

## 采用数模混合双闭环方法的 DFB 激光器驱动电源

曲世敏, 王 明, 李 楠

(吉林大学 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘 要:** 由于驱动电流波动会影响分布式反馈式(DFB)激光器激射波长及发光功率,采用数模混合双闭环技术,以 TMS320LF28335 为核心控制器,设计并研制了一种高稳定性 DFB 激光器驱动电源。在硬件电路设计方面,该激光器驱动电源采用运算放大器深度负反馈原理,提高了系统的稳定性(优于  $4 \times 10^{-5}$ )。软件设计中,引入 Ziegler-Nichols PID 算法,消除了实际驱动电流值与理论值之间的微小差异(小于 0.5%)。同时,该驱动电源具备防上电/断电冲击保护电路、延时软启动电路和过流保护电路等保护电路。利用该驱动电源,对中心波长为 1742 nm 的 DFB 激光器做了驱动测试。实验表明,在长时间(>220 h)稳定性测试中,驱动电流稳定度优于  $4 \times 10^{-5}$ (RMS),满足 DFB 激光器对驱动电流的要求,具有很强的实用价值。

**关键词:** 分布式反馈式激光器; 数模混合双闭环技术; Ziegler-Nichols PID 算法; 驱动电源

**中图分类号:** TP271.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1105007

## DFB laser driving power using hybrid digital-analog closed loop

Qu Shimin, Wang Ming, Li Nan

(College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** As the driving current fluctuation can affect distributed feedback (DFB) laser's emitting wavelength and optical power, a high stable DFB lasers driver was designed and developed by using hybrid digital-analog closed loop method, which was based on TMS320LF28335 core controller. In terms of hardware design, the proposed laser driver utilized operational amplifier deep feedback theory to increase the stability of the whole system (better than  $4 \times 10^{-5}$ ). In software design, Ziegler-Nichols PID algorithm was introduced to eliminate the micro deviation between the real driving current and the theory current value (less than 0.5%). Meanwhile, the driver possessed surge protection circuit when power was on/off, time delay soft start circuit and over current protection circuit, et al. Using the aforementioned driver, a driving test was performed on a DFB laser with a center wavelength of 1742 nm. Experiments show that the stability of driving current is better than  $4 \times 10^{-5}$  (RMS) during long term (>220 h) stability performance test, which meets the requirement of DFB laser and has good practical significance.

**Key words:** distributed feedback laser; hybrid digital-analog closed loop method;

Ziegler-Nichols PID algorithm; driving power

收稿日期:2016-03-15; 修订日期:2016-04-23

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)(2013BAK06B00)

作者简介:曲世敏(1968-),女,工程师,博士,主要从事激光光电检测方面的研究。Email:qsm\_jlu@163.com

## 0 引言

由于非对称气体分子具有偶极矩,在红外光谱具有很强的活性,有自己特定的指纹区,利用红外光谱直接吸收原理来检测气体的浓度已广泛地应用到实际中<sup>[1-4]</sup>。同时,由于DFB激光器具有线宽窄、能量高和单色性好等优点,使其非常适合作为光源应用于红外气体检测<sup>[5-7]</sup>。当DFB激光器驱动电流增加时,其输出波长也会随之增大,产生红移。当DFB激光器工作温度一定时,输出光功率与其驱动电流成正比。

在商品化DFB激光器驱动电源方面,国外厂商如Wavelength、ILXlight和Alpes lasers公司等<sup>[8]</sup>,长时间(>220 h)稳定性为 $10^{-4}$ 量级。国内研制DFB驱动电源的厂商主要以深圳市南方联合实业有限公司为代表<sup>[8]</sup>,长时间(>220 h)稳定性为 $10^{-3}$ 量级。考虑到以上DFB激光器驱动电源的稳定性均不高的现状,结合实际项目指标的需求,笔者等自主设计并研制了具有实际应用价值的高稳定性(优于 $4 \times 10^{-5}$ )DFB激光器驱动电源。

