|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 档号 |  |  | 编号 | Q/KZQ-548\_XQ\_XQ\_V2.01.A |
| 保管期限 |  |  | 密级 | 非密 |
|  |  |  | 阶段标记 | S |

|  |  |
| --- | --- |
| 名称 | J/CYL-37液冷动力组件 |
|  | 控制器软件需求规格说明 |

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

|  |  |
| --- | --- |
| 部门 | 控制研发部 |
| 编写 | 李盛 20240605 |
| 校对 | 魏旭来 20240605 |
| 审核 | 唐春茂 20240606 |
| 会签 |  |
| 标审 | 王庆辉 20240606 |
| 批准 | 郑自伟 20240606 |

|  |
| --- |
| 贵州航天林泉电机有限公司 |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 内容提要：  本报告主要是对液冷动力组件控制器软件的需求进行阐述。软件作为系统的控制核心，主要负责采样电机的运行参数，执行电机转速闭环调速，产生电机的驱动信号，驱动电机正常工作，并将电机的工作状态通过RS422串口实时上传。 | | | | |
| 主题词 | 液冷动力组件、需求规格说明 | | | |
| 更改栏 | 更改单号 | 更改日期 | 更改人 | 更改办法 |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

目录

[1 范围 4](#_Toc168868797)

[1.1 标识 4](#_Toc168868798)

[1.2 系统概述 4](#_Toc168868799)

[1.2.1 软件所在系统 4](#_Toc168868800)

[1.2.2 工作软件外部交联图 5](#_Toc168868801)

[1.2.3 工作软件的用途 5](#_Toc168868802)

[1.2.4 项目需求方、用户、开发方和保护机构 5](#_Toc168868803)

[1.3 文档概述 5](#_Toc168868804)

[2 引用文档 6](#_Toc168868805)

[3 需求 6](#_Toc168868806)

[3.1 要求的状态和方式 6](#_Toc168868807)

[3.2 CSCI能力需求 8](#_Toc168868808)

[3.2.1 上电初始化单元（XQ1） 8](#_Toc168868809)

[3.2.2 上电自检单元（XQ2） 10](#_Toc168868810)

[3.2.3 模拟量采集单元（XQ3） 11](#_Toc168868811)

[3.2.4 闭环调速单元（XQ4） 16](#_Toc168868812)

[3.2.5 周期自检单元（XQ5） 18](#_Toc168868813)

[3.2.6 自保护停机/降额运行单元（XQ6） 21](#_Toc168868814)

[3.2.7 RS422通讯单元（XQ7） 23](#_Toc168868815)

[3.2.8 硬线起停控制单元（XQ8） 25](#_Toc168868816)

[3.2.9 数据存储单元（XQ9） 26](#_Toc168868817)

[3.2.10 软件集中加载单元（XQ10） 28](#_Toc168868818)

[3.3 CSCI外部接口需求 29](#_Toc168868819)

[3.3.1 模拟信号采集接口 31](#_Toc168868820)

[3.3.2 硬线起停控制 31](#_Toc168868821)

[3.3.3 RS422串口 31](#_Toc168868822)

[3.3.4 E2PROM读写 31](#_Toc168868823)

[3.3.5 PWM信号输出 32](#_Toc168868824)

[3.4 CSCI的内部接口需求 32](#_Toc168868825)

[3.5 CSCI内部数据需求 32](#_Toc168868826)

[3.6 适应性需求 32](#_Toc168868827)

[3.7 保密性需求 32](#_Toc168868828)

[3.8 安全性需求 32](#_Toc168868829)

[3.9 CSCI环境适应性需求 33](#_Toc168868830)

[3.9.1 宿主机硬件环境 33](#_Toc168868831)

[3.9.2 目标机硬件环境 33](#_Toc168868832)

[3.9.3 宿主机软件环境 34](#_Toc168868833)

[3.9.4 目标机软件环境 34](#_Toc168868834)

[3.10 其他质量特性 34](#_Toc168868835)

[3.11 计算机资源需求 34](#_Toc168868836)

[3.12 设计和实现约束 34](#_Toc168868837)

[3.13 人员需求 35](#_Toc168868838)

[3.14 培训需求 35](#_Toc168868839)

[3.15 软件保障需求 35](#_Toc168868840)

[3.16 验收、交付和包装需求 36](#_Toc168868841)

[3.17 其它需求 36](#_Toc168868842)

[3.18 需求的优先顺序和关键性 36](#_Toc168868843)

[4 合格性规定 36](#_Toc168868844)

[5 需求的可追踪性 36](#_Toc168868845)

[6 注释 38](#_Toc168868846)

J/CYL-37液冷动力组件控制器软件需求规格说明

# 范围

## 标识

J/CYL-37液冷动力组件控制器软件是针对液冷泵动力组件电机泵组件功能开发的软件，对文档标识号、文档标题、术语和缩略语等定义如下：

1. 文档标识号：Q/KZQ-548\_XQ\_XQ-V2.01.A;
2. 文档标题：J/CYL-37液冷动力组件控制器软件需求规格说明;
3. 软件名称：J/CYL-37液冷动力组件控制器软件;
4. 软件标识：N1-US-EC-YLDL-CT。

本文档中的术语和缩略语：

1. 软件：J/CYL-37液冷动力组件控制器软件；
2. 电机：电机泵组件；
3. 适用系统：设备冷却子系统。

## 系统概述

### 软件所在系统

J/CYL-37液冷动力组件控制器是XX项目液冷动力组件电机泵组件的驱动部件，控制器驱动电机带动泵体高速旋转，为液冷泵提供动力。J/CYL-37液冷动力组件控制器软件嵌在控制器DSP中，接收RIU下发的控制器指令，驱动电机按指令运行，并向RIU实时上传电机的运行参数。系统原理见图 1。



图 1 J/CYL-37液冷动力组件内部原理图

### 工作软件外部交联图

液冷动力组件控制器设备交联图见图 2。



图 2 液冷动力组件控制器设备交连图

### 工作软件的用途

软件属于嵌入式实时系统软件，实现液冷动力组件的控制功能：1）给液位传感器和温压传感器供电，并将液位传感器和温压传感器信号传递给RIU；2）对电机泵组件及控制器健康状况进行实时检测，并通过通讯接口上传检测结果；3）软件执行上电自检功能，对系统运行的初始状态进行判断；4）采集各路模拟量，一方面用于闭环调速算法的数据输入，另一方面用于自保护功能的数据输入；5）具备周期自检、自保护停机/降额运行功能；6）接收RIU控制指令，实时上传电机的运行参数及BIT故障检测信息；6）具备软件统一加载功能。

