|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 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 |
| 研制总结报告 |

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

|  |  |
| --- | --- |
| 单位 | 林泉电机 |
| 编写 |  |
| 校对 |  |
| 审核 |  |
| 会签 |  |
|  |  |
| 标审 |  |
| 批准 |  |

规则航天林泉电机有限公司

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 内容提要：  本报告对21C852-0电机控制器的研制过程、试验情况、出现的技术问题及解决情况、产品达到的战术技术性能、尚存问题及解决措施等进行总结。 | | | | |
| 主题词 | 控制器 研制总结 | | | |
| 更改栏 | 更改单号 | 更改日期 | 更改人 | 更改办法 |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

目 录

[1 研制任务来源 5](#_Toc151403344)

[2 研制依据 5](#_Toc151403345)

[3 产品概述 5](#_Toc151403346)

[3.1 产品的组成 5](#_Toc151403347)

[3.2 总体方案 6](#_Toc151403348)

[3.3 产品主要功能 7](#_Toc151403349)

[3.4 主要性能指标 8](#_Toc151403350)

[3.5 电气接口要求 9](#_Toc151403351)

[3.6 机械接口要求 12](#_Toc151403352)

[3.7 软件研制要求 13](#_Toc151403353)

[4 研制情况 13](#_Toc151403354)

[4.1 研制阶段完成的主要工作 14](#_Toc151403355)

[4.2 软件研制情况 14](#_Toc151403356)

[4.2.1 通讯软件 14](#_Toc151403357)

[4.2.2 泵电机控制软件 15](#_Toc151403358)

[4.2.3 阀电机组件控制软件 17](#_Toc151403359)

[4.3 测试覆盖性 18](#_Toc151403360)

[5 试验情况 19](#_Toc151403361)

[5.1 绝缘电阻 19](#_Toc151403362)

[5.2 旋转方向 19](#_Toc151403363)

[5.3 浪涌电流 19](#_Toc151403364)

[5.4 蝶阀电机1、蝶阀电机2空载试验 20](#_Toc151403365)

[5.5 蝶阀电机1、蝶阀电机2负载试验 20](#_Toc151403366)

[5.6 油泵电机空载试验 20](#_Toc151403367)

[5.7 油泵电机负载试验 20](#_Toc151403368)

[6 双余度切换试验 20](#_Toc151403369)

[7 主要配套产品的定型（鉴定）情况及质量、供货保障情况 20](#_Toc151403370)

[8 六性分析、设计及验证 21](#_Toc151403371)

[8.1 可靠性设计 21](#_Toc151403372)

[8.2 保障性设计 21](#_Toc151403373)

[8.3 可测试性 21](#_Toc151403374)

[8.4 维修性 21](#_Toc151403375)

[8.5 安全性设计 22](#_Toc151403376)

[8.6 环境适应性设计 22](#_Toc151403377)

[9 寿命情况 22](#_Toc151403378)

[10 质量管理控制情况 22](#_Toc151403379)

[10.1 元器件、原材料选用与控制情况 23](#_Toc151403380)

[10.1.1 元器件控制和管理 23](#_Toc151403381)

[10.1.2 原材料控制和管理 23](#_Toc151403382)

[10.2 加工过程质量控制情况 23](#_Toc151403383)

[10.3 不合格品控制 24](#_Toc151403384)

[10.4 外协、外购件控制 24](#_Toc151403385)

[10.5 工艺过程的控制 24](#_Toc151403386)

[10.5.1 工艺控制 24](#_Toc151403387)

[10.5.2 工艺文件编写 25](#_Toc151403388)

[10.5.3 工艺过程确认 25](#_Toc151403389)

[11 标准化情况 25](#_Toc151403390)

[12 风险控制与管理情况 26](#_Toc151403391)

[13 设计指标达到任务书情况 26](#_Toc151403392)

[14 遗留问题落实解决情况 27](#_Toc151403393)

[15 结论 28](#_Toc151403394)

21C852-0电机控制器M阶段研制总结

# 研制任务来源

21C852-0电机控制器（以下简称控制器）由中国航天科技集团有限公司第六研究院第十一研究所提出，贵州航天林泉电机有限公司负责研制生产。该控制器接收上位机转速控制指令驱动一路泵电机（代号：21C222-0）运行，并实时调节电机转速，确保输出满足转速和功率要求，同时接收位置控制指令驱动两路阀电机组件（代号：ZL-69）运行，确保阀芯位置的调节满足指令要求。

# 研制依据

贯彻的标准见表 1。

表 1 21C852-0控制器贯彻标准

|  |  |
| --- | --- |
| QJ1714 | 航天产品设计文件管理规定 |
| QJ2850-1996 | 航天产品多余物预防与控制 |
| QJB4239 | 装备环境工程通用性要求 |
| GJB368B | 装备维修性通用大纲 |
| GJB900 | 系统安全性通用大纲 |
| GJB1443-92 | 产品包装、装卸、运输、贮存的质量控制要求 |
| GJB151A-97 | 军用设备和分系统电磁发射与敏感度要求 |
| QJ977A-95 | 非金属材料复验规定 |
| QJ1386A-95 | 金属材料复验规定 |
| GJB1863 | 永磁同步电机通用规范 |
| GJB6537-2006 | 3号喷气燃料 |
| GJB/Z35-93 | 元器件降额准则 |
| QJ3076-98 | 航天产品质量保证要求 |

# 产品概述

## 产品的组成

产品由电机本体（代号：21C222-0）、阀电机组件（代号：ZL-69）、电机控制器、绕组电缆、旋变电缆、270V电源电缆、通讯电缆等部分组成，产品的组成如图 1 所示。

