

解决 LVDT 定位传感器中的非线性问题

作者: Arun T Vemuri, 增强型工业产品部系统架构师

介绍

传感元件可将相关物理量转换为电信号。传感元件的常见输出特征是非线性, 即传感元件的输出不随相关物理量的变化而发生线性变化。这种非线性会导致测量不准确, 存在误差。

本文主要介绍纠正线性可变差分变压器 (LVDT) 定位传感器中非线性问题的方法, 适用于汽车液压阀定位传感等众多应用。此外, 本文探讨的内容还适合超声波停车辅助等其它类型的汽车传感器应用。

支持高频率输出的传感器

许多传感元件产生的电信号都是相对的高频率信号。这既是因为传感元件的激励信号是高频率信号, 也因为被测量的物理量在性质上属于高频率。典型的例子就是使用 LVDT 定位传感器对汽车液压阀进行定位测量。该传感器属于高频率性质的原因是 LVDT 初级线圈是通过 5KHz 等高频信号激励的。同样, 超声波停车辅助应用使用的压电变送器输出也属于高频率, 因为变送器测量的是超声波强度, 其信号频率大于 20KHz。

在传感器输出高频率信号的情况下, 信号信息通常大多嵌入在信号的振幅中。图 1 是高频率传感器信号的时间曲线图, 而且振幅代表传感器测量的物理量变化。该信号的数学表达式为:

$$y(t) = A_C \sin(\omega_C t) + A_S \sin(\omega_S t) A_C \sin(\omega_C t), \quad (1)$$

其中 A_C 是传感器的激励振幅, ω_C 是以弧度 / 秒为单位的传感器激励频率, A_S 是需测量物理量的振幅, 而 ω_S 则是以弧度 / 秒为单位的需测量物理量的频率。

假定有用信号的振幅小于高频率载波信号的振幅, 则 $y(t)$ 就是无失真的调幅信号。

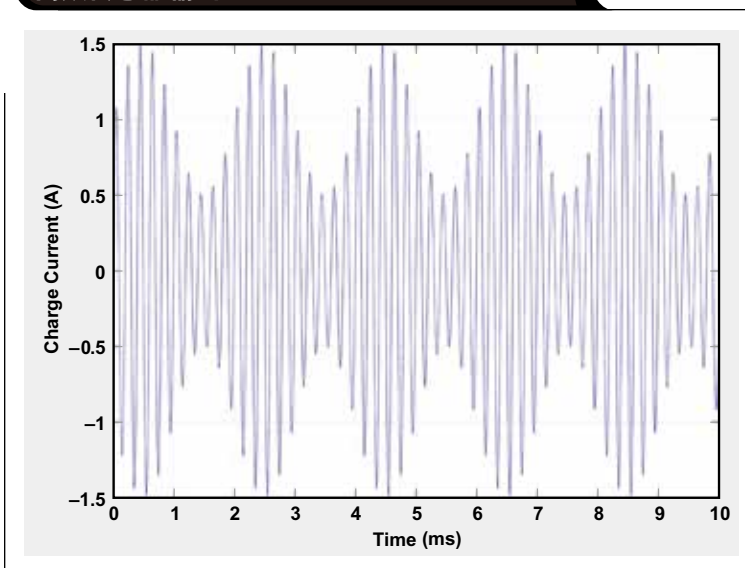
注意, 在某些情况下, 信号信息也能嵌入在信号的频率中。例如, 如果正在移动的汽车需要使用保险杠或后视镜中的超声波变送器测量与另一辆移动车辆的距离, 那么信号的频率将根据多普勒效应提供相关车辆相对速度的信息。

本文讨论的重点是如何从高频率传感器的输出提取振幅信息。提取振幅信息的技术也称为振幅解调。

自上个世纪初 AM 无线电广播传输的兴起, 振幅解调技术就一直存在。无论在模拟域还是数字域, 都存在可从信号中提取振幅信息的众多解决方案。此外, 解调进程不仅能提取信号的振幅, 同时也能提取传感器输出信号相对于传感器激励的相位信息。前一种解调技术被称为异步解调, 而后一种技术则被称为同步解调。

