

高精度温度传感、测量与控制技术综述*

文明轩, 李珏, 王成, 凌晨, 辜凌云, 丁延卫

“天琴计划”教育部重点实验室, 中山大学天琴中心 & 物理与天文学院, 天琴前沿科学中心, 国家航天局引力波研究中心, 广东 珠海 519082

摘要: 空间引力波探测中, 高精度温度传感、测量与控制作为探测卫星的关键技术之一, 技术指标高, 实现难度大。本文主要针对高精度温度传感、测量与控制, 介绍了传统铂电阻和 NTC 热敏电阻温度传感特性、新型光纤温度传感关键技术以及基于 PID 的温度控制算法, 对温度传感、测量以及控制算法特性进行了分析归纳。

关键词: 铂电阻; NTC 热敏电阻; 光纤光栅; 温度传感; 温度控制

中图分类号: V57 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 01-0146-10

Review of high precision temperature sensing, measurement and control technology

WEN Mingxuan, LI Jue, WANG Cheng, LING Chen, GU Lingyun, DING Yanwei

MOE Key Laboratory of TianQin Mission, TianQin Research Center for Gravitational Physics & School of Physics and Astronomy, Frontiers Science Center for TianQin, CNSA Research Center for Gravitational Waves, Sun Yat-sen University (Zhuhai Campus), Zhuhai 519082, China

Abstract: In space gravitational wave detection, high precision temperature sensing, measurement and control are some of the key technologies for satellites, with high technical requirements and implementation difficulty. This paper mainly focuses on high precision temperature sensing, measurement and control, introducing the sensing characteristics of traditional platinum resistance and NTC thermistor temperature sensors, and new optical fiber temperature sensing and PID temperature control algorithms. The characteristics of temperature sensing, measurement and control algorithms are analyzed and summarized.

Key words: platinum resistance; NTC thermistor; fiber Bragg grating; temperature sensing; temperature control

* 收稿日期: 2020-11-11

录用日期: 2020-12-29

网络首发日期: 2021-01-08

基金项目: 广东省基础与应用基础研究重大项目 (2019B030302001); 国家自然科学基金 (11973100)

作者简介: 文明轩 (1996 年), 男; 研究方向: 低噪声温度测量; E-mail: wmx3@mail2.sysu.edu.cn

李珏 (1996 年), 女; 研究方向: 光纤温度传感; E-mail: lijue6@mail2.sysu.edu.cn

(以上两位作者为共同第一作者)

通信作者: 丁延卫 (1976 年), 男; 研究方向: 重力/引力卫星总体设计与机热一体化; E-mail: dingyw3@mail.sysu.edu.cn

1 引言

温度作为基本的热力学性质之一, 其影响广泛存在于各领域, 对温度的传感、测量与控制具有重要意义。空间引力波探测中, 温度是干扰引力波探测卫星的重要因素之一, 对于卫星光学测量系统, 温度变化会导致光学元件折射率变化以及膨胀收缩, 使光程发生变化, 而对于惯性传感系统, 温差会使测试质量的相对面产生压力差, 由于辐射压力、辐射计效应和出气效应等对测试质量产生作用力, 导致残余加速度噪声, 干扰引力波探测^[1]。

由于引力波测量是在频域下对引力波信号进行探测分析, 为了减少温度带来的影响, 根据空间引力波超精超稳的探测需求, 对于温度方面要求在 0.1 mHz~1 Hz 频段内, 卫星光学平台温度噪声优于 0.1 mK/Hz^{1/2}, 惯性传感系统温度噪声优于 5 μK/Hz^{1/2}^[1]。在温度测控过程中, 为了避免系统噪声与环境温度噪声混淆, 要求系统噪声低于环境噪声一个量级, 即在引力波探测卫星中必须有一套与之匹配的高精度温度传感、测量与控制系统, 能够监测卫星核心组件中的微小温度变化, 提供精准的温度控制。本文主要介绍了基于铂电阻、热敏电阻、新型光纤光栅的高精度温度传感测量以及基于 PID (Proportion Integral Differential) 的高精度温度控制算法。

2 电阻式温度传感

由于金属、半导体等材料存在阻值随温度变化的特性, 使其可以用来实现对温度的传感^[2], 这类传感器被称为电阻式传感器^[3], 其特点是电路简单、灵敏度高、具有较高稳定性, 这里主要介绍使用范围最广的铂电阻温度传感器和热敏电阻温度传感器。

2.1 铂电阻温度传感

铂电阻温度传感器是由金属铂以导线或薄膜形式制成的电阻元件^[4], 由于金属铂的电阻值会随温度的变化而变化, 这让它可以被用于温度传感, 因为铂具有的长期的稳定性和良好的可重复性, 其阻值的变化大到可以用于检测微小的温度变化, 使其成为商业电阻传感器的主要制作材料^[5-6]。

在工业上, 通常利用 Callendar-van Dusen 方程表示铂电阻阻温关系^[7], 在 -200~0 °C 温度范围内, 阻温关系表示为

$$R_t = R_0 [1 + AT + BT^2 + CT^3(T - 100)]. \quad (1)$$

在 0~630 °C 温度范围内, 阻温关系表示为

$$R_t = R_0 [1 + AT + BT^2], \quad (2)$$

其中 A 、 B 和 C 为常系数, 由传感器结构和金属铂的性质决定, T 代表温度单位为 °C, R_0 为铂电阻在参考温度 (273.15 K) 下的阻值。

铂电阻温度传感的特点有: ① 阻温曲线近似线性关系, 有利于确定阻值与温度间的关系; ② 金属铂性质非常稳定, 因此具有长期的稳定性; ③ 具有很高的可重复性, 同规格的铂电阻之间具有很强的互换性。

