入范围
输出参数 1	$\sqrt{x^2 + y^2}$	[0,1]	输入矢量的模 如果 $ v >1$ 计算结果将饱和输出为 1
输出参数 2	atan2(y,x)	[-1,1]	输入矢量的相位角 需要乘以 $\pi$ 以得到弧度为单位的角度

CORDIC 驱动库中 AtanSqrt 函数调用流程如下(以用 float 型数据作为输入输出为例说明):

- 1) 检查输入参数 x,y 是否满足[-1,1], 如不满足需要软件缩放至[-1,1]范围内;
- 2) 将调整后的的 float 格式数据乘以  $2^{31}$ , 转化成 Q31 格式数据;
- 3) 调用 hal\_cordic 库的 HAL\_CORDIC\_AtanSqrt\_x 函数(x 为计算精度, 范围[1~8]),对 Q31 格式输入数据进行运算, 得到 Q31 格式的 AtanSqrt 运算结果;
- 4) 将 Q31 格式的 Sqrt 运算结果除以(CORDIC\_F\_31>>4, CORDIC\_F\_31 = 0xD2C90A46), 得到对应的 float 格式的 Sqrt 运算结果, 如果第 1 步中有缩放调整, 此处需反向缩放获得最终结果(缩放因子与输入相同);
- 5) 将 Q31 格式的 Atan 运算结果除以  $2^{31}$ , 得到对应 float 格式的 Atan 运算结果。如果想要得到以弧度为单位的角度值, 需要将运算结果乘以 $\pi$ ;



## 7.3. CoshSinh

函数功能	CoshSinh 函数计算双曲角度 x 的双曲正余弦 它也可用于计算指数函数 $e^x = \cosh x + \sinh x$ 和 $e^{-x} = \cosh x - \sinh x$		
	参数	参数范围	参数描述
输入参数	$\theta$	[-0.559,0.559]	输入双曲线角度值, 算法支持参数范围为[-1.118~1.118]。由于这个范围超过 Q31 格式的表示范围, 故输入算法运算时需先将输入参数除以 2, 这样实际进入模块运算的参数范围就变为[-0.559,0.559]。
输出参数 1	$\cosh\theta$	[0.5,0.846]	输入角度的双曲余弦值, Q31 格式, 需要乘以 2 才能得到最终结果
输出参数 2	$\sinh\theta$	[-0.683, 0.683]	输入角度的双曲正弦值, Q31 格式, 需要乘以 2 才能得到最终结果

- 1) CORDIC 驱动库中 CoshSinh 函数调用流程如下(以用 float 型数据作为输入输出为例说明):
- 2) 输入的 float 格式数据除以 2 乘以  $2^{31}$ , 将输入数据转化成[-0.559,0.559]范围内的 Q31 格式数据;
- 3) 调用 hal\_cordic 库的 HAL\_CORDIC\_CoshSinh\_x 函数(x 为计算精度, 范围[1~8]),对 Q31 格式输入数据进行运算, 得到 Q31 格式的 CoshSinh 运算结果;
- 4) 将 Q31 格式的运算结果除以  $2^{31}$  并乘以 2, 得到 float 格式的 CoshSinh 运算结果;

## 7.4. Atanh

函数功能	Atanh 函数计算输入参数 x 的双曲反正切		
	参数	参数范围	参数描述
输入参数	$\theta$	[-0.403 0.403]	算法支持参数范围为[-0.806~0.806]。输入算法模块运算时必须先将输入参数除以 2, 这样实际进入模块运算的参数范围就变为[-0.403 0.403]
输出参数	$\operatorname{atanh}\theta$	[-0.559 0.559]	输入参数的双曲反正切值, Q31 格式, 需要乘以 2 才能得到最终结果

CORDIC 驱动库中 Atanh 函数调用流程如下(以用 float 型数据作为输入输出为例说明):

- 1) 输入的 float 格式数据除以 2 乘以  $2^{31}$ , 将输入数据转化成[-0.403 0.403]范围的 Q31 格式数据;
- 2) 调用 hal\_cordic 库的 HAL\_CORDIC\_Atanh\_x 函数(x 为计算精度, 范围[1~8]),对 Q31 格式输入数据进行运算, 得到 Q31 格式的 Atanh 运算结果;
- 3) 将 Q31 格式的运算结果除以  $2^{31}$  并乘以 2, 得到 float 格式的 Atanh 运算结果;

