

激光与光电子学进展

反射式红外激光触发装置失稳现象分析与研究

郑传钰¹, 罗红娥^{1*}, 顾金良¹, 贺臻¹, 张涛²¹南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094;²内蒙古北方重工业集团有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014033

摘要 针对红外触发装置在经过长时间工作之后出现失稳现象,在分析红外触发装置工作原理的基础上,通过实验监测和分析手段得出如下结论:红外触发装置经长时间工作后,因温度累积导致温度上升,引起红外激光触发装置的光源——红外激光器阈值电流 $I_{th}(T)$ 上升,而温度升高同时引起激光光源驱动恒流源输出电流 $I_{out}(T)$ 降低,当 $I_{out}(T) < I_{th}(T)$ 时,红外激光器无法正常发出激光,输出功率不稳定,导致红外触发器失稳。在此研究基础上,通过提高恒流源的输出电流至最大阈值电流的 1.44 倍,即 640 mA 后,可保证在系统温度变化范围内, $I_{out}(T) > I_{th}(T)$, 红外激光器始终处于稳定发光状态,从而使红外触发装置也处于稳定工作状态。经过长时间的上电运行验证实验,红外触发器工作稳定,未发生误触发信号,较好解决了其失稳问题。此研究对提高红外触发装置的稳定性有重要的工程应用价值。

关键词 激光器与激光光学; 红外激光器; 恒流源; 触发装置; 阈值电流

中图分类号 TN06

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220610

Research and Analysis of Instability of Reflective Infrared Laser Trigger Device

Zheng Chuanyu¹, Luo Hong'e^{1*}, Gu Jinlang¹, He Zhen¹, Zhang Tao²¹State Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;²Technology Center, Inner Mongolia North Heavy Industry Group Co., Ltd., Baotou 014033, Inner Mongolia, China

Abstract In this study, the instability phenomenon of an infrared trigger device that has operated for a long period of time is examined on the basis of working principle of the device and by means of experimental monitoring and analysis. The threshold current, $I_{th}(T)$, of the infrared laser, which is the source of the infrared laser triggering device, increases after the infrared trigger device works for a long time owing to heat accumulation. In contrast, the output current, $I_{out}(T)$, of the constant current source decreases with the increase in temperature. When $I_{out}(T) < I_{th}(T)$, the infrared laser cannot emit the laser normally, and the output power becomes unstable; this leads to the instability of the infrared trigger. Upon increasing the output current of the constant current source to 1.44 times the maximum threshold current, that is, beyond 640 mA to make $I_{out}(T) > I_{th}(T)$, the infrared laser can be guaranteed to be in a stable luminous state within the range of temperature change, and the infrared trigger device is therefore in a stable working state. After a long period of power-on operation experiment, the infrared trigger worked stably and did not trigger the signal by mistake, indicating that its instability problem is effectively addressed. The findings of this study have important engineering application value in improving the stability of infrared trigger devices.

Key words laser and laser optics; infrared lasers; constant current source; trigger device; threshold current

1 引言

近弹道靶道在各类发射技术、常规弹丸的设计研究中发挥了十分重要的作用,成为必不可少的试验手段;在弹道理论研究中,如空气动力学、炮口激波流场

(中间弹道)、弹托分离气动力特性以及动态模拟理论等领域,更是不可缺少的试验研究工具^[1]。弹道靶道在兵器研制和弹道理论研究中,是与风洞、靶场具有同等重要性的必不可少的试验设施。阴影照相站系统^[2]是弹道靶道中最为关键的测试设备,能实现对飞行弹

收稿日期: 2022-01-24; 修回日期: 2022-02-28; 录用日期: 2022-03-03; 网络首发日期: 2022-03-13

通信作者: *19566867@qq.com

丸速度、姿态、质心坐标、流场信息等各种运动参数进行高精度测试,为武器的设计、优化选型提供重要的测试依据^[3]。

但在阴影照相系统使用中发现,红外激光触发器在长时间工作后会出现失稳现象,即不断产生误触发信号,导致系统无法在弹丸来临时根据时序开启工作,相应的照相站得不到正确的弹丸在本站的图像,影响整个照相站系统的测量。因此提高反射式红外激光触发器的稳定性变得尤为重要。

