

基于微型压缩机的高精度紫外激光器温控研究

熊伟国¹, 朱元成^{1,2}

(1. 深圳市酷凌时代科技有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518000)

摘要:温度对全固态紫外激光器的输出特性起着至关重要的作用。为了使全固态紫外激光器输出稳定,需要对其进行精确的温度控制,本文主要介绍一种基于蒸气压缩式变频制冷系统和电热补偿的温度控制方法实现对紫外激光器的高精度温控,该方法采用PID作为基本控制算法,对微型直流变频压缩机转速和电热功率进行控制,从而实现恒温系统兼具体积小、重量轻、效率高、温控好等特点。实验结果表明:该方法响应速度快,仅需6 min就能使系统达到稳定;控制精度高,水温精度最高能达到0.01℃。随着紫外激光器在打标、精密切割等行业的大量应用,该方法兼具诸多优势,具有很高的实用价值和推广意义。

关键词:紫外激光器;微型压缩机;变频控制;电热补偿;PID控制

中图分类号:TN248 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.10.009

Research on high precision temperature control of ultraviolet laser based on micro compressor

XIONG Wei-guo¹, ZHU Yuan-cheng²

(1. Shenzhen Coolingstyle Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;

2. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Temperature plays an important role in the output characteristics of all solid-state ultraviolet lasers. In order to stabilize the output of all solid-state UV laser, it is necessary to control its temperature accurately. This paper mainly introduces a temperature control method based on vapor compression variable frequency refrigeration system and electrothermal compensation to realize high-precision temperature control of UV laser. The method uses PID as the basic control algorithm to control the speed of the micro DC variable frequency compressor and the electrothermal power, so as to realize the constant temperature system with the characteristics of small volume, light weight, high efficiency and good temperature control. Experimental results show that the method has a fast response speed, and it only takes 6 minutes to stabilize the system; the control accuracy is high, and the water temperature accuracy can reach 0.01℃. Based on the UV laser will be used more and more in marking, precision cutting and many other industries, this method should be more popularized because of its advancement and practicality.

Keywords: ultraviolet laser; micro compressor; frequency control; electrothermal compensation; PID control

作者简介:熊伟国(1986-),男,硕士,主要研究方向为微型压缩机及微小型制冷系统设计,高精度激光冷水机设计。
E-mail: xwg@coolingstyle.com

通讯作者:朱元成(1987-),男,博士,主要研究方向为微型压缩机及制冷系统的高精度控制研究,利用微型压缩机在高温工况下的人体微环境降温系统研究。E-mail: zyc@coolingstyle.com

收稿日期:2020-12-07; **修订日期:**2021-01-15

1 全固态紫外激光器及其发展

自1961年梅曼^[1]发明第一台红宝石激光器以来,经过半个多世纪的研究和探索,激光技术取得了迅猛发展并广泛应用于工业、农业、测量、通信、医学、军事以及科学研究等各个领域。根据输出波长的不同,激光器可分为红外激光器、可见光激光器、紫外激光器等^[2]。

其中,紫外激光器是指输出波长不大于400 nm的激光器,其波长短、能量集中、分辨率高,根据泵浦方式不同可分为以下几种:气体激光器、准分子激光器、半导体激光器、灯泵浦的固体激光器和LD泵浦的固体激光器等。其中,LD泵浦的固体激光器也叫全固态激光器。二十世纪主要使用的紫外激光器为气体激光器和准分子激光器,都存在体积大、效率低、可靠性有限、寿命短、成本高等问题^[3]。

全固态紫外激光器采用激光二极管(LD)作为泵浦,利用激光晶体产生1 μm 左右的红外光,然后经非线性光学晶体的倍频或和频效应得到紫外激光。国外关于全固态紫外激光器的应用始于20世纪90年代。1995年,日本Sony公司的Oka M^[4]等人通过KTP倍频和BBO四倍频得到了1.5 W的266 nm连续Nd:YAG紫外激光。随后,各国都进行了大量研究,先后制造出了功率为12 W^[5]至160 W^[6]全固态紫外激光器。国内关于全固态紫外激光器的研究起步较晚,水平相对落后。1999年,西安光机所的陈国夫^[7]等人利用BBO晶体获得了266 nm的紫外激光输出,这是国内首次报道的全固态紫外激光器。此后,我国的紫外激光技术也进入了高速发展时期。

