

旋翼飞行机器人故障诊断与容错控制技术综述

齐俊桐^{1,2}, 韩建达¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 对故障诊断和容错技术的发展过程进行了简要概述, 以旋翼飞行机器人为研究对象, 在分析了旋翼飞行机器人故障诊断与容错控制特点的基础上, 介绍了当前国内外在该领域的研究进展和主要方法. 最后, 总结了该领域待解决的难点问题, 并指出了该研究领域的发展趋势.

关键词: 旋翼飞行机器人; 故障检测; 故障诊断; 容错控制

中图分类号: TP302.8 文献标识码: A 文章编号: 1673-4785(2007)02-0031-09

Fault diagnosis and fault-tolerant control
of rotorcraft flying robots : a survey

QI Jun-tong^{1,2}, HAN Jian-da¹

(1. Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract : In this paper, a survey of fault detection and diagnosis (FDD) and fault-tolerant control (FTC) technology for rotorcraft flying robots (RFRs) is presented. The present status of fault diagnosis and fault-tolerant technology is introduced based on analysis of some main features of this technology for RFRs. Research progress and significant approaches for FDD and FTC of RFRs are summarized. Finally, the main difficulties, challenges and future development in this research field are presented.

Keywords : rotorcraft flying robots; fault detection; fault diagnosis; fault-tolerant control

飞行机器人随着自主控制技术的发展, 已经开始在世界各地展开了广泛的研究. 旋翼飞行机器人更具有固定翼飞行机器人所不具备的很多优势, 具有独特的飞行性能和使用价值. 其无人员伤亡、体积小、造价低、战场生存能力强; 在军用方面, 旋翼飞行机器人既能执行各种非杀伤性任务, 又能执行各种软硬杀伤性任务, 包括侦察、监视、目标截获、诱饵、攻击、通信中继等; 在民用方面, 旋翼飞行机器人在航拍、大气监测、交通监控、资源勘探、电力巡检、森林防火、农业等方面具有广泛的应用前景. 因此旋翼飞行机器人的研制对我国的军事以及民用领域都具有重大的意义.

旋翼飞行机器人是一种稳定性差、不易控制的飞行器, 具有多变量、非线性耦合、柔性结构等多种动力学特性^[1], 在飞行过程中会遇到风扰、发动机振

动等多种扰动, 其机械部件和控制系统极易出现故障. 如果故障不能被有效检测出来或者在有限的控制周期内没有及时对控制器进行处理, 旋翼飞行机器人就会因其静不稳定的特点失去控制, 导致重大的损失甚至地面人员伤亡. 由此, 对于旋翼飞行机器人的故障诊断与容错控制技术的研究就成为了提高其安全性和可靠性的迫切研究任务. 美国国防部的报告^[2]就曾指出“提高无人机的可靠性是当前以至今后确保他们成功的最重要因素”, 强调了自修复的智能飞行系统是整个先进飞行机器人自主控制的关键一步.

所谓容错控制系统, 就是具有冗余能力的控制系统, 即在某些部件发生故障的情况下, 系统仍能按原定性能指标或性能指标略有降低、安全地完成任任务. 控制系统的故障诊断技术既是一门独立发展的技术, 也是容错控制重要支柱之一, 国内外主要的故障诊断方法有基于知识的方法、基于解析模型的方法

收稿日期: 2006-10-19.
基金项目: 863 国家高技术研究发展计划资助项目 (2003AA421020).

法以及基于信号处理的方法;而容错控制方法包括被动容错控制和主动容错控制^[3-5]。本文将重点对旋翼飞行机器人故障诊断及容错控制技术发展进行综述。

1 故障诊断与容错控制的发展历史

容错控制(fault-tolerant control, FTC)的思想最早可以追溯到1971年,以Niederlinski^[6]提出完整性控制(integral control)的新概念为标志;Siljak^[7]于1980年发表的关于可靠镇定的文章是最早开始专门研究容错控制的文章之一。“容错”原是计算机系统设计技术中的一个概念^[8],容错是容忍故障的简称。而容错控制这一概念是1986年9月由美国国家科学基金会和美国电气和电子工程师学会(IEEE)控制系统学会共同在美国加州桑塔卡拉拉大学举行的控制界讨论会的报告中正式提出的,与会的有全世界最著名的52位控制理论与应用专家。他们在报告中将多变量鲁棒、自适应和容错控制列为当今和未来7个富有挑战性的研究课题^[9],并预言容错控制将很快在飞行控制中得到应用。后来这份报告以集体的名义发表在IEEE Trans. on Automatic Control上。然而,直到1993年,国际上才出现了由现任IFAC技术过程的故障诊断与安全性专业委员会主席Patton教授所撰写的容错控制的综述文章^[10-11]。

动态系统的故障检测与诊断(fault detection and diagnosis, FDD)是容错控制的重要支撑技术之一。FDD技术的发展已大大超前于容错控制的发展,其理论与应用成果也远远多于容错控制方面的成果。目前国际上每年发表的有关FDD方面的论文与报告在数千篇以上。基于解析冗余的故障诊断技术被公认为起源于Beard^[12]在1971年发表的博士论文。1976年,Willsky^[13]在Automatica上发表了第一篇有关FDD方面的综述性质文章。Himmelblau^[14]于1978年出版了国际上第一本FDD方面的学术著作。随后报导的这方面的重要综述文章与著作参见文献[15-21]。

