

小幅低频调制 PWM 波脉宽提高稳频控制精度*

戴高良 殷纯永

谢广平

(清华大学精密仪器与机械学系, 北京, 100084) (中国矿业大学北京研究生部, 北京, 100083)

摘要: 建立了以 8098 单片机为控制核心的横向塞曼热稳频系统, 由模型预测控制算法计算控制量, 通过输出 PWM 波经低通滤波及功率放大后热补偿激光器腔长实现稳频。由于这由 PWM 波实现 D/A 变换的精度较低, 控制量量化误差将严重地影响控制系统的性能。为此, 提出一种通过将 PWM 脉宽作小幅低频调制实现高精度 D/A 变换的方法, 显著地改善了控制系统的性能, 并在此基础上增大了系统的控制裕度, 实现了长达 10h 的稳频, 通过 S 曲线估算得频率稳定度为 8.7×10^{-10} 。这种方法简单、实用, 可适用于其它智能控制系统。

关键词: 横向塞曼 稳频 8098 单片机 PWM D/A

Improving the control performance of frequency stabilized system for transverse Zeeman laser tube

Dai Gaoliang, Yin Chunyong

(Dept. of Precision Instrument and Mechanics, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Xie Guangping

(Beijing Graduate School, China University of Mining and Technology, Beijing, 100083)

Abstract: A real industry scale frequency stabilized system for transverse Zeeman laser tube is composed. It is based on 8098 single-chip computer system, which calculates control voltage with MPC algorithm and outputs PWM wave to realize thermal compensation. Because the control voltage calculated from MPC algorithm is always real number, it must be rounded to integer. This round error can influence the control performance seriously. A method of improving D/A converting precision by modulating pulse width of PWM wave with low frequency and little amplitude is introduced. The experiment show that it is effective. By adopting this method, control range is enlarged, so that the system can be stabilized over longer period than 10h. The laser tube reached frequency stability of 8.7×10^{-10} with sample time period of 10s.

Key words: transverse Zeeman frequency stabilization 8098 single-chip computer PWM D/A

引 言

激光外差干涉测量技术广泛应用于高精度几何测量。目前, 外差干涉测量已成为纳米精度测量的主要方法, 成为国际上研究的热点。由于干涉测量是以激光波长为基准的, 因此, 建立高性能的稳频系统是实现高精度测量的首要问题。

根据控制系统的类型, 文献发表稳频系统可分为由模拟电路构成的模拟稳频系统和由单片机等数字电路构成的数字稳频系统两大类。目前, 数字稳频系统由于结构简单、调整容易、易实现复杂控制算法而被广泛采用。

* 国家教委博士点基金、精密测试技术与仪器国家重点实验室开放基金资助。

我们建立了以 8098 单片机(下简称 8098)为核心的数字热稳频系统,通过预测估计模型建立了控制环节。然而,由于 8098 仅通过一个 8 位 PWM 波形发生器输出 PWM 波,经低滤波实现 D/A 变换,很难实现高精度变换,而其本身只有 8 位外部总线,扩展能力差,因此,其控制量化误差往往会影响控制系统的性能。

我们提出了一种通过将 PWM 波脉宽作小幅低频调制实现高精度 D/A 变换的方法,成功地应用于横向塞曼热稳频控制系统,显著地提高了系统的控制性能。这种方法不需要对硬件作任何改动,简单实效,可适用于其它智能控制系统。

一、控制原理

利用 8098 为控制核心的稳频系统如图 1 所示。处于横向磁场下的 HeNe 激光器由于横向塞曼效应输出正交线偏振光,其尾光经过与偏振方向成 45°的检偏器后,在光电接收器 Detector 上形成拍频信号。光电信号经整形后,由 8098 计数得到拍频频率,通过预测控制算法,输出相应的脉宽调制 PWM 反馈信号,经过滤波、功率驱动后输入至缠绕在激光器上的加热丝,由补偿加热丝的发热量恒定激光谐振腔长,以稳定拍频频率。因为横向塞曼激光器的光频和拍频在稳定的磁场下具有稳定的 S 曲线^[1],即拍频频率和光频存在稳定的一一对应关系,从而可以达到稳定激光频率的目的。

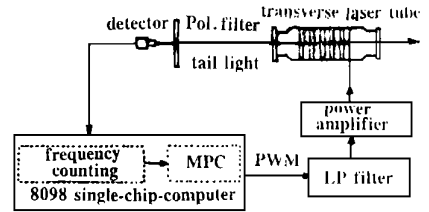


Fig.1 Schematic diagram of transverse Zeeman laser tube frequency stabilized system

利用 Hammerstein 模型描述热稳频系统,建立预测控制模型设计调节器,其控制序列为^[2]:

$$X^* = (C^T C + \Lambda)^{-1} \{ C^T (Y_r - Y_g - D) + \Lambda' x(k-1) \} \quad (1)$$