对于红外激光触发器,其光源红外激光器输出功率不稳定是触发装置出现失稳现象的主要原因。在半导体激光器稳定性的研究方面,田亚玲等^[4]用场效应管与运算放大器组成恒流源为激光器提供输入电流,并用半导体制冷器控制系统温度实现激光器稳定输出;李卓等^[5]通过外接反馈法,使得半导体激光器输出的光功率达到稳定;李宗平等^[6]设计了一种基于单片机的高精度可调数控恒流源,提高了控制精度;续文敏等^[7]利用深度反馈电路与模糊自适应比例、积分、微分(PID)算法与H桥电路驱动电路设计了高稳定度控制系统,提高了混沌半导体激光器输出波长和功率的稳定性;张安迪等^[8]将论域可变的模糊PID控制应用到半导体激光器温度控制系统中,提高了半导体激光器输出的精准性与稳定性。目前大部分对于半导体激光器稳定性的研究主要是针对提高恒流源的稳定性以及对激光器的温度稳定的控制,对激光半导体的阈值电流变化的研究较少。

本文在分析了反射式红外激光触发装置的结构与工作原理的基础上,通过实验研究了红外激光器恒流源的稳定性、红外激光器的阈值电流以及温度特性等方面对触发装置稳定性的影响,采取提高恒流源输出电流的方法提高了红外触发装置的稳定性。

2 红外激光触发装置的结构与工作原理

触发装置主要由恒流源、红外激光器(光源)、光电二极管(接收器件)、柱面镜、原向反射屏和后续的光电转换电路、放大电路、信号处理电路组成^[9]。其原理图如图1所示。

触发装置的光源和接收器件在同一侧,光源由恒流源提供稳定输出电流供电,发出的激光首先经过光阑,光阑的作用是限制光源在垂直方向上的发散角,但通过光阑的光仍旧存在一定的垂直方向上的发散角,利用柱面镜,将点光源转换成扇形光幕。激光入射到原向反射屏,原向反射屏再将光线原向反射回去,通过柱面镜,由光电二极管接收,光电二极管产生与光线光通量相对应的光电压,光电压经由后续放大电路、比较电路等处理后作出判断。

当没有弹丸穿过光幕时,光电二极管仍然在接收原向反射屏反射回来的光,会产生一个静态电流,经转换后为一个静态电压,此时系统不会产生触发信号;当

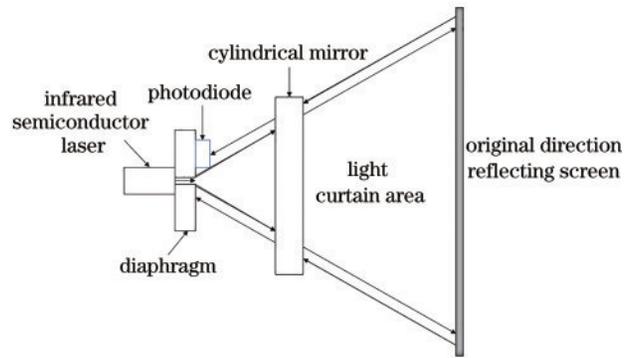


图1 红外触发装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of infrared trigger device

弹丸穿过光幕时,由于部分光线被弹丸遮挡,使得光电二极管接收到的光通量发生变化,导致输出光电压发生突变,经后续处理电路处理判断,系统产生一个脉冲触发信号以驱动后续设备工作。而在实际应用过程中,系统长时间工作后,少数触发装置会突然失去稳定状态,连续不断产生触发信号,导致系统无法正常工作。