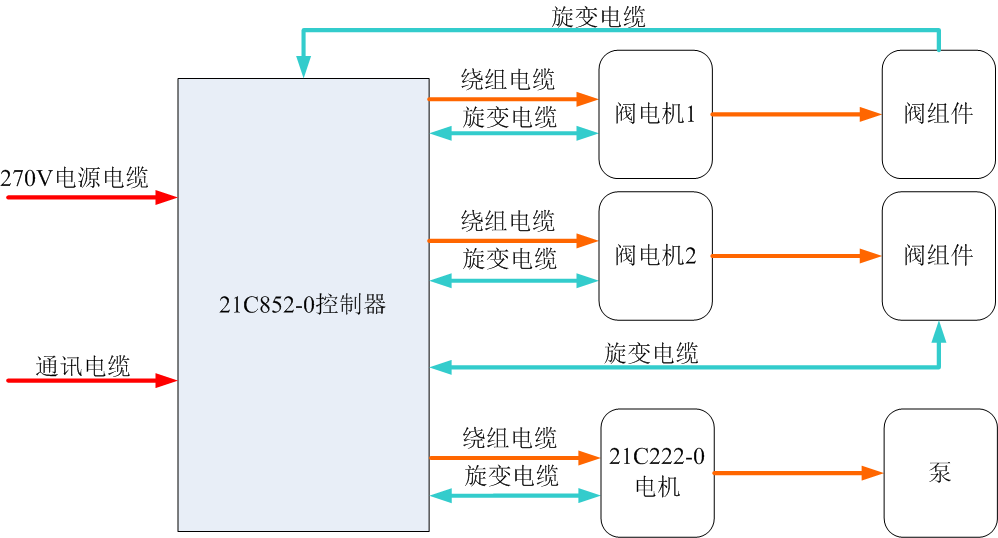


图 1 产品组成框架图

## 总体方案

依据任务书要求，控制器需驱动三路双余度电机，电机位置反馈采用双旋变，控制器内部的控制电路部分采用三余度设计，驱动部分采用双余度设计，依据模块化、通用化和标准化的设计思路，将控制器分为四大部分，分别为滤波单元，电机1控制单元、电机2控制单元以及电机3控制单元。控制器结构示意图如图 2所示。

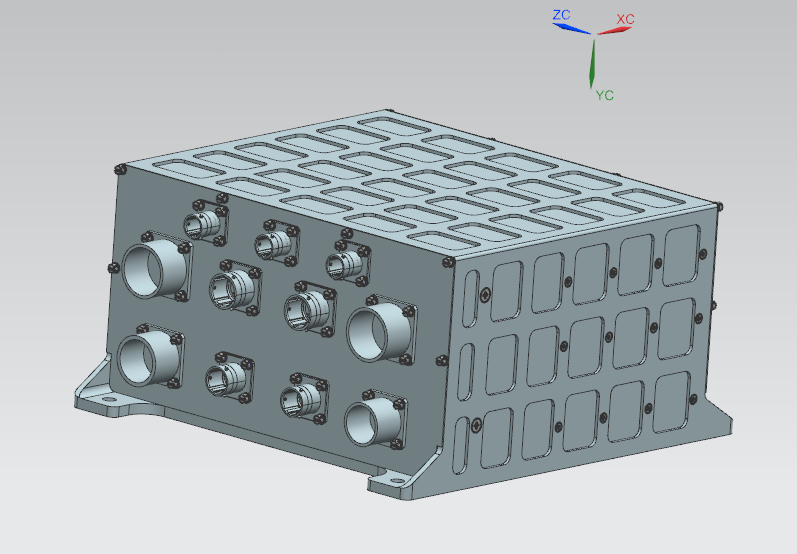


图 2 21C852-0电机控制器结构示意图

滤波单元包含28V和270V的EMI滤波器、母线滤波电容、信号连接背板、RS422通信电路等，主要实现功能为：

1. 具有28V电源的EMI滤波器及母线滤波电容，实现28V电源的EMC兼容性设计及母线滤波；
2. 具有270V电源的EMI滤波器及母线滤波电容，实现270V电源的EMC电磁兼容性设计及母线滤波；
3. 具有与系统的3路RS-422串口通信功能，实现与系统的数据互传互通；
4. 具有信号连接的功能，实现系统指令下发至各电机控制单元，协调控制各电机控制器工作，接收各电机控制单元的状态和故障数据反馈等；
5. 具有制动器解锁功能，采用28V上电解锁制动器，实现电机解锁。

三路电机控制单元的主要功能为接收上位机的控制指令，实现电机的转速控制和位置控制，按照功能可以分为控制板组件和驱动板组件两个部分：

控制组件：控制组件主要包含辅助电源电路、DSP主控电路、数据存储电路、信号处理电路、旋变解码电路、通信电路等，依据任务书的控制单元三余度的要求，将辅助电源电路、DSP主控电路、数据存储电路、通信电路设计为三个独立的单元，而信号处理电路、旋变解码电路分别设计为两路，与两路旋变和两套绕组对应。

驱动组件：驱动组件主要包含功率驱动模块、电压电流采样电路。依据任务书驱动单元双余度的要求，功率驱动模块、电压电流采样电路等均设计为两路单独的电路，分别与电机两路绕组连接。

## 产品主要功能

控制器主要包括以下5项功能：

1. 用电输入及输出：将系统提供的28V直流电转化为15V、12V、5V、3.3V直流电，提供28V、15V、12V、5V、3.3V电源供电机、控制器本身、传感器、DSP使用；
2. 控制器具有存储信息的功能，并能够通过RS422通信的形式供维护计算机读取。
3. 采集母线电压、母线电流、转速、控制器温度信号，存储在控制器内部，并以RS422通信的形式上传给上位机；
4. 具有典型故障检测功能；
5. 泵电机（21C222-0）转速控制功能；
6. 阀电机组件（ZL-69）位置控制功能；
7. 电机启停控制功能。

## 工作原理

21C852-0电机控制器实现了一路油泵电机（代号：21C222-0）和两路蝶阀电机（代号：ZL-69）的转速控制和角度控制，通过串口（3路串口，对外接口：X5、X6和X7）接收发动机控制器下发的指令，将目标指令换算为用于内部位置环（蝶阀电机）和转速环（油泵电机）计算的数字量，同时对当前电机的位置（蝶阀1电机、蝶阀2电机）和转速（油泵电机）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 3所示。



图 3 电机控制器工作原理图

为了实现双余度功能以及对3路电机的控制功能，控制器内部集成了6片CPU（TMS320F28335），如图 4所示。CPU11和CPU12位于蝶阀电机1控制板上，是控制蝶阀电机1的两路CPU，CPU11作为主CPU，CPU12作为副CPU。在无故障的情况下，CPU11接管串口通讯1的接收发送功能，在故障发生后，CPU12会接管串口通讯1接收发送功能。同理，CPU21和CPU22位于蝶阀电机2控制板上，接管串口通讯2的接收发送功能，完成蝶阀电机2的控制功能；CPU31和CPU33位于油泵电机控制板上，接管串口通讯3的接收发送，完成油泵电机的控制功能。为了实现任意一个串口都能对其他电机的控制，例如通过串口通讯1实现对蝶阀电机2和油泵电机的控制功能，各控制板上的CPU都挂载到CAN通讯总线上，实现板间通讯。当控制器只有一路串口处于工作时，通过CAN总线向其他控制板同步串口收到的指令，以及通过CAN收集其他板子和电机的运行参数，然后通过串口上传给上位机。综上，分别通过串口通讯1对蝶阀电机1，串口通讯2对蝶阀电机2、串口通讯3对油泵电机进行控制时，指令不需要通过CAN进行传递和接收，属于串口控制方式。通过串口通讯1对蝶阀电机2和油泵电机，串口通讯2对蝶阀电机1和油泵电机以及串口通讯3对蝶阀电机和蝶阀电机2进行控制时，指令都需要借助CAN总线进行交互，属于CAN控制方式。



