

·激光技术·

光纤激光器通用算法研究及软件实现

刘 稔

(厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘 要:结合激光速率方程理论和光纤激光器中信号光与泵浦光的传播方程,提出了适用于线型腔、环形腔光纤激光器的通用的行波理论模型,可以模拟连续波(continuous wave, CW)、主动/被动调 Q 脉冲输出。本模型考虑到了传统的点模型(point model)无法计算的因素,主要包括泵浦光和信号光在腔内分布不均匀的特性,以及传输、连接等不同损耗和非掺杂光纤对激光的影响,因此具有较高的理论精度。通过有限差分方法(finite difference method, FDM)推导出了求解光纤激光器行波模型的数值算法,并采用VC6.0以及C/C++与mideva混合编程技术实现了该算法,最终获得了具有较高运行效率、灵活性、可以模拟到大量动态激光器运行信息的光纤激光器数值仿真分析软件。

关键词:光纤激光器;行波模型;调 Q ;有限差分方法

中图分类号: TN248.1;O241.82

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-02-0023-04

Research on General Algorithm and Software Implementation of Fiber Laser

LIU Zhen

(Electronic Engineering Department, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Combining with equation theories of laser rate and propagating equations of pump and signal light in fiber lasers, a general traveling-wave theory model which is suitable to fiber lasers with line-shaped and ring-shaped cavity is proposed. And continuous wave (CW), active and passive Q -switched output can be simulated. Comparing with traditional point models, the model has higher accuracy in theory for considering more elements such as non-uniform distribution characteristic of pump and signal light in cavities as well as the influence on laser from different losses such as transmission and connection and non-doped fiber. According to finite difference method (FDM), the numerical algorithm of traveling-wave model is deduced. And the algorithm is implemented by VC 6.0 and hybrid programming technology of C/C++ and mideva. Numerical simulation analysis software with high operation efficiency and flexibility for fiber lasers is obtained finally. And plenty of dynamic operation information of lasers is simulated by the software.

Key words: fiber laser; traveling-wave model; Q -switching; finite difference method (FDM)

近年来光纤激光器引起了人们的极大关注^[1-3]。自双包层结构的光纤被提出来之后^[4],双包层光纤激光器(double cladding fiber lasers, DCFLs)成为了一种大功率激光器件。掺Yb的DCFLs连续波(continuous wave, CW)输出功率达到1.36 kW^[5]。同时,调 Q 输出的脉冲光纤激光器的峰值功率已经超过了数十千瓦^[6-7]。而高功率光纤激光器内的热-力、热-光效应^[8]非线性光学效应均会严重影响激光输出^[9]。所

以进行光纤激光器理论模拟有重要的意义。目前所谓的“点模型(single point model)”^[10-12]被大量的应用。但对于光纤激光器而言,其腔体通常超过数米,点模型的理论误差无法忽略。基于行波方程的模型具有较高的理论精度^[13-14],但是其模型尚不完备,且鲜见其算法的报道。为了更好地进行光纤激光器模拟工作,推导时考虑到了传统模型没有考虑到的影响因素,包括连接、传输等各种损耗;光功率分布以及非掺杂光纤长度等因素的影响。建立了适用于线

收稿日期: 2013-01-23

作者简介: 刘稔(1987-),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要研究方向为光电子器件。

