TB3250

采用 PWM 产生模拟输出

简介

许多单片机应用都要求使用模拟输出信号。许多低成本单片机都使用外设来处理模拟输入信号，如模数转换器（Analog-to-Digital Converter，ADC），但通常不包含数模转换器（Digital-to-Analog Converter，DAC）。当然，还有许多外部 DAC 可以选择；但这些器件可能都需要额外的 I/O 连接或 PCB 空间，会增加应用成本。幸运的是，大多数单片机都有一个脉宽调制（Pulse-Width Modulation，PWM）模块，可与低通滤波器组合使用以实现模拟输出。本技术简介重点介绍如何使用低通滤波器将 PWM 信号转换为模拟信号。

© 2020 Microchip Technology Inc.

目录

简介 1

1. 脉宽调制（PWM） 3
   1.1. 配置 PWM 模块 3

2. 低通滤波 5
   2.1. RC 滤波器示例 6

3. 结论 14

Microchip 网站 15

产品变更通知服务 15

客户支持 15

Microchip 器件代码保护功能 15

法律声明 15

商标 16

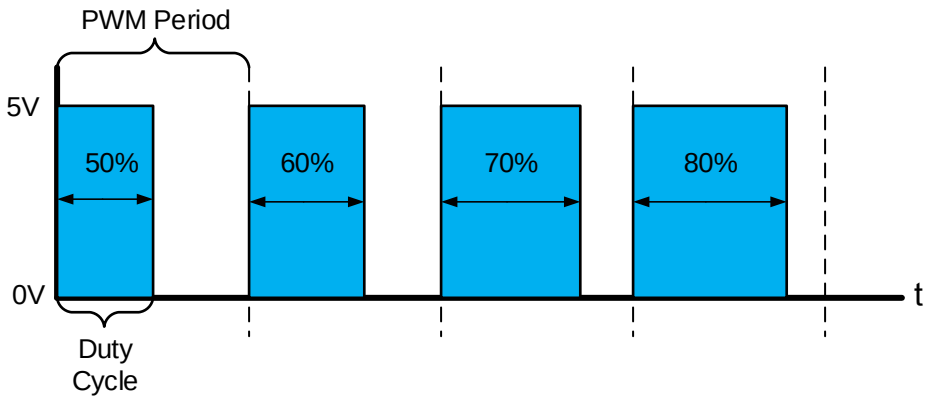
质量管理体系 16

全球销售及服务网点 17

1. 脉宽调制（PWM）

PWM模块可生成脉宽调制数字信号。在典型的PWM 信号中，基频是固定的，而脉宽是可变的（见图 1-1）。脉宽也被称为占空比）与原始未调制信号的幅度成正比，如公式 1-1 中所示。例如，如果需要 2.5V 输出信号，并且 PWM 信号具有 5V 的逻辑高电压和 0V 的逻辑低电压，则占空比为 50%的 PWM 信号就足够。50%占空比意味着一半周期，PWM 输出 5V，平均每个周期输出 2.5V。

图 1-1. PWM 波形



公式 1-1. 电压输出

$$V_{OUT} = A \times 占空比$$

其中 ：

A = 逻辑“高”电压幅度

1.1 配置 PWM 模块

例1-1显示如何配置标准 10 位 PWM。本例包含 PWM 和 Timer2 模块的初始化程序，两者都是生成 PWM信号所必需的。

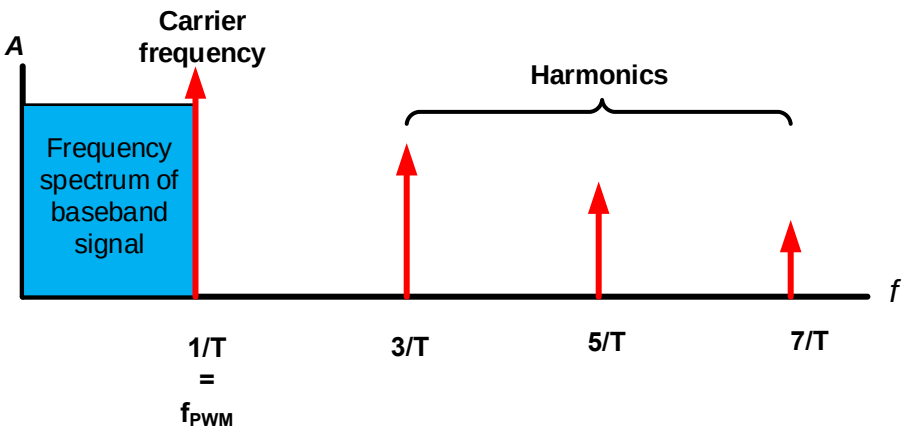
例 1-1. PWM 和 Timer2 初始化程序

```
void PWM3_Initialize(void)
 {
    PWM3CON = 0x80;                                  // POL active_hi; EN 使能
    PWM3DCH = 0x27;                                  // DC = 50%
    PWM3DCL = 0xC0;
 }

 void PWM3_LoadDutyValue(uint16_t dutyValue)
 {
     PWM3DCH = (dutyValue & 0x03FC)>>2;              //PWM 占空比为 8 MSB
     PWM3DCL = (dutyValue & 0x0003)<<6;              //PWM 占空比为 2 LSB
 }

 void TMR2_Initialize(void)
 {
    T2CLKCON = 0x01;                                 // T2CS FOSC/4
    T2HLT = 0x00;
    T2RST = 0x00;
    T2PR = 0x4F;                                     // 每 10 us 计满返回
    T2TMR = 0x00;                                    // 清除 IF 标志
    PIR4bits.TMR2IF = 0;
    T2CON = 0x80;                                    // CKPS 1:1; OUTPS 1:1; ON 导通
 }
```