全固态紫外激光器具有体积小、结构紧凑、效率高、寿命长、光束质量好以及成本低等优点,广泛应用于环境监测、医学、通讯以及微加工领域。在环境监测方面,可以利用紫外激光对大气对流层的底层水汽含量和O₃浓度进行监测^[8-9],也可以对空气中气溶胶的分布进行测定^[10];在医学领域,临床上可以利用紫外激光的高能量特性直接打断组织细胞之间的分子键,从而避免组织热损伤^[11];在通讯领域,紫外激光通讯具有低窃听率、高干扰性及非视距等优点^[12];在加工领域,由于紫外激光在加工过程中直接破坏化学键的冷加工特性,因此能够实现精密复杂结构的加工^[13]。近年来,随着深紫外及真空紫

外技术的兴起,全固态紫外激光器的应用越来越广泛^[14]。

2 全固态紫外激光器温度控制现状

全固态紫外激光器的整体效率较低,在LD抽运及倍频、和频过程中都会产生大量热量。产生的热量若不及时释放,就会使激光器温度升高。温度对固态紫外激光器的性能影响很大,主要影响LD泵浦和非线性晶体。温度变化会引起LD输出功率不稳定,当温度升高时,LD输出功率随之增大^[15]。温度不稳甚至会引发LD模式跳跃现象。同时,温度变化还会使激光晶体的折射率、形状和体积发生变化,从而引起LD输出波长的变化,其波长随温度的漂移为(0.3~0.4) nm/°C。紫外激光的波长本来就较短,少量的漂移都会引起出光性能的大幅改变。非线性光学晶体在谐波过程中也会吸收基波能量,会引起晶体通光方向上的局域升温^[16]。温度上升会使非线性光学晶体的折射率发生变化,输出光束质量和倍频效率都会降低。

全固态紫外激光器的产热大,且其性能对温度很敏感,因此,如果及时散出激光器产生的热量并维持其温度的稳定性就成了激光行业中必须要解决的问题。传统的风扇散热效率低且可控性差,不适合作为全固态紫外激光器的散热方式。目前常用的方法主要有TEC制冷片散热和水冷散热。采用PID控制的TEC散热方式已经可以做到温控精度 ± 0.01 °C^[17],但是TEC普遍效率很低且稳定性差,很难大规模应用。传统水冷散热一般都要借助于用蒸气压缩式制冷系统制成的冷水机,温度精度控制通过热气旁通的方法来实现。在热气旁通阀切换的过程中,压缩机系统的制冷或制热都会有一定的过冲,因此冷水机很难做到很高的精度。要做到高精度,就必须采用很大的水箱,利用水的热容来吸收热量或冷量的过冲,这种冷水机体积大、成本高。

