

航空宇航学院

013 系

014 系



目录

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
277	梁大开	正高	013	基于空心光纤的智能结构自诊断、自修复系统	航空维修与工程	2004.00.3
278	李东升 梁大开	博士后 正高	013 013	旋转反射镜式超声传感器的研究	压电与声光	2004.26.3
279	姚宗信 梁大开	博士 正高	013 013	基于加权模糊推理的分布式飞机大气数据专家系统	信息与控制	2004.33.1
280	姚宗信 梁大开	博士 正高	013 013	基于模糊逻辑的嵌入式飞机大气数据传感器测量位置优化设计	计量学报	2004.25.3
281	姚宗信 梁大开	博士 正高	013 013	一种基于 LISP 语言的加权模糊推理专家系统实现方法	小型微型计算机系统	2004.25.6
282	姚宗信 梁大开	博士 正高	013 013	基于神经网络的飞机极限数据专家系统	南京航空航天大学学报	2004.36.1
283	杨明 梁大开	博士 正高	013 013	复合材料结构损伤的属性理论综合评估	材料科学与工程学报	2004.22.5
284	杨明 梁大开	博士 正高	013 013	基于分形理论的智能材料结构的损伤诊断	压电与声光	2004.26.2
285	杨明 梁大开	博士 正高	013 013	多重分形的智能材料损伤诊断应用	兵器材料科学与工程	2004.27.2
286	潘晓文 梁大开	博士 正高	013 013	智能复合材料光纤传感层的研究	应用激光	2004.24.3
287	曾捷 梁大开	博士 正高	013 013	光纤表面等离子体波共振温度传感器的研究	中国激光	2004.31.7
288	万鹏飞 梁大开	硕士 正高	013 013	LabVIEW 在空心光纤自修复系统中的应用	压电与声光	2004.26.2
289	袁慎芳 黄睿 李向华 刘小会	正高 博士 博士 硕士	013 外地 013 013	Determination of internal strain in 3-D braided composites using optic fiber strain sensors	固体力学学报	2004.17.1
290	袁慎芳 徐颖娣 彭鸽	正高 硕士 博士	013 013 013	New developments in structural health monitoring based on diagnostic lamb wave	Journal of materials science & technology	2004.20.5
291	袁慎芳 黄睿 饶云江	正高 博士 博士	013 外地 外地	Internal strain measurement in 3D braided composites using co-braided optical fiber sensors	Journal of materials science & technology	2004.20.2
292	彭鸽 袁慎芳	博士 正高	013 013	Damage Localization on Two-Dimensional Structure Based on Wavelet Transform and Active Lamb Wave-Based Method	Proceedings of the 5 th Pacific Rim International Conference on Advanced materials and Processing	2004
293	彭鸽 袁慎芳	博士 正高	013 013	Damage Localization on two-dimensional Structure Based on Wavelet Transform and Lamb Wave	SPIE Proceedings, NDE for Health Monitoring and Diagnostics	2004
294	李向华 袁慎芳 王鑫伟 黄睿	博士 正高 正高 初级	013 013 013 外地	编入光纤后的 3-D 编织复合材料结构的力学建模	复合材料学报	2004.21.4
295	徐颖娣 袁慎芳 彭鸽	硕士 正高 博士	013 013 013	DISP 系统在结构健康监测中的应用	测控技术	2004.23.9
296	徐颖娣 袁慎芳	硕士 正高	013 013 013	二维结构损伤的主动 Lamb 波定位技术研究	航空学报	2004.25.5