型腔、环形腔可以模拟CW、主动/被动调Q输出的通用模型。并通过FDM推导出了其求解算法,编写了模拟软件。

1 模型

1.1 理论模型

线型腔、环形腔结构的光纤激光器如图1所示。

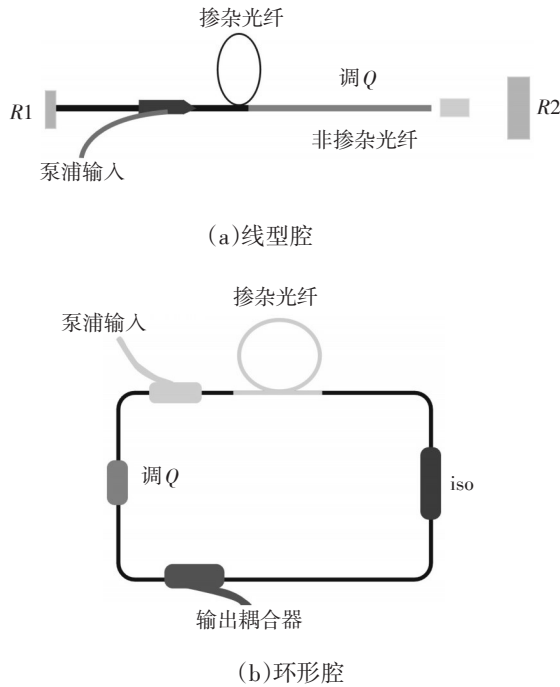


图1 激光结构

根据激光理论,常见的激光器均可以按能级系统描述,即泵浦光激发基态离子到上能级后快速弛豫到激光能级。速率方程如下

$$N_t = N_1 + N_2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{N_2}{\tau} = \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA} [\sigma_a(\lambda_p) N_1 - \sigma_e(\lambda_p) N_2] (P_p^+ + P_p^-) + \frac{\Gamma_s \lambda_s}{hcA} [\sigma_s(\lambda_s) N_1 - \sigma_e(\lambda_s) N_2] (P_s^+ + P_s^-) \quad (2)$$

方程中, N_t 是粒子总数, N_1 、 N_2 分别是基态能级和上能级粒子数。 P_p^+ 和 P_s^+ 分别是泵浦光和信号光功率(+、-分别表示正、反传播方向)。 τ 是荧光寿命。 σ_e 、 σ_a 分别是发射吸收截面。 Γ_s 、 Γ_p 分别是泵浦和ASE光与掺杂光纤面积之间的几何重叠因子(overlap factor)。掺杂光纤内的泵浦光和信号光传输方程

为^[13]

$$\pm \frac{\partial P_p^\pm}{\partial z} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial P_p^\pm}{\partial t} = \quad (3)$$

$$\Gamma_p [\sigma_e(\lambda_p) N_2 - \sigma_a(\lambda_p) N_1] P_p^\pm - \alpha(\lambda_p) P_p^\pm$$

$$\pm \frac{\partial P_s^\pm}{\partial z} + \frac{1}{v_s} \frac{\partial P_s^\pm}{\partial t} = \Gamma_s [\sigma_e(\lambda_s) N_2 - \sigma_a(\lambda_s) N_1] P_s^\pm -$$

$$\alpha(\lambda_s) P_s^\pm + 2\sigma_e(\lambda_s) N_2 \frac{hc^2}{\lambda_s^3} \Delta\lambda_s$$

(4)

其中, $\alpha(\lambda_p)$ 和 $\alpha(\lambda_s)$ 是泵浦光和信号光的损耗。式(5)则是非掺杂光纤内的传输方程,一般而言,泵浦会被掺杂光纤吸收掉,因而仅考虑信号光。

$$\pm \frac{\partial P_{\text{sudf}}^\pm}{\partial z} + \frac{1}{v_s} \frac{\partial P_{\text{sudf}}^\pm}{\partial t} = -\alpha P_{\text{sudf}}^\pm \quad (5)$$

式(5)中, P_{sudf}^\pm 是指在非掺杂光纤中传播的光功率, α 是非掺杂光纤的损耗。对于线型腔,由于腔镜 R_1 、 R_2 的存在,信号光在腔内来回振荡,因而式(4)正反方向均要考虑。对于环形腔,由于隔离器(ISO),则只考虑单向传播的信号光。光在两类激光器谐振腔内传播的物理过程则由边界条件具体描述。

1.2 边界条件

1.2.1 线型腔边界条件

设泵浦方向为正方向,即光由 R_1 传播到 R_2 (见图1a) 为正方向。 0 代表掺杂光纤和非掺杂光纤的起始端(左端面), L 代表末端(右端面)。则有左边界条件

$$P_s^+(0) = P_s^-(0) \cdot R_1 \quad (6)$$

R_1 是左端腔镜反射率,所以线型腔的输出可以表示为 $P_{\text{out}} = P_s^-(L) \cdot (1 - R_1)$ 。掺杂光纤与非掺杂光纤边界

$$P_{\text{sudf}}^+(0) = P_s^+(L) \cdot (1 - \gamma) \quad (7)$$

$$P_s^-(L) = P_{\text{sudf}}^-(0) \cdot (1 - \gamma) \quad (8)$$

γ 是连接损耗。非掺杂光纤右端边界

$$P_{\text{sudf}}^-(L) = P_{\text{sudf}}^+(L) \cdot R_Q^2 \cdot R_2 \quad (9)$$

R_Q 是调Q器的透射率,因为光经过调Q器后被腔镜反射后又通过调Q器耦合进光纤,故而平方,具体在下小节详述。 R_2 是右腔镜的反射率。

1.2.2 环形腔边界条件

因为环形腔中一般存在光隔离器,所以仅考虑单项传输的光信号,设顺时针为正方向。则掺杂光纤末端与非掺杂光纤起始端之间的边界条件可以用式(7)描述。掺杂光纤的起始端由下式表示