## 1 硬件系统设计

### 1.1 系统概述

此DFB激光器驱动电源由控制器模块、压控恒流源模块和保护电路模块组成,如图1所示。

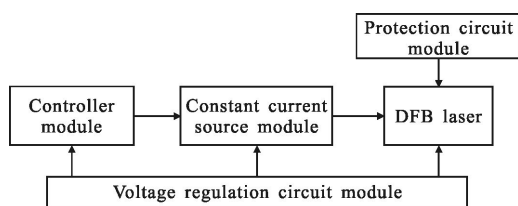


图1 硬件系统组成

Fig.1 Hardware system composition

采用美国TI公司的32位定点型处理器TMS320LF28335作为嵌入式控制器;芯片内部的数模转换器(DAC)产生高速高精度的模拟信号。恒流源模块的驱动原理是根据MOSFET的栅极控制电压VGS与MOSFET的导通电流ID之间的关系来调节驱动DFB激光器的电流。保护电路模块分别对驱动电流进行过载保护,电源电压波动进行瞬态抑制、

消除电路的静电干扰。因此,保护电路能够使DFB激光器工作于更复杂的电磁环境中,大大延长其使用寿命。

### 1.2 压控恒流源模块

如图2所示,压控恒流源模块采用双重反馈控制方案,以实现微小的电流误差和高稳定的电流输出。在标号为I的反馈环中,由于场效应管的漏源极电流受栅源极电压控制,以集成运算放大器 $U_A$ 为核心构成闭环系统,根据其同相端电位与反相端电位相等的原则,通过控制加在其正输入端的电压来控制稳定电流的输出<sup>[9-11]</sup>。

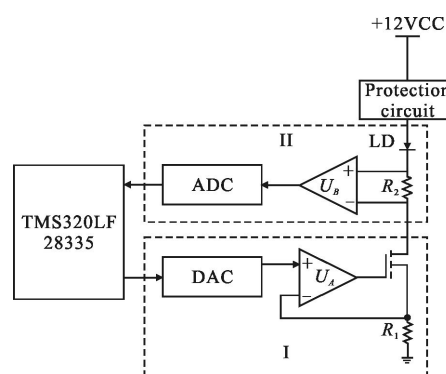


图2 压控恒流源模块

Fig.2 Constant current module

同时,为了进一步提高驱动电流的稳定性,采用标号为II的反馈环路,通过电阻 $R_2$ 对驱动电流进行取样,实现电流-电压的变换,然后经过模拟-数字转换,将数字量送给TMS320LF28335,与电流的预设量进行对比,利用Ziegler-Nichols PID算法对集成运算放大器 $U_A$ 同相输入端的电压进行调整,这样就实现了进一步提高驱动电流的稳定性。

标号为I的反馈电路的设计关键是注意不要产生自激振荡现象使该电路不稳定。同时,为了防止自激现象的发生,在场效应管的栅极和源极之间并联适当容值的电容。需要注意,过大的电容值会使系统建立动态平衡的时间变长,而取值过小又达不到消除自激振荡的目的,具体取值需要反复实验进行取舍。

### 1.3 保护电路模块

在延时软启动电路方面,对经典 $\pi$ 型网络进行了改进,借助NPN型达林顿晶体管的大电流来间接提高电容的等效容值,使它产生大电容的效果,如图3所示。如果达林顿管的电流放大倍数为 $k$ ,则在

基极与地电位之间接入的电容  $C_2$  就等效于在源极与地之间接入了容值为  $(1+k)C_2$  的大电容。此外,该电路还可以实现 DFB 激光器驱动的慢启动与慢关闭,具体的工作方式:电源接通瞬间,  $Q_1$  截止,其初始射极输出电流为零,外部电流通过接在达林顿管基极与集电极之间的电阻给电容  $C_2$  充电,其基极电位开始缓缓上升,当超过截止电压后,  $Q_1$  的工作状态由截止变为放大,其发射极电流由初始状态一直变大直至饱和,同时三极管  $Q_2$  基极电位也开始增大,最终  $Q_2$  导通,滤波电路的输出电压等于其输入电压。当电源断开时,变化过程同理。这样,激光器的开启与关闭都能躲过上电与断电瞬间的电网浪涌冲击,具体的延迟时间与电阻  $R$  的取值有关。

