

文章编号: 1673-9965(2011)04-382-05

吊舱环控系统的多级流模型故障诊断技术研究*

刘仲宇, 田素林, 李明

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 针对电子设备吊舱环控系统设备间故障耦合的问题, 研究了基于多级流模型的故障诊断技术, 建立了吊舱环控系统的多级流模型, 分析了基于该模型的故障诊断算法和诊断过程, 开发了吊舱环控故障诊断系统, 结合故障实例, 对诊断技术进行了验证. 研究表明: 多级流模型的图形化建模方法, 简单的诊断逻辑, 使得它具有诊断结果明了和诊断效率高的优点, 基于 MFM 的故障诊断技术能高效地对吊舱环控系统进行故障诊断.

关键词: 故障诊断; 多级流模型; 吊舱; 环控系统

中图分类号: T J85 **文献标志码:** A

现代军用飞机为提高战斗力, 越来越多地装备电子设备吊舱. 为保证吊舱能在恶劣的情况下可靠地运行, 同时具有通用性和灵活性, 必须在吊舱中装备独立的环控系统^[1]. 随着吊舱系统性能的提高, 环控系统也变得越来越复杂, 一旦发生故障, 则直接影响打击的准确度, 从而任务失效, 造成经济损失, 甚至带来人员伤亡. 因此, 对吊舱环控系统的实时故障诊断显得十分的必要.

多级流模型^[2] (Multilevel Flow Models, MFM) 由丹麦学者 Morten Lind 首先提出, 已成功用于复杂系统的故障诊断, 如瑞典核电厂、液态食物供应系统 (Steritherm 系统^[3]) 及用于手术后重症监护患者的监测与诊断系统 (Guardian 系统^[4]). MFM 建模方法从物质流、能量流、信息流的角度对物理系统进行抽象而建立模型, 通过一些特定的功能节点属性及诊断规则进行故障诊断. 它作为一种功能模型, 相比面向事件的模型显得更简单, 使其在实时性要求很高的故障诊断中具有独特的优势.

文中将基于 MFM 的故障诊断技术应用到吊舱环控系统中, 建立了吊舱环控系统的多级流模型

故障诊断系统, 并结合在研的吊舱项目, 进行了实例分析. 将基于 MFM 的故障诊断技术引入到吊舱的环控系统中, 对于促进吊舱环控系统故障诊断技术的发展, 提升电子设备吊舱的战场生存能力具有重要的意义.

1 多级流模型的符号描述

多级流模型是一种基于目标和功能以及相互关系的图形化模型, 它从物质流、能量流、信息流的角度抽象物理系统, 使用一些特定的图形符号来描述系统的目标、功能、设备元件以及之间的相互关系^[5]. 多级流模型主要功能节点符号及之间的关系如图 1~2 所示. 目标是建模思想的基础, 是系统各部分功能的实现; 功能是在目标获得的过程中, 系统所具有的一种角色, 它由许多个功能节点组成; 设备元件, 是组成系统的实体要素. 在多级流模型建立过程中, “流” 是建模的主线, 系统中的各单元通过“流” 结构以一定的关系而相互联系, 从而形成一定的因果依赖关系. MFM 建模方法根据目标建模的思想, 把系统的流程结构转化为图形语言, 利于图形语言直观方便的查询特性和简单明了的诊

* 收稿日期: 2011-03-10

基金资助: 国家“863”项目 (2008AA121803); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助项目 (2009CB72400607)

作者简介: 刘仲宇 (1982-), 男, 长春光学精密机械与物理研究所研究实习员, 主要研究方向为光电载荷平台结构设计.

E-mail: ross.liuzhongyu@gmail.com

断算法,使诊断过程具有更高的效率和实时性.