2. 低通滤波

典型 PWM 信号的傅立叶分析结果表明，在载波频率下会出现峰值，在载波的整数倍频率下会出现高阶谐波（见图 2-1）。这些信号会给系统带来不必要的噪声，可以使用简单的低通滤波器来减少或消除。

图 2-1. PWM 信号的傅里叶分析



所需信号的带宽应小于或等于 PWM 频率（见图 2-2）。如果所需信号的带宽等于 PWM 频率，可使用砖墙式滤波器。砖墙式滤波器几乎在瞬间从无衰减跳变至完全衰减，但创建这种类型的滤波器成本非常高，也非常复杂。如果需要这种精度，使用外部 DAC 可能会比构建昂贵的滤波器的成本更低。在实际应用中，可使用外部 RC 低通滤波器，如图2-3 中所示。如果使用简单的 RC 滤波器，所需信号的带宽就必须小于 PWM 频率。

图 2-2. PWM 信号所需带宽

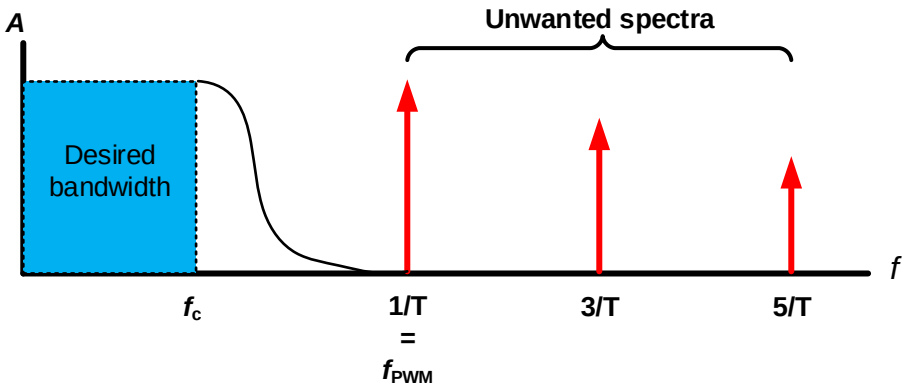
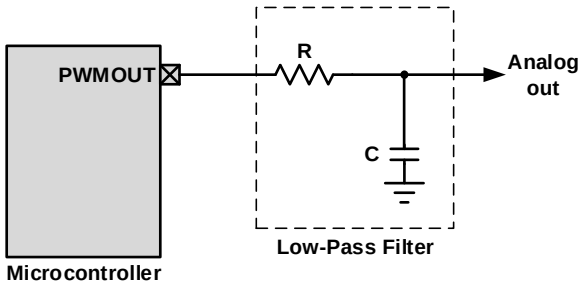


图 2-3. 外部 RC 低通滤波器



2.1 RC 滤波器示例

在本例中，要求设计一个简单的 RC 低通滤波器，通过 4 kHz 带宽的脉宽调制信号来获得模拟输出信号。

第 1 步：选择低通滤波器的电阻和电容值。

公式 2-1 显示如何根据截止频率（f_C）计算 R 值和 C 值。在本例中，根据固定电容值计算电阻值，如表 2-1 中所示。

公式 2-1. RC 时间常数

$$RC = \frac{1}{2\pi \times f_C}$$

其中 ：

R：*电阻*

C：*电容*

f_C：*截止频率*

表 2-1. 计算得出的电阻值

电容值	计算得出的电阻值
1 pF	40 MΩ
0.01 µF	4 kΩ
0.022 µF	1.8 kΩ

第 2 步：计算 PWM 频率下的衰减。

公式 2-2 显示基于 RC 值和 PWM 频率的衰减（dB）。

公式 2-2. 衰减（dB）

$$\text{衰减}\left(dB\right) @ f_{PWM} = -10\log\left[1 + (2\pi \times f_{PWM} \times RC)^2\right]$$

表 2-2. PWM 频率下的衰减（F_{PWM}）

F_{PWM}	R 值	C 值	F_{PWM} 下的衰减（dB）
10 kHz	40 MΩ	1 pF	-8.64
10 kHz	4 kΩ	0.01 µF	-8.64
10 kHz	1.8 kΩ	0.022 µF	-8.57

.....（续）

F_{PWM}	R 值	C 值	F_{PWM} 下的衰减（dB）
100 kHz	40 MΩ	1 pF	-28.01
100 kHz	4 kΩ	0.01 µF	-28.01
100 kHz	1.8 kΩ	0.022 µF	-27.92

