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

|  |  |
| --- | --- |
| 名称 | XXX电机控制器 |
|  | 软件故障逻辑复查 |

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

|  |  |
| --- | --- |
| 部门 | 控制研发部 |
| 编写 | 李盛 20240805 |
| 校对 |  |
| 审核 |  |
| 会签 |  |
| 标审 |  |
| 批准 | 刘政华 20240805 |

|  |
| --- |
| 贵州航天林泉电机有限公司 |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 内容提要：  本文主要针对21C852-0电机控制器软件故障报警逻辑进行复查，确保软件故障逻辑合理可控。 | | | | |
| 主题词 | 软件、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](#_Toc173767431)

[2 故障类型 3](#_Toc173767432)

[3 过压故障 3](#_Toc173767433)

[4 欠压故障 5](#_Toc173767434)

[5 过流故障 6](#_Toc173767435)

[6 硬件保护故障 7](#_Toc173767436)

[7 软件限位故障 7](#_Toc173767437)

[8 电机旋变故障 8](#_Toc173767438)

XXX电机控制器软件故障逻辑复查

# 概述

XXX控制器是为XXX研究所配套的三合一电机控制器，实现对两路蝶阀电机和一路油泵电机的控制。控制器根据上位机的工作指令，对两路蝶阀电机进行位置调节以及对油泵电机进行转速调节。该控制器为双余度控制器，硬件上每个电机都具有两路控制回路（控制主回路和控制副回路），每个控制回路都能独立完成电机的控制功能。

2024年7月30日，控制器在试验台试验的过程中，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，为了确定软件功能是否是影响此次电机启动失败的关键因素，故展开对软件故障逻辑进行复查。

# 故障类型

根据通讯协议要求，XXX控制器软件实现了以下故障：

1. 蝶阀1控制回路过压故障（28V）；
2. 蝶阀2控制回路过压故障（28V）；
3. 油泵电机控制回路过压故障（270V）；
4. 蝶阀1控制回路欠压故障；
5. 蝶阀2控制回路欠压故障；
6. 油泵电机控制回路欠压故障；
7. 蝶阀1控制回路过流故障；
8. 蝶阀2控制回路过流故障；
9. 油泵电机控制回路过流故障；
10. 蝶阀1控制回路硬件保护故障；
11. 蝶阀2控制回路硬件保护故障；
12. 油泵电机控制回路硬件保护故障；
13. 蝶阀1软件限位故障；
14. 蝶阀2软件限位故障；
15. 电机主回路旋变故障；
16. 电机副回路旋变故障；

复查软件，上述故障都使用特定的标志进行标识，程序在运行过程中周期性的检测故障参数（如28V电压、28V电流、270V电压等），当任一参数发生异常时，相应故障位置为1，故障消失后相应故障位清0。

# 过压故障

过压故障包括蝶阀1、蝶阀2以及油泵电机控制回路过压故障。两路蝶阀由28V电源进行驱动，过压检测是针对控制回路中的28V电压；油泵电机由270V电源进行驱动，过压检测针对控制回路中的270V电压。无论是蝶阀还是油泵电机，当检测到控制回路中的电压值超过上限阈值时，软件就会报相应的过压故障。

复查软件过压故障逻辑，两路蝶阀和油泵电机控制回路过压故障处理逻辑都类似，只是电压上限阈值不同。软件报故流程如下：1）读取ADC结果寄存器（AdcRegs.ADCRESULT3）得到母线电压；2）将ADC结果（0~4096）转换为对应的电压值，经过滤波处理后得到母线电压；3）连续判断1000次母线电压都大于或等于电压上限阈值，则将过压故障位设置为1；4）通过RS422上传至上位机。

复查软件参数，对于两路蝶阀而言，无论是主回路还是副回路，电压的上限阈值都设置为60V，如图 1、图 2、图 3、图 4所示。

|  |  |
| --- | --- |
| 图 1 蝶阀1控制主回路电压上限阈值 | 图 2 蝶阀1控制副回路电压上限阈值 |
| 图 3 蝶阀2控制主回路电压上限阈值 | 图 4 蝶阀2控制副回路电压上限阈值 |

