

文章编号: 1672-8785(2022)05-0001-08

红外地平仪电机电流遥测 数据波动现象研究

周士兵 郭 玮

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 对某型号卫星红外地平仪用直流无刷电机在卫星测试过程中出现的电机电流遥测数据波动现象进行了研究。该红外地平仪选用的直流无刷电机具有低转速、小负载特性。通过对该型直流无刷电机的稳速驱动电路进行分析, 根据电路锁相工作原理, 阐明了电机电流遥测数据波动现象的成因。机理分析表明, 直流无刷电机电流遥测数据波动现象是由于电机换相时产生的电流尖峰被采样电路采样到所致, 不影响电机的安全可靠工作, 也不影响产品在地面及在轨工作的使用寿命。通过对采样信号生成软件进行优化, 可有效避免电机电流遥测数据波动现象。

关键词: 红外地平仪; 遥测数据; 锁相环; 采样

中图分类号: TM33 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.05.001

Research on the Telemetric Current Fluctuation of Infrared Earth Sensor Motor

ZHOU Shi-bing, GUO Wei

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The telemetric current fluctuation of infrared earth sensor motor for a certain type of satellite is discussed, which occurred in the satellite test. The brushless DC motor selected for the infrared earth sensor has the characteristics of low-speed and small-load. By analyzing the steady-speed driving circuit of this brushless DC motor, and according to the working principle of the circuit phase locking, the cause of the telemetric current fluctuation is demonstrated. The mechanism analysis shows that the telemetric current fluctuation of the brushless DC motor is caused by the current spike generated in the motor commutation being sampled by the sampling circuit, which neither affects the safe and reliable operation of the motor nor affects the product's service life on the ground and on-orbit. By optimizing the sampling signal generation software, the telemetric current fluctuation of the motor can be effectively avoided.

Key words: infrared earth sensor; telemetric data; phase-locked loop; sampling

收稿日期: 2022-01-26

作者简介: 周士兵(1971-), 男, 江苏徐州人, 正高级工程师, 主要研究方向为卫星姿态敏感仪器以及红外光电探测技术。E-mail: 13816644432@163.com

0 引言

某型号卫星红外地平仪^[1]选用的光学扫描直流无刷电机转速为 1 r/s、负载为 70 g、转动惯量约为 250 g·cm²。该电机具有低转速小负载的特性。红外地平仪随卫星整星测试过程中,在温度交变情况下会出现电机电流遥测数据波动的现象,后经多次开关机试验,在常温常压下偶尔也会出现这种现象。根据直流无刷电机的结构特性、电特性以及电机驱动电路系统采用的锁相环控制原理,本文对直流无刷电机电流遥测数据波动现象进行分析研究,以确保产品在地面和在轨工作时的可靠性。

1 电机工作过程中的遥测电流波动现象

红外地平仪在卫星整星测试时,根据单机下传数据,发现电机电流遥测偶尔会出现

波动现象。为确保产品的安全可靠,后经多次常温常压试验和真空温度试验,电机电流遥测都会偶尔出现波动现象。由常温常压情况下的电机电流遥测波动曲线(见图 1)以及热真空试验中的电机电流遥测波动曲线(见图 2)可见,单机电机电流都是从正常工作时的 10 mA 左右波动到 22 mA 左右,且每次波动的最大幅度相近。

2 电机驱动电路系统设计

2.1 电机驱动电路设计与工作原理

如图 3 所示,红外地平仪电机驱动和稳速电路^[2]主要包括锁相电路、译码电路和上下桥路。红外地平仪所用电机为三相直流无刷电机。电机三相绕组 MA、MB、MC 采用 Y 形接法,通电方式为两相导通三相六拍状态。光