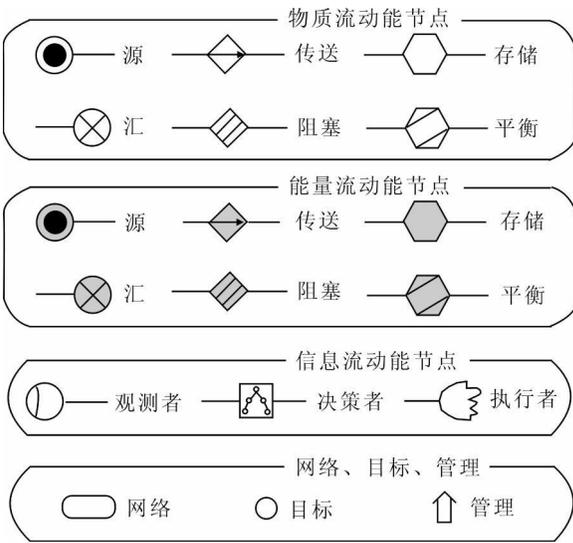
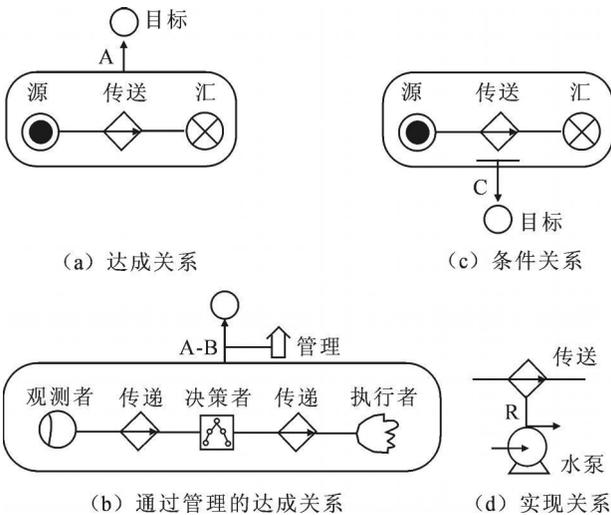


图 1 多级流模型主要功能节点的图形描述

Fig. 1 The symbols for MFM flow functions



(b) 通过管理的达成关系

(d) 实现关系

图 2 多级流模型功能节点间的关系属性

Fig. 2 The relations of MFM flow functions

2 吊舱环控系统的多级流建模

吊舱环控系统的核心是制冷系统,它以热工转换为手段,将电子设备的热载荷通过空气循环系统带到舱外的大气中.这里以逆升压回冷式冲压空气循环制冷的吊舱环控系统^[6]为例,分析其热工循环过程,建立吊舱环控系统的多级流模型.

系统的工作原理如图 3 所示.冲压空气通过进气道进入系统,首先流经温度传感器进行判断.当外界环境温度较低时,电动阀打开,冲压空气不通过制冷涡轮而直接流向电子设备.这样的流路

会使吊舱内空气压力高于吊舱外部环境压力,因此单向阀打开,冲压空气在吸收了电子设备的热量后通过单向阀直接排出舱外.当外界环境温度较高时,系统以空气循环方式工作,此时电动阀关闭,由进气道流入的冲压空气经回冷器冷却降温后,进入冷却涡轮中膨胀降温,涡轮出口的低温空气流入电子设备舱对各种设备进行冷却,带走热负荷的空气,再经回冷器冷却进气口的冲压空气,最后经由涡轮带动的压气机增压至适当值排出吊舱外.在充分认识逆升压回冷式空气循环制冷的吊舱环控系统工作原理的基础上,对该系统的热流传递过程进行抽象,建立多级流模型,具体的模型结构如图 4 所示.

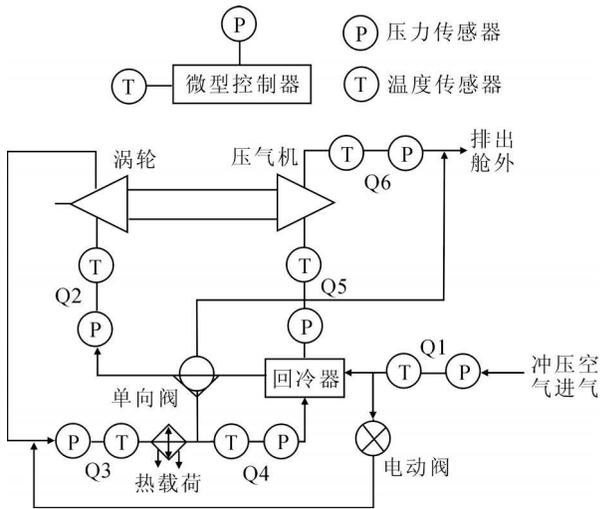


图 3 某吊舱环控系统工作原理图

Fig. 3 Principle of the environment control system of the pod

吊舱环控系统的最高目标是冷却设备的热负荷 G1. 它的实现是由能量流 E1 通过热流交换完成的.此目标包括了一个下一级子目标 G2 保持空气循环交换, G2 是能量流 E1 能够循环的条件,由物质流 M1 实现.子目标 G2 又包括了下一级子目标 G3 系统控制, G3 是由信息流 I1 实现的,它是物质流 M1 不同流循环控制选择的条件.

