

GigaDevice Semiconductor Inc.

基于 GD32 MCU 的 PWM-DAC 技术指南

应用笔记

AN320

1.0 版本

(2026 年 3 月)

目录

目录.....	2
图索引.....	3
表索引.....	4
1. 前言.....	5
2. PWM-DAC 基本原理分析.....	6
2.1. PWM 信号的傅里叶变换与频谱分析.....	6
2.2. PWM 输入到 DAC 输出的转换.....	7
3. PWM-DAC 分辨率：建模与理论分析.....	8
3.1. PWM-DAC 的转换分辨率.....	8
3.2. 如何权衡 PWM-DAC 分辨率与滤波参数.....	9
4. PWM-DAC 测试结果.....	11
5. 结论.....	12
6. 版本历史.....	13

图索引

图 2-1. PWM 信号时域波形	6
图 2-2. PWM 信号频域波形	7
图 2-3. PWM 信号滤波得到直流电压的原理	7
图 3-1. MCU PWM 产生原理	8
图 3-2. PWM-DAC 精度与 PWM 信号频率关系	9
图 3-3. 一阶和二阶 RC 低通滤波器的波特图	10

表索引

表 1-1. 适用产品	5
表 4-1. PWM 信号频率 100 kHz 时的测试结果	11
表 6-1. 版本历史	13

1. 前言

在现代嵌入式系统中，数模转换（DAC）是连接数字处理与模拟信号领域的关键接口。DAC 广泛应用于音频信号产生、传感器激励、电压调整、信号调制与电机控制等场景。然而，在资源有限或成本敏感的嵌入式设计中，并非所有微控制器（MCU）都集成了专用的 DAC 模块。为实现模拟信号输出且保证系统简化和低成本，基于脉宽调制（PWM）的 DAC 技术应运而生，并成为一种高效且灵活的替代方案。

本篇应用笔记全面介绍了在 GD32 MCU 平台上实现和应用 PWM-DAC 技术的方法。内容包括 PWM-DAC 的基本原理、精度分析、滤波电路分析和测试结果。通过本文档，工程师可快速掌握如何利用 GD32 MCU 的定时器资源生成高质量的模拟信号，为现代嵌入式系统设计提供了经济高效且灵活的解决方案。

表 1-1. 适用产品

类型	型号
MCU	GD32 MCU 全系列

注意：本应用笔记仅作参考，若与用户手册或数据手册内容有冲突，以用户手册或数据手册为准。

2. PWM-DAC 基本原理分析

2.1. PWM 信号的傅里叶变换与频谱分析

根据傅里叶分析，任意周期信号都可以表示为无穷多个不同频率正弦分量的叠加。对于周期为 T 的信号 $f(t)$ ，可表示为：

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_0 t) \quad (2-1)$$

其中， $\omega_0 =$ 基波角频率，其表达式为：

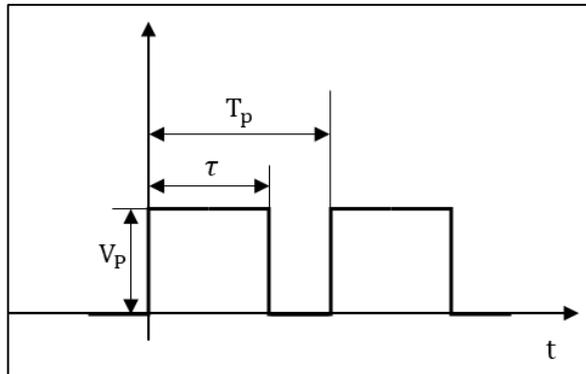
$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (2-2)$$

如 [图 2-1. PWM 信号时域波形](#) 所示，PWM 信号为周期性的方波，其高电平持续时间由占空比 D 决定，且 D 通常在 0 到 1 之间。占空比的定义为高电平时间占整个波形周期的比例，其表达式为：

$$D = \frac{\tau}{T_p} \quad (2-3)$$

其中， $T_p =$ PWM 信号周期， $\tau =$ 高电平持续时间。

图 2-1. PWM 信号时域波形



将 PWM 信号展开成傅里叶级数：

$$v_{\text{PWM}}(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(2n\pi f_{\text{PWM}} t) \quad (2-4)$$