图 4 电机控制器通讯框图

根据通讯协议要求，电机控制器与上位机之间的通讯方式为应答方式。上位机下发的指令包括自检指令、控制指令和遥测指令。自检指令在控制器与上位机通讯初期发送，随后以10ms周期发送遥测指令，控制指令作为随机事件，可能在任意时刻向控制器发送。其中控制指令又包含了电机使能指令（启动指令）、设置蝶阀电机1、蝶阀电机2的角度指令、设置油泵电机的转速指令以及三路电机的停止指令。控制器遵循先使能，再设置（设置角度或者转速），后停止的控制逻辑，若控制逻辑错误，则控制器不予响应。为了增加通讯双方的容错能力，自检指令和控制指令上位机最多会向电机控制器发送三次，若三次都没有收到响应指令，则认为通讯失败。

## 主要性能指标

21C852-0电机控制器的主要性能指标见表 2

表 2 21C852-0电机控制器主要性能指标

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 参数 | 单位 | 额定值 | 备注 |
| 1 | 电机驱动电源电压（2路） | V | DC270 |  |
| 2 | 控制电源电压（3路） | V | DC28±4 | 含两路小功率电机驱动 |
| 3 | 额定转速 | r/min | 6500±100 |  |
| 4 | 额定功率 | kW | 1.4 | 三路电机控制 |
| 5 | 调速范围 | r/min | 1000~6500 | 针对21C222-0永磁电机 |
| 6 | 位置控制精度 | / | ±0.5% | 参考 |
| 7 | 转速控制准确度 | / | ±1% |  |
| 8 | 每次连续工作时间 | h | 不小于8 |  |
| 9 | 平均无故障工作时间 | h | 单次1000s，工作次数≮50 |  |
| 10 | 控制电机旋转方向 | / | 轴伸端视之为顺时针 | 具有双向功能 |
| 11 | 转速解算及回传速率 | Hz | 不低于2k（暂定） |  |
| 12 | 控制周期 | ms | 电流环0.1，转速环4 |  |
| 13 | 工作环境温度 | ℃ | -45~80 |  |
| 14 | 重量 | kg | ≤8 |  |
| 15 | 体积 | mm | / | 不含支耳 |

电机控制器的其他性能指标要求：

1. 电机控制器通过RS422与上位计算机实现通讯，通讯内容包括设定转速、设定位置、实际转速、母线电流、绕组电流、电机控制器状态等信息，详见通讯协议；
2. 电机控制器实现一路泵电机（21C222-0）的转速和两路阀电机组件（ZL-69）的位置控制，其中控制器电路采用三余度，驱动部分采用双余度；
3. 21C222-0电机旋向的控制通过RS422通讯协议；
4. 电机控制器用元器件等级不低于Ⅳ级，元器件降额不低于Ⅱ级，主要、关键元器件采用Ⅰ级降额；
5. 电磁兼容要求：满足GJB151B-2013“空间系统”平台要求；
6. 电源要求：满足GJB181A-2003供电要求；
7. 减振器型号由林泉选取并提供，安装螺栓规格为M6。

## 电气接口要求

配对使用的光、电连接器插头、插座及其后附件从同一厂家订货，配套情况见表 3。

表 3 控制器外部接口节点表

| 序号 | **成品端光、电连接器代号** | **成品端光、电连接器型号** | 针号 | 定义 | **光、电连接器承制单位** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | X1 | JY27466T11FT02PA | A | 270V电源正 | 158厂 |
| B | 270V电源负 |
| 2 | X2 | JY27466T11FT02PB | A | 270V电源正 | 158厂 |
| B | 270V电源负 |
| 3 | X3 | JY27466T13FT02PN | 1 | 28V电源正 | 158厂 |
| 2 | 28V电源负 |
| 4 | X4 | JY27466T13FT02PA | 1 | 28V电源正 | 158厂 |
| 2 | 28V电源负 |
| 5 | X5 | JY27466T09FT35PN | 1 | RX+ | 158厂 |
| 2 | RX- |
| 3 | TX+ |
| 4 | TX- |
| 5 | 通讯地 |
| 6 | 暂无定义 |
| 6 | X6 | JY27466T09FT35PA | 1 | RX+ | 158厂 |
| 2 | RX- |
| 3 | TX+ |
| 4 | TX- |
| 5 | 通讯地 |
| 6 | 暂无定义 |
| 7 | X7 | JY27466T09FT35PD | 1 | RX+ | 158厂 |
| 2 | RX- |
| 3 | TX+ |
| 4 | TX- |
| 5 | 通讯地 |
| 6 | 暂无定义 |
| 8 | X8 | J599/20KF32SN | A | 1#绕组A | 158厂 |
| B | 1#绕组B |
| C | 1#绕组C |
| U | 2#绕组A |
| V | 2#绕组B |
| W | 2#绕组C |
| D | 1#SIN+ |
| E | 1#SIN- |
| F | 1#COS+ |
| X | 1#COS- |
| Y | 1#R+ |
| Z | 1#R- |
| G | 2#SIN+ |
| H | 2#SIN- |
| J | 2#COS+ |
| K | 2#COS- |
| L | 2#R+ |
| M | 2#R- |
| N | 机组旋变SIN+ |
| P | 机组旋变SIN- |
| R | 机组旋变COS+ |
| S | 机组旋变COS- |
| T | 机组旋变R+ |
| e | 机组旋变R- |
| a | V+ |
| b | V+ |
| c | V- |
| d | V- |
| f | GND-壳地 |
| g | GND-壳地 |
| j | 暂无定义 |
| h | 暂无定义 |
| 9 | X9 | J599/20KF32SA | A | 1#绕组A | 158厂 |
| B | 1#绕组B |
| C | 1#绕组C |
| U | 2#绕组A |
| V | 2#绕组B |
| W | 2#绕组C |
| D | 1#SIN+ |
| E | 1#SIN- |
| F | 1#COS+ |
| X | 1#COS- |
| Y | 1#R+ |
| Z | 1#R- |
| G | 2#SIN+ |
| H | 2#SIN- |
| J | 2#COS+ |
| K | 2#COS- |
| L | 2#R+ |
| M | 2#R- |
| N | 机组旋变SIN+ |
| P | 机组旋变SIN- |
| R | 机组旋变COS+ |
| S | 机组旋变COS- |
| T | 机组旋变R+ |
| e | 机组旋变R- |
| a | V+ |
| b | V+ |
| c | V- |
| d | V- |
| f | GND-壳地 |
| g | GND-壳地 |
| j | 暂无定义 |
| h | 暂无定义 |
| 10 | X10 | J599/20KE06SN | A | 1#绕组A相 | 158厂 |
| B | 1#绕组B相 |
| C | 1#绕组C相 |
| D | 2#绕组A相 |
| E | 2#绕组B相 |
| F | 2#绕组C相 |
| 11 | X11 | J599/20KD15SN | A | 1#SIN+ | 158厂 |
| B | 1#SIN- |
| C | 1#COS+ |
| D | 1#COS- |
| E | 1#R+ |
| F | 1#R- |
| G | 2#SIN+ |
| H | 2#SIN- |
| J | 2#COS+ |
| K | 2#COS- |
| L | 2#R+ |
| R | 2#R- |