图 2-4. 波特图

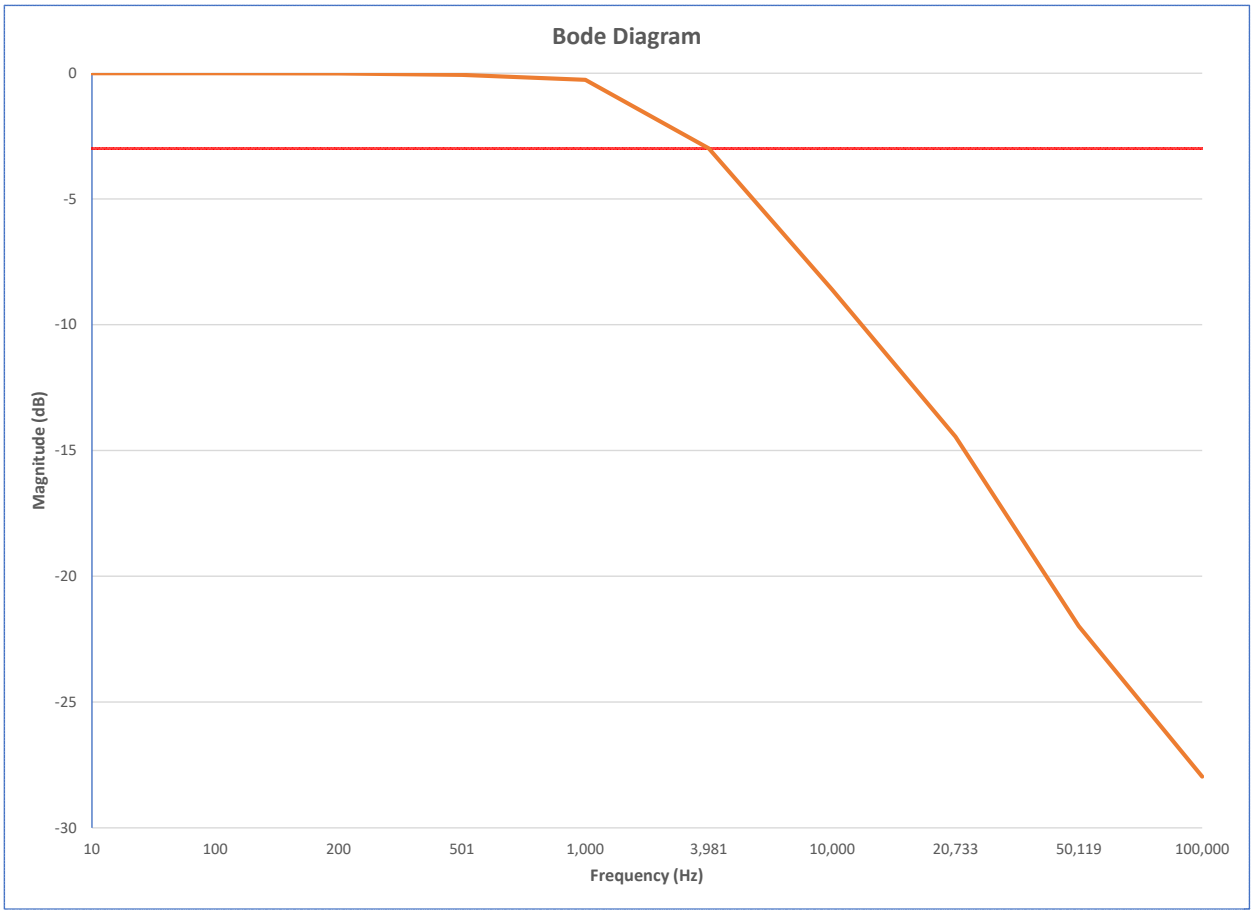


图 2-5. 阶跃响应（R = 40 MΩ，C = 1 pF，F_{PWM} = 10 kHz）

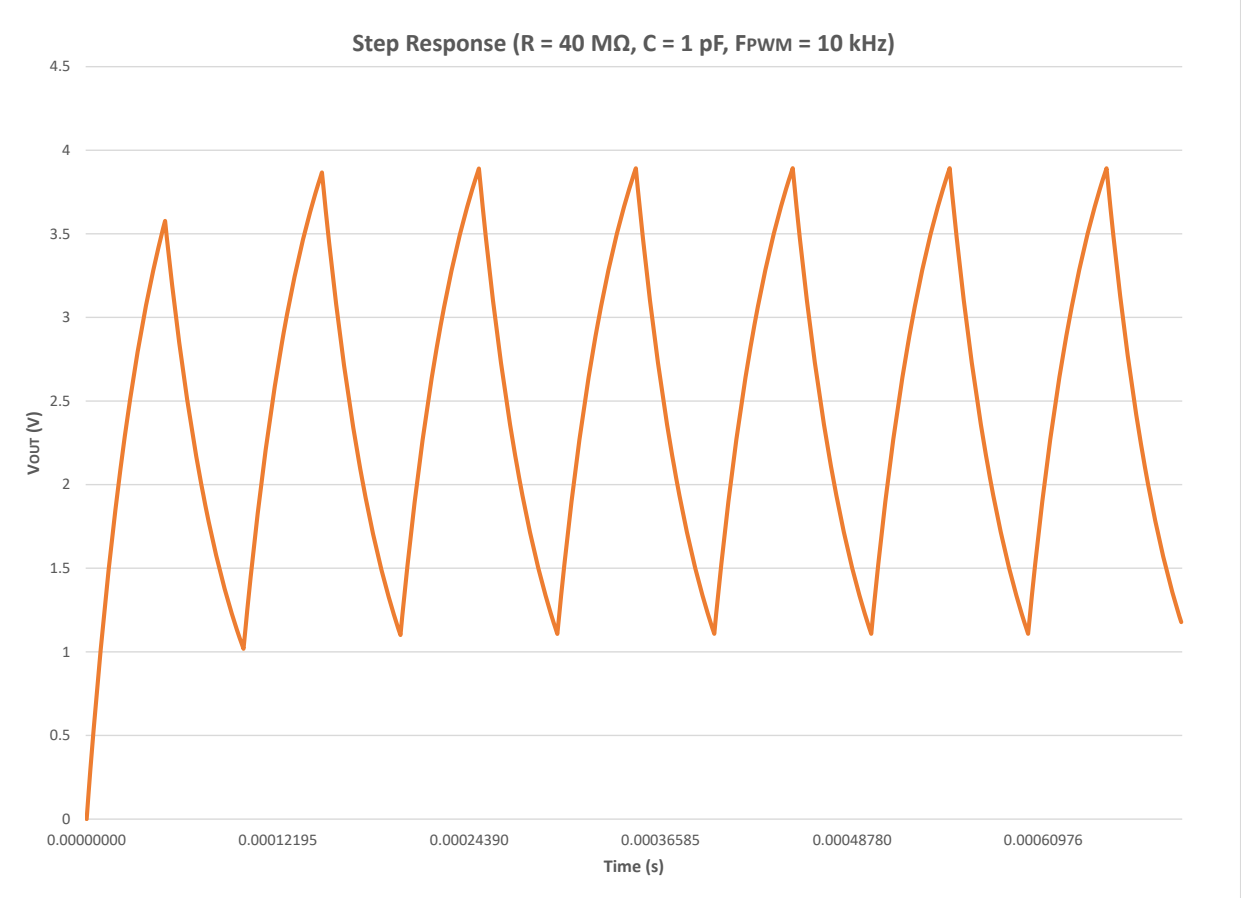


图 2-6. 阶跃响应（R = 40 MΩ，C = 1 pF，F_{PWM} = 100 kHz）