3 误触发信号产生的原因分析

对于红外激光触发装置,经实验发现,其稳定性主要受恒流源的输出电流稳定性和红外激光器温度稳定性的影响^[10]。

3.1 红外半导体激光器驱动恒流源电流稳定性影响

注入电流的变化会引起红外激光器输出波长的变化,导致红外半导体激光器的工作状态发生改变^[11]。红外半导体激光器的 $P-I$ 特性(即光输出特性)是指它的输出功率 P 随注入电流 I 的变化关系,是激光器最重要的特性之一,如图2所示。

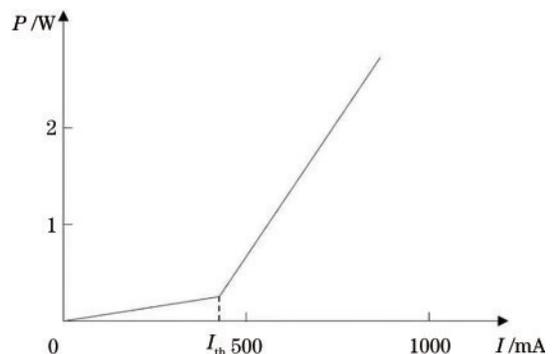


图2 红外半导体激光器的 $P-I$ 特性曲线

Fig. 2 $P-I$ characteristic curve of infrared semiconductor laser

图2中 I_{th} 为红外激光器的阈值电流,当恒流源提供的注入电流小于阈值电流时,红外半导体激光器以自发辐射为主,输出功率非常小,发出的是荧光;当注入电流大于阈值电流时,红外半导体激光器以受激辐射为主,输出功率迅速变大,发出的是激光,此时输出功率与注入电流呈线性相关^[12]。

因此,若恒流源的输出电流发生波动,会使得红外激光器的输出功率发生较大变化,导致红外触发装置输出不稳定,从而产生误触发信号导致系统无法正常工作。

3.2 温度对红外半导体激光器的阈值电流的影响

红外半导体激光器的电子-光子转换效率虽然很高,但在工作时不可避免地会将一部分电能转换为热能,引起温度升高^[13]。温度升高会导致红外半导体激光器阈值电流增大、中心波长漂移^[14]。随着温度的升高,红外半导体激光器的阈值电流也随之升高。一般来说,温度与激光器的阈值电流成正相关^[15],通过先验知识可知,阈值电流和工作温度之间存在关系^[16]为

$$I_{th}(T) = I_{th}(T_r) \cdot \exp\left(\frac{T - T_r}{T_0}\right), \quad (1)$$

式中: T_r 为室温; $I_{th}(T)$ 为 T 温度下测得的阈值电流大小; $I_{th}(T_r)$ 为室温 T_r 下的阈值电流大小; T_0 为拟合参数。由式(1)可知,阈值电流与温度之间呈指数关系,温度的稳定性直接影响激光器的阈值稳定性。由式(1)可得

$$\frac{I_{th}(T)}{I_{th}(T_r)} = \exp\left(\frac{T - T_r}{T_0}\right), \quad (2)$$

两边取对数,可得

$$\ln \frac{I_{th}(T)}{I_{th}(T_r)} = \frac{T - T_r}{T_0}, \quad (3)$$

推导可得

$$T_0 = \frac{T - T_r}{\ln \frac{I_{th}(T)}{I_{th}(T_r)}}. \quad (4)$$

根据测得数据代入式(4)计算的拟合参数 T_0 为 42°C 。

本系统使用的红外半导体激光器是绿高电子的AL830T1000型号的红外激光器,其主要数据如表1所示。

表1 红外半导体激光器参数
Table 1 Infrared semiconductor laser parameters

Continuous wave output power /mW	1000	Threshold current /A	≤ 0.45
Peak wavelength /nm	830 ± 10	Operating current /A	≤ 1.2
Spectral width /nm	≤ 5	Operating voltage /V	≤ 2.2

