

一种基于步进电机的光开关

于明圆^{1,2}, 徐斌¹, 欧阳鑫川^{1,2}, 王鑫^{1,2}, 万金银¹, 肖玲¹, 成华东^{1*}, 刘亮^{1**}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料和光电研究中心, 北京 100049

摘要 介绍了一种基于步进电机的光开关, 主要用于间歇型原子钟。采用直径为 6 mm 的两相步进电机, 结合不同形状的挡光叶片, 实现了对光的开启与关断。采用步进电机驱动芯片 TMC260 和微控制器 STC12C5A60S2 结合的方式控制步进电机的转动。该控制系统整体结构紧凑, 且一个微控制器可以控制多个步进电机。实验结果表明, 利用该光开关可实现高于 100 dB 的消光比, 并且可长时间稳定运行。

关键词 光开关; 步进电机; 消光比; 原子钟

中图分类号 TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0804003

Optical Switch Based on Stepper Motor

Yu Mingyuan^{1,2}, Xu Bin¹, Ouyang Xinchuan^{1,2}, Wang Xin^{1,2}, Wan Jinyin¹,
Xiao Ling¹, Cheng Huadong^{1*}, Liu Liang^{1**}

¹Key Laboratory of Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049, China

Abstract We describe an optical switch based on the stepper motor, which can be used to the pulsed atomic clocks. The switch consists of a two-phase stepper motor with 6 mm diameter and blades with different shapes to switch on and off the light. A universal stepper motor driver chip (TMC260) and a microcontroller (STC12C5A60S2) are used to control the rotation of the motors. The control system is compact. One microcontroller can be used to control multi-motors. The experimental results show that the extinction ratio higher than 100 dB is reached and the optical switches can work normally for a long term.

Key words optical switch; stepper motor; extinction ratio; atomic clock

OCIS codes 130.4815; 250.6715; 350.6090; 040.5570

1 引 言

原子钟在导航、定位、授时和通信等领域有着广泛的应用。根据工作方式的不同, 原子钟可以分为连续型原子钟和间歇型原子钟。间歇性原子钟主要有脉冲相干布居俘陷 (CPT) 原子钟 (Raman-Ramsey)^[1]、脉冲光泵抽运 (POP) 气泡式原子钟^[2]和冷原子钟^[3-7]等, 这些原子钟的共同特点是都需要采用激光器进行态制备和信号探测, 并且需要对激光器进行关断和开启。光开关对于间歇型原子钟而

言非常重要, 光的开启和关断时间以及获得的消光比直接影响原子钟的性能。声光调制器作为光开关^[2], 其开启和关断时间可达微秒量级, 但其消光比不是很理想, 特别在声光调制器的频移较小和入射光强较大的情况下。在实验室环境下, 研究人员普遍采用商用机械开关^[8], 但其稳定性和可靠性不能满足要求, 并且开关头和控制器的体积较大, 不能应用于工程化的原子钟系统。本文研制了一种基于步进电机^[9]的光开关, 采用直径为 6 mm 的两相步进电机, 结合电机的机械结构设计, 整体结构稳定可靠。

收稿日期: 2019-03-01; 修回日期: 2019-04-08; 录用日期: 2019-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(11604353, 61875215, 61727821)

* E-mail: chenghd@siom.ac.cn; ** E-mail: liang.liu@siom.ac.cn

电机控制系统使用电机驱动芯片和单片机相结合的方式,使整个控制系统较为紧凑。

2 光开关原理

基于步进电机的光开关控制原理如图 1 所示。透镜 1 和透镜 2 焦距相同且共焦,光阑和挡光叶片放置在焦点处,以缩短光开关的关断和开启时间。挡光叶片安装在步进电机的转轴上,步进电机为直径 6 mm 的两相步进电机 DM0620 (FAULHABER),其固有步距角为 18°。步进电机由通用的两相双极步进电机驱动芯片 TMC260 驱

