

[研究与设计]

基于嵌入式单片机的角度自动控制系统的可靠性设计*

龚征华 施 丹 沈国海 王志南

(708 研究所 上海 200011)

[关键词] 角度自动控制系统;重要件;硬件;软件;可靠性设计

[摘 要] 从方案设计、硬件设计、重要件设计、控制软件设计等几个方面,对某型基于单片机的角度自动控制系统的可靠性设计内容进行了介绍。

[中图分类号] U666.12+4 [文献标识码] A [文章编号] 1001-9855(2007)05-0007-06

Reliability design of angle auto-control system based on embedded SCM

Gong Zhenghua Shi Dan Shen Guohai Wang Zhinan

Keywords: angle auto-control system; important parts; hardware; software; reliability design

Abstract: This article introduces a reliability design on angle auto-control system based on embedded SCM (Single Chip Micryoco) on aspects of project design, hardware design, important part design, control software design and etc.

1 前 言

本文所述角度自动控制系统是专为某新型航行器的需要而研制。它采用嵌入式单片机作为中央控制单元,以航速为输入信号,以角度为系统反馈信号,组成一个负反馈型角度自动控制系统。

作为一个角度自动控制系统的设计,它直接为工程应用需要服务,而本自动控制系统的工作可靠性,又关系到航行过程的安全性,可以说是除了总体性能指标外另一个最重要的考核指标。在一定程度上对整个项目的成败有巨大的约束作用,自然就成为了用户和总师单位都极为关注的一项重要性能。

可靠性是部件、组件、产品或系统的完整性的最佳数量的度量。是产品在规定的环境下、规定的时间内、规定条件下无故障地完成其规定功能的概率,

或者说产品能保持功能的时间。它综合反映了一个产品的耐久性、无故障性、维修性、有效性和使用经济性等,并可应用各种指标表示。它是产品的一项重要质量指标^[1]。

可靠性工程是为了达到产品可靠性要求而进行的有关设计、生产和试验等一系列工作。它是适应武器装备和民用产品的需要而发展起来的,并且首先在航空、航天工业上得到应用推广。可靠性工程是研究如何评价、分析、提高产品可靠性的工程技术。它是一门基础性应用学科,也是一系列有关可靠性工作的综合。

可靠性设计的目的是要在设计阶段预测和预防可能发生的故障和隐患。

在本自动控制系统的研制过程中,我们根据可靠性工程原理,结合既有的工程经验,把自动控制系统可靠性的设计落实到了从总体方案到技术细节的

* [收稿日期] 2007-1-15

[作者简介] 龚征华(1974.10-),男,汉族,江苏人,工程师,上海交大在读工程硕士研究生,从事自动控制系统研究与设计工作。

施 丹(1977.2-),女,汉族,上海人,工程师,从事喷水推进技术研究工作。

沈国海(1950.1-),男,汉族,上海人,工程师,从事仪器仪表研究工作。

王志南(1979.9-),男,汉族,江苏人,助理工程师,从事船舶试验与仪器仪表研究工作。

诸多环节之中。

2 系统可靠性设计

角度自动控制系统在航行时是长时工作制,一旦航行,就意味着必须始终处于工作状态,不能停歇。

在自动控制系统的方案设计即控制方式的选择中,就设置了自动控制和手动控制两种控制方式。其中,自动控制方式由嵌入式单片机完成信号采集、数据运算,经过软件逻辑判断后,输出相应控制信号;手动控制则是由人代替单片机来完成这些工作。

在这两种方式中,角度传感器、信号放大器以及执行机构是共用的,而相关的操控开关等都是各自独立的。这两种控制方式独立设计、有机结合、互为备用,并且在其中之一处于工作状态时,另一个就处于备用状态,可以随时进行切换选择。

这样的设计,能够在自动控制系统的一种控制方式出现故障后,立即切换到另一种方式,保障航行器能够继续安全航行,为其继续完成工作任务或者尽快自主回到基地进行维修赢得了时间。从某种程度上说,这也大大提高了驾驶人员的生命安全性和整台航行器的安全性。角度自动控制系统可靠性框图见图 1 所示。