由表1可知,红外半导体激光器的阈值电流小于等于 450 mA ,不同的激光器阈值电流存在一定的差异。以选用红外激光器阈值电流 $I_{th}(T_{25}) = 350\text{ mA}$ 为例。

环境温度在 $0^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$ 时的阈值电流见表2。

由表2可知,当工作电流一定时,随着红外激光触发装置的工作带来的热量累积,会导致红外半导体激光器温度升高,进而引起其阈值电流增大,甚至超过恒流源提供的驱动工作电流,此时红外半导体激光器输出的是荧光,输出功率急剧减小,从而产生误触发信

表2 不同温度情况下阈值电流情况

Table 2 Threshold current at different temperatures

Ambient temperature / $^\circ\text{C}$	Threshold current of laser /mA
0	193
5	217
10	244
15	276
20	310
25	350
30	393
35	443
40	500
45	563

号,导致系统失稳。

4 红外激光触发器失稳现象实验验证

由前文分析可以发现,红外激光器在工作过程中由于温度升高使其阈值电流升高,若恒流源在工作过程中输出不稳定,将共同导致红外激光触发器出现失稳现象。故采用实验的方法对红外激光触发装置失稳原因进行验证:1)在上电情况下,对恒流源工作电流进行监测,同时对系统环境温度进行监测;2)采用直流稳压源代替恒流源,通过改变输入电流的方式,研究工作电流的变化对红外触发装置稳定性的影响,通过示波器观察是否出现误触发现象。

4.1 恒流源的稳定性监测

为了监测恒流源输出电流的稳定性,在原有的供电电路中加入小功率的电流表与红外激光器串联,测量电流随时间的变化。

图3是恒流源监测电路,其中P1是输入端子,输入的交流电由变压器提供,其有效值为 5.5 V ,D1是整流桥,把交流电变为单相电,经过电容C1、C2稳压滤波形成直流电压,直流电压再经过LM338和电阻R1、R2形成激光器工作的恒定电流。由于LM338在输出端与调整端之间有一固定的参考电压,其值为 1.25 V ,当LM338作为恒流源使用时,其输出电流为

$$I_{OUT} = \frac{V_{REF}}{R_1 + R_2}. \quad (5)$$

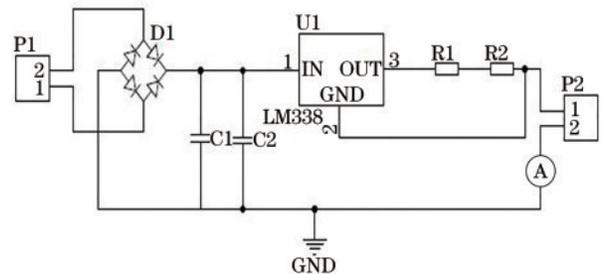


图3 恒流源监测电路

Fig. 3 Constant current source monitoring circuit

图 4 为红外半导体触发器系统连续工作 2.5 h 恒流源的输出电流的变化图,可以发现,随着时间增加,恒流源输出电流由 435 mA 下降到 398 mA,随后保持稳定,出现该现象是因为随着系统工作,电阻 R1 和 R2 的温度升高,阻值升高,当温度达到一定值时与环境形成了平衡,电阻的温度稳定下来,此时恒流源的输出电流也达到了平衡,所以最后的电流值不再发生变化,将保持稳定,变化量约为 8.5%。