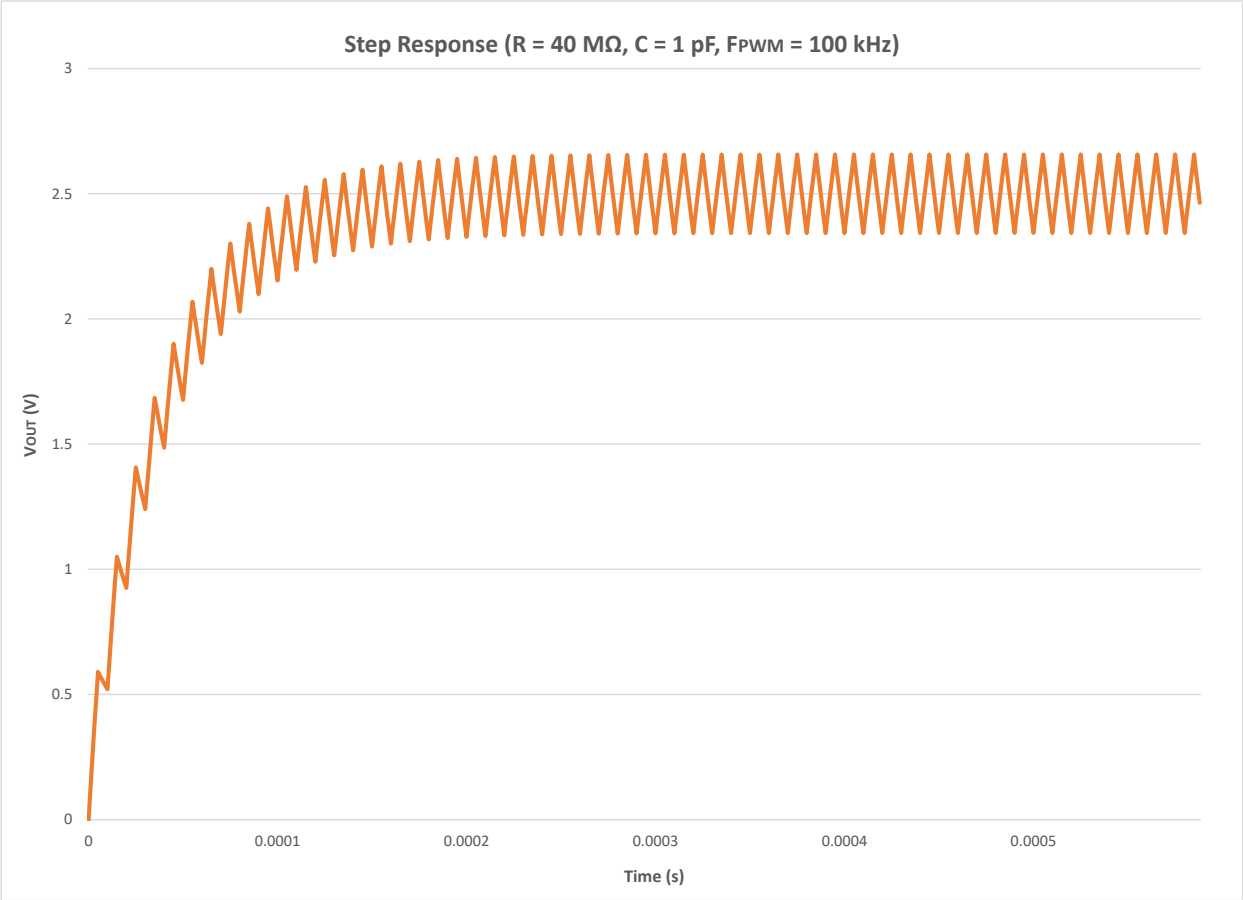


图 2-7. 阶跃响应（R = 4 kΩ，C = 0.01 μF，FPWM = 10 kHz）

图 2-8. 阶跃响应（R = 4 kΩ，C = 0.01 µF，F_{PWM} = 100 kHz）

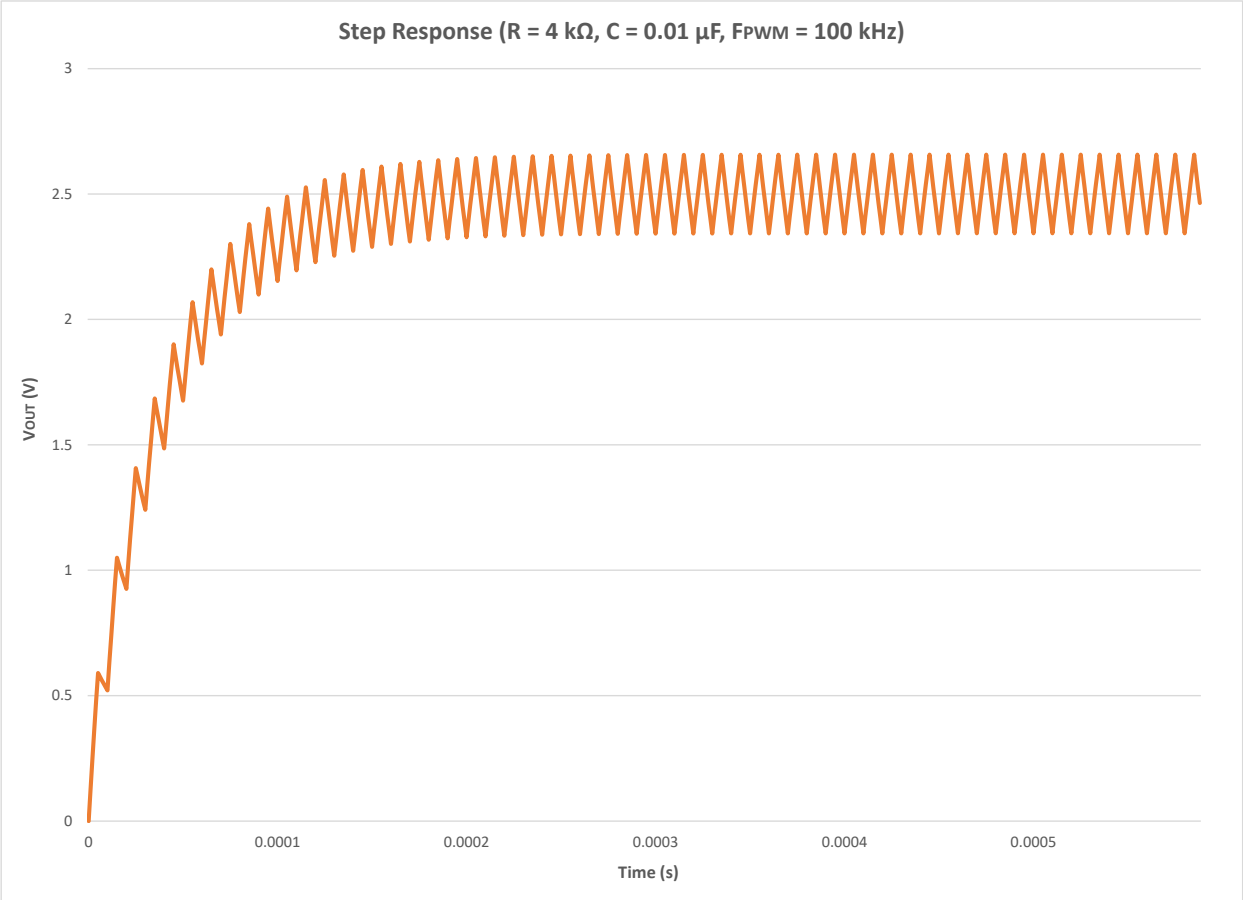


