

引用格式: 王新文, 于明圆, 白清松, 等. 一种基于 Labview 的喷泉钟控制系统设计与实现[J]. 时间频率学报, 2024, 47(2): 81-89.

一种基于 Labview 的喷泉钟 控制系统设计与实现

王新文, 于明圆, 白清松, 杜润昌, 刘类骥

成都天奥电子股份有限公司, 成都 610036

摘要: 为了快速验证喷泉钟技术方案, 设计搭建了一种基于 Labview 图形化编程环境的控制系统, 硬件上使用标准信号板卡和商用外围电路模块, 软件上采用主任务循环结合硬件触发的方式。经测试, 控制系统的信号同步和控制精度可以达到 μs 量级, Ramsey 谱线线宽为 1.65 Hz, 喷泉钟秒稳大约为 1.18×10^{-12} , 满足了喷泉钟对激光、微波和数据采集等要素的基本控制要求, 实现了喷泉钟的正常运行。

关键词: Labview; 控制系统; 同步精度; 喷泉钟; 激光冷却

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-02-0081-09

Design and implementation of control system for cold atom fountain clock based on Labview

WANG Xin-wen, YU Ming-yuan, BAI Qing-song, DU Run-chang, LIU Lei-ji

Chengdu Spaceon Electronics Company Limited, Chengdu 610036, China

Abstract: In order to quickly verify the technical scheme of fountain clock, a kind of control system based on Labview graphical programming environment is designed, it uses standard signal boards and commercial peripheral circuit modules as hardwares, and programs the main task in a loop structure with hardware triggering. The test results show that the signal synchronization and control accuracy of the control system can reach μs magnitude, the Ramsey spectral line width is 1.65 Hz and the fountain clock's stability is about 1.18×10^{-12} at 1 second. Therefore, the control system can meet the basic requirements of the fountain clock for laser, microwave, data acquisition and other elements, realizing the normal operation of the fountain clock.

Key words: Labview; control system; synchronization accuracy; fountain clock; laser cooling

自 1967 年国际度量衡大会更新秒定义以来,原子钟利用原子跃迁频率作为参考输出标称频率,除了被用于产生原子时和协调世界时外,还被应用于航天测控、卫星导航、通信、资源勘探、大地测量等领域,在国防和社会经济中发挥着重要的作用。铯原子喷泉钟是一种基准型原子钟,常应用于国家各重点守时、授时和计量实验室作为一级频率基准^[1-3]。喷泉钟运行时要依次经过原子俘获、能态选择之后才能进行微波激励和反馈,属于脉冲型原子钟,在单个脉冲周期内需要对激光、微波、探测信号、反馈信号等多种物理量进行精确的时序控制,一般要求信号时间控制和同步精度达到 μs 量级,因此精确的控制系统是喷泉钟正常工作的基本保障,担负着协调各子系统的重要作用。

传统的电子学控制系统需要专门设计复杂的软硬件来满足控制需求,消耗研究人员大量时间和精力,不利于研究人员快速验证创新性想法。本项目在硬件上采用标准信号板卡和商用外围电路模块,在软件上采用 Labview 图形化编程软件,设计了一套适用于喷泉钟的控制系统,实现了喷泉钟的正常运行,完成了喷泉钟系统方案的快速验证,该控制系统设计方法具有编程环境简单、可视性强、调试容易、部署快捷、通用性强等优势^[4],是一种良好的原型系统验证手段,且对后续

产品的专用电子学系统设计制作具有指导作用。

1 工作原理

喷泉钟是利用激光冷却技术将工作原子 (^7Rb 、 ^{133}Cs 等) 冷却至接近绝对零度,再通过控制激光、微波和磁场等参量变化,完成原子选态、激励、探测和反馈等过程^[1],实现喷泉钟闭环输出。冷原子喷泉钟一般按功能分为物理系统、光学系统、微波系统和控制系统四个部分^[1,4],各个部分互相关联作用。控制系统由可视化软件、信号板卡及外围电路模块组成,负责人机交互和子系统控制;微波系统由微波信号源和 5 MHz 或 10 MHz 标称参考频率源(如晶振)组成,负责输出激励信号和标称频率;物理系统是原子的工作场所,为原子提供必要的真空和电磁环境;光学系统由激光器、声光调制器、光纤及其他光学元件组成,负责输出多组激光束与原子相互作用。

系统控制关系如图 1 所示,其中控制、光学和物理系统组成激光作用循环,控制、微波和物理系统组成微波作用循环,控制系统输出信号控制光学系统和微波系统。光学和微波系统分别输出激光和微波作用于物理系统,两个过程共同作用得到探测信号,经软件处理后产生误差信号,进而反馈晶振,实现喷泉钟闭环输出。