## 机械接口要求

控制器外廓尺寸不大于293mm×269mm×145mm（包含耳片），控制器外形图见图 3。

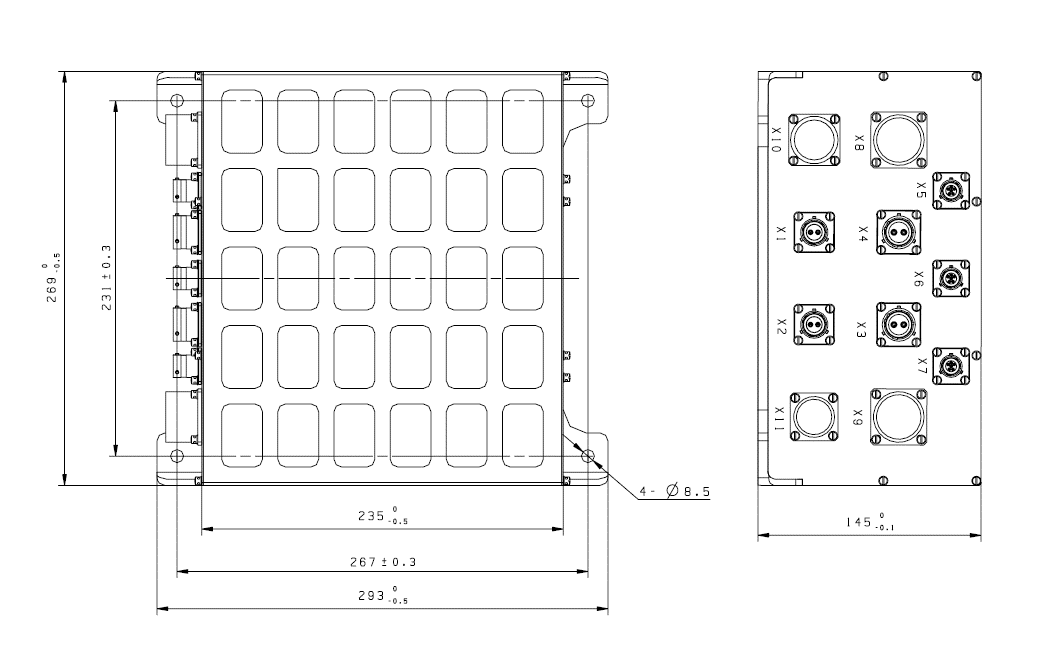


图 5 21C852-0电机控制器外形图

## 软件研制要求

1. 软件配置项名称为：双余度电机控制器软件，重要度等级为：重要。
2. 功能要求：上电自检、周期自检、旋变信号采集、AD采集、通讯、闭环调速、余度切换。

# 研制情况

控制器（代号：21C852-0）的研制工作从2022年开始，至2023年6月完成模样阶段的研制工作，并于2023年6月份完成出厂后交付用户使用，产品主要状态如下：

2022年8月5日完成方案评审；

2023年1月18日完成了图纸下发；

2023年2月1日完成了元器件的采购下发工作；

2023年3月开始电装和整机装配；

2023年4月~2023年5月开始单板调试和整机性能调试；

2023年7月于6院11所做油泵电机负载试验；

2023年7月5日于6院11所确定《电机控制器与发动机控制器通讯协议（初版）》；

2023年8月19日完成了控制器软件通讯协议修改；

2023年8月于6院11所做两路蝶阀电机的常温吹风试验；

2023年8月~2023年9月于6院11所进行系统联调；

2023年9月完成了下位机通讯波特率修改为115200；

2023年9月于6院11所随系统试验；

2023年10月实现了双余度切换功能，并完成相应验证试验；

2023年10月27日完成电机偶发不起动问题排查和测试。

## 研制阶段完成的主要工作

1）完成了控制器的硬件设计；

2）完成了控制器的硬件单元仿真；

3）完成了控制器的结构设计；

4）完成了相关定制器件技术协议的签订。

5）完成了电机电磁的优化仿真；

6）完成了电机结构设计；

7）完成了产品结构的力学仿真，优化了产品的结构设计；

8）完成了产品的热仿真，优化产品的结构的布局；

9）开展了可靠性设计、维修性设计、测试性设计、保障性设计、安全性设计及适航性设计；

10）完成了软件任务书的清理；

11）完成了M阶段的详细设计评审；

12）完成了双余度切换功能，并进行了验证；

12）开展了软件的工程化设计；

13）完成了3套工程样机的研制。

## 软件研制情况

根据任务书要求，按功能将软件设计分为3部分，即通讯软件、泵电机控制软件、阀电机组件控制软件。

### 通讯软件

通讯软件主要是根据通讯协议要求，实现电机控制器与发动机控制器（上位机控制器）的通讯功能。电机控制器接收发动机控制器下发的自检指令、控制指令、和遥测指令，然后完成相应指令动作，同时向发送机控制反馈相应的响应指令。整个通讯过程采用应答方式进行。

实现功能是①接收上位机的指令，并将指令通过CAN总线转发到相应控制板组件，②根据故障信息，实现余度切换，③将收集的电机运行数据集中打包，并上传至上位机，④根据IO状态电平，实现三路通讯之间的余度切换。按功能划分为通讯接收、通讯发送、通讯切换。

1. 通讯接收：该部分功能是通过RS422串口接收上位机发送的指令数据，并将解析的指令通过CAN/422总线进行转发。
2. 通讯发送：将收集的3个电机运行数据数据（转速、电流、电压等参数）集中打包，并上传至上位机。
3. 通讯切换：三路通讯通过IO电平进行切换，优先级的顺序为：RS422串口通信1、RS422串口通信2、RS422串口通信3。当RS422串口通信1通讯故障时，关闭指令转发功能，并通过IO口将故障状态发送至RS422串口通信2的主控DSP，此时RS422串口通信2开始执行控制功能，RS422串口通信2切换到RS422串口通信3的逻辑类似。