本文采用变频蒸气压缩式制冷系统和电热耦合的方式,利用水冷系统,对全固态紫外激光器的温度控制方法进行了研究。

3 温度控制原理

全固态紫外激光器的温度控制系统原理框图如图1所示。

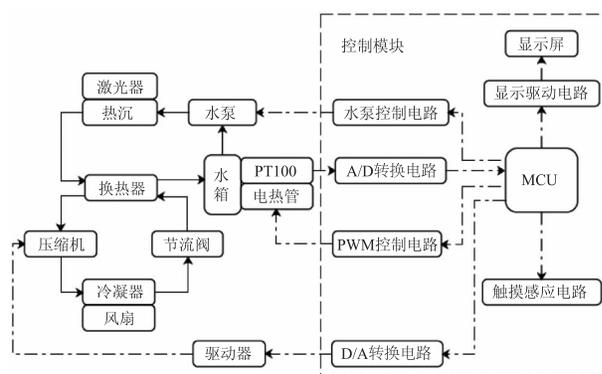


图1 控制系统原理框图

Fig.1 Schematic diagram of control system

激光器放置在热沉上,其产生的热量通过接触传导至热沉。热沉内部有水通道,与水泵、水箱、换热器构成水循环。换热器中有2组通道,一组为水通道,一组为冷媒通道,冷媒通道与压缩机、冷凝器、节流阀组成制冷系统。水将热沉吸收的激光器的热量传送到换热器,冷媒和水在换热器中进行间壁式热交换,并最终将热量传送到冷凝器,冷凝器在风扇的作用下将热量释放到环境中去。通过这种方式,就实现了激光器的散热。图中的压缩机为直流变频压缩机,需要借助驱动器将直流电转换成三相交流电之后才能工作。

对于固定的系统来说,只需要保持水温的稳定,就能确保激光器温度的稳定。水的冷却通过上述的制冷系统来实现,水的加热可以通过布置在水箱内部的电热管来实现。温度传感器将感应到的水温信号经A/D转换之后反馈给单片机(MCU),单片机根据当前实际水温和所需目标温度的关系,通过输出电路来控制压缩机和电热管的工作,以实现水温的稳定。在控制模块中,还设置有显示屏和触摸感应电路,可实现人机对话。使用者可以通过控制模块实时观察到水温以及温度控制系统的工作情况,也能根据需要设定目标温度。

4 硬件选型与功能实现

4.1 制冷系统

蒸气压缩式制冷是目前效率最高的制冷方式。常规的交流压缩机只能通过启停或热气旁通的方式来控制系统的制冷量或加热量,可控性差且精度不高。本文采用直流变频压缩机,体积小、重量轻、效率高,最重要的是能在很大范围内实现无极变速,转速越高,制冷量越大,因此系统的制冷量十分可控。选定的压缩机型号为CS-MCQ-19241100(图2),该

压缩机重量约850 g,直径56 mm,其制冷量和转速的关系如图3所示。



图2 压缩机 CS-MCQ-19241100

Fig.2 Compressor CS-MCQ-19241100

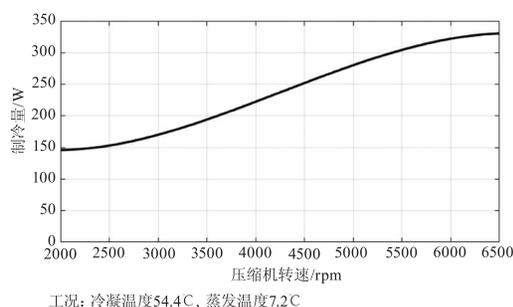


图3 压缩机制冷量曲线

Fig.3 Refrigerating capacity of compressor CS-MCQ-19241100

从图3可以看出,压缩机制冷量随着转速的升高而增大。控制模块通过内部程序计算出压缩机当前所需转速,通过D/A转换电路将数字转速信号转换成模拟信号,再将该模拟信号传输给压缩机驱动器。驱动器根据转速信号调节其输出的交流电频率,这样就实现了对压缩机转速的控制。

冷凝器、换热器等都选用常用的高效率类型,节流阀可选用毛细管,这样就制成了完整的制冷系统。

4.2 加热装置

由于压缩机属于机械装置,控制程序对其的转速指令都需要一定的响应时间才能体现到制冷量上。对于水箱较小的水冷系统,在热容不大的情况下,对压缩机转速的调节虽然可以将水温控制在很小的范围之内,但还是有可能存在波动,需要通过加热装置对水温进行精调。另外,激光器的工作并不是一直稳定的,甚至有时候不工作,这时温度控制系统是处于空载待机状态,即使将压缩机转速调到最低,水温还是会一直下降至目标温度以下,关闭压缩机将会引起水温更大的波动。

水箱中内置的电热管能完美解决上述问题。在中空的不锈钢管内部布置螺旋状的电阻丝,空隙中

填充高温氧化镁。电阻丝通电后发热,热量通过氧化镁陶瓷均匀地传导至电热管表面。将电热管浸没在水中,这样就实现了对水的加热。通过对电热管的输入电压进行 PWM 调节,可以对其发热功率实现精准控制。