根据上述定义, 本文的侧重点将限定在一个特定的振幅提取技术类别, 即数字异步振幅解调。

图 1: 信号信息嵌入在振幅内的高频传感器输出



为什么这一小类技术至关重要呢？随着德州仪器 (TI) LBC8LV 工艺等混合信号集成电路 (IC) 高级制造技术的问世，我们可使用混合信号信号处理器为各种类型的传感器提供支持。采用此类传感器时，信号调节一部分在模拟域中进行，一部分在数字域中进行。虽然信号调节架构已具有量化功能，但如果设计得当，这类器件能够带来灵活性，为大多数传感器应用提供足够的准确度。应用工程师能够轻松为其特定应用方案定制信号调节器，从而可加速其产品开发进程。

TI 推出的 PGA450-Q1 就是混合信号信号调节器的典型范例，可用于超声波停车辅助应用中采用的汽车传感器。具体而言，该信号调节器先使用放大器将电信号放大，然后再使用数字异步振幅解调技术提取信号振幅。

数字异步振幅解调技术

探讨数字异步振幅解调技术的两种方法：峰值法和均值法。

峰值法

在本异步解调方法中，可提取每个频率周期的传感器输出信号峰值，也就是说，该过程将在底层载波信号的频率下使信号及时离散。

如果我们已经知道了底层信号的频率（通常都是这样的），而且如果信号呈正弦波（这是典型的高频率激励信号），则提取的峰值就是每个周期中正弦波的振幅。也就是说，第 n 个载波频率周期的峰值可以表达为下列数学式：

$$y_P(t = nT_C) = A_C + A_S \sin \left[\omega_S \left(n - \frac{3}{4} \right) T_C \right], \quad (2)$$

其中 $T_C = 2\pi / \omega_C$ 。

PGA450-Q1 可实施峰值解调法。

均值法

采用异步解调法时，可首先对传感器信号进行整流。整流输出随后使用低通滤波器进行滤波。等式 1 中描述的信号全波整流输出用数学式表达为：

$$y_R(t) = |y(t)| \\ = [A_C \sin(\omega_C t) + A_S \sin(\omega_S t) A_C \sin(\omega_C t)] u(t), \quad (3)$$

其中 $u(t)$ 是振幅等于 1、频率等于 ω_C 的方波。

$$u(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin[(2n+1)\omega_C t]}{2n+1} \quad (4)$$

因此，整流后的输出可以表达为：

$$y_R(t) = [A_C \sin(\omega_C t) + A_S \sin(\omega_S t) A_C \sin(\omega_C t)] \left\{ \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin[(2n+1)\omega_C t]}{2n+1} \right\} \quad (5a)$$

$$y_R(t) = \frac{4A_C}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(\omega_C t) \sin[(2n+1)\omega_C t]}{2n+1} + \left\{ \frac{4A_S A_C}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(\omega_S t) \sin(\omega_C t) \sin[(2n+1)\omega_C t]}{2n+1} \right\} \quad (5b)$$

$$y_R(t) = \frac{4A_C}{\pi} \sin^2(\omega_C t) + \frac{4A_S A_C}{\pi} \sin(\omega_S t) \sin^2(\omega_C t) + \frac{4A_C}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\omega_C t) \sin[(2n+1)\omega_C t]}{2n+1} \\ + \left\{ \frac{4A_S A_C}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\omega_S t) \sin(\omega_C t) \sin[(2n+1)\omega_C t]}{2n+1} \right\} \quad (5c)$$

$$y_R(t) = \frac{2A_C}{\pi} - \frac{2A_C}{\pi} \cos(2\omega_C t) + \frac{2A_S A_C}{\pi} \sin(\omega_S t) - \frac{2A_S A_C}{\pi} \sin(\omega_S t) \cos(2\omega_C t) \\ + \frac{4A_C}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\omega_C t) \sin[(2n+1)\omega_C t]}{2n+1} + \left\{ \frac{4A_S A_C}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\omega_S t) \sin(\omega_C t) \sin[(2n+1)\omega_C t]}{2n+1} \right\} \quad (5d)$$

