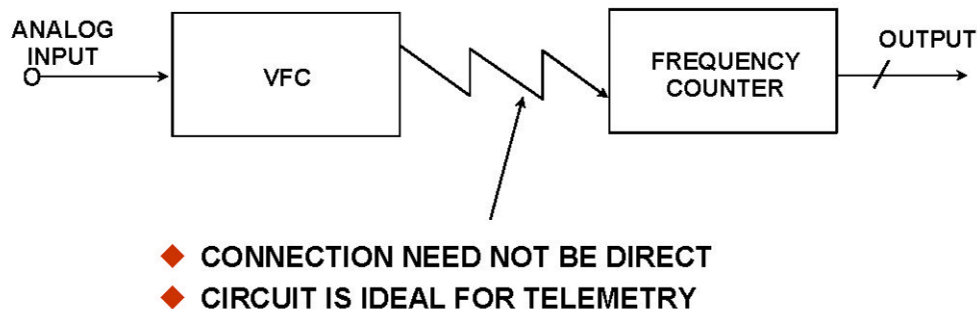


## 电压频率转换器

作者：Walt Kester和James Bryant

### 简介

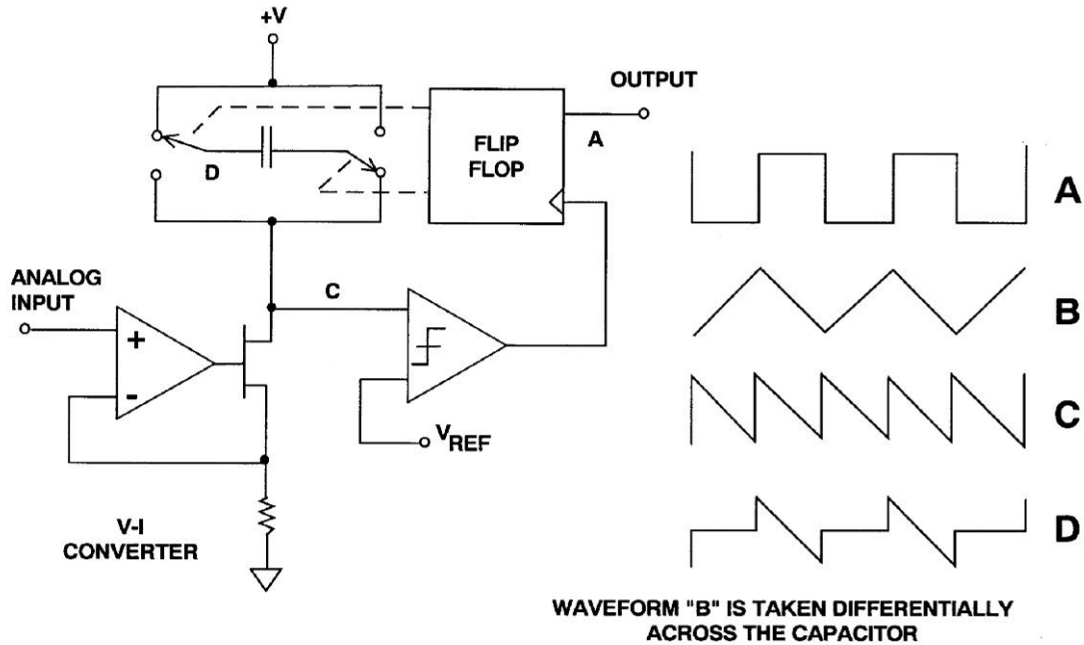
电压频率转换器(VFC)是一种振荡器，其频率与控制电压成线性比例关系。VFC/计数器 ADC 采用单芯片，无失码，可对噪声积分，功耗极低。该器件很适合遥测应用，因为 VFC 外形小巧、价格便宜且功耗低，可以安装在实验对象（患者、野生动物、炮弹等等）上，并通过遥测链路 with 计数器通信，如图 1 所示。



