

无刷直流电机无感矢量控制观测器算法及软件开发

2025 年 第 2 周 周报

日期范围：2025 3 月 10 日到 3 月 15 日

报告人：陈炫润

一、项目进展（具体情况，可以以文字和图片详细说明）

| 项目/任务（对照上周或计划任务） | 进度 | 关键指标 | 完成度 |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 验证 DengFOC 无位置传感器 FOC 算法，借助 SMO+PLL 得出估算电角度并绘制，最后比较其与传感器测量的角度误差（*）。 | 1.电角度与机械角度关系理解，绘制曲线坐标轴变量确认。 2.查阅 simplefoc 以及 dengfoc 官方文档，明确验证版上所运行的 foc 算法的流程。 3.记录电压、电流、速度控制下估算的与有感测出的电角度数据，存放 excel 表格列中。 | ①估算角度与测得实际角度误差是否 $\leq 10^{\circ}$ （目前速度控制误差最小约 $45^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ） ②实际与估算速度误差，是否少于 300rpm. | 60% |
| 撰写毕业论文初稿，查阅有关观测器估算准确性的文献，记录调试办法。 | 1.论文框架有了基本雏形。 2.明确论文的核心指标就在于控制误差最优化。 3.阅读经典文献若干篇。 4.从 b 站上学习波形，以及检验观测器指标的方法。 5.持续搜集、整理资料，向核心方向内聚整合。 | 10 篇左右，包括大厂用户手册，学位论文，期刊论文。 | 80% |

展开说明：

前言注：由于接线失误、没有过早发现电流传感器烧坏的问题，导致 **FOC** 相关的例程都无法验证；3.14 号拿到新传感器，与胡师兄经过反复讨论调试记录后，板子上 M0 电机部分出现损坏，但是 M1 电机部分可以正常运行，经过修改例程对应代码，M1 电机能够成功运行所有 **FOC** 例程以及观测器例程。

1.重视电机堵转，堵转说明了 **FOC** 无法顺利运行，存在风险：

2.电流传感器接反烧毁，导致有感/无感 **FOC** 电流环计算时得不到三相流，无法计算磁轴电流、励磁电流。说明要重视电流采样的方式。

3.参照大多数验证观测器估算准确性的调试方法，第一个要明确的就是角度：电角度才是实际观测器计算得到的，相电流的相位也就是实际的电角度，机械角度是转子的实际角度。而电角度与机械角度又存在线性关系，这样参照论文里的电角度的线性曲线的横轴应该就是机械角度，纵轴就是经过 $0\sim 2\pi$ 归一化的电角度。

4.对于无感 **FOC** 的无感定义，不是说驱动板子上，什么传感器都不能用。虽然没有明确定义，但在 **simplefoc** 的开源社区得到了一份有参考意义的答案。无感就是指无位置传感器，电流采样当然可以使用传感器代替昂贵的差分运放电路。

5.**dengfoc** 代码相较于 **simplefoc** 确实有很大的提升，特别是内存占用，以及算法流程裸露度问题，并且加入了更为精准的电流闭环代码，从而保证力矩为 90° 最大。但是由于 **c++** 封装的便捷也暴露出一些问题，就是 **dengfoc** 滑模代码中，程序逻辑的问题，或者说例程就是为了验证算法服务的，没有考虑到进一步验证性能的需求：与罗工讨论后，认为有感和无感得到的电角度一定是不能同时获取的，角度误差一定包含了对应环控制对象相关的影响因素，以及提议说用速度控制闭环的低速来采集数据，结果误差更大。这是因为 **smo** 在低速运行的

时候很难收敛，实验时发现甚至出现了反转、堵转。需要控制策略如 HFI（高频注入）。

6.目前搜索了很多资料，还是需要去繁就简，向核心目标内聚，需要继续整理提炼。

7.还有一个比较重要的问题就是，根据资料来说，大部分的 BLDC 都是适合或者采用有感 FOC 或者无感 FOC 方波驱动，因为 BLDC 的反电动势是梯形。正是因为 PMSM 反电动势是正弦波，所以基于 PMSM 的无感 foc 控制算法会更加复杂，但是效果似乎也更好。目前 BLDC 与 PMSM 的具体区别还是感到模糊。但是观测器的研究的方向还是统一的。