然后使用增益为 0dB、截止频率为 ω_c 的低通滤波器对整流输出进行滤波，滤波后的输出可表示为：

$$y_{LPF}(t) = LPF[y_R(t)] \cong \frac{2A_C}{\pi} + \frac{2A_S A_C}{\pi} \sin(\omega_S t) \quad (6)$$

公式 6 表示可使用这种方法提取信号。

非线性影响

在线性系统中，系统的输出与输入成比例，换言之，输出为：

$$y = \sum_{i=1}^1 a_i x^i, \quad (7)$$

其中 x 代表系统输入， y 代表系统输出，而 a_i 则代表系数。为简化分析，可将偏移项（即与输入信号无关的项）忽略不计。

在非线性系统中，系统的输出含有高次输入项，即输出为：

$$y = \sum_{i=1}^{\infty} a_i x^i. \quad (8)$$

具体就 LVDT 信号调节而言，等式 1 中给出的振幅调制信号可能会受非线性的影响。导致非线性的可能原因包括：

- 1、驱动信号失真，或载波具有较高阶谐波。载波含有高阶谐波的原因是载波信号本身是非线性系统的输出：

$$y_C = \sum_{i=1}^{\infty} a_i [A_C \sin(\omega_C t)]^i$$

- 2、非线性信号链，或信号输出相对于其输入呈非线性：

$$y_S = \sum_{i=1}^{\infty} a_i [A_C \sin(\omega_C t) + A_S \sin(\omega_S t) A_C \sin(\omega_C t)]^i$$

- 3、非线性变送器，或变送器的输出相对于其测量的物理量呈非线性：

$$y_S = \sum_{i=1}^{\infty} a_i [A_S \sin(\omega_S t)]^i$$

注意，头两个非线性来源是性能不理想的信号生成器/调节器导致的结果，而第三种非线性来源则是变送器造成的。

此外，上述所有非线性情况在系统中可能同时存在，从而会使信号链的输出用数学式表达异常复杂。

解决非线性问题

现在，我们不仅将解决由非理想信号生成器和调节器带来的两种非线性来源问题，而且还将分析常见非线性系统形式之一的二阶非线性系统。该分析可进一步延伸至更高阶的非线性以及非线性变送器输出。

失真驱动信号

在存在失真驱动信号（或载波信号）的情况下，通过三角函数运算并设 $a_1=1$ ， $a_2=b$ ，等式 1 给出的振幅调制载波信号可表示为：

$$y(t) = A_C \sin(\omega_C t) + A_S \sin(\omega_S t) A_C \sin(\omega_C t) + b [A_C \sin(\omega_C t)]^2 + b A_S \sin(\omega_S t) [A_C \sin(\omega_C t)]^2 \quad (9a)$$

$$y(t) = A_C \sin(\omega_C t) + A_S \sin(\omega_S t) A_C \sin(\omega_C t) + b A_C^2 [1 - \sin(2\omega_C t)] + b A_S A_C^2 \sin(\omega_S t) [1 - \sin(2\omega_C t)] \quad (9b)$$

等式 9 说明，除了大约为 ω_C 的信号外，变送器输出还提供 0 弧度/秒和大约 $2\omega_C$ 的频率组分。

最大限度减少频率组分（在 0 弧度/秒和大约 $2\omega_C$ 下）的明确方法是使用中心频率设定在 ω_C 、而且带宽足够的带通滤波器。具体而言，带宽应具有在 $\omega_C \pm \omega_S$ 范围内无显著衰减的特性。这样的带通滤波器，其输出可表达为：

$$y_{BPF}(t) = BPF[y(t)] \cong A_C \sin(\omega_C t) + A_S \sin(\omega_S t) A_C \sin(\omega_C t) \quad (10)$$