在此过程中,系统内部环境温度从室温 20 °C 逐渐升高到 35 °C,由表 2 可知,红外激光器的阈值电流将会

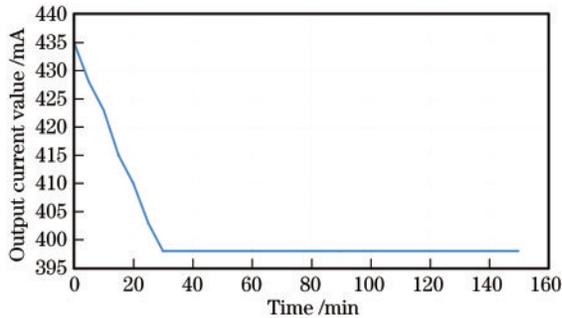


图 4 恒流源输出电流随时间变化图

Fig. 4 Plot of constant current source output current over time

表 3 稳压电源输入变化实验记录

Table 3 Experimental records of regulated power supply input change

Output current of direct current regulated power supply /mA	Output voltage of direct current stabilized power supply /V	Whether trigger function is normal	Whether there is a false trigger signal
310	1.77	N	Y
312	1.77	N	Y
313	1.77	N	Y
.....	Y
347	1.79	Y	N
.....	Y	N
450	1.82	Y	N
.....	Y
650	1.88	Y	N

综合前面分析,可得出红外激光触发装置失稳的原因在于:红外触发装置经长时间工作后,因温度累积导致温度上升,引起红外激光触发装置光源红外激光器阈值电流 $I_{th}(T)$ 上升,而温度升高同时引起激光光源驱动输出电流 $I_{out}(T)$ 降低,当 $I_{out}(T) < I_{th}(T)$ 时,红外激光器无法正常发出激光,输出功率降低,导致光电接收器产生的电信号发生变化,经放大后不断产生误触发信号导致红外触发器失稳。而工作电流始终保持大于阈值电流可保证其稳定工作。

5 红外激光触发装置优化及实验验证

经过实验监测发现当红外激光触发装置的恒流源输出电流大于 700 mA 时,触发装置的灵敏度将下降,为了提高红外激光触发装置的稳定性并保持其灵敏

由 310 mA 上升到 443 mA,超过恒流源的输出电流,将导致红外激光器输出功率不稳定,使红外触发装置产生误触发信号。

4.2 工作电流变化对红外激光触发装置稳定性的影响

为了研究工作电流的变化对红外激光触发装置稳定性的影响,采用直流稳压电源为红外激光器提供驱动电源。同时使用示波器监测触发器是否工作正常。

实验所使用的稳压电源为华谊(HYELEC)的 HY3005B 型号的直流稳压电源,采用单片机设计技术、高精度、高稳定性是其突出特点,电流显示分辨率为 1 mA,电压显示分辨率为 10 mV。输出电流为 0~5 A,输出电压为 0~30 V,可稳定为红外激光器提供激励电流。

由表 3 可以发现,当电流值在 310~347 mA 之间,触发器产生误触发信号,大于 347 mA 之后便不再产生误触发信号,由表 3 数据可推断,此红外半导体激光的阈值电流在 347 mA 附近,略低于 347 mA。当注入电流在小于阈值电流附近时,红外激光器处于自发辐射状态,输出的荧光不稳定,进而导致红外激光触发器产生误触发信号。

度,在实验分析结论的基础上提出优化措施:将恒流源输出电流初始值提高到工作最高温度下的红外半导体激光器阈值电流的 1.3 至 1.5 倍,实验中将由原有 500 mA 提高到 640 mA,为激光器在 35 °C 时阈值电流的 1.44 倍,使得始终保持工作电流大于阈值电流,保持红外激光器输出功率稳定,且在此区间可以保证红外激光触发装置的灵敏度。改进后的红外激光触发装置如图 5 所示。

选用 R1 为 1.8 Ω, R2 为 0.2 Ω, R1 与 R2 的实际阻值的和约为 1.97 Ω,由式(5)可得工作电流为 635 mA。由电流表测量得到的电流值约为 640 mA。图 6 为改善后的红外半导体触发器系统连续工作 3 h 的恒流源的电流值变化。