二、问题与攻关（具体情况，可以以文字和图片详细说明）

1、技术瓶颈

-编程能力：如何修改例程中 runfoc()任务的逻辑，考虑传感器所测量更新的接口函数到底怎么样调用，怎么样做到补偿因为计算时间所带来的误差，更正为类似两者实时打印的效果，还有要编写一个正确的打印函数，修改打印的逻辑才行。进一步看 dengfoc 的 FOC 流程、滑模观测器、PLL 代码撰写调试的视频也许会有所帮助。

-数据处理：目前存放数据的方式十分整脚，无法说是可以帮助效果展现的，如下：

| | | | | | |
|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 1 | 电流控制 最精确 1.0-1.4 3.3239172.330739 2.908388.1819301 2.490468.1.440408 1.910248.0.997088 1.489586.0.457124 1.069163.0.003068 0.610227.5.853672 0.109370.5.464040 6.027417.4.859651 5.537547.4.566680 5.032010.4.080389 4.605513.3.647807 4.205028.3.140060 3.788339.2.761165 3.267773.2.296370 2.842914.1.713457 | 速度控制 1.3-1.4 5.420275.3.491340 16.52.48.851 -> 0.424219.5.739623 16.52.48.898 -> 2.846779.3.459127 16.52.48.946 -> 2.532839.3.632467 16.52.48.994 -> 5.591605.0.809941 16.52.49.041 -> 2.452144.3.755185 16.52.49.136 -> 5.115205.0.202485 16.52.49.184 -> 1.493099.2.825592 16.52.49.232 -> 3.929470.5.341321 16.52.49.279 -> 0.184146.1.595341 16.52.49.327 -> 2.605896.3.874835 16.52.49.422 -> 5.118863.0.300660 16.52.49.470 -> 1.394816.2.687534 16.52.49.517 -> 3.849347.5.246216 16.52.49.565 -> 6.273943.1.242525 16.52.49.660 -> | 电压控制 0.8-0.9 17.02.22.920 -> 2.071575.1.082991 17.02.22.968 -> 2.355711.1.276272 17.02.23.064 -> 2.523274.1.576932 17.02.23.111 -> 3.183243.2.405282 17.02.23.158 -> 2.019817.1.182699 17.02.23.205 -> 0.754547.6.264777 17.02.23.301 -> 5.804685.5.052933 17.02.23.348 -> 4.526590.3.647805 17.02.23.396 -> 3.323676.2.511127 17.02.23.443 -> 2.095091.1.331495 17.02.23.491 -> 0.929234.0.141126 17.02.23.585 -> 6.060193.5.319846 17.02.23.633 -> 4.755334.3.936195 17.02.23.680 -> 3.537579.2.649183 17.02.23.727 -> 2.304475.1.512505 | 完整控制0.3-0.4 -> 1.3-1.4 2.927936 3.362486 17.14.54 452 -> 2.019144 2.339320 17.14.54 547 -> 1.102699 1.487961 17.14.54 547 -> 0.209881 0.593650 17.14.54 642 -> 5.662468 6.089903 17.14.54 689 -> 4.690783 5.077475 17.14.54 736 -> 3.867961 4.258331 17.14.54 784 -> 2.939420 3.256641 | |
| 3 | 注：因为函数先后问题，导致角度又很大的偏差，解决这一部分逻辑带来的偏差，需要修改程序逻辑。 | | | | |

需要考虑使用上位机或者文件 IO 编程。确定正确的绘制方式。

-**调试方式：**有许多来自与知乎、*b* 站高手的总结的方法，需要花时间尝试；阅读文献也需要一定的时间，总的来说，做到勤动手，多实践才是首要。

2.资源需求

目前来看并没有什么资源需求，只有持续的深入研究，寻找到宝贵的调试经验建议，才有可能完成。网上有关观测器与传感器角度误差的资料非常少，相当于大海捞针，但还是能找到一些有帮助的。总结就是继续借助 DengFOCV4 验证版的平台做实验，记录数据，绘制波形曲线。

三、下周任务

- ①完成正确的有感/无感电角度同时打印，绘制曲线，记录数据。
- ②推进毕业论文第一、二章，整理文献资料、公式图表、算法解析。
- ③根据正确的数据，说明传统 SMO 的优缺点、性能，开始探寻优化方法。
- ④深入电机控制中如下词条理论的学习：BLDC 与 PMSM，无位置传感器，角度估算，磁场定向控制 FOC，滑膜观测器，PLL。