其中， $A_0 =$ 直流分量幅值， $A_n =$ 谐波分量幅值， $f_{\text{PWM}} =$ PWM 信号频率。

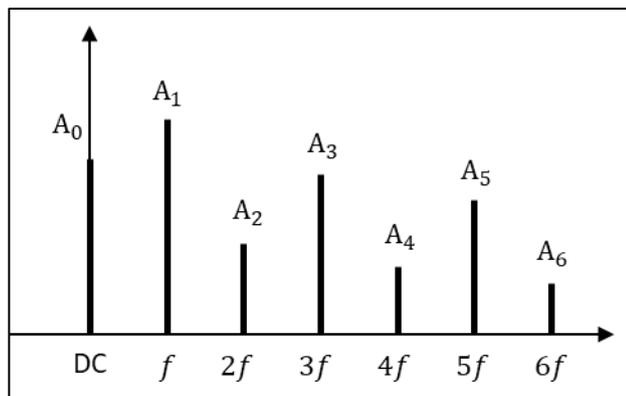
分别展开 A_0 和 A_n ，可得：

$$A_0 = DV_p \quad (2-5)$$

$$A_n = \frac{V_p}{n\pi} \left\{ \sin(n\pi D) - \sin \left[2n\pi \left(1 - \frac{D}{2} \right) \right] \right\} \quad (2-6)$$

[图 2-2. PWM 信号频域波形](#)展示了 PWM 信号各个谐波的幅值分布。从公式(2-5)和(2-6)来看，直流分量和谐波分量的幅值均与占空比 D 相关，与 PWM 信号频率 f_{PWM} 无关。

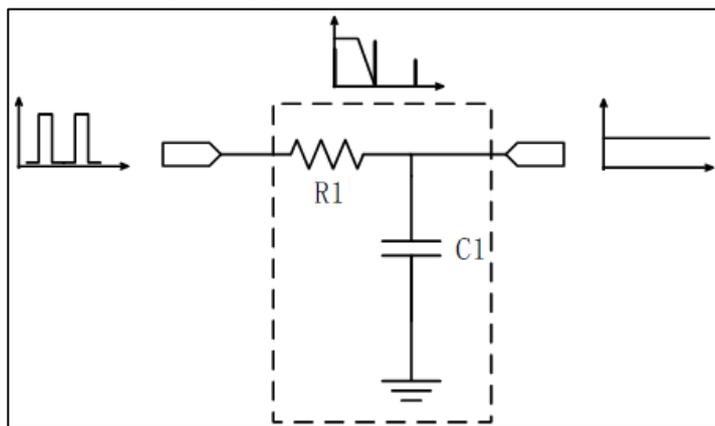
图 2-2. PWM 信号频域波形



2.2. PWM 输入到 DAC 输出的转换

如 [PWM 信号的傅里叶变换与频谱分析](#) 章节所述，PWM 信号的直流分量与其占空比 D 成正比。PWM-DAC 技术基于频域，通过滤波去除 PWM 信号中的谐波分量，仅保留核心的直流分量，从而实现数字信号到模拟信号的转换。实现原理如 [图 2-3. PWM 信号滤波得到直流电压的原理](#) 所示。

图 2-3. PWM 信号滤波得到直流电压的原理



在大多数情况下，一阶无源 RC 滤波器即可满足 PWM-DAC 的实现需求，适用于对输出精度要求较低的应用场景。但要获得更高的输出精度，可以采用高阶 RC 滤波网络。

为保持高输入阻抗、减小负载效应并提升滤波性能，建议采用运算放大器（Op-Amp）搭建有源滤波器。有源滤波器不仅能提供信号缓冲，还支持按照设计需求实现特定频率响应，如巴特沃斯或切比雪夫响应，从而优化系统的动态特性与精度。关于滤波设计的更多讨论，可参考 [如何权衡 PWM-DAC 分辨率与滤波参数](#) 章节。

3. PWM-DAC 分辨率：建模与理论分析

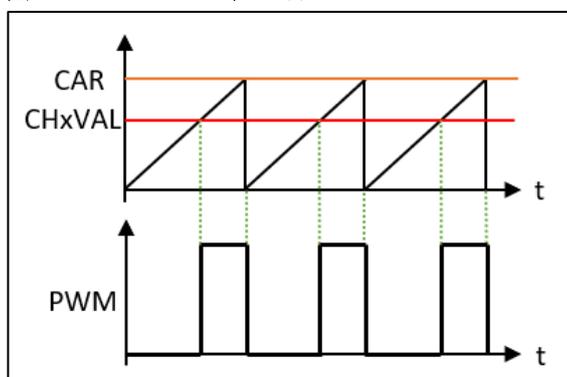
3.1. PWM-DAC 的转换分辨率

如[图 3-1. MCU PWM 产生原理](#)所示，对于确定周期（CAR 固定）的 PWM 信号，占空比由 CHxVAL 寄存器决定。占空比的最小步进值，如公式(3-1)所示，与 DAC 的最小分辨率成线性关系。