图 2-9. 阶跃响应（R = 1.8 kΩ，C = 0.022 µF，F_{PWM} = 10 kHz）

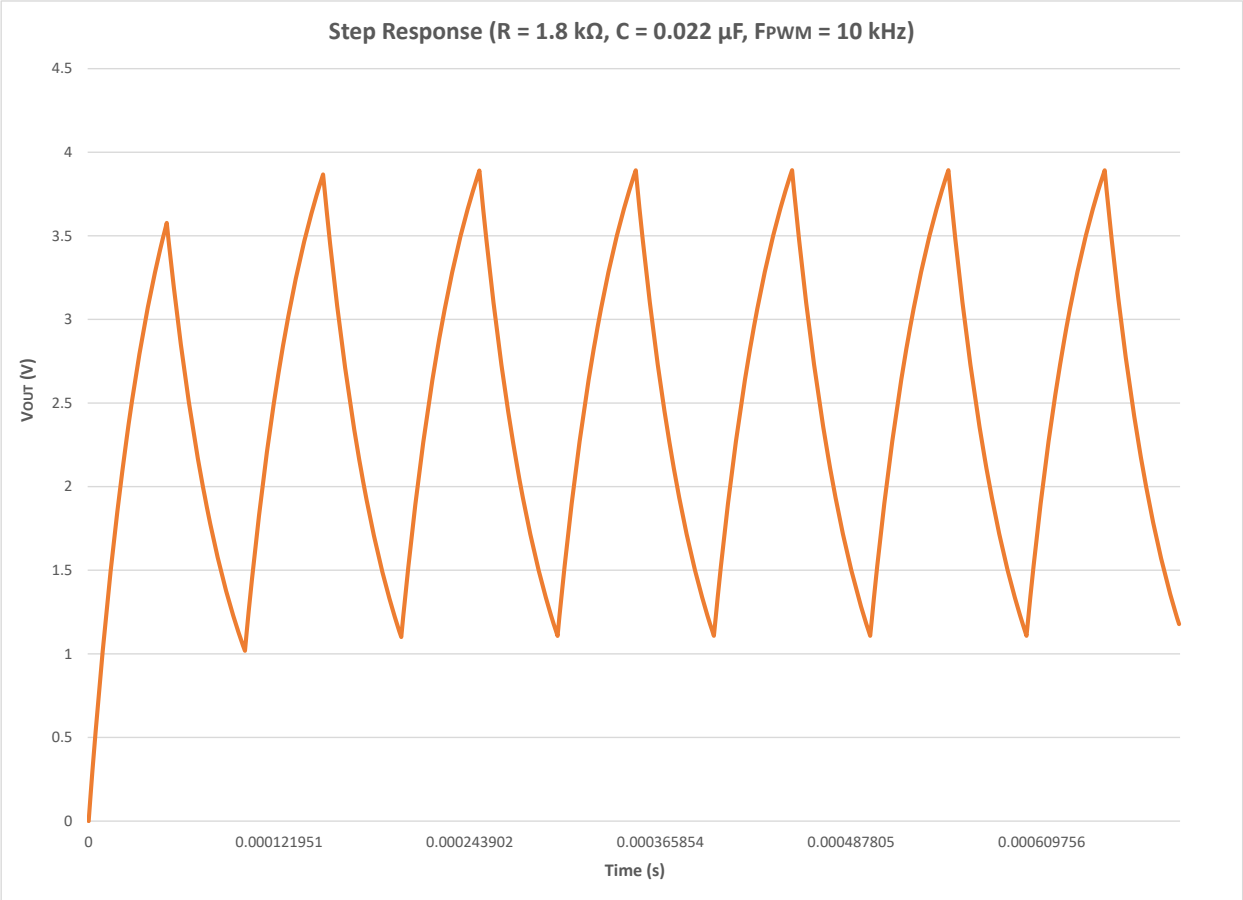
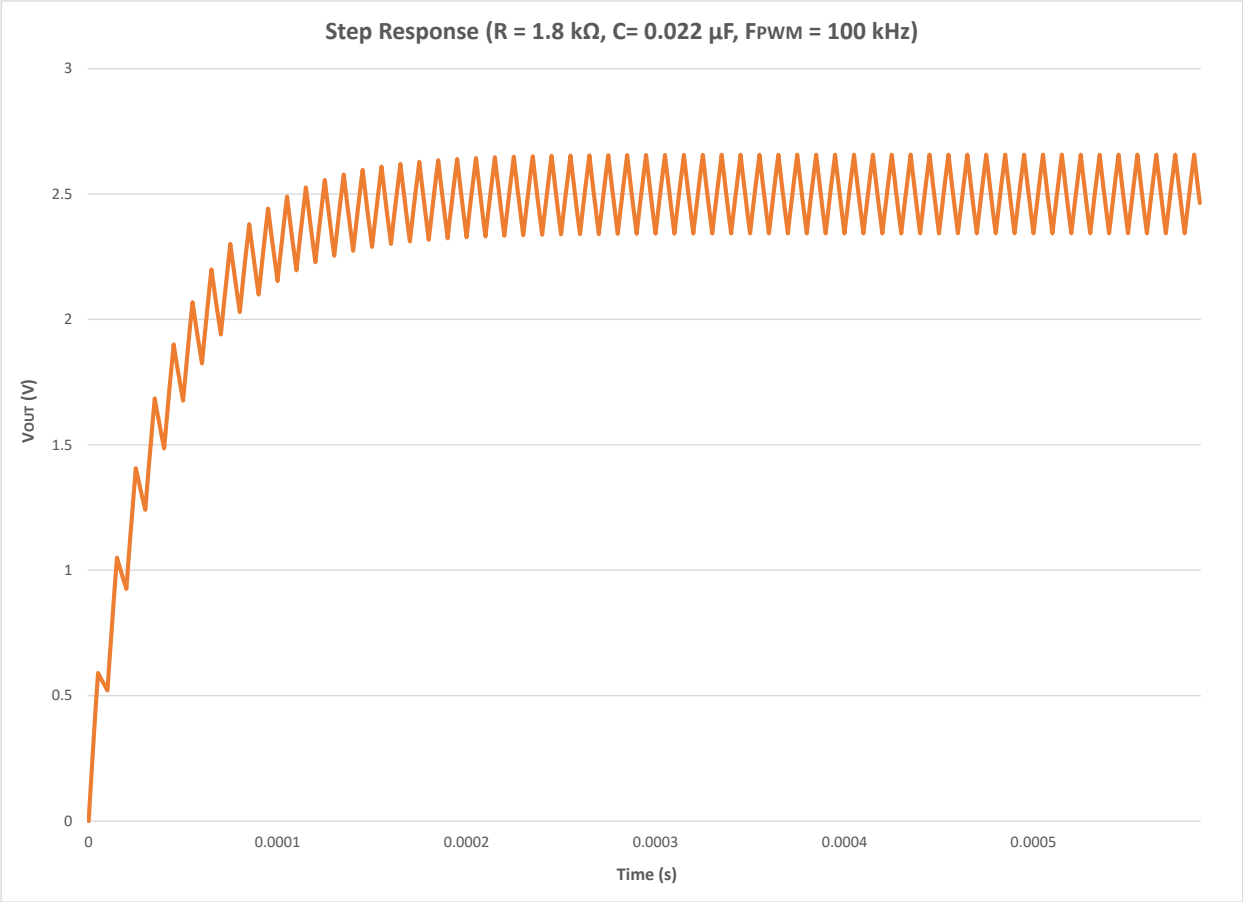


图 2-10. 阶跃响应（R = 1.8 kΩ，C = 0.022 µF，F_{PWM} = 100 kHz）



3. 结论

使用简单的 RC 型低通滤波器可将 PWM 信号转换为模拟信号。PWM 占空比决定滤波器电压输出的幅值。占空比增加，平均电压输出也随之增加，反之亦然。PWM 频率决定滤波器可实现的衰减量。当 PWM 频率接近于截止频率时，滤波器迅速响应，但会在输出信号中产生大量纹波。随着截止频率和 PWM 频率之间的距离增加，响应时间减少，但输出信号中的纹波也会减少。