研究表明铂电阻温度测量系统能够在 0.1~10 Hz 频段内到达 100 μK 量级的分辨率, 同时该系统在 230 h 内, 整体稳定性优于 10⁻⁵^[8]。基于铂电阻的快速多通道精密温度计读数系统, 系统分辨率能够在 1 Hz 频率下达到 0.38 mK^[8-9]。Guillet B 等设计的基于工业铂电阻温度传感器的温度读出系统^[10], 采用了交流供电以及锁相放大器方法, 能够在 300 K 温度和 1 Hz 频率下, 系统噪声水平达到 25~30 μK/Hz^{1/2}。此外欧空局的重力场和海洋循环探测卫星 GOCE, 根据 283~308 K 温度范围, 5 mHz~0.1 Hz 测量频段, 加速度计温度稳定性优于 5 μK/Hz^{1/2} 的要求, 设计了一套基于铂电阻的温度测控系统, 该系统能够实现 5 mHz~0.1 Hz 频段内 5 μK/Hz^{1/2} 的温度噪声测量^[11-12]。

2.2 NTC 热敏电阻温度传感

负温度系数 (Negative Temperature Coefficient, NTC) 热敏电阻通常是由陶瓷聚合物制成的半导体器件, 其阻值随温度升高而降低, 阻温特性呈指数关系, 是目前对温度变化最为敏感的传感器, 其尺寸小, 非常适合用于空间受到限制的地方^[13]。由于热敏电阻的高灵敏度, 快速响应等特性, 被广泛地用于温度测量、控制和补偿等^[14]。热敏电阻材料性质决定其温度测量范围一般为 -100~300 °C, 与铂电阻一样热敏电阻也是无源器件, 因此必须接入电路才能工作。

NTC 热敏电阻的电阻-温度关系可用 Steinhart-Hart 模型来表示^[15-16]

$$T^{-1} = A + B \ln R_T + C \ln^3 R_T, \quad (3)$$

式中 T 为绝对温度, A 、 B 和 C 为常系数其值取决于热敏电阻类型, R_T 是热敏电阻在温度 T 下的阻值。

在温度范围较小的情况下, 其方程还可以写成 β 参数方程形式

$$R_T = R_0 e^{\beta(T^{-1} - T_0^{-1})}, \quad (4)$$

R_0 为热敏电阻在参考温度 T_0 (298.15 K) 下的电阻值, β 为热敏电阻材料常数, 不同型号热敏电阻 R_0 值通常从几千欧姆到几万欧姆不等, β 值一般为 3 000 ~ 4 000 K。

NTC 热敏电阻特点有: ① 温度系数高, 在微小的温度变化下阻值也有很大的变化, 因此更容易检测到温度的相对变化; ② 具有负温度系数特性, 阻值随温度升高而降低; ③ 阻温关系呈指数关系, 虽然相对于线性关系更为复杂, 但是在测温范围内的灵敏度更高。

Schweiger H G 等的研究表明, 基于热敏电阻传感器的快速多通道精密温度测量系统在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围可以得到小于 30 mK 的偏差, 其精度与稳定性已经与铂电阻传感器相当^[17]。此外 Wudy E F 等基于分压器和直流技术的 NTC 热敏电阻测温系统, 实现了 10 Hz 的测量频率以及 75 μK 分辨率^[18]。在国外空间引力波探测计划 LISA 的先期技术验证卫星 LISA Pathfinder 中, Lobo A 等基于 NTC 热敏电阻设计了一套交流惠斯通电桥温度测量系统^[19], 其在 10 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围, 1 ~ 30 mHz 频段内, 实现了 10 $\mu\text{K}/\text{Hz}^{1/2}$ 的噪声水平, 该系统已经在 LISA Pathfinder 上取得了良好的运行结果^[20-21]。

2.3 铂电阻与 NTC 热敏电阻比较

虽然铂电阻的阻温特性具有良好的线性关系, NTC 热敏电阻属于非线性传感器, 但与铂电阻传感器相比热敏电阻在温度变化方面能够表现出更大的动态响应, 对温度的变化更为敏感, 其灵敏度比铂电阻高一个量级, 这有利于在相对较窄的温度范围内实现高输出信号, 因此更合适用于检测微小的温度变化。此外要将测温系统电压噪声转换为温度噪声, 需要将测温系统中电压噪声除以其灵敏度得到噪声等效温度, 因此同等情况下灵敏度更高的 NTC 热敏电阻能够实现更低的噪声。

3 光纤温度传感

光纤光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 是将掺锗石英光纤置于 488 nm 氩离子激光器下曝光, 永久性改变其纤芯折射率而形成的衍射光栅^[22]。掺锗提高了光纤的光敏性^[23], 而光纤的光敏性又与激光器功率的二次方成正比^[24], 为了进一步提升光纤的光敏性, Lmaire P G 等^[25] 提出了光纤载氢技术, 使 FBG 实现了批量生产并进一步降低了

成本。1989 年, Meltz G 等^[26] 将光栅刻写改进为 244 nm 紫外光干涉刻写, 不需要移除光纤涂覆层, 提升了制作效率, 且提高了光栅的高温稳定性。此后研究人员又对光栅刻写技术进行了一系列的改进, 相继提出了逐点刻写法^[27] 和相位掩膜法^[28]。