容错控制发展至今只有20年左右的历史,因此这是一门新兴交叉学科。促使这门学科迅速发展的一个最重要的动力来源于航空航天领域。美国空军从20世纪70年代起就不断投入巨资支持容错控制的发展,力求开发出具有高度容错能力的战斗机,甚至在多个翼面受损时,也能保持战斗机的生存能

力^[22]。作为一门交叉学科,容错控制与鲁棒控制、故障检测与诊断、自适应控制、智能控制等有密切的联系。从目前发展来看,控制系统的故障诊断和容错控制有着密切的联系,故障诊断是容错控制的基础和准备,容错控制为故障诊断的研究带来了新的活力,这2个方面也都成为了引人入胜的研究热点。

早期故障诊断技术已广泛应用于工业过程传感器与执行器的故障检测,后来故障检测技术也成功应用于固定翼飞机^[23-25]、倾转桨旋翼机^[26]、地面移动机器人^[35]以及水下机器人^[27],但对于旋翼飞行机器人的应用还很少^[28]。

2 旋翼飞行机器人故障诊断与容错控制的特点

旋翼飞行机器人超视距的自主飞行能力大大拓展了其应用范围,但当其置身未建模环境条件时,由于环境的不确定性以及人类的不可干预性,使其故障发生的机率明显增大,而旋翼飞行机器人自身复杂模型非线性、强耦合、不确定性等特点突出,又使得故障诊断与容错控制的研究具有很大难度。

2.1 旋翼飞行机器人的故障分类及故障模型

旋翼飞行机器人的主要故障类型包括传感器故障和执行器故障:其中传感器故障主要分为以下几类^[29]:

1) 传感器完全故障:这是一种灾难性的故障,传感器在某一时刻后停止工作并输出零或者常值。这种故障类型的原因是供电或通信问题。

2) 常数偏差传感器故障:传感器在某一时刻其输出带有常数偏差,其后输出保持常值。

3) 漂移/加性传感器故障:这是模拟信号传感器最常见的问题之一,由于内部温度的变化或者校准的问题,传感器输出具有一个附加的常数项。

4) 乘性传感器故障:这种类型的故障一般是由于传感器的标准输出后增加了乘数因子。

5) 离群数据传感器故障:这种故障一般出现在GPS等传感器上,某一时刻得到一个较大的误差点,而后的输出又是正确的,是一种暂时的故障。

传感器故障可有如下数学表示形式^[22]:

传感器恒值输出: $y_{out} = i$, i 为某一常数。

传感器恒值增益变化: $y_{out} = i y_{in}$, i 为恒增益变化的比例系数。

传感器恒偏差失效: $y_{out} = y_{in} + i$, i 为常数。

以上各种传感器故障形式可以统一表达为以下

形式:

$$y_{iout} = i y_{iin} + i.$$

旋翼飞行机器人执行器故障主要有舵面卡死、舵面缺损以及舵面松浮故障,其中舵面卡死和舵面损失故障可以对应于执行器的恒值故障与执行器卡死故障;舵面松浮故障一般指舵面处于不受控状态,就像风标一样随飞行器姿态的变化自由漂浮;松浮故障可以等效为执行器卡死在零度或执行器增益为零的故障,这几种故障的模型如下^[22]:

执行器卡死: $y_{iout} = i$, i 为某一常数.

执行器恒增益变化: $y_{iout} = i y_{iin}$, i 为恒增益变化的比例系数.

执行器恒偏差失效: $y_{iout} = y_{iin} + i$, i 为常数.

以上各种执行器故障形式可以统一表达为以下的形式:

$$y_{iout} = i y_{iin} + i.$$

Drozeski 等人^[30]考虑了饱和界,给出了另一种执行器故障模型:

$$= \max[\min(k y_{iin} + b, s_{\max}), s_{\min}].$$

式中,故障对执行器的影响因子为 k : $0 \leq k \leq 1$, 偏差为 b , 饱和界为 s_{\min} 和 s_{\max} .

2.2 旋翼飞行机器人故障诊断与容错控制的特点

旋翼飞行机器人其体积小、重量轻、结构紧凑的特点决定了其有限的挂载能力,而集多传感器、多执行器、复杂接口的控制系统于一身,再加上发动机飞行过程中 20 Hz 左右的强烈振动很难保证飞行过程中不出任何问题.由于旋翼飞行器不具有固定翼飞机或飞艇所具有的优良的降阶特性,自旋翼飞行机器人开展研究以来,在飞行试验过程中的控制系统本身的故障率很高,大大影响了飞行试验的进行.旋翼飞行机器人的故障诊断与容错控制具有如下显著特点:建模难度大、机载资源少、人工干预能力有限、故障范围大、故障潜在危害大.