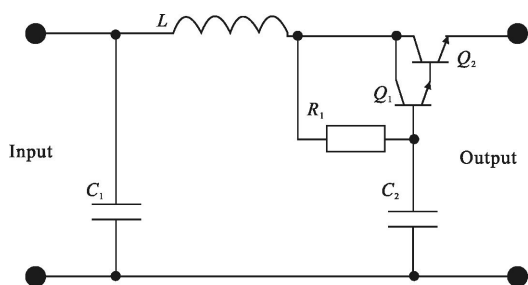


图 3 延时软启动电路

Fig.3 Timing-delay soft-start circuit

由于 DFB 激光器在实际工作中,存在静电。此驱动电源在 DFB 激光器两端反向并联瞬变电压抑制二极管构成静电导电通路,避免损坏。同时,采用过流保护电路实时地监控 DFB 激光器驱动电流,当驱动电流超过允许电流最大值时,立即切断电流通路,保护激光器。

## 2 数字 PID 算法及 Ziegler-Nichols 工程整定方法

### 2.1 数字 PID 算法

由于传统模拟 PID 控制参数一旦确定,便很难改变,给实际中 PID 参数调整带来不便。随着微型控制器的出现,以其为核心构建数字 PID 控制系统成为主流。数字 PID 是模拟 PID 在时间轴上先进行离散化后,然后利用  $P$ 、 $I$  和  $D$  环节对偏差值进行运算,从而使系统输出震荡成阻尼式衰减,最终逼近于期望值,具体表示形式如下:

$$u(k)=K_p \left\{ e(k)+\frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i)+\frac{T_D}{T} [e(k)-e(k-1)] \right\} \quad (1)$$

式中:  $e(k)$  为第  $k$  次采样时,系统实际输出值与期望值的偏差;  $T$  为系统采样周期;  $T_i$  为系统积分时间;  $T_D$  为系统微分时间。

### 2.2 Ziegler-Nichols 工程整定方法

实际中,对于复杂的系统建立的数学模型跟真实系统存在很大的差异。所以工程中通常采用临界比例带法,即不需要建立目标系统数学模型的前提下,利用经验公式,实现对  $P$ 、 $I$  和  $D$  三个参数进行整定。整定经验公式如表 1 所示。

表 1 Ziegler-Nichols 法参数整定经验公式

Tab.1 Empirical formula of parameters setting of Ziegler-Nichols method

| Parameter regulator | $\delta$            | $T_i/\text{min}$ | $T_D/\text{min}$ |
|---------------------|---------------------|------------------|------------------|
| $P$                 | $2\delta_{pr}\%$    | -                | -                |
| $PI$                | $2.2\delta_{pr}\%$  | $0.85T_{pr}$     | -                |
| $PID$               | $1.67\delta_{pr}\%$ | $0.5T_{pr}$      | $0.125T_{pr}$    |

临界比例带法具体实现过程如下:

(1) 初始化系统,使积分项和差分项为零,只存在比例环节。

(2) 调节比例系数  $P$ ,待系统输出响应等幅震荡。此时,比例系数  $P$  记为即临界比例带  $\delta_{pr}$ ,震荡周期记为  $T_{pr}$ ,如图 4 所示。

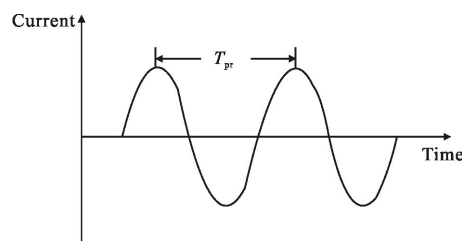


图 4 Ziegler-Nichols 法示意图

Fig.4 Diagram of Ziegler-Nichols method

(3) 利用表 1 中所示的经验公式计算各个参数。

## 3 驱动电源性能测试

利用该 DFB 激光器驱动电源,在室温 (25 °C) 条件下,对中心波长为 1 742 nm 的 DFB 激光器做了驱动测试。该 DFB 激光器内部集成热电制冷器和负温度系数的热敏电阻,为蝶形封装。

### 3.1 DFB 激光器驱动性能测试

根据器件的技术手册,DFB 激光器激光发生的中心谱线的波长为 1742 nm。在 DFB 激光器驱动性能实验中,采用 THERMO4700 型傅里叶红外光谱仪测量的 DFB 激光器中心谱线如图 5 所示。

