

# 半球谐振陀螺仪温控系统的设计

秦 琴<sup>1</sup>, 姜景科<sup>1</sup>, 陈振宇<sup>1</sup>, 吕沁元<sup>1</sup>, 李 强<sup>2</sup>

(1. 上海第二工业大学 工学部, 上海 201209; 2. 上海思晋智能科技有限公司, 上海 201209)

**摘要:** 热漂移是影响半球谐振陀螺使用精度的重要因素之一。为了保证半球谐振陀螺的输出精度,设计了一种半球谐振陀螺温控系统,为陀螺提供一个恒温环境,减小温度变化带来的影响,避免热漂移的产生,进而保证半球谐振陀螺的使用精度。该系统采用硬件结构设计结合软件编程,运用 PID 控制算法结合继电反馈法自整定参数,实现了整个温控系统的设计。硬件设计了恒温箱和控制柜,其中恒温箱内置金属托盘,用于放置半球谐振陀螺仪;控制柜内置油循环系统和数据采集设备,用于系统的加热、冷却和数据采集;软件采用 LabVIEW 完成整个系统程序设计,并在上位机提供可视化界面。整个系统通过反复实验,结果表明,该温控系统能够达到预期的设计效果,温控精度可以达到 $\pm 0.05$  °C。

**关键词:** 热漂移; 半球谐振陀螺; PID; 继电反馈法; 自整定参数

中图分类号: TN06

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.201180

中文引用格式: 秦琴, 姜景科, 陈振宇, 等. 半球谐振陀螺仪温控系统的设计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(5): 64-68, 72.

英文引用格式: Qin Qin, Jiang Jingke, Chen Zhenyu, et al. Design of temperature control system of hemispherical resonant gyroscope[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(5): 64-68, 72.

## Design of temperature control system of hemispherical resonant gyroscope

Qin Qin<sup>1</sup>, Jiang Jingke<sup>1</sup>, Chen Zhenyu<sup>1</sup>, Lv Qinyuan<sup>1</sup>, Li Qiang<sup>2</sup>

(1. Engineering Department of Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China;

2. Shanghai Synergy Technology Intelligence Co., Ltd., Shanghai 201209, China)

**Abstract:** Thermal drift is a key factor in gyroscope precision. To ensure the output accuracy of the hemispherical resonant gyroscope, a temperature control system for the hemispherical resonant gyroscope has been designed in this article. It provides gyroscope with constant temperature to reduce the influence of temperature and inhibit the thermal drift. This system combines hardware design and software programming. The relay-type self-tuning PID control algorithm is applied so that the design of hemispherical resonant gyroscope temperature control system can be completed. An incubator and a control cabinet has been designed as hardware. A metal tray is placed in the incubator to hold the hemispherical resonant gyroscope. Oil circulate system and data acquisition equipment in the control cabinet play the role of heating, cooling and data acquiring. From the aspect of software, the whole system is programmed by LabVIEW, a visual interface is also developed in the master. The experimental results show that the temperature control system can achieve the expected design effect, and the temperature control accuracy can reach $\pm 0.05$  °C.

**Key words:** thermal drift; hemispherical resonant gyroscope; PID; relay feedback method; self-tuning parameter

## 0 引言

半球谐振陀螺仪(HRG)是利用哥式效应工作的谐振式惯性敏感器件,它不具备传统陀螺仪的活动支撑和转子,而是采用半球谐振子来替代转动部件,所以具有精度高、功率低、启动快、可靠性高、寿命长等特点。如今,国内外半球谐振陀螺已经作为产品在导航系统、宇宙飞船、空间望远镜、卫星探测等空间领域和军事战争领域上得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。