$$P_s^+(0) = (1 - \gamma)P_{\text{sudf}}^+(L) \cdot R_Q \quad (10)$$

默认激光输出耦合器连接在掺杂光纤和非掺杂光纤之间, 则激光耦合输出端则有

$$P_{\text{sudf}}^+(0) = (1 - \gamma)P_s^+(L) \cdot (1 - R_{\text{out}}) \quad (11)$$

R_{out} 为环形腔的耦合输出比。所以环形腔的输出功率可以表示为 $P_{\text{out}}(L) = P_s^+(L) \cdot R_{\text{out}}$ 。

1.2.3 调 Q 边界条件

对于 CW 输出的激光, 由于腔内不存在调 Q 器, 因而上文中的 R_Q 的值为 1。

对于主动调 Q , 调 Q 器的透射率通过 Q 开关(电光调 Q 、声光调 Q 、机械转动调 Q)人为地控制, 当调 Q 器工作在高 Q 值时, 其透射率为 $R_{\text{high}Q}$, 反之为 $R_{\text{low}Q}$ 。当调 Q 器件的矩形性比较好时 R_Q 可以简单表示为

$$R_Q(t) = \begin{cases} R_{\text{high}Q}(t) & (t = \text{high } Q \text{ time}) \\ R_{\text{low}Q}(t) & (t = \text{low } Q \text{ time}) \end{cases} \quad (12)$$

被动调 Q 的 Q 开关是由染料或掺杂晶体作为可饱和吸收体(saturable absorber, SA)的光学元件, SA 的饱和吸收特性是由于光谱的跃迁饱和。将 SA 放入激光谐振腔内当泵浦抽运达到一定程度, 光子数不断增加, SA 被漂白, 腔内损耗急速下降, 形成高能脉冲。被动调 Q 器的透射率可以通过可饱和吸收体的耦合速率方程求解。可饱和吸收体的二能级速率方程如下

$$\frac{dN_{\text{sa}2}(t)}{dt} = \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA} \frac{[P_s^+ + P_s^-]}{2} N_{\text{sa}1}(t) + \frac{N_{\text{sa}1}(t)}{\tau_{\text{sa}}} \quad (13)$$

$$N_{\text{sa}} = N_{\text{sa}1}(t) + N_{\text{sa}2}(t)$$

N_{sa} 、 $N_{\text{sa}1}$ 、 $N_{\text{sa}2}$ 分别表示可饱和吸收体内离子的掺杂浓度, 基态离子浓度和上能级离子浓度。 τ_{sa} 是可饱和吸收体恢复时间。则可饱和吸收体的单程损耗为

$$\text{Loss} = l_{\text{sa}} [\sigma_{\text{sa}1} N_{\text{sa}1}(t) + \sigma_{\text{sa}2} N_{\text{sa}2}(t) + \alpha_{\text{nsa}}] \quad (14)$$

l_{sa} 是可饱和吸收体的厚度, $\sigma_{\text{sa}1}$ 和 $\sigma_{\text{sa}2}$ 分别是下、上能级的吸收系数, α_{nsa} 为 SA 的线性吸收系数, 至此可饱和吸收体的透射率 R_Q 可以通过式(13)、式(14)求得。

2 算法简述

2.1 差分格式

上文建立的光纤激光器通用模型是多个常微分和偏微分方程组成的耦合微分方程组, 解析求解的

难度过大, 因此采用数值求解的办法求解。上述方程中的常微分方程的数值求解方法已经比较成熟, 因而不予以讨论, 而式(3)、式(4)两式为偏微分方程, 根据偏微分方程有限差分方法的收敛条件建立差分方程如下

$$\frac{P_{p(k)}^n - P_{p(k-1)}^n}{\Delta z} + \frac{1}{v_p} \frac{P_{p(k)}^{n+1} - P_{p(k)}^n}{\Delta t} = \quad (15)$$