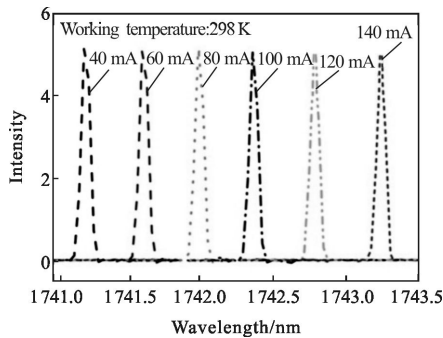


图 5 1742 nm DFB 激光器的中心光谱

Fig.5 Centre spectrum of DFB laser with 1742 nm

根据 DFB 激光器的自身参数,其驱动电流的调节范围是从阈值电流 40 mA 到峰值电流 140 mA,此时可实现的波长调节范围为 1741.2~1743.2 nm,注入电流调谐系数为 0.02 nm/mA。实际中可通过调节 DFB 激光器驱动电流来对其发射波长进行控制,与被测气体吸收峰进行匹配。

### 3.2 DFB 激光器驱动精度测试

通过 Ziegler-Nichols PID 工程整定方法,确定控制参数  $K_p=44.84$ 、 $K_i=19.93$ 、 $K_d=25.22$ 。实验中,将以上三个控制参数代入 PID 控制程序,对 DFB 激光器进行了驱动精度测试,设定目标驱动电流为 100 mA。图 6 给出了 DFB 激光器驱动电流测试曲线。

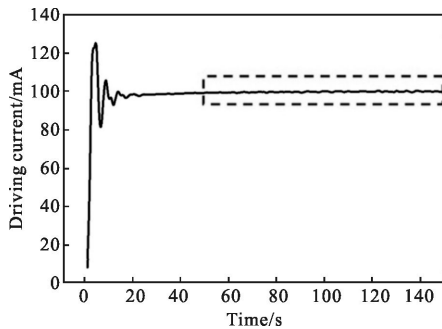


图 6 DFB 激光器驱动电流测试曲线

Fig.6 Test curve of DFB laser's driving current

DFB 激光器驱动电流经过 20 s 震荡调节后逐渐稳定于预设值 100 mA。经 50 s 后,驱动电流纹波均小于  $\pm 0.025$  mA,保证 DFB 激光器稳定工作。

### 3.3 驱动电源系统线性度分析

由于压控恒流源的驱动电流大小受其输入电压控制。实验中,分别对压控恒流源输入电压和驱动电流进行测量,二者线性拟合曲线如图 7 所示。

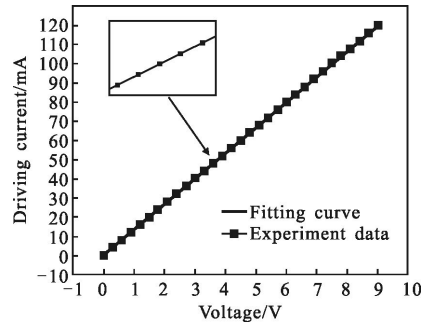


图 7 输入电压与驱动电流关系曲线

Fig.7 Relationship between input voltage and driving current

结果显示,驱动电源驱动电流为 17.46 mA 时,电流最大偏差值为 0.087 3 mA,相对偏差量小于 0.5%。驱动电流在整个输出范围内(0~120 mA),驱动电流线性度为 99.97%。

### 3.4 驱动电流稳定性测试

实验中,对驱动电源的驱动电流稳定性进行了长时间测试,结果如图 8 所示。

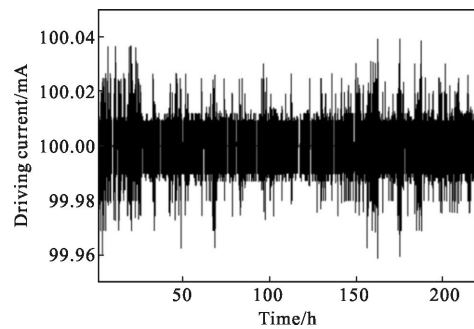


图 8 长期稳定性测试结果

Fig.8 Long term stability test result

在长期稳定性测试实验中,驱动电流预期值为 100 mA,均值为 100.000 435 mA,与均值误差最大驱动电流值为 100.000 439 mA,驱动电流长期稳定度优于  $4 \times 10^{-5}$  (RMS)。