4.3 温度信号的采集

全固态紫外激光器的最佳工作温度一般在(20~30)℃之间,实际测量水温在(0~40)℃范围内。该温度区间属于常温范围,大部分的温度传感器都能满足要求。高温控精度需要温度传感器在此区间内有高精度、较大的温度系数和较好的线性度。本文选用三线制的不锈钢封装的 Pt100 温度传感器,其内部由很细的铂丝绕在云母支架上制成。Pt100 的电阻随温度而变化,在 0℃ 时阻值为 100 Ω,在常温区间内具有很好的线性度。在 Pt100 两端加上一个恒流源,温度采样电路在其两端测出电压差,从而就能得到其电阻,然后再根据 Pt100 自身的电阻特性线性插值得到其探测到的温度。三线制的使用可以排除线上电阻的影响,从而更精确地得到实际温度。将 Pt100 浸入水箱中,就能实时检测水温,检测到的电压信号经 A/D 转换后传输给 MCU 进行分析和处理。

4.4 PID 控制系统

系统通过调节压缩机转速和电热管开关的 PWM 参数,控制制冷量和加热量,最终使水温达到稳定。由于激光器的工作并不是稳定的,且环境因素的不确定性对制冷系统的影响很大,系统的结构和参数必须依靠经验和现场调试来确定,因此无法用一个精确的数学模型来控制系统的工作。PID 算法简单、鲁棒性好、可靠性高,是最适合本系统的控制策略之一,它根据系统的误差,计算出比例、积分、微分控制量来调节系统的工作。PID 的工作流程如图 4 所示,在每个时间步长内,系统先对水温误差进行计算,再对误差进行 PID 计算,然后得出压缩机转速和电热管功率的调节量。如此反复进行,直至温度误差控制在精度要求范围内,此时水温达到稳定。 P 、 I 、 D 参数对系统性能的影响很大,工程上一般依靠经验并结合试验的方法对其进行整定。本文采用临界比例度法进行 PID 参数整定。

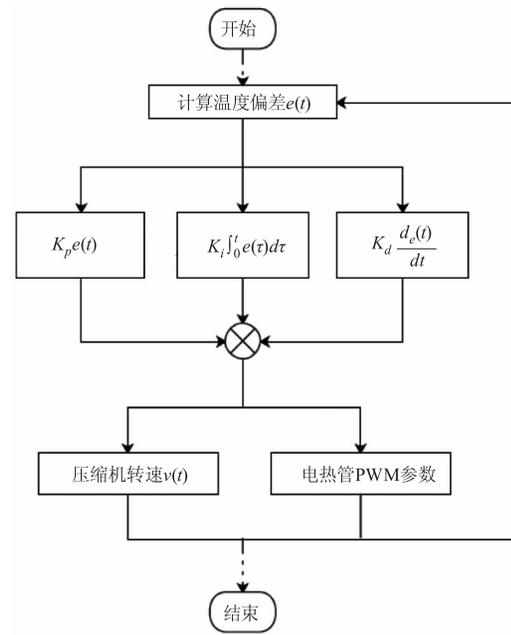


图 4 PID 流程

Fig. 4 Flow chart of PID

5 系统控制流程

系统控制流程如图 5 所示。当系统刚开机时,若水温高于目标温度 1℃ 以上,则开启制冷系统,使压缩机全速运行,将水温快速降低;若水温低于目标温度 1℃ 以上,则满功率开启电热管,使水温快速升高。当水温进入目标温度 ± 1 ℃ 范围后,采用 PID 算法对压缩机转速和电热管功率进行实时调控,最终使水温稳定。