式中, X^* 为待求的最优控制序列; D 为模型误差补偿量; C 为系统响应特性矩阵; $\Lambda' = [\lambda, 0, \dots, 0]^T$, 式中, λ 为控制量加权平方和系数;

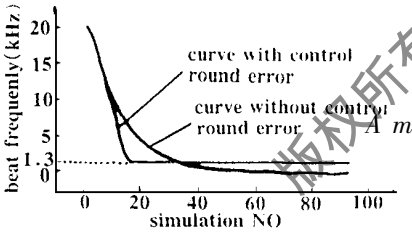


Fig. 2 Influence of control round error on control performance

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 2\lambda & -\lambda & \dots & 0 \\ -\lambda & 2\lambda & -\lambda & \vdots \\ \vdots & -\lambda & \ddots & -\lambda \\ 0 & \dots & -\lambda & 2\lambda \end{bmatrix}$$

在实际的稳频系统中,通过(1)式得到的控制序列往往是实数,而 8098 系统输出的控制量只能为 8 位,即只能将控制量量化为 256 级,显然这一量化误差将影响控制性能。为了直观地理解这一量化误差对控制精度的影响,我们进行了仿真计算,仿真假设系统在起始时离待稳频点具有 20kHz 的偏差,利用(1)式计算控制量,结果如图 2 所示。从图 2 可知,当系统不存在控制量量化误差时,系统可平稳地收敛到待稳频点,即静态偏差为 0;而当存在控制量量化误差时,系统出现了 1.3kHz 的静态偏差,并出现控制结果不平滑。可见,这种量化误差会严重地影响控制系统的性能,削弱控制系统的鲁棒性。因此,减少这种量化误差是提高稳频精度的重要环节。

二、方法描述

对 PWM 波脉宽作小幅低频调制实现高精度 D/A 变换的原理如图 3 所示。8098 系统利用 PWM 实现 D/A 的原理框图如图 3a 示,通过对 8098 的 PWM 控制寄存器

设置一个 0~ 255 的整数, 8098 输出相应的占空比的 PWM 波, 对于使用 12M 晶振的系统, 其频率 $f_{PWM} \approx 15\text{kHz}$, 经过一低通滤波器后, 其高频分量被隔掉, 剩下的直流分量即相当于 D/A 变换结果, 经过放大电路

$$U_a = K \frac{5W}{T} \quad (2)$$

其中, W , T 分别为 PWM 波的脉宽和周期, K 为比例放大系数。

由于 PWM 波的占空比由 PWM 控制寄存器的值 PWM-CONTROL 确定, 因此 (2) 式可写为:

$$U_a = K (5 \times \text{PWM-CONTROL}) / 255 \quad (3)$$

显然, 由于 PWM-CONTROL 只能为 0~ 255 的整数, 因此, 这种方法的 D/A 变换精度只能达到 0.02V。若要减小控制量量化误差, 必须减小 K , 而 K 的减小必将导致加热量控制范围的减小, 由于热稳频系统是通过控制加热量来稳定系统, 没有专门的冷却系统, 加热量控制范围的减小势必削弱系统的控制裕度, 从而影响控制系统对环境的适应能力, 使得难于实现长时间稳频。因此, 必须设法在保持 K 不变的情况下提高控制精度。

为提高 D/A 变换精度, 我们提出了如图 3b 所示的 PWM 波产生方法, 即交替产生的 m 个宽度为 W 的 PWM 波和 n 个宽度为 $(W+1)$ PWM 波, 这相当于在 PWM 波的基础上作小幅度低频脉宽调制。如果将这 PWM 波通过截止频率为 $f_{PWM} / (m+n)$ 的低通滤波器, 就可以近似得到如图 3c 示的占空比为 $n / (m+n)$ 、调制幅度为 0.02V、直流偏置为 U_a 的调制信号。在实际应用中, 将图 3b 示的信号通过一截止频率更低的低通滤波器, 就可得到所需的直流信号, 不难求得信号的幅值为:

$$U_a = K (5 / 255) [\text{PWM-CONTROL} + n / (m+n)] \quad (4)$$

显然, 通过 (3) 式得到的直流信号的精度可达到

0.02 / $(m+n)$ V, 比 (2) 式提高了 $(m+n)$ 倍。

上面提出的方法不需要对硬件作任何调整, 仅需软件实现, 因此简单易行。

三、实 验

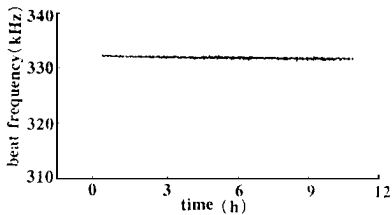


Fig. 5 Experiment result of long time frequency stabilization

长达 10h 的稳频实验, 其实验曲线如图 5 所示。实验时间为从 AM. 9:00 到 PM. 7:00, 这期间环

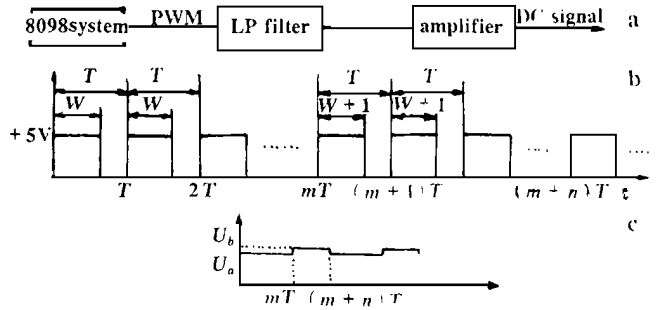


Fig. 3 Schematic diagram for improving 8098 D/A converter precision
a- block diagram of 8098 D/A converter b- wave form of PWM for improving 8098 D/A converter c- wave form of improved PWM after low pass filter

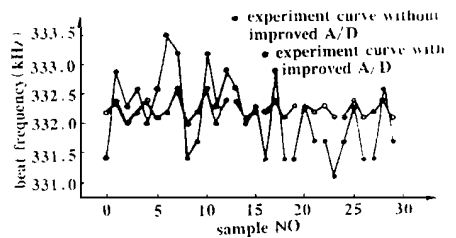


Fig. 4 Comparing experiment result with improved A/D and without improved A/D

利用上面提出

的改进方法应用于图 1 所示的控制系统进行稳频实验, 得到的实验结果如图 4 所示。由图 4 可知, 这一改进显著地提高了系统稳频精度, 可见这种改进方案是有效的。

采用上述控制方案, 我们在保持较高控制精度的前提下适当增大 K 以提高系统的控制范围, 进行了长

α-吡啶酮衍生物粉末微晶的二次谐波测量*

颜星中^{ab} 祝亚非^a 罗挺^b 宋花灿^c 蔡志岗^b 英柏宁^c

(中山大学^a 测试中心; ^b 超快速激光光谱学国家重点实验室; ^c 化学系, 广州, 510275)

摘要: 建立了有机物粉末二次谐波(SHG)的测量系统。测定了 N-烃基 α-吡啶酮衍生物粉末的 SHG, 并以溶剂变色法测定了一些 α-吡啶酮衍生物的分子超极化率与分子基态偶极矩的复量 ($\beta_{CR}^{\mu_g}$)。从分子结构特征与分子折射率等方面对其所表现出的非线性光学性质进行了分析。具有“Λ”型多极结构、分子间氢键、支化烷基和甲基的 α-吡啶酮衍生物, 粉末 SHG 较强; $\beta_{CR}^{\mu_g}$ 与 SHG 相对强度近似线性关系; 分子折射率与 SHG 不满足 Kurtz-Perry 关系。

关键词: 二次谐波 分子折射率 α-吡啶酮衍生物 粉末

Second harmonic generation of microcrystal of acridine derivates

Yan Xingzhong^{ab}, Zhu Yifei^a, Luo Ting^b, Song Huacan^c, Cai Zhigang^b, Ying Baining^c

(^aInstrumentation Analysis and Research Center, ^bState Key Lab. of Ultrafast Laser Spectroscopy,

^cDepartment of Chemistry, Zhongshan University, Guangzhou, 510275)

Abstract: A second harmonic generation (SHG) measurement system for organic powders have

* 广东省自然科学基金资助。

境温度变化了近 8℃, 采样周期为 10⁻⁶。由图 5 可知, 系统在 10h 的稳频过程中, 拍频率始终稳定在 332kHz, 表明系统具有良好的长期稳频性能。通过阿伦方差公式^[3]估算频率稳定度 S 的方法, 估算得 S 为 8.7 × 10⁻¹⁰。

四、结 论

在数字稳频系统中, 控制量化误差往往会影响控制系统的控制性能, 例如出现较大的静态偏差, 控制过程不平稳等, 因此, 必须减小这一量化误差以提高稳频精度。我们提出的这种对 8098 PWM 波作小幅度的脉宽调制的方法实现了高精度 D/A 变换, 该方法不需对硬件电路做修改, 简单而有效。实验表明采用这种方法可有效地改进系统的控制性能。在采用上述改进方案的基础上, 增大了控制量的范围, 实现了长达 10h 的稳频, 并估算频率稳定度为 8.7 × 10⁻¹⁰, 表明本实验的方法是有效的。我们提出的提高 D/A 变换精度的方法同样适用于其它稳频系统和智能仪表。

参 考 文 献

- 1 巴恩旭, 杨性愉, 刘玉照 *et al.* 光学学报, 1984; 4(5): 398~ 405
- 2 戴高良, 殷纯永, 谢广平. 中国激光, 1998 25(3)
- 3 Umeda N. Appl Opt, 1980; 19(3): 442~ 450

作者简介: 戴高良, 男, 1972 年 1 月出生。博士生。主要从事激光应用与精密测量测试研究工作。