复查油泵电机电压上限阈值，主控制回路和副控制回路都为400V，检下图。

|  |  |
| --- | --- |
| 图 5 油泵电机控制主回路电压上限阈值 | 图 6 油泵电机控制副回路电压上限阈值 |

结合试验现象，此次停机表现为过流故障后停机，试验过程中未发现过压故障，不是导致停机的原因。

# 欠压故障

同过压故障处理逻辑类似，过压故障判断的是控制回路中的电压值大于等于设定的电压上限阈值，而对于欠压故障，故障判断的条件为控制回路中的电压值小于设定的电压下限阈值。复查软件参数，三个电机的电压下限阈值都是0V，其中油泵电机电压下限阈值是为了方便使用30V电压进行电机调试由200V修改为0V。软件电压下限阈值见下图：

|  |  |
| --- | --- |
| 图 7 蝶阀1控制主回路电压下限阈值 | 图 8 蝶阀1控制副回路电压下限阈值 |
| 图 9 蝶阀2控制主回路电压下限阈值 | 图 10 蝶阀2控制副回路电压下限阈值 |
| 图 11 油泵电机控制主回路电压下限阈值 | 图 12 油泵电机控制副回路电压下限阈值 |

结合试验现象，此次停机表现为过流故障后停机，试验过程中未发现欠压故障，不是导致停机的原因。

# 过流故障

复查软件，过流保护的处理逻辑如下：1）读取ADC结果寄存器（AdcRegs.ADCRESULT0、AdcRegs.ADCRESULT1、AdcRegs.ADCRESULT2）得到三相电流；2）将ADC结果（0~4096）转换为对应的三相电流值；3）经过坐标变换将三相电流转换为直轴电流（Id）和交轴电流（Iq），经过滤波处理后得到用于过流保护的直轴电流（Id）和交轴电流（Iq）；4）通过Id和Iq进行平方根计算得到采集电流；5）连续判断1000次，当条件都成立时将过流故障位设置为1；4）通过RS422上传至上位机。

复查软件，油泵电机的故障判断条件为：①采集电流大于等于电流保护值；②转速闭环控制计算的Id，Iq合成电流大于等于2A且采集电流小于等于0A。蝶阀电机的故障判断条件为：①采集电流大于等于电流保护值；②位置闭环控制计算的Id，Iq合成电流大于等于3A且检测到的电机电流小于等于0A。其中，条件①或②只要满足其中一个就会触发过流故障。

复查软件参数，两路蝶阀电机的电流保护值为10A，最大电流为7A；油泵电机电流保护值为23A，最大电流为18A见下图：

|  |  |
| --- | --- |
| 图 13 蝶阀1控制主回路电流保护值 | 图 14 蝶阀1控制副回路电流保护值 |
| 图 15 蝶阀2控制主回路电流保护值 | 图 16 蝶阀2控制副回路电流保护值 |
| 图 17 油泵电机控制主回路电流保护值 | 图 18 油泵电机控制副回路电流保护值 |

过流故障采用的是三相电流进行的，控制器处于油泵电机控制模式时会进行三相电流计算。当电机处于控制模式且处于停机状态时，当计算的电机电流大于2A且采集的电机电流为0时会报过流故障。

Clark恒功率变换+Park

结合试验数据，三相电流在试验过程中均属于正常范围内，过流故障不是因为电机电流大于电流保护值造成的。经分析，过流故障的原因是控制器处于控制模式（此时还未下发停机指令）且电机已停止，导致采集电机电流为0，而软件计算的电机电流大于2A，所以触发了过流故障。综上所述，过流故障导致油泵电机停机的原因可以排除。

# 硬件保护故障

硬件保护故障包括蝶阀1硬件保护故障、蝶阀2硬件保护故障以及油泵电机硬件保护故障。复查软件，硬件保护故障是通过检测硬件IO（GPIO13）的状态确定的，当检测到IO为低电平时，将硬件故障位设置为1，并关闭PWM波输出，停止电机控制；当检测到IO为高电平时，将硬件故障为设置为0，恢复控制器对电机的控制功能。

复查硬件原理图，当硬件检测到母线电流大于16A时，将GPIO13设置为低电平，当母线电流低于16A时，将GPIO13设置为高电平。

试验过程中未发生硬件保护故障，不是停机的原因。

# 软件限位故障

软件限位故障针对的是两路蝶阀（蝶阀1软件限位故障和蝶阀2软件限位故障），当蝶阀当前位置小于阈值下限或大于等于阈值上限时就将软件限位故障位设置为1，否则设置为0。

复查软件，软件限位故障处理流程如下：1）通过读取AD2S1210获取蝶阀当前位置；2）判断当前蝶阀位置是否大于阈值上限或者小于阈值下限；3）通过RS422上传至上位机。

