

用于激光供能电流互感器的低功耗光电传输系统

邱红辉, 李立伟, 段雄英, 范兴明, 吕 斌
(大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁省大连市 116024)

摘要: 设计了用于激光供能电流互感器的低功耗光电传输系统, 系统包括上行光纤和下行光纤。上行光纤在完成向包含传感器及相关电路的一次转换器供能的同时, 还可以传输控制信号。在不影响光供能稳定性的情况下, 在短暂的供能中断中完成数据通信。在一次转换器中, 控制信号通过在能量变换电路中增加一个比较器电路提取出来。改进的一次转换器光发射驱动电路只需要消耗数毫瓦的平均功率就可以稳定地工作, 一次转换器总的功耗可控制在 40 mW 以内。实验结果表明, 上行光纤和下行光纤中通信波特率可以分别达到 200 kbit/s 和 2 Mbit/s, 完全满足电流互感器通信需要。

关键词: 电流互感器; 激光供能; 光电传输系统; 低功耗; 异步串行通信
中图分类号: TM452

0 引言

随着电力系统容量的日益扩大和电网电压运行等级的不断提高, 传统的电磁式互感器表现出越来越多的弱点^[1], 电子式高压电力互感器取代传统的电磁式互感器已成为发展的必然趋势^[2-3]。电子式高压电力互感器可以分为光学电子式互感器^[4-5]和混合式光电互感器 2 类^[6-7]。后者的优点在于有源电路采样精确度比较高, 结构更加简单, 比较容易与计算机实现直接通信。

传感器电源问题和电子电路低功耗设计是目前混合式光电电流互感器的研究难点。已见报道的电源方案主要有自具电源供电^[6]和激光供能 2 种方式。自具电源供电方式存在工作电流死区; 激光供能电源结构简单, 输出质量高, 工作可靠, 不受母线电流的影响, 缺点是能提供给高压侧的能量比较小。为保证光电互感器能够不间断、稳定地工作, 必须对高压侧电路进行低功耗设计。另外, 成本和工作寿命也是限制激光供能方式应用的主要因素之一。

在目前技术条件下, 用于信号处理的电子器件的功耗已下降到很低的水平, 而光电传输系统本身消耗了大部分能量, 成为高压侧电路中的功耗“大户”。本文提出在激光供能电流互感器中将数据信息和能量传输结合起来的载波供能方式, 并设计了高压侧光发射模块激光二极管(LED)的低功耗驱动电路, 可有效地降低光电传输系统的功耗。

1 电子式电流互感器基本原理

图 1 为 IEC 标准《电子式电流互感器》(IEC 60044-8)^[8]给出的单相电子式电流互感器通用结构框图。

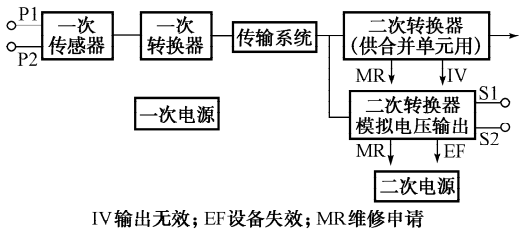


图 1 单相电子式电流互感器通用框图
Fig. 1 General block diagram of a single-phase electronic current transformer

一次传感器用于产生与通过电流相对应的信号, 可以采用低功率电流互感器 (LPCT)^[9]、Rogowski 线圈^[7,10]或电阻分流器等; 一次转换器的功能是将来自 1 个或多个一次传感器的信号转换成适合于传输系统的信号; 二次转换器将来自传输系统的信号转换成正比于一次端子电流的量, 供给测量仪器、仪表和继电保护或控制装置。

传输系统是一次部件与二次部件之间传输信号的短距或长距耦合装置, 也可以传送功率。高压电流互感器的传输系统通常采用光纤作为传输介质, 能够起到绝缘和传输的作用, 按照传输的方向分为上行光纤和下行光纤, 图 2 为传输系统结构。

下行光纤完成由一次转换器向二次转换器传输高压侧数据信息的功能, 其中包括一次电流、高压侧环境温度以及一次电源的工作状态 (例如电流、电

压)等。上行光纤在为一次部件供能的同时,能够将来自二次转换器的控制信号传输到一次转换器,包括时钟同步信号、采样时间间隔微调命令和在线校准命令等。为了完成复杂的逻辑时序控制和实现光纤通信信号的编、解码,一次转换器以低功耗的微处理器或可编程逻辑器件(PLD)作为控制核心。