旋翼飞行机器人除了刚体动力学模型外还有旋翼动力学、尾桨动力学模型、水平安定面和垂直尾翼等共同构成完整的直升机对象特性,如果用数学表示则至少需要 27 阶^[31],还不包括发动机及传感器特性,在理论上精确建立飞行动力学数学模型目前尚未解决,再加上环境的复杂性、带噪声的传感器信息、不精确的执行机构^[32]以及与环境交互的不确定性导致建模难度大^[33].

机载计算机配置、能源与燃料的供给都是涉及故障诊断算法和容错技术需要考虑的限制因素,机

载系统计算能力有限、存储空间小、通讯带宽低^[34],这些都需要其故障诊断与容错控制方法要简明有效,防止过分复杂导致正常运行模式的软件可靠性的下降.

超视距自主飞行能力是旋翼飞行机器人的主要飞行模式,由于远距离通讯的时延以及不可靠性,导致人工干预有限、慢速、不可靠或不可能^[35],这就要求其必须能在未建模环境下具有自诊断以及自修复能力.

旋翼飞行机器人是一个多传感器、多执行器无硬件冗余的复杂系统,即使其中的一个微小故障,有时也会使整个系统无法完成预先任务,甚至飞机失控坠落.

3 旋翼飞行机器人故障诊断与容错控制的主要方法

旋翼飞行机器人的故障诊断和容错技术是随着其飞行任务扩展、飞行稳定性提高以及工作半径增大等要求而发展起来的.故障检测与诊断是容错控制的重要支撑技术之一,也是容错控制研究最重要的组成部分.目前应用于旋翼飞行机器人故障检测与诊断的方法主要可以分为以下几种:基于知识的方法、基于解析模型的方法和基于信号处理的方法.

3.1 基于知识的方法

旋翼飞行机器人其体积小、重量轻、结构紧凑的特点决定了其有限的挂载能力,而集多传感器、多执行器、复杂接口的控制系统于一身,再加上发动机飞行过程中 20 Hz 左右的强烈振动很难保证飞行过程中不出任何问题.由于旋翼飞行器不具有固定翼飞机或飞艇所具有的优良的降阶特性,自旋翼飞行机器人开展研究以来,在飞行试验过程中的控制系统本身的故障出现率很高,大大影响了飞行试验的进行.旋翼飞行机器人的故障诊断与容错控制具有如下显著特点:建模难度大、机载资源少、人工干预能力有限、故障范围大、故障潜在危害大.

基于知识的故障诊断方法引入了诊断对象多方面的信息,特别是可以充分利用领域专家的诊断知识,避免了对精确数学模型的过分依赖,是一种非常适合离线系统的诊断方法.

神经网络这种基于知识的故障诊断方法被用于飞行器上,并进行了试验验证^[36].Napolitano 等^[23]提出了将基于神经网络故障诊断方法应用于波音 B737 的传感器有效性检测上,使用在线学习神经网络

络估计器,通过反向传播算法对多层前馈神经网络进行训练.整个故障检测策略包括一个主神经网络(MNN)和 n 个分散的神经网络(DNNs),其中 n 为无硬件冗余的飞行控制系统传感器个数. MNN 的输出是通过 k 时刻 n 个传感器从 $k-1$ 时刻到 $k-m$ 时刻的测量值估计的参数,这些参数与 k 时刻的实际测量值相比较;DNNs 中的第 i 个输出是第 i 个传感器测量值的估计值,当 MNN 的二次估计误差(MQEE)超过了预定的界限,则系统认为某一传感器可能或已经发生故障,此时 DNN 停止训练,此时如果其中一个 DNN 的二次估计误差(DQEE)超过预定界限,则可以确定有故障的传感器.

$$MQEE(k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\text{Num. of DNNs}} (Y_i(k) - O_{i,MNN}(k))^2,$$

$$DQEE(k) = \frac{1}{2} (x(k) - \hat{x}(k)).$$

当传感器发生阶跃类型的故障时,无论偏差的大小,通过 MQEE 的峰值都可以检测到.但当其故障类型为如斜坡类型的“软”故障时, MQEE 的诊断可靠性就大大降低了.因此, Napolitano 等人^[24]提出了神经网络输出二次估计误差(OQEE)标准,试验证明此标准对于任意传感器故障都能够保证较好检测性能.

$$MQEE(k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\text{Num. of DNNs}} (O_{i,MNN}(k) - Q_{i,DNN}(k))^2.$$

由于传感器故障与执行器故障在故障检测上存在耦合,对于执行器故障的研究以往都是在局限于假设传感器无故障的情况下进行的^[36].而 Napolitano 等人^[24]提出的改进的基于神经网络的传感器与执行器解耦故障检测方法,传感器的故障可以通过 MQEE 的大小确定,执行器的故障可以通过对飞机姿态的变化进行分析得到,再分析特定的互相关函数(cross-correlation functions)可以辨识相应故障的执行器.然而,机载飞控计算机计算能力有限,必须将 DNN 的更新频率降低至传感器测量频率以下,这就增加了训练时间. Narendra 等人^[37]针对飞行控制系统动力学模型学习的故障检测与诊断神经网络估计器学习速率进行了研究,得出了使用低训练速率(0.05)可以得到比较性优势.对于 Napolitano 等人的基于神经网络的故障检测方法, Nepach 等人^[38]又验证了其他优点,诸如这种方法可以同时处理多传感器非同时刻故障等等.