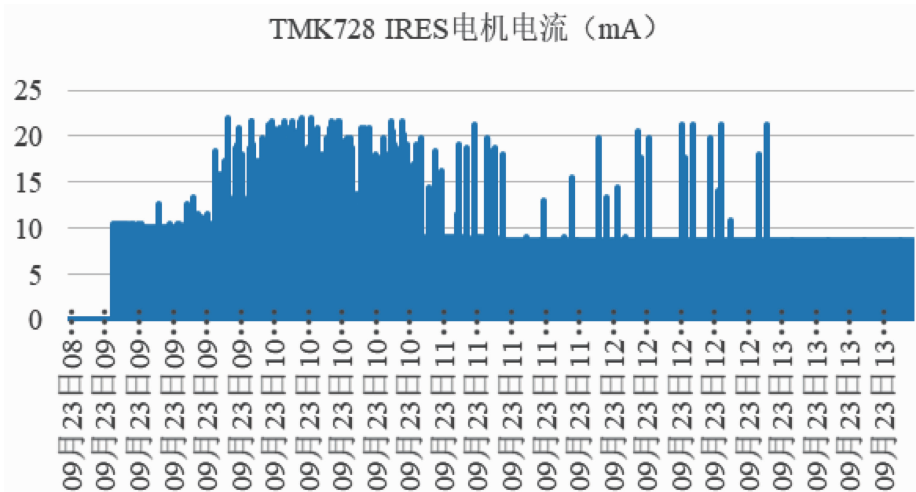


图 1 常温常压下的红外地平仪电机电流遥测波动曲线

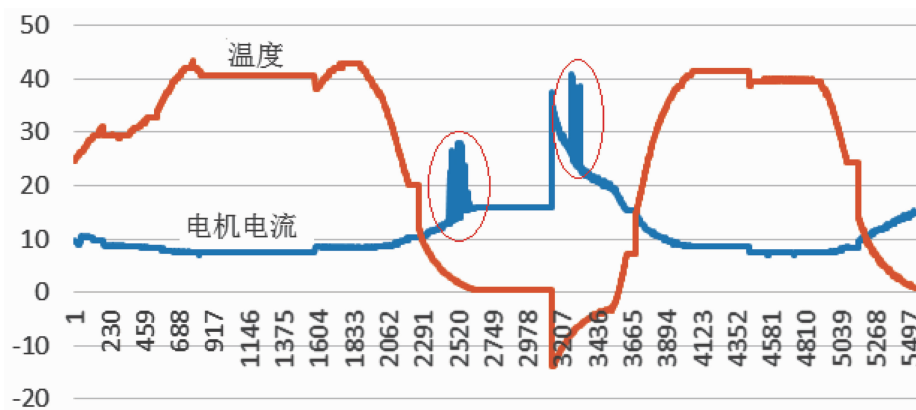


图 2 热真空试验中的红外地平仪电机电流遥测波动曲线(mA-°C)

