

用于双波长稳频 CO₂ 激光的 自组织模糊控制系统

陈可简 朱 勤

(深圳大学控制工程系, 深圳 518060)

提要 报道了一种用于高精度双波长稳频 CO₂ 激光的自组织模糊控制系统。由于 CO₂ 激光工作在极复杂的条件下,特别是双波长同时稳定的条件极为严格,故对 CO₂ 激光的一系列工作参量必须进行有效的控制。所介绍的自组织模糊控制系统可以满足这方面的要求。它可使同时振荡的双波长之频率稳定度不论短周期或长周期都优于 10^{-10} 。

关键词 自组织模糊控制, 双波长 CO₂ 激光, 频率稳定性

1 引 言

众所周知,多波长稳频 CO₂ 激光在激光光谱学、精密测量、激光化学、激光雷达及环境工程等领域是十分有用的。然而多波长 CO₂ 激光的稳频技术是十分复杂的。其困难主要来自于激光器内部的复杂物理过程。频率稳定性和各参量的关系很难用准确的数学模型表述,以往的稳频方法一般都是选择众多参量中的一个(多数是选择谐振腔长度 L) 对其进行 PID 型的伺服控制^[1],但在实际过程中,已经发现它有很大的局限性,主要是由于在 PID 控制中对主控参量以外的其它参量都是简单地进行恒值控制,此时各参量并不能严格不变,而是都存在一定的扰动,所有扰动的迭加则会干扰 PID 系统的工作,而且这种扰动的迭加不一定是调节腔长 L 所能补偿的,为此我们研制了一种自组织模糊控制系统,由于系统可以实现模糊优化和自组织,故不需要精确的数学模型。它还可以免除外界干扰,并且十分简单,又具有自适应功能,可使双波长 CO₂ 激光实现很高的频率稳定度。

2 对控制系统的要求

在多波长 CO₂ 激光器中为实现高精度稳频,对激光器的色散特性、增益及损耗特性,谐振腔长度和环境因素的控制是十分必要的。但如此众多的因素其间相互关系无法用数学模型描述。例如,布儒斯特窗 B (图 1) 由于激光腔内极高的功率密度及由此而来的局部高温,使谐振腔的光学长度(nd) 值将是经常变化的(n 为折射率, d 为几何路程)。而且局部高温还引起光学元件表面曲率的变化,后者将使激光束会聚性变化从而带来衍射损耗的变化。衍射损耗的变化还可由腔的输出镜 M 和金属光栅 G 所引起,也可由激光束在横向的摆动(激光器管壳温度的

不均匀及管内气体压力随温度变化等引起) 所产生, 所以仅仅是恒温对达到最佳效果是远远不够的。尤其是双波长 CO_2 激光的稳频是基于双跃迁系统谱线竞争效应的, 影响此效应的因素有各谱线的自饱和参量以及两谱线间的交叉饱和参量^[2], 因而情况更为错综复杂。

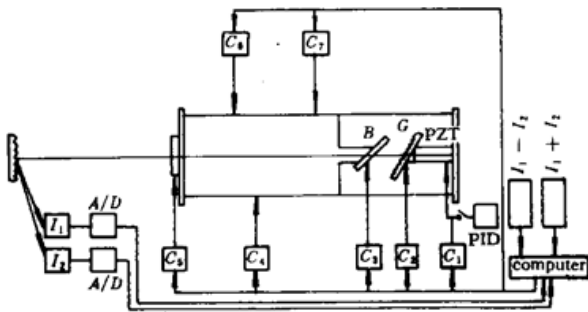


Fig. 1 The control system for frequency stabilized CO_2 laser *M*: germanium mirror; *B*: the Brewster window; *G*: metal grating; *T*: laser tube; PZT: piezo-electric transducer; C_1 : controller of a piezo-electric transducer for controlling the laser's cavity length; C_2 : a control valve of cooling water for controlling the temperature of the metal grating *G*; C_3 : a control valve of cooling water for controlling the temperature of the window *B*; C_4 : a control valve of cooling water for controlling the temperature of the germanium mirror *M*; C_5 : controller for controlling the temperature of the laser tube *T*; C_6 : controller for controlling the discharge current of the laser tube; C_7 : controller for controlling the gas pressure; I_1, I_2 : the detectors for λ_1, λ_2 ; PID: PID electronics; $I_1, I_2, I_1 + I_2$: electronics