动,该驱动芯片可以最高输出 2 A 的驱动电流和 60 V 的驱动电压,而且可以实现每个步距角最高 256 个微步设置。基于微控制器 STC12C5A60S2 的最小系统与驱动芯片通过串行外设接口(SPI)方式进行通信,对驱动芯片中的控制寄存器进行设置。微控制器通过电机驱动芯片上的 STEP 和 DIR 引脚,分别对步进电机的转动角度和转动方向进行设置。外部触发信号通过微控制器外部中断的方式实现叶片的顺时针或者逆时针转动。叶片的初始位置为挡光位置,一般情况下每个钟周期有两个触发脉冲,分别控制光脉冲的开启和关断。

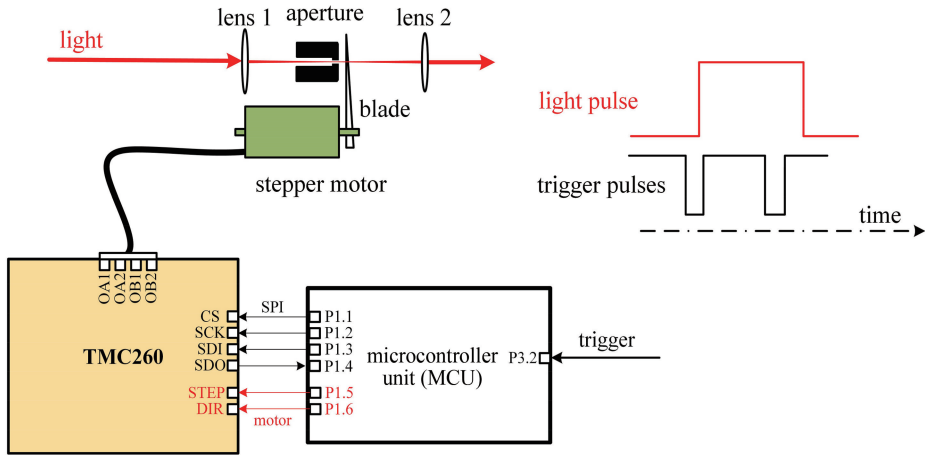


图 1 基于步进电机的光开关原理图

Fig. 1 Schematic of the optical switch based on the stepper motor

3 机械结构设计

为了保证光开关的关断和开启时间等参数的稳定性,步进电机需要有可靠的机械结构设计。图 2 为步进电机机械结构设计模型图。为了便于安装和拆卸,步进电机先安装在铝制套筒中,套筒再安装在铝制安装支架上,安装支架上开启大小合适的通光光阑。通光光阑的轴向长度约为 10 mm,内表面涂上消光漆,从而达到很好的消光比。步进电机和套筒、步进电机和挡光叶片均采用固胶的方法。安装支架底部与光路之间使用适当厚度的隔振垫,以减小电机机械转动对光路的影响。

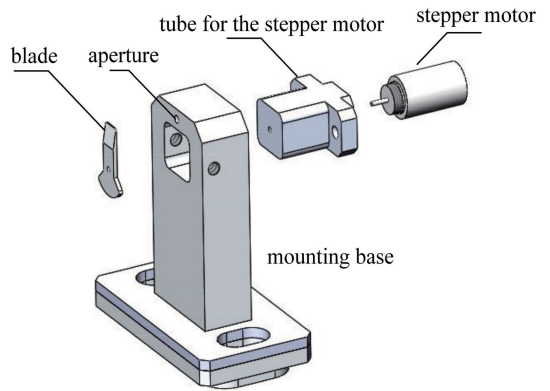


图 2 光开关的机械结构设计

Fig. 2 Mechanical design of the optical switch

设计了不同结构的挡光叶片以实现不同的光脉冲持续时间。图 3(a)所示叶片结构 1 中,扇形的圆弧实线表示叶片运行轨迹,初始叶片处于挡光位置 P_1 ,第一个触发脉冲使步进电机顺时针转动 θ ,此时叶片位置为通光位置 P_2 ;一段时间之后,第二个触发脉冲使叶片逆时针转动到初始位置 P_1 ,两个触发脉冲之间的时间间隔对应于光脉冲的持续时间。由