PID 算法控制精度高,但需要较长的稳定时间。本文所采用的控制策略,先将水温快速控制在目标温度附近,再用 PID 算法进行精调,大大缩短了稳定时间。

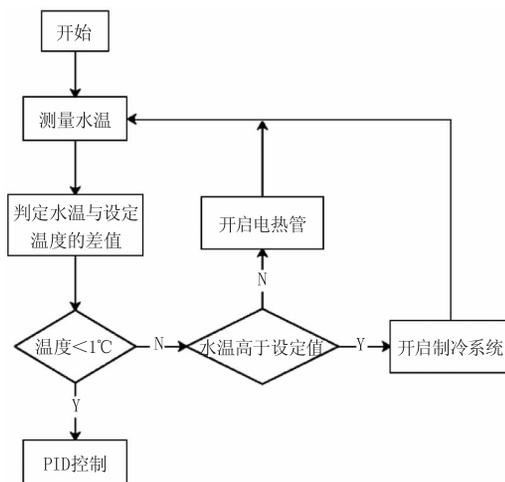


图 5 系统控制流程

Fig. 5 Flow chart of system control

6 实验结果与分析

对某型号 10 W 紫外激光器进行了温控试验。采用了前文所述的制冷系统、电热器件等功能单元及控制算法,系统循环水量仅 1 L。设定目标温度为 25 °C,激光器和温控系统同时开启,图 6 记录了系统从开机到稳定的水温变化全过程。

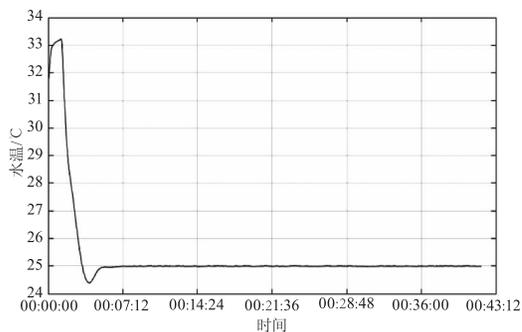


图 6 温度控制系统响应图

Fig. 6 Response graph of temperature control system

从图中可以看出,系统稳定时间较短,仅 6 min。稳定后,水温维持在 $(25 \pm 0.01)^\circ\text{C}$,这说明此温控系统的精度可以达到了 0.01°C 。水温稳定后,激光器工作温度也是稳定的。

7 结 语

温度对全固态紫外激光器的输出特性起着至关重要的作用,本文针对该激光器设计了一种基于微型直流压缩机制冷系统和电热补偿相耦合的温度控制方法。通过对微型直流变频压缩机的转速和辅助电热设备的功率进行控制,实现对激光器冷却系统水温的精确调控。用该方法采用微型变频压缩机制冷技术,制成的温控系统体积小、重量轻、效率高,实验结果表明,系统响应速度快,稳定时间短,且温控精度很高,能达到 0.01°C 。

与常规冷水机相比,该系统具有体积小、重量轻、制冷精度高的突出优势,同时因系统内部使用的压缩机为直流压缩机,非常适合冷却系统匹配不同国家的电源制式,其通用性更强。与 TEC 电子制冷相比,压缩机系统制冷能力更大,能效比更高,在长期持续使用中能大大降低用户的能耗,降低使用成本。同时机器内部自带加热控制,可在冬季初始使用时快速预热。目前该系统设计成本随着微型压缩机成本的降低也已经可以和 TEC 制冷或同制冷量级别的压缩机想抗衡。随着紫外激光器在打标、精密切割等行业的大量应用,该方法兼具体积小、重量轻、精度好、

能效高、成本低等诸多优势,具有很高的实用价值和推广意义。

参考文献:

