

步进电机恒流驱动电路设计

张超, 王淳, 张晓敏, 张晗, 康建兵

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 针对步进电机在恒压驱动控制中, 高频条件下容易出现电机失步, 造成无法正常运转的情况, 设计了基于 LMD18200 的电流滞环驱动电路; 通过对步进电机功率放大器电路的常见形式进行研究, 分析恒压与恒流驱动电路设计上的差异, 理论上推导恒流驱动稳定电流及波动频率等特性; 利用 Matlab 仿真对比恒流与恒压驱动电路相电流的上升速度, 说明两种方式下平均输出力矩以及运行频率情况; 以电机驱动集成芯片 LMD18200 实现两种驱动方式的硬件电路, 分别对型号 TS3641N1E2 的负载电机进行测试; 在不同的运行频率下, 根据两种驱动电路的相电流以及运行状态, 验证步进电机恒流驱动电路设计满足空间光学遥感器机构控制的要求。

关键词: 步进电机; LMD18200; 恒流驱动

Design of Constant Current Driver Circuit of Stepper Motor

Zhang Chao, Wang Chun, Zhang Xiaomin, Zhang Han, Kang Jianbing

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: In the constant voltage driver for stepper motor control, the motor cannot rotate properly under the high-frequency environment, so current hysteresis control circuit is designed based on LMD18200. This paper describes the common forms of the stepper motor power amplifier circuit firstly, and analyzes the difference between constant voltage and constant current driver circuit, and deduces the characteristics of steady current and fluctuation frequency theoretically. Comparing the rising slope of phase current between constant current driver circuit and constant voltage driver circuit through Matlab simulation, the average output torque and operating frequency are explained. Two kinds of drive hardware circuit are achieved with motor driver integrated chip LMD18200, and tested separately under the condition of using the same motor type TS3641N1E2. At different operating frequency, according to the phase current and operating state of the two driving circuits, the design of constant current driver circuit is verified to meet the requirements for the control of space remote sensing mechanism.

Keywords: stepper motor; LMD18200; constant current driver

0 引言

空间光学遥感器是实现空间对地观察的重要手段之一, 主要应用到天基光学预警、空间光学对抗等领域, 具有重要的应用价值^[1]。步进电机由于它的开环控制、无定位累计误差等优点, 广泛应用于光学遥感器机构的控制中^[2]。

随着空间光学遥感器成像精度和实时性的提高, 对机构运行的平稳性和快速性有了更高的要求。在以往的航天工程应用中, 步进电机大都采用恒压的驱动方式, 但是在高频的运行条件下, 由于受到电感和反电势等因素的影响, 使得相电流没能达到额定值便开始下降, 相电流呈三角波形, 平均输出力矩降低, 步进电机甚至不能正常运转, 无法满足空间光学遥感器平稳、高速运行的使用要求^[3-5]。此外, 步进电机的恒压驱动设计需要串联较大电阻, 使得串联电阻分得了大部分的电压和功率, 消耗了较多的电能, 从而电机的转换效率明显降低。

本文针对恒压驱动电路的不足, 设计基于电流滞环控

制的恒流驱动电路。功率放大部分以电机驱动集成芯片 LMD18200 为核心, 选用日本多摩川步进电机 TS3641N1E2。控制回路中不需要串联较大的分压电阻, 通过采样电阻获得相电流的数值, 利用滞环控制将电流限制在一个合理的区间内, 完成恒流驱动电路设计。实验结果表明, 恒流驱动电路电流的上升时间为 0.25 ms, 是恒压驱动方式时间的 1/4。恒流驱动电路能够达到 2 kHz 以上的运行频率, 而原有的恒压驱动电路最高运行频率不足 1 kHz。恒流驱动电路避免了能量的过剩, 降低低频的共振现象, 同时改善高频的响应特性, 满足了实时性的指标, 可以在航天、航空以及军事设备等对可靠性和快速性要求较高的领域中广泛应用。

1 恒压与恒流驱动原理与仿真分析

步进电机的功率放大器不单要向绕组提供足够的电压和电流, 而且应当具有较高的频率、消耗较小的功率和较低的成本。功率放大器电路常见的功率器件有功率晶体管、场效应功率管, 双极性晶体管与场效应管的复合管以及各种功率模块^[6], 形式上主要分为恒压驱动和恒流驱动两种方式。