$$D_0 = \frac{1}{2^N} \quad (3-1)$$

其中，N = 计数器位宽(bit)。

图 3-1. MCU PWM 产生原理



最小步进值还可表示为计数器时钟频率与 PWM 信号频率的函数。

$$D_0 = \frac{f_{PWM}}{f_c} \quad (3-2)$$

其中， f_{PWM} = PWM 信号频率， f_c = 计数器时钟频率。

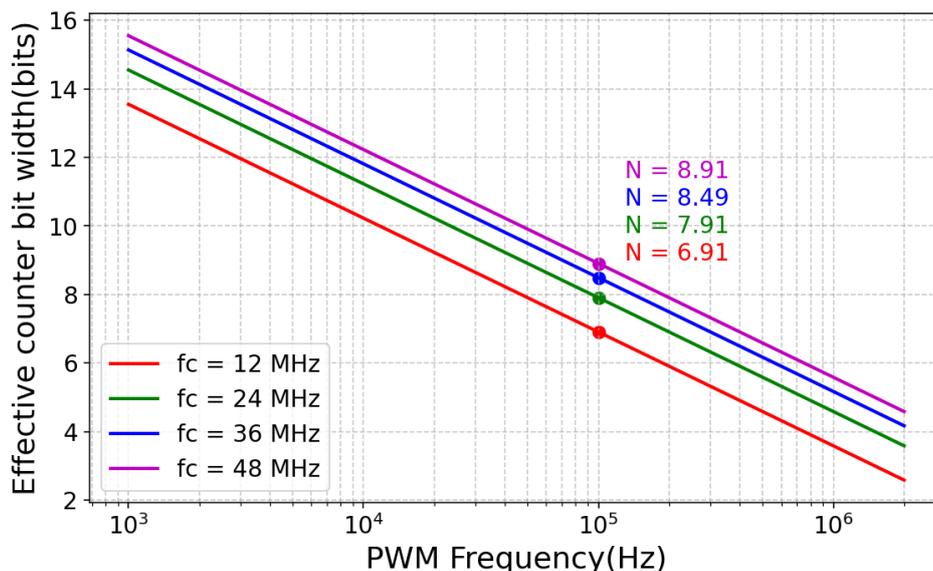
PWM-DAC 对应输出的理论最小电压为

$$V_{min} = V_p * D_0 \quad (3-3)$$

由公式(3-2)可知，减小 f_{PWM} 或增大 f_c 均可获得更小的 D_0 ，从而提升 PWM-DAC 的分辨率。但降低 f_{PWM} 会要求滤波器的截止频率更低，显著增加了电路复杂度和元件成本，这与 PWM-DAC 技术的低成本特性相悖。因此，提高 f_c 是提升 PWM-DAC 分辨率最实用高效的方法。

以 GD32C231xx 举例，其最大计数器时钟频率为 48 MHz。[图 3-2. PWM-DAC 精度与 PWM 信号频率关系](#)仿真了 PWM-DAC 分辨率与 PWM 信号频率在四种计数器频率（12 MHz、24 MHz、36 MHz 和 48 MHz）下的关系。当 $f_{PWM} = 100$ kHz 时，PWM-DAC 的有效计数器位宽 N 约为 8.9 bits。

图 3-2. PWM-DAC 精度与 PWM 信号频率关系



3.2. 如何权衡 PWM-DAC 分辨率与滤波参数

如前文所述，通过降低 f_{PWM} 提升 PWM-DAC 分辨率势必会增加滤波电路的复杂度与成本。以下部分将介绍一种实现这两项参数平衡的设计方法，使 PWM-DAC 在系统约束下获得更好的精度。