Rysdyk 等人^[39]将扩展自适应神经网络用于故障诊断,并通过 XV-15 倾转桨旋翼机试验验证了非

线性自适应控制器结构用于故障诊断的有效性.

在线训练的神经网络大大的占用了机载计算机资源,由此 Napolitano 等人^[40]又将 Kosko^[41]提出的基于模糊逻辑的故障诊断方法与基于神经网络的方法相比较,研究表明:在大部分飞行包络中,横向故障的诊断基于神经网络的方法性能要优于基于模糊逻辑的方法,而在纵向故障中情况则相反.

3.2 基于解析模型的方法

基于解析模型故障诊断方法是当前与今后主流方法之一,其思想就是利用现有的知识建立系统的数学模型,将系统的输入与输出同时传递给数学模型,利用一定的准则建立系统的残差,再按照一定的判定准则确定系统是否发生了故障及发生了什么故障和故障的大小.

基于观测器和参数估计的方法是故障诊断最常用的方法之一^[42],其基本思想是以测量值为基础,通过在确定性系统中采用 Luenberger 观测器或在随机性系统中采用卡尔曼滤波器估计系统的输出. Heredia 等人^[43]设计了基于 Luenberger 观测器留数产生方法的执行器故障诊断系统,随后 Heredia 等人^[29]又将此方法应用于无人直升机的传感器故障检测与诊断,并通过仿真以及飞行试验对此方法的有效性进行了验证,试验表明:此方法对于诸如零或者常值传感器输出的“硬”故障可以很容易地进行检测,而对于诸如加性或乘性的“软”故障则决定于误差的大小,如果误差太小,则系统不能将其与误差区分开来.飞行控制系统是具有系统噪声和测量噪声的随机性系统,将其作为确定性系统研究是一种简化假设,同时也将会带来故障诊断系统可靠性的降低.

卡尔曼滤波故障诊断方法是针对随机性系统的方法,已经应用于飞行控制系统传感器故障的检测与诊断. Bundick, Motyka 等人^[44-45]已经将基于卡尔曼滤波的在飞行控制系统中进行了成功应用,标准的卡尔曼滤波是针对线性系统的,对于非线性系统一般采用扩展卡尔曼滤波(EKF)或迭代扩展卡尔曼滤波(IEKF),这样与估计误差相关的代价函数(cost function)就必须进行线性化,而这种线性化会导致误差和次优估计. Haupt 等人^[46]提出了一种最优递归迭代算法,克服了上述问题.离散状态方程为

$$x_k = A_{k-1}x_{k-1} + B_{k-1}u_{k-1} + L_{k-1}w_{k-1},$$

$$y_k = C_k x_k + D_k u_k + v_k.$$

则通过 $k-1$ 时刻的测量输出预测的 k 时刻最优估计为

$$\hat{x}_k = A_{k-1} \hat{x}_{k-1} + B_{k-1} u_{k-1} + K_{ek-1} [y_{k-1} -$$

$$C_{k-1} \hat{x}_{k-1} - D_{k-1} u_{k-1}],$$

$$K_{ek-1} = A_{k-1} P_{k-1} C_{k-1}^T [R_{k-1} + C_{k-1} P_{k-1} C_{k-1}^T]^{-1},$$

$$P_k = L_{k-1} Q_{k-1} L_{k-1}^T + [A_{k-1} - K_{ek-1} C_{k-1}] P_{k-1} A_{k-1}^T.$$

式中: K_e 为估计增益, P 为估计误差协方差矩阵.

3.3 基于信号处理的方法

基于信号处理的诊断方法可以部分地回避建立诊断对象数学模型的难点,直接利用各类信号处理的方法,自适应能力强,从原理上既适用于线性系统,也适用于非线性系统.基于信号处理的方法是建立在对故障机理的透彻分析和研究基础之上,判断出测量信号的哪些特征能够最显著地反映出待诊断的故障.基于信号处理的方法一般包括基于小波变换的方法、信号的谱分析或相关性分析等方法.

小波变换技术是目前基于信号处理方法的一个研究热点,其由于同时具有时域和频域分析的特点,对于准确分析系统传感器的故障十分有利.利用小波变换进行故障诊断的基本思路是首先对被诊断对象的输入输出信号进行小波变换,利用该变换求出输入输出信号的奇异点,再去掉由于输入突变引起的极值点,则其余的极值点就对应于被诊断对象的故障状态.

Kriedland 等^[47]首先提出了利用小波展开来检测短时非平稳暂态信号的方法,但该方法对于固定的分析窗函数其时频分辨率是不变的,而且涉及矩阵运算.随后, Jee 等^[48]提出了利用小波变换的方法得到了对波行机到达时间未知的暂时信号的有效检测,然而其构造的小波检测器是基于广义似然比检测的,所做的估计是某级较好地反映信号特征的尺度下对小波系数的假设检验,实质上得到的仍然是信号在小波空间中的某种特征. Frisch 等人^[49]又利用小波变换的多分辨率性质,基于信号和随机噪声在小波变换域中不同的模极大值系数特征来对信号波形进行有效检测. Seungkeun 等人^[50]针对飞行控制系统,提出了基于离散小波变换的故障诊断方法,并应用到双硬件冗余的飞行机器人和低成本飞行器上,试验表明,这种基于非模型的故障诊断方法能够对系统故障进行有效的检测与诊断.