### 项目需求方、用户、开发方和保护机构

项目的需方：新乡航空工业（集团）有限公司；

项目的用户：新乡航空工业（集团）有限公司；

项目的开发方：贵州航天林泉电机有限公司；

项目的保障机构：贵州航天林泉电机有限公司。

## 文档概述

该文档描述了软件的CSCI能力需求、外部接口、内部接口需求、内部接口数据要求、安全性、设计和实现约束、验收、交付和包装等内容。针对软件研制任务书中的任务及接口，详细开展需求分析。该文档用于软件的设计开发、质量管理及验收交付工作。

本文档编写的用途：

1. 作为软件设计开发的依据。
2. 作为软件配置项测试的依据。
3. 作为软件评测的依据。
4. 本文档适用于软件开发人员和测试人员。

# 引用文档

下列文件中的有关条款通过引用而成为本文件的条款。凡注日期或版次的引用文件，其后的任何修改单（不包括勘误的内容）或修订版本都不适用于本文件，但提倡使用本文件的各方探讨使用最新版本的可能性。凡不注日期或版本的引用文件，其最新版本适用于本文档。引用的标准及法规见表 1，引用文件见表 2。

表 1 贯彻的标准和法规

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 文件号 | 文件名称 | 编写单位 | 修订版本 | 发布日期 |
| 1. | 装型[2010]37号 | 《空军重点型号软件研制管理办法》 | 空军装备部 | / | 2010 |
| 2. | GJB 2786A-2009 | 《军用软件开发通用要求》 | 总装备部 | / | 2009 |
| 3. | GJB 438C-2021 | 《军用软件开发文档通用要求》 | 总装备部 | / | 2021 |
| 4. | GJB 5000B-2021 | 《军用软件研制能力成熟度模型》 | 总装备部 | / | 2021 |

表 2 引用文件

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 文件号 | 文件名称 | 编写单位 | 修订版本 | 发布日期 |
| 1. | J/CLB61-XY-202301 | 《成品技术协议书》 | 新乡航空工业（集团）有限公司 | / | 202309 |
| 2. | / | 《J/CYL-37液冷动力组件控制器通讯协议》 | 新乡航空工业（集团）有限公司 | / | 202309 |
| 3. | Q/KZQ-548\_XQ\_RW\_V2.01.A | 《J/CYL-37液冷动力组件控制器软件任务书》 | 贵州航天林泉电机有限公司 | V2.01.A | 202406 |

# 需求

## 要求的状态和方式

软件是基于液冷动力组件控制器硬件平台开发的嵌入式软件，初始版本的软件通过仿真器烧写固化到控制器中的DSP中。软件的工作模式分为正常运行模式、待机模式和维护模式，如图 3所示。模式的切换通过RS422串口指令实现。



图 3 控制器工作模式

各模式状态定义、功能和切换条件具体见表 3。

表 3 工作模式状态定义

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 工作模式名称 | 定义 | 模式功能 | 切换条件 |
| 正常工作模式 | 该状态根据外部系统输入的有效起动指令及要求，实现电机的目标转速获取、转速闭环控制。在控制过程中检测并处理故障告警情况，并通过RS-422接口与RIU进行数据交互。 | 上电自检、模拟量采集、转速闭环控制、周期自检、自保护停机、数据通讯 | 接收的串口指令为正常运行 |
| 待机模式 | 该状态表示软件已通过上电自检，软件进行周期自检，等待接收有效起动指令。 | 可正常启动电机，电机停机后恢复到该状态 | 接收串口数据为停机 |
| 维护模式 | 该状态表示软件已通过上电自检，软件进行周期自检，等待接收有效的集中加载软件指令。 | 集中加载、数据通讯 | 接收的串口指令为集中加载状态 |

软件在正常运行模式下，实现电机的控制功能：1）软件执行上电自检功能，对系统运行的初始状态进行判断；2）采集各路模拟量，一方面用于闭环调速算法的数据输入，另一方面用于自保护功能的数据输入；3）具备自保护停机功能；4）实时上传电机的运行参数及BIT故障检测信息，4）存储电机运行的故障数据。

待机模式，该状态表示软件已通过上电自检，软件进行周期自检，等待接收有效起动指令，正常运行的控制器收到停机指令后回到该模式等待下一次启动指令到来。

软件在维护模式，主要实现软件集中加载功能，提高产品的维护性和维修性。维护状态下通过RS422接收串口指令，串口操作指令由地面维护设备发送，当接收的串口指令为集中加载时，执行软件升级功能。

## CSCI能力需求

根据软件任务书功能要求以及电机控制的算法原理分解功能需求，液冷动力组件控制器软件的能力需求如图 4。



图 4 软件CSCI能力需求图

### 上电初始化单元（XQ1）

#### 需求描述

系统上电后，程序从FLASH加载到RAM中开始运行，上电初始化执行的操作是初始化各变量参数、系统的时钟、中断向量表、SPI、SCI、ADC、EPWM、ECAP、ECAN、AD1210等外设。上电初始化的进入条件是DSP上电后硬件复位成功。

#### 输入

无。

#### 处理过程

上电初始化主要进行系统时钟初始化、将程序从FLASH加载至RAM、初始化外设初始状态、初始化各变量参数等动作。系统时钟初始化的目的是为了配置各外设的时钟，使各外设可以正常工作；将程序冲FLASH加载至RAM是为了加快程序的执行速度；初始化各外设初始状态是为了将各外设的初始状态设置为已知状态，可以按任务需求进行工作；初始化各变量参数是为了软件可以按照初始参数进行运行，使得软件的运行和达到的目标是符合任务要求的。

系统时钟初始化包括如下步骤：

完成DSP运行的各寄存器初始化，将输出引脚配置在正确的工作状态，初始化操作主要是初始化各变量参数、系统的时钟、中断向量表、GPIO、CAP、PWM、SPI、SCI、ADC、CAN等外设。上电初始化流程如图 5所示。