半球谐振子是半球谐振陀螺仪的核心部件,它是一个半球形的薄壳弹性体,并且带有中心支撑杆,支撑杆是与半球形薄壳一体加工而成的。国内外所研制的半球

谐振子,其材料大多为熔融的石英晶体,直径一般为 15~60 mm,壁厚一般为 0.3~1.0 mm。半球谐振子石英晶体材料的密度、泊松比、弹性模量、膜层应力及半球谐振子球面半径和厚度等受温度变化的影响较大。温度的变化会导致半球谐振子物理参数发生变化,半球谐振子参数的变化会造成谐振子固有频率的变化及半球谐振陀螺仪的时间常数差异,致使半球谐振陀螺仪在使用时出现漂移现象<sup>[3]</sup>。

半球谐振子在工作过程中,由于半球谐振陀螺仪内部热源释放热量和周围环境温度变化,陀螺仪内部会产生温度梯度,因此热漂移对于半球谐振陀螺仪来说是难

以避免的误差源<sup>[4]</sup>。针对半球谐振陀螺仪热漂移问题,本文提出的方法是采用精确温度控制的方式,使半球谐振陀螺能够保持在一个恒温环境中,从而减小热漂移带来的影响,保证半球谐振陀螺仪使用精度。

由于被控对象半球谐振陀螺仪为电子设备,如果直接采用传统的电控温的方式,必然会带来电磁干扰,影响半球谐振陀螺仪的使用精度。因此,本文在控制方式上,摒弃传统的电控温的方式,采用油控温的方式,杜绝电磁干扰,在适当牺牲控制速率的同时保证控制精度;在控制算法上,采用二级 PID 控制方式,较传统的单级 PID 控制大幅度提升了控制效率。

## 1 系统构造

本系统结构分为三部分,分别是恒温箱、控制柜和上位机,如图 1 所示。

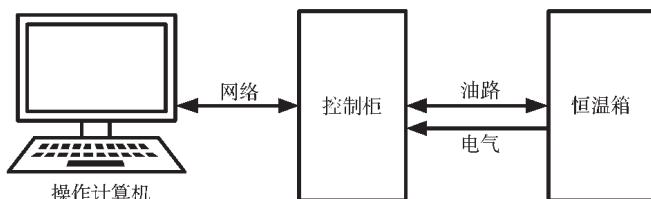


图 1 系统结构示意图

恒温箱,内置金属托盘,用于放置半球谐振陀螺仪;托盘底部设有测温点,实时测量托盘温度。整个恒温箱的设计能够为半球谐振陀螺仪提供恒温的工作环境,抑制热漂移的产生。

控制柜,内置油箱、油管、油泵、加热模块、制冷模块、C-DAQ 数据采集设备和信号调理电路等,用于对恒温箱的加热和冷却以及数据的采集和调理。

上位机为可操作计算机,内置 LabVIEW 编程软件,用于接收数据、处理数据和系统可视化。

控制柜和恒温箱采用物理连接,即油管和电气连接,用于对恒温箱进行加热和冷却;控制柜和上位机采用网络连接完成数据的传输。

## 2 硬件结构

### 2.1 恒温箱设计

恒温箱内置金属托板,用于放置半球谐振陀螺仪。其结构示意图如图 2 所示。

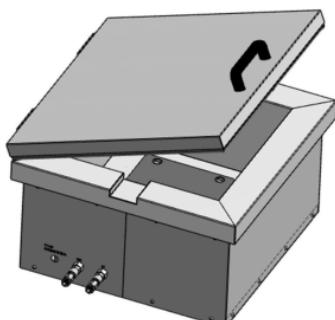


图 2 恒温箱结构示意图

恒温箱由箱盖、箱体和油管构成。箱盖由两层盖板、酚醛树脂拉手和高温密封条组成,两层盖板的设计和高温密封条具有良好的保温效果;箱体由内腔、外框、底板和金属托板组成,油管置于内腔、外框与底板之间,呈 S 形分布,如图 3 所示,目的是保温和保证箱体受热均匀。金属托板采用紫铜材料,紫铜又名红铜,具有很好的导热性,其热导率仅次于银,所以被广泛用于制作导热器材,金属托板用于放置半球谐振陀螺仪。