光纤光栅不仅可以在通信系统中应用为窄带滤波器, 还可以在传感系统对诸多物理量进行传感测量。如温度^[29]、压力^[30]、湿度^[31]、弯曲^[32]、位移^[33]、折射率^[34]、磁场^[35]、气体^[36]、流速^[37] 等。目前, 光纤传感器已广泛应用于工业传感、生物医学、电力系统等^[38]。

3.1 光纤光栅传感特性

光纤光栅传感的本质是将被测测量转换为光波参数, 通过测量光波参数获得被测测量的信息。根据不同的光波参数调制类型, 可将光纤光栅传感器分为强度调制型传感器、相位调制型传感器、偏振调制型传感器、波长调制型传感器、频率调制型传感器等^[39]。与电学传感器相比, 光纤光栅传感器具有抗电磁干扰能力强、不对测量对象产生电磁干扰、体积小、质量轻、易实现分布式测量等优点。

通常光纤光栅温度传感系统结构如图 1 所示, 由宽带光源输入光信号, 经环形器打入 FBG, 将特定波长的光反射回环形器并进入光谱仪, 其余波长的光将透过 FBG, 光谱仪对 FBG 的反射波长信号进行解调。对于掺锗石英光纤 FBG, 当温度增加时, FBG 反射波长会向长波长方向移动。

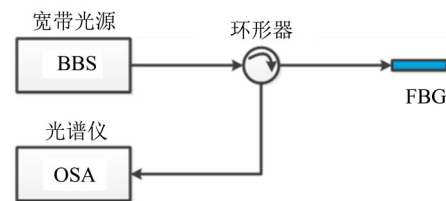


图 1 光纤光栅温度传感系统

Fig. 1 Fiber grating temperature sensor system

光纤光栅用于温度测量的基本原理是根据其热光效应和热膨胀效应, 温度的变化导致了材料折射率和光栅的分布周期的变化, 从而改变了反射波长, 其关系如公式 (5) 所示^[40]

$$\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (5)$$

式中 λ 为布拉格波长 (反射中心波长), n_{eff} 为光纤有效折射率, Λ 为光栅周期。

在理想情况下, 对公式 (5) 等号两端进行求

微分得到

$$d\lambda = 2n_{\text{eff}}d\Lambda + 2\Lambda dn_{\text{eff}} \quad (6)$$

当温度 T 改变时,

$$d\Lambda = \frac{\partial \Lambda}{\partial T} dT = \alpha \Lambda_0 dT, \quad (7)$$

$$dn_{\text{eff}} = \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} dT + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \lambda} d\lambda. \quad (8)$$

考虑到 $\lambda_0 \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \lambda} \ll 1$, 故光纤光栅温度灵敏度可以表示为

$$K_T = \frac{d\lambda}{dT} = \lambda_0 \left(\alpha + \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \right) = \lambda_0 (\alpha + \xi), \quad (9)$$

其中 λ_0 为谐振波长, α 为热膨胀系数, ξ 为热光系数。对于掺锗石英光纤 $\alpha = 5.5 \cdot 10^{-7}/^\circ\text{C}$, $\xi = 6.4 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 在 $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 时, 灵敏度 $K_T = 0.0109 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

为了提高温度测量的精度和可靠性, 对于光纤温度传感系统的研究可分为两个方向: 一方面对传感器探头进行优化改进, 如优化传感器的温度灵敏度、响应时间、环境适应性等; 另一方面进行传感解调系统的性能提升, 如改进波长/光强分辨率、提升数据采集能力等。

3.2 光纤传感关键技术问题

3.2.1 光纤传感器探头 近年来, 国内外关于光纤光栅温度传感器的研究主要集中在: 温度灵敏度提升、封装技术、多参数测量与交叉敏感抑制等方面。

提升温度灵敏度可以提高系统的温度测量精度, 提升传感器温度灵敏度主要有三种方法: ① 对光纤材料进行改性, 如使用稀土掺杂光纤^[41-43]或塑料光纤^[44-45]; ② 对光纤封装结构进行改进, 如进行金属封装^[46-47]、结构封装^[48]等, 利用封装对温度的敏感性, 间接提升传感器的灵敏度; ③ 通过级联 FP 腔^[49]、MZI 干涉仪^[50]等, 改变光谱的温度特性来提升温度灵敏度。

对光纤传感器进行封装, 除了是对其结构进行保护、增加敏感性之外, 还是为了适应不同参数的测量, 如铁磁流体封装测磁场^[35]、PVA 材料封装测量湿度^[51]、沸石封装进行气体传感^[36]等。

此外由于应力的存在, 由于光弹效应会改变光纤折射率以及造成光纤轴向形变, 出现光纤光栅传感器温度应力交叉敏感问题。对温度单一参数测量时, 为了避免应力变化的影响, 需要抑制传感器的交叉敏感, 如利用弛豫封装制作应力不敏感温度传感器^[52]。

3.2.2 温度信号与光学信号转换 光纤传感信号解调平台中, 波长解调工作由光纤光栅解调系统完成, 对光纤光栅反射光中心波长的测量速度和精度是解调仪的重要参数, 解调速度决定了测量的频率, 解调精度决定了测量的最小变化量^[53]。对于解调方案可以分为干涉解调法和滤波解调法。

干涉解调法包括: 非平衡迈克尔逊干涉解调法^[54]、非平衡干涉解调法^[54]、Sagnac 解调法^[55]、复合干涉解调法^[56]等。干涉解调基本原理是波长变化在经过干涉结构后转化为相位的变化, 通过检测干涉光的相位变化得出反射光中心波长的变化量, 最终实现波长解调。采用干涉解调方法的优点是其具有很好的灵敏度, 解调方案容易搭建, 缺点是由于相位变化的范围有限, 使得这种方法的测量范围有限, 外部环境的变化容易对解调结果造成干扰。