图 5 上电初始化软件流程图

#### 输出

DSP各寄存器初始化值。

#### 性能

无。

#### 设计约束

1. 执行初始化前，应关闭所有中断；
2. 初始化在上电后执行一次;
3. 初始化时间不大于100mS。

#### 容错措施

无。

### 上电自检单元（XQ2）

#### 需求描述

控制器在上电初始化完成后，需对控制器的初始参数进行自检，以确保系统能运行在可以正常工作的初始状态。上电自检进入的条件是软件初始化完成。

#### 输入

输入的模拟量采集数据滤波处理见3.2.3条，滤波处理后的数据用于自检单元的输入。

#### 处理过程

控制器在上电初始化完成后，需对控制器初始运行参数进行自检。软件对1.9V基准电压、3.3V基准电压、AD模块状态、液位传感器状态、温压传感器状态、IGBT状态、A相电流、C相电流、270V电源电流、270V电源电压、控制器温度、电机温度等参数进行自检。自检的策略为：连续执行5次自检，只要有1次不通过，通过RS422总线，按照通讯协议上传上电自检故障位至机上RIU。当出现A相电流、C相电流自检不通过，不允许起动电机。其余自检项目不通过，允许电机起动。

表 4 自检方法描述

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 自检项目 | 自检方法及故障判据 | 串口上报故障位 | 备注 |
| 1.9V基准电压 | 1.9V基准电压大于等于1.8V，小于等于2V，自检通过 | 上报“上电BIT故障” |  |
| 3.3V基准电压 | 3.3V基准电压大于等于3V，小于等于3.5V，自检通过 |
| AD模块状态 | 1V电压大于等于0.5V，小于等于1.5V；2V电压大于等于1.5V，小于等于2.5V，自检通过 |
| 液位传感器状态 | 液位传感器采集电压小于等于3V自检通过 |
| 温压传感器状态 | 压力采集电压小于等于3V，温度采集电压大于等于0.4V，小于等于2V则自检通过 |
| IGBT状态 | IGBT端采集电压大于等于1.5V则自检通过 | 自检不通过，允许电机起动，并上报“上电BIT故障”。 |
| A相电流 | 电流采集零点绝对值不大于2A，自检通过 |
| C相电流 | 电流采集零点绝对值不大于2A，自检通过 |
| 270V电源电压 | 270V电源电压大于200V，小于340V，自检通过 | 上报“上电BIT故障”。 |
| 270V电源电流 | 电流采集零点不大于2A，自检通过 |
| 控制器温度 | 控制器温度小于120℃，自检通过 |
| 电机温度 | 电机温度小于170℃，自检通过 |

#### 输出

软件的上电自检结果。

#### 性能

自检时间不大于1S。

#### 设计约束

无。

#### 容错措施

无。

### 模拟量采集单元（XQ3）

#### 需求描述

模拟量信号采集单元主要对270V电源电压、270V电源电流、A相电流、C相电流、油箱液位、泵出口压力、冷却液温度、电机温度、控制器温度等9路模拟信号进行采集。其中A相电流、C相电流的采集周期是100us，参与闭环控制；其余模拟量信号采集周期是1ms，用于数据采集上传。

#### 输入

软件对9路模拟量进行采样，原始数据经过处理后，参与控制算法的计算及控制器的判故处理。

#### 处理过程

软件开辟了一个定时器中断Timer，中断周期100us，进入中断后，先采集各路外部模拟量信号，考虑到电机的闭环调速控制以及BIT设计，需采集270V电源电压、270V电源电流采样、控制器温度、电机温度、A相电流、C相电流。整个外部采样利用的是JDSP320F2812芯片A/D采样A、B通道，考虑到不同信号频率响应，在软件中对不同模拟输入信号进行了不同深度的滤波，尽量保证电机强干扰下信号采样的准确性及动态响应。超范围的数据软件不做处理，并通过串口上报按检测数据对应的故障。

表 5 模拟信号采样处理

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 采样参数 | 采样周期 | 采样处理 | 滤波处理 |
| 270V电源电压 | 1ms | 直接读取ADC结果寄存器 | 16次均值滤波 |
| 270V电源电流 | 1ms | 直接读取ADC结果寄存器 | 减去电流采样的零点，求32次平均，再进行一阶平滑滤波 |
| A相电流 | 100us | 直接读取ADC结果寄存器 | 减去电流采样的零点，再进行一阶平滑滤波 |
| C相电流 | 100us | 直接读取ADC结果寄存器 | 减去电流采样的零点，再进行一阶平滑滤波 |
| 油箱液位 | 1ms | 直接读取ADC结果寄存器 | 求16次平均，再进行一阶平滑滤波 |
| 泵出口压力 | 1ms | 直接读取ADC结果寄存器 | 求16次平均，再进行一阶平滑滤波 |
| 冷却液温度 | 1ms | 直接读取ADC结果寄存器 | 求16次平均，再进行一阶平滑滤波 |
| 电机温度 | 1ms | 直接读取ADC结果寄存器 | 求256次平均，再进行一阶平滑滤波 |
| 控制器温度 | 1ms | 直接读取ADC结果寄存器 | 求256次平均，再进行一阶平滑滤波 |



图 6 模拟量采集流程图

模拟量具体采集过程实现如下：

1. 270V电源电压采集

270V电源电压采集通过中断触发，以1ms的周期进行采集。软件直接读取ADC转换寄存器ADCRESULT3的值（0-4096），经过比例还原计算得到采集值的实际电压，比例系数由硬件设计决定，再经过16次均值滤波计算得到电压的采集值。



图 7 270V电源电压采集过程

1. 270V电源电流采集

270V电源电流采集通过中断触发，以1ms的周期进行采集。软件直接读取ADC转换寄存器ADCRESULT2的值（0-4096），经过比例还原计算得到采集值的实际电流值，比例系数由硬件设计决定，再经过32次均值滤波，计算得到电流的实际值。



图 8 270V电源电流采集过程

1. A相电流采集

A相电流采集通过中断触发，以100us的周期进行采集。软件直接读取ADC转换寄存器ADCRESULT1的值（0-4096），先减去电流采集的零点，经过比例还原计算得到采集值对应的电流值，比例系数由硬件设计决定，再经过一阶平滑滤波，计算得到A相电流的实际值。



