

文章编号: 1672-2892(2011)03-0388-05

大型浮空器多级冗余协同控制策略

朱 弘, 谭剑波

(中国电子科技集团 第38研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 大型浮空器需要全天候、全时域工作, 对其控制系统的可靠性要求高。文中采用多级冗余的设计思想, 将控制系统划分为3个层次: 逻辑应用层、数据通信层和功能执行层, 针对不同层次的关键环节分别采用不同级别的冗余设计。基于不同冗余对象的工作特性分别实施相应的控制策略和算法, 包括系统级控制权策略、冗余数据交换策略、冗余处理器仲裁机制以及多冗余传感器融合算法, 从而保证各级别冗余设备高度协同受控, 最终实现工作控制系统的高可靠性和浮空平台系统运行的高安全性。

关键词: 浮空器; 冗余设计; 控制策略; 可靠性

中图分类号: TN47; TP273.5

文献标识码: A

Multilevel redundancy and coordination control strategy for large-scale aerostat

ZHU Hong, TAN Jian-bo

(The 38th Research Institute of CETC, Hefei Anhui 230031, China)

Abstract: Due to the requirement of all-weather and all-day working, large-scale aerostat control system must be high reliable. Based on the multilevel redundancy design thought, the control system was divided into three levels: logical application level, data communication level and function execution level. Corresponding redundancy schemes were designed for the key equipments of different levels. According to different working characteristics of the redundant objects, corresponding control strategies and algorithms, including system control right strategy, redundant data exchange strategy, redundant processor arbitration mechanism and multiple sensor fusion algorithm, were implemented. To ensure that the redundant equipment is highly coordinated, a control system with high reliability and an aerostat platform system of high safety were realized finally.

Key words: aerostat; redundancy design; control strategy; reliability

系留气球是一种依靠自身浮力的无动力浮空器, 在系留缆绳的牵引下实现升空、下降和滞空等各种工作状态。以其为空中平台, 搭载各种通信、干扰、侦察、探测电子设备的气球载系统^[1], 具有载重量大、预警能力强、侦查视野广、效费比高等优势, 可以在时间和空间上填补机载和星载的空白, 成为空中预警立体防御体系的重要组成部分。大型浮空器由于其工作特性, 需要实现全天候、全时域工作能力, 滞空时间长, 升空高度高, 一方面体积庞大, 不易受控; 另一方面所处的空中环境复杂, 因此对控制系统的安全性要求高。如何实现高可靠性、高实时性、能有效满足各种复杂需求的控制系统, 是构建整个浮空平台系统的重要内容。

1 浮空器控制系统

浮空器控制系统实现大型系留气球各种工作状态下的控制功能, 完成平台定位、三维姿态、囊体压力、风速风向、系缆状态、电力参数等近百个系统参数的采集, 实施风机、阀门等数十个设备控制, 监测全系统设备运行状态, 掌握系留气球系统的安全状态, 具备压力调节、温度控制、任务定制等多种自控遥控功能以及系统紧急状态下的应急处理能力。

控制系统组成见图1, 地面控制中心经无线通信将控制信息传至球上测控计算机和执行控制器, 同时通过传

传感器网络和多种信号采集设备实现对气球系统状态的全面监测,实现系留气球系统不同应用环境下的自主或自动控制。此外,地面控制中心还实时监控地面防护舱系留设施的工作运行状态。

2 多级冗余设计

浮空器控制系统为分布式控制系统,由多个独立的处理单元组成,单元间的联系依靠相互间的消息传递,具有模块性、并行性、自治性等优点。由于分布式系统复杂而且具有更多的独立失效点,必须进一步提高系统的容错能力^[2]。冗余技术可以提高系统抑制和校正整体性故障的能力,是大幅度提高整体系统的可靠性、安全性指标的有效手段,通过配置同等功能的部件,并通过一定的冗余逻辑使其协调地同步运行,使系统应用功能的实现得到多重保证。

2.1 冗余设计思想

冗余设计会增加系统的复杂程度和设计难度,设计合理可以大大降低系统的失效率,但冗余不当反而会增加系统的故障率。在系统分布式控制框架下,各设备承担的功能存在差异,对容错的需求也不同。因此,系统冗余设计的总体思想是:首先针对各对象的故障模型、失效率进行解析,得出对象的元器件组成、故障构成、故障类别、故障发生概率等数据,然后利用故障模型的数据进行冗余有效性分析,进行有针对性的冗余设计^[3]。最终,浮空器控制系统选择在核心处理、关键执行、状态采集、数据交换及地面指控等多个关键环节进行冗余设计。