3.4 先进重构控制方法

先进重构控制方法不再依赖故障检测和诊断,使控制系统具有适应未知故障和损伤的能力,促进

了鲁棒控制、智能控制和自适应控制技术在容错领域的交叉和融合.

Brinker 等人^[51-52]针对飞行控制系统使用了基于神经网络的直接自适应控制方法,在出现故障后,神经网络具有稳定飞行的能力,在线神经网络增强了逆控制器的指令并自适应地抵消了逆误差,从而获得理想的闭环动力学特性. Calise 等人^[53]提出了在线神经网络加权了逆误差的基函数展开,以便在每个轴进行自适应控制.

Siwakosit 等^[54]将自适应定量反馈重构控制方法应用到了飞行控制,该方法将自适应滤波器与定量反馈补偿器串接,从而利用标定系统对象不确定性的固有鲁棒性,基于这种方法的控制器可以对显著的模型不确定性提供稳定性和性能鲁棒性,并且不需要对故障系统进行辨识,具有较强的使用价值.

Boskovic 等人^[55-56]在 1999 年将基于多模型的故障检测和诊断——自适应重构控制方法应用于飞行控制系统,这也是对严重机翼损伤下的鲁棒控制重构问题唯一可行的解决方案.该方法是基于一个有限集就可以描述不同的损伤情况的假设为基础,针对每种故障模型设计相应的观测器,观测器并行运行以寻找最接近当前工作状态的模型,并切换到相应的控制器.6 自由度仿真结果^[55]表明该方法整体性能优越.

3.5 故障检测与容错控制结构

Drozeski 等人^[31]提出了一种容错控制结构,并将其应用于 GTMAX 旋翼飞行器,在不降低飞机性能的情况下处理多类型的传感器故障.这种容错控制结构采用 3 层结构:重构飞行控制器与基本飞行控制器处于底层,这一层按照预定的飞行轨迹产生给定的控制器输入;中层结构产生飞行器飞行轨迹以及管理系统的重构,当本层 FDD 检测到故障后,向所有层发送重构指令;高层为任务管理层,具有人机接口,操作者可以指定飞行路径点,旋翼飞行器可以按照路径点依次飞行.试验表明,这种容错控制结构在旋翼飞行器悬停状态下出现故障的情况下能够较好地保持稳定.

4 旋翼飞行器故障诊断与容错控制中存在的问题及发展方向

4.1 目前研究存在的问题

虽然对容错控制的研究已经有了 30 余年的历史,但针对对于旋翼飞行机器人的研究目前尚处于

起步阶段,仍存在很多问题,主要包括:异故障解耦、多故障同时诊断、综合诊断、鲁棒性、自适应性以及容错算法优化。

1) 异类故障解耦:一般对于故障诊断的研究,传感器与执行器是分开考虑的。研究传感器故障诊断的前提是假设执行器一直处于完好的状态,但实际过程这种假设就有很大的局限性。旋翼飞行机器人不同传感器的故障可通过故障分离找出,但传感器故障与执行器故障存在耦合,即它们发生故障后的故障分离输入相似,无法进行辨别。虽然基于神经网络的方法可以对此异类故障进行解耦,但对于斜坡类的“软”故障仍不理想,且未考虑传感器与执行器类故障外的其他类型。

2) 多故障实时诊断:目前各种传感器故障检测与诊断、容错控制器的设计一般都是在假定只有单个故障条件下发展起来的。然而,实际系统中常常有可能同时发生多个故障,损坏某个元件的同时很容易损坏周围的部件。旋翼飞行机器人飞行环境复杂,会受到风、电磁以及振动等多重扰动,可能对机载系统多元件同时造成影响,出现多故障的情况。基于逻辑模型的诊断方法虽然可以诊断多故障,但难以诊断瞬时故障,对旋翼飞行机器人并不适用。

3) 综合诊断:旋翼飞行机器人飞行中所处的未建模环境会导致其故障的复杂性,而现有的诊断方法又存在各自的局限性,单一使用一种诊断方法就完全解决机载系统的诊断问题几乎是不可能的。因此要对多种故障诊断方法进行研究,发挥各自优势,将它们有效地集成在一起,从而提高整个容错系统的综合性能。

4) 鲁棒性:旋翼飞行机器人在未建模环境中工作面临各种不确定性,包括系统模型的不确定性、环境的不确定性、传感器的不确定性等。故障诊断的鲁棒性问题多年来一直受到广泛关注,并且已经出现了一些增强故障诊断系统鲁棒性的方法,然而这些方法都有很大的局限性。目前对带有非结构化不确定性的系统的鲁棒故障诊断已经成为一个亟待解决的问题。