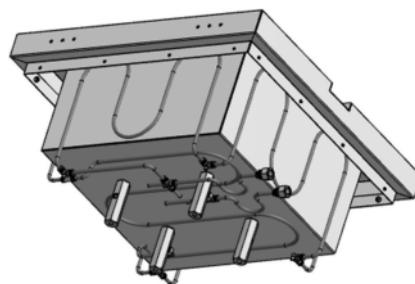


图 3 恒温箱油管分布图

### 2.2 控制柜设计

控制柜用于对恒温箱进行油温加热或冷却控制,营造恒温环境,同时对数据进行实时采集和调理。其结构示意图如图 4 所示。

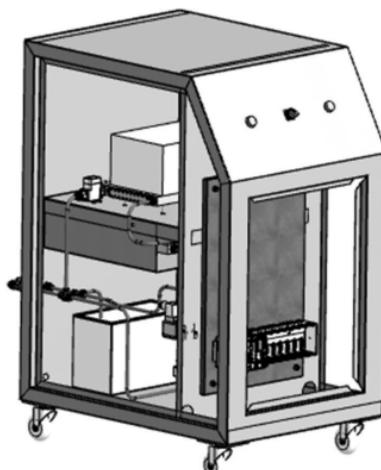


图 4 控制柜结构示意图

控制柜由金属柜体、油循环系统、NI C 系列数据采集卡构成。金属柜体由外置开关、脚轮和可拆卸金属门板组成,脚轮和可拆卸门板的设计使得前期装配和后期维护变得更加便利。

油循环系统由油箱、油管、油泵、加热模块和制冷模块组成,如图 5 所示。

(1) 加热时,系统经油箱→V1→油泵→一级温控(油加热)→二级温控(油冷却)→V3→恒温箱→止回阀→油箱;

(2) 回收油时,系统经恒温箱→V2→油泵→V4→油箱;

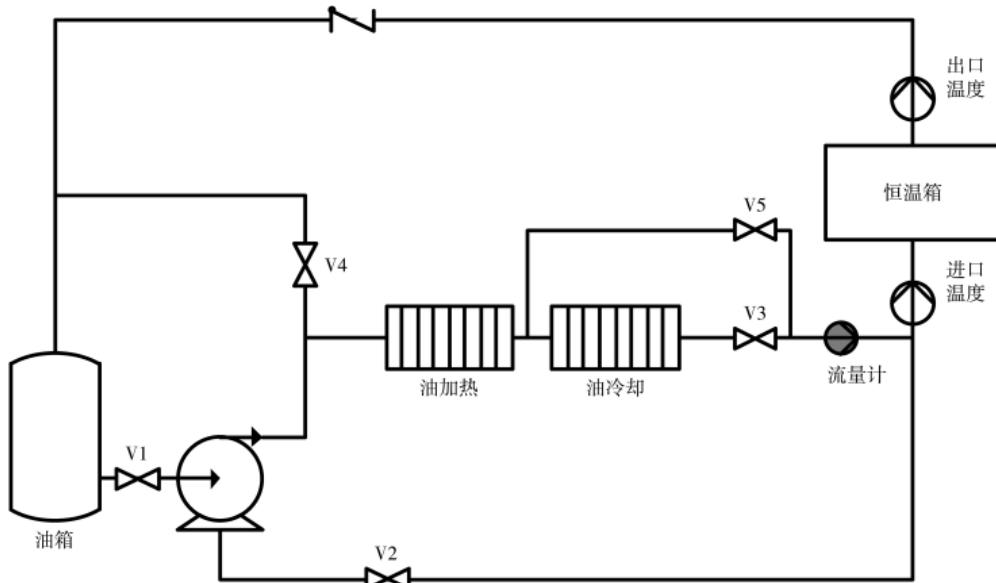


图 5 油循环系统示意图

(3)V5 用于旁路油冷却,用在某些纯加热情况下。

油箱内的油采用的是变压器油,变压器油是天然石油中经过蒸馏、精炼而获得的一种矿物油,是石油中的润滑油馏份经酸碱精制处理得到的纯净稳定、粘度小、冷却性好的液体天然碳氢化合物的混合物。其俗称方棚油,为浅黄色透明液体。使用变压器油的好处是绝缘、消弧和散热。