于整个驱动控制系统对两个触发脉冲的延迟响应,实验测量得到输出光脉冲的最短持续时间约为 5 ms。对于间歇型原子钟而言,有些光脉冲,例如光学抽运脉冲,只需要 1~2 ms 的脉冲持续时间,如果使用这种叶片结构,将造成很大的时序浪费,同时会影响原子钟的性能。为此,设计了图 3(b)所示叶片结构 2。叶片的初始位置为挡光位置 P_1 ,一个触

发脉冲使叶片位置变为 P_2 , 在转动过程中狭缝会经过光斑位置, 从而产生一个持续时间很短的光脉冲, 一段时间之后, 控制程序会使叶片从 P_2 位置转动到初始位置 P_1 , 进而产生第二个光脉冲。两种挡光叶片的质心均位于转轴中心 C , 以减小叶片转动带来的整体结构振动。

叶片的结构设计对步进电机的转动角度也提出了要求。设光斑直径为 M , 则对于叶片结构 1, 步进电机需要转动的最小角度为 $\theta_{\min} = \frac{M}{2\pi R} \times 360^\circ$; 对于

叶片结构 2, 步进电机不仅有最小角度的要求, 而且转动角度不能过大, 否则会导致漏光。设叶片结构 2 中的狭缝宽度为 d , 叶片的扇形角度为 φ , 则其转动角度为 $\frac{M+d}{2\pi R} \times 360^\circ < \theta < \varphi - \frac{M}{2\pi R} \times 360^\circ$ 。按照典型值 $M=1 \text{ mm}, R=5 \text{ mm}, \varphi=80^\circ, d=0.5 \text{ mm}$, 则叶片结构 1 电机转动角度必须大于 11.5° ; 结构 2 的转动角度 $17.2^\circ < \theta < 68.5^\circ$ 。

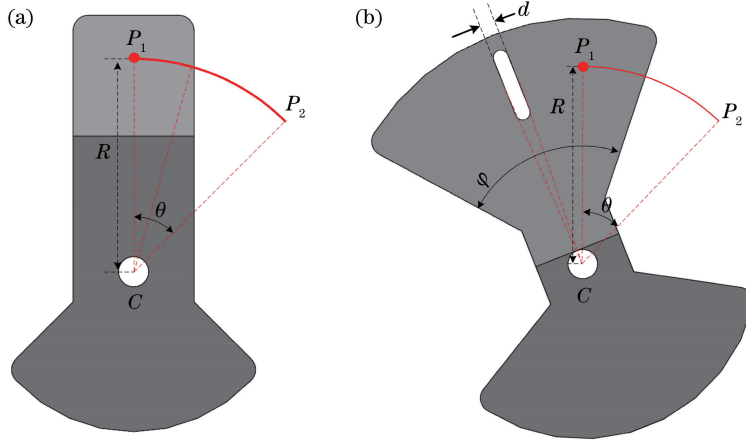


图 3 不同形状的挡光叶片(圆点表示光斑位置)。(a)叶片结构 1;(b)叶片结构 2

Fig. 3 Design of blades with different shapes (solid circles show the light spot positions). (a) Blade 1; (b) blade 2

4 驱动硬件设计

4.1 TMC260 外围电路设计

TMC260 的外围电路原理如图 4 所示, 输入信号主要包括和单片机进行 SPI 通信的信号 (MOTOR_SDI、MOTOR_SDO、MOTOR_CS 和

MOTOR_SCK) 以及控制步进电机的转动步数和方向信号 (MOTOR_STEP 和 MOTOR_DIR)。驱动板输出给电机两相的绕组信号分别为绕组 OA (OA1 和 OA2) 和绕组 OB (OB1 和 OB2)。微步可以通过 20 位 DRVCTRL 控制寄存器的最后四位进行设置。电机的均方根电流可以表示为