对于最简单的情况(设增益 G 为恒定) 工作频率是

$$f = \frac{qc}{2\langle L \rangle} \quad (1)$$

此处 $q = 1, 2, 3, \dots, c$ 为光速, $\langle L \rangle$ 为腔的总光学长度。对于更一般的情况

$$f = F(\alpha, G, \langle L \rangle, \dots,) \quad (2)$$

此处 α 是激光器的损耗。在文献[2]中, 我们已经给出以两个波长光强相等即 $I_1 = I_2$ 作为两个波长激光频率的稳定判据。我们必须控制下列对象: C_1 是压电陶瓷, 用来进行激光腔长控制; C_2 是冷却水流量控制器, 用来控制金属光栅的温度; C_3 是冷却水流量控制器, 用来控制布儒斯特窗片温度; C_4 是控制激光管管壳温度控制器; C_5 是冷却水流量控制器, 用来控制锗镜 M 的温度; C_6 是电流控制器, 用来控制激光器放电电流; C_7 用于控制激光管内部气压。

由于 C_6 及 C_7 对激光的增益有复杂的影响, 对它们仅进行恒值控制, 不进行伺服反馈, 可使系统相对简化。而 $C_1 \sim C_5$ 则需要进行时变控制。此处特别需要强调的是由于 $C_1 \sim C_5$ 的动态响应各不相同, 故必须在短周期(短于 0.1 s)和长周期($t = 10$ s)两种情况下实现激光器频率的稳定, 它们的组合应实现最优化。

3 控制系统

为满足上述要求, 建立了一个自组织模糊控制系统, 其原理结构组成如图 2 所示。

3.1 模糊控制(Fuzzy)

3.1.1 确定各状态的隶属度函数

对于系统任一时刻的输入 I_1 和 I_2 , (它们分别是两个波长的光强), 相应有 r_1, r_2, \dots, r_5 这样一组参考状态量, 分别代表腔长、金属光栅 G 的温度、布氏窗 B 的温度、管壳 T 的温度和锗镜 M 的温度的状态参量。各状态与波长光强之间的关系可以用隶属度函数描述。此处, 隶属度函数定义为

$$\mu_i(I) = \exp(-r_i^2/2\sigma_i^2) \quad i = 1, 2, \dots, 5 \quad (3)$$

σ_i 是 r_i 到其分布中心的距离。

这部分工作如图 2 中第一个框 Fuzzy 所述。

3.1.2 控制决策

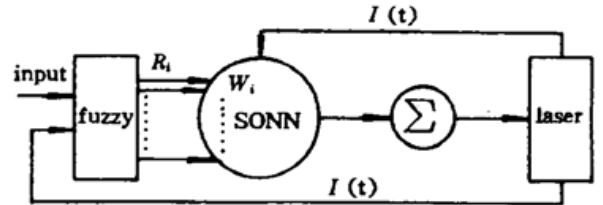
对于每个状态 r_i , 以及其隶属度 μ_i , 存在一个决策 W_i 用来控制 C_i 。所以该系统的控制决策为这些决策之和。控制装置的输出可以表达为

$$Y = \sum_{i=1}^5 \mu_i W_i \quad (4)$$

这部分内容如图 2 中第三个框 Σ 所示。

Fig. 2 The structure of the control system

Fuzzy: the fuzzy interface for calculating the membership function μ_i of reference states; SONN: the self-organized neural network for optimizing the control decision; Σ : the decision units of the control system



3.2 决策单元的自组织(SONN)

一般来说,作出一个恰当的决策或对决策的调整,需要根据以前的知识和人们的经验来找到参考状态和状态参量的恰当定义。由于对复杂系统理解上的不完善和人们经验的不足,尤其是激光控制系统中 $C_1 \sim C_5$ 是时变因子,且动态响应是十分不同的,控制决策的初始优化受到了限制。