图 11 A相电流采集过程

1. C相电流采集

C相电流采集与A相电流采集处理过程完全一致，通过中断触发，以100us的周期进行采集。软件直接读取ADC转换寄存器ADCRESULT0的值（0-4096），经过比例还原计算得到采集值对应的电流值，比例系数由硬件设计决定，再经过一阶平滑滤波，计算得到C相电流的实际值。



图 12 C相电流采集过程

软件未直接采集B相电流，B相电流通过计算得到，即通过公式IB=（0-IA-IC）计算可得到B相电流的实时值。

1. 油箱液位采集

油箱液位采集通过中断触发，以1ms的周期进行采集。软件直接读取ADC转换寄存器ADCRESULT6的值（0-4096），经过比例还原计算得到采集值对应的油箱液位，比例系数由硬件设计决定，再经过16次均值滤波，计算得到油箱液位的实际值。



1. 泵出口压力采集

泵出口压力采集与油箱液位采集处理过程完全一致，通过中断触发，以1ms的周期进行采集。软件直接读取ADC转换寄存器ADCRESULT7的值（0-4096），经过比例还原计算得到采集值对应的泵出口压力，比例系数由硬件设计决定，再经过16次均值滤波，计算得到泵出口压力的实际值。



1. 冷却液温度采集

冷却液温度与油箱液位采集处理过程完全一致，油箱液位采集通过中断触发，以1ms的周期进行采集。软件直接读取ADC转换寄存器ADCRESULT14的值（0-4096），经过比例还原计算得到采集值对应的冷却液温度值，比例系数由硬件设计决定，再经过16次均值滤波，计算得到冷却液温度的实际值。



1. 控制器温度采集

控制器温度通过中断触发，以100us的周期进行采集。软件直接读取ADC转换寄存器ADCRESULT4的值（0-4096），经过比例还原计算得到采集值对应的温度值，比例系数由硬件设计决定，再经过256次均值滤波，计算得到温度的采集值，如果计算的温度是正温度，则直接上传。如果是负温度则温度值加0x8000后上传。



图 9 控制器温度采集过程

1. 电机温度采集

电机温度采集处理过程与控制器温度采集处理过程完全一致，通过中断触发，以100us的周期进行采集。软件直接读取ADC转换寄存器ADCRESULT5的值（0-4096），经过比例还原计算得到采集值对应的温度值，比例系数由硬件设计决定，再经过256次均值滤波，计算得到温度的采集值，如果计算的温度是正温度，则直接上传。如果是负温度则温度值加0x8000后上传。



图 10 电机温度采集过程

#### 输出

模拟量采集是为了监控产品的工作状态，并实现周期自检、自保护停机功能，其输出作为其他功能单元的数据输入。

1. 采集270V电源电压是为了实现欠压、过压保护功能；
2. 采集270V电源电流是为了实现母线过流保护功能；
3. 采集A相、C相电流，一方面是为了电机转子估算位置及电流闭环控制，另一方面是为了实现相电流过流保护功能；
4. 采集油箱液位、泵出口压力、冷却液温度是为了对油箱、泵、冷却液做健康监控；
5. 采集的电机温度、控制器温度用于对产品的温度进行监控，对出现的过温故障进行保护。

模拟量采集的数据通过RS422串口以200ms的周期上传至RIU，上传的数据值为通讯发送时刻的计算值。

#### 性能

A相电流、C相电流采样时间间隔为100us±10%，270V电源电压、270V电源电流、油箱液位、泵出口压力、冷却液温度、控制器温度、电机温度采样时间间隔为1ms±10%。

#### 设计约束

见3.2.3.5。

#### 容错措施

所有采样通道数据都进行了均值或一阶平滑滤波，单个错误的采样数据不会对采样结果造成影响。

### 闭环调速单元（XQ4）

#### 需求描述

软件在接收到RIU控制指令后，采集两相绕组电流，估算电机转子位置信息，并通过空间矢量计算得到PWM输出信号，驱动电机运转。该单元进入的条件是上电自检通过且接收到电机起动指令。

#### 输入

1. 给定指令信号：RIU下发的控制指令、硬线控制起停控制信号；
2. 反馈信号：A相电流、C相电流；

#### 处理过程

闭环调速单元是软件的核心控制单元，该单元需运行在上电自检通过后的待机状态，在该状态下，软件在接收到控制指令后，通过电流传感器检测的相电流，估算电机转子的位置并计算得到电机转速，再经过转速闭环计算得到PWM输出信号，驱动电机运转。具体处理过程如下：

1. 转子位置估算及转速估算

转子位置估算采用锁相环的滑模观测器来实现。A相电流、C相电流在采集后，按Q13格式进行标幺处理，然后经过Clark得到*、*，同时通过计算的*、*，输入到滑模观测器内，经过低通滤波计算得到估算的反电动势、，通过三角函数计算得到输入角度和预估角度偏差Err。由于在计算过程中，滤波会导致相位的延迟，因此根据转速对角度进行了动态补偿，计算公式如式1所示。

其中为补偿后的角度，为补偿前估算角度，为电机转速，为补偿因子。

角度偏差Err经过PI调节器得到预估转速，再通过一阶低通滤波滤除高频分量，得到估算的电机转速Speed\_M。

1. 转速控制

J110TY9200电机采用转速控制方式，根据设定的档位，确定电机运行的转速值，并执行电机转速闭环控制，驱动电机运行。具体执行步骤如下：

1. 软件接收运行指令；
2. 根据指令确定电机运行的目标转速（9800rpm）；
3. 响应目标转速，执行闭环转速控制。
4. 根据软件周期性采集的A相、C相电流估算电机转速；
5. 通过将电机设定的转速与实际转速进行PI计算，输出PWM占空比，驱动电机运行到目标转速。



图 13 电机转速闭环调节流程图

#### 输出

6路PWM信号。

#### 性能

1. 控制器驱动输出转速为9800rpm，转速精度需满足±300r/min的要求；
2. 速度环控制周期1ms；
3. 起动时间≤5S（从电机起动到额定转速的时间）。