由图 6 可以发现,随着时间的增加,恒流源的输出

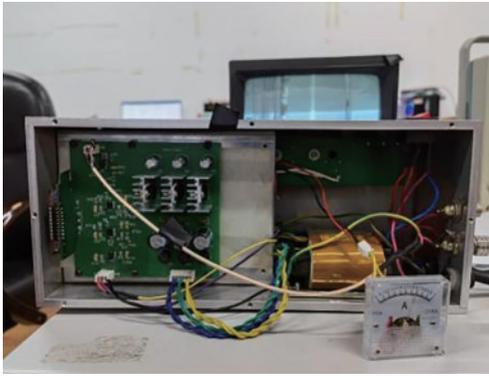


图 5 优化后的红外激光触发装置

Fig. 5 Optimized infrared laser trigger device

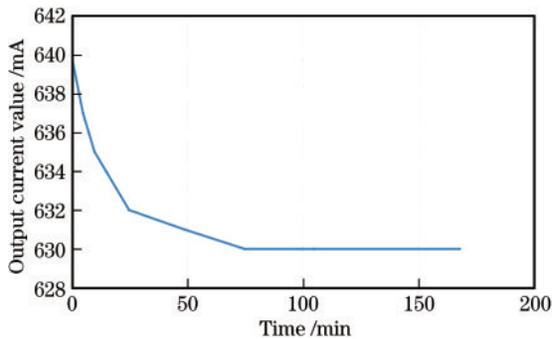


图 6 改善后的恒流源输出电流随时间变化

Fig. 6 Improved constant current source output current variation with time

电流由 640 mA 逐渐下降到 630 mA, 随后保持稳定。尽管已经选择温漂较小的电阻, 但其阻值仍不可避免地随着温度的升高而增大, 不过电流值整体的变化量较小, 变化量约为 1.6%。

图 7 为红外半导体激光器随时间变化的温度变化图, 由图中可以发现, 红外半导体激光器的温度会随着温度的升高而逐渐趋于稳定, 最终稳定下来的温度与环境温度有关。经过一个多月的长期上电运行考验, 红外触发装置性能稳定, 未产生误触发信号。在 640 mA 的初始工作电流情况下, 随着温度的变化, 恒流源输出电流最终稳定在 630 mA 附近, 大于红外

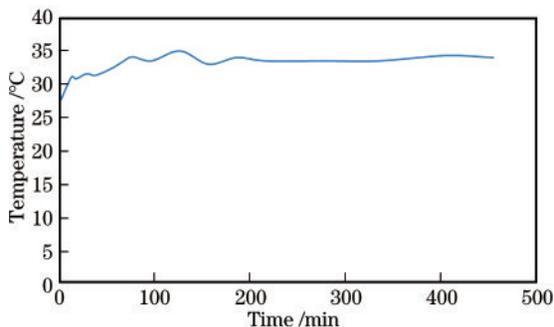


图 7 红外半导体激光器温度变化图

Fig. 7 Temperature change diagram of infrared semiconductor laser

半导体激光器在稳定温度 35 °C 时的阈值电流 443 mA, 因此红外激光触发装置可以稳定运行。

6 结 论

在分析了红外触发器的结构与工作原理后, 通过对恒流源的稳定性、激励电流对红外半导体激光器的输出功率的影响以及温度对红外半导体激光器阈值电流的影响等研究, 发现产生误触发信号的主要原因在于原有红外激光触发装置恒流源输出电流 (450 mA 左右) 不够高, 在工作一段时间后, 由于热量累积效应, 系统环境温度升高, 导致红外激光器阈值电流增大同时恒流源输出电流减小, 当阈值电流接近甚至超过输出电流时, 使得红外半导体激光器工作在自发辐射与受激辐射之间, 输出光功率不稳定, 从而产生误触发信号。在将注入电流提高至最高工作温度时红外激光器阈值电流的 1.44 倍即 640 mA 后, 系统可长时间稳定工作, 不再产生误触发信号, 可为阴影照相系统提供稳定的触发信号。由该研究还可看出, 如果系统需要满足宽温工作条件, 最好增加一些温度控制措施, 确保红外激光触发器的稳定运行。