滤波解调法包括: 可调谐滤波器解调法、匹配光栅解调法、边缘滤波解调法、可调激光光源法等^[57]。滤波解调法的解调原理是采用不同的器件对传感光栅的反射光进行滤波, 从中得到不同波长的光强, 根据滤波器输出端光强的最大值与波长值的对应关系, 得出光纤光栅的中心波长值, 实现波长解调。其中基于可调谐滤波器的解调方法相对成熟, 在实际中应用范围最广。

3.2.3 光电信号转换 光纤传感器信号为光信号, 需要用光电探测器将光信号转化为电信号进行输出^[58]。常用的光电检测器件包括: 光电池、光电二极管、PIN 型光电二极管、雪崩光电二极管、光电三极管、光电位置敏感器件、光电倍增管、光敏电阻等。在光纤光栅传感解调系统中应用最多的是具有较高灵敏度与稳定性的 InGaAs 型 PIN 光电二极管^[59]。

3.2.4 高精度波长信号寻峰算法 FBG 传感解调系统的关键技术是测量其波长的移动, 而布拉格波长又对应其反射谱的峰值位置, 因此通过寻峰算法对反射光谱进行准确的峰值提取对于提高传感系统的波长分辨率和检测准确度至关重要。

典型的寻峰算法包括: 质心探测法、一般多项式拟合法、高斯-多项式拟合法、高斯拟合法、高斯公式非线性曲线拟合法等^[60]。其中高斯拟合法和高斯公式非线性拟合法的寻峰误差最小且最为稳定, 但两者的运行时间都较长, 适用于静态信号或低频动态信号的解调; 质心探测法运算速度最快, 寻峰误差相对较小, 但是其对于中高频

动态信号的解调效果不佳^[61]。

3.3 铂电阻、NTC热敏电阻和光纤温度传感比较

铂电阻、NTC热敏电阻和光纤温度传感三种温度传感方式中,铂电阻尺寸小、功耗低,在测量中具有较高的准确度和长期稳定性,但是其价格相对昂贵,灵敏度不如NTC热敏电阻与光纤温度传感器。NTC热敏电阻在三种传感器中灵敏度最高,但是其测量准确度较差,不同元件之间的互换性较差,此外由于制作材料主要为半导体材料,可能会在测量中带来额外的噪声。光纤温度传感的优点是响应时间极快,不受电磁环境干扰,具有体积小、质量轻和易于实现分布式测量的特点,但是目前光纤温度传感器在性能一致性和空

间环境适应性等方面还有待进一步研究,距工程应用还有一定差距。

4 温度控制技术

温度控制实质是热量的精确传递控制问题,在空间方面,航天器热系统的复杂性、扰动的多样性给高精度温度控制带来了巨大的挑战性。图2为典型的温度控制结构示意图,一个控温周期内,参考信号与实际温度的偏差作为控制器的输入,控制器根据偏差信号,通过控温算法计算出本周期内应当施加的控制信号大小,最终输出到控制执行元件,实现对温控对象的温度调控。

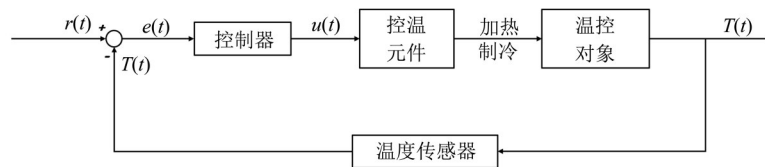


图2 温度控制结构示意图

Fig. 2 Structure of temperature control system

4.1 温度控制算法

温度控制具有大惯性、大时滞、参数时变、非线性的特点。目前国内航天器上常用的温控算法主要有开关式控制方法、比例式控制方法及开关加比例式控制方法,虽然开关控制能将温度控制在一定范围之内,但是其精度较差,难以克服温度控制的时滞性问题,不具备环境自适应性。为了提高控温精度及控温方法的自适应能力,目前以PID控制算法为主的智能型控温方法在航天器的高精度温度控制中得到广泛重视,其以经典PID控制为基础,针对饱和、干扰等具体问题对PID进行改进,通过与神经网络、模糊控制、遗传算法

等智能算法结合,实现智能化PID控制,以解决温控系统非线性和时变性,针对大时滞问题对控制精度的影响,还可引入Smith预估、Dahllin算法等进行前馈补偿。

4.1.1 经典PID控制及其改进 经典PID控制以其原理简单、鲁棒性好、可靠性高等优点,广泛应用于温度控制系统设计中。经典的PID控制的原理如图3所示,基于反馈思想,将设定值 $r(t)$ 与测量值 $y(t)$ 的偏差信号 $e(t)$ 按照比例、积分、微分的形式进行线性组合构成控制量 $u(t)$,对被控对象进行控制。