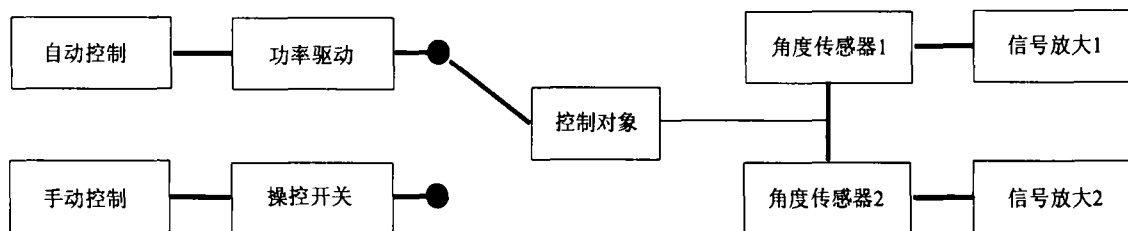


图 1 角度自动控制系统可靠性框图

这是一个可以进行实时切换选择的旁联模型。根据可靠性工程原理,这实际上就组成了冗余工作方式的一种——能够完全切换的储备系统。

考虑到系统本身工作的可靠性,在每个角度测量位置设置了两个角度传感器,它们在结构上呈对称布置,同步对角度进行测量,并传递信号至各自所属的信号放大器,组成了传感器并联系统。

根据可靠性工程原理,并联系统的可靠度比其中任意组件的可靠度高,对一个组件(角度传感器)添加并联组件,是提高系统可靠性的一种方法,这就是冗余(redundancy)。

3 重要件(角度传感器)的可靠性设计

角度自动控制系统是一个典型的负反馈系统,角度传感器提供关键的反馈信号,被确定为自动控制系统中唯一的重要件,如何保证其在工作时的可靠性是关系到控制系统方案可行性的至关重要的一个环节。

角度传感器的可靠性设计主要包括三个方面。

第一、角度传感器由于总体结构布置的需要,浸没在水中转动工作,为了从根本上解决角度传感器的水密问题,设计中大胆而巧妙地应用了非接触磁耦合传动技术,使传感器外部联轴器与内部电位器实现了物理隔离,在工作原理和结构上都保证了密封性。通过台架试验和实际航行试验的考核验证,这样的设计既保证了水密性能的万无一失,又能确保传感器外联轴器 and 内转动轴角度传动的同步性,不会产生相位滞后和信号失真,传感器的可靠性设计保证了系统设计的性能需求。

第二、传感器的供电电源质量对信号转换精度和输出稳定性影响极大。为此对于角度传感器工作电源设计采用 AD 公司的 AD581 基准电源。该电源除了输出电压精度高以外,还具有短路自保护功能,即当输出回路(传感器供电回路)出现短路故障时,电源自动跳闸,当短路故障排除以后,能自动恢复供电。同时,在 AD581 的输出端还采用了 L-C 滤波,进一步提高输出电压的稳定性。

第三、传感器的外部信号传输线,采用具有两层防水屏蔽措施的水密电缆,提高防水密封可靠性。

对于信号线的编制屏蔽层,在传感器工作端接地,既可以抑制共模信号干扰,又可以抑制静电感应引起的干扰。

4 嵌入式单片机系统的硬件可靠性设计

角度自动控制系统同时又是典型的嵌入式控制系统,其所处的工作环境极为恶劣和复杂。高温、潮湿、盐雾、振动、冲击以及电磁干扰等,这些都是系统可靠运行的基本障碍。自动控制系统硬件部分必须进行可靠性设计,采取有效手段保证其工作的可靠性。