## 4 结论

以 TMS320LF28335 为核心控制器,采用数模混合双闭环技术,设计并研制了一种高稳定性 DFB 激光器驱动电源。硬件电路设计方面,该激光器驱动电

源采用运算放大器深度负反馈原理,提高了系统的稳定性。此外,该驱动电源具备防上电/断电冲击保护电路、延时软启动电路和过流保护电路等保护电路,保证了 DFB 激光器长期稳定的工作,使其免受损坏,增加了使用寿命。在软件设计中,引入 Ziegler-Nichols PID 算法,消除了实际驱动电流值与理论值之间的微小差异。利用该 DFB 激光器驱动电源,在室温(25℃)条件下,对中心波长为 1 742 nm 的 DFB 激光器做了驱动测试。实验表明,在长时间(>220 h)稳定性测试中,驱动电源线性度为 99.97%,驱动电流稳定度为  $4 \times 10^{-5}$ (RMS),满足 DFB 激光器对驱动电源的要求,具有很强的实用价值。

### 参考文献:

- [1] Xiao Yun, Zhang Yunhai, Wang Zhen, et al. Effect of incident laser on resolution of LSCM [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1): 31–38. (in Chinese)  
肖响, 张运海, 王真, 等. 入射激光对激光扫描共聚焦显微镜分辨率的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 31–38.
- [2] Chen Chen, Huang Jianqiang, Lv Mo, et al. High-precision narrow pulse drive power for infrared quantum cascade laser [J]. *Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition*, 2011, 41(6): 1739–1740. (in Chinese)  
陈晨, 黄渐强, 吕默, 等. 高精度纳秒级红外量子级联激光器驱动电源的研制 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(6): 1739–1740.
- [3] Zhang Chuansheng, Li Dianjun, Yang Guilong, et al. Pulsed exciting power supply of high-power TEA CO<sub>2</sub> laser [J]. *Chinese Optics*, 2009, 2(3): 242–247. (in Chinese)  
张传胜, 李殿军, 杨贵龙, 等. 大功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的脉冲激励电源[J]. 中国光学, 2009, 2(3): 242–247.
- [4] Lu Kai, Liu Baiyu, Bai Yonglin, et al. High power laser diode drive power supply [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2680–2684. (in Chinese)  
卢凯, 刘百玉, 白永林, 等. 大功率半导体激光器驱动电源的设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2680–2684.
- [5] Tong Cunzhu, Wang Lijie, Tian Sicong, et al. Study on Bragg reflection waveguide diode laser [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 480–498. (in Chinese)  
佟存柱, 汪丽杰, 田思聪, 等. 布拉格反射波导半导体激光器的研究[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 480–498.
- [6] Guo Shaoai, Ruan Hui, Fang Sichao, et al. Design of photoelectric loop data acquisition system circuit for laser haze detection [J]. *Laser Journal*, 2015, 36(7): 19–22. (in Chinese)  
郭少艾, 阮慧, 房思超, 等. 用于激光雾霾检测的光电环数据采集系统电路研制[J]. 激光杂志, 2015, 36(7): 19–22.
- [7] Zhang Wenwen, He Fengtao, Dong Jun, et al. Development of multifunctional power supply for OLED [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1883–1888. (in Chinese)  
张稳稳, 贺锋涛, 董军, 等. 多功能 OLED 驱动电源的设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1883–1888.
- [8] Li Lei, Cao Feng, Yi Dingwang, et al. Design and characteristics of quantum cascade laser-based CO detection system [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2009, 142(1): 33–38.
- [9] Dang Jingmin, Zhai Bing, Gao Zongli, et al. Nanosecond driver for multiple pulse-modulated infrared quantum cascade lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(9): 2210–2213. (in Chinese)  
党敬民, 翟冰, 高宗丽, 等. 纳秒级脉冲型群红外量子级联激光器驱动电源[J]. 光学精密工程, 2013, 21(9): 2210–2213.
- [10] Xu Huawei, Ning Yongqiang, Zeng Yugang, et al. Design and epitaxial growth of quantum-well for 852 nm laser diode [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(3): 590–597. (in Chinese)  
徐华伟, 宁永强, 曾玉刚, 等. 852 nm 半导体激光器量子阱设计与外延生长[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 590–597.
- [11] Yuan Jie, Chen Wenlan, Qi Xianghui, et al. Design for power supply and frequency stabilization of ECL[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 115–119. (in Chinese)  
袁杰, 陈文兰, 齐向辉, 等. 可调谐半导体激光器的高精密驱动电源与稳频设计 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 115–119.