|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 档号 |  |  | 编号 |  |
| 保管期限 |  |  | 密级 | 非密 |
|  |  |  | 阶段标记 | M |

|  |  |
| --- | --- |
| 名称 | 21C852-0电机控制器 |
|  | 软件转速控制框架梳理 |

|  |
| --- |
| 会签 |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |

|  |  |
| --- | --- |
| 部门 | 控制研发部 |
| 编写 |  |
| 校对 |  |
| 审核 |  |
| 会签 |  |
| 标审 |  |
| 批准 |  |

|  |
| --- |
| 贵州航天林泉电机有限公司 |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 内容提要：  本文主要针对21C852-0电机控制器（231001#、231002#）软件框架流程进行梳理。 | | | | |
| 主题词 | 软件、框架、算法、故障 | | | |
| 更改栏 | 更改单号 | 更改日期 | 更改人 | 更改办法 |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

目录

[1 概述 3](#_Toc177118341)

[2 产品工作原理 3](#_Toc177118342)

[3 油泵电机转速控制过程 4](#_Toc177118343)

[4 PI算法 4](#_Toc177118344)

[5 转速控制流程 6](#_Toc177118345)

[5.1 周期自检 6](#_Toc177118346)

[5.2 转速环控制 6](#_Toc177118347)

[5.3 电流环控制 8](#_Toc177118348)

[6 故障保护 10](#_Toc177118349)

[6.1 超速保护 10](#_Toc177118350)

[6.2 过流保护 11](#_Toc177118351)

[6.3 过压保护、欠压保护 12](#_Toc177118352)

[6.4 过温保护 13](#_Toc177118353)

[6.5 旋变故障 14](#_Toc177118354)

[7 结论 15](#_Toc177118355)

21C852-0电机控制器软件转速控制框架梳理

# 概述

21C852-0电机控制器是为航天科技集团第六院第十一研究所配套的三合一电机控制器。2024年7月30日，控制器231002#在试验台进行联合动力试验的过程中，出现过流故障导致控制器未能成功驱动油泵电机按设定转速运行的情况。2024年9月5日，控制器在试验台进行整改措施验证过程中仍出现未启动问题。为了对电机不启动问题进行准确定位，特对控制器软件框架进行全面梳理。

# 产品工作原理

21C852-0电机控制器实现了一路油泵电机（代号：21C222-0）的转速控制和两路蝶阀电机（代号：ZL-69）的位置控制。通过RS422接收发动机控制器下发的指令，将目标指令换算为用于位置控制和转速控制的数字量，同时对电机运行过程的过程信息进行实时采集。对于两路蝶阀电机而言，获取目标位置和当前位置的偏差，控制电机按相应的方向高速旋转，电机带动减速机构驱动蝶阀向目标位置靠近。控制器根据不断更新的位置偏差信号，随时对电机转速和转矩进行控制，当位置偏差较大时，要求电机快速以最高转速运行，当位置偏差逐步减小逼近目标位置时，控制电机开始减速，直至达到要求的稳态精度后，电机开始进入动平衡状态，保持当前位置闭环控制。对于油泵电机而言，控制器根据不断跟新的转速与目标转速的偏差，实时调节PWM的输出，从而对电机转速进行实时控制，当达到目标转速并进入稳定状态后，保持当前转速，并进行闭环控制。双余度电机控制器工作原理如图 1所示。



图 1 电机控制器工作原理图

# 油泵电机转速控制过程

油泵电机接收发动机控制器下发的自检指令和控制指令，接收到自检指令时，返回控制器自检状态结果；接收到控制指令时，按照控制指令驱动电机按设定转速启动、运行、停止。转速控制流程如图 2所示，油泵电机控制板在接收到启动指令和转速设定指令后，将运行状态标志、转速控制标志、转矩控制标志设置为1，并进入转速控制过程。转速控制需要周期自检获取用于转速控制和转矩控制的转速信息和电流信息，然后使用采集的转速信息进行转速环控制，并使用转速环的输出和采集的电流进行电流环控制。在接收到停止指令或出现异常触发故障保护逻辑后，电机停止运行并退出控制流程。



图 2 油泵电机转速控制流程

# PI算法

PI控制算法在电机控制领域普遍使用，是转速环、电流环控制的核心，由比例项和积分项组成。PI控制器需要参考值、反馈值、比例系数、积分系数、累计误差值、积分上下限、PI输出上下限作为输入。

复查软件，该控制器采用限制积分上下限和输出上下限方式的PI算法，具体过程如图 3。首先，计算系统偏差，对于转速环而言偏差是转速，对于电流环而言偏差时D轴电流或Q轴电流偏差。该软件积分项是否进行计算由积分周期决定，当积分周期时间到达设定值时才进行积分项的计算，使用比例系数与累计误差相乘得到比例项输出。该软件对积分项输出做了钳位处理，当积分项输出达到设定上下限时将积分项输出设置为积分上下限值。随后，进行比例项计算，比例项输出等于偏差与比例系数相乘。最后，计算PI输出，使用比例项输出加上积分项输出得到PI的输出，该输出也会做了钳位处理，防止PI输出过大或过低。经过上述处理后得到PI算法的最终输出。



图 3 PI控制器算法流程

# 转速控制流程

## 周期自检

复查软件，周期自检按150us的周期对电机运行状态参数进行采集，用于电机的位置控制和转速控制，包括通过旋变获取电机角度信息、通过ADC获取三相电流、母线电流、母线电压以及驱动板温度，流程如图 4所示。其中，周期采集的信息一部分用于电机的转速闭环控制，一部分用于故障保护，一部分用于遥测数据通过RS422上传至发动机控制器。



