

doi: 10.7690/bgzd.2021.06.008

基于 DSP 微处理器的电机转速控制器设计

季伟¹, 王道波², 周凌子², 汪浩²

(1. 苏州长风航空电子有限公司, 江苏 苏州 215151; 2. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘要: 针对有刷直流电机的转速控制, 设计一种 DSP 转速控制器。基于 DSP 芯片 TMS320F28335, 以传统的 PI 控制算法为核心, 从硬件电路和控制结构 2 方面对转速控制器进行介绍, 并通过离合器接合性能测试, 对比 ECAP 捕获模块和 AD 采样模块的优劣, 从工程的角度优化和完善转速控制器的设计。结果表明: 该方法能优化 DSP 转速控制器的设计, 信号采集精度远远高于单纯的 AD 采样模块。

关键词: 转速; 直流电机; PI 控制算法; DSP 转速控制器; 离合器接合性能测试

中图分类号: TP23 **文献标志码:** A

Design of Motor Rotary Speed Controller Based on DSP Microprocessor

Ji Wei¹, Wang Daobo², Zhou Lingzi², Wang Hao²

(1. Suzhou Changfeng Avionics Co., Ltd., Suzhou 245151, China;

2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the rotary speed control of brush DC motor, design the DSP rotary speed controller. Based on DSP chip TMS320F28335, taking traditional PI control algorithm as core, introduce hardware circuit and control structure of rotary speed controller. Compare ECAP capture module with AD sampling module through clutch joint performance test. The design of speed controller is optimized and improved from an engineering perspective. The results show that the method can optimize design of DSP rotary speed controller and the signal collection accuracy is much higher than AD sampling module.

Keywords: rotary speed; DC motor; PI control algorithm; DSP rotary speed controller; clutch joint performance test

0 引言

对于结构复杂、精密度高、转速快的电机, 工程上往往会采取相对简单的算法来实现对其转速的控制, 如 PI 控制算法^[1], 其应用广泛, 可靠性高, 较为容易实现, 且所需成本不高。

以离合器高速接合电机为控制对象, 电机转速最高能达到 20 000 r/min。2 个电机转速相交时中间的离合器会将 2 个电机进行接合, 一个电机将驱动另一个电机转动, 此时另一个电机仅作为惯性负载随动。驱动电机称为输入端电机, 被驱动的电机称为输出端电机。笔者设计的 DSP 转速控制器需同时对这 2 个电机的转速进行控制, 不仅控制精度要高, 而且需要保证有一定的抗干扰性能, 防止 2 个电机的转速信号相互影响, 降低控制效果。

动电压的增大而上升(功放电流恒定 200 A), 输入端电机通过传动比为 1 的传动装置驱动内圈转动, 输出端电机通过传动比为 69/51 的传动装置驱动外圈转动, 因此内圈转速与输入端电机的转速同步, 而外圈转速与输出端电机转速之比则为 69/51。

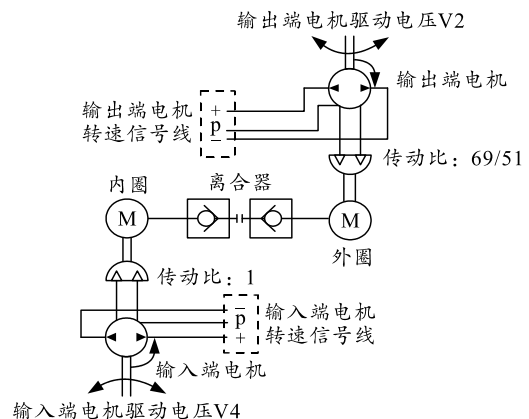


图 1 离合器高速接合电机(离合器未结合)