**图1：用电压频率转换器(VFC)和频率计数器实现低成本、多功能、高分辨率ADC**

常见的 VFC 架构有两种：*电流导引多谐振荡器 VFC* 和 *电荷平衡 VFC*（参考文献 1）。电荷平衡 VFC 可采用 *异步* 或 *同步*（时钟控制）形式。VFO（可变频率振荡器）架构种类更多，包括无处不在的 555 计时器，但 VFC 的主要特性是线性度——而极少 VFO 具有高线性度。

电流导引多谐振荡器 VFC 其实是电流频率转换器而非 VFC，但如图 2 所示，实际电路的输入端总是包含电压电流转换器。工作原理很简单：电流使电容放电，直至达到阈值，当电容端子反转时，半周期重复进行。电容两端的波形是线性三角波，但任一端子相对于地的波形都更复杂，如图所示。

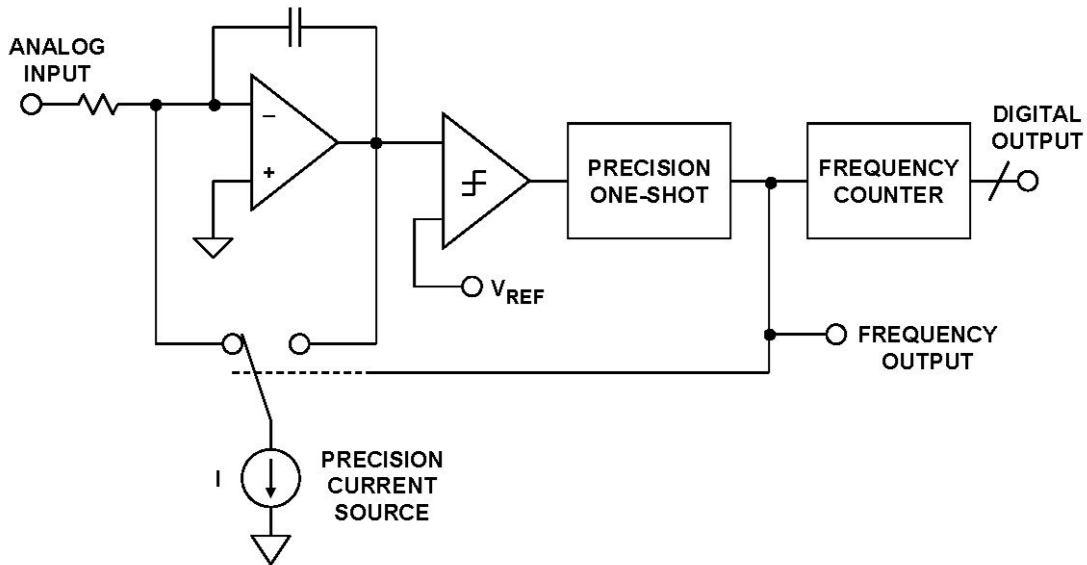


**图2：电流导引VFC**

此类实际 VFC 具有约 14 位的线性度和同等稳定性，不过也可用于具有更高分辨率的 ADC 中，并且无失码。性能限制取决于比较器阈值噪声、阈值温度系数、电容（一般是分立元件）稳定性和电介质吸收(DA)。图中所示的比较器/基准电压源结构比实际使用电路更能体现所实现的功能，实际电路与开关电路高度集成，相应地更难分析。