图 4 周期自检流程

## 转速环控制

转速环是速度控制的外环，需要设定转速和反馈转速作为输入，经过PI计算后，得到用于内环电流环输入的Q轴电流。复查软件，转速环控制任务位于150us任务周期，计算周期为1.5ms，由控制周期计数器决定。转速环控制流程如图 5所示，需要设定转速、当前转速、转速增加值作为输入。首先，更具设定转速和当前反馈转速决定参考转速是增加还是减少，当目标转速大于当前转速时，当前转速加上转速增加值作为参考值；当目标转速低于当前转速时，当前转速减去速度增加值作为参考转速。随后进行计数器递增操作，并判断控制周期是否到达。转速周期到达即进行转速环PI计算，并将计算结果作为电流环的输入参与到电流环的计算中；当控制周期未达到时，采用前次PI的输出作为电流环的输入。



图 5 转速环控制流程

图 6为转速计算的具体过程，使用旋变采集的角度信息作为输入，电机转速作为输出。转速计算的第一步也是计算角度偏差，得到电机角度较上一次的增量。随后，根据电机旋向，计算角度偏差的累计值。复查软件，该速度计算模块也是位于150us任务周期之内，通过计算器控制其周期，当计数器达到计数周期后进行转速计算。计数周期达到设定值时，使用角度累计误差值与转速比例相乘得到电机转速，然后对角度累计误差值进行清零以便下次计算，同时根据计算的转速值进行超速保护。最后，将得到的转速通过RC低通滤波器进行滤波处理，得到最后的转速，一边用于转速闭环控制，一边用于遥测信息上传。



图 6 转速计算流程

## 电流环控制

复查软件，电流环控制流程如图 7所示，Q轴电流和D轴电流作为输入，生成的PWM作为输出。电流环控制包括D轴电流PI计算与Q轴电流PI计算，其中D轴电流参考值为0，Q轴电流参考值为转速环的输出。DQ轴PI计算结束后，根据其输出计算DQ轴电压Ud和Uq。根据Ud、Uq进行反Park和SVPWM计算得到PWM，继而控制电机按设定转矩和转速运行。



图 7 电流环控制流程

电流环计算需要D轴电流和Q轴电流作为输入，其流程如图 8所示，通过ADC采集的三相电流Ia、Ib、Ic进行Clark和Park计算得到。首先，对三相采集电流进行校正操作，见式（1）、（2）、（3）

其中，为电流放大倍数，为电流偏移量。随后进行Clack和Park计算，该软件采用的恒功率变换：

其中为角度信息。通过上述一系列变换后得到用于电流环进行的和。



图 8 Clark、Park计算流程

# 故障保护

## 超速保护

该软件超速保护机制是判断电机转速是否超过设定的最高转速，若超过设定值则置为超速保护标志，同时将驱动运行标志和转速运行标志清零，停止电机运行。判故的方式为连续判断，当计数期间任一转速低于保护值，计数器都会清零并重新计数。超速故障恢复的机制是连续检测到转速低于保护值10次后才会清除故障位，并允许进行下次的控制任务，具体流程如图 9。



图 9 超速保护流程

## 过流保护

该软件过流保护模块需要D轴、Q轴电流，电流环经过PI计算后的D轴、Q轴电流作为输入，其流程如图 10所示。首先，软件会计算D轴、Q轴电流的均方根反应电机整体电流情况，其次计算经过PI计算后的D、Q轴电流的均方根代表将要输出至电机的电流。触发过流保护的条件有两个①DQ轴均方根电流大于保护值（23A），②PI计算后DQ轴电流均方根大于等于2且DQ轴均方根电流小于等于0。在条件被触发后，软件会进行计数操作，当计数次数达到设定值时会置为过流保护标志，并关闭驱动，停止电机。过流恢复的条件是DQ轴均方根电流小于保护值，且PI计算后DQ轴电流均方根大于等于9及DQ轴均方根电流小于等于2。恢复过程也会进行计数处理，当计数值达到设定值后才会进行故障为的清除。



图 10 过流保护流程

## 过压保护、欠压保护

该软件过压和欠压保护逻辑一样，都是判断采集电压是否超过设定的上下限阈值，流程如图 11所示。过压保护、欠压保护都需要ADC采集的母线电压作为输入。当采集电压大于上限时，软件会进行计数，计数到达设定值时会将过压保护标志置位同时允许标志被清零，电机允许停止；在此区间若检测到一次电压小于400，则会将计数器清零并重新计数。过压恢复的条件是连续多次采集电压小于电压上限，当条件满足时清除过压标志。同理，欠压保护和恢复的逻辑只是把采集电压大于电压上限变为小于电压下限。



图 11 过压、欠压保护流程

## 过温保护

该软件过温保护逻辑同超速、过压、欠压，也是判断采集值是否超过保护阈值。过温保护的输入条件时ADC采集的温度值，保护阈值为100，当采集温度大于100时，置为过温保护标志，将运行标志清零并停止电机运行。



图 12 过温保护流程

## 旋变故障

复查软件，旋变故障的判断模式是根据旋转变压器返回的故障码进行判断的。连续多次读取的结果都为故障码，则认为旋变故障，只要有一次不是则将计数器清零并重新开始计数。其恢复逻辑也是多次判断模式，在连续多次采集的过程中都不为故障码则认为旋变正常，并清除旋变故障标志。



# 结论

该软件具备转速控制的全部要素，既电流采集、角度采集、转速采集、转速环控制、电流环控制、SVPWM计算模块，且具备相应的保护措施。其中转速采样为转速环提供输入，参与电流环计算；电流采集和角度采集为电流环提供电流反馈参与电流环的计算；电流环的输出作为SVPWM模块的输入，参与计算并产生PWM。整改过程构成转速环、电流环的双环控制框架。综上所述，转速控制框架不存在问题。