### 泵电机控制软件

软件功能包括：上电自检、周期自检、旋变信号采集、AD采集、通讯、闭环调速、余度切换。

上电自检：上电自检的功能是对系统运行的初始状态（电压传感器、电流传感器、驱动电路、绕组连接状态、旋变信号等）进行检测，以判断系统是否具备运行的条件。上电自检的故障通过串口上报，并作为余度切换的依据，上电自检方法和判据依据见表 4。

表 4 上电自检方法及判据

| 自检项目 | 自检方法及故障判据 | 备注 |
| --- | --- | --- |
| 驱动电路及绕组连线状态检查 | 开环转动电机，连续检测每相电流1000次，若其中检测的每相电流有200次大于等于2A（绝对值），认为自检通过，否则认为自检不通过。 |  |
| 传感器 | 不加电时，相电流绝对值、母线电流值小于2A。 |  |
| 相电流、母线电流、母线电压、  电机温度、控制器温度 | 参考自保护停机的参数阀值，若初始采样参数在阀值内，认为自检通过，如果超过阀值，则认为自检不通过。 |  |
| 旋变信号 | 判断旋变解码芯片输出的信号LOT、DOS，如果两个信号的电平均为高电平，认为自检通过，否则认为自检不通过。 |  |

周期自检：通过周期性(100us)采样270V电源电流、270V电源电压、A相电流、B相电流参数值，当出现异常时，确保能及时有效的对控制器进行保护。周期自检的故障通过总线上报DSP，并作为余度切换的依据，周期自检的方法和判断依据见表 5。

表 5 周期自检方法及判据

| 参数名称 | 检测周期 | 故障模式 | 连续故障时间 |
| --- | --- | --- | --- |
| 270V电源母线电流 |  | 过流大于10A | 5ms |
| 270V电源电压 | 欠压小于165V， | 100us |
| 过压大于330V | 1ms |
| A、B相电流 | 过流大于20A，或小于-20A。 | 500us |
| 控制器温度 | 大于123℃，在小于100℃后清除。 | 3s |
| 电机温度 | 大于150℃，在小于130℃后清除 | 3s |
| 电机失位 | 反向转速大于600rpm | 1ms |
| 电机堵转 | 电机转速小于500r/min，且A、B相任一相电流大于25A | 200ms |
| 旋变故障 | 检测旋变角度偏差绝对值大于8.7°，或旋变检测信号LOT和DOS，任一信号为低电平 | 5ms |

AD采集：AD采样包括270V电源电流、270V电源电压、A相电流、B相电流等，一方面用于串口上传数据的输入，另一方作为上电自检和周期自检的输入数据。

旋变信号采集：旋变信号采集在周期中断中执行，采样周期为100us，采样的旋变角度信号经过限幅和卡尔曼滤波，处理后的数据：1）用于SVPWM闭环调速单元中的坐标变换，2）通过该数据计算得到电机的转速，3）作为旋变报故的依据。

通讯：接收上位机下发的指令数据，同时将电机运行的参数上传。

闭环调速：该部分程序控制永磁同步电机按照串口指令，执行电机控制功能。主要涉及永磁同步电机转速电流双闭环调节，是系统的控制核心。转速环的给定为转速指令，反馈信号为采集旋变信号计算得到的电机转速，给定转速与反馈转速进行PI计算，得到的输出作为电流环q轴电流分量的参考值。内环为电流环，控制周期100us，电流环的给定为、，其中给定为0，为转速环的PI输出，反馈信号为电机的A、B相电流，A、B相电流通过clarke变换得到反馈的、，给定与反馈经过PI计算得到，给定与反馈计算得到，、再经过扇区计算得到三路PWM输出信号。

余度切换：①驱动双余度切换，一路DSP的PWM口对应一路驱动电路，切换的依据为上电自检和周期自检的故障标志，当出现上电和周期自检故障时，主回路DSP关断PWM口的输出，切换到副回路PWM口驱动电机运行，并将状态、故障信息发送到CPLD。CPLD断开主回路PWM口与驱动电路的连接，同时接通副回路PWM口与驱动电路的连接。②旋变双余度切换，DSP实时采集双旋变的角度数据，并实时与预估的角度进行比较，若单路的旋变角度与预估角度误差超过设定值，则切换到另一路，若两路均误差大，上报旋变故障停机。

### 阀电机组件控制软件

阀电机组件控制软件与泵电机控制软件逻辑基本一致，但阀电机组件的软件需要增加阀组件旋转变压器的位置采集，并进行位置闭环调节。

由于供电电压和输出功率与泵电机存在差异，因此上电自检和周期自检的参数判断的阈值存在差异，上电自检和判据方法、周期自检和判据方法分别见表 6和表 7。

表 6 上电自检方法及判据

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 自检项目 | 自检方法及故障判据 | 备注 |
| 驱动电路及绕组连线状态检查 | 开环转动电机，连续检测每相电流1000次，若其中检测的每相电流有200次大于等于2A（绝对值），认为自检通过，否则认为自检不通过。 |  |
| 传感器 | 不加电时，相电流绝对值、母线电流值小于2A。 |  |
| 相电流、母线电流、母线电压、  电机温度、控制器温度 | 参考自保护停机的参数阀值，若初始采样参数在阀值内，认为自检通过，如果超过阀值，则认为自检不通过。 |  |
| 旋变信号 | 判断旋变解码芯片输出的信号LOT、DOS，如果两个信号的电平均为高电平，认为自检通过，否则认为自检不通过。 |  |

表 7 周期自检方法及判据

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 参数名称 | 检测周期 | 故障模式 | 连续故障时间 |
| 28V电源母线电流 |  | 过流大于5A | 5ms |
| 28V电源电压 | 欠压小于18V， | 100us |
| 过压大于33V | 1ms |
| A、B相电流 | 过流大于10A，或小于-10A。 | 500us |
| 电机失位 | 反向转速大于600rpm | 1ms |
| 控制器温度 | 大于123℃，在小于100℃后清除。 | 3s |
| 电机温度 | 大于150℃，在小于130℃后清除 | 3s |
| 电机堵转 | 电机转速小于500r/min，且A、B相任一相电流大于15A | 200ms |
| 旋变故障 | 检测旋变角度偏差绝对值大于8.7°，或旋变检测信号LOT和DOS，任一信号为低电平 | 5ms |