#### 设计约束

无。

#### 容错措施

无。

### 周期自检单元（XQ5）

#### 需求描述

软件周期性的对温压传感器温度输出、温压传感器压力输出、液位传感器输出、通讯故障状态、电机温度、A相电流、C相电流、270V母线电流、270V母线电压进行检测，并根据参数的特性设置故障判断的周期和阈值，在故障位被置位后，通过RS422串口将故障位，按通讯协议的上报要求发送到机上RIU。

#### 输入

电机关键运行参数。

#### 处理过程

软件周期自检功能通过周期性采样电机运行关键参数，并根据参数的特性设置故障判断的周期和阈值。为降低故障检测的虚警率，对关键参数进行连续多次判断，在连续多次判断的周期内，如果有1次参数恢复正常，则重新开始判断连续故障时间。在未达到连续故障时间前，不置位故障标志。软件在检测到任一故障后，置位相应故障标志，并通过RS422串口将故障位，按通讯协议的上报要求发送到机上RIU。

表 6 周期自检参数列表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 故障名称 | 检测周期 | 故障模式 | 连续故障时间 | 上传故障码 |
| 温压传感器温度输出故障 | 100us | 温度采集电压大于等于0.4V，小于等于2V | 100us±10% | ①发送数据B6的bit7位（温压传感器温度输出故障）  ②发送数据B6的bit2位（周期故障） |
| 温压传感器压力输出故障 | 100us | 温压传感器压力采集电压小于3V | 100us±10% | ①发送数据B6的bit6位（温压传感器压力输出故障）  ②发送数据B6的bit2位（周期故障） |
| 液位传感器输出故障 | 100us | 液位传感器电压小于3V | 100us±10% | ①发送数据B6的bit5位（液位传感器输出故障）  ②发送数据B6的bit2位（周期故障） |
| 通讯故障状态 | 1s | 不能正常接收数据 | 1s±10% | ①发送数据B6的bit0位（通讯故障状态故障）  ②发送数据B6的bit2位（周期故障） |
| 电机过温故障 | 1ms | 电机温度大于150℃ | 5S±10% | ①发送数据B23的bit5位（电机过温故障）  ②发送数据B6的bit2位（周期故障） |
| 相电流过流故障 | 100us | A、B、C相电流绝对值大于49A | 48ms±10% | ①发送数据B23的bit3位（相电流过流故障）  ②发送数据B6的bit2位（周期故障） |
| 270V电源电压过压故障 | 1ms | 电压大于340V | 48ms±10% | ①发送数据B23的bit1~bit0位（母线电压故障）  ②发送数据B6的bit2位（周期故障） |
| 270V电源电压欠压故障 | 1ms | 电压小于170V | 48ms±10% | ①发送数据B23的bit1~bit0位（母线电压故障）  ②发送数据B6的bit2位（周期故障） |
| 270V电源过流 | 1ms | 电流大于60A | 48ms±10% | ①发送数据B23的bit2位（母线电流故障）  ②发送数据B6的bit2位（周期故障） |



图 14 周期自检软件流程图

#### 输出

周期自检BIT。

#### 性能

检测周期以及各参数连续故障时间见表8。

#### 设计约束

无。

#### 容错措施

对各运行参数连续多次判断，满足连续故障时间，置位相应的周期自检故障位。

### 自保护停机/降额运行单元（XQ6）

#### 需求描述

软件在周期自检中检测到270V电源电流过流、电机过热、电机失步、电机堵转、相电流过流故障后，控制电机停转，并通过RS422串口上报相应状态故障、严重故障。电机停转后，延时6S后重新检测，如果软件检测故障状态恢复正常，则清除故障标志位，重新响应控制指令起动电机运行。在检测到270V电源电压欠压、控制器过热故障后，控制电机进入降额至低档运行。自保护停机/降额运行单元的进入条件是周期自检检测的参数出现故障并被置位。

#### 输入

周期自检BIT。

#### 处理过程

在系统运行异常时，软件根据周期自检检测故障，可能造成的危害度影响程度，分别进行自保护停机、降额运行两种保护策略。软件在周期自检中检测到相电流过流、电机堵转、电机失步、母线过流、电机过热故障后，置位故障标志位（等待发送周期到，即通过串口发送到RIU），关断PWM信号输出，电机开始停机，此时电机处于故障锁定状态，不响应起动指令信号，维持停机状态。延迟6S±0.1S后，对故障参数重新进行检测，故障恢复的判断条件如表9所示，若此时参数恢复正常，清除故障标志，允许响应控制指令。若故障未消除，电机一直处于停转状态。



图 15 自保护停机软件流程图

表 7 故障恢复判断条件

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 故障名称 | 检测周期 | 故障清除条件 | 连续故障时间 |
| 270V电源电压过压故障 | 100us | 电压大于200V，小于340V | 2ms±10% |
| 相电流过流故障 | 100us | A、B、C相电流绝对值小于10A | 2ms±10% |
| 270V电源过流 | 100us | 电流小于10A | 2ms±10% |
| 控制器通讯接收故障 | 100ms | 接收到校验通过的数据 | / |
| 电机失步故障 | 100us | 检测A、C相电流小于10A，而此时270V电源电流小于2A时 | 1S±10% |
| 电机堵转故障 | 100us | 检测的电机转速为0 | / |
| 控制器过热故障 | 100us | 控制器温度小于100℃ | 3S±10% |
| 电机过热故障 | 100us | 电机温度小于140℃ | 3S±10% |
| 270V电源欠压故障 | 100us | 电压大于170V，小于340V | 2ms±10% |

软件在周期自检中检测到控制器过热、270V电源欠压故障后，电机进入降额运行至低档运行。当参数检测正常后，清故障位，并恢复至控制指令对应的电机转速运行。



图 16 降额运行软件流程图

#### 输出

1. 软件PWM关断，电机停机；
2. 电机降额运行。

#### 性能

无。

#### 设计约束

无。

#### 容错措施

无。

### RS422通讯单元（XQ7）

#### 需求描述

RS422通讯发送接口用于软件与RIU进行通讯，软件通过串口以200ms周期上传系统关键运行参数及BIT故障信息等。串口通讯的格式和数据传递的格式遵循《J/CYL-37液冷动力组件制器串口通讯协议》的相关规定。RS422通讯单元进入的条件是通讯接收、发送的中断被正常响应。