为了保证控制系统设计合理、缜密有序,进行具体设计时采用了多级冗余的设计思想。如图 2 所示,将控制系统划分为 3 个层次:逻辑应用层、数据通信层和功能执行层。各个层次的设备具有独立的函数和任务划分。

2.2 逻辑应用层冗余

逻辑应用层的设计,是基于逻辑整件级的系统冗余,指实现冗余的对象在控制逻辑上具有完备的功能,可以自成系统独立完成工作任务。对冗余信息的利用,可以将不同系统的同类信息综合处理应用,也可以其中一系统为主,其余系统辅助或处于热备状态。球控计算机、指控计算机、显控台等设备是浮空器的控制中心,承担着系统管理、任务分发、状态维护等工作,控制系统基于这些设备整件实现逻辑应用层冗余设计。2 个系统级设备间周期性交互数据判定对方的工作状态,同时实时监听对方的专用“心跳”信号^[4],在对方系统发生故障后接管系统控制权。

2.3 功能执行层冗余

功能执行层的冗余,是基于功能部件级的局部冗余,主要针对单个器件采用冗余设计。球控计算机和执行控制器的处理器作为浮空器控制的核心,负责控制律计算、控制时序实现等任务,协调整机的有序运行。针对球控计算机内部的 CPU 和执行控制器内部的 FPGA 等关键器件,进行双核冗余设计。部件具备双冗余处理器的总线仲裁和数据交换功能^[5],其中一个处理器出现故障后能够立即保存现场数据,实时切换到另一个处理器继续工作。

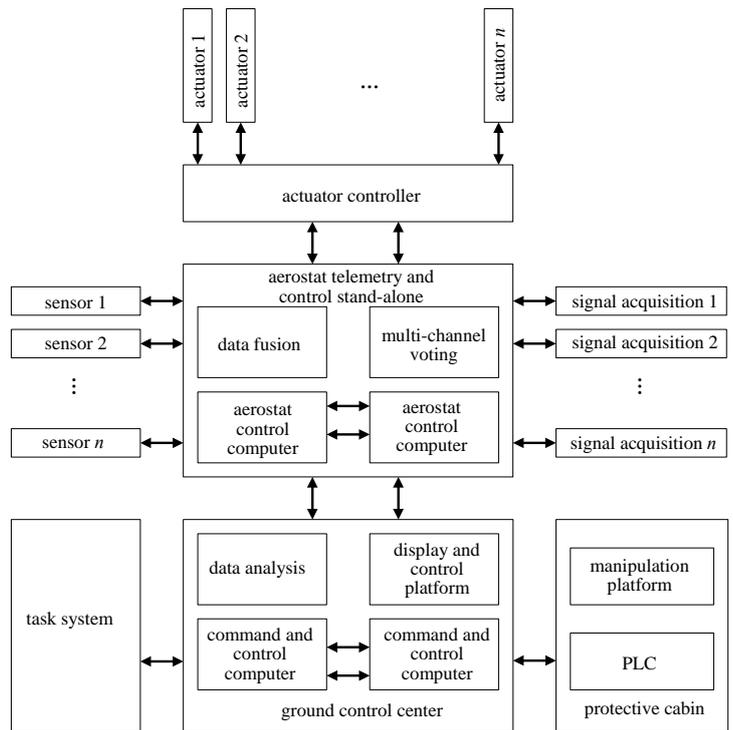


Fig.1 Aerostat control system

图1 浮空器控制系统

logical application level	double redundant command and control computer double redundant aerostat control computer double redundant display and control platform
data communication level	double channel air-to-ground communication double channel actuator controller communication double channel communication between computers
function execution level	double CPU of aerostat control computer double FPGA of actuator controller multiple sensor

