

doi: 10.7690/bgzdh.2016.06.007

一种高精度高隔离脉宽调制解调电路设计

刘万山

(绵阳市维博电子有限责任公司传感器技术部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为满足机车牵引系统、强磁场线圈等的高压高隔离监测要求, 提出一种新颖的电磁隔离脉宽调制解调电路设计方案。从工作原理、数学推导、软件仿真及工程实测等方面对电路的功能、性能与可靠性进行了论述。结果表明: 该电路能有效地解决高压隔离监测场合的各种问题, 具有高精度、高隔离、高响应、低功耗等特点, 运行稳定可靠。

关键词: 脉宽调制解调; 高压; 高精度; 高隔离; 高响应; 低功耗

中图分类号: TP272 **文献标志码:** A

A Design of Pulse Width Modulation and Demodulation Circuit with High Precision and High Isolation

Liu Wanshan

(Department of Sensor Technology, Mianyang Weibo Electronics Co., Ltd, Mianyang 621000, China)

Abstract: To cope with the demands of monitoring under high voltage and high isolation cases for traction systems of electric trains and intense magnetic field coils, a new pulse width modulation and demodulation circuitry with electromagnetic isolation is proposed. The function, performance and reliability of the circuit are discussed from the aspects of working principle, mathematical deduction, software simulation and engineering test. Application results show that, the circuit can effectively solve the problems of monitoring in cases of high voltage and high isolation, with advantages of high precision, high isolation, high response, low power consumption, stable and reliable.

Keywords: pulse width modulation and demodulation; high voltage; high precision; high isolation; high response; low power consumption

0 引言

为优化能源供应效率, 一些大功率系统采用了较高的工作电压。例如高铁与城轨的机车牵引系统, 我国目前采用的牵引电压以直流 750、1 500 V 为主流^[1-2], 国外最高牵引电压高达 3 600 V; 其他如大功率变频或逆变控制器、航天直流高压配电系统、科研用强磁场线圈等, 都可能工作在高压驱动模式。对于这类系统的监测, 一是为保障人身与设备的安全, 隔离电压须相应提高, 如地铁牵引系统要求隔离耐压在 10 kVAC 以上; 二是相对于低压小功率系统, 在该类高压大功率系统中可能存在高共模电压信号, 需要隔离耐压更高、可靠性更高的监测产品。

霍尔技术、磁隔离脉冲幅度调制(PAM)技术与光电隔离技术是当前电量隔离检测的主流技术。然而, 霍尔传感器, 尤其是霍尔电压传感器, 测量功耗大、准确度低, 难以满足多档位、高精度的测量需求; 电磁隔离 PAM 的技术, 变压器传递的是功率信号, 隔离耐压越高漏感越大, 很难同时满足响

应时间、隔离耐压、测量准确度三者的要求; 光电隔离器件目前耐压仅做到 5 kV 以内, 单级隔离根本无法满足系统隔离耐压的要求。

长期以来, 我国铁路、科研等行业主要靠引进国外厂商的传感器。近年来, 国内虽也有个别厂家推出了直流高压高隔离产品, 但测量准确度只到 0.5 级, 与国外产品相比还有一定差距; 因此, 迫切需要研制一种高精度、高隔离、高可靠的电量隔离传感器。

1 常规 PWM 电路存在的问题

在常规的电磁隔离式脉冲宽度调制(PWM)电路中传递的是脉宽信号, 传输准确度几乎不受漏感影响, 本应该非常适合高隔离监测场合; 然而, 却存在以下 2 方面的问题^[3]。

首先, 常规的 PWM 电路采用三角波与输入信号比较实现调制, 由振荡电路产生并由电容充放电形成的三角波, 其边沿的线性度直接影响系统的测量精度, 而其线性度受元件参数的影响很明显, 温

收稿日期: 2016-02-05; 修回日期: 2016-03-03

作者简介: 刘万山(1979—), 男, 贵州人, 本科, 工程师, 从事电量传感器研究。

度性能差，可靠性低。

其次，PWM 经过隔离变压器后，输出的是交流信号，其上下电平随 PWM 波的占空比变化而变化。对于解调电路来说，这是一个浮动的信号，必须对其进行电平的规格化处理，一旦处理不当则会大大降低信号的动态范围，且存在可靠性问题。

由于常规 PWM 隔离传输存在的一系列问题，业界极少成功应用于量产的工业产品，尤其是对可靠性要求较高的应用产品。本设计拟以较低的成本，设计一套高精度、高隔离、高响应、高可靠、低功耗的电磁隔离 PWM 调制解调电路方案，以满足新能源监控技术发展的需求。