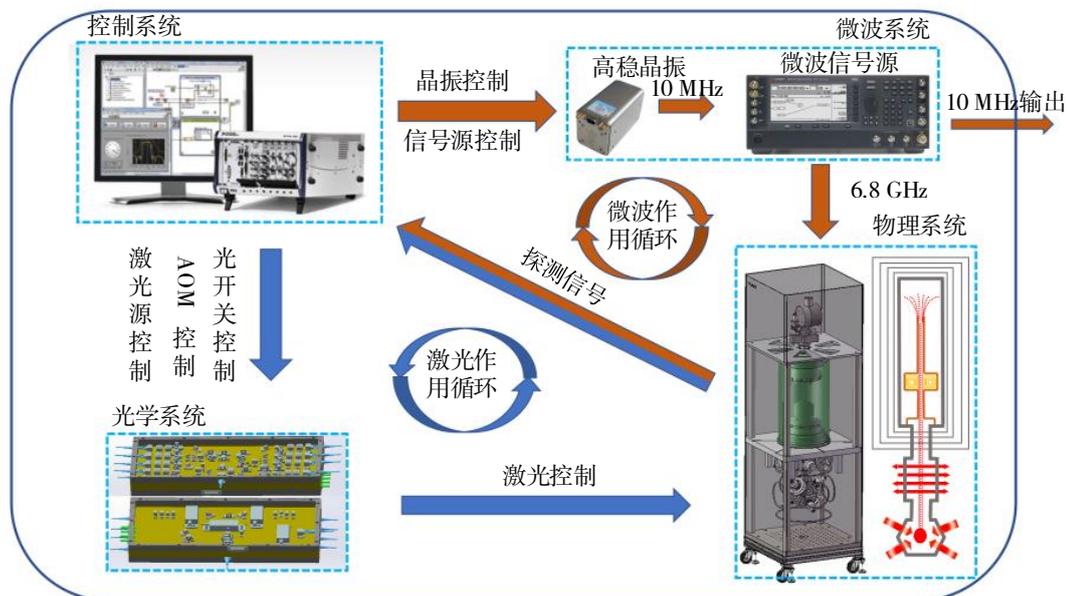


图 1 喷泉钟系统控制关系图

2 总体方案设计

喷泉钟整机包括物理系统、光学系统和微波系统(图 1),由控制系统实现联合运行,系统的总体设计框架如图 2 所示,控制系统在物理层面

上与各子系统及模块直接相连,在信息层面上,根据喷泉钟工作模式和时序关系控制各种信号有序输入输出。

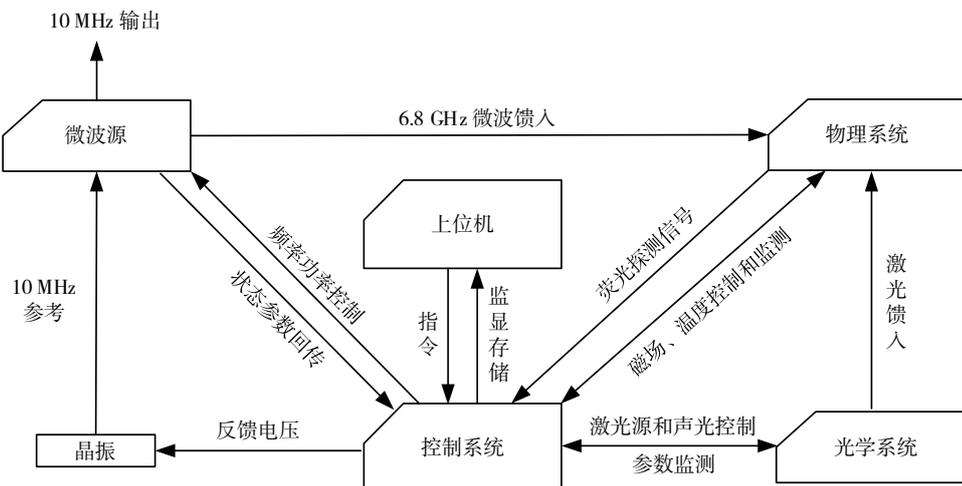


图 2 系统总体设计框架图

根据喷泉钟工作原理,分解喷泉钟单脉冲周期控制流程如下:① 打开冷却光、重泵光和梯度磁场;② 关闭梯度磁场,对冷却光扫描幅完成偏振梯度冷却并抛射原子;③ 打开抽运光、重泵光以及偏置磁场完成原子光选态;④ 控制微波开关完成原子微波激励;⑤ 打开探测光并完成探测信号采集;⑥ 数据上传并处理,产生误差信号反馈晶振。

控制系统输出的各种模拟或数字信号按照以上流程设计控制时序,不同信号输出任务间需要保持一定的时序同步精度,通过将某一输出任务作为主任务,利用其空闲通道产生触发信号用于触发同步其他板卡的输出任务,从而实现时序同步要求。另外,为了实现脉冲钟周期连续运行,将控制程序框图放置于单一的 While 循环中,设置循环终止条件即可实现可控的连续运行。