Fig.2 Multilevel redundancy design

图2 多级冗余设计

对浮空器状态参数的采集依靠传感器实现,事关系统的控制决策。单一传感器误报风险大,可靠性和容错性低。多传感器信息融合技术利用来自不同传感器的信息互补,扩展了时间、空间、频率等多维空间的覆盖范围^[6];剔除局部探测结果的噪声和误差,增强信息可信度,提高分辨准确度;互补、冗余和相关特性保证数据具有良好的容错性和可靠性。针对浮空器系统的囊体压力、平台定位、风速风向等重要信息,采用多传感器信息融合技术,分布在不同位置的传感器完成信息检测、录取和预处理后,送至计算机进行数据的同步、综合、分析,最终完成对浮空器系统状态的一致性解释和描述。

2.4 数据通信层冗余

数据通信层负责完成逻辑应用设备到执行设备的消息传递与功能映射,同时实现逻辑层和功能层的同层设备之间的互联互通。由于数据通信在系统中的重要性,必须考虑容错措施。容错数据通信网络包括通信节点和通信链路的高可靠性,系统中对节点和链路采用双冗余结构,硬件设计双通信控制器和双通信通道,通信网络的容错、诊断和切换通过软件实现。正常情况下,节点可通过两路通信总线同时进行数据通信,通道并行工作,如果其中一路发生故障,将其关闭隔离,通信任务转移到另一路继续工作。

3 协同控制策略

多冗余设计进一步增加了系统的复杂度,因此需要严格保证各冗余设备协调工作,控制系统基于各个层级不同对象的冗余特性分别采用相应的控制策略和方法。

3.1 系统级控制权

系统级冗余设计的主要控制策略为:整个控制系统由地面控制中心到球上测控分机再到执行控制设备等,将具有自治性的设备划分为若干个单元系统,每个单元系统具备相对独立的控制权限,单元系统内部的冗余设备以独享的控制权实现协同工作,不失同一冗余设计内部的内聚性,同时降低多个不同冗余设计之间的耦合度。

以球上测控分机为例,两球控计算机拥有独立于其他系统的控制权。两冗余设备互相监听工作状态,交换系统控制信息,包括系统工作参数表、传感器采集数据表、控制命令记录表、执行状态和故障表等。拥有控制权的一方为主设备,在每个工作周期完成任务切换、扫描输入、程序执行、更新输出,按照其特有的“生产者/消费者”模式,将所有更新的系统控制信息送至从设备,从设备作为“消费者”完成数据同步,确保主从设备的输入、输出映像的一致性。

一旦主设备发生故障,从设备在规定的时间内没有检测到对方的“心跳”信号和无法获取数据信息,接管控制权,升级为主设备,接替上一个工作周期执行结果继续工作,实现系统平滑过渡。此外,为了避免异常干扰造成误判、控制权非正常竞争等现象的发生,地面控制中心具备第三方监督功能,在两冗余设备发生控制权异常时提供赋权恢复机制。

3.2 数据交换策略

数据交换策略中将控制命令流与状态数据流严格区分,分别定义不同的交换机制,保证控制命令执行的准确性和安全性的同时,满足数据、状态和故障信息的实时性和有效性。以其中的球上球下无线通信的数据流为例,如图3所示。

两球控计算机各自拥有完整的系统状态数据信息,两计算机进行实时交换保证数据的完整性和一致性。一旦接收到来自地面控制中心的问询命令,任意一球控计算机均能立即从本地回传系统信息,保证了整个球上信息下传的快速性。

与状态数据流的双向性不同,控制命令流具有严格的单向性和有序性,球控计算机接收到来自地面控制中心的设备控制或系统配置等命令,分析命令的目的和流向后,或本地执行或转发执行,保证整个控制命令流向的清晰准确,和最终执行的唯一性。

3.3 处理器仲裁机制

功能执行层的处理器冗余策略采用仲裁机制,仲裁器实时判断处理器运行情况,复位故障器件,同时将总线交付正常的处理器。仲裁算法采用固定优先级算法,即每个处理器的优先级事先确定,在仲裁过程中固定不变。运行过程中,仲裁器负责控制两处理器并行工作的数据共享和同步通信,并且负责处理器与外部设备的通信,两处理器采用竞争输出机制,在输出任务时同时申请输出总线控制权^[7],以并行输出方式保证数据的无缝切换。仲