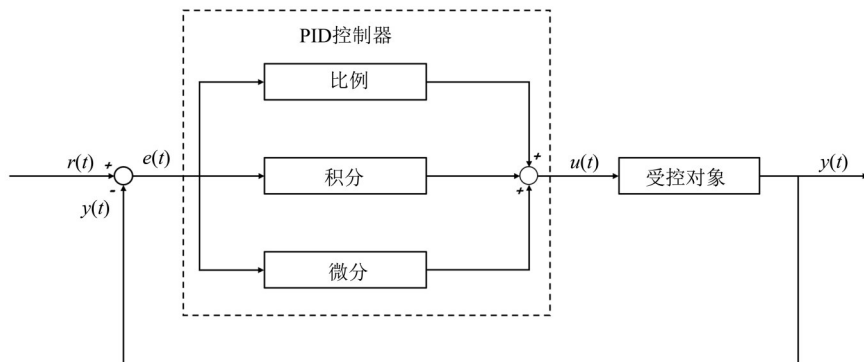


图3 经典PID控制

Fig. 3 Classic PID control

经典PID控制律可以表示为^[62]

$$G(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s), \quad (10)$$

式中 K_p 、 T_i 、 T_d 分别为比例、积分和微分时间常数, 这三个参数直接决定PID控制的品质。

在天琴一号卫星的核心载荷的温控中, 通过 16 个高精度铂电阻温度传感器和精密的热控设计, 实现在轨 ± 50 mK 的温度稳定性^[63]。针对小卫星的热控, 徐志明等利用分级结构热控设计和PID控温算法相结合, 实现敏感单元控温精度优于 ± 0.01 K^[64]。Envisat 卫星的光学系统中通过PI控制, 也实现了轨道周期内 ± 0.05 K 的温度波动控制^[65]。

为解决经典PID控制参数整定问题, 常对PID的线性控制结构进行改进。改进PID控制其实质是建立起控制偏差和PID系数的联系, 通过对比例项、积分项和微分项的改进, 以解决控制过程中的积分/微分饱和、干扰抑制等问题。对比例项的改进, 通常期望大偏差对应大比例系数, 小偏差则适当降低比例系数或设为0。Swift 卫星控温系统上应用积分分离PID控温算法, 对X射线望远镜进行温度控制, 其控制精度优于 ± 0.1 K^[66]。李小平等在投影物镜浸液温控系统设计中, 采用了分段PID控制, 针对不同偏差状况设置不同系数, 结合上位决策器, 实现温度快速稳定功能^[67]。GP-B 卫星中SQUIDs测量系统采用了带峰值滤波的PI控制算法, 结合高精度的测温和执行元件, 实现了敏

感频段 ($3.49 \cdot 10^{-2}$ rad/s) μ K 量级的精密控温^[68]。

PID控制简单、有效、可靠, 是一种简单实用的数据驱动的控制, 能有效地实现控制目标, 但也正是基于其特点, PID控制是先产生偏差后进行控制输出, 有天然的滞后性。此外单纯的PID控制也无法有效地处理强耦合、非线性和存在控制输入约束的情况, 因此通常将智能控制算法引入PID控制, 实现智能PID控制。

4.1.2 智能算法与PID控制整合 为解决温控系统中的非线性和时变问题, 常将智能算法与PID控制进行整合, 以提高系统的自适应和鲁棒性。模糊控制是当前在温控系统中与PID结合最为成熟的算法, 最常用的方式是通过模糊控制在线整定PID控制参数, 其结构如图4(a)所示。在微纳米测量环境控制箱设计中, 张辉应用模糊自整定PID控制设计, 在常温环境实现了 ± 0.05 K 的稳定性控制^[69]。

如图4(b)所示, 利用神经网络算法的非线性逼近学习能力, 可对控温对象进行在线建模识别, 在高精度温控系统中也具有重要应用^[70]。李国强等在国内某航天器铷钟的精密控温系统中, 采用多级控温方法, 核心级采用RBF神经网络PID控制算法, 实现稳态控温精度优于 ± 0.08 K^[71]。

除模糊控制、神经网络算法外, 遗传算法、蚁群算法等也可以同PID整合优化参数, 应用到高精度温控算法设计中^[72-73]。

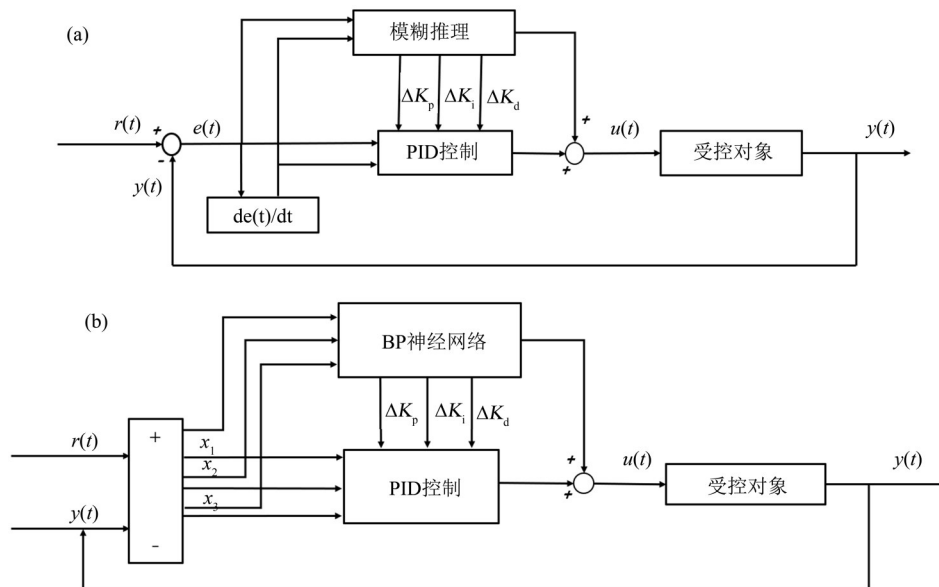


图4 模糊PID控制 (a) 和神经网络自整定PID (b)

Fig. 4 Fuzzy PID control(a) and Neural network self-tuning PID control(b)