4.1 元器件的选择与使用

元器件的选择及其组合使用是自动控制系统控制思想的物理体现,是自动控制系统的外在表现形式,也是控制软件的载体。元器件的性能直接影响到自动控制系统工作可靠性。

从系统设计方案可以看出,在信号输入与反馈、信号处理、信号输出的诸多环节中,既有模拟量信号,又有数字量信号;既有信号放大器,又有功率驱动器。因此,选用合理、优质的元器件是系统可靠性设计的重要环节。

我们在系统设计过程中,遵循如下的一些准则,进行了元器件的选用。

4.1.1 满足性能要求

元器件的选用必须以满足自动控制系统总体设计指标为首要条件,特别应注意严格控制与温度相关的性能指标。

4.1.2 简化系统设计

自动控制系统的可靠性与其自身的复杂程度是成反比的。

对于自动控制系统的核心部件——CPU,我们采用了嵌入式 C8051F000 单片机。它集成了一个典型的嵌入式测控系统所要使用的绝大多数外设硬件功能,包括 A/D 采样、UART 通信、内部看门狗等。这样在进行自动控制系统控制器(CPU 控制板)的设计时,最大程度地减少了大量的外设功能芯片和硬连接线路,大大提高了系统的可靠性。同时,由于 C8051F000 单片机是采用 3.3 V 供电,使得功耗比 5 V 单片机降低,也在一定程度上提高了系

统可靠性^[2]。

4.1.3 采用成熟的标准化元器件或性能优良的定型元件

自动控制系统的可靠性与采用成熟的标准化元器件是成正比的。

对于系统中的元器件(主要指各类集成电路),在保证功能和性能要求的前提下,尽量选用符合国标和/或其他相关标准的通用芯片,质量稳定性好,供货有保证,对于系统可靠性和今后的维护保养都非常有利。

角度传感器中的核心电位器采用了经过定型用于航天的 WDD35D1 型精密导电塑料电位器。

4.1.4 环境防护可靠性设计

(1)针对使用环境温度达到 55℃ 甚至更高,在模拟量角度电压信号放大器的设计中,放大倍数的温度稳定性是至关重要的。我们选用了适用于低频电路(尤其是模拟放大器)的高精度 10 K Ω /0.25 W 金属膜电阻,它具有阻值准确(误差小于 0.1%),温度系数小(5 ppm/℃),噪声电压小,性能稳定的特点,这些正是我们在进行线性放大器设计时所期望的;

(2)对自动控制系统中的功率驱动器件加装了散热器,并且直接固定在箱体上进行散热,减少了箱体内部的升温;

(3)以所适用的船用设备规范为标准,针对使用现场的频率特性范围,根据控制箱重量加装减震橡胶垫,大大改善了其抗振动、冲击性能;

(4)对箱体内部的 PCB 印刷板进行涂抹三防密封漆处理,在箱体外表面采用防腐漆进行涂装,防止盐雾腐蚀造成的破坏;

(5)在控制箱体的所有接合处使用导电橡胶材料进行箱体连接,防止电磁干扰信号通过缝隙串入箱内部,提高了系统的抗电磁干扰性能。

4.1.5 故障保护可靠性设计

根据自动控制系统的工作特点,针对可能出现的硬件故障模式,进行了可靠性设计。

控制电磁阀的功率驱动器件,采用具有自保护功能的逻辑智能芯片,当外部线路出现短路、开路等故障时,可以进行自我关闭保护,使执行元件控制动作停止,避免误动作引发危险,同时通过硬件线路发出报警指示信号。

4.1.6 充分的验证

上述元器件都是依据使用所需参数指标进行选用的,而实际性能的控制则有赖于试验。在自动控制系统总装之前,我们根据设计指标,对涉及到系统性能参数的主要元器件都进行了装机前的测试和筛选,确保其工作性能的可靠性。