裁器实时获取两处理器的计数信息作为判断是否出现故障的依据,通过信号量实现两处理器软件同步,正常情况下任务在高优先级处理器上运行,当其出现故障后,仲裁器将其复位,并将总线切换至低优先级处理器,低优先级处理器接管总线后,初始化外部端口,恢复工作数据和现场环境,继续执行任务。

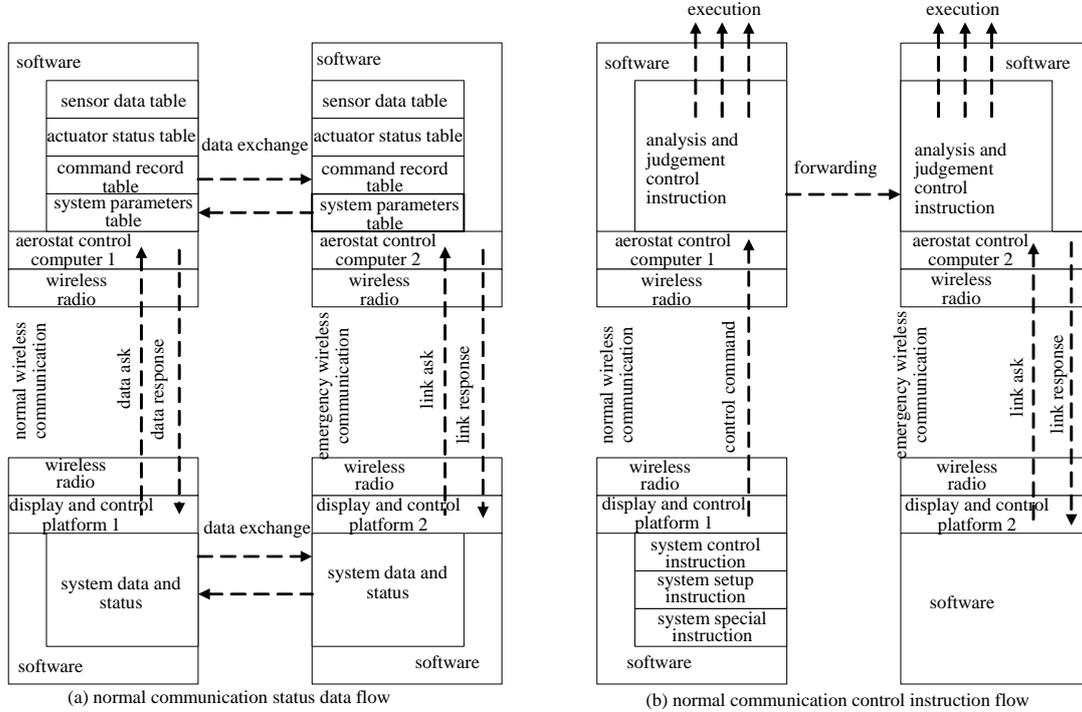


Fig.3 Wireless communication data exchange

图3 无线通信数据交换

3.4 多传感器融合算法

多冗余的传感器算法采用分布式融合结构,基于多卡尔曼滤波器实现数据融合,融合过程中实时估计各传感器的置信度,融合中心根据各传感器置信度,选择适合的融合策略,最后得到全局状态估计。

卡尔曼滤波的目的是尽可能减少噪声的影响,并从含有噪声的测量值中得到状态的最优估计。算法利用迭代递推的方式,其状态的每一次更新估计都由前一次估计和新的输入数据计算得到。非线性连续——离散系统其状态方程和测量方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t)=f[x(t),u(t),Q;t]+\Gamma w(t) \\ y(k)=h[x(k),u(k),Q;t_k]+v(k) \end{cases} \quad (1)$$

预测 k 时刻的值的的状态预测方程:

$$\frac{d}{dx} \hat{x}(t/t_{k-1}) = f[\hat{x}(t/t_{k-1}),u(t),\theta,t], \quad t_{k-1} \leq t \leq t_k \quad (2)$$

误差协方差矩阵预测方程:

$$\frac{d}{dt} P(t/t_{k-1}) = P(t/t_{k-1})F^T(t) + \Gamma Q(t)\Gamma^T, \quad F(t) = \frac{\partial f(x)}{\partial x} \quad (3)$$