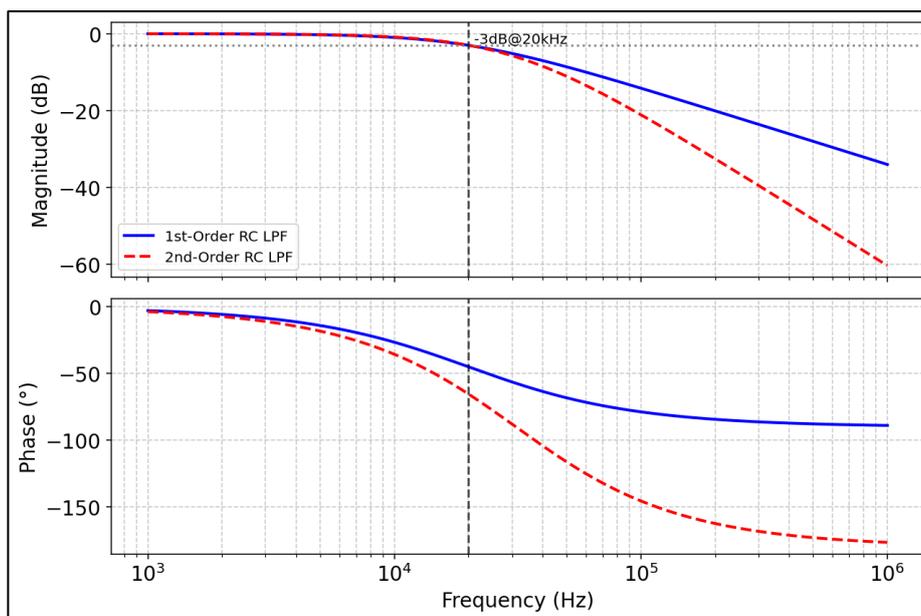
无源 RC 滤波网络因结构简单、易于实现而被广泛采用。文中对一阶与二阶无源 RC 滤波器进行了对比分析，相应的传递函数见公式(3-4)和(3-5)。

$$H_1(s) = \frac{1}{1 + sRC} \quad (3-4)$$

$$H_2(s) = \frac{1}{s^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + s R_1 C_1 + s R_2 C_2 + 1} \quad (3-5)$$

为更好的对比两种滤波器，一阶和二阶无源 RC 网络在截止频率为 20 kHz 时的幅频和相频响应如 [图 3-3. 一阶和二阶 RC 低通滤波器的波特图](#) 所示。可以看出，二阶滤波器相比一阶滤波器具有更陡峭的衰减斜率(-40 dB/十倍频程)和更长的相位延迟，可以更有效地抑制谐波分量。

图 3-3. 一阶和二阶 RC 低通滤波器的波特图



从公式(3-2)可知，一次谐波频率越低，PWM-DAC 能实现的精度越高。但当滤波网络未能有效抑制谐波时，剩余的谐波分量必然叠加到直流输出上，降低 PWM-DAC 的精度。滤波器的幅频特性随阶数变化明显，如 [图 3-3. 一阶和二阶 RC 低通滤波器的波特图](#) 所示，二阶无源 RC 滤波器具备更陡峭的衰减率，对一次谐波具有更好抑制，从而获得更高的有效位数（ENOB）。但随着 PWM 频率提升，PWM-DAC 的最小步进值变大，能实现的精度将迅速下降。为获得更高精度，滤波网络的衰减率应进行优化，同时建议一次谐波的衰减在 -60 dB 到 -40 dB 之间。

在实际的 PWM-DAC 应用中，简单的 RC 低通滤波器能够平滑 PWM 波形，但其负载驱动能力有限。为提升输出驱动并确保不同负载条件下的电压输出稳定，通常在末级加入一个运算放大器作为电压跟随器，以提供低输出阻抗和更强的带载能力。

4. PWM-DAC 测试结果

现将 GD32C231xx 的 PA1 引脚配置为输出，计数器时钟频率 f_c 配置为 48 MHz，生成频率为 100 kHz 的 PWM 信号，并在输出端串联一阶无源 RC 滤波器提取直流分量，其中 $R=4.7\text{ k}\Omega$ ， $C=100\text{ nF}$ 。在此配置下，一次谐波分量的衰减约为 -49 dB，符合建议的 -60 dB 到 -40 dB 范围。详细测试数据见 [表 4-1. PWM 信号频率 100 kHz 时的测试结果](#)。

