|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 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](#_Toc176796368)

[2 问题概述 3](#_Toc176796369)

[3 硬件状态一致性分析 4](#_Toc176796370)

[4 软件变更情况 5](#_Toc176796371)

[5 软件状态一致性分析 6](#_Toc176796372)

[5.1 231001#、231002#控制器软件参数复查 6](#_Toc176796373)

[5.1.1 蝶阀1主回路参数 6](#_Toc176796374)

[5.1.2 蝶阀1副回路参数 9](#_Toc176796375)

[5.1.3 蝶阀2主回路参数 12](#_Toc176796376)

[5.1.4 蝶阀2副回路参数 15](#_Toc176796377)

[5.1.5 泵电机主回路参数 18](#_Toc176796378)

[5.1.6 泵电机副回路参数 20](#_Toc176796379)

[6 复查结论 23](#_Toc176796380)

21C852-0电机控制器软件梳理

# 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100us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100us任务周期，计算周期为1ms，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100us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



## 过流保护



## 过压保护



## 欠压保护



## 过温保护



## 旋变故障



# 复查结论

在燃油系统联试和联合动力试验期间，两台控制器（231001#、231002#）所烧写的代码均是重庆大学提供的最新烧写码，并于同一时间同一地点烧录。此外，复查两台控制器软件参数，231001#直流侧电压阐述为270，231002#直流侧电压参数为30（于2024年8月归零期间修改为270）。总上所述，在燃油系统联试和2024年9月5日归零措施验证过程中软硬件状态一致，不存在差异。