2 闭环 PWM 调制电路设计

闭环 PWM 波调制电路见图 1，电路采用数模结合与反馈控制原理设计，高速斯密特反向器 U1A 与 R_1 、 C_1 构成方波振荡电路，产生所需频率的方波信号。

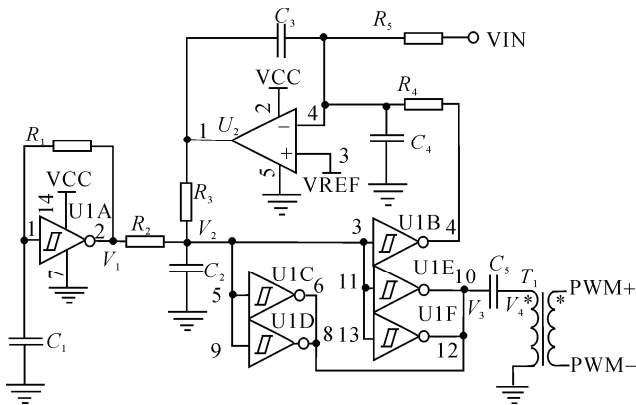


图 1 闭环 PWM 波调制电路

设斯密特反向器的正负门限电压分别为 V_{T+} 和 V_{T-} ，输出高低电平为电源电压 VCC 及 GND，电路正常运行后， C_1 的充放电方程为：

$$\left. \begin{aligned} V_{T+} &= V_{T-} + (VCC - V_{T-})(1 - e^{-t_1/R_1C_1}) \\ V_{T-} &= V_{T+} e^{-t_2/R_1C_1} \end{aligned} \right\}。$$

t_1 、 t_2 为充放电时间，可得：

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= RC \cdot \ln\left(\frac{VCC - V_{T-}}{VCC - V_{T+}}\right) \\ t_2 &= RC \cdot \ln\left(\frac{V_{T+}}{V_{T-}}\right) \end{aligned} \right\}，$$

则振荡频率

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} = RC \cdot \ln\left[\frac{V_{T+} \cdot (VCC - V_{T-})}{V_{T-} \cdot (VCC - V_{T+})}\right]。 \quad (1)$$

方波经 R_2 、 C_2 滤波得到近似三角波，当三角

波信号高于反向器的正门限电压时，反向器出为低电平，当三角波电压低于反向器负门限电压时，反向器出为高电平；因此，根据三角波的边沿不同，反向器输出的是占空比与其正负门限电压相关的 PWM 信号。该 PWM 波一路经 R_4 、 C_4 滤波后与输入电压 VIN 经 R_5 叠加，再通过运放和 C_3 组成的积分电路与基准电压 VREF 进行比较积分^[4]，运放输出电压通过 R_3 叠加到 C_2 端的三角波上，三角波平移，进而调整 PWM 波的占空比，实现闭环控制。

在闭环控制的作用下，运放 U2 的输出通过 R_3 实时调节三角波与反向器正负门限电压的交点位置，实现对 PWM 波占空比的调节，系统收敛于运放反向输入端电压与同相输入端参考电压 VREF 相等，PWM 波占空比 D 满足下式：

$$\frac{VCC \cdot D \cdot R_5}{R_4 + R_5} + \frac{VIN \cdot R_5}{R_4 + R_5} = VREF。$$

则 PWM 输出占空比由下式决定：

$$D = \frac{VREF}{VCC} + \frac{(VREF - VIN) \cdot R_4}{VCC \cdot R_5}。 \quad (2)$$

可见，只要精确控制 VREF 为 VCC 的一半，当 VIN 等于 VREF 时，则 PWM 波的占空比约为 50%，可定义系统输出为 0，必要时可增加零点调节电路。当有 VIN 输入时，运放反向输入端电压改变，在反馈环的作用下，系统将按上述过程调节 U1B 的输出占空比，实现 VIN 对 PWM 波占空比的线性调制。由式 (2) 还可以看出：无论 R_4 、 R_5 取值如何，均不会影响零输出，仅决定 VIN 对 PWM 波占空比调节的灵敏度^[5]。

PWM 波另一路输出由 U1C、U1D、U1E、U1F 并联，经电容 C_5 交流耦合后驱动高隔离变压器 T_1 ，将 PWM 波的边沿信息传输到次级解调电路。

由上述分析可知：一方面，PWM 波的占空比只与输入信号与 VREF、VCC 相关，而 VIN 是被测输入信号，则测量准确度仅由 VCC、VREF 精度决定。目前市场上高精度的、低漂移的参考基准电压很容易采购；因此，该电路很容易实现高的测量精度，并且该精度不依赖三角波边沿的线性度，对元件参数的容差能力很强。换言之，只要 VCC 及 VREF 够精确，在反馈环的作用下，即便各元器件的参数变化造成振荡频率、三角波边沿、滤波与积分时间常数等小范围变化，误差均可被实时闭环，不会影响测量准确度，即稳定性很好。另一方面，变压器传输的只是 PWM 波的边沿信息，是一组数字信号，