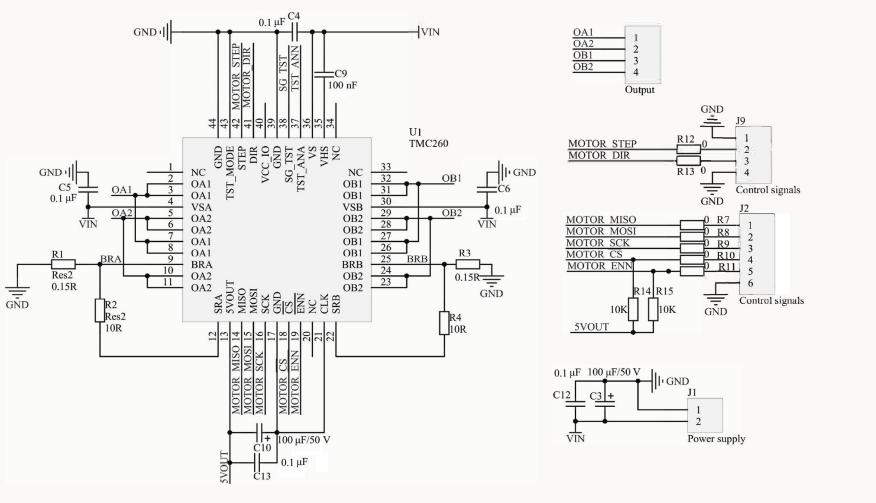


图 4 TMC260 外围电路设计

Fig. 4 Peripheral circuit design of TMC260

$$I_{RMS} = \frac{S_c + 1}{32} \times \frac{V_{FS}}{R_{SENSE}} \times \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (1)$$

式中： R_{SENSE} 为检测电阻(即图4所示R1和R3的阻值)； S_c 为控制寄存器中5个可以设置电流大小的特定比特位； V_{FS} 为满量程的检测电阻电压，也可以通过控制寄存器中的特定位来设置。由(1)式可知，通过软硬件都可以对电机的输出电流进行设置：硬件方面，可以改变检测电阻 R_{SENSE} 的大小；软件方面，可以通过驱动芯片中的控制寄存器进行设置。

4.2 微控制器外围电路

微控制器采用基于单片机(STC12C5A60S2)的最小系统中的开发板，其外部晶振频率为11.0592 MHz，有32个输入输出引脚(P0, P1, P2和P3)，有两个外部中断引脚(P3.2和P3.3)。外部触发脉冲通过单片机的外部中断方式，对步进电机的转动进行控制。所以一个单片机可以控制两个步进电机驱动板。

4.3 控制电路供电

单片机开发板采用+5 V供电电压，电机驱动板采用+12 V供电电压。实验发现，每次开关机时叶片的初始位置都会发生变化，原因是供电顺序和残余电位导致电机电流扰动。因此，采用如下供断电方案，即单片机和电机驱动板同时供电或断电。+12 V电源信号与电机驱动板供电引脚之间连接一个继电器(MAX319)，单片机上的供电电源开关控制继电器的开断，进而控制驱动板的供电。测试发现，每次开关机时电机的初始位置保持不变，能够满足实验要求。

