

InGaAs 多路偏振探测器高精度温控系统

王晓光¹, 钱小东^{1,2}, 洪津¹, 胡亚东¹, 张爱文¹, 鲍健¹

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘要: 暗电流是影响红外探测器测量精度的重要因素之一,暗电流的大小及波动状况主要受器件工作温度的影响。为满足器件温变速率和控温精度的要求,采用“限斜率”和增量式PID两种不同控制算法设计高精度温度控制系统。针对半导体制冷器(TEC)低电压大电流的工作特性,先用开关电源将输入的高电压转换为低电压,再用多只晶体管控制多路TEC,以达到高转换效率且输出“纯净”的目的。将该温控系统应用于某星载红外分孔径InGaAs多路探测器,实现了在指定的时间范围内探测器温度达到稳定状态,进入稳态后实测温度波动 ΔT 不大于 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$,优于为满足仪器偏振探测精度 0.2% 的指标所需的温度波动 ΔT 不大于 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的要求。

关键词: 红外探测器; 半导体制冷器; 暗电流; 增量式PID算法; 电噪声

中图分类号: TP272 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)05-0094-05

High Precision Temperature Control System of InGaAs Multi-channel Polarization Detectors

WANG Xiao-guang¹, QIAN Xiao-dong^{1,2}, HONG Jin¹, HU Ya-dong¹, ZHANG Ai-wen¹, BAO Jian¹

(1. Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Dark current is one of the important factors that affect measurement accuracy of infrared detector, while the size and fluctuation of the dark current is mainly affected by the working temperature of the device. In order to meet the accuracy requirement of the temperature gradient and temperature control of device, we designed a high precision temperature control system by using two different control strategies including “limit slope” algorithm and incremental PID algorithm. Considering the operating characteristics of low voltage and large current of semiconductor cooler (TEC), we used a DC/DC convert to change the high voltage to low voltage, then used some transistors to control multi-channel TEC, in order to achieve the purpose of high conversion efficiency and get a “pure” output with low electrical noise. This temperature control system was applied to an InGaAs multi-channel detector. The result showed that: the detector temperature reached a stable state within specified time; and after entering the steady-state, temperature fluctuation ΔT is less than $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$. The measurement accuracy of infrared detector can reach 0.2% as the temperature fluctuation ΔT is less than $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, so the design meets the requirement.

Key words: infrared detector; TEC; dark current; incremental PID control algorithm; electrical noise

0 引言

大气成分容易受到人类活动和自然因素的影响,气溶胶通过吸收和反射太阳辐射影响气候变化。近年来,偏振遥感在气溶探测方面发展了多种偏振探测技

术及仪器。偏振探测的测量精度受到探测器暗电流的大小及波动的影响^[1],对红外探测器制冷可减小暗电流,采用控温技术可以减小暗电流波动。

本文首先给出红外分孔径偏振探测系统的暗电流特性测试,分析得到探测器探测精度与工作温度之间定量的关系,然后以某航天载荷应用为背景,结合半导体制冷器(TEC)低电压大电流的工作特性,设计了一套多路高精度温度控制系统,该温控系统为满足系统偏振探测精度要求提供了前提。

收稿日期:2015-05-21

修回日期:2016-02-13

基金项目:中国科学院科技创新重点项目(KGFZD-125-13-006)

作者简介:王晓光(1990—),男,安徽滁州人,硕士生,研究方向为光学精密仪器。

1 红外分孔径偏振探测系统暗电流特性测试

应用于气溶胶特性探测的红外分孔径偏振探测系统由三组检偏探测通道组成,如图1所示。

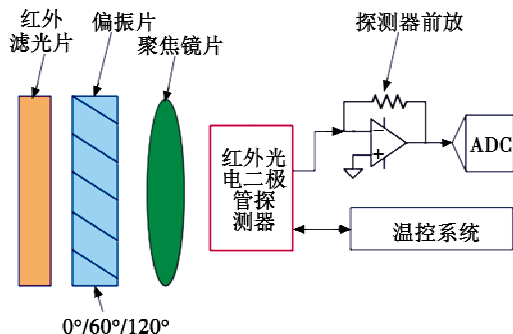


图1 红外分孔径偏振探测系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of infrared aperture polarization detection system