#### 输入

RIU下发的数据帧。

#### 处理过程

控制器通过422接收RIU下发的控制指令，从而按指令控制电机运行，当单个通道连续5个周期内未收到正确的RIU指令时，上报该通道通讯故障。RS422通讯接收功能主要是软件接收机上RIU的控制指令，软件在接收到操作指令后，根据指令执行相应的操作。



图 17 RS422串口通讯接收软件流程图

RS422通讯接口用于软件与机上RIU进行通讯，软件通过串口以200ms周期上传电机关键运行参数及BIT故障信息等。数据发送以中断的方式进行。



图 18 RS422串口通讯发送软件流程图

连续5个周期（1s）未收到正确的RIU指令时，上报该通道通讯故障，通讯故障期间，若收到一包正确的通讯指令，取消通讯故障状态。

#### 输出

1. 周期自检上报的BIT故障信息；
2. 电机关键运行参数。

#### 性能

发送周期200±10ms。

#### 设计约束

上电后设置8S的通讯保护期，保护期内屏蔽硬线控制指令且不上报通讯故障。上电8S后或者接收到一包正确的RIU通讯指令后解除保护。

#### 容错措施

需校验帧头、帧长度及校验位。

### 硬线起停控制单元（XQ8）

#### 需求描述

软件接收硬线起停信号，在RS422串口通讯功能丧失后，硬线控制信号有效。当硬线信号有效时（输入开关信号为低电平），控制电机起动，当硬线信号无效时（输入开关信号为高电平），电机停机。

#### 输入

RS422通讯故障；

#### 处理过程

硬线起停控制模式优先级低于RS422控制模式。当RS422通讯出现通讯故障，软件切换至硬线控制模式，硬线控制信号低电平有效。当RS422通讯恢复时，软件控制模式由硬线控制切换回RS422控制。起停信号连续判断1000次，剔除开关信号抖动影响。

#### 输出

硬线控制指令。

#### 性能

无。

#### 设计约束

硬线控制优先级最低，上电前8S处于保护状态，不启用硬线控制，RS422通讯接收到一包正确值或上电时间超过8S后解除保护状态，保护状态结束后，当且仅当RS422失效时才启用。

#### 容错措施

需进行多次连续判读。

### 软件集中加载单元（XQ9）

#### 需求描述

软件接收到串口发送的升级指令后，将需要升级的代码烧写固化到FLASH中，实现软件的在线加载功能。软件集中加载进入的条件是接收到的串口指令为软件集中加载状态。

#### 输入

总线数据包中的系统模式字，控制器通过RS422串口读取；

#### 处理过程

软件处于正常工作的状态下，实时接收地面维护设备下发的数据。若软件接收到RS422串口数据包中，系统模式字为地面维护，该状态至少持续2个通讯周期，则确认系统模式为软件升级加载模式。软件将电机置于停机状态。

然后软件将自身软件升级加载标志置为有效，具体操作：对软件升级加载标志所在的FLASH执行擦除操作，并将软件升级加载标志写入到已擦写的FLASH中，写入后判断是否写入成功，若成功，则执行软件加载；若写入不成功，则重新擦除FLASH，并写入软件升级加载标记字，允许最大3次操作，超过最大允许次数后，不再执行写入操作。若软件升级加载标志为无效状态，处理器复位后仍将运行软件加载前的程序。在软件升级加载模式标记字写入成功后，关闭看门狗，DSP复位运行。

当控制器自身已进入软件升级加载模式后，仅能响应输入的总线数据包中的执行加载和清除软件升级加载模式标志指令，保持预定义的安全状态。在接收的地面维护设备发送的总线数据包中执行加载请求由无效变为有效，且该状态至少持续2个通讯周期，进入加载状态，将镜像标记字置为有效，不允许响应清除软件升级加载模式请求。镜像标记字置位后，延时发送5个周期的数据后，将软件存储位置的FLASH扇区擦除，擦除完毕后，开始接收升级后的软件并固化至目标地址，并根据加载过程，更新控制器的加载状态。如果未接收到地面维护设备发送的执行加载请求由无效变为有效，或者该状态未持续至少2个通讯周期，则保持当前状态不变。

在全部加载过程中，控制器通过RS422串口向地面维护设备反馈当前软件的CSCI ID、自身软件升级加载模式状态、接收包序号、当前包接收状态、加载状态、加载进度和清除软件升级加载标志状态。

当目标码固化完成后，控制器将对目标码进行CRC校验，计算完成后，将该CRC校验码与地面维护设备下发的总线数据包中的CRC校验码进行比对：若两者一致，则将加载状态置为校验成功；否则将加载状态置为校验失败。当软件校验成功后，将镜像标记字置为无效，允许响应清除软件升级加载模式请求，向地面维护设备反馈校验成功状态。

#### 输出

无。

#### 性能

软件从接收到地面维护设备的升级指令，到完成软件的全部加载（含校验通过），总时间不大于80秒。

#### 设计约束

无。

#### 容错措施

无。

## CSCI外部接口需求

软件的外部接口包括：模拟量输入接口、RS422串口、硬线起停控制、PWM信号输出接口、以及E2PROM的读写接口，整个外部接口如图 21。



图 21 外部接口图

表 8 外部接口标识及数据说明

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 接口名称 | 接口标识 | 接口说明 | 接口数据/数据名称 | 数据标识 | 来源 | 目的地 |
| 模拟量采集接口 | ADC | 模拟量采集 | 模拟量采集 | ADC\_AD | 外部传感器 | 软件 |
| 硬线起停信号 | HARDLINE | 读取电机起停控制信号 | 电机起停信号 | HARDLINE\_KG | 外部开关 | 软件 |
| RS422串口 | RS422 | 接收RIU下发控制指令 | 控制指令 | RS422\_RX | RIU | 软件 |
| 向RIU发送电机的运行参数 | 电机运行参数 | RS422\_TX | 软件 | RIU |
| E2PROM读写 | DATA\_STORE | 将故障信息写入E2PROM | 故障信息 | DATA\_STORE\_Write | 软件 | E2PROM |
| 从E2PROM中读取故障信息 | 故障信息 | DATA\_STORE\_Read | E2PROM | 软件 |
| PWM信号输出接口 | PWM\_OUTPUT | 输出PWM信号，驱动电机 | PWM信号 | PWM\_OUTPUT | 软件 | 驱动电机 |