4.2 温度控制策略

复杂温度控制系统中, 需要充分基于被控对象的结构和热特性来展开高精度控制算法的设计。通过对系统各部分热特性和环境扰动的分析, 对于主要扰动部分和滞后部分可通过串级控制的结构来解决, 将主要扰动部分置于内环控制, 而滞后部分置于外环, 通过内外环的合理设置可以有效地实现复杂系统的高精密温控。李小平等^[67]在对投影物镜浸液温控系统设计中, 采用串级控制的结构, 其控制系统框图如图5所示, 将扰动较大的换热器部分 $G_2(s)$ 划为内环控制, 采用积分分离PI控制, 由于外回路中输送管道 $G_1(s)$ 存在较大的时间滞后, 因此设置Smith预估器 $G_B(s)$ 进行滞后补偿, 外回路主控制器采用递阶控制的策略, 可

根据起始状态的不同进行状态的切换, 最终实现快速控制到稳定温度工作点的目的。

多层分级控制的热控结构设计是实现高精度温控的有效措施, 它通过多个层级的温控, 从外到内, 由粗到精逐级进行控制。李国强等在国内某航天器铷钟的精密控温系统的设计^[71], 以及徐志明针对小卫星的热控设计^[64], 都采用了分级结构热控设计策略实现核心级的高精密温控。韩国BUPE的UPCMM(Ultra Precision CMM)研究计划, 分别通过绝热层、隔音层、真空层和核心层实现逐级控温, 达到核心级1 mK的恒温环境控制^[74]。在微纳米测量环境搭建中, 美国NIST分子测量机为实现核心级 ± 5 mK的精密温度控制, 也采用了多层分级控制^[75]。

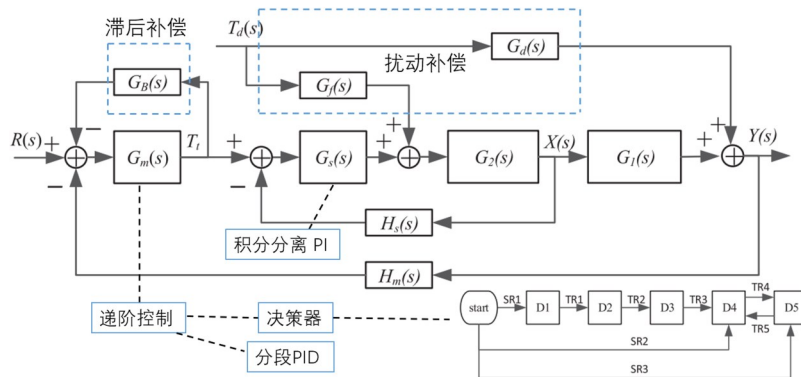


图5 投影物镜温控系统框图^[67]

Fig. 5 Temperature control system block diagram of projection objective^[67]

5 结 语

目前传统的电阻式温度传感仍然是实现高精度温度传感与测量的重要手段, 铂电阻与NTC热敏电阻两种传感方式中, 灵敏度更高的热敏电阻更适合用于引力波探测卫星中的超低噪声温度测量。此外随着技术的发展, 新型光纤温度传感也

是未来实现高精度测量的潜在温度传感技术。对于高精度温度控制, 基于PID算法的温度控制是实现的重要手段之一, 良好的控制结构和策略设计, 不仅能提高系统的适应性和鲁棒性, 抑制扰动和消除时滞, 提升控制精度, 还能灵活满足设计需求, 在保障控制目标实现的同时提升系统整体控制品质。

参考文献:

- [1] LUO J, CHEN L S, DUAN H Z, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector [J]. Classical and Quantum Gravity, 2016, 33(3): 035010.
- [2] BENEDICT R P. Fundamentals of temperature, pressure, and flow measurements [M]. John Wiley & Sons, 1984.
- [3] MICHALSKI L, ECKERSDORF K, KUCHARSKI J, et al. Dynamic temperature measurement [C]. Proceedings Tempus Summer School Sensor Construction. 2001: 326-351.
- [4] BENTLEY J P. Temperature sensor characteristics and measurement system design [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1984, 17(6): 430.
- [5] CROVINI L, JUNG H J, KEMP R C, et al. The platinum resistance thermometer range of the International Temperature Scale of 1990 [J]. Metrologia, 1991, 28