探测器的暗电流包括扩散电流、复合电流和隧道电流,而这三者均主要受到温度和反向偏压的影响,所以探测器的暗电流也受到温度和反向偏压的影响^[2-3]。

某高精度偏振遥感载荷 2250 nm 波段偏振探测系统主要参数如表1所示。

表1 2250 nm 波段系统参数

Table 1 2250 nm band system parameters

光谱辐射亮度/ $\mu\text{W} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})^{-1}$	FW HM/ nm	F 数	工作 温度/ ℃	探测 系统 带宽/ Hz	光电 流/nA	暗电 流/nA
2.3	80	4	-20	500	870	13

探测系统的总噪声由仪器各噪声平方和的平方根表示^[4]。对于短波红外探测系统来说,探测信号和暗电流的散粒噪声 (I_{shot}) 与探测器暗电流随温度波动引起的测量误差 (ΔT_{dark}) 是其主要噪声源^[5-7],因此引入暗电流测量误差的探测系统的信噪比 (SNR) 可表示为

$$R_{s,N} = \frac{I_{\text{scene}}}{\sqrt{I_{\text{shot}}^2 + I_{\text{det}}^2 + I_{\text{amp}}^2 + I_{\text{quant}}^2 + \frac{\delta y}{\delta x} \Delta T_{\text{dark}}^2}} \quad (1)$$

式中: I_{scene} 为探测信号; $I_{\text{shot}} = \sqrt{(I_{\text{scene}} + I_{\text{dark}})2fq}$, I_{dark} 为探测器暗电流, f 为系统带宽, q 为电子电荷; $\Delta T_{\text{dark}} = \sqrt{RT_{\text{dark}} \Delta T}$, RT_{dark} 为探测器暗电流温变速率, ΔT 为探测器工作温度误差。

由表1结合式(1),计算得到探测器工作温度波动 ΔT 不大于 0.2℃ 时才能实现红外波段偏振探测精度优于 0.2% 的技术指标。

综上所述,高精度温控系统的设计对于提升探测器探测精度具有重要意义。

2 温控系统的设计

根据以上测算,结合实际工作环境,要求温控系统实现对 7 路 InGaAs 探测器的独立控温并分为:一级制冷有 4 路,工作温度为 -10℃;二级制冷有 3 路,工作温度为 -20℃。具体设计要求如下:

- 1) 一级制冷有 4 路,工作温度为 -10℃;二级制冷有 3 路,工作温度为 -20℃,温控系统应能够实现每一路的独立控温;
- 2) 7 路探测器工作温度具备可设置功能;
- 3) 由于探测器、热敏电阻、TEC 及温控系统安装在同一个狭小的盒体内,温控电路的电噪声不能影响探测器性能;
- 4) 使用数字方式实现控温算法;
- 5) 安全性要求,过流保护功能,负载最大电流限制为 0.8 A;
- 6) 稳态温度波动 $\Delta T < \pm 0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- 7) 为避免大幅度急速升降温对探测器寿命的影响,要求升降温速率 $< 8 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$;
- 8) 温控系统应具备自我健康管理功能,具备对探测器温控电路的电流和温度状态监测能力。

TEC 是用帕尔贴效应进行制冷的半导体器件,在 TEC 两端加上直流电压就会产生电流,这会使 TEC 的一端发热,另一端制冷;把电压反向则会导致相反的热流向。TEC 移去的热量与流过 TEC 的电流值有关,因此,目标对象的温度可以通过调整 TEC 电流的方向和幅度来控制^[8]。

2.1 温控系统硬件设计

该温控系统的主要组成部分包括 CPU 模块、采样模块、TEC 模块、上位机模块和电源模块。

1) CPU 模块:选用美国微芯公司的 PIC16F874A,它自带 8 路 10 位 ADC, SPI 同步串口和 SCI 异步串口,内置 EEPROM 存储器,用户改变运行参数后可断电记忆;哈弗架构内部总线,精简指令集;相比同类产品该芯片稳定性好、抗干扰性能强。

2) 采样模块:CPU 的 8 路 10 位 ADC 分配 7 路用于温度采样,1 路通过 8 选 1 模拟开关 4051 用于 7 路电流采样。采样电路采用电阻分压的方式将温度信号和电流信号转换为电压信号,之后经 ADC 转换为数字信号。热敏电阻阻值 - 温度特性曲线如图 2 所示。