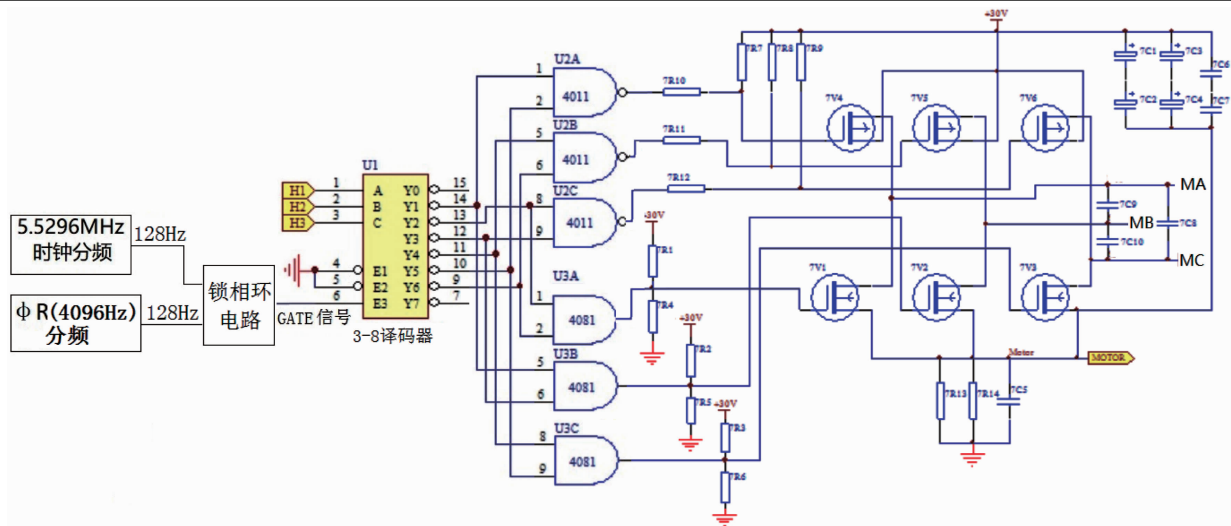


图 3 红外地水平仪电机驱动和稳速电路的原理图

栅编码器电路用于提供电机速度反馈信号，主要包括 1 Hz 的 $\phi 0$ 基准信号、4096 Hz 的 ϕR 信号以及三路频率为 6 Hz、相位相差 120° 的 H1、H2、H3 信号。其中，H1、H2、H3 信号作为 3-8 译码器输入的地址译码信号。

在电机驱动电路中，锁相环输入信号为由晶振信号分频得到的 128 Hz 标准时钟信号和由电机光栅编码器 4096 Hz 信号分频得到的 128 Hz 速度反馈信号。通过锁相环电路后输出频率为 128 Hz 且具有一定占空比方波的 GATE 信号。电机工作时，H1、H2、H3 信号被输入到 3-8 译码器进行译码。在锁相环输出的 128 Hz GATE 信号的控制下，电机绕组两两顺次导通，定子绕组不断换流，产生一个步进式的旋转磁场，从而实现电机的稳速控制。

2.2 锁相环电路的工作原理

红外地水平仪电机稳速锁相环电路通过比较标准时钟信号和由电机光栅编码器反馈的分频信号，生成占空比变化的具有一定频率的误差控制信号来调整电机转动的速率，以达到电机光栅编码器反馈的分频信号与标准时钟信号同频的目的，并最终保证电机以 1 r/s 的速率匀速转动。

在电机稳速转动过程中，如果负载有波动，那么锁相环输出控制信号的占空比就会随

之波动。负载变大，则误差控制信号的占空比变大；负载变小，则误差控制信号的占空比变小。这样就可确保电机驱动环路的稳速“锁定”状态。

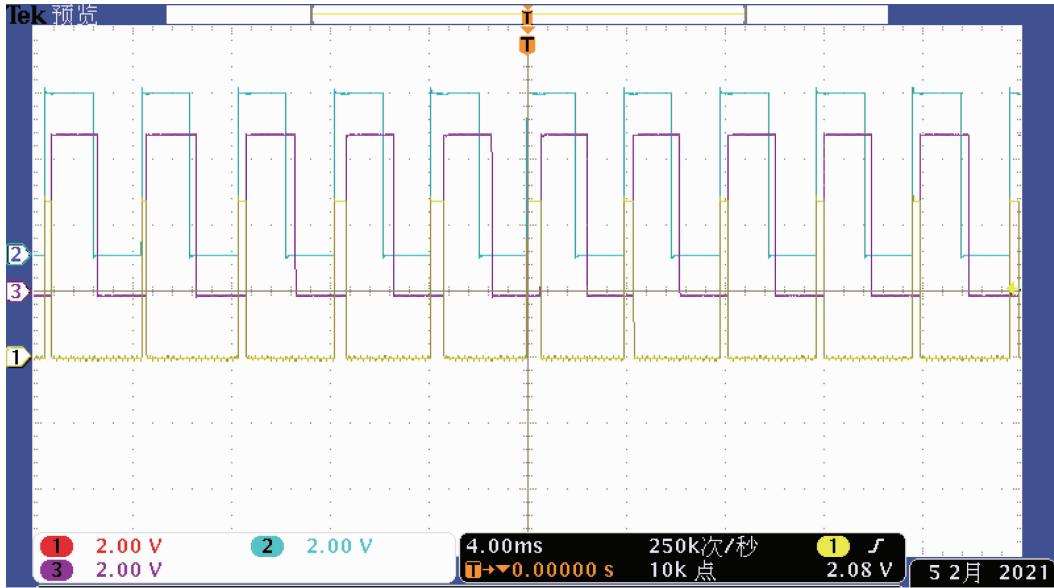
如果因电机负载瞬间变化较大而导致电机失速，那么驱动电路就会重新调整误差控制信号的频率和占空比，直至电机以 1 r/s 的速率匀速转动。此时，电机驱动环路重新进入稳速“锁定”状态。