表 4-1. PWM 信号频率 100 kHz 时的测试结果

CHxVAL	理论电压 (mV)	测量电压 (mV)	误差 (mV)
48	332.8	331.9	-0.9
96	665.6	663.6	-2.0
144	998.4	995.4	-3.0
192	1331.2	1327.2	-4.0
240	1664	1659	-5.0
288	1996.8	1990.9	-5.9
336	2329.6	2322.8	-6.8
384	2662.4	2654.8	-7.6
386	2676.3	2668.8	-7.5
388	2690.1	2682.6	-7.5
390	2704	2696.5	-7.5
392	2717.9	2710.3	-7.6
394	2731.7	2724.2	-7.5
395	2738.7	2731.1	-7.6
396	2745.6	2738	-7.6
397	2752.5	2744.9	-7.6
398	2759.5	2751.8	-7.7
432	2995.2	2986.9	-8.3
480	3328	3319.1	-8.9

根据 [表 4-1. PWM 信号频率 100 kHz 时的测试结果](#) 所示的结果，DAC 的最小分辨率约为 6.9 mV，与公式(3-3)得出的理论值一致。然而，这一分辨率未考虑一次谐波残余分量的影响。实际上，电压测量仪器多数都采用运算放大器，会对一阶无源 RC 滤波器的输出进行积分，从而提升了测量精度。因此，评估 ENOB 时，也需综合考虑一次谐波残余分量的影响。

5. 结论

本应用笔记验证了 PWM-DAC 技术可通过定时器输出和简单 RC 滤波器产生模拟电压。该方案为嵌入式系统提供了经济高效且灵活的解决方案，无需专门的 DAC 硬件。通过优化 PWM 参数及滤波器设计，该方法可在不同 GD32 MCU 产品中实现稳定且可预测的输出性能。

6. 版本历史

表 6-1. 版本历史

版本号.	说明	日期
1.0	首次发布	2026 年 03 月 30 日

Important Notice

This document is the property of GigaDevice Semiconductor Inc. and its subsidiaries (the "Company"). This document, including any product of the Company described in this document (the "Product"), is owned by the Company according to the laws of the People's Republic of China and other applicable laws. The Company reserves all rights under such laws and no Intellectual Property Rights are transferred (either wholly or partially) or licensed by the Company (either expressly or impliedly) herein. The names and brands of third party referred thereto (if any) are the property of their respective owner and referred to for identification purposes only.

To the maximum extent permitted by applicable law, the Company makes no representations or warranties of any kind, express or implied, with regard to the merchantability and the fitness for a particular purpose of the Product, nor does the Company assume any liability arising out of the application or use of any Product. Any information provided in this document is provided only for reference purposes. It is the sole responsibility of the user of this document to determine whether the Product is suitable and fit for its applications and products planned, and properly design, program, and test the functionality and safety of its applications and products planned using the Product. The Product is designed, developed, and/or manufactured for ordinary business, industrial, personal, and/or household applications only, and the Product is not designed or intended for use in (i) safety critical applications such as weapons systems, nuclear facilities, atomic energy controller, combustion controller, aeronautic or aerospace applications, traffic signal instruments, pollution control or hazardous substance management; (ii) life-support systems, other medical equipment or systems (including life support equipment and surgical implants); (iii) automotive applications or environments, including but not limited to applications for active and passive safety of automobiles (regardless of front market or aftermarket), for example, EPS, braking, ADAS (camera/fusion), EMS, TCU, BMS, BSG, TPMS, Airbag, Suspension, DMS, ICMS, Domain, ESC, DCDC, e-clutch, advanced-lighting, etc.. Automobile herein means a vehicle propelled by a self-contained motor, engine or the like, such as, without limitation, cars, trucks, motorcycles, electric cars, and other transportation devices; and/or (iv) other uses where the failure of the device or the Product can reasonably be expected to result in personal injury, death, or severe property or environmental damage (collectively "Unintended Uses"). Customers shall take any and all actions to ensure the Product meets the applicable laws and regulations. The Company is not liable for, in whole or in part, and customers shall hereby release the Company as well as its suppliers and/or distributors from, any claim, damage, or other liability arising from or related to all Unintended Uses of the Product. Customers shall indemnify and hold the Company, and its officers, employees, subsidiaries, affiliates as well as its suppliers and/or distributors harmless from and against all claims, costs, damages, and other liabilities, including claims for personal injury or death, arising from or related to any Unintended Uses of the Product.

Information in this document is provided solely in connection with the Product. The Company reserves the right to make changes, corrections, modifications or improvements to this document and the Product described herein at any time without notice. The Company shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. Information in this document supersedes and replaces information previously supplied in any prior versions of this document.