5 驱动软件设计

软件设计流程如图5所示。主程序对整个系统进行初始化设置，包括单片机的中断和定时器设置、电机驱动芯片中的控制寄存器设置等，之后系统处于循环闲置状态，接收到触发脉冲后，运行中断子程序，实现对电机的转动控制。叶片结构1和2分别采用图5所示中断子程序1和2。对于叶片结构1，驱动软件设计需要实现两个重要功能，其一是每个钟周期内对接收的两个触发脉冲进行响应，且两个触发脉冲分别控制电机的顺时针和逆时针转动。这可以通过对变量loop的操作来实现。初始化loop变量为零，第一次中断后，进入中断子程序1，进而设置DIR为0，步进电机顺时针(或逆时针)转动。然后置loop为1，则下一次中断，设置DIR为1，步进电机逆时针(或顺时针)转动。其二，如果控制器接收奇数个触发脉冲，其必须自动复位，以保证下一次上电运行时步进电机初始位置不变。程序中加入计时和步进电机复位模块，当控制器接收奇数个脉冲后，开始触发计时，如果一段时间内没有接收到下一个偶数脉冲，控制器就会使叶片复位，如果在规定时间内接收到下一个脉冲，计时器停止并清零。对于叶片结构2，每个钟周期只需要给一个触发脉冲，之后进入中断子程序2，步进电机先顺时针(或逆时针)转动，之后延迟一段时间，电机再逆时针(或顺时针)转动。所以对于叶片结构2，一个触发脉冲会产生两个光脉冲。经过长期实验测试，该程序运行良好。

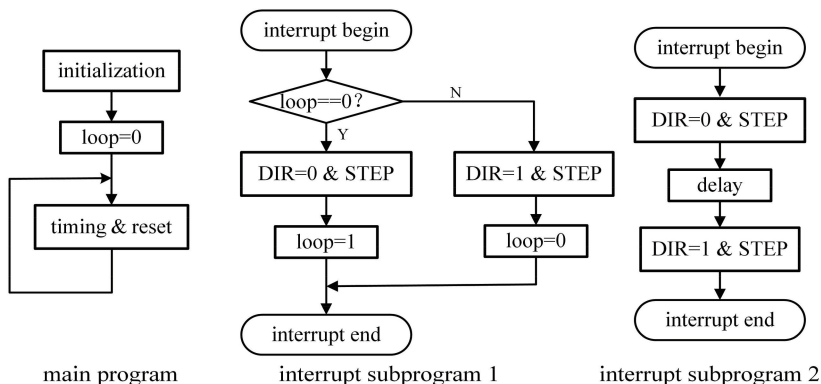


图5 软件流程图

Fig. 5 Software flow diagram

6 实验结果与结论

图6为光开关分别使用叶片结构1和2时的测量结果。主要测量光开关的开启和关断时间、触发

相对应的延迟和光脉冲持续时间。用带宽为5 MHz的光电管测量光脉冲，电机控制系统的触发脉冲(下降沿有效)由外部控制信号提供。叶片结构1对应的步进电机采用双脉冲触发方式，即图5所示中断