- (4): 317.
- [6] CHAUHAN J, NEELAKANTAN U. An experimental approach for precise temperature measurement using platinum RTD PT1000 [C]//2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). IEEE, 2016: 3213-3215.
- [7] ATHERTON A. The applicability of the IPTS-68 interpolation equations to PRTs which have low temperature coefficients of resistance [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 1988, 10 (2) : 110-112.
- [8] AMBROSETTI R, MATTEOLI E, RICCI D. Note: A versatile, stable, high-resolution readout system for RTD and thermistor sensors [J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(9): 096101.
- [9] ROSS-PINNOCK D, MAROPOULOS P G. Review of industrial temperature measurement technologies and research priorities for the thermal characterisation of the factories of the future [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016, 230(5): 793-806.
- [10] GUILLET B, MÉCHIN L, ROBBES D. High performance temperature controller: application to the excess noise measurements of YBCO thermometers in the transition region [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/conk-mat/0305469>.
- [11] VALENTINI D, VACANCE M, BATTAGLIA D, et al. GOCE instrument thermal control [J]. SAE Transactions, 2006: 115-126.
- [12] STEIGER C, MARDLE N, EMANUELLI P P. GOCE end-of-mission operations report [R]. ESA2014, 2014.
- [13] WILSON J S. Sensor technology handbook [M]. Elsevier, 2004.
- [14] LIU T, ZHANG H, MA P, et al. Core-shell NTC materials with low thermal constant and high resistivity for wide-temperature thermistor ceramics [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2019, 102(8): 4393-4398.
- [15] STEINHART J S, HART S R. Calibration curves for thermistors [C]//Deep sea research and oceanographic abstracts. Elsevier, 1968, 15(4): 497-503.
- [16] KIM J D, JEONG D H, SONG H J, et al. Efficient calibration tool for thermistor [J]. Sens Mater, 2015, 27 (8): 593-598.
- [17] SCHWEIGER H G, MULTERER M, GORES H J. Fast multichannel precision thermometer [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(5): 2002-2009.
- [18] WUDY F E, MOOSBAUER D J, MULTERER M, et al. Fast micro-Kelvin resolution thermometer based on NTC thermistors [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2011, 56(12): 4823-4828.
- [19] LOBO A, NOFRARIAS M, SANJUAN J. Thermal diagnostics for LTP [J]. Classical and Quantum Gravity, 2005, 22(10): S171.
- [20] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, et al. Beyond the required LISA free-fall performance: new LISA Pathfinder results down to 20 μ Hz [J]. Physical Review Letters, 2018, 120(6): 061101.
- [21] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, et al. Temperature stability in the sub-milliHertz band with LISA Pathfinder [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019, 486(3): 3368-3379.
- [22] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication [J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647-649.
- [23] HILL K O, MELTZ G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [24] LAM D K W, GARSIDE B K. Characterization of single-mode optical fiber filters [J]. Applied Optics, 1981, 20(3): 440-445.
- [25] LEMAIRE P J, VENGSARKAR A M, REED W A, et al. Refractive-index changes in optical fibers sensitized with molecular hydrogen [C]// Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 1994: TuL1.
- [26] MELTZ G, MOREY W W, GLENN W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method [J]. Optics Letters, 1989, 14(15): 823-825.
- [27] HILL K O, MALO B, VINEBERG K A, et al. Efficient mode conversion in telecommunication fibre using externally written gratings [J]. Electronics Letters, 1990, 26(16): 1270-1272.
- [28] HILL K O, MALO B, BILODEAU F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask [J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(10): 1035-1037.
- [29] HIRAYAMA N, SANO Y. Fiber Bragg grating temperature sensor for practical use [J]. ISA Transactions, 2000, 39(2): 169-173.
- [30] VORATHIN E, HAFIZI Z M, ISMAIL N, et al. Review of high sensitivity fibre-optic pressure sensors for low pressure sensing [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 121: 105841.
- [31] LEE C L, YOU Y W, DAI J H, et al. Hygroscopic polymer microcavity fiber Fizeau interferometer incorporating a fiber Bragg grating for simultaneously sensing humidity and temperature [J]. Sensors and Actuators

- B: Chemical, 2016, 222: 339-346.
- [32] YAKUSHIN S S, WOLF A A, DOSTOVALOV A V, et al. A study of bending effect on the femtosecond-pulse inscribed fiber Bragg gratings in a dual-core fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 43: 101-105.
- [33] ZHAO Y, HUANG H, WANG Q. Interrogation technique using a novel spectra bandwidth measurement method with a blazed FBG and a fiber-optic array for an FBG displacement sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 165(2): 185-188.
- [34] TIAN P, ZHU Z, WANG M, et al. Refractive index sensor based on fiber bragg grating in hollow suspended-core fiber [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(24): 11961-11964.
- [35] CHEN Y, HAN Q, YAN W, et al. Magnetic-fluid-coated photonic crystal fiber and FBG for magnetic field and temperature sensing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(23): 2665-2668.
- [36] SNELDERS D J M, MACKENZIE F O V, BOERSMA A, et al. Zeolites as coating materials for Fiber Bragg Grating chemical sensors for extreme conditions [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 235: 698-706.
- [37] JEWART C, MCMILLEN B, CHO S K, et al. X-probe flow sensor using self-powered active fiber Bragg gratings [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 127(1): 63-68.
- [38] MENDEZ A. Fiber Bragg grating sensors: a market overview[C]//Third European Workshop on Optical Fibre Sensors. International Society for Optics and Photonics, 2007, 6619: 661905.
- [39] 孙圣和. 现代传感器发展方向[J]. *电子测量与仪器学报*, 2009, 23(1): 1-10.
SUN S H. Development direction of modern sensors [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2009, 23(1): 1-10.
- [40] KASHYAP R. Fiber bragg gratings [M]. Academic Press, 2009.
- [41] VENUGOPALAN T, SUN T, GRATAN K T V. Temperature characterization of long period gratings written in three different types of optical fibre for potential high temperature measurements [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 160(1/2): 29-34.
- [42] GAO X, NING T, ZHANG C, et al. A dual-parameter fiber sensor based on few-mode fiber and fiber Bragg grating for strain and temperature sensing [J]. *Optics Communications*, 2020, 454: 124441.
- [43] LEI W, CHEN H. Reflectivity measurement of fiber Bragg grating by cavity ring-down spectroscopy technique[J]. *Optik*, 2018, 172: 526-530.
- [44] ZHANG Z F, TAO X M. Intrinsic temperature sensitivity of fiber Bragg gratings in PMMA-based optical fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 25(3): 310-312.
- [45] BHOWMIK K, PENG G D, AMBIKAI RAJAH E, et al. Intrinsic high-sensitivity sensors based on etched single-mode polymer optical fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 27(6): 604-607.
- [46] KANG H C, KIM D, SONG M. Sensitivity enhancement of FBG temperature sensor [C]//Optical Sensing and Detection Ii. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8439: 84392C.
- [47] FENG Y, ZHANG H, LI Y L, et al. Highly sensitive Ni-Cu duplex metal coated fiber Bragg grating temperature sensor [C]//2009 Symposium on Photonics and Optoelectronics. IEEE, 2009: 1-4.
- [48] BARRERA D, FINAZZI V, VILLATORO J, et al. Packaged optical sensors based on regenerated fiber Bragg gratings for high temperature applications [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 12(1): 107-112.
- [49] LIU Y, YANG D, WANG Y, et al. Fabrication of dual-parameter fiber-optic sensor by cascading FBG with FPI for simultaneous measurement of temperature and gas pressure [J]. *Optics Communications*, 2019, 443: 166-171.
- [50] CAO Y, LIU H, TONG Z, et al. Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on a Mach-Zehnder interferometer cascaded with a fiber Bragg grating [J]. *Optics Communications*, 2015, 342: 180-183.
- [51] QI Y, JIA C, TANG L, et al. Simultaneous measurement of temperature and humidity based on FBG-FP cavity [J]. *Optics Communications*, 2019, 452: 25-30.
- [52] SONG L J, YU G Q. The packaging technique about FBG temperature sensor [C]// 2010 Second International Conference on Communication Systems, Networks and Applications. IEEE, 2010, 1: 67-70.
- [53] 任宇. 光纤光栅传感器解调系统设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
REN Y. Design of fiber bragg grating sensor demodulation system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [54] KERSEY A, BERKOFF T, MOREY W. High-resolution fibre-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection [J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(3): 236-238.
- [55] KIM C S, LEE T H, YU Y S, et al. Multi-point interrogation of FBG sensors using cascaded flexible wavelength-division Sagnac loop filters [J]. *Opt Express*, 2006, 14(19): 8546-8551.
- [56] LEE B. Review of the present status of optical fiber sen-