输入端电机和输出端电机分别安装有转速传感器, 转速信号线引出用以采集转速信号, +线与-线为信号正负极, p 线为屏蔽线, 一般与外包铜线相

1 电机转速控制系统

1.1 离合器高速接合电机结构

离合器高速接合电机结构如图 1 所示。

输入端电机转速与输出端电机转速会随着其驱

收稿日期: 2021-02-09; 修回日期: 2021-03-28

作者简介: 季伟(1995—), 男, 江苏人, 硕士, 从事无人机飞行控制研究。E-mail: 2390928788@qq.com。

连以降低干扰。如图 2 所示，当外圈转速与内圈转速逐渐靠近并相等时，二者将通过离合器进行接合。此时，输入端电机将会通过内圈、驱动外圈以相同速度进行转动。

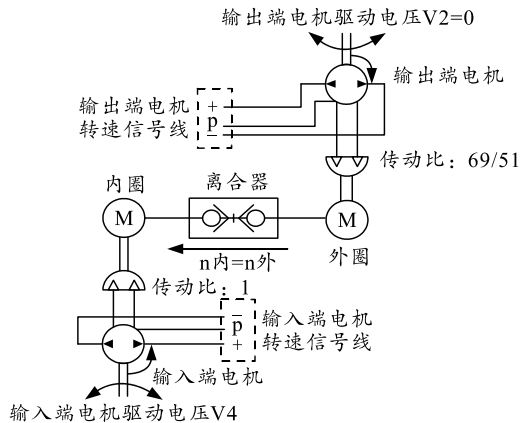


图 2 离合器高速接合电机 (离合器已接合)

1.2 离合器高速接合电机控制系统

如图 3 所示，离合器接合电机整体控制系统由控制柜内的工控机和功放、DSP 转速控制器以及离合器高速接合电机组成。

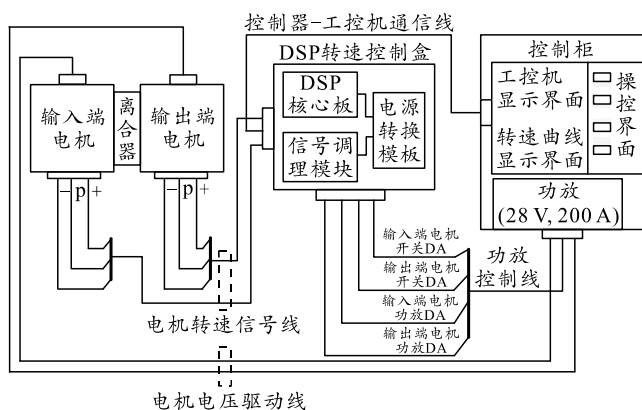


图 3 电机转速控制系统

利用 DSP 核心板 TMS320F28335 芯片的 SCI 功能外设，实现转速控制器与工控机之间的异步串行通信。通过控制器-工控机通信线，转速控制指令可由工控机发送到 DSP 控制器，同时电机转速也可由 DSP 控制器传递到工控机进行显示。

转速控制盒的 DSP 核心板对外有 4 路 DA 输出，其中两路作为电机的开关，输出 +5 V 连接至控制柜内的继电器，通过控制功放输出的通断来控制输入端电机和输出端电机的启动和停止。另外两路作为功放的输入，通过控制这两路 DA 的大小来改变电机驱动电压，从而控制 2 个电机转速的上升和下降。

电机的转速信号需要通过信号调理电路才能被 DSP 核心板采集和解析，控制盒内的电源转换模块

则用于为 DSP 核心板和信号调理模块供电。控制器根据工控机发过来的目标转速和加速度，结合电机实时转速，输出相应的驱动电压，使电机以一定时间达到目标转速，从而实现对电机转速的闭环控制。

2 DSP 转速控制器硬件设计

对转速信号的采集和解析模块是 DSP 转速控制器设计中的重要一环^[2]，转速值不仅要传递到工控机进行显示，而且要实时代入到转速的闭环控制。TMS320F28335 芯片共有 2 种功能外设可用于转速信号的采集，分别为 ECAP 捕获和 AD 采样。

2.1 ECAP 捕获模块电路设计

ECAP 捕获可直接对输入信号的脉冲进行计数，对于转速的测量更为精准。电机转速传感器输出的转速信号为正弦信号，电机转速与正弦信号的频率成正比。图 4 是 ECAP 捕获模块的信号调理电路。