5) 自适应性:旋翼飞行机器人在飞行过程中存在悬停、前飞、升高等多种飞行模态,而不同的飞行模态所对应的系统模型差异很大,被诊断对象的状态会在运行过程中发生变化。这就要求诊断与容错系统具有一定的适应能力和学习能力,使得它能够对变化后的诊断对象仍能有效地诊断。因此增强诊

断与容错系统的自适应性就成为一个值得研究的问题。

6) 容错算法优化:旋翼飞行机器人作为非线性、欠驱动、静不稳定系统,是一个复杂的被控对象,要实现对其较好地稳定控制一般需要复杂的控制算法,这就占用了机载计算机的大量资源,留给容错控制算法的资源并不多,由此,对于旋翼飞行机器人这样的复杂被诊断系统,计算代价与诊断精度之间存在着很大的矛盾。

4.2 未来的发展趋势

旋翼飞行机器人的故障诊断与容错控制理论研究尚处于起步阶段,其目前所遇到问题的尽快解决,对提高其自主控制的可靠性至关重要。近几年,旋翼飞行机器人的故障诊断与容错控制的发展趋势主要有以下几个方面:

1) 与航天技术相近^[57],飞行控制需要系统进行整体优化,将结构设计与控制方案、控制系统设计以及容错控制有机结合,使得在满足系统的可靠性要求下,考虑资源约束及可利用的解析冗余度,确定最小硬件冗余度及进行各部件可靠度的合理分配。

2) 改进现有的诊断方法,克服误诊及漏诊现象,在提高容错控制的可靠性同时,进一步提高效率。

2) 从分析传感器故障、执行器故障等异类故障的特点出发,改进现有的故障诊断方法,研究对异类故障进行实时检测及诊断技术。

3) 现有的故障诊断与容错控制方法各具特点又存在各自的局限性,将基于知识的、基于解析模型的以及基于信号处理的多种诊断技术有机结合,建立多层体系的诊断与容错控制结构,提高其可靠性。

4) 将主动建模技术与容错技术结合,提高诊断与容错系统对被诊断系统的“认知”,增强系统鲁棒性。

5) 优化诊断与容错控制算法,在理论研究的同时密切联系实际计算能力的约束,发展简单、便于实现、计算实时性强、占用计算资源少、符合旋翼飞行机器人特点的故障诊断和容错控制方法。

5 结束语

随着科学技术的发展,国内外对于旋翼飞行机器人的相关研究已经取得了多项令人鼓舞的进展,也使人们认识到了其必然的发展方向以及广泛的应用前景,受到各国特别是发达国家的高度重视并制定了各种详细的发展规划。其故障诊断与容错控制

更是旋翼飞行器机器人应用领域发展的重要保障,但近期仍处于研究、试验与开发阶段.将更多控制或其他相关学科的研究成果引入,对于旋翼飞行器故障诊断与容错控制方法研究会产生新的思路、取得新的成果.

参考文献:

- [1]黄一敏. 直升飞机控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,1999.
HUANG Yimin. Research on helicopter technology of control [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1999.
- [2]Office of the Secretary of Defense. Unmanned Aerial Roadmap 2002 - 2027[R]. Washington, DC 20301: Office of the Secretary of Defense, 2002.
- [3]周东华,孙优贤. 控制系统的故障检测与诊断技术[M]. 北京:清华大学出版社,1994.
- [4]周东华,叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [5]胡昌华,许化龙. 控制系统故障诊断与容错控制的分析和设计[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [6]NIEDERLINSKI A. A heuristic approach to the design of interacting multivariable systems[J]. Automatica, 1971 (7): 691 - 701.
- [7]SALJAK D. Reliable control using multiple control system[J]. Int J Control, 1980(31): 303 - 329.
- [8]PIERCE W. Failure-tolerant computer design[M]. New York: Academic Press, 1965.
- [9]郑应平. 控制科学面临的挑战:专家意见综述[J]. 控制理论与应用, 1987, 4(3): 1 - 10.
ZHENG Yingping. The challenge of the control technology: the summarize of the experts[J]. Control Theory and Application, 1987, 4(3): 1 - 10.
- [10]PATTON R. Robustness issues in fault tolerant control [A]. Proc of International Conference on Fault Diagnosis[C]. France, Toulouse, 1993.
- [11]PATTON R. Fault-tolerant control: the 1997 situation [A]. Proc of IFAC/ IMACS symposium on Fault Detection and safety for Technical Process[C]. Hull, England, 1997.
- [12]BEARD R. Failure accommodation in linear systems through self-reorganization [D]. CAMBRIDGE: Man Vehicle Lab, MIT, 1971.
- [13]WILLSKY A. A survey of design methods for failure detection in dynamic systems [J]. Automatica, 1976 (12): 601 - 611.
- [14]HMMELBLAU D. Fault detection and diagnosis in chemical and petrochemical process[M]. Amsterdam: Elsevier Press, 1978.
- [15]GERTLER J J. Survey of model based failure detection and isolation in complex plants[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1988, 8(6): 3 - 11.
- [16]ISERNANN R. Process fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing: tutorial paper[J]. Automatica, 1993, 29(4): 815 - 835.
- [17]FRANK P. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey and some new results[J]. Automatica, 1990, 26(3): 459 - 474.
- [18]ISERNANN R. Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing: tutorial paper [J]. Automatica, 1993, 29(4): 815 - 835.
- [19]BASSEVILLE M. Detection of abrupt changes in signal and dynamic systems [M]. New York: Prentice Hall, 1989.
- [20]PATTON R. Fault diagnosis in dynamic systems[M]. New York: Prentice Hall, 1989.
- [21]ZHANG X. Auxiliary signal design in fault detection and diagnosis[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- [22]刘伟. 高生存力飞行控制系统的研究[D]. 西安:西北工业大学, 2003.
LIU Wei. Research on high survival ability flight control system[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003.
- [23]NAPOLITANO M, AN Y, SEANOR B, PISPISTOS S and MARTINELLI D. Application of a neural sensor validation scheme to actual Boeing B737 flight data[A]. Proc of the 99AIAA Guidance, Navigation and Control Conference[C]. [s.l.], 1999.
- [24]NAPOLITANO M, AN Y, SEANOR B. A fault tolerant flight control system for sensor and actuator failures using neural networks[J]. Aircraft Design, 2000(3): 103 - 128.
- [25]NAPOLITANO M, WINDON D, CASANOVA J. Kalman filters and neural-network schemes for sensor validation in flight control systems[J]. IEEE Trans on Control System Technology, 1998(6): 596 - 611.
- [26]RAGO C, PRASANTH R, MEHRA R, FORTENBAUH R. Failure detection and identification and fault tolerant control using the IMM KF with application to Eagle-Eye UAV[A]. Proc of the 37th Conf on Decision and Control[C]. Tampa, USA, 1999.
- [27]ALESSANDRI A, CACCIA M, VERUGGIO G. Fault detection of actuator faults in unmanned underwater vehicles[J]. Control Engineering Practice, 1999(7): 357 - 368.
- [28]HEREDIA G, REMUB V, OLLERO A, MAHTANI R, MUSIAL M. Actuator fault detection in autonomous helicopter [A]. Proc of the 5th IFAC/ EURON Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles [C]. Lisbon, Portugal, 2004.
- [29]HEREDIA G, OLLERO A, MAHTANI R, BEJAR