对锁相环电路输入输出信号相序及波形进行了测试(见图 4)。图 4 中，示波器通道 CH2 为标准时钟信号，CH3 为电机光栅编码器反馈信号的分频信号，CH1 为锁相环输出信号。图 4(a)为正常工作时的波形图，图 4(b)为将电机负载加大时的锁相环输入输出信号相序图。可以看出，电机负载加大，锁相环输出信号的占空比变大，电机驱动表现为加力，以克服增加的阻力。

2.3 电机电流遥测电路原理

电机电流遥测电路^[3]中，电机电流通过两个并联的 2Ω 采样电阻并放大 52 倍，经 8 选 1 模拟门输入到 AD 转换电路(见图 5)。在正常情况下，电机电流约为 9~13 mA。

单机共输出 7 路遥测信号，采样频率为 1 Hz。根据时序控制，在模拟门各通道开关顺序中，电机电流遥测最先采样。采样点为电机



(a) 电机正常工作负载



(b) 电机负载加大

图4 电机工作时的锁相环输入输出信号相序图

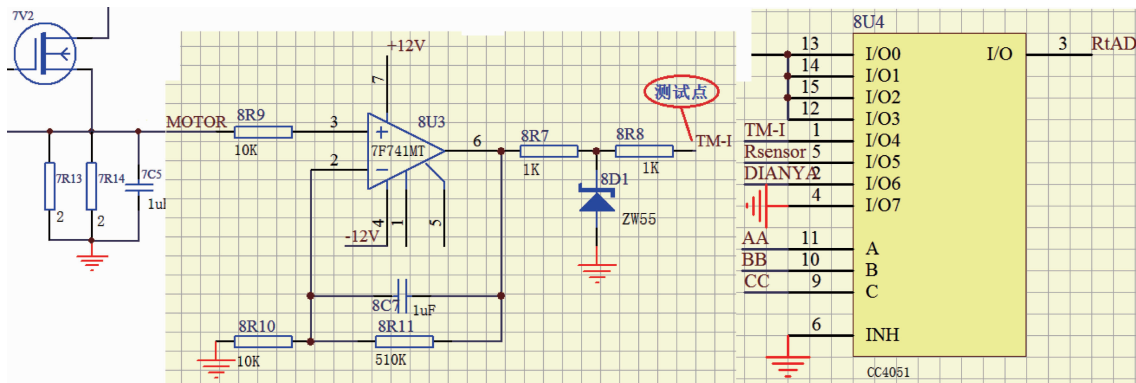
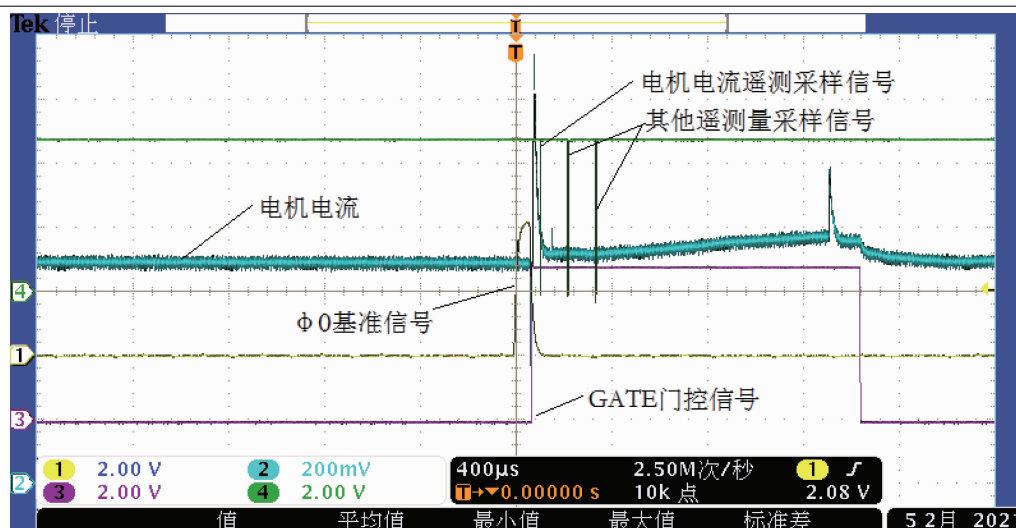