此类 VFC 结构简单、价格便宜且功耗低，大多数使用很宽的电源电压范围，因此非常适合低成本中等精度 ADC 和数据遥测应用。

图 3 所示的电荷平衡 VFC 更复杂，对电源电压和电流的要求更高，也更精确。它能提供 16 至 18 位线性度。



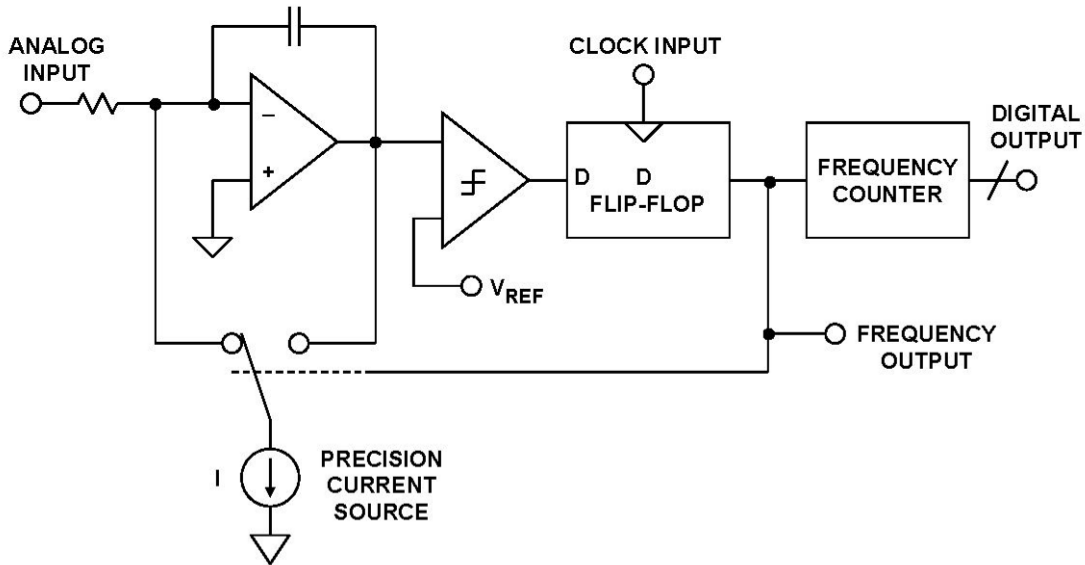
**图3：电荷平衡电压频率转换器(VFC)**

积分器电容通过信号充电，如图 3 所示。当它超过比较器阈值时，固定电荷从电容中移除，但输入电流在放电期间继续流动，因此输入电荷不会丢失。固定电荷由精密电流源和精密单稳态的脉冲宽度定义。因此输出脉冲速率与积分器从输入端充电的速率具有精确比例关系。

在低频率下，此 VFC 的性能限制由电流源和单稳态时序（取决于单稳态电容及其他因素）的稳定性决定。影响精度的不是积分电容的绝对值和温度稳定性，而是泄漏和电介质吸收(DA)。在高频下，二阶效应（例如积分器内的开关瞬变、单稳态在脉冲结束后立即重新触发时的精度）会严重影响精度和线性度。

电流源内的转换开关用于解决积分器瞬变问题。使用转换开关代替旧 VFC 设计中更常见的接通/关断开关有下列优点：(a)精密电流源内无开/关瞬变，以及(b)积分器输出级面对的是恒定负载——大多数时间电流源电流直接流入输出级；电荷平衡期间仍然流入输出级，只不过会通过积分电容。