复查软件，蝶阀阈值上限和下限阈值分别使用变量POSMAX = 65000和POSMIN = 500 表示。其中360°的范围由0~65535表示，通过比例计算可知蝶阀位置上限阈值为*357.05°*，下限阈值为*2.74°*。

此次停机的电机为油泵电机，不是蝶阀不存在软件限位，不是停机的原因。

# 电机旋变故障

电机旋变故障包括电机主回路旋变故障和电机副回路旋变故障。旋变故障的检测逻辑也是通过读取AD2S1210的结果来进行的。当旋变出现错误时，读取AD2S1210时将会返回一个故障码，在软件检测到这个故障码时就将电机旋变故障位设置为1。

复查软件，旋变故障的处理流程如下：1）读取AS2S1210的值；2）周期性检测故障码的值，当连续1000次都检测到故障码时，将相应故障位设置为1。

试验过程中未报出旋变故障，不是停机的主要原因。

# 直流侧电压的影响

直流侧电压（变量：Udc\_Mche）直接参与PWM的产生过程，是该控制器的关键参数，参数不合适会导致控制异常。如下图所示，T1、T2、T3都与直流侧电压相关且成倍数关系。

文本, 信件

描述已自动生成

直流侧电压参与占空比计算过程

复查各控制器参数，231001#和231002#直流侧电压参数不一致，231001#为270，231002#为30。当直流侧电压设置为30和270且驱动电压皆为270V时，启动电机，三相电流波形如下图所示。与正常波形（270参数下）相比，30参数下，三相电流呈震荡状态，且此时上位机报过流故障，电机不能正常启动。在270参数下，设置电机转速，电机控制正常启动，上位机无故障发生。

图形用户界面

描述已自动生成

直流侧电压30，驱动电压270V，A相电流波形

图形用户界面

描述已自动生成

直流侧电压30，驱动电压270V，B相电流波形

日程表

描述已自动生成

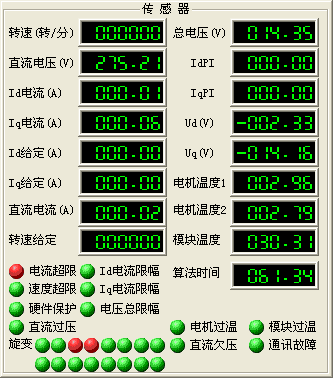
直流侧电压30，驱动电压270V，C相电流波形

图形用户界面, 图示

描述已自动生成

直流侧电压270，驱动电压270V，A相电流波形

直流侧电压30V，驱动电压270V，转速3300，启动报电流超限



直流侧电压270V，驱动电压270V，转速3300，无故障：

图形用户界面

描述已自动生成

综上所述，直流侧电压对控制器的控制功能有影响，是造成电机不能正常启动的主要原因。

# 控制器在不提供驱动电源时报过流过程

根据试验过程发现，控制器在直上控制电源（28V）不上驱动电源（270V）的情况下，给控制器下发转速控制指令，控制器会上报母线过流故障。复查软件，软件过流故障逻辑如过流故障所述，有两个触发条件：一是采集电流过电流保护阈值（23A），二是进行转速控制计算的Id，Iq的合成电流大于等于2且采集电流小于0。

挂上仿真器，给控制器通电，实时监测过流故障相关参数变化情况。启动电机过程中，转速控制计算的Id，Iq的合成电流为2.277大于设定值2，此时采集电流为0，满足第二个条件，从而触发过流保护。

复查软件，控制器处于转速控制模式时，电流环PI会持续进行计算，由于没有驱动电源，转速一致维持为0，转速误差一致存在，导致电流持续增加从而导致过流故障。

# 复查结论

试验过程中没有报过压故障、欠压故障、硬件保护故障、软件限位故障、电机旋变故障，不是造成停机的主要原因，可以排除。试验过程中，三相电流均处于正常范围内，不是过流的原因。造成过流的原因为：控制器处于控制模式且电机处于停止状态，此时软件计算的电流大于2A且采集电流小于等于0达到过流故障判断的其中一个条件，触发过流故障。