油加热模块由硅橡胶加热片和铝合金板组成,油冷却模块由半导体制冷片和铝合金板组成,铝合金板表面开有 S 形凹槽,目的是让流经模块的油受热均匀,硅橡胶加热片和半导体制冷片采用直流功放驱动,尽量将电磁干扰减小到最低;数据采集卡实现实时温度数据采集。

### 3 软件设计

#### 3.1 软件简介

上位机和下位机程序设计均采用 LabVIEW<sup>[5]</sup>软件平台。上位机功能模块划分为以下几个部分:用户管理、参数设置、测试启动、维护操作、PID 自整定、数据浏览,采用事件结构和状态机的设计方式,主要功能是将驱动事件发送给下位机,同时接收下位机实时数据并显示和存储;下位机采用多线程并行的设计模式,主要包括通信处理、模拟实时采集、模拟输出数据处理、数字输入实时采集和恒温 PID 控制 5 个线程,其中恒温 PID 控制为核

心线程,采用实时双 PID 循环,采集温度,并依据改进的 PID 算法进行加热模块和冷却模块的控制。

#### 3.2 改进 PID 算法

传统的 PID 控制算法多为单级控制,但是针对本系统控制精度并不理想,效率也不高。而且系统如果要控制在低温状态,那么仅仅只有加热是实现不了的,所以后来改成加热和冷却 PID 同时工作,通过采用继电反馈法自动在线调整 PID 参数,并通过不断的试验,最终达到既能加快控温,同时又能保证控温精度。改进的 PID 算法结构如图 6 所示。

#### 3.3 继电反馈法整定参数

系统采用 PID 算法实现温度控制,算法的关键在于参数整定问题,运用合适的参数整定算法往往能够达到更好的控制效果。PID 参数整定的算法有很多,包括临界比例度法、经验数据法、衰减曲线法、试凑法、反应曲线法、继电反馈法、模式识别法等。本系统则选用继电反馈算法整定参数,并运用 LabVIEW 软件设计 PID 参数自整定控制程序<sup>[6]</sup>。

ASTROM K J 在 1984 年提出基于继电反馈控制的 PID 参数整定方法<sup>[7]</sup>。依据在于大多数的对象在继电特性的非线性环节作用下都能产生稳定的振荡。当过程输出达到稳定状态时启动整定程序,控制开关切换到继电

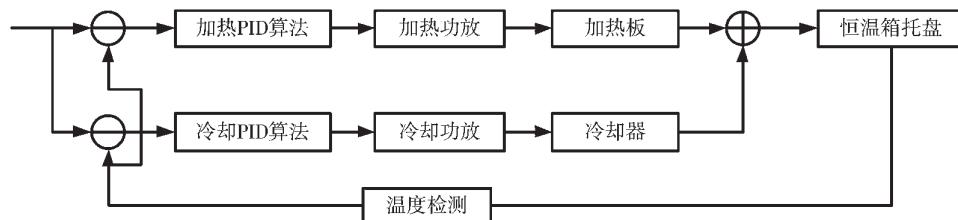


图 6 改进 PID 算法结构图

整定上,通常会产生一个稳定的极限环振荡,等到不变的振荡输出量产生,通过测量这个极限环输出的振荡频率与幅值,就可以测得对象临界点的信息(即临界增益 $K_u$ 和临界周期 $T_u$ ),继而通过Z-N整定公式计算出PID调节参数。图7为继电反馈PID参数自整定结构图。