精密单稳态的稳定性和瞬变特性带来了更多问题，但可以用时钟控制双稳态多谐振荡器取代单稳态来避免。这种配置称为同步 VFC 或 SVFC，如图 4 所示。

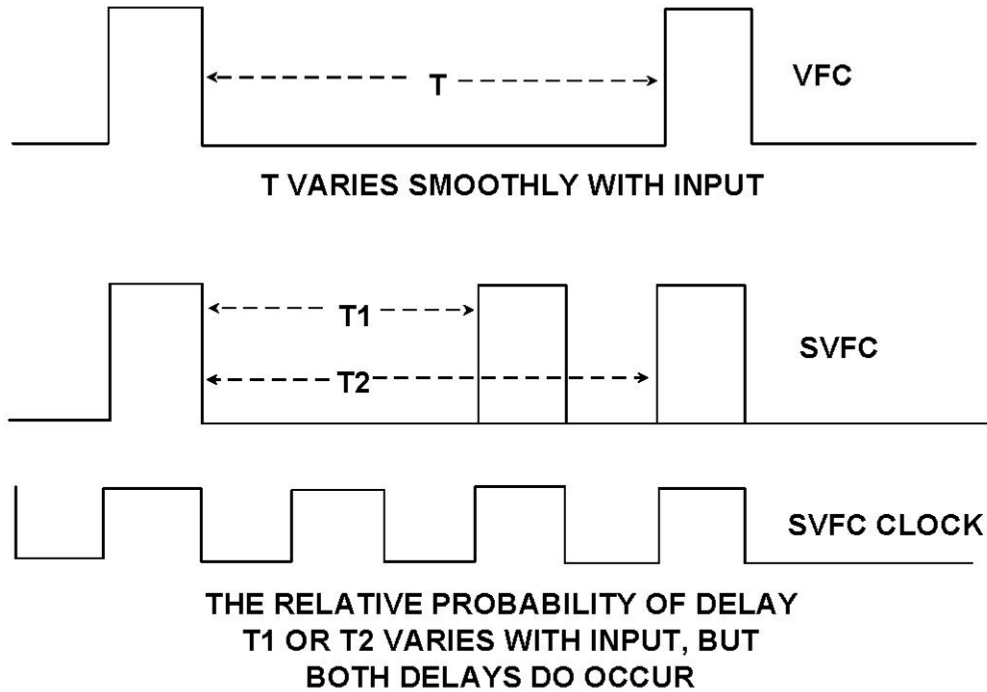


**图4：同步VFC (SVFC)**

该器件与上述电路的差异很小，但电荷平衡脉冲长度现在由外部时钟的两个连续沿定义。如果该时钟具有低抖动，将会精确定义电荷。输出脉冲也会与时钟同步。此类 SVFC 能提供最高 18 位的线性度以及出色的温度稳定性。

这种同步特性在许多应用中很方便，因为同步数据传输比异步更易于处理。但这也意味着 SVFC 的输出不像传统 VFC 一样是纯音（当然还有谐波），而是包含与时钟频率相关的谐波分量。

示波器上显示的 SVFC 输出尤其具有误导性，并且往往会让人困惑不解——改变 VFC 输入会使输出频率产生平滑变化，但改变 SVFC 会使输出脉冲在前一输出脉冲后的  $N$  和  $N + 1$  个时钟周期产生概率密度变化，这常被误解为严重抖动和器件故障征兆（参见图 5）。



**图5：VFC和SVFC波形**

SVFC 的另一问题是与时钟频率相关的输出频率呈非线性。如果研究 SVFC 的传递特性，可以看到在时钟频率  $F_c$  的次谐波附近呈非线性，如图 6 所示。在  $F_c/3$ 、 $F_c/4$  和  $F_c/6$  下也一样。这是由于芯片上（以及电路布局中）存在杂散电容，且时钟信号耦合至 SVFC 比较器，造成器件表现为注入锁定锁相环(PLL)。这是 SVFC 本身固有的问题，但通常不甚严重：如果电路卡布局合理，时钟幅度和变化速率尽可能压低，在  $F_c/3$  和  $F_c/4$  下，对于 8 LSB（18 位分辨率时）以下的传递特性的影响并不连续，在其他次谐波下则更低。由于发生这种情况的频率已知，因此常常是容许的。当然，如果电路布局或去耦不佳，影响可能更大，但这是设计缺陷而不能归咎于 SVFC 本身。