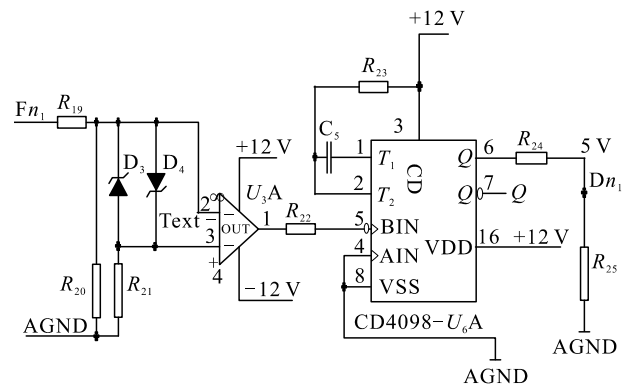


图 4 ECAP 捕获模块信号调理电路

电机的转速信号，通过该电路接入 DSP 核心板的 ECAP 捕获引脚 Dn_1 进行采集和解析。 Fn_1 和 AGND 是输入信号的正极和负极， D_3 和 D_4 是一对二极管构成并联电路，用于对输入信号进行限幅，硅管二极管会将输入电压限制在 $-0.7 \sim 0.7$ V。

U_3A 为比较器，当电压 $U_3 > U_2$ 时，输出高电平；当 $U_3 < U_2$ 时，输出低电平。比较器 3 端接地，所以 $U_3 = 0$ 。 U_2 接电机转速信号，电机转速信号是一个幅值为 $-0.7 \sim 0.7$ V 的正弦波，比较器输出电平为 U_o 。

CD4098 包含 2 个独立的单稳态触发器， U_6A 是其中之一。图 4 中 CD4098 的正极接地，负极接输入信号 U_o ，根据芯片的功能，在输入信号 U_o 的下降沿会触发 Q 端输出一个正脉冲，图 4 中的 Q 端输出一个负脉冲。

Q 端输出脉冲信号经 R_{24} 和 R_{25} 降压后输入至 ECAP 引脚 Dn_1 。转速信号转换过程如图 5 所示。

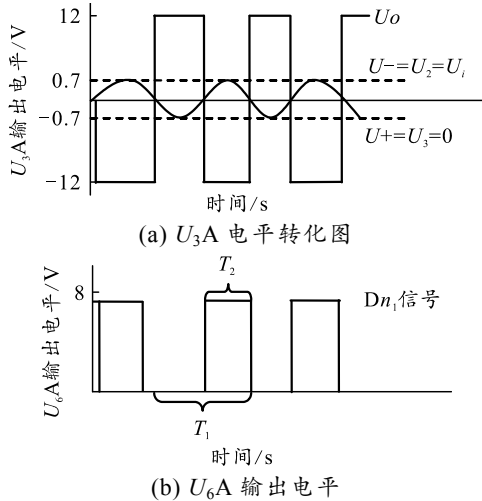


图 5 转速正弦信号-脉冲信号转换

图 5 中 T_1 为脉冲信号频率的倒数，即信号的周期。当电机转速上升，输入信号的频率不断增大， T_1 将不断减小，当脉宽 T_2 不变时， Dn_1 输出的脉冲信号将会越来越趋近于恒压，ECAP 捕获模块将无法再有效地采集转速信号。

CD4098 可对输入的脉冲信号进行延时和展宽，所用的稳态触发器 CD4098，不仅 Q 引脚以及 \bar{Q} 引脚输出的脉冲宽度相同，而且其宽度受图 4 中电容值 C_5 以及电阻值 R_{23} 的影响，对脉冲宽度时间的估算公式可以用 $T_2=(C_5 \times R_{23})/2$ 来表示。