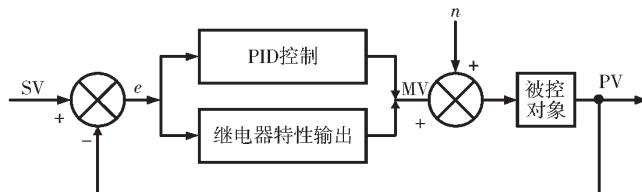


图7 继电反馈PID参数自整定结构图

继电反馈法自整定参数可以分为两个阶段:继电整定阶段和PID控制阶段,在继电整定刚开始进行时,PID控制参数是未知的,需要先进入整定阶段得到临界参数信息。整定阶段系统产生稳定的等幅振荡,以理想继电器特性为例,继电环节输出方波信号,这个信号作为被控对象的输入可令其输出相同频率的周期振荡,当误差反馈到继电环节就可使系统产生稳定的极限环。所谓极限环,也称为自激振荡,是非线性系统在初始状态的激励下可以产生固定振幅和固定频率的周期振荡<sup>[8-9]</sup>。也并不是所有系统都能产生极限环,只有被控对象满足以下条件:在高频处具有至少 $\pi$ 个弧度的相位滞后。继电反馈原理如图8所示。

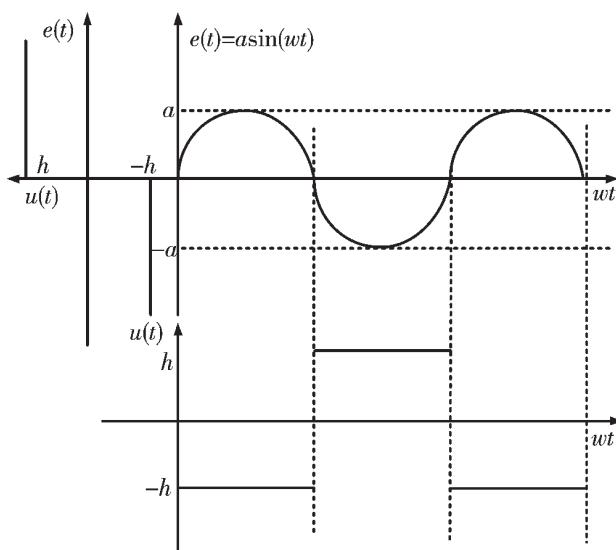


图8 继电反馈自整定原理图

当继电输出 $u(t)=h$ 时,由于继电环节输出滞后输入 $\pi$ 个弧度,当输入 $e(t)$ 增大时,继电器输出 $u(t)=-h$ ,如此循环反复进行,通过继电反馈即可得到周期为 $T$ 的等幅振荡曲线。继电反馈整定阶段主要任务是求取临界周期 $T_u$ 和临界增益 $K_u$ ,当进入PID控制阶段后,将求取的临界参数结合Z-N整定公式即可实现PID自整定<sup>[10]</sup>。

Z-N整定公式如表1所示。

表1 Z-N整定公式

控制器	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.50K_u$		
PI	$0.45K_u$	$0.85T_u$	
PID	$0.60K_u$	$0.50T_u$	$0.125T_u$

运用LabVIEW软件工具设计PID自整定控制程序,系统程序设计流程如图9所示。

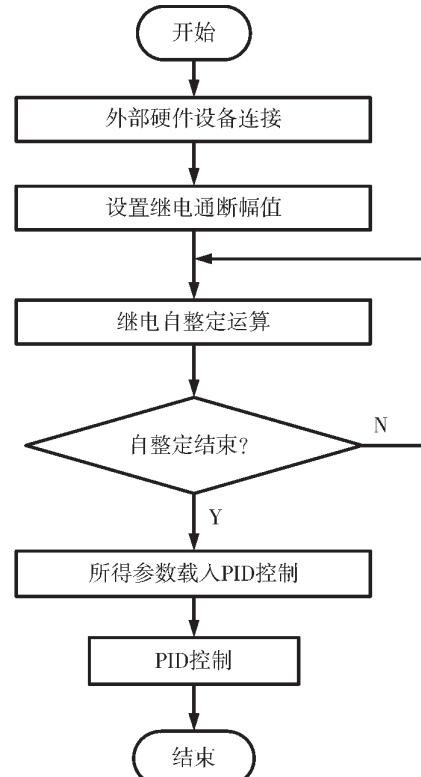


图9 系统自整定控制流程图

整个系统在实际运行过程中,首先需要设定继电通断幅值,之后进行PID参数自整定,此时继电反馈整定程序开始运行,等待系统产生稳定等幅振荡后,输出临界参数载入PID控制器<sup>[11-13]</sup>,如图10所示。