## 测试覆盖性

21C852-0电机控制器M01批所有产品出厂前，均按照《21C852-0冲压电机控制器产品规范》进行相关试验，试验结果合格。详细测试项目见表 8。

表 8 21C852-0电机控制器测试项目

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项目 | 验收试验 | 产品规范对应章节号 | 备注 |
| 1 | 外形尺寸 | √ | 4.2.2.1 |  |
| 2 | 重量 | √ | 4.2.2.2 |  |
| 3 | 外观 | √ | 4.2.2.3 |  |
| 4 | 产品刻字及接插件标识 | √ | 4.2.2.4 |  |
| 5 | 对外接口要求 | √ | 4.2.2.5 |  |
| 6 | 绝缘电阻 | √ | 4.2.2.6.1 |  |
| 7 | 搭接电阻 | √ | 4.2.2.6.2 |  |
| 8 | 旋转方向 | √ | 4.2.2.6.3 |  |
| 9 | 浪涌电流 | √ | 5.2.2.6.4 |  |
| 10 | 空载性能 | √ | 4.2.2.6.5 |  |
| 11 | 负载性能 | √ | 4.2.2.6.6 |  |
| 12 | 通讯要求 | √ | 4.2.2.6.7 |  |
| 13 | 互换性要求 | √ | 4.2.2.7 |  |

# 试验情况

## 绝缘电阻

在正常大气压条件下和常温条件下：控制器接插件X1（X2）点位A、B并联后对壳体用三用表欧姆档进行阻抗检测；控制器接插件X3（X4）点位1、2并联后对壳体用三用表欧姆档进行阻抗检测；控制器接插件X5（X6、X7）点位1、2、3、4、5并联后对壳体用三用表欧姆档进行阻抗检测；控制器接插件X8（X9）点位A、B、C、D、E、F、G、H、J、K、L、M、N、P、R、S、T、U、V、W、X、Y、Z、a、b、c、d、e、f、g并联后对壳体用三用表欧姆档进行阻抗检测；控制器接插件X10点位A、B、C、D、E、F并联后对壳体用三用表欧姆档进行阻抗检测；控制器接插件X11点位A、B、C、D、E、F、G、H、J、K、L、R并联后对壳体用三用表欧姆档进行阻抗检测；阻抗检测要求均不小于100MΩ，并记录数据。

## 旋转方向

控制器上电后在额定电压28VDC和270VDC下电机空载通电，观察电机旋转方向。

试验结果表明：两路蝶阀电机（ZL-69）可以双向旋转，油泵电机从轴伸出端看为顺时针方向。

## 浪涌电流

在270V电源与控制器电源线缆间加一个空开，空开先断开连接，上电270V，用钳形电流表夹住电源线缆，合上开关，使用示波器检测上电浪涌电流并记录数据。

## 蝶阀电机1、蝶阀电机2空载试验

按照附录B图B.1接线图接线，在接通270V路供电电源的情况下，控制电分别为22V、28V（额定电压）、29V下电机组件（ZL-69）的情况下空载通电，采用上位机启动电机组件的方式测量空载性能。

## 蝶阀电机1、蝶阀电机2负载试验

在接通270V路供电电源的情况下，分别在电压22V、28V（额定电压）、29V下电机组件（ZL-69）负载通电，对电机施加相应功率负载，按表 7测量和记录电机的转速、电流、功率。

## 油泵电机空载试验

在接通28V供电电源的情况下，分别在250V、270V（额定电压）、280V下电机（21C222-0）空载通电，采用上位机启动电机的方式测量空载性能。

## 油泵电机负载试验

在接通28V供电电源的情况下，分别在250V、270V、280V下电机（21C222-0）负载通电，对电机施加相应功率负载，按表 8分别测量和记录电机的转速、电流、功率。

# 双余度切换试验

# 主要配套产品的定型（鉴定）情况及质量、供货保障情况

为了保证产品的质量，严格控制装机电子元器件的质量，21C852-0电机控制器所用元器件的选用、采购均进行筛选和控制。21C852-0电机控制器所用元器件见表 9。从表格数据分析情况看，所用的原材料皆满足型号规定的要求。

表 9 21C852-0电机控制器所用材料清单

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 材料名称 | 材料牌号 | 执行标准 | 是否满足要求 | 备注 |
| 1 | 铝板 | 7075-T651 | GB/T29503-2013 | 是 |  |
| 2 | 绝缘导热胶垫 | T500 |  | 是 |  |
| 3 | 铝板 | 7075-T651 | GB/T29503-2013 | 是 |  |
| 4 | 铝板 | 7075-T651 | GB/T29503-2013 | 是 |  |
| 5 | 圆钢 | 2Cr13 | GJB2294-95 | 是 |  |
| 6 | 圆钢 | 2Cr13 | GJB2294-95 | 是 |  |
| 7 | 覆铜箔板 | CEPGC-31（四层） | GB/T4725-92 | 是 |  |
| 8 | 覆铜箔板 | CEPGC-31（四层） | GB/T4725-92 | 是 |  |

# 六性分析、设计及验证

## 可靠性设计

产品为结构件，为我厂常用产品的材料之一，结构强度满足力学试验要求且重量较轻。元器件选用遵循公司标准《电子元器件优选目录》、《元器件降额准则》，原材料为常规、常用的成熟材料。

## 保障性设计

产品的生产过程按照工厂质量体系程序文件Q/Fv(ZG)0820-04《过程的监视和测量管理制度》的要求进行质量控制。零组件加工的工艺过程质量控制是通过严格执行工艺纪律、首件检验制度、加强巡回检验以及质量管理人员严格的现场监督检查来保证的。产品用所有零组件按照工艺要求经过检验合格。产品装配过程工厂采取了净化加工环境、定额发料等措施，杜绝产生多余物。产品加工过程产生的不合格品按照工厂质量体系程序文件Q/FV（QM）0830《不合格品控制程序》的要求进行了严格审理，超差零组件报废处理。

## 可测试性

产品在研制和试验过程中，对产品的主要功能、性能及技术指标需要测试的项目，逐项进行覆盖性分析，确保了产品性能测试的可操作性以及测试的覆盖面的齐全。单机在地面可以采取观察电机轴运转情况进行判断，可用工具进行拆卸，方便地面维修。

## 维修性

产品采用常规结构设计，通过紧固件进行固定。在地面工作期间可通过拆解、更换零组件的形式进行维修，控制器的所有部件均可用工具进行拆卸，方便地面维修。

## 安全性设计

控制器所使用的材料，在要求的使用环境下，都不具有自燃性，也不会产生爆炸的可能性，非金属材料（如电机用聚酰亚胺、粘接剂、热缩管）不会产生对人体危害的挥发物，不会对舱内环境造成污染。在零部件的加工过程中，所有外壳上较为尖锐的棱角均采取倒圆倒钝措施，可以有效的保护人身安全。