4.2 硬件线路设计中的可靠性措施

(1)角度传感器电压信号经放大器输出后,需要同时送到 CPU 采样和显示表头。在这里分别加入了射极跟随器的设计,以防止信号源因阻抗匹配原因引起失真。

(2)在自动控制系统 PCB 印刷电路板的设计中,C8051F000 的空余 I/O 引脚在进行 PCB 布线设计时要并联接地,以避免干扰信号串入单片机系统。

(3)在单片机的 DI/DO 信号接口,设计加入了光电隔离器,避免外界干扰脉冲信号经过单片机 I/O 端口串入 CPU,引发意外。

(4)航空插头/座中加装了穿芯电容,数字量信号经过航空插座进入到控制箱内时,在每一根线上都套上磁珠,加强了线路的抗电磁干扰能力。

(5)对于控制箱内的走线,都进行了成束包覆,并可靠地固定,保证其抗振动冲击性能。

5 控制软件的可靠性设计

自动控制系统的现场运行环境恶劣,干扰严重,对嵌入式单片机系统运行的可靠性与安全性有很高要求。在嵌入式测控系统中,软件可靠性的重要性与硬件设计的可靠性同等重要,系统的可靠工作,除了要求硬件的高性能和高抗干扰能力外,还需要软件系统的密切配合。

嵌入式测控系统控制软件的编制必须具有易理解、易维护、实时性、可测试性、准确性、和可靠性的基本特征。

角度自动控制系统的控制软件在可靠性设计方

面采取了如下的措施。

5.1 bang-bang 控制技术的应用

自动控制系统控制对象的惯性矩很大,角度控制精度要求较高,而执行元件由于总体设计条件的约束,只能采用普通开关电磁阀,并且液压执行机构的流量是随主机转速变化的,实际上成为一个 bang-bang 控制系统,这些特性的相互叠加,很容易造成系统的超调和振荡。为此,控制软件通过 T0 定时器的使用,对输出的控制信号采用了间断的方波信号形式,并且经过实际的试验验证,信号占空比设定为 50%,在整个液压流量变化范围(即航速变化范围)内,既保证了满足控制精度的要求,又保证了系统工作的稳定可靠,并且具有一定的稳定裕度储备。

5.2 数字滤波方法的应用

数字滤波器是将一组数字序列进行一定的运算转换成另一组数字序列的装置^[3]。测量信号的数字滤波器处理流程如图 2 所示。

设数字滤波器的输入为 $X(n)$,输出为 $Y(n)$,则输入序列和输出序列之间的关系可用差分方程式表示为:

$$Y_{(n)} = \sum_{K=0}^N akX(n-K) - \sum_{K=0}^N bkX(n-K)$$

式中,输入信号 $X(n)$ 可以是模拟信号经采样和 A/D 变换后得到的数字序列,也可以是计算机的输出信号。具有上述关系的数字滤波器的当前输出与现在及过去的输入、输出有关。由这样的差分方程式组成的滤波器,称为递归型数字滤波器。如果将上述差分方程式中 bk 取 0,则可得:

$$Y_{(n)} = \sum_{K=0}^N akX(n-K)$$

说明输出只和现在的输入和过去的输入有关。这种类型的滤波器称为非递归型数字滤波器。

参数 ak 、 bk 的选择不同,可以实现低通、高通、带通、带阻等不同的数字滤波器。

角度传感器的模拟量输入信号由于受到诸多因

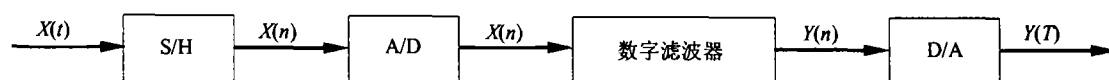


图 2 数字滤波流程框图

素的影响,到达单片机的 A/D 采样输入端口时,信号质量有所下降,其中除了表达角度量的有用电压信号外,还有无法消除的噪声和干扰信号。为了保证控制系统的正常稳定工作,我们采用系统控制软件中的滤波子程序对模拟量电压(角度)信号进行了数字滤波。

自动控制系统控制软件采取的滤波方法主要包括:

程序判断滤波法:根据工程经验设置判断两次采样允许的最大偏差 ΔY ,若先后两次采样值的差值大于 ΔY ,则本次采样值有效;若差值小于等于 ΔY ,则表明此次采样值无效,应该去除,用上次采样值作为本次采样值,在控制软件中 ΔY 设置为 0.05° ,本方法对噪声信号影响的滤除十分有效;