在实验模式的设计上,根据喷泉钟对不同实验模式的要求,主要是对微波的频率和功率控制有差别,可通过改变循环过程中的微波参数变量并设置不同的循环终止条件来实现。比如微波功

率定标实验模式,在脉冲周期循环过程中,设置微波功率扫描起点、终点和步进值,程序计算出每个周期应输出的微波功率值并发送至微波信号源,程序运行至最后一个周期时,通过条件结构设置循环终止信号,循环结束后根据不同微波功率值下的原子跃迁几率值作图,即可自动得到不同功率下原子跃迁几率曲线,根据该曲线可以确定微波激励时所需要的微波功率值,使用该值用于后续试验。其他实验模式的控制方式类似。

3 控制系统硬件

控制系统的硬件分为信号端和操作端,信号端由 1 台背板信号机箱(NI PXIe 1088)、1 块处理器板卡(NI PXIe 8840)、1 块模拟输出板卡(NI PXIe 6738)和 1 块多功能板卡(NI PXIe 6358)组成,操作端包括声光调制器(AOM)驱动模块、光开关驱动模块、磁场线圈驱动模块、探测调理模块、晶振驱动模块、微波信号源调制模块等。主要硬件模块及其功能见表 1。

表 1 控制系统硬件及其功能

分类	名称	功能
信号端	背板信号机箱	装载板卡及信号转接
	处理器板卡	系统中央处理器, 提供 USB、LAN、GPIB、串口等接口
	模拟输出板卡	提供 AOM 驱动、线圈驱动等模块所需模拟信号
	多功能板卡	提供 AOM 驱动、光开关驱动、晶振驱动等模块所需数字信号, 并进行模拟信号采集
操作端	AOM 驱动模块	频率和功率可变的射频源, 改变 AOM 衍射激光频率和功率
	光开关驱动模块	提供光开关动作所需的信号
	磁场线圈驱动模块	控制磁场线圈所需电流大小和通断状态
	探测调理模块	弱电流调理模块, 对微弱荧光光电流进行前端滤波放大
	晶振驱动模块	提供高精度电压信号
	微波信号源调制模块	控制信号源功率和频率

4 控制系统软件设计

4.1 软件流程

控制系统的软件设计以应用需求为导向, 根据喷泉钟控制流程, 各系统及模块上电后, 完成参数配置, 启动控制程序使喷泉钟脉冲周期循环运行, 控制流程如图 3 所示^[9]。

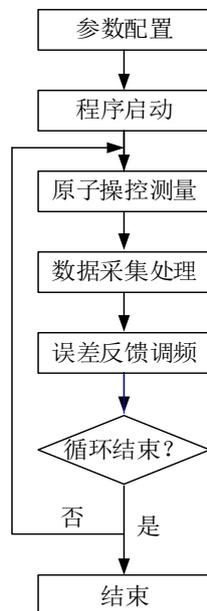


图 3 软件流程图

参数配置过程主要是设置激光器稳频、实验模式、喷泉钟时序、数据处理等参数, 程序启动后将对系统进行初始化, 使系统按预定的参数运行。该过程主要用于调试系统性能, 调试完成后参数可保存下来, 供用户直接调用。

原子操控测量流程包括原子冷却陷俘、原子选态、原子激励和原子能级探测 4 个过程, 这些过程同时涉及对激光、磁场、微波的精确控制, 时间分辨率和同步精度需要达到 μs 量级。

数据采集处理流程根据设定好的采集参数, 在特定时间被触发采集后, 原始数据被保存下来, 并用于显示和后处理。

误差反馈调频流程根据数据处理结果, 将误差信号反馈给压控晶振, 从而调节微波激励频率和输出标称频率。

循环内单次流程结束后会根据用户指令或者设置条件判断是否终止循环。

4.2 软件框架

软件框架总体上采用顺序结构, 分为 3 帧, 第 1 帧是预处理帧, 第 2 帧是循环帧, 第 3 帧是终止帧。

预处理帧主要处理前面板输入信息, 生成板卡任务数据数组, 并配置不同任务的通道、定时、触发等信息。任务数据组数据量较大, 需要处理器并行处理多任务, 会占用较多内存充当缓存, 且存在较大时间不确定性, 将该帧置于预处理帧而不是循环内, 仅执行一次, 因此不会对循环产生不利影响。如图 4 所示为模拟输出任务程序的预处理帧, 该任务循环输出前需要先确定输出波形数据、通道和定时等信息, 第 1 步配置前面板输入参数, 包括时序参数和器件数值参数; 第 2 步根据输入参数生成不同通道对应的模拟信号输出波形数据; 第 3 步配置板卡输出物理通道、采样率、采样时钟等参数并将波形数据写入缓