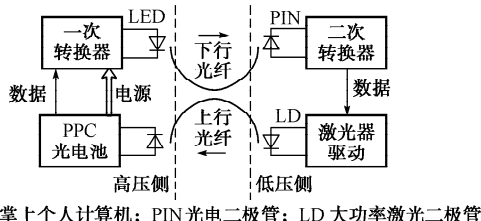


图2 光电传输系统结构

Fig. 2 Structure of the opt-electric transmission system

2 上行光纤传输系统设计

上行光纤传输系统采用分时复用的方式完成能量和控制信号的传输。当有控制信号需要传输时,中断激光能量的传输。一次转换器在绝大部分工作时间内不需要来自二次转换器的控制信号,需要传输的控制信号数据量很少,上行光纤仍然以供能为主。在光能供应中断期间,由特殊设计的储能电路为一次转换器供能,对于一次部件来说,光能的传输并没有中断过。这里采用异步串行通信方式,在上行光纤中,有激光功率传输为1,无则为0;反映在掌上个人计算机(PPC)光电池端就是输出电平高为1,低则为0。控制信号传输功能的实现,构成了系统闭环结构,以极低的功耗代价省去了功耗较大的光纤接收模块。

2.1 压控电流源设计

在相同数据量情况下,上行传输波特率越高,光供能被中断的时间越短,所以激光器的驱动电路需要具备输出高频率脉冲电流的载波能力,要实现较窄的上升沿和下降沿;同时,要限制驱动电流过冲损害激光器。

图3为用于激光器载波驱动的压控电流源电路。该电路以功率MOS管Md为驱动元件,3个放大器构成电压调整和负反馈回路, R_s 为激光器工作电流采样无感电阻,Mp用做激光器保护开关。这里设定通过激光器电流为 I ,电压控制信号为 U ,OP3输出反馈电压为 U_f ,OP1输出电压为 U_o 。

根据放大器工作原理,可得到系统的输入控制电压 U 与输出到激光器的电流 I 的关系为:

$$I = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{R_s} \frac{R_{10}}{R_9 + R_{10}} \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) U \quad (1)$$

本文设定为: $I=U/(2\Omega)$ 。当控制信号 U 保持恒定时,该电路作为激光器的恒流驱动电路。激光器的降额使用有利于保护激光器并延长其工作寿命,所以驱动电流宜控制在60%额定以下,这时一次电源能够输出不小于300 mW的功率(室温下)。当工作在控制信号传输方式下,输入电压为脉冲形式。输出电流脉冲的上升时间与下降时间由前向通路上总的时间常数 RC_1 决定, R_7 与 C_2 串联能滤除Md栅极控制信号中的高频电压过冲。由于不可避免存在过冲,电流不宜超过额定工作电流的40%。

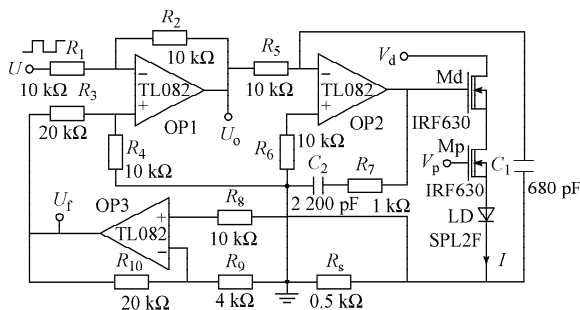


图3 LD驱动电路

Fig. 3 Circuitry driving the LD

2.2 一次转换器解码

解码电路的关键是在实现准确解码的同时尽量保证电源的转换效率不受影响,电路如图4所示。

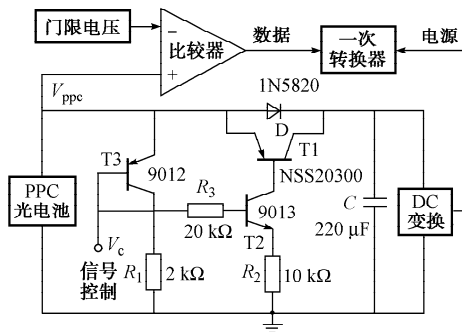


图4 解码电路

Fig. 4 Decoding circuitry

肖特基二极管D(1N5820)和三极管T1起电荷隔离作用,防止稳压电容 C 上存储的电荷倒流,否则光电池输出电压被抬高,数据信号解码无法实现。电容 C 作为储能元件,当光供能短暂中断时,继续维持对后续电路的供能。肖特基二极管的固有导通压降(约0.3 V)带来的损耗,降低了供能的效率。为此,采用导通压降极低的低饱和压降三极管T1与其并联,可显著降低损耗。三极管T2起电平反向作用, R_2 起限流作用,能够降低损耗。光电池对脉冲光信号的响应与其负载有关,快速三极管T3在数据传输过程中将电阻 R_1 切入到输出回路中,