	彭鸽	博士				
297	刘小会 袁慎芳	硕士 正高	013 013	基于光纤光栅的编织复合材料多点 热应变监测	南京航空航天大学学报	2004.36.5
298	赵霞 袁慎芳	博士 正高	013 013	小型化结构健康监测实时信号分析 模块	仪器仪表学报	2004
299	赖晓松 袁慎芳	硕士 正高	013 013	嵌入式 Ad hoc 无线传感网络的载荷 定位研究	南京航空航天大学第六届 研究生学术会议	2004
300	赖晓松 袁慎芳	硕士 正高	013 013	嵌入式 Ad hoc 无线传感网络的载荷 定位研究	测控技术	2004.23.12
301	沈星 袁慎芳 王鑫伟	中级 正高 正高	013 013 013	PLZT 压电陶瓷的高温还原行为研究	材料工程	2004.00.3
302	沈星 袁慎芳 陈勇	中级 正高 副高	013 013 013	Characterization and Microstructure of PLZT RAINBOW Ceramics	Chinese Journal of Aeronautics	2004.17.2
303	沈星 袁慎芳 王鑫伟 陈勇	中级 正高 正高 副高	013 013 013 013	铜-压电陶瓷复合型驱动器	华南理工大学学报(自然科 学版)	2004.32.4
304	沈星 季赛 陈勇	中级 硕士 副高	013 013 013	Manufacture of large displacement antiferroelectric ceramic and its properties	Journal of Southeast University	2004.20.2
305	沈星 万建国	中级 副高	013 013	具有大位移驱动能力的 REINBOW 压电陶瓷研究进展	材料科学与工程学报	2004.22.3
306	沈星 万建国	中级 副高	013 013	基于 REINBOW 结构的反铁电陶瓷 研究	功能材料	2004.35.4
307	沈星 王鑫伟 袁慎芳	中级 正高 正高	013 013 013	Research on REINBOW Actuators made of PSZT	Smart Materials for Engineering and Biomedical Applications	2004
308	沈星	中级	013	利用实验室的科研优势培养创新人 才	南京航空航天大学学报(社 会科学版)	2004.6.增刊
309	徐志伟 Michael Yu Wang 陈天宁	副高	013 外地 外地	A particle damper for vibration and noise reduction	Journal of Sound and Vibration	2004.270.4- 5
310	徐志伟 Michael Yu Wang 陈天宁	副高	013 外地 外地	An experimental study of particle damping for beams and plates	Journal of Vibration and Acoustics	2004.126
311	徐志伟 K.W.Chan W.H.Liao	副高	013 外地 外地	An empirical methods for particle damping design	Shock and Vibration	2004.11
312	郑世杰	正高	013	八节点压电固体单元的再研究	压电与声光	2004.26.4
313	郑世杰	正高	013	用于超弹性分析的高效杂交应变- EAS 固体壳单元的研究	计算力学学报	2004.21.3
314	郑世杰 王鑫伟 陈万吉	正高 正高 正高	013 013 外地	精化杂交压电固体单元的研究	计算力学学报	2004.21.1
315	郑世杰	正高	013	A Stabilized EAS Element for Hyperelastic Analysis of Shells	Finite Elements on Analysis & Design	2004.40.3
316	郑世杰	正高	013	Finite Elements Analysis of Smart Structures with Piezoelectric Sensors/Actuators Including Debonding	航空学报(英)	2004.17.4
317	郑世杰 王鑫伟	正高 正高	013 013	The Formulation of Refined Hybrid- EAS Solid-Shell Element and its	Smart Materials and Structures	2004.13.4