测试试验中温度设定值为60℃,系统由于上次实验,仍处于保温状态,当设备关闭时,温度有缓慢下降趋势;打开温控设备,由于加热模块功率较大,系统在很短时间内温度上升明显,超过预设值;之后冷却模块发挥作用,温度下降,收敛速度较自然冷却快得多。加热模块和冷却模块同时工作,通过参数调节最后达到平衡状态,达到预期效果,运行结果如图11所示。

#### 4 结论

温度是影响半球谐振陀螺仪使用精度的重要因素之一。本文设计了一套温控系统,使得半球谐振陀螺仪能够工作在一个恒温的测试环境中,减小热漂移带来的

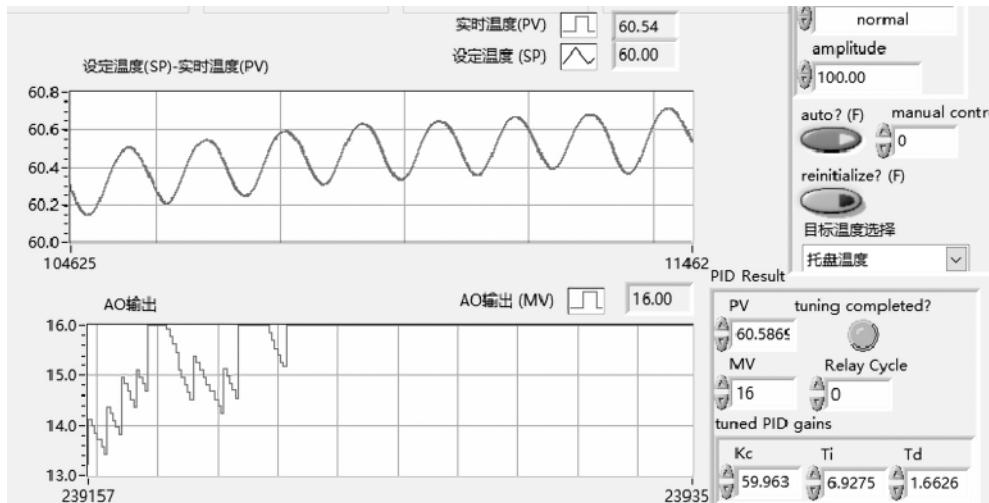


图 10 PID 自整定控制面板

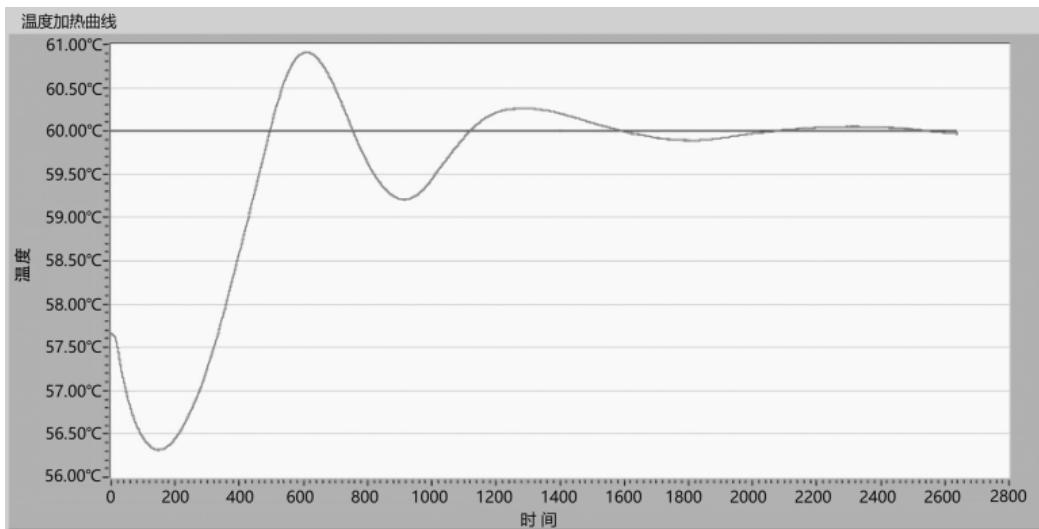


图 11 系统运行结果——温度曲线图

影响,从而保证陀螺测试时的输出精度。本系统通过相关硬件设计,结合 NI 公司 LabVIEW 软件工具,运用 PID 参数自整定算法,实现了对恒温箱的精确温控,通过反复试验,整个系统运行良好,控制精度可达到 $\pm 0.05$  °C。

半球谐振陀螺仪为电子类产品<sup>[14]</sup>,本系统采用油控温的方式,杜绝测试过程中的电磁干扰,这一思路可以为日后工业电子类产品的温控方案提供参考<sup>[15]</sup>。

#### 参考文献

- [1] ROZELLE D M. The hemispherical resonator gyro: from wineglass to the planets[J]. Advances in the Astronautical Encs, 2013, 134: 1157–1178.
- [2] 高胜利.半球谐振陀螺的分析与研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2008.
- [3] 吕志清.半球谐振陀螺(HRG)信号处理技术[J].中国惯性技术学报, 2000, 8(3): 58–61.
- [4] 倪受东, 吴洪涛, 朱剑英, 等.微型半球陀螺仪的误差源研究[J].传感器与微系统, 2007, 26(1): 30–32.
- [5] HUBISZ J L. Hands-on introduction to LabVIEW for scientists and engineers[J]. The Physics Teacher, 2014, 52(5): 318–319.