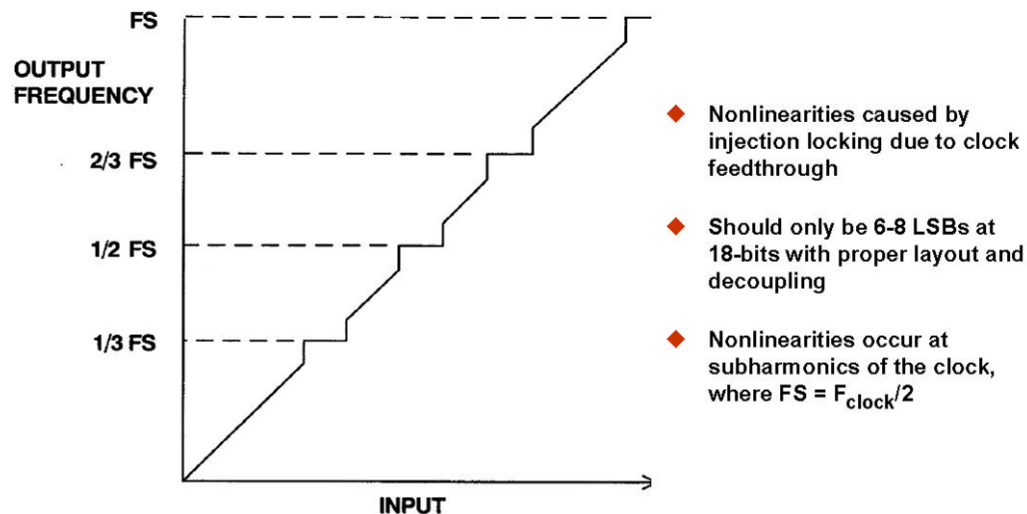


图6：SVFC非线性

显然 SVFC 是量化的，而基本 VFC 不是。这并不意味着计数器/VFC ADC 的分辨率（忽略非线性）比计数器/SVFC ADC 更高，因为计数器内的时钟也会对分辨率形成限制。

当 VFC 具有较大输入时，它会快速运行并（在短时间内）提供良好分辨率，但对于低速运行 VFC，很难在合理的采样时间内获得良好分辨率。这种情况中，测量 VFC 输出周期可能更实际（此方法对 SVFC 无效），当然该系统的分辨率会随着输入（及频率）增加而变差。不过，如果计数器/计时器进行“巧妙”配置，则可以测量 VFC 近似频率和确切的 N 个周期（而非一个，N 值由近似频率决定），并在较宽输入范围内保持高分辨率。1986 年发布的模块式 ADC [AD1170](#) 即该架构的一个示例。

除了作为 ADC 中的一个元件，VFC 还有更多应用。由于其输出是脉冲流，因此很容易通过各类传输介质（PSN、无线电、光学、IR、超声等等）发送。输出也不必由计数器接收，只需将另一个 VFC 配置为频率电压转换器(FVC)即可。这样便可提供模拟输出，VFC-FVC 组合则能够更有效地跨越隔离栅发送精密模拟信号。用 VFC 构建 FVC 还有许多问题需要考虑，参考文献 2 至 5 中有相关讨论。

## 总结

ADI 公司为仪器仪表、工业和自动化市场提供各种电压频率转换器(VFC) (参见[电压频率转换器选型表](#))，包括 [AD537](#)、[AD650](#)、[AD652](#)、[AD654](#) 和 [ADVFC32](#)。这些器件非常适合模数转换(ADC)、长期积分、线性频率调制和解调以及频率电压转换应用。ADI 公司最新 VFC 系列产品 [AD7740](#)、[AD7741](#) 和 [AD7742](#) 都是基于  $\Sigma - \Delta$  技术的同步 VFC，采用小型封装，以低成本提供高线性度。

## 参考文献

1. John L. Lindesmith, “电压-数字测量电路”，*美国专利号*2,835,868，1952年9月16日申请，1958年5月20日发布。 (*电压频率转换ADC*) 。
2. Paul Klonowski, “使用电压频率转换器进行模数转换”，[应用笔记AN-276](#)，ADI公司 (*关于VFC的一份实用的应用笔记*) 。
3. James M. Bryant, “电压频率转换器”，[应用笔记AN-361](#)，ADI公司 (*较好地概述了VFC*) 。
4. Walt Jung, “[AD654](#) IC V-F转换器的工作原理和应用”，[应用笔记AN-278](#)，ADI公司。
5. Steve Martin, “将[AD650](#)电压频率转换器用作频率电压转换器”，[应用笔记AN-279](#)，ADI公司 (*介绍采用AD650 VFC的频率电压转换器*) 。
6. Walt Kester, [模数转换](#)，ADI公司，2004年，ISBN 0-916550-27-3，第3章。另见[数据转换手册](#)，Elsevier/Newnes，2005年，ISBN 0-7506-7841-0，第3章。

© 2009 Analog Devices, Inc 保留所有权利。对于客户产品设计、客户产品的使用或应用，以及因ADI公司协助而可能导致的任何侵权，ADI公司概不负责。所有商标和标志均属各自所有人所有。ADI公司应用与开发工具工程师提供的信息准确可靠，但ADI公司对其技术指南所提供内容的技术准确性和时效性不承担责任。