算术平均滤波法:连续取 N 个值进行采样,然后算数平均,本方法适用于对一般具有随机干扰的信号进行滤波。信号的特点是有一个平均值,信号在某一数值范围附近上下波动。经过计算和试验,本控制软件对 N 取值为 8。

防脉冲干扰平均值滤波法:此方法对于工作在干扰比较严重的电磁环境中是较为合适的。即先对 N 个连续采样值,去掉最大和最小值,然后计算 $N-2$ 个数据的算术平均值,作为本轮采样的最终取值,控制软件中 N 取值为 10。

5.3 DI 端口输入信号重复检测方法的应用

DI 输入信号所受的干扰是迭加在有效电平信号上的一系列离散尖脉冲,幅指大,作用时间短。当控制系统存在输入干扰,又不能完全用硬件措施加以有效抑制时,可以采用软件重复检测的方法,达到“去伪存真”的目的。

对接口中的输入数据信息进行多次检测,若检测结果完全一致,则是真的输入信号;若相邻的检测内容不一致,或多次检测结果不一致,则有干扰信号引入。两次检测之间应有一定的时间间隔 t ,设干扰存在的时间为 T ,重复次数为 K ,则 $t = T/K$ 。

自动控制系统控制软件对于工况选择开关量输入信号进行了软件重复检测处理,有效地预防了干扰信号的影响。图 3 所示是对工况转换信号判断进行重复检测的程序流程框图。

5.4 DO 端口输出信号数据刷新方法的应用

DO 端口输出信号的抗干扰性能,特别是对于

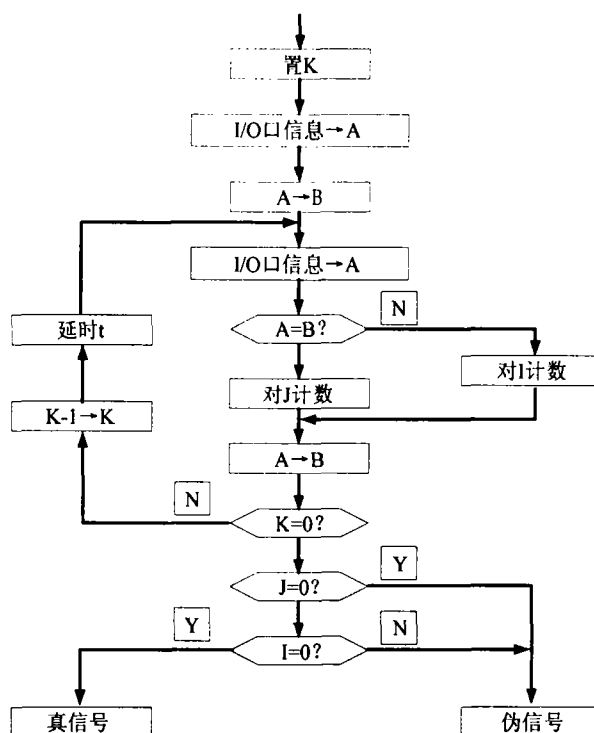


图 3 工况转换信号重复检测程序框图

本自动控制系统这样的输出控制对象是电磁阀负载,直接由信号控制开闭,主要是采取重复输出的办法加以保证。当输出端口受到干扰而产生错误的信号后,外部执行机构还来不及做出有效的反应动作,正确的控制信号又输出了,这就及时而有效地防止了错误动作的产生。

控制软件在每个程序循环周期(本系统约为 10 ms)都对输出端口进行一次输出信号刷新,台架试验和实际行驶试验结果表明,自动控制系统的输出控制信号始终是正确可靠的。