存,最后数据流以簇的形式传递至下一帧循环帧。

循环帧主要包含各任务的启动、查询和停止程序。循环帧内主要包含 3 个任务：激光控制任务、微波控制任务和采集控制任务。激光控制任务涉及对模拟输出板卡和数字多功能板卡的控制，为了实现不同板卡输出任务的同步，我们采用软件同步和硬件同步结合的方法，软件同步使用“事件发生函数”，硬件同步采用数字边沿触发，如图 5 所示。由于 labview 的数据流工作模式，同一帧内所有数据流完成才能开始执行下一帧,第 1 步在循环外产生事件,第 2 步从任务“等待事件发生函数”触发，从任务的第 1 帧暂停，直到第 3 步主任务“设置时间发生函数”触发，

第 4 步主任务和从任务在软件层面同时向硬件板卡发送任务开始指令，完成软件同步，同步精度一般可达 ms 级。

同一板卡同一任务不同通道通过共用开始时钟来实现非常精确的同步 (ns 量级)，要实现不同板卡不同任务精确同步，一种有效的方法是通过主任务板卡的空闲通道产生触发信号，使从任务跟随主任务时序，同步精度可达 μs 级。

终止帧主要用于结束各任务并综合处理各个任务分支所产生的警告和错误信息，根据错误类型和重要程度分级处理，比如导致程序无法正常运行的在前面板弹框提示，并停止循环，组件未接入导致的接口匹配异常则仅提示，不暂停实验。

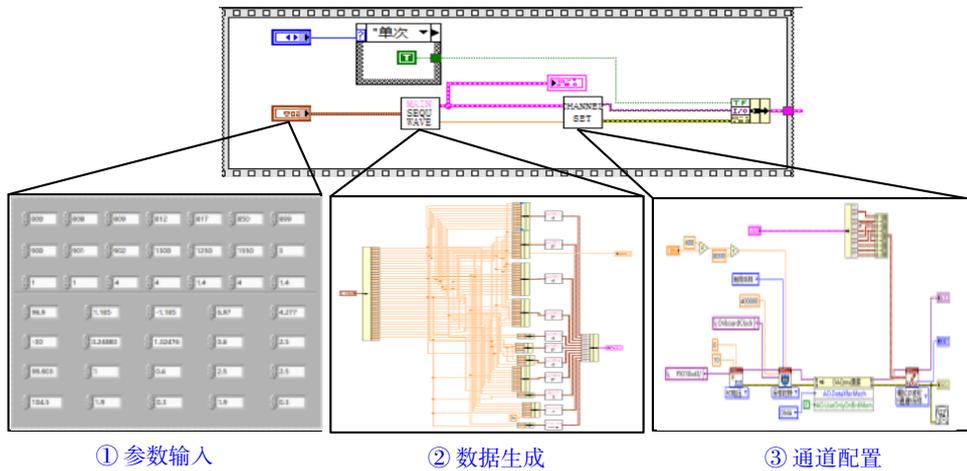


图 4 预处理帧程序框图

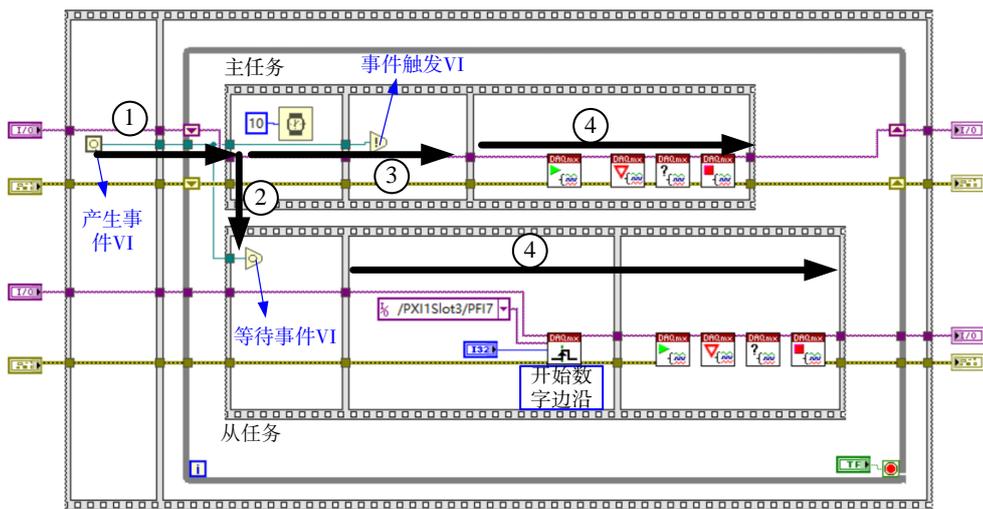


图 5 循环帧同步控制流程示意图

4.3 模拟和数字信号产生

对于喷泉钟控制而言，最复杂的控制部分是

原子激光冷却过程对激光频率和功率的控制，单路通道需要在数毫秒内完成上千次的线性或非线

性频率和功率变换^[1,5]，其他原子操控过程则主要是控制电压跳变，相对简单，因此本节以激光冷却过程为例。

将模拟信号输出任务作为主任务分支，其他信号的触发和同步都以模拟信号时序为基准。设定模拟输出任务的第一个输出采样点为 T_0 时刻，将原子冷却过程划分为磁光阱俘获、预冷却、原子抛射和后冷却 4 个阶段，如图 6 所示。