该系统的最高目标主要是由能量流 E1、物质流 M1、信息流 I1 以及之间的因果依赖关系来支撑实现.能量流 E1 由下面的功能节点组成:来自电子设备的热量,被低温气体所带走,如果此时的气体压力比外界的空气压力大,则单向阀打开,低温气体直接排出舱外.如果此时的气体压力比外界的空气压力小,则单向阀关闭,低温气体流经回冷器

冷却入口的冲压空气后,再经过压气机升压到足够的压力,然后排出舱外.物质流 M1 由下面的功能节点组成:冲压空气从进气道进入循环系统,如果此时的空气温度足够低,则电磁阀节点打开,冲压空气直接对热负荷节点进行冷却,如果温度过高,则电磁阀节点关闭,冲压空气经回冷器节点冷却后,进入涡轮进一步降温,涡轮出口的低温空气

对热负荷节点进行冷却.流过热负荷的气体如果压力足够高,则经单向阀节点排出舱外,如果气压不足,则经由回冷器节点,再经压气机节点升压后排出舱外.信息流 I1 是对传感器信号处理以便对阀体控制及基于传感器信号进行故障诊断的信息反馈过程.

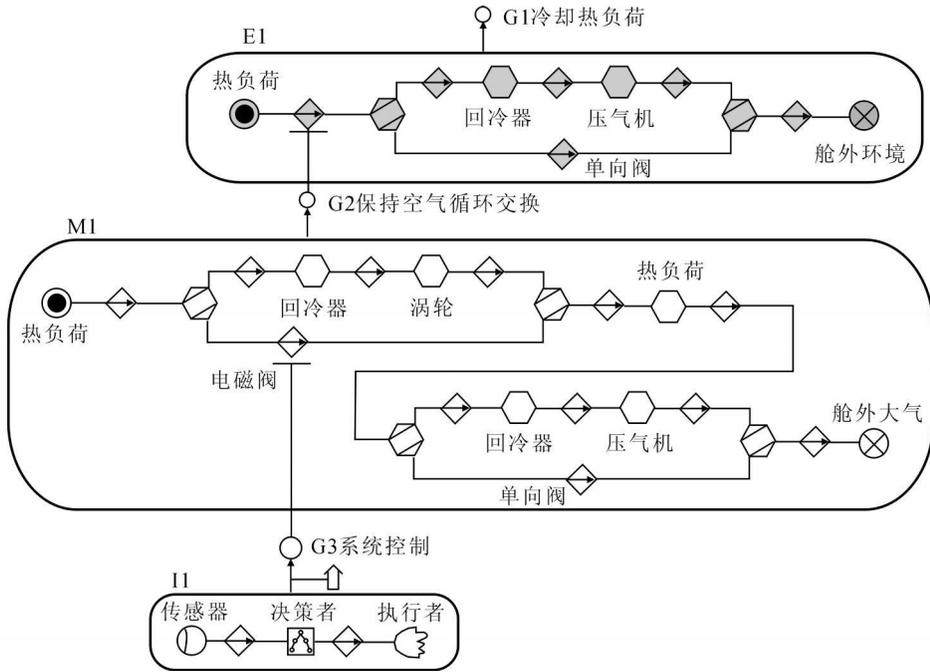


图4 某吊舱环控系统的多级流模型

Fig.4 MFM model of the environment control system of the pod

3 多级流模型故障诊断

3.1 故障警报分析与诊断算法规则

故障警报分析与诊断算法通过传感器状态获得数据,利用一系列的警报状态识别根源警报,从而定位出故障的根源,找出发生故障的元件^[7].结合前一节建立的多级流模型,以一个实例说明故障警报分析与诊断算法规则.如图5所示,源节点 F1 与传送节点 F2 相连接,实际的物理原型相对应入口的冲击空气与电磁阀.

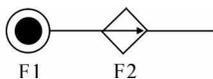


图5 源节点与传送节点

Fig.5 Source function and transport function

针对两节点出现的警报状态进行分析与讨论

如下:

1) 如果源节点的气体容量 F_{cap} 低于期望值,即压力传感器显示入口压力过低,源节点发生低压警报,则传送节点将不能得到足够的流量,这会使其流量 F_t 处于低流量状态,即流过电磁阀的气体流量计值变小.这意味着源节点的低容量警报会导致与其相连接的传送节点的低流量警报.同理,源节点的高容量警报则会导致传送节点的高流量警报.