### 模拟信号采集接口

需求标识：XQ\_IN\_0001

内部模拟信号采集分别为270V电源电压、270V电源电流、A相电流、C相电流、油箱液位、泵出口压力、冷却液温度、电机温度、控制器温度等。采用定时器中断触发采样，采样周期100us。该接口采集的数据一方面参与到闭环调速控制，另一方面用作实时保护（运行报警和自保护停机），并通过RS422串口发送给RIU。

### 硬线起停控制

需求标识：XQ\_IN\_0002

软件接收硬线起停信号，当硬线信号有效时（输入开关信号为低电平），电机起动，硬线信号无效时（输入开关信号为高电平），电机停转。起停信号连续判断1000次，剔除开关信号抖动影响。

表 9 硬线起停控制接口数据元素表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 标识号 | 说明 | 值域 | 数据类型 | 表示方法 |
| 1 | HARDLINE \_KG | 硬线起停信号GPIOE1输入到DSP中，软件根据GPIO输入的高低电平进行运行或停机处理 | 0/1 | BOOL | 二进制 |

### RS422串口

需求标识：XQ\_JK\_0001

RS422串口A用于软件与RIU进行通讯，软件一方面接收RIU下发的控制指令，另一方面通过串口以200ms周期上传电机关键运行参数。通讯的格式和数据传递的格式遵循《J/CYL-37液冷动力组件控制器串口通讯协议》的相关规定。

### PWM信号输出

需求标识：XQ\_OUT\_0001

软件在接收到控制指令后，采集电机的相电流，进行位置估算，在空间矢量计算后，输出6路PWM信号，输出信号的更新频率为10K，该信号在经过驱动放大后，驱动电机运行。

表 11 PWM信号输出接口数据元素表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 标识号 | 说明 | 值域 | 数据类型 | 表示方法 |
| 1 | PWM\_Output | 输出占空比 | 0~6000 | 整形 | 十进制 |

## CSCI的内部接口需求

液冷动力组件控制器软件内部各功能单元之间的接口简述如下图24所示。



图 22 CSCI内部接口设计

## CSCI内部数据需求

CSCI内部数据需求详见软件设计说明。

## 适应性需求

无。

## 保密性需求

无。

## 安全性需求

工作软件安全性需求如下：

1）所有接收到的控制指令，必须进行正确性检验后，方可执行后续操作。对于错误的指令不执行，仍保持上一次正常工作状态。

2）采集的模拟量需进行滤波处理。

3）故障检测需进行多次判断降低误停机的风险。

4）具备上电自检、周期自检功能。

5）设置软件看门狗，复位时间320ms±10ms（该复位时间为JDSP320F2812数字芯片的器件特性决定），喂狗周期277ms±10ms，程序异常导致不能正常喂狗时，软件会进入复位，在复位过程中，硬件设计保证控制器处于安全状态，即功率管处于关断状态、驱动电源处于无供电状态。复位后，电机停转，软件重新初始化运行，并执行上电自检，在自检通过后，电机按当前指令状态运行。

## CSCI环境适应性需求

该软件必须运行在J/CYL-37液冷动力组件硬件平台下，脱离此平台，将不运行或错误执行。软件基于TI公司的Code Composer Studio Version10.0进行开发。

### 宿主机硬件环境

1. 计算机：Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU @ 2.90GHz；
2. 仿真器：YXDSP-XDS100V3。

### 目标机硬件环境

JDSP320F2812，JDSP320F2812是中电58所国产化美国德州仪器（TI）生产SMJ320F2812的一款面向电机控制领域的专用32位定点数字信号处理器（DSP），其系统组成：150MHz、每秒150×106条指令的低电压3.3V CPU，片内存储器，中断管理模块，事件管理模块，片内集成设备等。JDSP320F2812采用增强的哈佛结构，芯片内部具有六条32位总线，其程序存储器总线和数据存储器总线相互独立，支持并行的程序和操作数寻址，因此CPU的读/写可在同一周期完成，这中高速运算能力使精确控制、多变量控制、神经网络、遗传算法等复杂的计算变现实。JDSP320F2812的特点主要体现：片内存储器丰富，通常不需外部扩展，这简化了电路设计；片内包括两个管理事件模块EVA和EVB，这为开发电机控制提供方便；自带多路A/D转换器，这简化控制设计电路；多个快速中断管理，这为电机实时控制算法的实现提供了便利条件；含有标准异步串行通讯接口和符合CAN 2.0B标准的增强型CAN总线控制器，通过外扩串口驱动器和CAN总线驱动器还可方便地与操控计算机进行通讯；高效代码，SMJ320F2812和C/C++编译程序设计在一起，以确保最高的效率，使设计者能够使用高级语言进行开发，此外软件还包括很多设计库，简化了开发程序。

### 宿主机软件环境

1. Microsoft Windows 10；
2. Code Composer Studio Version 10.0

### 目标机软件环境

无。

## 其他质量特性

该软件为嵌入式软件，在相同硬件平台下可以移值，软件功能、性能、执行方式不会发生变化。软件不存在冗余代码，代码注释率不低于20%。

## 计算机资源需求

1. 硬件需求
2. Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU @ 2.90GHz；，16GB内存；
3. YXDSP-XDS100V3。
4. 软件需求

Microsoft Windows 10、Code Composer Studio Version10.0、地面维护设备通讯软件（以VC++为基础工厂自行开发）、VC++6.0。其中Microsoft Windows 10为计算机操作系统，Code Composer Studio Version10.0为芯片JDSP320F2812的专用开发软件，VC++6.0是地面维护设备软件的开发软件，目的是检测底层嵌入式软件功能、性能的执行情况。

## 设计和实现约束

1. 软件设计约束

①软件设计需遵循GJB/Z 102A-2012《军用软件安全性设计指南》、GJB 2786A-2009《军用软件开发通用要求》、GJB 438C-2021《军用软件开发文档通用要求》等相关法规文件；