直流侧电压在软件中参与了PWM的生成，是控制器的关键控制参数。当直流侧电压设置为30时，三相电流处于震荡状态，会造成母线过流，从而导致电机无法正常启动。当直流侧电压设置为270时，三相电流波形良好，控制器可以正常驱动电机。

综上，由于软件故障逻辑问题造成电机停转的原因可以排除，而直流侧电压不合适是造成电机不能启动的主要原因。

# 机理分析

油泵电机转速闭环控制包括如下过程：

1. 三相电流采集
2. 进行Clark和Park变换，得到D轴和Q轴电流，公式如下：

其中，表示D轴电流，表示Q轴电流，分别表示ADC采集的三相电流。

1. 进行PI计算，获得D轴和Q轴电压，如下式：

其中表示PI积分项输出，表示电机转速，表示电机电阻，表示相应电感，表示PI比例项输出，表示三相合成电流，表示电流环阻尼系数，表示电机磁链。

其中蝶阀1、2对应参数如下：

，，，，

其中油泵电机对应参数如下：

，，，，

上式可以简化为：

由上式可知的变化与电机转速、比例项、积分项相关。

1. 进行反Clark计算获取三相电压；

进行反Park计算，获取：

1. 进行SVPWM计算，获得各桥臂MOS管PWM的占空比。

其中，是与空间电压矢量相关的常数，为直流侧电压，正常时设置为270，异常时设置为30。从上式中可以看出PWM占空比与三相电流、电机参数以及直流侧电压相关。其中，是更具PI进行实时调整的变量，而其余都可认为是常量。

当分别设置为30和270时，在相同下，T1和T2所在桥臂的占空比是原来的三分之一，若要达到相同的控制效果，即在30和270的参数下达到相同转速，则必须为正常参数下的9倍，即：

其中，，则可得到：，。

根据上述闭环控制逻辑，是与D轴和Q轴电压相关的变量，而D轴和Q轴电压变量又是与D轴和Q轴电流电流环相关（式（5）、（6））。同理，要获得相同就要求电流环比例项、积分项输出为原来的9倍，即，。其中，，，式中，，分别式PI中的积分系数、比例系数和误差项。

综上所述，在直流侧电压设置为30时，要达到直流侧电压为270的控制效果，PI计算的比例系数、积分系数将增加9倍，间接改变PI的系数，造成PI控制的震荡，从而引起三相电流震荡，从而造成停机。

# 故障复现

在保证其他条件一直的情况下，即相同驱动电压、相同转速的情况下，按下列控制参数分别对电机进行转速控制，其中电机控制参数、模拟参数和其他参数在试验过程中都不修改，只改变电机参数中的直流侧电压，见图 20和图 23。



图 19 油泵电机控制参数



图 20 油泵电机电机参数



图 21 油泵电机其他参数



图 22 油泵电机模拟参数



图 23 油泵电机异常电机参数

在试验过程中将电机转速设置为3300，分别监控母线、三相电流波形以及电机启动和转速情况，如下图：

图形用户界面

描述已自动生成

直流侧电压30，驱动电压270V，A相电流波形

图形用户界面

描述已自动生成

直流侧电压30，驱动电压270V，B相电流波形

日程表

描述已自动生成

直流侧电压30，驱动电压270V，C相电流波形

图形用户界面, 图示

描述已自动生成

直流侧电压270，驱动电压270V，A相电流波形

直流侧电压30V，驱动电压270V，转速3300，启动报电流超限

图形用户界面

低可信度描述已自动生成

直流侧电压270V，驱动电压270V，转速3300，无故障：

图形用户界面

描述已自动生成

综上，当直流侧电压设置为30时，三相电流处于震荡状态，电机启动后转速反馈为0，电机不能启动；当直流侧电压设置为270时，电流波形良好，电机可以正常启动，且转速平稳。

母线电流保护：

1. 母线电流（三相电流合成电流）大于等于保护值（23）
2. 给定电流大于等于2或母线电流小于等于0

过流保护措施：

1. 停止电机
2. 关闭PWM输出

母线电流保护恢复：

1. 控制器处于母线过流停机中；
2. 母线电流低于保护值；
3. 电机转速低于启动速度

三相电流为什么都是正的：上位机接收到的数据都是做了绝对值的。