3) TEC 模块:图 3a 所示为一、二级 TEC 的工作特性曲线,图 3b 所示为 TEC 的电流 - 电压特性曲线,容易看出 TEC 低电压大电流的工作特性。

CPU 输出接 DAC 芯片,选用美国美信公司的 MAX5309,它是一款 8 通道 10 位 DAC,采样 CPU 的 SPI

接口。

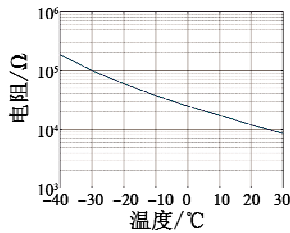


图 2 热敏电阻特性曲线

Fig. 2 Thermistor characteristic curve

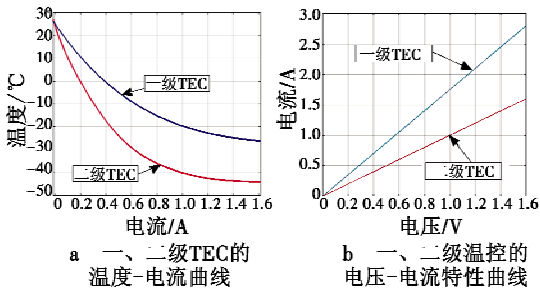


图 3 TEC 的工作特性曲线

Fig. 3 Performance curves of TEC

由于 DAC 的输出电压范围为 0 ~ 5 V, 而 TEC 所需的电压远低于 5 V, 此处 DAC 的输出信号通过 2 个等值电阻分压后传送给后续电路, 充分利用 DAC 的转换精度, 如图 4 所示。

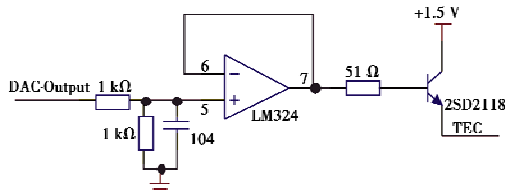


图 4 CPU 输出控制

Fig. 4 CPU output control

分压后的电压信号传送给 LM324 运算放大器, 利用运放的缓冲作用减小输出对输入的影响, 同时提高电路的带负载能力。

考虑 TEC 的低电压大电流工作特性, 用 2 只 LM2677 开关电源芯片把 DC/DC 变换器传送来的 12 V 电压高效率地降低为 1.5 V 和 2.0 V, 并供给一级、二级制冷电路, 再利用晶体管共集电路的电流放大特性, 将运放的输出信号经高电流增益 NPN 功率管 2SD2118 驱动 TEC, 因为三极管电流放大电路是线性放大电路, 所以输出电噪声极小。

4) 上位机模块: CPU 的 SCI 串口通过一片隔离驱动器与电脑的 RS-232 口相连, 用于与上位机通信, 实现上位机对系统运行状态的实时监测控制。

5) 电源模块: 如图 5 所示, 一次电源为 28 V 直流, 采用 28 V/12 V 隔离 DC/DC 变换器 (URB2412MP-12W)。

一方面提升抗干扰性能, 另一方面为后续方便使用, 把输入电压高效率地降低为稳定的 12 V。CPU 使用 +5 V 供电, 使用 L78L05 线性稳压器获得 +5 V 电压, 隔绝噪声。