从图 6 可以看出，在偏振梯度冷却阶段需要对冷却光频率和功率进行快速变换^[6-7]，具体输出波形根据系统不同有一定差异，往往需要根据实际冷却效果来确定合适的波形。冷却光频率由数字信号输出任务控制，冷却光功率由模拟信号输出任务控制，两种信号波形数据产生的具体步骤如图 7 所示，步骤 (a) 使用“公式波形 VI”，根据

输入参数变量和波形公式生成线性或非线性的分段模拟波形数据，步骤 (b) 使用“拼接波形 VI”将各分段模拟波形拼接得到完整的模拟波形数据，此时该波形数据可以用于模拟信号输出任务，而数字波形数据只需要再按步骤 (c) 使用“模数转换 VI”将模拟波形转换数字波形数据即可。

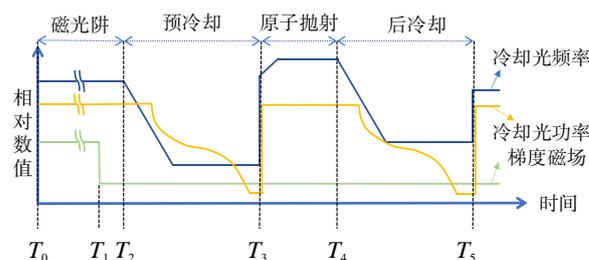


图 6 原子冷却过程输出时序波形

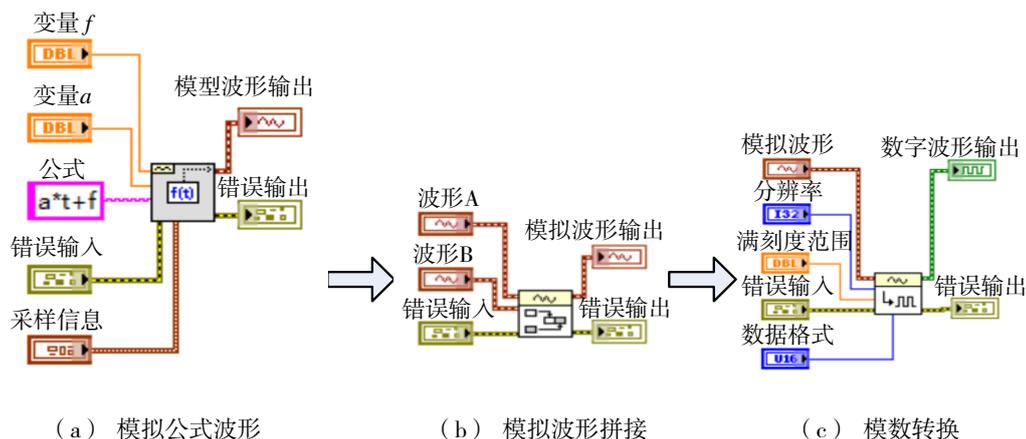


图 7 模拟和数字波形数据产生步骤

4.4 晶振和微波驱动信号产生

系统使用的本地晶振为 OCXO 8607 高稳压控晶振，其电调系数约为 $2 \times 10^{-8} / V$ ，为了使单次调频分辨率达到 10^{-15} 量级，晶振的驱动电压分辨率需要达到 $0.5 \times 10^{-7} V$ 。高稳晶振驱动模块使用 20 位的数模转换芯片为核心，当输出范围为 10 时，分辨率仅为 $0.95 \times 10^{-6} V$ 。为了满足使用需求，有两种有效方法，一是降低驱动模块的电压输出范围，二是使用标准电阻分压驱动的方式，为了使高稳晶振驱动模块输出电压范围与晶振输入电压范围匹配实现满量程可调，我们采取分压驱动的方式来满足电压分辨率需求。

原子探测所需的微波信号以晶振输出作为参

考信号，经微波信号源倍频、放大、锁相等过程产生。微波信号源配置有功率数控衰减和频率调制等功能，可以通过 LAN 口通信控制微波的输出功率和频率，微波的开关时刻通过“事件发生”软件同步手段与主任务同步。