1. 软件功能设计应遵循《液冷动力组件控制器软件研制任务书》的相关功能、接口规定；

③软件设计需遵循JDSP320F2812芯片相关设计、开发规则；

1. 软件的实现约束

①采用结构化和模块化设计方法；

②中断不允许嵌套；

③实际运行时间在实时周期（100us）中有30％以上的余量；

④存储空间留有30％以上的余量。DSP内部flash存储空间128K\*16位，内部RAM空间18K\*16位。

## 人员需求

能力需求：能熟悉使用开发软件Code Composer Studio Version10.0、VC++6.0；能掌握永磁同步电机控制策略的相关理论知识；能熟悉掌握液冷动力组件控制器硬件平台的相关硬件知识。

人员需求：6人，一、软件需求分析（2人）；二、开发地面维护设备系统软件，以为软件功能测试提供平台，开发底层嵌入式嵌入式软件，以便执行系统的相关功能、性能（2人）；三、对软件进行详细系统测试，以便保证系统软件的可靠性（2人）。

## 培训需求

无。

## 软件保障需求

软件开发方负有保修和检测的责任；产品超过保修期限时，软件开发方承担有偿复测、维修和应用户要求修改的责任。

1. 人员保障

为了实现软件的开发，在人力资源上应能提供保障。

1. 硬件保障

需提供软件开发的相关硬件资源，以便软件开发。

1. 软件质量体系保障

软件开发应遵循相关软件质量体系，以确保软件的质量。

1. 软件修改保障

该软件的修改承制方根据相关手续进行修改，修改后的软件需通过验证以及总体单位的认可。

1. 软件升级

由于型号要求，对软件进行升级，这需承制方根据软件相关要求开展工作，升级后的软件需通过验证以及总体单位的认可。

## 验收、交付和包装需求

该软件为嵌入式软件，是JDSP320F2812的开发软件，是以J/CYL-37液冷动力组件硬件平台实现控制器的功能，软件在成品交付时已烧写在芯片里。

对于总体有要求时，可将代码刻成光盘交付（光盘上需注明版本号、名称、标识）。

对于软件相关的纸制文档，在一批成品中随成品交付一份。

## 其它需求

无。

## 需求的优先顺序和关键性

无。

# 合格性规定

合格性规定见表17

表 12 软件合格性规定

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 章节号 | 能力需求 | 所在章节 | 合格性方法 | 合格性级别 |
| XQ1 | 上电初始化 | 3.2.1 | A、Z、D | 1、3 |
| XQ2 | 上电自检 | 3.2.2 | A、Z、D | 1、3 |
| XQ3 | 模拟量采集 | 3.2.3 | A、Z、D | 1、3 |
| XQ4 | 闭环调速 | 3.2.4 | A、Z、D | 1、3 |
| XQ5 | 周期自检 | 3.2.5 | A、Z、D | 1、3 |
| XQ6 | 自保护停机/降额运行 | 3.2.6 | A、Z、D | 1、3 |
| XQ7 | RS422通讯 | 3.2.7 | A、Z、D | 1、3 |
| XQ8 | 硬线起停控制 | 3.2.8 | A、Z、D | 1、3 |
| XQ9 | 数据存储 | 3.2.9 | A、Z、D | 1、3 |
| XQ10 | 软件集中加载 | 3.2.10 | A、Z、D | 1、3 |
| 合格性方法：D-演示或测试，A-分析，Z审查  合格性级别：1-单元级，2-部件级，3-配置项级，4-系统级 | | | | |

# 需求的可追踪性

本软件需求规格说明到软件研制任务书的需求追溯表见表18，软件研制任务书到需求规格说明的追溯表见表19。

表 13 需求到任务书追溯表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 需求及标识 | 需求规格说明章节 | 软件研制任务书来源 | 软件研制任务书章节 |
| 1 | 上电初始化单元XQ1 | 3.2.1 | 上电初始化M1 | 4.1.1 |
| 2 | 上电自检单元XQ2 | 3.2.2 | 上电自检M2 | 4.1.2 |
| 3 | 模拟量采集单元XQ3 | 3.2.3 | 6路模拟量采集M3 | 4.1.3 |
| 4 | 闭环调速单元XQ4 | 3.2.4 | 电机转速闭环调节M4 | 4.1.4 |
| 5 | 周期自检单元XQ5 | 3.2.5 | 周期自检M5 | 4.1.5 |
| 6 | 自保护停机/降额运行单元XQ6 | 3.2.6 | 自保护停机/降额运行M6 | 4.1.6 |
| 7 | RS422通讯单元XQ7 | 3.2.7 | RS422通讯M7 | 4.1.7 |
| 8 | 硬线起停控制单元XQ8 | 3.2.8 | 硬线起停控制M8 | 4.1.8 |
| 9 | 数据存储单元XQ9 | 3.2.9 | 数据存储M9 | 4.1.9 |
| 10 | 软件集中加载单元XQ10 | 3.2.10 | 软件集中加载M10 | 4.1.10 |
| 11 | 性能 | 3.4 | 性能 | 4.2 |

表 14 任务书到需求追溯表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 软件研制任务书来源 | 软件研制任务书章节 | 需求及标识 | 需求规格说明章节 |
| 1 | 上电初始化M1 | 4.1.1 | 上电初始化单元XQ1 | 3.2.1 |
| 2 | 上电自检M2 | 4.1.2 | 上电自检单元XQ2 | 3.2.2 |
| 3 | 6路模拟量采集M3 | 4.1.3 | 模拟量采集单元XQ3 | 3.2.3 |
| 4 | 电机转速闭环调节M4 | 4.1.4 | 闭环调速单元XQ4 | 3.2.4 |
| 5 | 周期自检M5 | 4.1.5 | 周期自检单元XQ5 | 3.2.5 |
| 6 | 自保护停机/降额运行M6 | 4.1.6 | 自保护停机/降额运行单元XQ6 | 3.2.6 |
| 7 | RS422通讯M7 | 4.1.7 | RS422通讯单元XQ7 | 3.2.7 |
| 8 | 硬线起停控制M8 | 4.1.8 | 硬线起停控制单元XQ8 | 3.2.8 |
| 9 | 数据存储M9 | 4.1.9 | 数据存储单元XQ9 | 3.2.9 |
| 10 | 软件集中加载M10 | 4.1.10 | 软件集中加载单元XQ10 | 3.2.10 |
| 11 | 性能 | 4.2 | 性能 | 3.4 |

# 注释

CSCI：计算机软件配置项。