- M, REMUSS V, MUSIAL M. Detection of sensor faults in autonomous helicopters[A]. Proc of the International Conference on Robotics and Automation[C]. Barcelona, Spain, 2005.
- [30] DROZESKI G, SAHA G, VACHTSEVANOS G. A fault detection and reconfigurable control architecture for unmanned aerial vehicles [A]. Proc of the IEEE Conference on Aerospace[C]. Big Sky, USA, 2005.
- [31] 曾丽兰, 王道波, 郭才根, 黄向华. 无人驾驶直升机飞行控制技术综述[J]. 控制与决策, 2006, 21(4): 362 - 366.
- ZENG Lilan, WANG Daobo, GUO Caigen, HUANG Xianghua. Survey of flight control technology for unmanned helicopter[J]. Control and Decision, 2006, 21(4): 362 - 366.
- [32] LAMINE K, KABANZA F. History checking of temporal fuzzy logic formulas for monitoring behavior based mobile robots[A]. Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence [C]. Vancouver, Canada, 2000.
- [33] CARLSON J, MURPHY R, NELSON A. Follow-up analysis of mobile robot failures[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Cincinnati, USA, 1997.
- [34] QI Juntong, ZHAO Xingang, JIANG Zhe, HAN Jianda. Design and implement of a rotorcraft UAV testbed [A]. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics[C]. Kunming, China, 2006.
- [35] HUA D, XING C, XIA Y. Fault diagnosis and fault tolerant control for wheeled mobile robots under unknown environments: a survey [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Barcelona Spain, 2005.
- [36] NAPOLITANO N, NEPPACH C, CASDORPH V, INNOCENTIM, SILVESTRI G. A neural-network-based scheme for sensor failure detection, identification, and accommodation[J]. AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1995, 18(6): 474 - 482.
- [37] NAREND A K, PARTASARATHY K. Identification and control of dynamical systems using neural networks [J]. IEEE Trans Neural Networks, 1990.
- [38] NEPPACH C. Application of neural networks in sensor failure detection, identification, and accommodation in a system without sensor redundancy [D]. Morgantown: Dept Mech Aerospace Eng, West Virginia Univ, 1994.
- [39] RYSDYK R, CALISE A. Fault tolerant flight control via adaptive neural network augmentation [A]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit[C]. Boston USA: 1998.
- [40] NAPOLITANO M, CASANOVA J, INNOCENTI M. On-line learning neural and fuzzy logic controllers for actuator failure accommodation in flight control systems [A]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference[C]. [s.l.], 1997.
- [41] KOSKO B. Fuzzy Thinking: The New Science of Fuzzy Logic[M]. New York: Hyperion, 1997.
- [42] ISERMANN R, BALLE P. Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes[J]. Control Engineering Practice, 1997 (5): 709 - 719.
- [43] HEREDIA H G, REMUS V, OLLERO A, MAHTANI R, MUSIAL M. Actuator fault detection in autonomous helicopters[A]. Proc of the 5th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles[C]. Lisbon, 2004.
- [44] BUNDICK W, THOMAS A. A preliminary evaluation of a failure detection filter for detection and identifying control element failures in a transport aircraft [R]. NASA TM-87576.
- [45] MOTYKA P, BONNICE W, HALL S, WAGNER E. The evaluation of failure detection and isolation algorithms for restructurable control [R]. NASA CR-177983, 1985.
- [46] HAUPT G, KASDIN N, KEISER G, PARKINSON B. An optimal recursive iterative algorithm for discrete nonlinear least squares estimation[A]. Baltimore: 1995.
- [47] KRIEDLANDER, PORAT V. Detection of transient signals by gabor representation[J]. IEEE Trans on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1989, 37(2): 169 - 180.
- [48] JEE J, SUN Y. Multiscale corner detection by using wavelet transform[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1995, 4(1): 100 - 104.
- [49] FRISCH M, MESSER H. The use of the wavelet transform on the detection of an unknown transient signal[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1989, 38(2): 892 - 897.
- [50] SEUNGKEUN K, YODAN K, CHANGOOK P, INSUNG J. Hybrid fault detection and isolation techniques for aircraft inertial measurement sensors [A]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit[C]. Providence, 2004.
- [51] BRINKER J, WISE K. Flight testing of a reconfigurable flight control law on the X-36 tailless fighter aircraft [A]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit[C]. Denver, 2000.
- [52] BRINKER J, WISE K. Nonlinear simulation analysis of a tailless advanced fighter aircraft reconfigurable flight control law[A]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit[C]. Portland, 1999.
- [53] CALISE A, ANTHONY J. Development of a reconfigurable flight control law for the X-36 tailless fighter aircraft [A]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit[C]. Denver, 2000.
- [54] SIWA KOSIT W, HESS R. A reconfigurable scheme