控制器在设计充分考虑了产品的安全性，通过冗余设计、降额设计、裕度设计等保证产品的可靠性，控制器采取过流保护设计，确保产品在功耗增大的情况下而电流不跟随相应增大，保护产品自身，同时对系统供电也进行保护，避免对系统供电造成影响。

## 环境适应性设计

元器件工作温度范围为-55℃~125℃，原材料等为常规、常用的成熟材料，满足-45℃~80℃的工作温度范围要求。

# 寿命情况

控制器主要由元器件构成，不存在机械转动等情况，因此控制器的寿命以元器件的使用寿命为依据，对控制器而言，元器件贮存寿命影响更大，控制器采用的电子元器件主要包含电阻器类、电容器类、集成电路类、半导体分立器件类等。在元器件选用和电参数选择时，严格按照GJB/Z35-93《元器件降额准则》要求执行，并按照相关文件的要求严格进行入厂复验，不合格器件立即剔除。元器件焊装过程中，采用专用的焊接设备和焊接工艺，严格控制焊接温度、时间等关键工艺参数，确保焊接的质量，既不产生虚焊，也不损伤器件。印制板组件在元器件焊装完以后，按照厂标文件进行环氧点封，并整件喷涂TS01-3聚氨酯清漆，提高防潮性能。可以满足寿命要求。

# 质量管理控制情况

元器件选用符合要求，元器件选用兼顾了高等级的一致性和可获得性，使用的目录外元器件履行了报批手续（审批过程中）。任务书指标传递正确，已根据任务书指标变化情况进行了相应落实。生产研制过程记录均按相关要求进行，记录完整、有效、具有可追溯性，并在整批产品完成后归档。

生产过程严格执行图纸及工艺文件要求。

通过对控制器测试覆盖性分析，测试覆盖性分析全面、合理；单机测试覆盖性检查项目实施到位，测试过程受控，测试数据有效，满足任务要求。

## 元器件、原材料选用与控制情况

### 元器件控制和管理

元器件选用参照公司标准《电子元器件优选目录》，元器件的选用已通过型号总体组织的评审，元器件选用符合“EEE”保证要求，初样产品采用普军质量等级的元器件。

### 原材料控制和管理

产品所用的原材料采用常用的成熟应用材料，均按照公司质量体系文件Q/FV（QM）0703《采购的控制程序》及总体有关要求进行质量控制，公司对A、B类采购产品的分承制方的质量保证体系、检验系统进行了严格的考查，均在“合格器材供应单位名单”中选用，确保了入厂产品的质量。

## 加工过程质量控制情况

生产加工人员相对固定，具有成熟的技术和经验，电气装配、特种工序和整机装配人员具有3年以上加工经验；加工用工装设备、计量器具经过鉴定合格并在有效期内；原材料、外购件、标准件以及元器件出库经过检验确认，加工现场标识到位，没有出现材料混用、错用；加工者严格按照工艺要求进行加工；加工现场洁净度、温湿度、防静电环境等满足工艺要求。

零组件加工的工艺过程质量控制是通过严格工艺纪律、严格进行首件检验制度、巡回检验以及质量管理人员严格的现场监督检查。零组件加工时，加工者严格按照设计图纸、工艺文件进行加工，加工者认真填写“生产流程卡”，签署完整后，随同零件一起提交检验员检验，以保证产品质量的可追溯性，产品所用零组件由检验人员严格按图纸、工艺要求进行检验合格；在产品研制完成后，“生产流程卡”进行整理后交质量部归档。

生产过程中涉及的特种工序主要电镀氧化，加工者严格按照所制定的工艺规程进行加工、检验和参数记录，保证加工及检验人员的稳定。检验人员一方面按照工艺规定进行检验，另一方面加强巡检，避免不合格品及多余物。

为了防止产品用元器件静电损伤，工厂在各环节配备了相应的设备、工具，使元器件在入厂、检验、周转、发放、装配、产品调试、试验各环节均得到有效控制。

在多余物控制方面，设计、工艺均采取了有效措施，使产品在零件加工、装配过程不会产品多余物，同时工厂从管理上采取了净化工作环境、定额发料等措施，有效控制了多余物的产生。

## 不合格品控制

产品的生产过程中所出现的不合格品均严格按质量体系程序文件Q/FV（QM）0804《不合格品的控制程序》的要求进行审理，并办理了相关手续。

检验人员严格对不合格品进行标识和隔离，防止不合格品流入下道工序。

## 外协、外购件控制

控制器外协、外购件入厂后，质量部进行入厂复验，清单如表 10所示。

表 10 外协外购清单

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 品名 | 型号规格 | 批次 | 生产单位 | 单台数量 | 验收结果 |
| 1 | 控制印制板 | / | M01 | 719厂 | 3 | 合格 |
| 2 | 驱动印制板 | / | M01 | 719厂 | 3 | 合格 |

控制器的印制板外协厂家在图纸中进行规定，外协按照印制板加工信息表和相关图纸进行生产，控制器印制板都在719厂进行。印制板入厂后，由外协检验按照《印制板检验规定》及设计图纸进行入厂复验，复验项目包括：外观、尺寸、翘曲度及金属化孔、厂家提供的合格证明、印制板加工图形符合性等。

## 工艺过程的控制

### 工艺控制

完成了工艺总方案、工艺文件、工艺清单的编制以及工艺评审工艺更改控制等工作，按常见工艺质量问题与隐患控制、禁（限）用工艺控制、工艺过程确认、关键工序控制、洁净度、污染及多余物工艺控制、电子产品防静电工艺控制、工艺装备控制等要求开展了相关工作。产品生产过程均采用典型工艺和通用工艺，并严格执行有关工艺标准、规范。

### 工艺文件编写

工艺文件依据《航天产品工艺文件管理制度》编制。文件完整、正确、统一、协调、清晰。工艺文件包含工艺流程、工艺要求、工艺过程记录卡或质量跟踪卡、特殊岗位人员资质要求、工艺设备和装备、测试设备、环境要求等内容。能有效指导产品生产。

### 工艺过程确认

按照质量管理标准《特殊过程管理规定》的要求对产品生产过程中涉及的特殊过程，根据相应的工艺细则对其进行了确认，工艺过程和方法能够满足产品要求。

# 标准化情况

控制器按照通用化、系列化、组合化要求以及可靠性工程要求开展研制工作，系统运行稳定可靠；考虑电机在其设计功能和结构上的可继承性、互换性和维修性，提高产品的通用化程度，最大限度地采用标准件、通用件。控制器结构采用我厂典型结构，技术状态成熟度高。选用目录内常用标准件、元器件、原材料选用的品种规格。