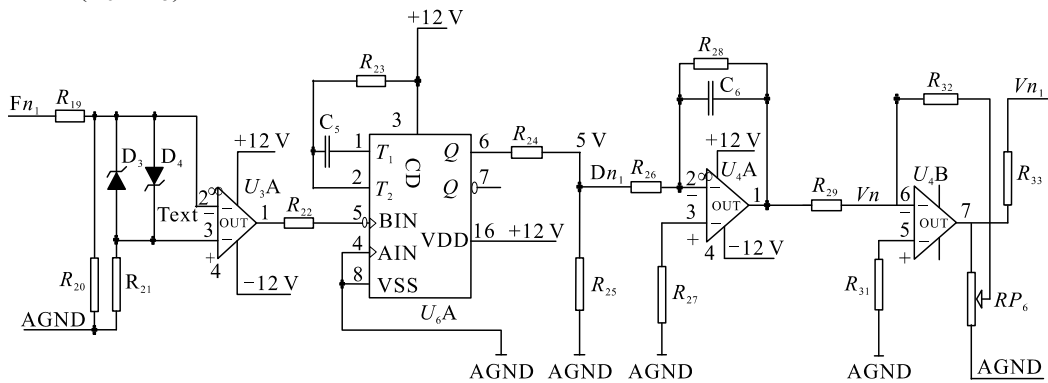


图 6 AD 采样模块信号调理电路

根据线性电路虚短和虚断的特性可知，积分电路输出电压 $U_o=-1/RC \int U_i dt$ 。其中， $R=R_{26}$ ， $C=C_6$ ， U_i 为输入的矩形脉冲信号，利用反馈电容充电放电的特性，可输出三角脉冲信号。其中，反馈电容并联一个电阻 R_{28} 是为了给电容提供放电回路，避免积分漂移造成放大器饱和。

如图 7 所示，当时间常数 $\tau=RC \gg T_1$ (积分电路对输入脉冲信号的周期要求)，电容冲放电速度较慢，因此三角波虽然有起伏，但较为平稳，基本实现了脉冲信号向模拟信号的转换。

根据规格，离合器接合电机转速最高可达 20 000 r/min，由转速公式可以计算 Dn_1 输出信号频率最高在 1 333 Hz，因而周期 T_1 最小能达到 0.75 ms，那么信号的脉宽最宽也要低于 0.75 ms。将 R_{23} 接为 10 k Ω 电阻， C_5 接为 0.1 μ F 的电容，电路输出信号的脉宽就减小至 0.5 ms，ECAP 捕获模块便可以检测到 20 000 r/min 至更高的转速。

2.2 AD 采样模块电路设计

AD 采样可将电压模拟量转化为数字量。通过调理电路将一定频率的转速信号转化为相应电压^[3]，输入至 DSP 核心板的 AD 采样引脚，DSP 便可通过一定换算得到电机的实时转速。AD 采样模块虽然在采集精度上不如 ECAP 捕获模块，但其抗干扰能力强，在有振动工况的环境下更能胜任。

为简化 AD 采样信号调理电路，可在 ECAP 捕获信号调理电路的基础上进行完善，在其输出端 Dn_1 串联一个积分电路和反比例运算放大电路，如图 6 所示。这 2 个电路的作用是将 Dn_1 端周期脉冲信号转化为直流模拟信号 Vn ，并通过调节滑动变阻器来调节模拟信号的增益，让输出端 Vn_1 的电压限制在 0~10 V；再通过 DSP 核心板中的比例运算放大电路将电压转化为 0~3 V，传至 TM320F28335 相应的 AD 采样引脚。

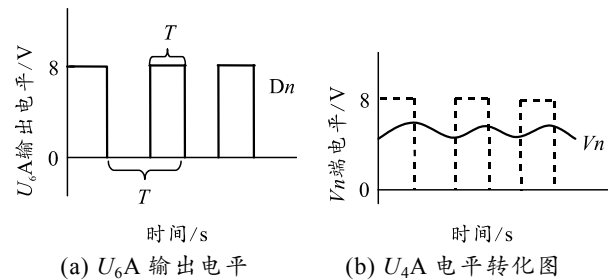


图 7 转速脉冲信号-模拟信号转化

理论上，积分电路输出的直流电压，与 Dn_1 端脉冲信号的占空比、高电平幅值成正比。当信号脉

宽 T_2 与高电平幅值不变时，输出的直流电压 V_n 与 Dn_1 端信号的周期 T_1 成反比，即与 Dn_1 端信号的频率成正比，相当于反馈电容充电时间相对放电时间更长，输出电压将升高。输出的直流电压 V_n ，即模拟信号，最大为脉冲幅值 8 V，最小则接近 0 V。