Microchip 网站

Microchip 网站（www.microchip.com/）为客户提供在线支持。客户可通过该网站方便地获取文件和信息。我们的网站提供以下内容：

- **产品支持**——数据手册和勘误表、应用笔记和示例程序、设计资源、用户指南以及硬件支持文档、最新的软件版本以及归档软件
- **一般技术支持**——常见问题解答（FAQ）、技术支持请求、在线讨论组以及 Microchip 设计伙伴计划成员名单
- **Microchip 业务**——产品选型和订购指南、最新 Microchip 新闻稿、研讨会和活动安排表、Microchip 销售办事处、代理商以及工厂代表列表

产品变更通知服务

Microchip 的产品变更通知服务有助于客户了解 Microchip 产品的最新信息。注册客户可在他们感兴趣的某个产品系列或开发工具发生变更、更新、发布新版本或勘误表时，收到电子邮件通知。

欲注册，请访问 www.microchip.com/pcn，然后按照注册说明进行操作。

客户支持

Microchip 产品的用户可通过以下渠道获得帮助：

- 代理商或代表
- 当地销售办事处
- 应用工程师（ESE）
- 技术支持

客户应联系其代理商、代表或 ESE 寻求支持。当地销售办事处也可为客户提供帮助。本文档后附有销售办事处的联系方式。

也可通过 www.microchip.com/support 获得网上技术支持。

Microchip 器件代码保护功能

请注意以下有关 Microchip 器件代码保护功能的要点：

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术指标。
- Microchip 确信：在正常使用的情况下，Microchip 系列产品是当今市场上同类产品中最安全的产品之一。
- 目前，仍存在着恶意、甚至是非法破坏代码保护功能的行为。就我们所知，所有这些行为都不是以 Microchip 数据手册中规定的操作规范来使用 Microchip 产品的。这样做的人极可能侵犯了知识产权。
- Microchip 愿意与关心代码完整性的客户合作。
- Microchip 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是“牢不可破”的。

代码保护功能处于持续发展中。Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。任何试图破坏 Microchip 代码保护功能的行为均可视为违反了《数字器件千年版权法案（Digital Millennium Copyright Act）》。如果这种行为导致他人在未经授权的情况下，能访问您的软件或其他受版权保护的成果，您有权依据该法案提起诉讼，从而制止这种行为。

法律声明

提供本文档的中文版本仅为了便于理解。请勿忽视文档中包含的英文部分，因为其中提供了有关 Microchip 产品性能和使用情况的有用信息。Microchip Technology Inc.及其分公司和相关公司、各级主管与员工及事务代理机构对译文中可能存在的任何差错不承担任何责任。建议参考 Microchip Technology Inc.的英文原版文档。

本出版物中提供的信息仅仅是为方便您使用 Microchip 产品或使用这些产品来进行设计。本出版物中所述的器件应用信息及其他类似内容仅为您提供便利，它们可能由更新之信息所替代。确保应用符合技术规范，是您自身应负的责任。

MICROCHIP“按原样”提供这些信息。Microchip 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保，包括但不限于针对非侵权性、适销性和特定用途的适用性的暗示担保，或针对其使用情况、质量或性能的担保。

在任何情况下，对于因这些信息或使用这些信息而产生的任何间接的、特殊的、惩罚性的、偶然的或间接的损失、损害或任何类型的开销，MICROCHIP 概不承担任何责任，即使 MICROCHIP 已被告知可能发生损害或损害可以预见。在法律允许的最大范围内，对于因这些信息或使用这些信息而产生的所有索赔，MICROCHIP 在任何情况下所承担的全部责任均不超出您为获得这些信息向 MICROCHIP 直接支付的金额（如有）。如果将 Microchip 器件用于生命维持和/或生命安全应用，一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切损害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任。除非另外声明，在 Microchip 知识产权保护下，不得暗中或以其他方式转让任何许可证。

商标

Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、Adaptec、AnyRate、AVR、AVR 徽标、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、chipKIT、chipKIT 徽标、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、FlashFlex、flexPWR、HELDO、IGLOO、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LinkMD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、Microsemi、Microsemi 徽标、MOST、MOST 徽标、MPLAB、OptoLyzer、PackeTime、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32 徽标、PolarFire、Prochip Designer、QTouch、SAM-BA、SenGenuity、SpyNIC、SST、SST 徽标、SuperFlash、Symmetricom、SyncServer、Tachyon、TimeSource、tinyAVR、UNI/O、Vectron 及 XMEGA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的注册商标。

AgileSwitch、APT、ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、FlashTec、Hyper Speed Control、HyperLight Load、IntelliMOS、Libero、motorBench、mTouch、Powermite 3、Precision Edge、ProASIC、ProASIC Plus、ProASIC Plus 徽标、Quiet-Wire、SmartFusion、SyncWorld、Temux、TimeCesium、TimeHub、TimePictra、TimeProvider、WinPath 和 ZL 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国的注册商标。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、Augmented Switching、BlueSky、BodyCom、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoAutomotive、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、Espresso T1S、EtherGREEN、IdealBridge、In-Circuit Serial Programming、ICSP、INICnet、Intelligent Paralleling、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、maxCrypto、maxView、memBrain、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICkit、PICtail、PowerSmart、PureSilicon、QMatrix、REAL ICE、Ripple Blocker、RTAX、RTG4、SAM-ICE、Serial Quad I/O、simpleMAP、SimpliPHY、SmartBuffer、SMART-I.S.、storClad、SQI、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Switchtec、SynchroPHY、Total Endurance、TSHARC、USBCheck、VariSense、VectorBlox、VeriPHY、ViewSpan、WiperLock、XpressConnect 和 ZENA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP 为 Microchip Technology Incorporated 在美国的服务标记。

Adaptec 徽标、Frequency on Demand、Silicon Storage Technology 和 Symmcom 均为 Microchip Technology Inc.在除美国外的国家或地区的注册商标。