收稿日期: 2019-02-26; 修回日期: 2019-03-20。

作者简介: 张超(1987-), 男, 黑龙江人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事空间遥感器机构控制方向的研究。

1.1 恒压驱动原理

恒压驱动结构上将三极管与电机的绕组串联，控制信号连接到三极管的基极，通过控制三极管的导通和关断实现电机的换向控制，保证电机的正常运动^[7-8]。当通电时控制电压加载在电机绕组两端，会造成稳态电流值过大，超过电机正常运转的电流范围，因此需要在回路中串联分压电阻，保证电流稳态时达到额定值。

恒压驱动的优点在于电路结构简单，功放器件少，设计的成本较低。而缺点在于高频运行条件下，受电感和反电势等因素影响，平均输出力矩降低，电机甚至无法正常运转。并且串联的电阻往往大于电机的相电阻，串联电阻分得了大部分的电压和功率，消耗比较多的电能，同时使得电机的转换效率明显降低。

恒压驱动多用于对使用性能指标不是非常严格的情况或者小功率的步进电机的驱动设计上。

1.2 恒流驱动原理

恒流驱动同样利用两个三极管 T1、T2 和电机的绕组串联，控制信号分别通过逻辑电路连接到两个三极管的基极，控制三极管 T1 和 T2 的导通和关断，实现电机的换向控制^[9]。

恒流驱动电路首先需要选择合适的采样电阻，根据电流的额定值，转换成相应的电压反馈信号，与设定的固定电平作比较，如果相电流没有达到额定值，将保持三极管 T1 和 T2 的导通状态，电机绕组继续通电，相电流继续上升。当相电流超过额定值，逻辑电路将使得三极管 T1 处于关断状态，电机绕组断电，相电流经二极管回路逐渐下降。通过上述过程，使得相电流在额定值附近不断的波动，形成锯齿波，波动的频率由绕组的电感值、比较器的回差等因素所决定。恒流驱动电路原理示意如图 1 所示。

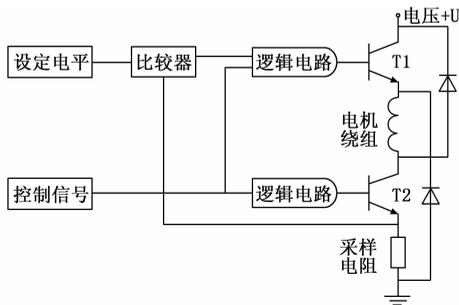


图 1 恒流驱动原理示意图

恒流驱动属于间歇式的供电方式，具有很高的效率。当电流上升到预定值时，取样电阻上的电压因为有反馈控制作用，这样能把绕组电流控制在一个合理的区间内，避免能量过剩导致的低频共振现象。此外，高频响应特性明显改善，斩波频率可调，消除了高频噪声，输出的转矩也基本恒定，运行较为安静。

步进电机的绕组呈感性，模型等效为一阶惯性系统，

因此电流的上升情况按指数曲线形式变化，响应曲线方程为：

$$I = \frac{U}{R}(1 - e^{-\frac{t}{L/R}}) \quad (1)$$

其中： I 为绕组的相电流， U 为功率电压， R 为通电回路的总电阻， L 为绕组的电感。

稳态电流 I_0 处的导数为：

$$I'_0 = \frac{u}{L}e^{-\frac{t}{L/R}} = \frac{U}{L} - \frac{R}{L}I_0 = \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{I_+ - I_-}{\Delta t} \quad (2)$$

其中： I_+ 和 I_- 为滞环控制的上限和下限电流值， Δt 为电流滞环的上升时间。

在不考虑反电势的情况下，电流在滞环区间时，PWM 的占空比为：

$$P = \frac{I_0 R}{U} = \frac{\Delta t}{t} \quad (3)$$

其中： t 为电流滞环的周期。

可得电流波动的频率为：

$$f = \frac{I_0 R}{U} \left(\frac{U}{L} - \frac{R}{L}I_0 \right) \left(\frac{1}{I_+ - I_-} \right) = \left(\frac{I_0 R}{L} - \frac{I_0^2 R^2}{UL} \right) \left(\frac{1}{I_+ - I_-} \right) \quad (4)$$