微波控制程序在前面板选择实验模式，不同实验模式下的微波频率、功率设置和实验停止条件有所不同，通过选项卡控件在不同的实验模式选项下配置不同的输入参数，在循环帧内使用条件结构来匹配对应的程序代码框图，如图 8 所示，在“微波功率定标”模式下，微波频率为定值，微波功率 (dBm) 由初始值线性递增，如式 (1) 所示，其中 P_0 为初始功率值， i 为循环次数， Δp 为步进值 (dB)， P_i 为截止功率值。

$$P_i = P_0 + i \times \Delta p, (P_0 \leq P_i \leq P_1) \quad (1)$$

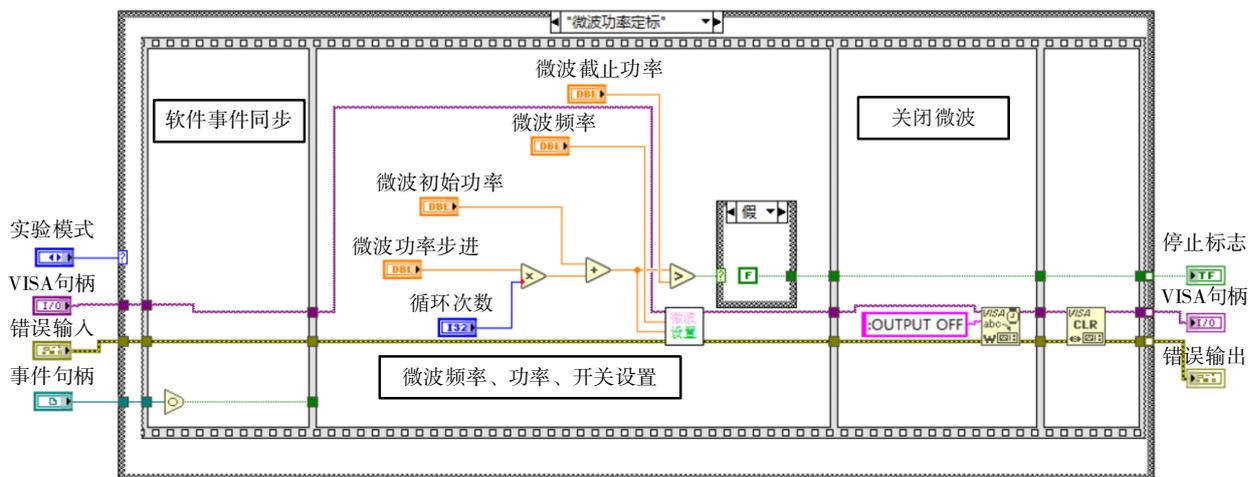


图 8 循环帧内微波功率定标程序框图

4.5 数据处理程序设计

数据处理程序主要完成数据采集、计算、存储、显示等功能。冷原子喷泉钟为脉冲型原子钟，数据采集在每次循环末端触发完成，采集完成后立刻开始下一个脉冲周期，本次循环周期的数据计算、存储和显示等过程在下次钟周期开始阶

段完成，数据处理过程与激光、磁场等操控过程解耦合，如图 9 所示，数据采集任务每次循环受下降沿触发采集，采集数据保存在移位寄存器中，在下一个循环进行数据计算、显示和存储，因此不会对钟周期时序带来不确定性。

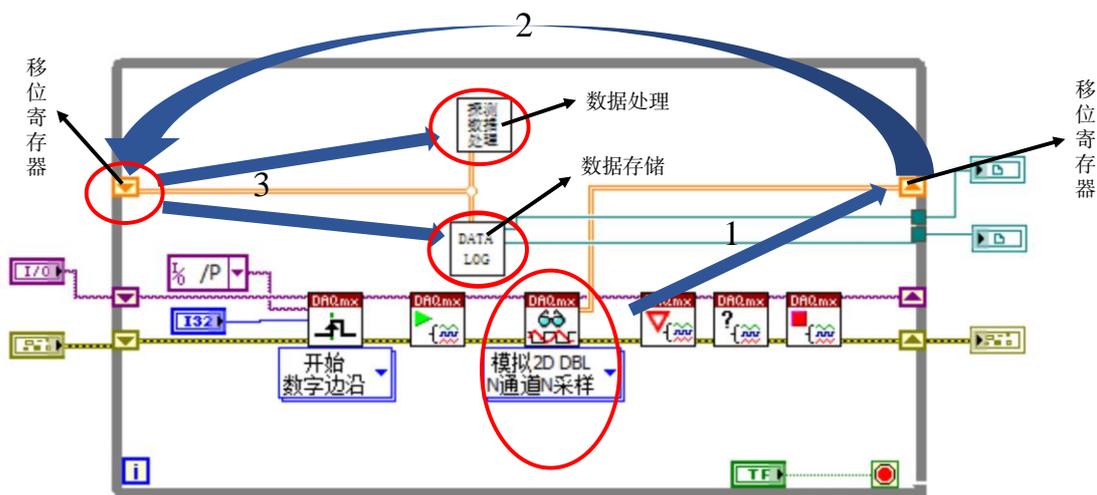


图 9 循环帧内数据采集、处理、存储程序框图

数据计算内容主要是根据采集的原始 TOF (time of flying) 数据计算双能级原子数，在硬件滤波的基础上对数据进行软件平均去本底、滤波、高斯拟合、积分等过程，根据原子数计算公式代入探测光参数和器件参数即可得到双能级原子数