5.5 指令冗余的应用

当单片机因干扰而出现错误,程序便会脱离正常运行轨道,出现乱飞,为了使其迅速纳入正轨,便要采取指令冗余技术。

指令冗余包括:在双字节指令和三位元组指令之后插入两个单字节 NOP 指令,保证其后的指令不被拆散,正常执行;对程序流向起决定作用的指令(如 RET、RETI、ACALL、LCALL、LJMP、JZ、JNZ、JC、JNC、DJNZ 等)和某些对系统工作状态起重要作用的指令(如 SETB、EA 等)之前插入两条 NOP 指令,可保证乱飞的程序迅速纳入正轨,确保这些指令正确执行。

5.6 软件陷阱的应用

软件陷阱,就是用引导指令强行将捕获到的乱飞程序引向复位入口地址 0000H,在此处将程序转向专门对程序出错进行处理的程序,使程序纳入正轨。在本系统控制软件中,在 64K 程序存储区的空余部分,大量重复填写了软件陷阱程序。

例:程序存储区尾部的软件陷阱程序。

```
ORG 0000H
SJMP    MAIN
- - -
ORG     0FDF9H
NOP
NOP
LJMP    0000H
```

当控制软件落入陷阱区,便会执行上述指令,转到 0000H 起始单元,使程序重新纳入正轨,指定运行到预定位置。

5.7 看门狗(WATCHDOG)的应用

看门狗技术是嵌入式测控系统中应用非常普遍的安全措施,它能够强制陷入了“死循环”的程序返回到 0000H 入口,使系统重新纳入到正常运行轨道。

在本系统的设计中包括了两道看门狗安全措施。

首先,在嵌入式 C8051F000 单片机内部,已经自带了看门狗,而且看门狗定时清除脉冲过程非常简单,只要周期性地写入一句指令即可完成:

```
MOV WDTCN, #05H.
```

此外,为了提高系统可靠性,我们还设计了外部计数器型看门狗电路。只要通过 I/O 口周期性地对看门狗计数器输入清零脉冲,即可使其输出端为零,不影响程序正常执行,并重新开始计数,监视程序的运行。

试验表明,控制软件的可靠性设计措施与手段是行之有效的,它保证了自动控制系统安全、可靠的运行。

6 结束语

本文从系统到部件、从硬件到软件,综合介绍了角度自动控制系统在设计工作中所采取的可靠性保

障措施。实践证明,一个嵌入式自动控制系统的可靠性,必须从多方入手,采用综合措施进行设计和试验,给予充分的保证。

附:AD 采样滤波子程序^[4]:

```
Void ADGET(void)
{
    ulong angsum = 0; uchar j;
    uint ang = 0, angavg = 0, angmax = 0, angmin = 0xffff;
    for(j = 0; j < 10; j++) //AD 采样 10 次
    {
        ADOINT = 0;
        ADOBUSY = 1;
        while( ADOINT == 0);
        ADOINT = 0;
        ang = ADC0; //AD 采样结果赋值
        if( ang > ( angavg + 10) ) { ang = angavg; } //AD
        采样变化量判断
        else if( ang < ( angavg - 10) ) { ang = angavg; }
        else { ; }
        if ( ang > angmax ) { angmax = ang; }
        else if ( ang < angmin ) { angmin = ang; }
        else { ; }
        angsum += ang;
    }
    angsum = angsum - angmax; //减去最大值
    angsum = angsum - angmin; //减去最小值
    angavg = angsum >> 3; //angavg = angsum/8,
    返回 angavg
    { }
}
```

[参考文献]

- [1] 可靠性技术培训教材[R]. 中国船舶工业集团质量与可靠性中心
- [2] 潘琢金、施国君. C8051Fxxx 高速 SOC 单片机原理及应用[M]. 北京航空航天大学出版社, 2002. 5.
- [3] 王幸之、王雷、钟爱琴、王闪. 单片机应用系统电磁干扰与抗干扰技术[M]. 北京航空航天大学出版社, 2006. 2.
- [4] 马中梅、籍顺心、张凯、马岩. 单片机的 C 语言应用程序设计[M]. 北京航空航天大学出版社, 2001. 11.