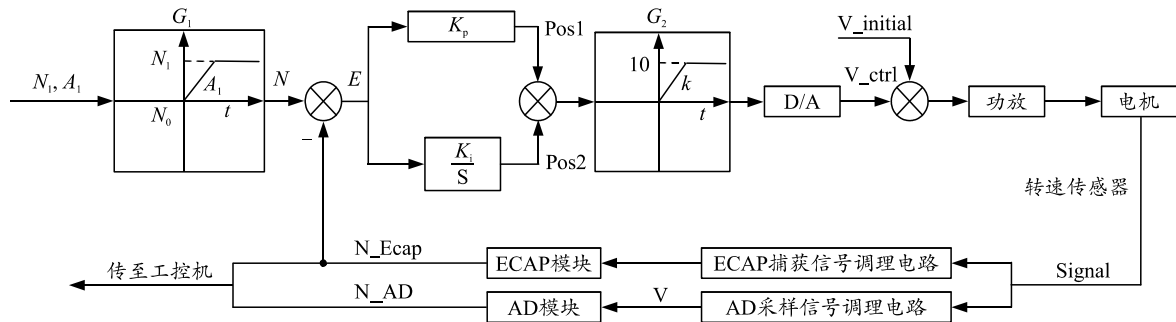


图 8 ECAP 捕获模块控制结构

图中 N_1 和 $A_1 (>0)$ 是利用工控机给定控制器的目标转速和加速度， G_1 表示目标转速 N_1 的转换环节，初始转速 N_0 会以加速度 A_1 逐渐上升或者下降至 N_1 ；因此，电机运转到目标转速的快慢可通过设置加速度 A_1 的大小来决定。

$Pos1$ 和 $Pos2$ 分别是比例环与积分环的控制分量，二者相加即为电机的控制量。因为控制器 D/A 转换模块的输出电压为 $-10 \sim 10$ V，而作为控制对象的电机只需以一个方向固定旋转，无需反压，因此设置限幅环节 G_2 ，把 DA 输出控制在 $0 \sim 10$ V，输出电压的快慢也可在程序中通过设置斜率 k 来实现。

控制电压 V_{ctrl} 输入至功放来控制电机的转速，转速传感器将转速信号传递到信号调理电路，

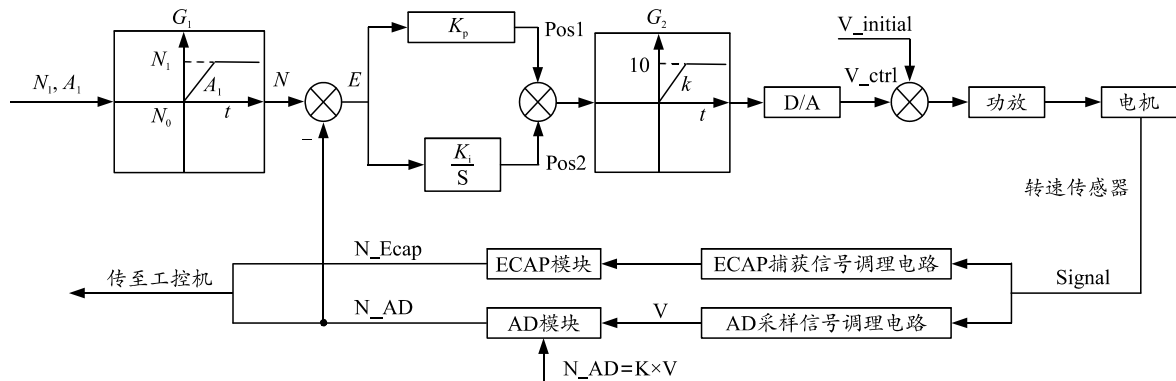


图 9 AD 采样模块控制结构

首先需要得知转速 N_{AD} 与采样电压 V 之间的线性关系，利用信号发生器，给信号调理电路输入频率为 0 与频率为 1 333 Hz 的正弦波，分别代表 0 转速和最高转速的信号。0 转速信号输出电压 $V=0$ ；