$$\Gamma_p [\sigma_e(\lambda_p) N_2^n - \sigma_a(\lambda_p) N_1^n] P_{p(k)}^n - \alpha(\lambda_p) P_{p(k)}^n$$

$$\frac{P_{s(k)}^{+(n)} - P_{s(k-1)}^{+(n)}}{\Delta z} + \frac{1}{v_s} \frac{P_{s(k)}^{+(n+1)} - P_{s(k)}^{+(n)}}{\Delta t} =$$

$$\Gamma_s [\sigma_e(\lambda_s) N_{2(s)}^{(n)} - \sigma_a(\lambda_s) N_{1(s)}^{(n)}] P_{s(k)}^{+(n)} - \quad (16)$$

$$\alpha(\lambda_s) P_{s(k)}^{+(n)} + 2\sigma_e(\lambda_s) N_{2(s)}^{(n)} \frac{hc^2}{\lambda_s^3} \Delta \lambda_s$$

$$- \frac{P_{s(k+1)}^{-(n)} - P_{s(k)}^{-(n)}}{\Delta z} + \frac{1}{v_s} \frac{P_{s(k)}^{-(n+1)} - P_{s(k)}^{-(n)}}{\Delta t} =$$

$$\Gamma_s [\sigma_e(\lambda_s) N_{2(s)}^{(n)} - \sigma_a(\lambda_s) N_{1(s)}^{(n)}] P_{s(k)}^{-(n)} - \quad (17)$$

$$\alpha(\lambda_s) P_{s(k)}^{-(n)} + 2\sigma_e(\lambda_s) N_{2(s)}^{(n)} \frac{hc^2}{\lambda_s^3} \Delta \lambda_s$$

其中, n, k 分别表示时间和光纤位置网格, 网格比 $r = \frac{v\Delta t}{\Delta z}$, 根据稳定条件 $|r| \leq 1$, 可令 $v\Delta t = \Delta z$ 使得 $|r| = 1$ 。非掺杂光纤的传输方程可按照式(16)、式(17)离散化, 具体差分方程不再展开。

2.2 算法流程

各个量的初始值按照以下规则设定:

在初始条件下认为掺杂光纤内的激活离子以及可饱和吸收体中的离子均处于基态, 即 $N_1 = N_i; N_2 = 0; N_{\text{sa}1} = N_{\text{sa}}; N_{\text{sa}2} = 0$ 。

初始条件下光纤中的信号光, 泵浦光均为 0; 只有掺杂光纤泵浦端面的泵浦光功率等于泵浦功率, 即 $P_s^\pm(z, 0) = 0, P_{\text{sudf}}^\pm(z, 0) = 0$ 而 $P_p^\pm(0, t) = \text{pump}$ 。

将上述初始条件结合代入方程(1)~(5)中, 设定迭代步数, 结合边界条件(6)~(11)进行迭代求解, 对于 CW 输出其边界条件是固定的, 而调 Q 边界条件可通过求解(12)~(14)获得。具体迭代步骤如下:

(1) 求解常微分方程(1)得到 t 时刻各个离散点上能级离子数密度, 代入方程(3)和方程(4)。

(2) 结合边值 $P_p^\pm(0, t) = \text{pump}$, 通过式(3)的差分方程求解 t 时刻泵浦光在掺杂光纤内的分布。

(3) 通过边界条件(线型腔用式(6), 环形腔用式(10))求出掺杂光纤起始端正向光功率 $P_s^+(0, t)$, 利

用式(4)的差分方程求解 t 时刻正向光功率在掺杂光纤内的分布。

(4)通过边界条件(线型腔用式(7),环形腔用式(11))得到非掺杂光纤起始端正向光功率 $P_{\text{sudf}}^+(0, t)$, 利用式(5)的差分方程求解 t 时刻正向光功率在非掺杂光纤内的分布。对于线型腔利用后续步骤求解反向传输的光功率,而对于有隔离器的环形腔不存在反向光功率,所以返回第(1)步,直到完成迭代步数。

(5)对于线型腔,利用边界条件式(9)得到非掺杂光纤末端反向光功率 $P_{\text{sudf}}^-(L, t)$, 通过利用式(5)的差分方程求解 t 时刻反向光功率在非掺杂光纤内的分布。