- [6] 李宁, 郑艺华.基于 LabVIEW 的 PID 自整定温控系统研究[J].青岛大学学报(工程技术版), 2019, 34(2): 27–32.
- [7] HANG C C, ASTROM K J, WANG Q G. Relay feedback auto-tuning of process controllers—A tutorial review[J]. Journal of Process Control, 2002, 12(1): 143–162.
- [8] BAZANELLA A S, PARRAGA A. Tuning PID controllers from sampled-data relay feedback experiments[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(4): 125–130.
- [9] HOFREITER M. Biased-relay feedback identification for time delay systems[J]. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(1): 14620–14625.
- [10] 马良威.阀门定位控制参数整定与算法研究[D].杭州:浙江工业大学, 2020.

(下转第 72 页)

放、自由的安全权限管理,进一步增强了5G网络数据安全保护。

#### (4) 安全能力开放

5G网络能力开放为垂直行业开放API接口,不仅仅为第三方开放业务服务,还拓展了相应的安全能力,可将系统侧的安全能力渗透至业务层面,传统的业务提供商专注于业务逻辑开发,提升用户的友好体验,同时通过安全层面的边云协同处理,将5G中心侧安全能力拓展至网络边缘,能够为垂直行业用户提供相匹配的安全防护能力,支撑其将关键业务迁移至5G网络,真正实现5G安全能力的开放。

#### (5) 隐私保护

5G网络对于多种应用场景以及垂直行业的支持,加深了用户对于隐私数据泄露的担忧,5G网络需提供差异化的按需的隐私保护能力,可对用户身份标识、位置信息、用户行为以及信息内容进行可配置的隐私保护。通过明确5G网络涉及的隐私范围,引入数据最小化、数据访问控制、匿名化处理与数据加密存储等技术,在空口、网络、控制面、数据面、传输层以及应用层各个层面提供隐私保护能力。