N_1 和 N_2 ，根据 $P = N_2 / (N_1 + N_2)$ 得到原子跃迁几率测量值，跃迁几率与微波频率关系如式 (2) 所示^[8]， ν 为微波频率， ν_0 表示中心频率：

$$P = A \{ 1 + \cos[2\pi T(\nu - \nu_0)] \} \quad (2)$$

式(2)中, A 和 T 为与系统相关的常数值, 调制微波频率, 即可得到误差信号 ΔP , 如式(3)所示, 根据该误差信号调整晶振驱动电压即可实现喷泉钟的闭环锁定。

$$\frac{\Delta P}{\Delta \nu} = -A \sin[2\pi T(\nu - \nu_0)] \quad (3)$$

5 运行效果

控制系统按照上述方式搭建调试完成后, 测量模拟板卡通道间触发波形如图 10 所示, 模拟通道数据建立时间小于 $4 \mu\text{s}$, 通道间时间同步性优于 $1 \mu\text{s}$ 。

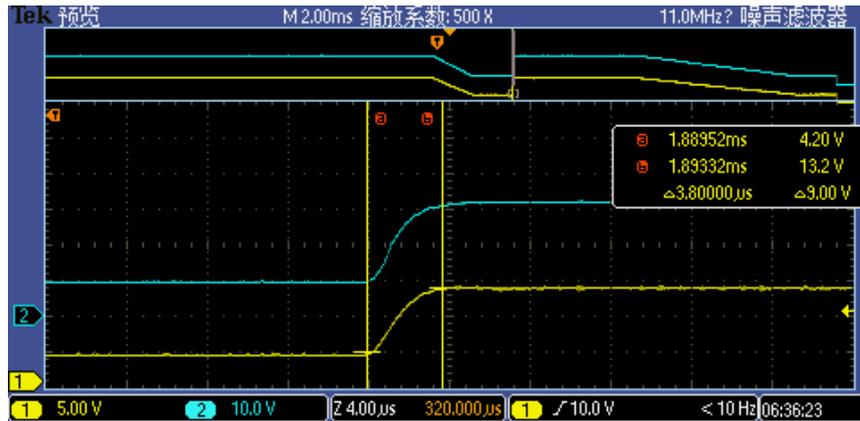


图 10 模拟板卡不同通道输出波形

模拟板卡和数字多功能板卡输出信号触发时的波形, 数字输出任务通过模拟通道下降沿触发启动, 数字信号起始值为“00100101”, 通道采样率为 1 MHz , 单采样周期为 $1 \mu\text{s}$, 如图 11 所示。数字信号边沿有过冲振荡现象, 由于外部器件

DDS 有片选信号输入^[9-10], 可以使片选信号有效区间避开振荡区间防止输入错误; 触发信号建立时间为 $4 \mu\text{s}$ 左右, 和图 9 结果相当, 触发后数字信号响应时间远小于 $1 \mu\text{s}$, 可知同步精度取决于模拟触发信号的建立时间, 即 $4 \mu\text{s}$ 左右。

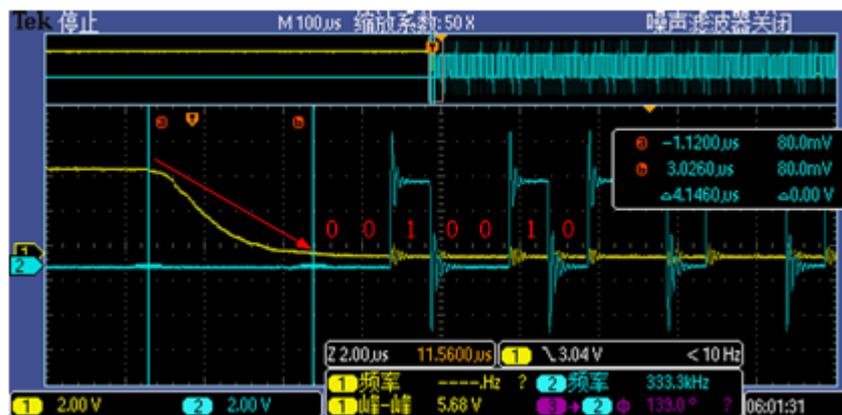


图 11 模拟板卡和数字板卡同步精度波形图

控制系统与光学、微波和物理系统联调后, 得到冷原子喷泉钟的原子荧光如图 12 所示, 得到喷泉钟的 Ramsey 花样^[11]如图 13 所示, 谱线线宽为 1.65 Hz 。