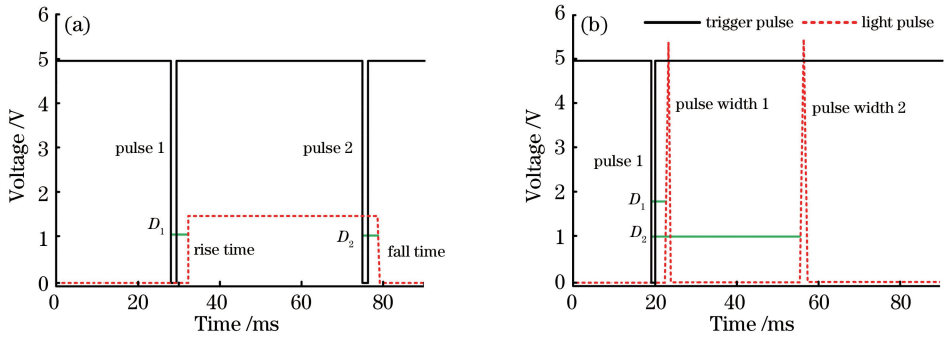


图 6 光开关对触发脉冲的响应参数。(a)叶片结构 1;(b)叶片结构 2

Fig. 6 Optical switch response to trigger pulse. (a) Blade 1; (b) blade 2

子程序 1。叶片结构 2 对应的步进电机采用单脉冲触发方式,即图 5 所示中断子程序 2。电机正常转动之后,需要优化的是微步数和电机转动的角度大小。转动角度一定的情况下,如果微步数设置较大,电机转动比较平稳,但是光脉冲的上升和下降时间变得很大。如果微步数设置较小,叶片转动速度较快,转动惯性可能会导致漏光。经过优化,叶片结构 1 和结构 2 的电机均设置为 64 微步,即每个微步转动的角度为 0.28° (固有步距角 18°)。电机驱动芯片的 STEP 引脚接收的脉冲数确定了电机转动的微步数。叶片结构 1 和结构 2 的 STEP 脉冲数分别设置为 128(对应的转动角度为 36°)和 115(对应的转动角度为 32.3°)。图 6(a)中触发脉冲(下降沿)与光脉冲的开启和关断之间的延迟时间分别为 D_1 (3.9 ms)和 D_2 (4.7 ms),光脉冲的持续时间大于 5 ms。光脉冲的上升和下降时间分别为 0.3 ms 和 0.35 ms。图 6(b)中触发脉冲与两个光脉冲之间的时间延迟分别为 D_1 (3.6 ms)和 D_2 (36.3 ms),两个光脉冲的宽度分别为 1.5 ms 和 2 ms。测量光开关的消光比大于 100 dB。测试结果表明,这种光开关可以满足实验要求,目前此光开关已经可以应用于积分球冷原子钟^[8,10]。

研制的基于步进电机的光开关,具有机械结构稳定、体积小、隔离度大、可靠性高等特点,并且具有通用性,故亦可应用于其他间歇型原子钟。

参 考 文 献

[1] Abdel Hafiz M, Coget G, Petersen M, *et al.* Toward a high-stability coherent population trapping Cs vapor-cell atomic clock using autobalanced Ramsey spectroscopy[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 9 (6): 064002.
 [2] Micalizio S, Calosso E, Godone A, *et al.* Metrological characterization of the pulsed Rb clock

with optical detection[J]. *Metrologia*, 2012, 49(4): 425-436.
 [3] Esnault F X, Rossetto N, Holleville D, *et al.* HORACE: a compact cold atom clock for Galileo[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(5): 854-858.
 [4] Wang Y N, Meng Y L, Wan J Y, *et al.* Reaching a few 10-15 long-term stability of integrating sphere cold atom clock[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(7): 070201.
 [5] Weyers S, Gerginov V, Kazda M, *et al.* Advances in the accuracy, stability, and reliability of the PTB primary fountain clocks [J]. *Metrologia*, 2018, 55 (6): 789-805.
 [6] Wang X M, Li L, Meng Y L, *et al.* New method for cold atom number stabilization in integrating sphere cold atom clock[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37 (8): 0802001.
 王秀梅, 李琳, 孟艳玲, 等. 积分球冷原子钟冷原子数稳定的新方法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0802001.
 [7] Wang X M, Meng Y L, Li L, *et al.* Frequency and intensity noises of probe laser in integrating sphere cold atom clock[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0912001.
 王秀梅, 孟艳玲, 李琳, 等. 积分球冷原子钟的探测光频率和强度噪声 [J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0912001.
 [8] Liu P, Meng Y L, Wan J Y, *et al.* Scheme for a compact cold-atom clock based on diffuse laser cooling in a cylindrical cavity[J]. *Physical Review A*, 2015, 92(6): 062101.
 [9] Butcher M, Masi A, Picatoste R, *et al.* Hybrid stepper motor electrical model extensions for use in intelligent drives[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(2): 917-929.
 [10] Wang Y N, Meng Y L, Wan J Y, *et al.* Optical-plus-microwave pumping in a magnetically insensitive state of cold atoms[J]. *Physical Review A*, 2018, 97 (2): 023421.