## 7.5. Ln

函数功能	Ln 函数计算输入参数 x 的自然对数		
	参数	参数范围	参数描述
输入参数	x	[0.054~0.875]	算法支持参数范围为[0.107~9.35]。输入算法模块运算时必须先将输入参数按照输入参数缩放表进行相应缩放再输入算法模块进行运算。这样实际进入模块运算的参数范围就变为[0.054~0.875]
输出参数	$Ln(x)$	[-0.279~0.137]	输入参数的自然对数值，Q31 格式，需要乘以 4 才能得到最终结果

CORDIC 驱动库中 Ln 函数调用流程如下(以用 float 型数据作为输入输出为例说明):

1) 判断输入数据 x 范围，参照下表进行缩放并转成 Q31 格式；

输入数据范围	Scale	转 Q31 格式	输入参数范围(float 格式)
$0.107 \leq x < 1$	1	乘以 $2^{31}$ 并除以 2	$0.0535 \leq ARG1 < 0.5$
$1 \leq x < 3$	2	乘以 $2^{31}$ 并除以 4	$0.25 \leq ARG1 < 0.75$
$3 \leq x < 7$	3	乘以 $2^{31}$ 并除以 8	$0.375 \leq ARG1 < 0.875$
$7 \leq x \leq 9.35$	4	乘以 $2^{31}$ 并除以 16	$0.4375 \leq ARG1 < 0.584$

2) 调用 hal\_cordic 库的 HAL\_CORDIC\_Ln\_x 函数(x 为计算精度，范围[1~8])，对 Q31 格式输入数据进行运算，得到 Q31 格式的 Ln 运算结果；

3) 将 Q31 格式的运算结果除以  $2^{31}$  并乘以 4，得到对应 float 格式的 Ln 运算结果；

## 7.6. Sqrt

函数功能	Sqrt 函数计算输入参数 x 的平方根		
	参数	参数范围	参数描述
输入参数	x	[0.027~0.875]	算法支持参数范围为[0.027~2.341]。输入算法模块运算时必须先将输入参数按照输入参数缩放表进行相应缩放再输入算法模块进行运算。这样实际进入模块运算的参数范围就变为[0.027~0.875]
输出参数	$\sqrt{x}$	[0.04~1]	输入参数的平方根，Q31 格式，需要按照输出参数转换表处理后才能得到最终结果

CORDIC 驱动库中 Sqrt 函数调用流程如下(以用 float 型数据作为输入输出为例说明):

1) 判断输入数据 x 范围，参照下表进行缩放并转成 Q31 格式；

输入数据范围	Scale	转 Q31 格式	输入参数范围(float 格式)
$0.027 \leq x < 0.75$	0	乘以 $2^{31}$	$0.027 \leq ARG1 < 0.75$
$0.75 \leq x < 1.75$	1	乘以 $2^{31}$ 并除以 2	$0.375 \leq ARG1 < 0.875$
$1.75 \leq x \leq 2.341$	2	乘以 $2^{31}$ 并除以 4	$0.4375 \leq ARG1 \leq 0.585$

2) 调用 hal\_cordic 库的 HAL\_CORDIC\_Sqrt\_x 函数(x 为计算精度，范围[1~8])，对 Q31 格式输入数据进行运算，得到 Q31 格式的 Sqrt 运算结果；

3) 参照下面输出参数转换表, 得到对应 float 格式的 Sqrt 运算结果(W\_INV\_Q31 = 0x6A012206)

Scale	对应操作
0	除以 W_INV_Q31
1	乘以 2 并除以 W_INV_Q31
2	乘以 4 并除以 W_INV_Q31

## 8. 版本历史

版本	日期	作者	描述
V1.0	2024-11-19	Aisinochip	初始版

### 版权声明

本文档的所有部分，其著作权归上海航芯电子科技股份有限公司（简称航芯科技）所有，未经航芯科技授权许可，任何个人及组织不得复制、转载、仿制本文档的全部或部分组件。本文档没有任何形式的担保、立场表达或其他暗示，若有任何因本文档或其中提及的产品所有资讯所引起的直接或间接损失，航芯科技及所属员工恕不为其担保任何责任。除此以外，本文档所提到的产品规格及资讯仅供参考，内容亦会随时更新，恕不另行通知。

### 联系我们

公司：上海航芯电子科技股份有限公司

地址：上海市闵行区合川路 2570 号科技绿洲三期 2 号楼 702 室

邮编：200241

电话：+86-21-6125 9080

传真：+86-21-6125 9080-830

Email: [service@AisinoChip.com](mailto:service@AisinoChip.com)

Website: [www.AisinoChip.com](http://www.AisinoChip.com)