为了达到对激光器的有效控制,需要进行控制决策的自组织优化。此处控制决策的自组织的推导如下。

对每一参考状态 (r_1, r_2, \dots, r_5) , 激光器当前所具有光强 I_1 和 I_2 的模糊隶属度是 μ_i , 而相应的输出决策是 W_1, W_2, \dots, W_5 。模糊隶属度函数归一化处理为

$$\mu'_i = \frac{\mu_i}{\sum_{j=1}^5 \mu_j} \quad i = 1, 2, \dots, 5 \quad (5)$$

由此,改写后的输出决策将是

$$Y = \sum_{i=1}^5 \mu'_i W_i \quad (6)$$

由于实际输出与期望输出的差值应该最小化,定义 Y_T 代表期望输出, E 代表输出误差,即有

$$E = E(\|Y_T - Y\|) = \min \quad (7)$$

此处 $\| \cdot \|$ 是在 R^n 空间(n 维空间)都适合的,因此,决策单元 i 的学习规则可以通过对式(7)的逼近而得到, ΔW_i 是 E 对 W_i 的偏导 $[-\partial E / \partial W_i]$ 。最终,可表达为

$$\Delta W_i = \beta \mu_i (Y_T - \sum_{j=1}^5 \mu'_j W_j) \quad (8)$$

β 是一个非常小的学习速率。

用 $\Delta W_1 \sim \Delta W_5$ 修正 $W_1 \sim W_5$ 若干次后, $C_1 \sim C_5$ 的优化要求很快就实现了。

这部分工作如图 2 中第二个框 SONN 所示。

4 实验结果

在采用上述的自组织模糊控制系统 SONN 后,可使以往用 PID 控制的双波长 CO₂ 激光器的频率稳定度明显地改善,平均比采用一般的 PID 控制改善了 2~3 倍(示于图 3)。除控制系统外,双波长 CO₂ 激光器与文献[1]中所述的相似,为封离型固定光栅双波长 CO₂ 激光器。

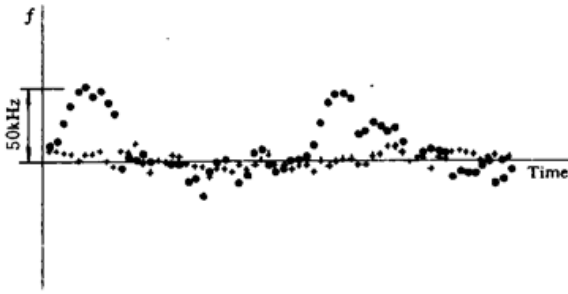


Fig. 3 The improvement of frequency stability is shown of self-organized fuzzy controlling (▲) against PID controlling (●)

f : the frequency fluctuation; Time: the sampling time; $t = 10$ s; sampling period is 10 s; PID: the result from PID controlling; SONN: the result from self-organized fuzzy controlling

为了得到更确切的结果,可以由两个类似的系统进行拍频测量。测量时两个激光器的 λ_1 和 λ_2 同时进行各自的光学混频探测,以求每个波长的频率稳定度。这样可得同时发射之双波长的频率稳定度如下:

对 10P(22) 线: 2.0×10^{-10} (采样周期 $t = 10$ s)

对 10P(20) 线: 2.2×10^{-10} (采样周期 $t = 10$ s)

而在 $t = 0.1$ s 时,频率稳定度为 3.7×10^{-11} 。

综上所述,自组织模糊控制系统对于结构复杂具有众多影响因素的双波长稳频 CO_2 激光器来讲是一种很好的办法。对于没有确定数学模型的其它稳频激光控制系统,这也是一种很好的办法。目前正在试验一种类似的用于某种多运转频率稳频激光控制系统。

参 考 文 献

- 1 朱 勤,王 晶. 双波长稳频二氧化碳激光. 中国激光, 1993, 20(10): 783~787
- 2 朱 勤. 并联双跃迁系统的谱线竞争效应. 深圳大学学报(理工版), 1993, 8(3~4): 15~20
- 3 Q. Zhu. A dual-wavelength frequency stabilized CO_2 laser with four operating frequencies. *Appl. Opt.*, 1993, 32(21): 3989~3991
- 4 M. Y. Chow. A self-organized CMAC controller. Proc of the IEEE Conf. on Industrial Technology 94TH0659-3, 1994. 68~72

A Self-organized Fuzzy Control System Used for a Dual- Wavelength Frequency Stabilized CO_2 Laser

Chen Kejian Zhu Qin

(Department of Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060)

Abstract A self-organized fuzzy control system used for a dual- wavelength frequency stabilized CO_2 laser with high precision is presented. Because of the very complex operating situation of the CO_2 laser, especially the tough condition for simultaneous dual-wavelength stabilization, a series of parameters in the CO_2 laser system must be controlled effectively. A self-organized fuzzy control system described in this paper is satisfied for these requirements. Both short and long term frequency stabilities of the simultaneous oscillations are better than several parts in 10^{10} .

Key words self-organized fuzzy control, dual-wavelength CO_2 laser, frequency stabilization