图5 电机电流遥测电路的原理图

图 6 遥测量采样信号与 ϕ_0 基准信号相序波形图

基准信号 ϕ_0 之后 $40.5 \mu\text{s}$ 位置处, 采样时间宽度为 $2 \mu\text{s}$ 。

对遥测采样信号与 ϕ_0 基准信号相序波形进行了测试(见图 6)。

3 电机电流遥测波动分析

红外地水平电机绕组的工作电压为 30 V 直流电压。在电机驱动电路的控制下, 该电压直接加到电机绕组上。绕组的工作方式为 0-1 式通断。在通电瞬间, 电机平均工作电流上会叠加电流尖峰信号。

电机驱动电路开始工作时, 光栅编码器反馈的 ϕ_R 信号经分频后输入到锁相环, 与 128 Hz 标准时钟信号比较生成锁相环 GATE 门控信号(即误差控制信号)。通过调整误差控制信号的占空比来实现电机转动的稳速控制。电机转动具有一定的稳定度^[4]。经测试, 电机转动周期稳定偏差约为 $100 \mu\text{s}$, 则电流尖峰位置相对于电流遥测采样信号会左右变化(变化量为 $100 \mu\text{s}$ 左右)。

电流尖峰信号在绕组通电瞬间产生, 其上升沿与 GATE 信号上升沿对齐, 同时与标准时钟信号上升沿对齐。单机 FPGA 加电工作时便开始对晶振信号进行分频。分频得到的 128 Hz 标准时钟信号与电流遥测采样信号在时间上的间距具有不确定性, 则同步信号电流尖峰的位置与电流遥测采样信号的间距也具有不确

定性, 导致电机电流遥测出现以下三种状态:

(1) 电机电流尖峰位置距离电流遥测采样信号远大于 $100 \mu\text{s}$, 则尖峰位置左右变化时不会被 AD 采样到, 电机电流遥测数据不会表现出波动现象。

(2) 电机电流尖峰位置距离电流遥测采样信号小于 $100 \mu\text{s}$, 则尖峰位置左右变化时会不时地被 AD 采样到, 电机电流遥测数据在单机整个工作过程中一直表现出波动现象, 如图 1 所示。