然后，无论采用峰值法还是均值法，都能通过解调该带通滤波器输出来提取变送器信号。

非线性信号链

二阶信号链非线性的存在会导致振幅调制信号发生下列变化：

$$y(t) = \sum_{i=1}^2 a_i [A_C \sin(\omega_C t) + A_S \sin(\omega_S t) A_C \sin(\omega_C t)]^i \quad (11)$$

设 $a_1=1$ 、 $a_2=b$ ，经过下列三角函数运算，可将等式 11 表示为：

$$y(t) = \left\{ \left[A_C \sin(\omega_C t) + A_S \sin(\omega_S t) A_C \sin(\omega_C t) \right] \right\} + b \left\{ \left[A_C \sin(\omega_C t) \right]^2 \right\} \tag{12a}$$

$$+ b \left\{ \left[A_S \sin(\omega_S t) A_C \sin(\omega_C t) \right]^2 \right\} + b \left[2 A_C \sin(\omega_C t) A_S \sin(\omega_S t) A_C \sin(\omega_C t) \right]$$

$$y(t) = \left[A_C \sin(\omega_C t) + A_S \sin(\omega_S t) A_C \sin(\omega_C t) \right] + b A_C^2 \left[1 - \sin(2\omega_C t) \right] \tag{12b}$$

$$+ b A_C^2 A_S^2 \left[1 - \sin(2\omega_C t) \right] \left[1 - \sin(2\omega_S t) \right] + 2 b A_C^2 A_S \left[1 - \sin(2\omega_C t) \right] \sin(\omega_S t)$$

$$y(t) = \left[A_C \sin(\omega_C t) + A_S \sin(\omega_S t) A_C \sin(\omega_C t) \right] + b A_C^2 \left[1 - \sin(2\omega_C t) \right] \tag{12c}$$

$$+ b A_C^2 A_S^2 \left[1 - \sin(2\omega_C t) - \sin(2\omega_S t) + \sin(2\omega_C t) \sin(2\omega_S t) \right] + 2 b A_C^2 A_S \left[\sin(\omega_S t) - \sin(2\omega_C t) \sin(\omega_S t) \right]$$