- [1] Maiman T H. Stimulated optical radiation in ruby[J]. Nature, 1960, 187.
- [2] Fu Zhehong. Application and development of laser[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2017, (5): 117 - 119. (in Chinese)
傅哲泓. 激光的应用与发展[J]. 电子技术与软件工程, 2017, (5): 117 - 119.
- [3] Shen Zhaoguo. Research on LD-pumped 532 nm green and 355 nm ultraviolet lasers[D]. Xi'an: Northwest University, 2009. (in Chinese)
沈兆国. LD 泵浦 532 nm 绿光及 355 nm 紫外激光器研究[D]. 西安: 西北大学, 2009.
- [4] Oka M, Liu L Y. All solid-state continuous-wave frequency-quadrupled Nd : YAG laser[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1995, 1 (3) : pp. 859 - 866.
- [5] N Hodgson, D Dudley, L Gruber, et al. Diode end-pumped, TEM₀₀ Nd:YVO₄ with output power greater than 12 W at 355 nm[C]//Conference on Lasers & Electro-optics. IEEE, 2001.
- [6] David R Dudley, Oliver Mehl, Gary Y Wang, et al. Q-switched diode-pumped Nd : YAG rod laser with output power of 420W at 532 nm and 160 W at 355 nm[J]. Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering, 2009, 7193 (1) : 28.
- [7] Chen Guofu, Wang Xianhua, Du Geguo. Research on all solid-state ultraviolet lasers [J]. Acta Photonica Sinica, 1999, (9) : 785 - 788. (in Chinese)
陈国夫, 王贤华, 杜戈果. 全固态紫外激光器研究[J]. 光子学报, 1999, (9) : 785 - 788.
- [8] Wang Shaolin, Cao Kaifa, Tao Zongming, et al. Research on spectroscopic system of water vapor ultraviolet raman lidar [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2010, 21 (8) : 1171 - 1175. (in Chinese)
汪少林, 曹开法, 陶宗明, 等. 水汽紫外拉曼激光雷达分光系统研究[J]. 光电子·激光, 2010, 21 (8) : 1171 - 1175.
- [9] Tan Xuechun. Laser radar simulation device and experimental research[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
谭雪春. 激光雷达模拟样机系统与实验研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.

- [10] McGill Matthew, Hlavka Dennis, Hart William, et al. Cloud physics lidar: instrument description and initial measurement results[J]. 2002, 41(18): 3725-34.
- [11] Wang Yang, Wang Xubao, Dong Zhanling, et al. Expression of β -catenin and peroxisome proliferator-activated receptor γ protein in liver tissues irradiated by ultraviolet laser[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2011, 15(33): 6191-6195. (in Chinese)
王杨, 王旭葆, 董战玲, 等. 紫外激光辐射区肝组织 β 连环蛋白及过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 蛋白的表达[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(33): 6191-6195.
- [12] Li Jiye, Qiu Keni. The application of ultraviolet communication in military communication system[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2005, 3(4): 19-21. (in Chinese)
李霁野, 邱柯妮. 紫外光通信在军事通信系统中的应用[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(4): 19-21.
- [13] Nie Shilin, Guan Yingchun. Ultraviolet laser and its application in micromachining[J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(12): 1169-1179, 1251. (in Chinese)
聂世琳, 管迎春. 紫外激光器及其在微加工中的应用[J]. 光电工程, 2017, 44(12): 1169-1179, 1251.
- [14] Wang Di. Generation and applications of DUV and DUV femtosecond laser[D]. Shanghai: East China Normal University, 2016. (in Chinese)
王迪. 深紫外与真空紫外飞秒激光的产生及应用探索[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [15] T G Kim, M Ogura. High characteristic temperature ($T = 322$ K near room temperature) of V-grooved AlGaAs-GaAs quantum wire diode lasers[J]. Solid State Electronics, 2000, 44(1): .
- [16] Li Long, Ling Yawen, Shi Peng, et al. Research on temperature field of nonlinear crystal KTP in water-cooled laser system[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(1): 51-54. (in Chinese)
李隆, 凌亚文, 史彭, 等. 水冷式激光系统中非线性晶体 KTP 的温场研究[J]. 激光与红外, 2005, 35(1): 51-54.
- [17] Zeng Hualin, Jiang Pengfei, Xie Fuzeng. Research on temperature control of semiconductor laser[J]. Laser & Infrared, 2004, 34(5): 339-340, 346. (in Chinese)
曾华林, 江鹏飞, 谢福增. 半导体激光器温度控制研究[J]. 激光与红外, 2004, 34(5): 339-340, 346.