for accommodating actuator failures in multi-input, multi-output flight control systems [A]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit [C]. Denver, 2000.

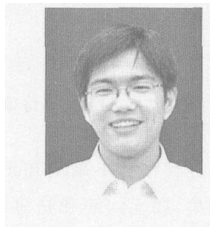
[55] BOSKOVIC J, LI S, MEHRA R. Evaluation of the properties of a multiple-model reconfigurable flight controller on a 6 DOF simulation [A]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit [C]. Denver, 2000.

[56] BOSKOVIC J, MEHRA R. Intelligent adaptive control of a tailless advanced fighter aircraft in the presence of wing damage [A]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit [C]. Portland, 1999.

[57] 邢 琰, 吴宏鑫, 王晓磊, 李智斌. 航天器故障诊断与容错控制技术综述 [J]. 宇航学报, 2003, 24 (3): 221 - 226.

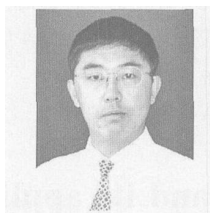
XING Yan, WU Hongxin, WANG Xiaolei, LI Zhibin. Survey of fault diagnosis and fault-tolerance control technology for spacecraft [J]. Journal of Astronautics, 2003, 24 (3): 221 - 226.

作者简介:



齐俊桐,男,1981 年生,博士研究生,主要研究方向为飞行器机器人自主控制、容错控制.

E-mail: qijt@sia.cn.



韩建达,男,1968 年生,研究员,博士生导师,《机器人》杂志副主编,主要研究方向为自主控制、机器人系统,在国内外期刊及会议发表文章 60 余篇.

E-mail: jdhan@sia.cn.

第四届亚太地区混沌控制与同步会议 The Fourth Asia-Pacific Workshop on Chaos Control and Synchronization

The Fourth Asia-Pacific Workshop on Chaos Control and Synchronization (APW-CCS) is organized by the Centre for Chaos and Complex Networks, City University of Hong Kong and Hong Kong Polytechnic University, co-organized by the China Institute of Atomic Energy and hosted by the Heilongjiang University, China.

The workshop is sponsored by the IEEE CAS (Circuits and Systems Society) and the IEEE CAS Non-linear Circuits and Systems Technical Committee.

The main purpose of this Workshop is to bring together some leading researchers and experts worldwide, especially those from the Asia-Pacific region, to further promote and develop the cutting-edge research on chaos control and synchronization theories and their engineering applications.

Main Topics:

Topics of interests include, but not limited to

- 1) Bifurcation analysis and control
- 2) Chaos analysis, control and anti-control
- 3) Chaos synchronization and anti-synchronization
- 4) Chaos-based encryption and digital communications
- 5) Chaotic neural networks, electronics, and systems
- 6) Control and synchronization of complex networks
- 7) Chaotic dynamics in complex networks

Important Deadlines:

15 May, 2007 Detailed abstract submission

15 June, 2007 Acceptance notification

15 July, 2007 Advanced registration and camera-ready paper in electronic form

Paper Submission:

Authors are invited to submit their papers or extended abstract electronically in pdf, ps or Word format to Prof. Yong Feng: yfeng@hit.edu.cn (oryong.feng@rmit.edu.au)