使用 Ramsey 中心条纹半高全宽处的频点作为方波调制的设置频点, 喷泉钟周期运行过程中, 微

波源输出频率在两频点间切换, 相邻两次钟周期的原子跃迁频率差值作为喷泉钟锁定的误差信号, 使用 Labview 自带的 PID 控制模块, 设置合适的 PID 参数, PID 模块输出的数值与晶振电调系数结合输出纠偏电压, 从而控制晶振锁定至喷泉钟系统, 输出频率与氢钟信号比对结果如图 14 所示。



图 12 冷原子团荧光照片

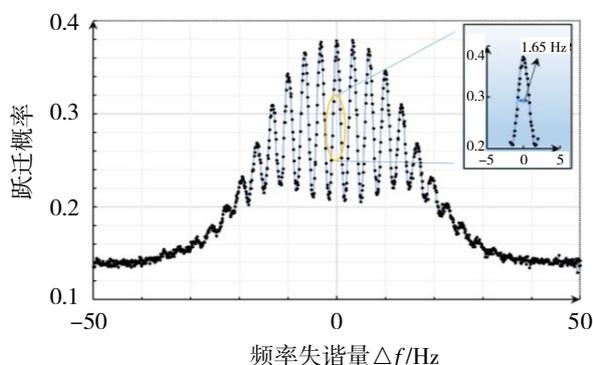


图 13 喷泉钟 Ramsey 谱线

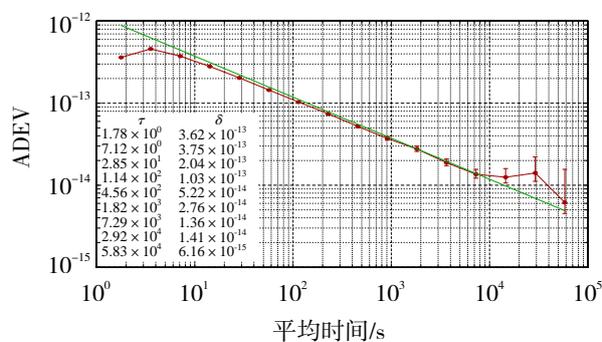


图 14 闭环锁定稳定度曲线

6 结论

冷原子技术的应用范围非常广泛,可以应用于重力加速度、时间频率和磁场等物理量的高精度测量^[12],近年来由此衍生的高精度产品开始逐渐进入市场。目前该喷泉钟控制系统工作正常、性能较优,提升了实验过程的调试效率和控制精度,保证了冷原子钟的良好运行,接下来我们将对控制系统性能做进一步优化,比如提高同步精度、提升喷泉钟闭环锁定效果、添加远程监控功

能等。基于 Labview 图形化软件编程和信号板卡的控制系统设计方法具有编程环境简单、可视性强、调试容易、部署快捷等优势,有利于研发人员快速完成原型验证、产品开发和后期维护等工作,可以推广应用于不同的系统产品。

参考文献:

- [1] WANG X W, LIU K K, CHENG H N, et al. Optimization of temperature characteristics of a transportable ⁸⁷Rb atomic fountain clock[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(8): 080201.
- [2] 肖娅聪, 刘昆, 刘洪康, 等. 喷泉钟驱动恒温晶振方法研究[J]. 时间频率学报, 2022, 45(2): 110-114.
- [3] 张辉, 王心亮, 刘丹丹, 等. 冷原子喷泉的激光准直镜筒研究[J]. 时间频率学报, 2022, 45(2): 115-123.
- [4] 刘昆, 陈伟亮, 宋文霞, 等. 基于 Labview 冷原子喷泉钟控制系统的研制[J]. 计量技术, 2020(8): 3-7.
- [5] 刘夏鸣. 基于 Labview 的冷原子干涉仪精密时序控制系统[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(8): 182-188+199.
- [6] LETT P D, PHILLIPS W D, ROLSTON S L, et al. Optical molasses[J]. JOSA B, 1989, 6(11): 2084-2107.
- [7] 吉经纬, 赵鑫, 李琳, 等. 空间冷原子钟的控制电子学设计[C] // 中国卫星导航学术年会, 广州: 中国卫星导航学术年会组委会, 2017.
- [8] RIEHLE F. Frequency Standards: Basics and Applications[M]. Germany: Wiley-VCH, 2005: 193.
- [9] 徐周翔, 黄凯凯, 章显, 等. 基于 DDS 的激光频率高精度控制技术及其冷原子中的应用[C] // 2011 年全国时间频率学术会议, 北京: 全国时间频率学术会议组委会, 2011.
- [10] 罗东云, 程冰, 吴彬, 等. 用于冷原子干涉仪激光时序控制的 DDS 跳频系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(9): 83-86.
- [11] CLAIRON A, SALOMON C, GUELLATI S, et al. Ramsey resonance in a zacharias fountain[J]. Euro Physics Letters, 1991, 16(2): 165-170.
- [12] 厉泽环, 颜树华, 贾爱爱, 等. 基于虚拟仪器的冷原子干涉时序控制系统[J]. 中国科技论文, 2016, 11(8): 886-890.