(3) 电机电流尖峰位置距离电流遥测采样信号稍大于 $100 \mu\text{s}$, 则单机工作时尖峰位置的左右变化不会被采样到, 电机电流遥测数据没有表现出波动现象。如果此时单机工况发生较大变化, 导致电机负载力矩瞬间发生较大变化, 电机出现失速-重新稳速的过程, 那么光栅编码器 ϕ_0 基准信号位置相对于 GATE 门控信号就会发生变化, 以 ϕ_0 信号为基准生成的电流遥测采样信号位置也会同步变化。若变化后的位置使得电流尖峰位置距离采样位置小于 $100 \mu\text{s}$, 则尖峰信号就会被 AD 采样到, 电机电流遥测数据出现波动。如果此时单机工况反向变化, 那么电机电流尖峰位置变化到距离采样信号位置 $100 \mu\text{s}$ 稍远处, 此时尖峰信号不再被 AD 采样到, 电机电流遥测数据也不再波动(见图 2)。

分析结果表明,直流无刷电机电流遥测数据波动是由于电机换相时产生的电流尖峰信号被采样电路采样到所致,即由遥测电路对电机电流的采样位置不同导致,而红外地平仪和电机自身技术状态没有变化。

4 试验结果分析

通过对技术状态完全相同的红外地平仪单机进行常温试验和热真空试验,验证电机电流遥测数据波动现象分析结果的合理性。

单机在常温状况下进行多次开关机试验,偶尔会出现电机电流遥测波动现象(见图7)。

对单机内部信号节点相序进行了测试(结果见图8)。CH1为 ϕ_0 ,用作触发信号;CH2为电机电流遥测信号;CH3为锁相环输出的GATE信号;CH4为AD采样信号。从图8中可以看出,与每个GATE信号上升沿对齐的电机电流信号均叠加了尖峰信号,距离采样信号最近的电机电流尖峰信号刚好被AD采样到。电机正常工作平均电流与尖峰电流相差12 mA左右。

在真空状况下对单机进行多个循环多次开关机试验^[4]。具体试验条件如下:(1)真空度小于等于 6.65×10^{-3} Pa。(2)温度变化速率大于等于 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 。(3)温度稳定度为 $\pm 3^\circ\text{C}$ 。(4)试验从室温开始,产品通电。当温度达到 37°C 时,保温4 h后产品降温至 -15°C ;保温2 h后,升温至 37°C ;保温1 h,关机,试验

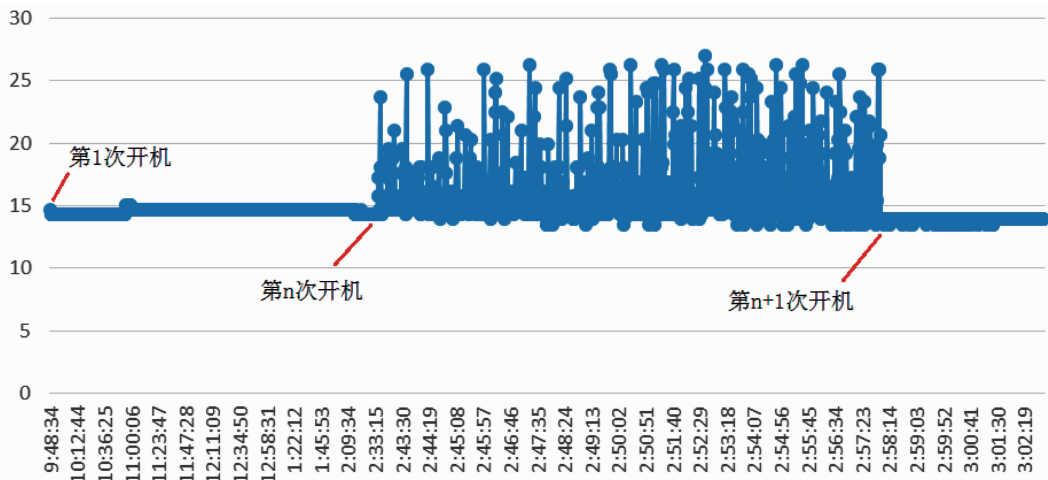


图7 单机常温常压试验的电机电流遥测曲线图(mA)