- sors [J]. *Optical Fiber Technology*, 2003, 9 (2) : 57-79.
- [57] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, et al. Fiber grating sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1442-1463.
- [58] 刘剑, 孙善会. 微弱光电信号测量电路的设计[J]. *新型工业化*, 2011, 1(9): 69-72.
LIU J, SUN S H. Design of weak photoelectric signal measurement circuit [J]. *New Industrialization*, 2011, 1(9): 69-72.
- [59] WANG C, ZHANG Y, SUN J, et al. Research on a fiber bragg grating temperature measurement method for inter-satellite laser link [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(1): 1-10.
- [60] 陈勇, 刘焕淋. 光纤光栅传感技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018:63-66.
- [61] 陈志军, 白剑, 吴祖堂, 等. 光纤布喇格光栅反射谱寻峰算法优化及比较[J]. *光子学报*, 2015, 44 (11): 83-88.
CHEN Z J, BAI J, WU Z T, et al. Optimization and Comparison of peak searching algorithm for Fiber Bragg Grating reflection Spectrum [J]. *Acta Photonics*, 2015, 44(11): 83-88.
- [62] 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2001.
- [63] LUO J, BAI Y Z, CAI L, et al. The first round result from the TianQin-1 satellite [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2020, 37(18): 185013.
- [64] 徐志明. 小卫星高精度热控方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
XU Z M. Study on high-precision thermal control method for small satellites [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [65] LEMMEN M, KOUWEN J, KOOREVAAR F. In-flight results of the sciamachy optical assembly active thermal control system[C]// 34th International Conference on Environmental Systems (ICES) Colorado Springs. Colorado, 2004:19-22.
- [66] CHOI M K. Thermal assessment of swift instrument module thermal control system and mini heater controllers after 5+years in flight [C]//40th International Conference on Environmental Systems, 2010.
- [67] LI X P, ZHAO Y W, LEI M. High precision and stability temperature control system for the immersion liquid in immersion lithography[P]. *Flow Measurement & Instrumentation*:S095559861630111X.
- [68] LI J, LOCKHART J M, BORETSKY P. Cryogenic precision digital temperature control with peaked frequency response [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(5):1182.
- [69] 张辉. 微纳米测量环境控制机理及系统研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2009.
ZHANG H. Study on environmental control mechanism and system of micro-nano measurement [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [70] 李秀丽. 基于神经网络的PID算法在黑体辐射源温度控制中的研究[D]. 天津:天津理工大学, 2018.
LI X L. Research on temperature control of blackbody radiation source based on PID algorithm based on neural network [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2018.
- [71] 李国强, 耿利寅, 童叶龙. 航天器伽钟的一种精密控温系统[J]. *航天器工程*, 2011, 20(4):93-98.
LI G Q, GENG L Y, TONG Y L. A precision temperature control system of spacecraft rubidium clock [J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(4):93-98.
- [72] 王健. 基于遗传蚁群算法的恒温控制系统的研究与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2018.
WANG J. Research and implementation of a thermostatic control system based on genetic ant colony algorithm [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.
- [73] 刘智城, 杨向宇. 基于蚁群算法分数阶PID控制器在温度控制系统的应用[J]. *机械制造与自动化*, 2018, 47(5):218-220+224.
LIU Z C, YANG X Y. Application of fractional-order PID controller based on ant colony algorithm in temperature control system [J]. *Machinery Manufacturing and Automation*, 2018, 47(5):218-220+224.
- [74] FAN K C, WANG H M, LIU Y C. Development of a constant temperature environment chamber with high stability [J]. *Materials Ence Forum*, 2008, 594: 78-83.
- [75] KRAMAR J, JUN J, PENZES W, et al. The molecular measuring machine [C]//Proceedings of the 1998 International Conference on Mechatronic Technology. Hsinchu, Taiwan, 1998: 477-487.