参 考 文 献

- [1] 宋炜. 高精度弹道靶道空间基准系统及其校准方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018: 12.
Song W. Research on high-precision ballistic target space reference system and its calibration method[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018: 12.
- [2] 王大伟, 刘吉, 杨琦, 等. 脉冲半导体激光器阵列照明摄影测弹着点坐标[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(5): 99-102.
Wang D W, Liu J, Yang Q, et al. Pulse semiconductor laser array illumination photograph and measure coordinate of point of bullet contact[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(5): 99-102.
- [3] 罗红娥, 顾金良, 陈平, 等. 三次序列闪光阴影照相系统研究[J]. 半导体光电, 2011, 32(2): 265-267.
Luo H E, Gu J L, Chen P, et al. Research on shadow photograph system with three-sequence laser sparking[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32(2): 265-267.
- [4] 田亚玲, 李创社, 张朝阳. 高稳定度半导体激光器电源[J]. 应用激光, 2020, 40(4): 740-744.
Tian Y L, Li C S, Zhang Z Y. High-stability power for semiconductor lasers[J]. Applied Laser, 2020, 40(4): 740-744.
- [5] 李卓, 平敏君, 胡子健. 高精度稳定光源研究与设计[J]. 萍乡学院学报, 2020, 37(3): 28-32, 62.
Li Z, Ping M J, Hu Z J. Research and design of high precision stabilized semiconductor lasers[J]. Journal of Pingxiang University, 2020, 37(3): 28-32, 62.
- [6] 李宗平, 王少坤, 张宁, 等. 基于单片机的恒流源设计和实验[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(1): 49-53.
Li Z P, Wang S K, Zhang N, et al. Design and experiment of current source based on single chip

- microcomputer[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2017, 36(1): 49-53.
- [7] 续文敏, 杨强, 王兴, 等. 面向混沌半导体激光器的高稳定控制系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0714008.
Xu W M, Yang Q, Wang X, et al. Design of high stability control system for chaotic semiconductor lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0714008.
- [8] 张安迪, 张艳荣, 李涛. 论域可变的模糊 PID 控制在半导体激光器温度控制系统中的应用[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1214003.
Zhang A D, Zhang Y R, Li T. Application of variable domain fuzzy PID control in semiconductor laser temperature control system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1214003.
- [9] 周彤, 顾金良, 刘静宝, 等. 高速弹丸测量的激光触发装置可靠性分析[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(10): 16-20.
Zhou T, Gu J L, Liu J B, et al. Reliability analysis of high-speed projectiles measured laser triggering device[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(10): 16-20.
- [10] Hao Z Q, Li H Z. Design on laser diode temperature control circuit[J]. Advanced Materials Research, 2013, 850/851: 512-515.
- [11] 周根弟. 高稳定度激光光源温度控制算法研究和实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019: 4.
Zhou G D. Research and application of temperature control system for high stability laser source[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019: 4.
- [12] Crump P, Patterson S, Wang J, et al. Diode laser bars deliver > 400 -W peak CW power from 800-nm to 980-nm enabling wide range of applications[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6397: 36-44.
- [13] 郑胜亨, 杨远洪. 调制光栅 Y 分支可调谐激光器高精度波长调谐特性[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0201001.
Zheng S H, Yang Y H. High precision and accuracy wavelength tuning characteristics of modulated grating Y-branch tunable lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0201001.
- [14] 李江澜, 石云波, 赵鹏飞, 等. TEC 的高精度半导体激光器温控设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1745-1749.
Li J L, Shi Y B, Zhao P F, et al. High precision thermostat system with TEC for laser diode[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1745-1749.
- [15] 赵青杨. 基于电流温度反馈控制的半导体激光驱动系统设计[D]. 太原: 中北大学, 2020: 5.
Zhao Q Y. Design of semiconductor laser drive system based on current temperature feedback control[D]. Taiyuan: North University of China, 2020: 5.
- [16] 齐忠亮. 小功率半导体激光器的恒温控制与驱动方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012: 3.
Qi Z L. The study of temperature control and drive method about low power semiconductor laser diode[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2012: 3.