结束。

按上述试验条件进行了多次试验。结果表明,电机电流偶尔会出现第三节中所分析的第三种状态,即工况变化过程中电流遥测数据的短时间波动现象(见图9)。其中,遥测数据的最大波动值约为12 mA。

5 电流遥测数据波动现象的出现概率

根据电路设计,晶振信号分频后的标准时钟信号频率为128 Hz。基于之前对此类型电机转动稳定性的研究^[5],对于同类技术状态的电机,可将电机转动周期稳定偏差设定为 $100 \mu\text{s}$ 。考虑到电流尖峰信号与标准时钟信号同步,且与上升沿对齐,则电机电流遥测采样信号之前或之后 $100 \mu\text{s}$ 距离内如果有标准时钟信号,就会出现电流遥测数据波动现象。

根据式(1)可以计算出电机电流遥测数据波动现象出现的概率^[6]:

$$p = \frac{2 \times 100 \times 10^{-6}}{1} = 0.0256$$

由计算结果可知,该红外地平仪电机电流遥测数据波动现象出现的概率为0.0256,与所研制产品在测试过程及多次试验验证中电机电流遥测数据波动现象出现的频次基本一致,且属于小概率事件。

6 优化设计

根据前文分析,电机电流遥测数据波动现

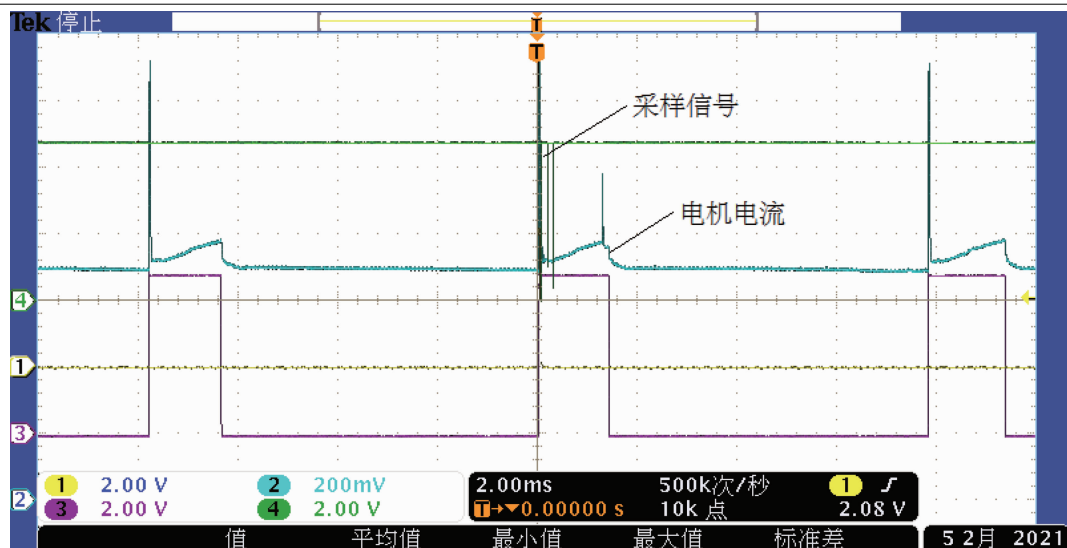


图 8 电机电流尖峰位置被 AD 采样到的波形图

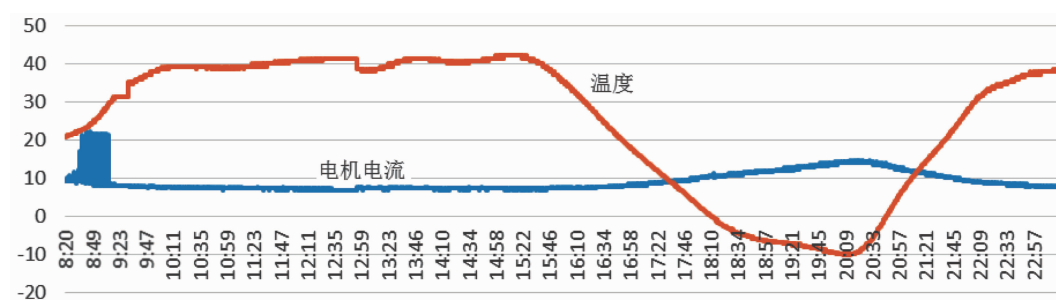


图 9 单机热真空试验的电机电流遥测数据-温度曲线图(mA-°C)