由此可以看出，恒流驱动的波动频率由功率电压、设定的稳态电流值、绕组的电感和电阻以及滞环比较器的环宽决定。

基于电流滞环控制的恒流驱动只有两种输出状态：开启和关闭。对于这种“开”、“关”的工作方式，可等价于 Bang-Bang 的开关控制。Bang-Bang 控制是一种非线性控制，它利用最佳控制函数，使得控制信号交替工作在其极限值，以达到最短时间内达到指定状态的目的。它是基于最小时间控制理论的时间最优控制。这种控制是一种开关控制，其控制输出是离散的数字^[10]。它将系统的控制作用维持在极限值上，而且不断的从一个极限值切换到另一个极限值，构成一种最大力量的控制，这样设计出来的系统是在现实基础上最快的系统。

设定两个极限控制值的 Bang-Bang 控制算法如下：

$$\Delta u = \begin{cases} u_+, & u(i) < u_- \\ 0, & u(i) >> u_+ \end{cases} \quad (5)$$

式中， Δu 为电流滞环控制器的输出， u 为功率电压， $u(i)$ 为采样的电压信号， u_+ 和 u_- 为设定的滞环控制上限和下限电压值。

设定允许误差范围的上下两个极限值之间的区域，则被控制量在设定的两个极限控制值 u_+ 和 u_- 之间进行切换，输出值 Δu 以一定的精度稳定在设定值范围内，使基于电流滞环控制的恒流驱动实现最小时间最优控制。

1.3 仿真分析

实验中选用日本的多摩川步进电机，型号为 TS3641N1E2，电机各参数如表 1 所示。

表 1 电机测量参数

电机参数	参数值
功率电压/V	24
相电阻/ Ω	2.7
相电感/(mH)	2.4
额定相电流/A	0.95
步距角/ $^\circ$	1.8
保持力矩/(Nm)	0.06

设置电流的环境为 0.06 A, 即电流的正常波动范围在 0.92~0.98 A, 经过选取合适的采样电阻, 匹配后的滞环电压上下限分别为 8.1 V 和 7.6 V。

根据上述参数, 利用 Matlab 对恒压和恒流驱动方式下的电流上升过程进行仿真分析, 搭建如图 2 的步进电机两种驱动方式的仿真框图。

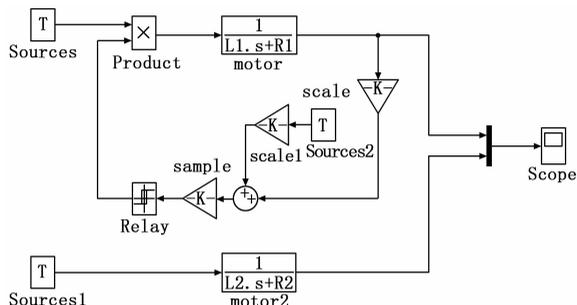


图 2 步进电机驱动仿真框图

根据之前的推导, 恒流驱动方式下的电流波动频率为:

$$f = \left(\frac{I_0 R}{L} - \frac{I_0^2 R^2}{UL} \right) \left(\frac{1}{I_+ - I_-} \right) \quad (6)$$

其中: 功率电压 U 为 24 V, 额定相电流 I_0 为 0.95 A, 绕组电阻 R 为 5.4 Ω , 绕组电感 L 为 4.8 mH, I_+ 为滞环控制上限电流值 0.98 A, I_- 为滞环控制下限电流值 0.92 A。通过上述参数, 可得基于电流滞环控制的恒流驱动电流波动频率 f 为 14 kHz。

通过搭建的仿真结构框图, 可得如图 3 的电流上升过程仿真曲线。

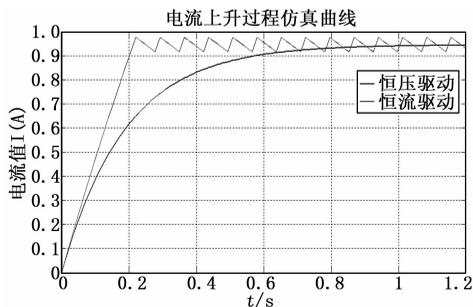


图 3 电流上升过程仿真曲线

从图 3 的仿真结果中可以看出, 恒压驱动电路经过 1 ms 达到稳态值 0.95 A, 而恒流驱动电路用时 0.25 ms, 仅为恒压驱动电路时间的 1/4。同时, 恒流驱动电路的电流在