(6)利用式(8)得到掺杂光纤末端反向光功率 $P_s^-(L, t)$, 通过式(4)的差分方程求解 t 时刻反向光功

率在掺杂光纤内的分布,返回第(1)步,直到完成迭代步数。

3 结果与讨论

根据差分收敛条件以及精度要求,差分网格的大小要满足一定的要求,所以完成一个模拟要进行大量的迭代。C语言的执行效率高,因此算法的核心差分运算用多线程C/C++实现。mideva虽然运行速度慢,但是集成了很多有用的函数,因而结果的图形输出、处理用mideva实现,通过动态链接库将各部分结合起来形成了一款光纤激光器通用模拟软件,图2所示的是该软件的运行界面。本软件可以模拟出上文所讨论的各类型光纤激光器任意时刻的功率分布,以及任意一点光功率随时间的变化。

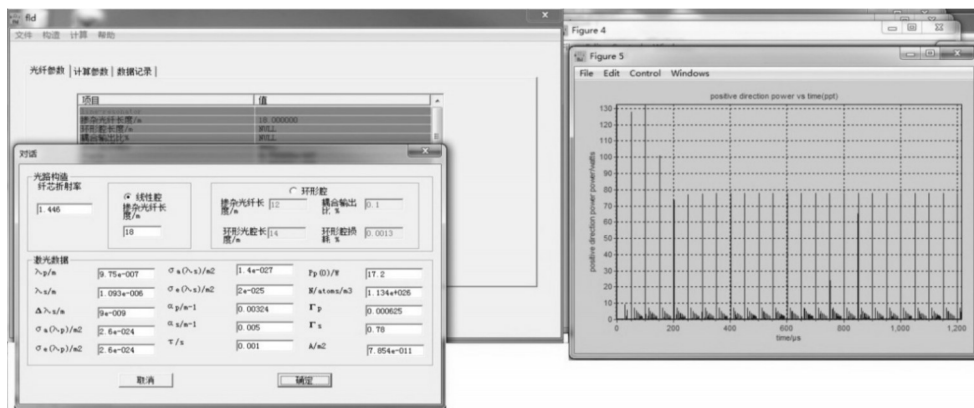
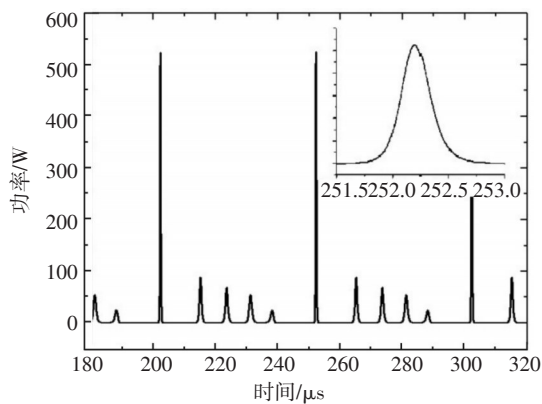


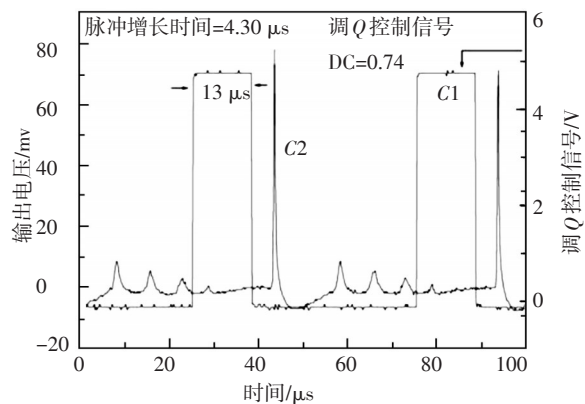
图2 软件运行界面

为验证本算法以及基于本算法编写的软件的精度,对文献[1]所报道的实验进行了验证模拟。模拟结果与实验对比如图3所示。通过对比可以发现模

拟的结果中,重复频率、卫星脉冲个数和脉冲间距均与文献报道的基本一致,说明本算法具有较高的精度。



(a) 模拟结果



(b) 文献实验结果^[9]

图3 软件模拟结果与文献结果对比

(下转第66页)