象产生的原因是遥测采样位置以电机信号 ϕ_0 为基准, 在 ϕ_0 之后 $40.5 \mu\text{s}$ 处。电流尖峰信号与 GATE 信号上升沿对齐, 而产品每次加电, GATE 信号上升沿与 ϕ_0 基准信号的相对位置具有不确定性, 因此会出现电机电流尖峰信号被遥测采样到的情况。

为了避免电机电流遥测数据波动现象, 在电机技术状态不变的情况下, 可以通过优化红外地平仪的 FPGA 软件来改变电机电流遥测采样信号的位置, 从而得到电机电流遥测数据的平滑结果。

在 FPGA 软件中, 将电机基准信号 ϕ_0 和其后的第一个 128 Hz 标准时钟的下降沿进行逻辑组合, 生成电机电流遥测采样信号(信号宽度为 $2 \mu\text{s}$)。该采样信号上升沿与电机基准信号 ϕ_0 之后的第一个 128 Hz 标准时钟下降沿对齐。

优化设计前, 每次产品加电, 电机电流遥

测采样信号与电机基准信号 ϕ_0 的相对位置固定; 在 ϕ_0 之后 $40.5 \mu\text{s}$ 处, 与电机电流尖峰信号的相对位置不固定。

优化设计后, 每次产品加电, 电机电流遥测采样信号与电机基准信号 ϕ_0 的相对位置不再固定, 而是在 ϕ_0 之后的第一个 128 Hz 标准时钟下降沿处, 与电机电流尖峰信号的相对位置固定。由于电机电流尖峰信号与 128 Hz 标准时钟的上升沿对齐, 可以确保电机电流遥测采样信号始终在两个电流尖峰信号的中间位置, 不会再采样到电机电流尖峰信号, 从而保证电机电流遥测采样数据的平滑。

7 结束语

红外地平仪是航天器姿态测量的重要设备之一。本文对其电机电流遥测数据波动现象进行了分析。电机采用锁相环电路稳速, 电机换相时绕组所加直流电压未经平滑处理, 电机绕组通电工作方式 of 0-1 式通断, 在通电瞬间电

机平均工作电流上会有尖峰信号叠加。当尖峰信号被 AD 转换电路采样到时, 电机电流遥测数据就会出现波动现象。该现象由遥测电路对电机电流的采样位置不同导致, 而单机自身技术状态在工作过程中并没有发生变化。

综合考虑电机工作瞬间尖峰电流的普遍存在以及相同技术状态产品的在轨工作情况(有的红外地平仪在轨工作时长已达 10 年, 远超设计寿命), 因此认为电机工作瞬间尖峰电流对电机组件可靠性和红外地平仪在轨可靠性及寿命影响不大。考虑到航天产品技术状态的稳定性和继承性, 在后续产品研制中, 电机设计技术状态不作更改, 仅对遥测采样信号生成软件部分进行优化设计, 以得到电机电流遥测的平滑数据。

参考文献

- [1] 杨晓宇. 双圆锥扫描式红外地球敏感器信息处理及检测精度的技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2007.
- [2] 谭建成. 电机控制专用集成电路 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [3] 何立民. MCS-51 系列单片机应用系统设计 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1996.
- [4] 卫星环境试验要求: GJB 1027-90 [S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1991.
- [5] 周士兵, 杨晓宇, 崔维鑫, 等. 低转速小负载无刷直流电机稳速控制 [J]. 微特电机, 2008, 36(6): 48-50.
- [6] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.