2) 如果某处发生故障(比如电磁阀下游管道泄露),传送节点的流量值高于其上边界值,则传送节点发生高流量警报.此时,源节点的气压会降低,发生低容量警报.这说明传送节点的高流量的警报会导致与其连接的源节点的低容量警报.相反,如果传送节点的低流量警报(如管道阻塞),会使入口气体增多,冲压空气压力变大,带来高容量警报.

通过上面的分析,可以总结诊断规则如下:

1) 源节点发生故障,它的低容量警报将会导

致与之连接的传送节点的低流量警报;它的高容量警报将会导致与之连接的传送节点的高流量警报.

2) 传送节点发生故障.它的高流量警报将会导致与之连接的源节点的低容量警报.它的低流量警报将会导致与之连接的源节点的高容量警报.

根据以上规则,如果已知源与传送节点的警报状态,即可诊断出根源警报,从而找出发生故障的设备元件.以上诊断规则推广到所有流功能节点,即可得到所有功能节点的诊断规则^[5].

3.2 吊舱环控系统的故障诊断流程

在已建立的吊舱环控系统 MFM 的基础上,对吊舱环控系统进行故障诊断分析.吊舱环控系统故障诊断流程如下:系统循环读入吊舱各传感器的监测数据,并根据数据库中边界值确定各节点的状态,一旦某节点状态超出边界值,则发生警报.然后通过使用故障警报分析与诊断算法,找出根源警报点.故障警报分析与诊断算法具体诊断过程是:首先找出顶层流结构最左边的警报节点,判断其状态是否与其子目标状态一致?如果状态一致,那么则跳入到子目标的流结构中,找出其最左边的警报节点;如果状态不一致,那么利用诊断规则,判断是否与其他的节点警报状态一致?如果状态一致,则说明此节点是根源警报;如果状态不一致,则对与其连接的下一节点进行诊断分析,一直判断找到某节点警报状态能使整个流结构状态一致为止.最后通过实现关系,找到故障发生的设备元件.关于状态冲突的定义,参见文献[6]的具体规则.

4 系统设计及实例分析

4.1 系统设计

文中在基于 MFM 的故障诊断系统框架^[6]的基础上开发吊舱环控故障诊断系统.系统框架采用 Microsoft.NET 作为程序运行平台,C# 作为主要开发语言,使用 Microsoft SQL Server2000 作为数据库工具.系统运行的主界面如图 6 所示.

图 6 中各个节点通过一定的语法关系联系在一起,每个节点的状态值范围保存在数据库之中,当传感器测得的数据超过状态值的范围时发生警报,之后在发生的警报中,通过故障警报与分析算法,诊断出根源警报.

4.2 应用实例分析

为了对系统模型进行验证,文中以某吊舱环控

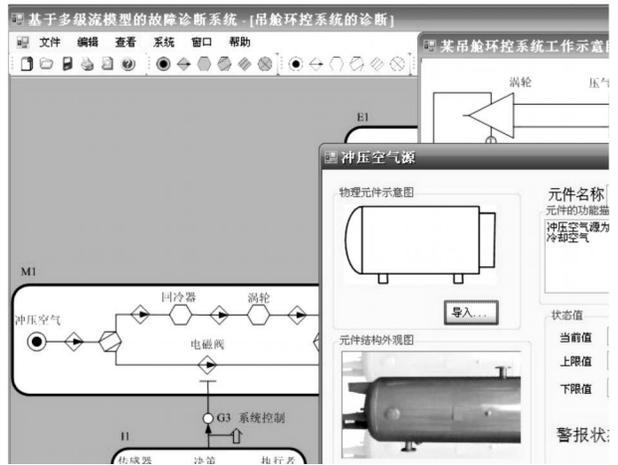


图 6 系统运行主界面

Fig. 6 The main interface of system operation

系统的涡轮出口管道泄漏事故数据,进行多级流故障诊断分析.环控系统传感器的布置如前节图 3 所示,每个测试点除压力传感器和温度传感外,还布置了气体流量传感器.各测试点的故障警报状态见表 1.在诊断系统中所对应的功能节点如图 7 所示.其中发生高流量警报的节点变成黄色,发生低流量警报节点变成蓝色,根源警报节点变成红色.