数据,然后向FPGA写入十进制数30,31,32,33,34,35,进而回读所写入的数据。FPGA在DSP读信号的下降沿(即反相信号的上升沿)先取出FIFO存储器中相应数据,送入输入/输出复用端口,然后在DSP写信号的下降沿(即反相信号的上升沿)将输入/输出复用端口的数据写入FIFO存储器中。为观察读写数据是否正确,可以通过DSP设置的寄存器的值看出,如图9b所示。ReceData为DSP接收FPGA初始数据的寄存器,ReceDataNew为回读DSP写入FPGA数据的寄存器,TestData显示的是DSP写入FPGA的数据,为十进制“30,31,32,33,34,35”。从图9b可以看出,DSP与FPGA的FIFO读写正常,表明FIFO读写设计正确。

3 结 论

设计并实现了红外热像仪硬件通讯电路,通过将FPGA与上位机的串行通讯、FPGA与DSP的双向FIFO数据传输均集成于FPGA中,从而避免了传统采用基于专用串行通讯芯片如TL16CP754等的设计方式,提高了系统集成度和稳定性。仿真和实验验证了设计的正确性,能够有效稳定地完成系统的通讯功能。该设计集成度高,稳定性好,可广泛应用于小型化、低成本红外热像仪的系统设计中。

(上接第26页)

4 结 论

基于速率方程理论和行波方程,充分考虑了影响激光输出的各种因素,建立起了线型腔、环形腔的CW、主动/被动调Q光纤激光器通用的行波模型。此模型相比传统模型充分考虑了各种损耗、信号光与泵浦在光纤中的分布、掺杂与非掺杂光纤长度的影响。结合有限差分理论推导出了光纤激光器行波模型的通用算法,并编写了基于本算法的计算机软件,通过与文献中实验结果的对比,证明了本模型与算法具有较高的精度。

参考文献

[1] Kelson I, Hardy A A. Strongly pumped fiber lasers[J]. IEEE J Quantum Electron, 1998, 34(9): 1570-1577.

参考文献

[1] 耿春萍,张建辉,张丽霞,等. 激光与红外隐身效果的测量评估方法研究[J]. 光电技术应用,2008,23(4):78-80.
 [2] 李清安,万中南,鄂盛国. 红外热像仪在水平空投系统的应用研究[J]. 红外与激光工程,2008,37(4):588-590.
 [3] 郭旭敏,李艳宁,段萌,等. 红外成像导引头信号调理卡的设计[J]. 传感器与微系统, 2012,31(7):80-83.
 [4] 郑智惠. 红外遥感用低温制冷器的进展[J]. 电光与控制, 2002,9(2):9-13.
 [5] 赵石彬,张存林,伍耐明,等. 红外热波无损检测技术用于聚丙烯管道缺陷的检测[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 456-460.
 [6] 安俊超,荆洪阳,徐连勇,等. 一种用红外热成像仪测定焊接热循环的新方法[J]. 天津大学学报, 2011, 44(2): 148-153.
 [7] 薛书文,雷雨,陈习权,等. 脉冲红外热成像无损检测的物理检测机理[J]. 电子科技大学学报, 2005,34(3):320-323.
 [8] 曹西征,郭立红. 基于VC++的红外相机串行通讯软件设计[J]. 微计算机信息, 2007, 23(2):289-290.
 [9] 邢素霞. 非制冷红外热成像系统研究[D]. 南京:南京理工大学,2005:63-68.
 [10] 赵正辉,李宇,刘恒辉. 非制冷红外热像仪信号处理系统的设计与研究[J]. 红外,2009,30(10):18-22.
 [11] 罗玉梅,简献忠,裴云天. MCT1024 红外热像仪的研制[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 708-709.

[2] K Ueda, A Liu. Future of high-power fiber lasers[J]. Laser Physics, 1998, 8(3): 774-781.
 [3] J Limpert, F Roser, T Schreiber, et al. High-power ultrafast fiber laser systems[J]. IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics, 2006, 12(2): 233-244.
 [4] E Snitzer, H Po, F Hakimi, et al. Double clad, offset core Nd fiber laser[C]. Optical Fiber Sensors, New Orleans, LA, January 27, 1988 Postdeadline Papers.
 [5] Y Jeong, J K Sahu, D N Payne, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. Optics Express, 2004, 12(25): 6088-6092.
 [6] M Laroche, H Gilles, S Girard, et al. Nanosecond pulse generation in a passively Q-switched Yb-doped fiber laser by Cr4+:YAG saturable absorber[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2006, 18(6): 764-766.
 [7] J A Alvarez Chavez, H L Offerhaus, J Nilsson, et al. High-energy, high-power ytterbium-doped Q-switched fi-

(下转第79页)