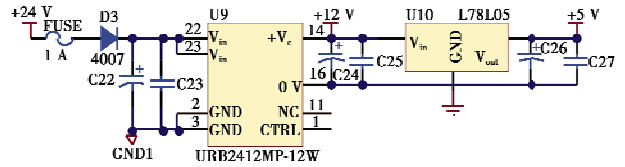


图 5 电压转换电路

Fig. 5 Voltage conversion circuit

负载主要是 TEC, 在工作电流为 0.8 A 时, 电压分别为 0.5 V 和 0.8 V, 此处欲采用 1.5 V 和 2.0 V 分别供给一级制冷和二级制冷的晶体管, 采用 1.5 V 和 2.0 V 是考虑到 TEC 所需电压、电流采样消耗电压、以及为保证控制电路工作在线性区必须的最小压降和满负荷时线路压降等。为提高转换效率, 采用两级降压型开关稳压器: 第一级采用隔离型 DC/DC 转换器, 将输入的 28 V 电压高效地降为 12 V, 采用隔离型芯片可以提升抗干扰能力; 第二级采用 2 只非隔离型开关电源芯片 (可调型 LM2677) 将 12 V 电压高效率地降低为 1.5 V 和 2.0 V。此处 LM2677 的输入电压为 8 ~ 40 V, 输出电压为 1.2 ~ 37 V, 输出电流可达 5 A, 而一级制冷共有 4 路, 总电流 3.2 A, 二级制冷共有 3 路, 总电流 2.4 A, 均小于 5 A。

综上, 一方面考虑转换效率, 另一方面考虑噪声干扰, 利用开关电源降低电压的同时, 采用线性电路输出, 既提高转换效率, 也有效减小了输出信号的噪声, 同时, 也减小了输出信号对探测器的电气干扰。

2.2 温控系统软件设计

对于 7 路温度信号和 7 路电流信号的采集, 为提高采样精度, 软件采用多次累加取平均的方法。

关于控制策略, 按照设计要求, 升降温速率小于 8 °C/min, 最大电流限制为 0.8 A。按此测算, 从室温降至设置温度时间约为 4 ~ 5 min, 这个速度非常慢, 采用常规 PID 算法并不合适, 本设计根据温差使用了 2 种控温策略。在温差较大 (刚开/关机或改变设置温度尚未稳定期间) 时, 采用“定斜率”算法, 定时根据温差决定在 DAC 原值上是 +1 (降温) 或 -1 (升温), 以限制升降温速率, 当温差较小 (在 ±1 °C 以内) 时采用增量式 PID 算法快速跟踪设置温度直至稳定。

关于如何整定 PID 参数简略介绍如下。

PID 控制单元的控制精度取决于比例环节的放大系数 K_p , 积分环节的积分时间 T_i 和微分环节的微分时间 T_d ^[9]。采用 Ziegler-Nichols 法^[10-11]整定参数, 温度控制系统通常可近似为一阶惯性加上纯延迟环节, 即

$$Y(S) = \frac{Ke^{-\tau s}}{T_p S + 1} \quad (2)$$

采用典型的 PID 校正器^[12]

$$G(S) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \quad (3)$$

有 Ziegler-Nichols 整定公式

$$\begin{cases} K_p = 1.2 \frac{T_p}{K\tau} \\ D = 0.5\tau \\ T_D = 0.5\tau \end{cases} \quad (4)$$

在测定参数时,先将 PID 控制单元断开,以阶跃信号作为被控单元的输入,可得图 6a 所示的理论阶跃响应曲线^[13-14],测量出 K, T_p, τ ,按式(4)分别计算 K_p, T_i, T_D 。图 6b 所示为实测的系统阶跃响应曲线。

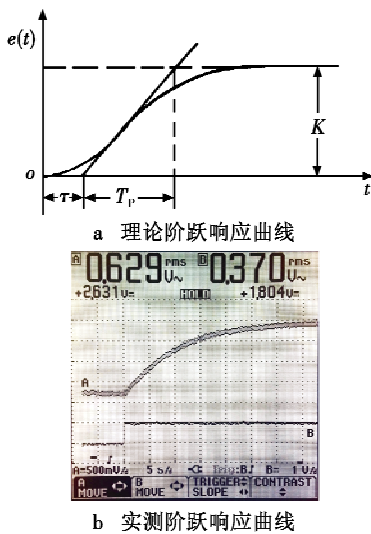


图 6 系统的理论与实测阶跃响应曲线

Fig. 6 Theoretical and actual step response of system

由实测的阶跃响应曲线可测出: $K \approx 1.75, \tau \approx 0.6, T_p \approx 13, K_p = 1.2 T_p / (K \times \tau) = 1.2 \times 13 / (1.75 \times 0.6) = 14.86, T_i = 2; \tau = 2 \times 0.6 = 1.2 (s), T_D = 0.5 \tau = 0.5 \times 0.6 = 0.3 (s)$ 。

PID 控制器的参数整定工作完成后,根据实际工作情况对参数进行微调以达到目标要求。

用户从上位机实现以下功能:

- 1) 实现温控系统的开、关机,也可以单独关闭任一路;
- 2) 随时改变任一路的设置温度值;
- 3) 接收各路实时温度值、温度差值(实际温度与设置温度的差值,显示精度可达 $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$)和电流值(精度 10 mA)。

系统软件流程如图 7 所示。

3 实验结果

图 8 是以二级制冷温控为例,实测得到的温控曲

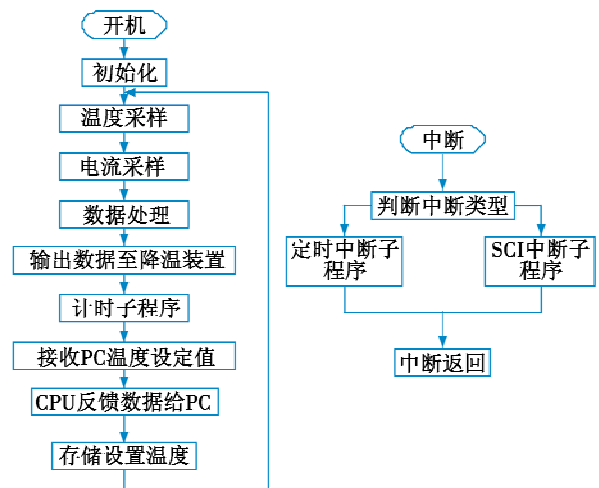
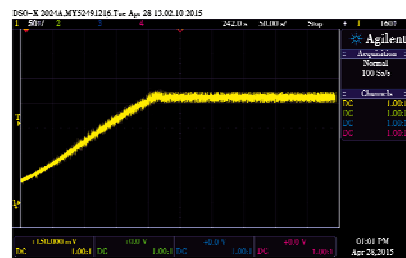


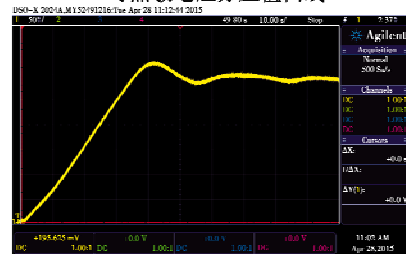
图 7 程序流程图

Fig. 7 Program flow chart

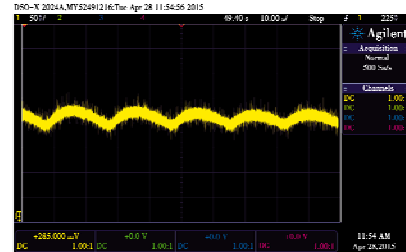
线,其中,图 8a 为从常温开机至稳态的控制全过程,略大于 4 min 。



a 从常温($\approx 1 \text{ V}$)到稳态($\approx 2.1 \text{ V}$)时热敏电阻分压值曲线



b 偏移放大后的温度曲线



c 偏移放大后的稳态温度曲线

图 8 实测温控曲线

Fig. 8 Temperature control curve by actual measurement

为看清楚温度稳定后的波动细节,将热敏电阻分压信号通过一个运放放大,通过偏移将 $-19 \sim -21 \text{ } ^\circ\text{C}$ 对应到 $0.5 \sim 5 \text{ V}$,图 8b 为分压信号经过运算放大器偏移放大后得到的曲线,对应图 8a 中拐点附近的变化细节。

图 8c 为稳态温度信号经过运算放大器偏移放大得

到的曲线,此时 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度变化量对应的电压变化量约为 225 mV ,图中,波形是经过示波器探针 10 倍缩小后得到的波形,峰峰值约为 10 mV (实际值约为 100 mV),对应温度波动峰峰值约为 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$,即稳态温度波动约为 $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$,满足系统温差小于 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的要求。

4 结论

偏振仪器探测精度是一个复杂的系统性问题。本文通过对应用于气溶胶航天遥感的高精度偏振探测器相关参数的分析计算,得出温度对遥感探测精度有重要制约作用的结论,并获得了探测器工作温度波动 ΔT 不大于 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时才能实现红外波段偏振探测精度优于 0.2% 的技术指标,设计出了一套稳态温度波动 ΔT 优于 $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高精度温控系统,为探测器达到 0.2% 的测量精度提供了前提。