不仅功耗低，而且变压器比差以及漏感引起的振铃噪声不会影响有用信息，对测量准确度无影响，故电路可以工作于较高频率，易于做到低功耗、高精度、高隔离、高响应、高可靠性^[6]。电路各点仿真波形见图2。

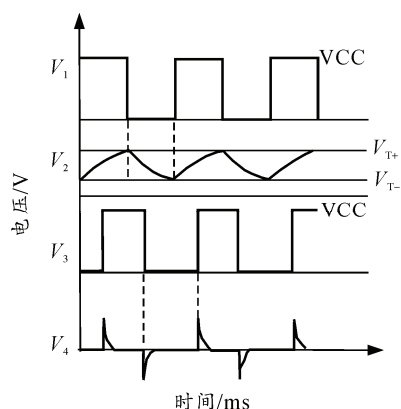


图2 调制电路波形图

3 PWM 隔离解调电路设计

PWM 隔离解调电路见图3，变压器传递的是一组开关信号，表征 PWM 波的占空比信息，解调的目标是将其还原为电平固定的 PWM 波。D 触发器 U3A 的数据端 D 与时钟端 CLK 均接地，输出电平的翻转只受置位端 SD 及复位端 CD 控制。当 PWM+ 相对于 PWM- 输出正脉冲时，三极管 Q1 截止，Q2 导通，D 触发器的 SD 端为高电平，CD 端为低电平，D 触发器的反向输出端，即 PO 输出为高电平；当 PWM+ 相对于 PWM- 输出负脉冲时，三极管 Q1 导通，Q2 截止，D 触发器的 SD 端为低电平，CD 端为高电平，PO 输出为低电平，完成 PWM 波的解调。

由上述分析可知：解调精度仅受 VDD 控制，且变压器的振铃信号不影响开关信号的导通边沿，电磁干扰性能好；由于数字逻辑器件 D 触发器的 SD、CD 电平信号均有一定的有效范围，工作中各电阻、三极管电流等因温度改变而小范围变化时，对解调的精度几乎不造成影响，电路可靠性高。

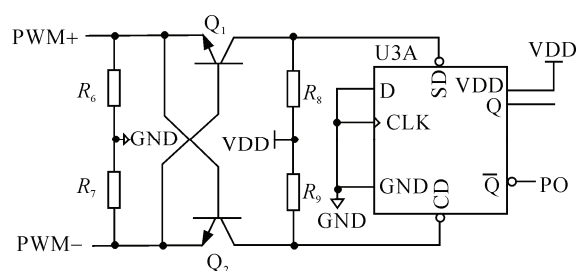


图3 PWM 隔离解调电路

4 结束语

该 PWM 调制与隔离解调电路，有效规避了霍尔原理、PAM 调制解调原理、光电原理等隔离检测技术存在的不足，在保证响应时间、高隔离耐压、测量准确度三指标的同时，充分发挥闭环控制原理的特点，收敛点只受控于参考电压与输入电压。调制部分可以说是一个高精度、高响应的闭环 PI 控制电路，而解调部分是一个极其精简的数字电平转换逻辑，未引入附加的延迟环节。电路设计从多维度贯穿着性能指标、参数容差与可靠性的统一。

笔者依照上述模型研制的高压隔离传感器实测线性度可达 0.02%，响应时间 0.2 s 以上，隔离耐压易实现 10 kVAC 或更高等级，满足复杂电磁环境应用要求，在认证及现场应用中都收到了很好的效果，有效地解决了机车牵引、强磁场线圈等高压隔离监测中的各种问题，运行稳定可靠。

参考文献：

- [1] TB10009—2005, 铁路电力牵引供电设计规范[S].
- [2] 郭志. 地铁直流牵引系统负荷监测系统[J]. 工业控制计算机, 2008(7): 29-30.
- [3] 杨月婷, 董韶军, 陈杰翔. 脉宽调制电路在传感器信号调理电路中的应用[J]. 自动化仪表, 2003, 24(8): 54-56.
- [4] 彭程程, 谷鸣, 刘波, 等. 模拟有源积分器在脉冲磁场测量中的分析和应用[J]. 核技术, 2007, 30(9): 725-729.
- [5] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 5 版. 北京: 科学出版社, 2011.
- [6] 杨腾飞, 周文华, 张岳. 直接驱动式共轨系统可控针阀升程的驱动电路研究[J]. 机电工程, 2015, 32(1): 78.