0.92~0.98 A 的范围内不断波动, 波动频率为 14 kHz, 与理论计算值相符。在低频下, 恒流驱动与恒压驱动平均输出力矩相同, 但是随着运行频率的升高, 恒流驱动的平均输出力矩明显大于恒压驱动, 最终导致恒压驱动的电流在达到额定电流前便衰减下来, 电流波形畸变, 平均输出力矩很小。恒流驱动电路的上升速度快于恒压驱动, 可以适应步进电机更高的运行频率, 而恒压驱动电路在高频时, 电机可能无法正常运行。

2 恒压与恒流控制系统设计

恒压和恒流驱动电路的功率器件均选用 LMD18200, 它是美国国家半导体公司推出的用于电机驱动的功率集成芯片, 内部集成有 CMOS 控制电路和 DMOS 功率管, 组成了校准的 H 型驱动桥。LMD18200 具有很强的驱动能力, 瞬间驱动电流可达 6 A, 正常的工作电流为 3 A, 输入与 TTL 和 CMOS 电平相兼容, 工作电压高达 55 V, 还具备温度报警、过热与短路保护的功能, 有良好的抗干扰性^[1]。

LMD18200 是经过在轨验证的成熟芯片, 利用它与 FPGA、电机等部分构成一个完整的控制系统。

2.1 恒压驱动电路设计

LMD18200 提供双极性驱动方式和单极性驱动方式。双极性的驱动方式利用方向控制 DIR 信号的占空比控制加载电压的正负, 当占空比为 50% 时, 输出电压为 0 V; 占空比大于 50% 时, 输出电压为正; 反之, 输出电压为负。单极性的驱动方式根据方向控制 DIR 信号的高低电平判断加载电压的正负, 控制电流的流向, 输出电压的幅值由 LMD18200 的 PWM 信号占空比决定。

双极性电流波动和功率损耗较大, 所以系统中采用单极性驱动, 逻辑控制关系如图 4 所示。

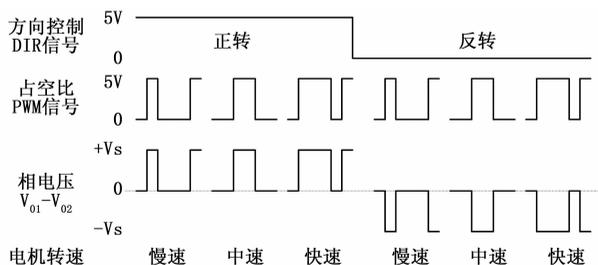
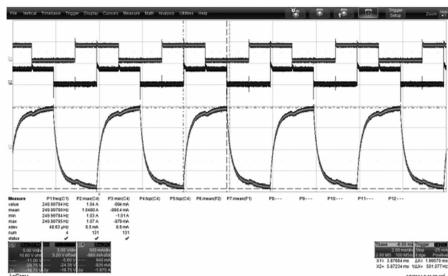


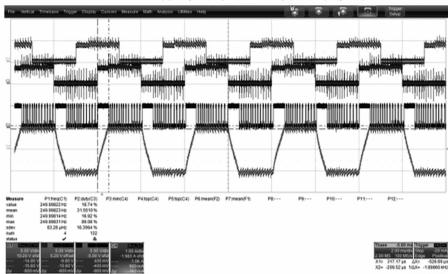
图 4 LMD18200 逻辑关系图

LMD18200 的方向控制 DIR 信号、使能 BRAKE 信号和占空比 PWM 信号由 FPGA 控制输出。使能 BRAKE 信号为高电平时, 电机电枢绕组电流将被短路从而停止运动; 方向控制 DIR 信号为占空比 50% 的方波信号, 两相电机的方向控制 DIR 信号相位差为 90°; 占空比 PWM 信号始终接高电平, 以实现恒压的驱动方式。恒压驱动的电路原理图如图 5 所示。

设计中选用日本的多摩川步进电机, 型号为 TS3641N1E2。根据电机的等效直流相电阻、静态相电流以及 LMD18200 引脚 6 加载的功率电压等参数, 得到分压电阻