电机及控制器在研制过程中，具体标准实施情况如下：

a）产品设计时涉及的相关标准包括《电子元器件优选目录》、《元器件降额准则》 GJB/Z35-93、《印制板电路设计规范》QJ 3103-99、《电子设备可靠性预计手册》GJB/Z299C-2006等。

b) 设计文件的编制是按照QJ 1714.1B～1714.12B《航天产品设计文件管理制度》的规定进行的，所编制设计文件的格式、标识、编号符合标准的规定，并按照QJ 1714.6B-2011《设计文件的完整性》的规定编写了产品定型阶段所需的各种设计文件。设计文件的编制正确，各相关设计文件做到了协调统一，设计文件的签署完整、正确，符合QJ 1714.9B-2011《设计文件的签署规定》。对图样的格式、填写要求、编号、签署、更改、完整性要求、管理按照QJ 1714B系列标准执行。图样贯彻了国家标准机械制图GB/T 14689～14691-1993、GB/T4457.4～4457.5-2002、GB/T 4458.1～4458.5-2002、GB/T 11675.1～11675.2-2012和电气制图GB/T 4728.3-2005、GB/T 6988.2～6988.3-2008的标准，电子、电气文字符号的使用与编制符合GB/T 7159-1987的要求。

c) 产品工艺文件编制执行文件包括有《航天产品工艺文件管理制度》QJ903.1B-～QJ903.30B-2011、《元器件通孔安装技术要求》QJ3012-98、《电镀和化学处理典型工艺》Q/FvZ57-2012、《常用有色金属材料热处理规范》Q/FvZ59.2-2008和《航天电子电气产品安装通用技术要求》QJ165A-96等。

d) 材料、标准件等的选用及在设计文件上的标注符合厂标Q/Fv 59.1-2010《非金属材料选用范围》、Q/Fv 59.2-2010《金属材料选用范围》、Q/Fv 62-2010《紧固件选用范围》的规定。

# 风险控制与管理情况

该控制器结构采用我厂典型结构，加工工艺成熟度较高，而且沿用前期产品的成熟设计，技术状态成熟度高，所以该控制器不存在风险点。

# 设计指标达到任务书情况

两路阀电机位主要实现位置控制，电机可在0~360°的范围内进行正反转。电机角度范围通过旋转变压器的返回值进行表示，对应的旋转变压器返回值的范围为500~65000。两路阀电机的主要指标见表 11，阀电机1和阀电机2的位置控制和响应时间见表 12、表 13。

表 11 阀电机主要技术指标

| 序号 | 协议书要求指标 | 设计指标 | 备注 |
| --- | --- | --- | --- |
| 1 | 供电电压：28VDC。 | 可在22V~30V工作 | 满足 |
| 3 | 电机额定转速：10r/min； | 实测转速为：10r/min | 满足 |
| 6 | 额定功率：70W | 参考同类型指标产品，可满足要求 | 满足 |
| 8 | 控制电机旋转方向：具有双向功能 | 通过软件控制可实现电机的正反转 | 满足 |
| 10 | 位置控制精度：±0.5% | 实测角度：±1° | 满足 |

表 12 阀电机1位置控制及响应时间表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 角度/旋变值 | 测试值 | 响应时间（主）s | 响应时间（副）s |
| -90°/16268 | 16239 | 11.51 | 10.24 |
| -60°/21768 | 21759 | 9.43 | 9.69 |
| -30°/27268 | 27279 | 8.11 | 9.42 |
| 0°/32768 | 32767 | - | - |
| 30°/38268 | 38271 | 6.12 | 7.05 |
| 60°/43768 | 43775 | 7.65 | 7.75 |
| 90°/49268 | 49231 | 9.56 | 9.70 |

表 13 阀电机2位置控制及响应时间表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 角度/旋变值 | 测试值 | 响应时间（主）s | 响应时间（副）s |
| -90°/16268 | 16319 | 11.88 | 11.35 |
| -60°/21768 | 21743 | 10.36 | 10.61 |
| -30°/27268 | 27247 | 9.38 | 8.49 |
| 0°/32768 | 32703 | - | - |
| 30°/38268 | 38223 | 7.34 | 7.78 |
| 60°/43768 | 43759 | 8.81 | 8.13 |
| 90°/49268 | 49279 | 11.70 | 8.59 |

泵电机和其他主要技术指标达到情况见表 14。

表 14 其他主要技术指标的到达情况

| 序号 | 协议书要求指标 | 设计指标 | 备注 |
| --- | --- | --- | --- |
| 1 | 供电电压：270VDC。 | 可在250V~290V工作 | 满足 |
| 2 | -45℃～＋80℃ | 产品所选材料、器件皆满足-55℃～＋125℃ | 满足 |
| 3 | 电机额定转速：6500±100r/min； | 实测转速：6479～6503r/min | 满足 |
| 4 | 转速调节范围：1000～6500r/min； | 转速调节范围：1000～6500r/min | 满足 |
| 6 | 额定功率：1200W | 参考同类型指标产品，可满足要求 | 满足 |
| 7 | 每次连续工作时间：不小于8h | 控制器按长时工作设计 | 满足 |
| 8 | 控制周期：电流环0.1ms，转速环4ms | 电流环150us，转速环周期1.5ms | 满足 |
| 9 | 速度控制精度：±1% | 实测值±100r/min | 满足 |
| 10 | 外形尺寸 | 满足要求 | 满足 |
| 11 | 外观 | 满足要求 | 满足 |
| 12 | 绝缘电阻：＞100MΩ | ＞100MΩ | 满足 |
| 13 | 电气接口 | 符合要求 | 满足 |
| 14 | 搭接电阻：不大于35mΩ | X1对底座：0.198mΩ  X2对底座：0.412mΩ  X3对底座：0.304mΩ  X4对底座：0.307mΩ  X5对底座：0.288mΩ  X6对底座：0.342mΩ  X7对底座：0.418mΩ  X8对底座：0.644mΩ  X9对底座：0.681mΩ  X10对底座：0.845mΩ  X11对底座：0.818mΩ | 满足 |
| 15 | 旋转方向：从轴伸端看为顺时针 | 顺时针 | 满足 |
| 16 | 重量≤8kg | 6.1kg | 满足 |

# 遗留问题落实解决情况

现阶段暂无遗留问题。

# 结论

21C852-0电机控制器经过设计、模样研制，性能指标满足任务要求，满足生产和整机使用要求，可以交付使用。