3 DSP 转速控制器算法设计

3.1 ECAP 捕获模块控制结构

将 ECAP 捕获模块所采集到的电机转速 N_{ECAP} 代入控制，电机转速的闭环控制结构如图 8 所示。

以供 ECAP 模块捕获和 AD 模块采样，从而获取 N_{Ecap} 和 N_{AD} 两路转速，传至工控机显示和对比，并选择一路切入闭环控制。

在 ECAP 模块中，DSP 采集前一个脉冲时刻为 $Tst1$ ，后一个脉冲的采集时刻为 $Tst2$ ，DSP 系统时钟频率为 150 MHz，电机每转 1 圈转速传感器将发出 4 个脉冲，通过公式 $N=1/((Tst2-Tst1) \times 1/150\,000\,000) \times 60/4$ ，即可实时计算电机的转速。

3.2 AD 采样模块控制结构

ECAP 捕获模块虽然采集精度高，但理论上抗干扰能力较弱^[4]。若 2 个电机未通过离合器接合，以不同转速同时运行，甚至是在有振动工况的情况下，只能选择抗干扰能力较强的 AD 采样模块进行转速采集。其闭环控制结构如图 9 所示。

输入 1 333 Hz 转速信号，通过调节滑动变阻器，将输出端电压 V 调至 10 V。最高转速 20 000 r/min 比上最高电压 10 V，即得到转速 N_{AD} 与采样电压 V 的线性关系为： $N_{AD}=2\,000 V$ ，DSP 核心板将采集

的电压值进行换算得到当前转速。

3.3 转速控制调试

控制系统可利用 DA 输出控制离合电机的启动和停止,电机飞车可以立即发送停止指令切断电机电源,停止电机运行;因此,可用实际试车效果来对比例系数 K_p 和积分系数 K_i 进行调参^[5],省略了仿真实验环节,降低了时间成本。

已知电机的转速最高可达 20 000 r/min,而控制器输入至功放的控制电压 V_{ctrl} 在 10 V 以内。根据调试经验,可将 K_p 与 K_i 的取值限制在 0.000 1~0.001,使 DSP 转速控制器输出的控制电压 V_{ctrl} 不易超出上限,较为稳妥安全。

调试过程中,发现电机转速在低速爬升时,抖动较为严重,且电机转速有超调。

1) 降低比例系数 K_p ,并在控制软件中对 K_p 作如图 10 的设置。

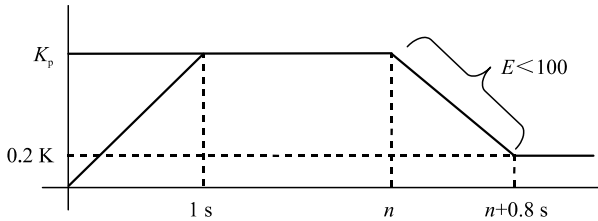


图 10 比例系数 K_p 设置

在电机启动时,比例系数 K_p 增益从 0 以 0.001 ms 的斜率上升,用以降低电机低速爬升时的转速波动;当实际转速靠近目标转速,转速差 $E < 100$ r/min 时,比例系数 K_p 增益 k 再以 -0.001 ms 斜率降到 0.2 ms,用以消除转速超调。

2) 从工程的角度,可以通过 DA 给定电机一个 1~2 V 的初始电压 $V_{initial}$,相当于补偿,可以让电机启动时在最快时间内达到一个初始速度,避免电机转速在低速爬升时产生波动。