等式 12 再次说明，除了大约为 ω_C 的信号外，变送器输出还提供 0 弧度 / 秒和大约 $2\omega_C$ 及各种更高频率的频率组分。

再次使用中心频率设定在 ω_C 、具有足够带宽的带通滤波器，可以减少非线性引起的频率组分。使用这样的带通滤波器，带通滤波器的输出可表达为：

$$y_{BPF}(t) = BPF[y(t)] \tag{13}$$

$$\cong A_C \sin(\omega_C t) + A_S \sin(\omega_S t) A_C \sin(\omega_C t)$$

然后，无论采用峰值法还是均值法，都能通过解调该带通滤波器输出来提取变送器信号。

结论

LVDT 定位传感器的输出可能会呈非线性。本文介绍的在信号链中使用带通滤波器的方法可能是一种有效解决信号非线性问题的方法。

图 2 是本文所述 LVDT 信号调节器的简化方框图。具体来说，该方框图说明了如何在信号链中使用带通滤波器。

注意，TI PGA450-Q1 信号调节器专为汽车超声波停车辅助传感器精心设计，已包含带通滤波器。

参考文献

作者：Alan Oppenheim 和 Ronald Shafer，《数字信号处理》，Prentice Hall 出版社，1975 年。

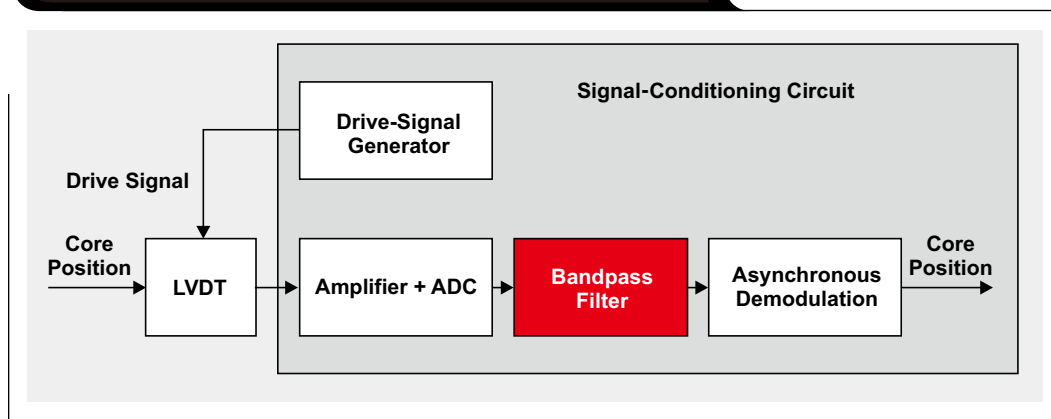
相关 Web 站点

www.ti.com/3q14-PGA450Q1
www.ti.com/3q14-automotive

订阅 AAJ:

www.ti.com/subscribe-aaj

图 2：支持带通滤波器的 LVDT 信号调节器



TI Designs 参考设计库提供完整的设计方案，由资深工程师团队精心创建，支持汽车、工业、医疗、消费等广泛应用的设计。在这里，您能找到包括原理图、物料清单、设计文件及测试报告的全面设计方案。登陆TI Designs，找寻更多适合您的参考设计！简单设计，从TI起步。

马上登录 TI.COM.CN/TIDESIGNS 查询最适合您的设计文档。



WEBENCH® 设计中心: 易于使用且可提供定制结果的设计工具。
PowerLab™ 参考设计库, 包含了近千个适用于所有应用的参考设计。
电源在线培训课程

www.ti.com.cn/webench
www.ti.com.cn/powerlab
www.ti.com.cn/powertraining

WEBENCH® Designer My Designs

Clocks	Filters	传感器
电源	FPGA/μP	LED

输入您的供电要求:

直流 交流

最小 最大

输入电压 14.0 V 22.0 V

输出 3.3 V 2.0 A

环境温度 30 °C

多负载 单输出

Power Architect **开始设计**

WEBENCH® Designer My Designs

最小 最大

输入电压 14.0 V 22.0 V

输出 3.3 V 2.0 A

环境温度 30 °C

SIMPLE SWITCHER®

开始设计 ▶

德州仪器在线技术支持社区

www.deyisupport.com

中国产品信息中心 免费热线:

800-820-8682

TI新浪微博



e.weibo.com/tisemi

热门产品

- | | |
|------------|--|
| DAC8760 | 用于 4-20mA 电流回路应用的单通道、16 位、可编程电流/电压输出 DAC |
| DAC7760 | 单通道、12 位可编程电流输出和电压输出 DAC |
| ADS1247 | 极低噪音、精密 24 位 模数转换器 |
| ADS1120 | 具有串行外设接口的低功耗、低噪声、16 位 ADC |
| ISO7242 | 四通道 2/2 25MBPS 数字隔离器 |
| ISO7631FM | 4kV _{PK} 低功耗三通道、150MBPS 数字隔离器 |
| TPS54062 | 4.7V 至 60V 输入、50mA 同步降压转换器 |
| TLK105L | 工业温度、单端口 10/100Mbps 以太网物理层 |
| SN65HVD255 | CAN 收发器具有快速循环次数, 可用于高度已加载网络 |

了解更多, 请搜索以下产品型号:

DAC8760



重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或隐含权作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独力负责满足与其产品及其应用中使用的 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独力负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	www.ti.com.cn/audio	通信与电信	www.ti.com.cn/telecom
放大器和线性器件	www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	www.ti.com.cn/dataconverters	消费电子	www.ti.com.cn/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com.cn/energy
DSP - 数字信号处理器	www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	www.ti.com.cn/microcontrollers		
RFID 系统	www.ti.com.cn/rfidsys		
OMAP应用处理器	www.ti.com.cn/omap		
无线连通性	www.ti.com.cn/wirelessconnectivity	德州仪器在线技术支持社区	www.deyisupport.com

邮寄地址: 上海市浦东新区世纪大道1568号, 中建大厦32楼邮政编码: 200122
Copyright © 2014, 德州仪器半导体技术(上海)有限公司