能够获得较好的电压脉冲信号。

解码电路工作时序如图 5 所示。当光电池输出 V_{ppc} 保持低电平较长时间(AC), 则确认为进入供能中断状态(AB), 控制信号 V_c 变为低电平, 负载 R_1 切入。此时, 电路可以接收较高频率的数据信息(CD)。数据信息接收完成后, V_c 恢复为高电平, 电路重新进入供能状态。被传送的控制信号通过光纤传输, 并经过光电池实现光电转换后, 输出跳变并不明显的电压信号, 所以必须经过电平判定(波形整形)才可以被一次转换器解码。将光电池的输出电压与判决门限(阈值)电压进行比较后, 就可以还原控制信号。这里采用低功耗比较器电路实现, 判决门限电压由 DC 变换输出电压经电阻分压得到。

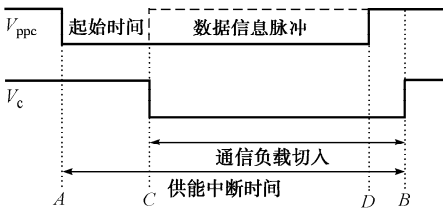


图 5 解码电路工作时序
Fig. 5 Working sequence of decoding

3 低功耗 LED 驱动电路

用于通信的光发送 LED 是一次转换器中功耗最大的器件, 必须对其进行优化处理, 以降低电路功耗, 使激光供能易于实现。为实现最低功耗, 通信电路设计要考虑: ①采用功耗较低的器件, 以降低驱动功耗; ②使用尽可能少的 LED; ③设计高效率的光发送驱动电路。

本文采用 Agilent 公司的 LED 组件光发送、接收模块 HFBR1414 和 HFBR2412。MCU 或 PLD 的使用可以在单根下行光纤中分时传送温度和电压等数据, 这种设计可以把下行光纤减少到只有 1 根。

LED 的驱动电流与通信距离的关系如图 6 所示。驱动电流的单位为 dB, 相当于 $10\log(I/I_0)$, I_0 为 LED 的最大驱动电流值 (60 mA), 图 6 为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内最苛刻条件下的数据。由于较大孔径的光纤耦合效率高, 连接损耗小, 而单位距离的传输损耗相对大, 所以 0.5 km 距离内使用 $100\text{ }\mu\text{m}/140\text{ }\mu\text{m}$ 光纤所需的驱动电流更小些。为此, 这里选用 $100\text{ }\mu\text{m}/140\text{ }\mu\text{m}$ 多模通信光纤。

为了在保证通信可靠的同时尽量降低电路功耗, 驱动电路的设计尤其重要。从图 6 可以得出, 若将光通信距离限制在 0.2 km 以内, 则 HFBR1414 只需要 12 mA 驱动电流就可以满足要求, 此时导通