### 3 结论

5G网络作为驱动社会信息化转型的关键通信基础设施,将为社会各个领域的发展带来颠覆性的影响。5G网络在终端、接入网、核心网以及业务领域引入了诸多创新技术,并采用了更为灵活、开放的网络架构,为开启5G全面发展格局打下了重要基石,但同时也带了全新的安全挑战。本文全方位地分析了5G网络在各个层面存在的安全风险,并给出了具体的防护体系建设建议,可支撑未来5G网络安全部署和发展。

### 参考文献

- [1] 黄宇红,王晓云,刘光毅.5G移动通信系统概述[J].电子技术应用,2017,43(8):3-7.
- [2] 刘光毅,方敏,关皓,等.5G移动通信系统:从演进到革命[J].电信科学,2016,32(11):166.
- [3] 唐连雷,王海龙.5G移动通信应用场景及关键技术探讨[J].  
上接第68页)
- [11] PARK B E, KIM K H, KANG H S, et al. Improved relay feedback method under noisy and disturbance environments[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2019, 52(5): 430-438.
- [12] Wang Liuping. Automatic tuning of PID controllers using frequency sampling filters[J]. IET Control Theory & Applications, 2017, 11(7): 985-995.
- [13] Li Hongyan. The ziegler-nichols PID parameters setting method based on the ideal relay feedback identification and its improvements[J]. Advanced Materials Research, 2013, 2534: 756-759.

中国新通信,2018,20(22):141.

- [4] 陈虹旭,李菲,李晓坤,等.基于eMBB,mMTC,uRLLC场景的第五代移动通信方法研究[J].智能计算机与应用,2019,9(6):13-20,23.
- [5] 杨燕玲,阮丹.eMBB应用场景下的5G无线网络部署方案研究[J].广东通信技术,2018,38(10):55-58,79.
- [6] 赵丽彤.面向5G的大规模机器类通信关键技术研究及标准化[D].北京:北京邮电大学,2018.
- [7] 朱红梅,林奕琳,刘洁.5G URLLC标准、关键技术及网络架构的研究[J].移动通信,2017,41(17):28-33.
- [8] 任驰,马瑞涛,REN,等.网络切片网络切片:构建可定制化的5G网络[J].中兴通讯技术,2018,24(1):26-30.
- [9] 常志泉,谢玉娟.5G网络安全技术探究[J].信息安全研究,2019,5(12):1124-1128.
- [10] 崔媛,淦贵生.第五代移动通信技术网络安全问题研究[J].通信企业管理,2020(9):77-79.
- [11] 黄开枝,金梁,赵华.5G安全威胁及防护技术研究[J].邮电设计技术,2015(6):8-12.
- [12] 季新生,黄开枝,金梁,等.5G安全技术研究综述[J].移动通信,2019(1):34-39,45.
- [13] 李子姝,谢人超,孙礼,等.移动边缘计算综述[J].电信科学,2018,34(1):87-101.
- [14] 齐彦丽,周一青,刘玲,等.融合移动边缘计算的未来5G移动通信网络[J].计算机研究与发展,2018,55(3):478-486.
- [15] 聂炜玲.论NFV和SDN架构下的核心网生态系统[J].电信技术,2016,8(1):82-84.

(收稿日期:2020-10-22)

### 作者简介:

刘笑凯(1977-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:信息安全、保密通信。

王文东(1979-),女,工程师,主要研究方向:移动管理、企业安全。

王萍(1990-),通信作者,女,硕士,主要研究方向:移动安全、企业安全,E-mail:guoguo\_w@163.com。



扫码下载电子文档

- [14] 宋以鹰,颜杰.一种测试电子产品关机温度的系统[J].电子技术与软件工程,2020(6):85-86.

- [15] 孙琦,于兰英,吴文海.电子产品高温试验箱的温度场分析及优化[J].中国测试,2019,45(12):159-164.

(收稿日期:2020-12-08)

### 作者简介:

秦琴(1978-),女,博士,副教授,主要研究方向:智能检测与运动控制。

姜景科(1994-),通信作者,男,硕士研究生,主要研究方向:智能检测与运动控制、环境工程,E-mail:1548101311@qq.com。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所