增益矩阵:

$$\mathbf{K}(k)=P(k/k-1)H^T(k)\left[H(k)P(k/k-1)H^T(k)+R(k)\right]^{-1}, \quad H(k)=\frac{\partial h(x)}{\partial x} \quad (4)$$

得到 k 时刻的估计量的状态校对方程:

$$\hat{x}(k/k)=\hat{x}(k/k-1)+\mathbf{K}(k)[y(k)-H(k)\hat{x}(k/k-1)] \quad (5)$$

为 $k+1$ 次迭代使用的误差协方差矩阵校对方程:

$$P(k/k)=[I-\mathbf{K}(k)H(k)]P(k/k-1) \quad (6)$$

滤波计算按以上步骤进行。融合算法为了弥补常规卡尔曼滤波融合算法的不足,采用多滤波器结构以解决传

传感器的失效问题^[8]。信息融合策略由传感器的置信度决定,置信度符合设置的门限,才能进行融合。融合中心先根据传感器的状态及时调整参与融合的传感器数目,在此基础上求多个传感器输出数据的加权平均值,权值的大小与其测量方差成反比,从而输出一个更精确的估计结果。

4 结论

浮空器控制系统是大型系留气球系统的核心部件,针对控制系统的不同层次的多处关键环节,分别进行不同级别的冗余设计,降低系统设计的复杂性,规避冗余设计引入系统性风险。基于不同冗余对象实施灵活的控制策略、机制和算法,确保控制系统的高度协同性,最终有效地提高系统的健壮性和鲁棒性。

参考文献:

- [1] 陈昌胜,赵攀峰. 系留气球载雷达系统分析[J]. 雷达科学与技术, 2007,5(6):410-414. (CHEN Changsheng,ZHAO Panfeng. Analysis of Tethered Aerostat Borne Radar System[J]. Radar Science and Technology, 2007,5(6):410-414.)
- [2] 马连川,刘波. 一种分布式三模冗余控制系统的实现[J]. 北方交通大学学报, 2000,24(5):71-74. (MA Lianchuan,LIU Bo. Implementation of a Distributed Triple-Modular Redundancy Control System[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2000,24(5):71-74.)
- [3] 黄文君,金建祥,冯冬芹,等. 控制系统的冗余策略和实现准则[J]. 仪器仪表学报, 2004,25(4):545-548. (HUANG Wenjun, JIN Jianxiang,FENG Dongqin,et al. Research on Redundancy Strategy and Design Rule in Control System[J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2004,25(4):545-548.)
- [4] 满梦华,原亮,丁国良,等. 嵌入式高可靠性异构双机冗余系统的设计[J]. 计算机应用, 2009,29(8):2143-2145.(MAN Menghua,YUAN Liang,DING Guoliang,et al. Embedded dual-computer redundant system design with high reliability and heterogeneous structure[J]. Journal of Computer Applications, 2009,29(8):2143-2145.)
- [5] 黄翌,陈丽娟. 气球系统控制安全中的双机冗余设计[J]. 信息与电子工程, 2009,8(3):357-359. (HUANG Yi,CHEN Lijuan. Dual-host redundancy design on safe control of balloon[J]. Information and Electronic Engineering, 2009,8(3):357-359.)
- [6] Scheunert U,Cramer H,Polychronopoulos A,et al. Multi-sensor data fusion for object detection: Challenges and benefit[J]. Journal Ingegneria Automotoristica, 2002(55):301-307.
- [7] 安鹏,邵贝贝,张健. 基于四重化冗余技术的高可信性计算平台设计[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2009,49(11):1737-1740. (AN Peng,SHAO Beibei,ZHANG Jian. High reliability computer platform using quadruple modular redundancy[J]. Journal of Tsinghua University Science and Technology, 2009,49(11):1737-1740.)
- [8] Mehra R,Seereeram S,Bayard D. Adaptive Kalman Filtering, Failure Detection and Identification for Spacecraft Attitude Estimation[C]// 4th IEEE Conference on Control Applications. Albany:[s.n.], 1995:176-181.

作者简介:



朱 弘(1974-),男,安徽安庆人,硕士,主要研究方向为地面、机载雷达监控、浮空器控制.email:cetczh@163.com.

谭剑波(1968-),男,重庆人,研究员,主要研究方向为地面雷达、机载、球载、飞艇等控制系统.