该温控系统不仅适用于本文所涉及的探测器温控,还可衍生应用于其他类似的高精度温度控制场合,具有广泛的航天、军工、商业应用前景。

参 考 文 献

- [1] SCHWARTZ S E. Uncertainty requirements in radiative forcing of climate change[J]. Air & Waste Management Association, 2004, 54(11):1351-1359.
 - [2] SPINHIRNE J D, PALM S P, HART W D, et al. Cloud and aerosol measurements from GLAS: overview and initial results[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(32):109-127.
 - [3] CAIRNS B, RUSSELLB E E, LAVEIGNEB J D, et al. Research scanning polarimeter and airborne usage for remote sensing of aerosols[J]. SPIE, 2003, 5158:33-44.
 - [4] 陈立刚, 洪津, 乔延利, 等. 一种高精度偏振遥感探测方式的精度分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(10):2384-2387. (CHEN L G, HONG J, QIAO Y L, et al. Accuracy analysis on a sort of polarized measurement in remote sensing [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(10):2384-2387.)
 - [5] FENG W W, CHEN L G. The impact of the orientation angles uncertainty of instrument polarizers on polarization measurement accuracy[J]. Optik, 2010, 121(24):2276-2279.
 - [6] BASS M, DECUSATIS C, ENOCH J, et al. Hand book of optics[M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2010.
 - [7] CIZDZIEL A P, MERLO T, KORMOS K, et al. The santa barbara research center multimodule shortwave IR linear array and scene simulator[J]. Proc Spie, 1988, 972:83-106.
 - [8] MISHCHENKO M I, CAIRNS B, HANSEN J E, et al. Monitoring of aerosol forcing of climate from space: analysis of measurement requirements[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2004, 88:149-161.
 - [9] 鲍健, 孙力, 樊宏, 等. 高精度二极管激光温度控制器设计及参数整定[J]. 光电子·激光, 2005, 16(6):659-661. (BAO J, SUN L, FAN H, et al. Design of high precise temperature controller for LDs [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16(6):659-661.)
 - [10] 朱茂华, 谷彤昭, 钟福艳. 半导体激光器温度控制的研究[J]. 物理与工程, 2003, 13(4):40-41, 60. (ZHU M H, GU T Z, ZHONG F Y. Research on the temperature control of laser diode [J]. Physics and Engineering, 2003, 13(4):40-41, 60.)
 - [11] 吴宏鑫, 沈少萍. PID 控制的应用与理论依据[J]. 控制工程, 2003, 10(1):37-42. (WU H X, SHEN S P. Basic of theory and applications on PID control [J]. Control Engineering of China, 2003, 10(1):37-42.)
 - [12] 江孝国, 祁双喜, 王伟. 高精度半导体激光器自稳温控系统[J]. 电子技术, 2005, 29(5):56-59. (JIANG X G, QI S X, WANG W. Temperature controller of high precise semiconductor laser [J]. Electronic Technology, 2005, 29(5):56-59.)
 - [13] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 1997(4):60-64. (TAO Y H. New type PID control and its application [J]. Industrial Instrumentation & Automation, 1997(4):60-64.)
 - [14] ESMAN R D, RODE D L. $100\text{-}\mu\text{K}$ temperature controller [J]. Review of Scientific Instruments, 1983, 54(10):1368-1370.
- (上接第 25 页)
- [7] 汪浩, 胥辉旗, 马良. 基于饱和攻击的伴飞诱饵与反舰导弹协同突防能力研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(5):29-31. (WANG H, XU H Q, MA L. Study of cooperation penetration capability of anti-ship missile and escort free-flight decoys based on saturation attack [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(5):29-31.)
 - [8] 董受全, 刘志强. 反舰导弹对近岸目标射击的研究[J]. 飞航导弹, 2000(11):12-14. (DONG S Q, LIU Z Q. Research on firing alongshore target with anti-ship missile [J]. Winged Missiles Journal, 2000(11):12-14.)
 - [9] 王建国, 沙卫晓, 刘涛, 等. 反舰导弹攻击近岸目标问题研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(2):71-72. (WANG J G, SHA W X, LIU T, et al. Study of attacking alongshore target with anti-ship missile [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(2):71-72.)