压降约为 1.45 V。在该工作条件下, 本文改进了原有的驱动电路, 如图 7 所示。

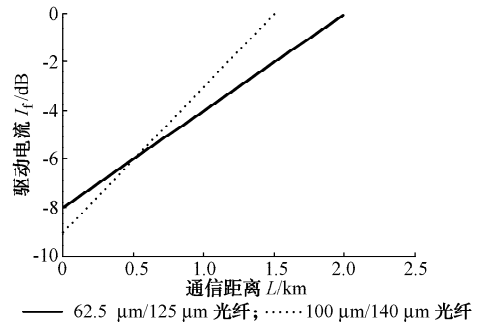


图 6 驱动电流与通信距离的关系
Fig. 6 Link length vs driving current

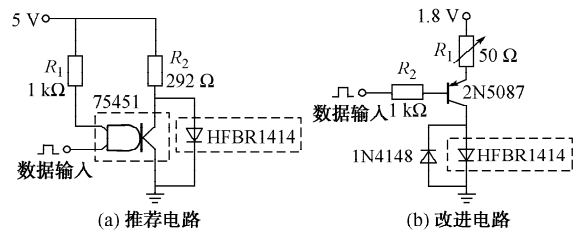


图 7 驱动电路对比
Fig. 7 Comparison of the driving circuit

在改进电路中, 电路的工作电压可以降低到 1.8 V。驱动器件选用小信号 PNP 三极管, 可以工作在数兆赫频率下, 完全适合于下行光纤的高速数据传输。其中高电平对应光线“灭”, 低电平则为“亮”, 在 LED 中没有电流通过时三极管关闭, 电路几乎不需要消耗能量。当 R_2 的阻值取 1 kΩ、调节 R_1 的阻值约为 4 Ω 时, 电路的总功耗接近最低。计算得到改进后电路导通时的瞬时功耗约为 22 mW, 平均功率将更低; 从高效 DC/DC 得到 1.8 V 电压的效率能够达到 85% 以上, 损耗不过数毫瓦。而推荐电路在相同工作条件下的平均功耗在 60 mW ($5\text{ V}\times 12\text{ mA}$) 以上。改进后的电路电压更低, 功耗更小; 虽然通信速率有所降低, 当仍能满足本系统数据传输的需要。一次转换器其他部分采用低功耗电子元器件, 总功耗可控制在 20 mW 以内, 加上 LED 驱动电路的功耗, 一次转换器总功耗可以控制在 40 mW 以内, 能够降低激光器的工作电流, 从而延长激光器的寿命。

4 光电传输系统性能实验测试

4.1 上行光纤通信实验

脉宽畸变是衡量数据传输性能的重要参数, 当脉宽展宽或压缩到前后沿相互重叠时, 就会形成码间干扰, 导致误码率上升, 使通信质量下降。实验原

理如图 8 所示。采用方波作为输入,对输出脉冲的脉宽畸变进行测量。

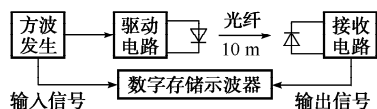


图 8 光通信实验原理

Fig. 8 Set-up for experiment of fiber transmission

实验中,AFG3021 波形发生器作为方波源,100 MHz数字存储示波器 THS720P 用来记录实验波形,光纤长度为 10 m。实验结果表明,当输入 200 kHz的方波时,接收端仍能得到高质量的电压信号。由图 9 所示数据可计算出脉宽畸变约为 12%,2 个信号上升沿的延时约为 2 μ s。

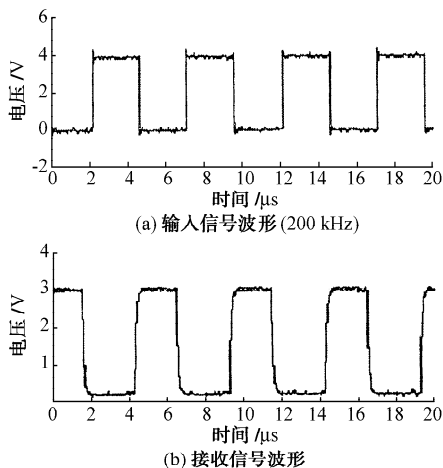


图 9 上行光纤通信实验波形

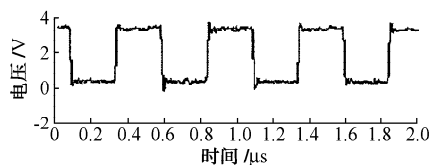
Fig. 9 Waveform of up-fiber data transmission

4.2 下行光纤通信实验

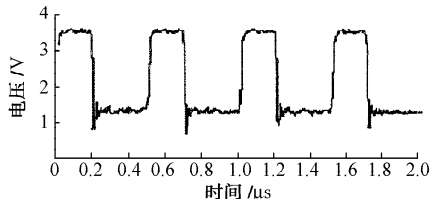
实验原理类似图 8,光纤长度为 3 m,接收端使用 HFBR2412 推荐接收电路。当输入 2 MHz 方波信号时,输出波形如图 10 所示,脉宽畸变约为 24%,上升沿的延时约为 100 ns。

4.3 异步串行通信编码方式

通信中传输的数字信号常用的编码有不归零编码、曼彻斯特编码和差分曼彻斯特编码。曼彻斯特编码的传输较不归零编码需要更宽的带宽。在相同的微处理器频率和通信带宽的条件下,不归零编码能达到的通信速率约为曼彻斯特编码的 2 倍。在相同通信数据量下,使用较高的通信速率可以减小 LED 导通时间,降低一次转换器功耗;也能够缩短上行光纤中供能中断时间,提高供能稳定性。所以,本文采用不归零编码作为异步串行通信编码。由前面通信实验结果可知,上行光纤通信波特率能够达到 200 kbit/s,下行光纤通信能够达到 2 Mbit/s。