(a) 1 kHz 频率下恒压驱动电路波形

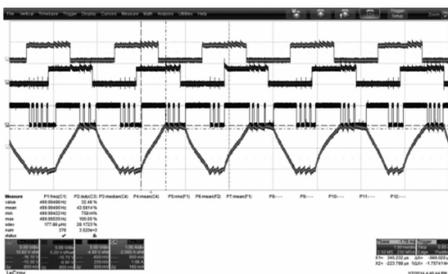


(b) 1 kHz 频率下恒流驱动电路波形

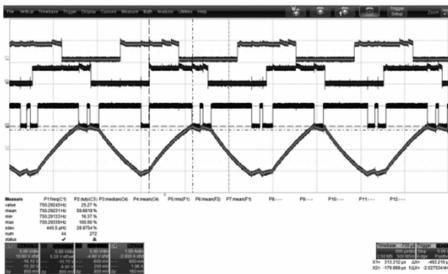
图 9 1 kHz 频率下恒压与恒流驱动电路波形

流开始反向流动, 电流波形接近三角波, 而恒流驱动电路输出的相电流仍在滞环区间内波动。恒压驱动电路达到电流稳定值 0.95 A 时需要经过 1 ms 的时间, 而恒流驱动电路的上升时间为 0.25 ms 左右, 这与 MATLAB 对电流上升过程仿真的结果是一致的。由此可以看出, 在 1 kHz 的匀速运行频率下, 恒压驱动电路控制的步进电机是无法正常运转的, 而恒流驱动电路控制的效果依然很理想。

继续升高运行频率, 当步进电机在 2 kHz 和 3 kHz 下运行时, 恒流驱动电路的波形图如图 10 所示。



(a) 2 kHz 下恒流驱动电路波形



(b) 3 kHz 下恒流驱动电路波形

图 10 高频下恒流驱动电路波形

从图中可以看出, 高频的运行条件下, 受到电流上升时间 0.25 ms 的影响, 使得步进电机在 2 kHz 频率下能够平

稳运行, 但是 3 kHz 的运行频率便无法正常运行。

4 结论

本文针对空间光学遥感器应用中, 利用恒压驱动的步进电机在高频运行条件下, 出现无法正常运转的情况, 设计了基于 LMD18200 芯片的恒流驱动电路。通过 Matlab 仿真分析得出恒流驱动电路的电流上升斜率大, 在电机型号 TS3641N1E2 的测试条件下, 达到稳态电流的时间为 0.25 ms, 是恒压驱动电路时间的 1/4。从实验结果可以看出, 在 1 kHz 的运行频率下, 恒压驱动电路电流波形接近于三角波, 电机无法正常运转, 而恒流驱动电路可以达到 2 kHz 以上的运行频率。

利用恒流驱动电路进行设计, 电流的上升速度更快, 步进电机可以获得更高的匀速运行频率。通过滞环控制将电流限制在合理的范围内, 既保证了控制跟踪性能, 又防止系统出现不稳定的状态, 高频响应特性也得到明显改善, 满足了空间光学遥感器对机构运行快速性和平稳性的要求。

参考文献:

- [1] 李 婧, 金占雷. 两相步进电机单极性细分驱动器的实现 [J]. 控制与应用技术, 2012, 39 (3): 14-18.
- [2] 蔡洪宝, 侯远龙, 高 强. 基于 TC1002 的两相混合式步进电机细分驱动器设计 [J]. 机械制造与自动化, 2017, 46 (3): 215-219.
- [3] 冒建亮, 叶 桦, 李 奇. 基于 FPGA 的步进电机电流优化控制策略 [J]. 信息与控制, 2015, 44 (5): 585-591.
- [4] 王邦继, 刘庆想, 周 磊, 等. 步进电机控制系统建模及加减速度曲线优化 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22 (1): 37-39.
- [5] Dhruti Ranjan Gaan. Real-Time Precise Position Tracking With Stepper Motor Using Frequency Modulation Based Microstepping [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54 (1): 693-701.
- [6] 李建军, 左 巍. 基于切换的步进电机驱动力矩的研究 [J]. 计算机与现代化, 2012, 199 (3): 155-158.
- [7] 廖 平, 韩伟伟. 基于 STM32 多步电机驱动控制系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2016, 20 (4): 71-74.
- [8] 徐 锐, 党幼云, 张 峰. 四自由度机械手多细分步进电机驱动器的设计 [J]. 西安工程大学学报, 2015, 29 (6): 714-719.
- [9] 鲁炳林, 徐衍亮, 辛 峰. 定子永磁和转子永磁混合式步进电机性能比较研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (21): 6255-6257.
- [10] Wang Yong, Wang Wei, Yang Wentao. Control system design of acceleration and deceleration curves of stepping motor and its application [J]. Control Engineering of China, 2008, 15 (5): 576-579.
- [11] Qi Zeng. Design of a Driver of Two-phase Hybrid Stepper Motor Based on THB6064H [J]. Materials Science and Engineering, 2017, 199 (1): 11-14.