GestIC 为 Microchip Technology Inc.的子公司 Microchip Technology Germany II GmbH & Co. KG 在除美国外的国家或地区的注册商标。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2020, Microchip Technology Incorporated 版权所有。

ISBN：978-1-5224-7332-9

质量管理体系

有关 Microchip 的质量管理体系的信息，请访问 www.microchip.com/quality。

全球销售及服务网点

美洲	亚太地区	亚太地区	欧洲
公司总部 2355 West Chandler Blvd. Chandler, AZ 85224-6199 电话：480-792-7200 传真：480-792-7277 技术支持： www.microchip.com/support 网址： www.microchip.com **亚特兰大** 德卢斯，佐治亚州 电话：678-957-9614 传真：678-957-1455 **奥斯汀，德克萨斯州** 电话：512-257-3370 **波士顿** 韦斯特伯鲁，马萨诸塞州 电话：774-760-0087 传真：774-760-0088 **芝加哥** 艾塔斯卡，伊利诺伊州 电话：630-285-0071 传真：630-285-0075 **达拉斯** 阿迪森，德克萨斯州 电话：972-818-7423 传真：972-818-2924 **底特律** 诺维，密歇根州 电话：248-848-4000 **休斯顿，德克萨斯州** 电话：281-894-5983 **印第安纳波利斯** 诺布尔斯维尔，印第安纳州 电话：317-773-8323 传真：317-773-5453 电话：317-536-2380 **洛杉矶** 米慎维荷，加利福尼亚州 电话：949-462-9523 传真：949-462-9608 电话：951-273-7800 **罗利，北卡罗来纳州** 电话：919-844-7510 **纽约，纽约州** 电话：631-435-6000 **圣何塞，加利福尼亚州** 电话：408-735-9110 电话：408-436-4270 **加拿大 - 多伦多** 电话：905-695-1980 传真：905-695-2078	**澳大利亚 - 悉尼** 电话：61-2-9868-6733 **中国 - 北京** 电话：86-10-8569-7000 **中国 - 成都** 电话：86-28-8665-5511 **中国 - 重庆** 电话：86-23-8980-9588 **中国 - 东莞** 电话：86-769-8702-9880 **中国 - 广州** 电话：86-20-8755-8029 **中国 - 杭州** 电话：86-571-8792-8115 **中国 - 香港特别行政区** 电话：852-2943-5100 **中国 - 南京** 电话：86-25-8473-2460 **中国 - 青岛** 电话：86-532-8502-7355 **中国 - 上海** 电话：86-21-3326-8000 **中国 - 沈阳** 电话：86-24-2334-2829 **中国 - 深圳** 电话：86-755-8864-2200 **中国 - 苏州** 电话：86-186-6233-1526 **中国 - 武汉** 电话：86-27-5980-5300 **中国 - 西安** 电话：86-29-8833-7252 **中国 - 厦门** 电话：86-592-2388138 **中国 - 珠海** 电话：86-756-3210040	**印度 - 班加罗尔** 电话：91-80-3090-4444 **印度 - 新德里** 电话：91-11-4160-8631 **印度 - 浦那** 电话：91-20-4121-0141 **日本 - 大阪** 电话：81-6-6152-7160 **日本 - 东京** 电话：81-3-6880-3770 **韩国 - 大邱** 电话：82-53-744-4301 **韩国 - 首尔** 电话：82-2-554-7200 **马来西亚 - 吉隆坡** 电话：60-3-7651-7906 **马来西亚 - 槟榔屿** 电话：60-4-227-8870 **菲律宾 - 马尼拉** 电话：63-2-634-9065 **新加坡** 电话：65-6334-8870 **台湾地区 - 新竹** 电话：886-3-577-8366 **台湾地区 - 高雄** 电话：886-7-213-7830 **台湾地区 - 台北** 电话：886-2-2508-8600 **泰国 - 曼谷** 电话：66-2-694-1351 **越南 - 胡志明市** 电话：84-28-5448-2100	**奥地利 - 韦尔斯** 电话：43-7242-2244-39 传真：43-7242-2244-393 **丹麦 - 哥本哈根** 电话：45-4485-5910 传真：45-4485-2829 **芬兰 - 埃斯波** 电话：358-9-4520-820 **法国 - 巴黎** 电话：33-1-69-53-63-20 传真：33-1-69-30-90-79 **德国 - 加兴** 电话：49-8931-9700 **德国 - 哈恩** 电话：49-2129-3766400 **德国 - 海尔布隆** 电话：49-7131-72400 **德国 - 卡尔斯鲁厄** 电话：49-721-625370 **德国 - 慕尼黑** 电话：49-89-627-144-0 传真：49-89-627-144-44 **德国 - 罗森海姆** 电话：49-8031-354-560 **以色列 - 若那那市** 电话：972-9-744-7705 **意大利 - 米兰** 电话：39-0331-742611 传真：39-0331-466781 **意大利 - 帕多瓦** 电话：39-049-7625286 **荷兰 - 德卢内市** 电话：31-416-690399 传真：31-416-690340 **挪威 - 特隆赫姆** 电话：47-72884388 **波兰 - 华沙** 电话：48-22-3325737 **罗马尼亚 - 布加勒斯特** 电话：40-21-407-87-50 **西班牙 - 马德里** 电话：34-91-708-08-90 传真：34-91-708-08-91 **瑞典 - 哥德堡** 电话：46-31-704-60-40 **瑞典 - 斯德哥尔摩** 电话：46-8-5090-4654 **英国 - 沃金厄姆** 电话：44-118-921-5800 传真：44-118-921-5820