(a) 输入信号波形 (2 MHz)



(b) 接收信号波形

图 10 下行光纤通信实验波形

Fig. 10 Waveform of down-fiber data transmission

5 结语

本文针对激光供能电流互感器系统的特点,设计了低功耗的光电传输系统。

1)室温环境中,激光器在恒流驱动状态下,一次电源能够提供不低于 350 mW 的功率输出。

2)能量传输光纤兼做数据传输用,在一次转换器中通过比较器电路解码出控制信号,省去了功耗较大的光接收模块,通信波特率达到 200 kbit/s。

3)改进了一次转换器光发射模块的驱动电路,大大降低了其功耗,进而将一次转换器总平均功耗降低到不足 40 mW,通信波特率达到 2 Mbit/s。

传输系统形成了一次转换器与二次转换器之间的闭环结构,有利于实现在线校准和电流采样点调节等功能,促进了互感器测量准确度的提高。

参考文献

- [1] 袁季修,盛和乐,吴聚业. 保护用电流互感器应用指南. 北京:中国电力出版社,2003.
YUAN Jixiu, SHENG Hele, WU Juye. Application note of protective current transformer. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [2] 王廷云,罗承沐,田玉鑫. 电力系统中光电电流互感器研究. 电力系统自动化,2000,24(1):38-41.
WANG Tingyun, LUO Chengmu, TIAN Yuxin. Study on optical current transformer in power system. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1): 38-41.
- [3] 李英英,王凯. 利用光纤技术测量电流. 电力系统自动化,1999,23(15):40-42.
LI Fuying, WANG Kai. Measurement of electrical current with optic fiber technology. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(15): 40-42.
- [4] CEASE T W, JOHNSTON P A. Magneto-optic current transducer. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2): 548-555.
- [5] SAWA T, KUROSAWA K, KAMINISHI T, et al. Development of optical instrument transformers. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2): 884-891.

- [6] DONALDSON E F, GIBSON J R, JONES G R, et al. Hybrid optical current transformer with optical and power-line energisation. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2002, 147(5): 304-309.
- [7] DUAN Xiongying, ZOU Jiyan, LIAO Minfu, et al. Combined digital electronic current and voltage transducer. Journal of Shanghai University (English Edition), 2002, 6(1): 79-84.
- [8] IEC 60044-8 Electronic current transducers. 2002.
- [9] 王鹏, 罗承沐, 张贵新. 基于低功率电流互感器的电子式电流互感器. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 98-101.
WANG Peng, LUO Chengmu, ZHANG Guixin. Electronic current transformer based on low-power current transformer. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 98-101.

- [10] 申烛, 王士敏, 罗承沐. 一种电子式电流互感器的研制. 电力系统自动化, 2002, 26(18): 41-44.
SHEN Zhu, WANG Shimin, LUO Chengmu. Development of an electronic current transformer. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(18): 41-44.

邱红辉(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事智能化电器智能检测的科研工作. E-mail: qiuhh1979@163.com

李立伟(1970—), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统的智能检测和状态维修等方面的研究。

段雄英(1974—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为智能化电器及智能检测技术。

Opt-electric Transmission System of Low Power Consumption for Optically Powered Electronic Current Transformers

QIU Honghui, LI Liwei, DUAN Xiongying, FAN Xingming, LÜ Bin
(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: An opt-electric transmission system of low power consumption that consists of the up- and down-fiber for the electronic current transformer (ECT) is designed. The command data signals can be transmitted via the same up-fiber that is used to transmit power from the secondary power supply to the primary converter containing sensors and associated circuitry. The up data transmission is done during the brief interruption of optical power supply, which does not affect the steady electrical power supply. The command data can be picked off by a simple comparator circuit added to the power-conversion circuit in the primary converter. The improved circuitry driving the fiber transmitter in the primary converter works reliably with only a few mWs average power consumption, and the total power consumption of the primary converter can be limited to merely 40 mW. So the output of the optical power-supply is considerably cut down. The experimental results show that data can be transmitted at a baud-rate as high as 200 kbit/s from the secondary to the primary converter, and 2 Mbit/s in the opposite direction. The baud-rate will meet the communicating demand of the CT. Together with the digital data processing techniques the transmission system can cut down power consumption and improve the measuring accuracy if applied in ECTs.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50447006).

Key words: current transformer; optically powered; opt-electric transmission system; low power consumption; asynchronous serial communication