3) 适当增加积分系数 K_i ,并对积分环节作如图 11 的设置。

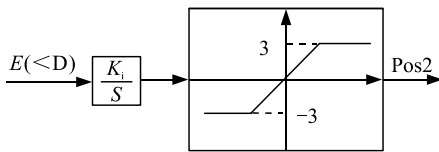


图 11 积分系数 K_i 设置

当目标转速与实际转速的偏差 $E < D$ (比如 1 000 r/min),积分环节才起作用,同时为了防止积分饱和,设置了积分限幅。积分饱和会使控制器失效,产生非受控行为,对积分环节进行如此设置有利于提高转速控制的精度和可控性。

4 离合器高速接合性能实验

具体实验流程:先启动输出端电机,让外圈转速达到一定数值,比如最高转速的 92%,再启动输入端电机,让内圈转速上升,DSP 转速控制程序中设定,当内圈转速达到最高转速的 82%时,自动停止输出端电机,外圈转速将迅速下降。在这 10% 的转速差中,外圈转速将与内圈转速相交,届时离合器接合,输入端电机将会驱动外圈以相同速度运行。

首先,利用 ECAP 捕获模块来采集电机转速,实验结果如图 12 所示。

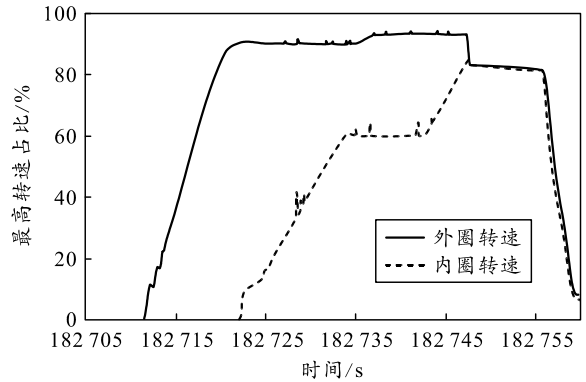


图 12 ECAP 捕获模块所采集的转速波形

从上图可以看出,2 个电机的离合器接合成功且内圈转速与外圈转速一致,说明将 ECAP 捕获模块作为转速反馈通道,对电机转速控制的平稳性和准确性有保障。

输入端电机与输出端电机同时运行,在离合器尚未接合的情况下,可看出内圈转速有明显毛刺,外圈转速有轻微毛刺,显然是由于 2 个电机的转速信号相互影响所致,说明以 ECAP 捕获模块为转速反馈通道的 DSP 转速控制器抗干扰能力不强。

其次,利用 AD 采样模块来采集电机转速。在单独驱动某端电机时,转速曲线较为平滑,抗干扰能力较好。而后进行了离合器接合性能实验,实验结果如图 13 所示。

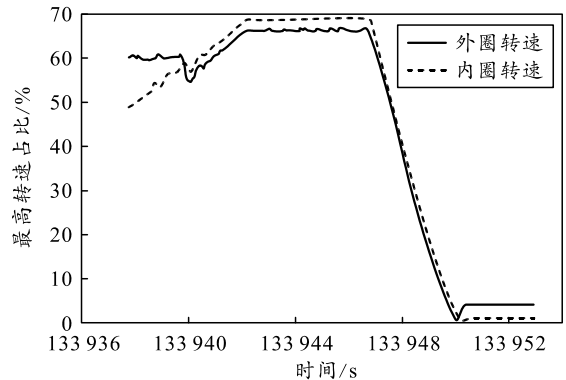


图 13 AD 采样模块所采集的转速波形

在输入端电机与输出端电机接合的情况下，内圈转速曲线与外圈转速曲线只有轻微波动，因此 AD 采样模块具有较好的抗干扰性能；但是离合器接合后，数值应一致的内圈转速与外圈转速相差 400 r/min，说明以 AD 采样模块作为转速反馈通道的 DSP 转速控制器精度较低。

5 对 DSP 转速控制器的优化与完善

如图 14 所示，从工程角度来兼顾这 2 种转速采集模块的优点，并弥补其缺陷，特地选用外部设备 SPEED TRANSMITTER 来对转速信号进行转化。



图 14 转速信号转化器实物

S4-RT SPEED TRANSMITTER 标识上写明是转速信号转化器，本质上是把一定频率的信号转化为一定的电压，输入信号的频率范围是 0~10 KHz，输出电压的范围是 0~10 V，因此 1 V 对应 1 KHz。图 15 是信号转化器用于转速控制的反馈通道^[6]。