表 1 测试点警报状态

Tab. 1 Alarm state of the test point

测试点	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
状态	高	高	低	低	低	低

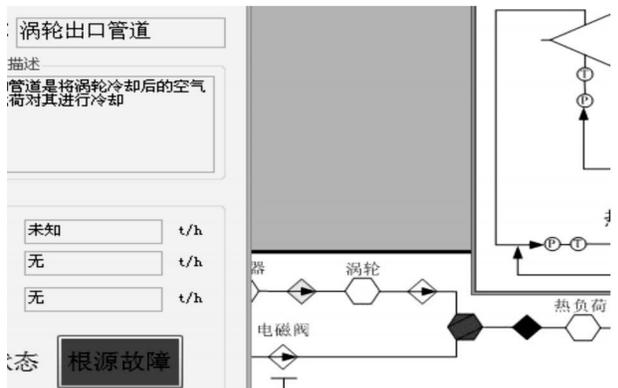


图 7 吊舱环控系统故障诊断实例分析

Fig. 7 Example of fault diagnosis of the environmental control system

利用故障警报与分析算法规则对系统诊断的结果进行验证.从最左边源节点所对应的冲压空气进气口的高流量警报开始分析,如果它是根源警报,那么根据“源节点的高流量警报将会导致与之连接的传送节点的高流量警报”.依次根据规则推

理下去,那么 Q3 所测得的也应是高流流量警报,这与已知冲突,所以说冲压空气进气口不是故障根源.依次这样分析下去,发现只有当涡轮出口处管道故障,因为它对应平衡节点,根据诊断规则“平衡节点的泄漏将会导致与它的输出端相连的传送节点的低流量警报,与它的输入端相连的传送节点的高流量警报^[6]”.这符合测试点的警报状态.由此可以推出涡轮出口处发生故障.这与系统的诊断结果及实际的故障情况是相符的.

5 结论

针对吊舱环控系统设备实时故障诊断问题,进行了基于 MFM 吊舱环控系统故障诊断技术研究.在分析环控系统空气循环过程基础上,建立了吊舱环控系统的多级流模型.

根据多级流故障警报分析与诊断的算法规则,提出了吊舱环控系统的故障诊断流程,并进行了系统设计及实例验证.

结果表明,基于 MFM 的故障诊断技术能够有效地从系统的角度,对吊舱环控制冷循环进程的设备进行故障诊断.由于多级流模型的图形化的表达方法,简单的诊断逻辑,使得它具有诊断结果的易理解性和诊断效率高的优点.

参考文献:

[1] 张铁军,王李宁.某机载雷达模拟吊舱结构设计[J].电子机械工程,2010,26(1):25.

ZHANG Tie-jun, WANG Li-ning. Structural Design of an Airborne Radar Simulation Pod[J]. Electro-mechanical Engineering, 2010, 26(1): 25 (in Chinese)

- [2] Lind M. Representing Goals and Functions of Complex Systems: An Introduction to Multilevel Flow Modelling[D]. Lyngby, Copenhagen: Institute of Automatic Control Systems. Technical University of Denmark, 1990.
- [3] Larsson J E. Diagnostic Reasoning Based on Means-end Models: Experiences and Future Prospects [J]. Knowledge-Based Systems, 2002, 15(1/2): 103.
- [4] Hayes-Roth B. Guardian: An Experimental System for Intelligent ICU Monitoring[J]. Proc Annu Symp Comput Appl Med Care, 1994, 1004
- [5] 刘仲宇. 基于多级流模型的故障诊断技术研究[D]. 杭州: 浙江大学机械能源系, 2008.
- LIU Zhong-yu. Research on Fault Diagnosis Base on Multilevel Flow Models[D]. Hangzhou: Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [6] 余建祖, 钱翼稷. 电子设备吊舱冲压空气驱动的环境控制系统研制[J]. 航空学报, 1997, 18(01): 99.
- YU Jian-zu, QIAN Yi-ji. The Development of Aram Air Driven Environmental Control System For Avionics Pods[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 1997, 18(01): 99. (in Chinese)
- [7] Ohman B. Discrete Sensor Validation with Multilevel Flow Models[J]. Intelligent Systems, 2002, 17(3): 55.

MFM-Based Diagnostic Technology for the Pod's Environment Control System

LIU Zhong-yu, TIAN Su-lin, LI Ming

(Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to solve the problem that the failures of the pod's equipments of the environment control system are coupling, the fault diagnosis of the environment control system based on multilevel flow models(MFM) is studied. An MFM of the environment control system of the pod is built, the fault diagnosis algorithm and diagnostic process are given and the fault diagnosis system is designed. The alarm analysis and fault diagnosis based on MFM are validated in a real case. The results show that MFM, with the feature of graphic modeling and simple diagnostic logic, has obvious advantages in the real-time fault diagnosis for the environment control system.

Key words: fault diagnosis; multilevel flow models(MFM); environment control system; pod

(责任编辑、校对 张立新)