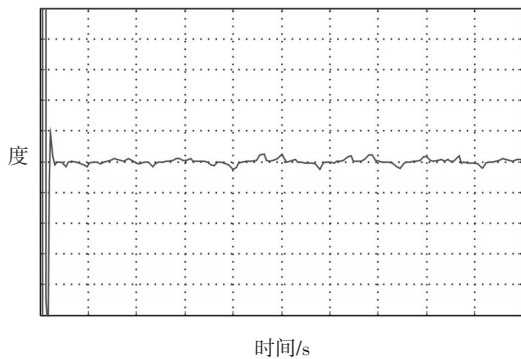


图10 正弦跟踪误差曲线

由仿真结果可以看出,基于PSD的快速反射镜系统采用不完全微分PID控制算法对其进行控制,校正后比校正前的相角裕度得到明显提高,保证了系统的稳定性,校正后的系统带宽和阶跃响应时间理想,实现了系统的高带宽和快速性,由位置跟踪曲线和误差曲线可知,系统跟踪良好,实现了系统的精确跟踪。

5 结束语

设计系统相比其他使用CCD作为位置反馈器件的快速反射镜系统,有着更高的性价比、稳定性和跟踪精度,但在实际应用中,仍有不足之处,例如:辅助光源的稳定性不够和PSD位置探测器受外界可见光

干扰,造成PSD读数有波动,影响位置闭环的跟踪精度;还有,快速反射镜的柔性支撑系统可重复性能差,不能每次回到相同的初始零位位置,需要反复更改初始零位;通过选取光功率稳定性更高的辅助光源,PSD位置探测器加装遮光罩,在快速反射镜的柔性支撑系统材料和加工工艺上采取措施,将使此系统的跟踪精度和稳定性得到进一步提高。

参考文献

- [1] 王强,陈科,傅承毓.基于闭环特性的音圈电机驱动快速反射镜控制[J].光电工程,2005,32(2):9-11.
- [2] 屈玉宝,丛龙洋.稳像振镜系统的设计[J].光电技术应用,2010,25(6):25-30.
- [3] 庞怀玉.机械制造工程学[M].北京:机械工业出版社.
- [4] 胡寿松.自动控制原理[M].北京:科学出版社,2007.
- [5] 郑彬,凌宁.高速倾斜镜的频率响应函数测量[J].光电工程,1999,26(5):59-63.
- [6] 范国滨.光束稳定与振动控制的光机电一体化系统研究[D].西安:西安电子科技大学,2004.
- [7] 张建民.机电一体化系统设计[M].北京:北京理工大学出版社.
- [8] 邓耀初,贾建援,陈贵敏,等.振动环境下的快速反射镜精确跟踪系统[J].激光与红外,2008,28(1):1-13.
- [9] 邓耀初.基于快速反射镜的光束指向稳定技术[D].西安:西安电子科技大学,2008.
- [10] 张志涌.MATLAB[M].北京:北京航空航天大学出版社.

(上接第66页)

- [8] D C Brown, H J Hoffman. Thermal, stress and thermal-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers [J]. IEEE J. Quantum Electron, 2001, 37(2): 207-217.
- [9] Brahma N Upadhyaya, Arun Kumar, Usha Chakravarty, et al. Analysis of output pulse characteristics in Q-switched Yb-Doped Fiber Laser[J]. IEEE J Quantum Electron, 2011, 47(6):786-793.
- [10] J J Degnan. Theory of the optimally coupled Q-switched laser[J]. IEEE J. Quantum Electron, 1989, 25(2): 214-220.
- [11] G Xiao, M Bass. A generalized model for passively Q-switched lasers including excited state absorption in the saturable absorber[J]. IEEE J. Quantum Electron, 1997, 33(1): 41-44.
- [12] T Y Tsai, M Birnbaum. Characteristics of Co²⁺:ZnS saturable absorber Q-switched neodymium lasers at 1.3 [J]. Appl. Phys., 2001, 89(4): 2006-2012.
- [13] Y Wang, C Q Xu. Switching-induced perturbation and influence on actively Q-switched fiber lasers[J]. IEEE J. Quantum Electron, 2004,40(11): 1583-1596.
- [14] Huo Yanming, Peter K Cheo, George G King. Modeling of actively Q-switched Er³⁺/Yb³⁺-codoped clad-pumped fiber lasers[J]. IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics, 2005, 41(15):573-580.