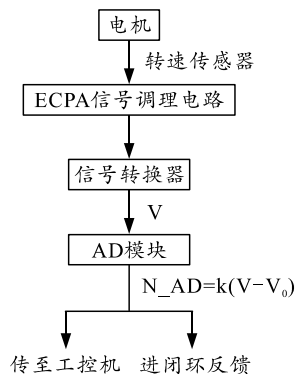


图 15 信号转化器所在转速控制反馈通道

转速信号先通过 ECAP 捕获模块信号调理电路进行调理，再传至信号转化器，转化为模拟量 V 供 DSP 核心板的 AD 模块采样，得到转速代入控制和用于显示。

电机最高转速为 20 000 r/min，转速信号频率最高为 1 333 Hz，因此转速信号转化器输出电压最大为 1.333 V。DSP 核心板利用 AD 模块采集电压数值，转速 N_{AD} 与电压 V 在 AD 模块的信号调参中，其

比例系数 K 应为 15 000。

当电机停转时，本该为 0 的电压模拟量 V 实测出现了一个微小的偏置 V_0 ，同样会产生一个转速信号，影响控制的精度和力度；因此，在信号调参中，先消除偏置电压值 V_0 ，最后得到电机转速与采样电压的线性关系为 $N_{AD} = k(V - V_0)$ 。经过完善的 DSP 转速控制器，实验效果如图 16 所示。

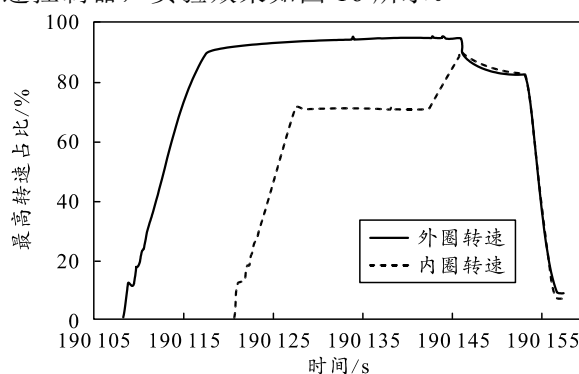


图 16 完善的转速反馈通道所采集的转速波形

经过 K_p , K_i 的不断调试，转速曲线不仅没有毛刺，而且信号采集精度远远高于单纯的 AD 采样模块，最终获得良好的控制效果。

6 结束语

针对电机的转速控制，笔者对基于 DSP 微处理器为核心的转速控制器进行设计。从硬件电路和控制结构 2 方面介绍转速控制器，同时进行转速控制调试。通过离合器高速接合性能测试，对比 ECAP 捕获模块和 AD 采样模块的优劣，并结合这 2 种转速采集模块的优点，从工程的角度，构造出控制效果更好的转速反馈通道，优化了设计。

参考文献：

- [1] 王璟, 何小刚. 一种基于 DSP 的无刷直流电机转速控制器[J]. 机械工程与自动化, 2012(2): 177-179.
- [2] 王昌盛, 郭家虎, 赵堃莹, 等. DSP 控制器在矿用电机转速测量和转子转角计算中的应用[J]. 煤矿机械, 2011, 32(9): 62-64.
- [3] 王光军. 具有 PID 调节功能的电磁调速电机控制器[J]. 广东化纤, 1998(1): 3-5.
- [4] 欧阳名三, 闫中文. 基于自抗扰的无刷直流电机控制系统研究[J]. 铜陵学院学报, 2020, 19(2): 102-104, 108.
- [5] 毛勇. 控制电机转速的 PID 算法综述[J]. 机电信息, 2011(6): 43-44.
- [6] 田秋实, 赵鹏. 步进电机控制器设计[J]. 中国科技信息, 2019(14): 69-71.