	陈万吉	正高	外地	application to model smart structures containing distributed piezoelectric sensors/actuators		
318	陈仁文 孙亚飞 熊克 徐志伟	副高 博士 正高 副高	013 013 013 013	飞机座舱结构的弹性波主动控制研究	南京航空航天大学学报	2003.10.5
319	陈仁文 孙亚飞 陈勇	副高 博士 副高	013 013 013	一种利用光反射原理测量小位移的新方法	光谱学与光谱分析	2004.24.1
320	周洪梅 陈仁文	硕士 副高	013 013	输油管道中微弱应力波信号检测的研究	测试技术学报	2004.18.1
321	袁华 陈仁文	硕士 副高	013 013	用 TMS320F206 的 ASP 实现 1-Wire 总线温度传感器接口	电子工程师	2004.30.1
322	余旭峰 陈仁文	硕士 副高	013 013	Windows 下远程检票系统中的单片机和微机的通讯	中国测试技术	2004.30.3
323	史丽远 艾军	博士 正高	013 013	泰扶纤维加固钢筋混凝土梁抗剪性能试验研究与理论分析	南京航空航天大学学报	2004.36.4
324	吴瑾 吴胜兴	副高 正高	013 外校	锈蚀钢筋混凝土受弯构件承载力评估	河海大学学报(自然科学版)	2004.32.3
325	吴瑾 吴胜兴 程吉昕	副高 正高	013 外校 外校	锈蚀钢筋混凝土受弯构件承载力评估	河海大学学报(自然科学版)	2004.32.5
326	黄杰 程吉昕 吴瑾	硕士 副高	013 外校 013	连云港苏港商厦地下室混凝土结构耐久性设计	全国第六届混凝土耐久性学术交流会	2004
327	吴瑾 程吉昕	副高	013 外校	新加坡国立大学土木工程人才培养方案及其特点	高等建筑教育	2004.13.4
328	吴瑾	副高	013	关于土木工程专业定位与特色的探讨	南京航空航天大学学报(社会科学版)	2004.6.增刊
329	吴瑾 程吉昕 陆明生	副高	013 外校 外校	Damage location due to corrosion in reinforced concrete structures	南京航空航天大学学报(英)	2004.21.4
330	石长 赵新铭	硕士 副高	013 013	边坡稳定分析方法综述	昆明理工大学学报	2004.29.4A
331	张小平 包承刚 施斌	副高 正高 正高	013 外校 外校	三峡二期围堰建设中的科技创新	水利水电科技进展	2002.22.6
332	张小平 施斌 陆现彩	副高 正高 副高	013 外校 外校	石灰改良膨胀土微孔结构试验研究	岩土工程学报	2003.25.6
333	张小平 刘\艳 华 张小蒙 包承刚	副高	013 外校 外校 外校	泡沫轻质材料试验的均匀设计方法及配方优化	岩土力学	2004.25.8
334	张小平 顾羌盛 施斌	副高 正高	013 外校 外校	Water saving technology for paddy rice irrigation and its popularization in China	Irrigation and Drainage Systems	2004.18.4
335	杨杰	中级	013	PAF: The Grope for Integrated Diagnosing Method	Proceedings of the third international conference on earthquake engineering	2004
336	毛利军 李爱群	博士后 正高	013 外校	建筑结构基础隔振体系研究进展	华东交通大学学报	2004.21.4

337	毛利军 李爱群	博士后 正高	013 外校	基础滑移隔震体系的地震反应谱	土木工程学报	2004.37.2
338	张大林 陈维建	副高 博士	014 014	飞机机翼表面霜状冰结冰过程的数值模拟	航空动力学报	2004.19.1
339	夏文庆	中级	014	《高等工程热力学》公理化体系教学初探	南京航空航天大学学报(社会科学版)	2004.6.28 增刊
340	夏文庆 刘卫华 朱春玲	中级 正高 副高	014 014 014	双两相换热器的建模仿真	空气动力学学报	2004.22.1
341	夏文庆 朱春玲	中级 副高	014 014	Theoretical Investigation on Heat Transfer Characteristics with Rotating Thermal Source	南京航空航天大学学报(英)	2004.21.1
342	夏文庆 明晓 朱春玲	中级 正高 副高	014 012 014	基于状态空间的流固耦合传热的分析	南京航空航天大学学报	2004.36.1
343	孙建红	副高	014	Similarity analyses on flapping turbulent plane jets	第四届国际环境水动力和第十四届 IAHR-APD 国际年会	2004
344	孙建红 明晓	副高 正高	014 014	非线性气体振荡整流效应对翼尖涡的影响	南京航空航天大学学报	2004.36.1
345	苏向辉 昂海松	副高 正高	014 012	A method to solve the multilayer non-continuity problem for heat and moisture transfer in building structure	Communications in numerical methods in engineering	2003.19.12
346	余刚	中级	014	离心泵中固相效应系数的提出、求解、论证及应用	中国工程热物理学会流体机械学会	2004
347	余刚 余奇 顾璠 徐益谦	中级 初级 正高 正高	014 外校 外校 外校	The putting forward, solution and application of particle-effect coefficient in solid-liquid two-phase	第二届国际多相流、非牛顿流和反应流学术会议	2004
348	余刚 余奇 翟晓东 顾璠 徐益谦	中级 初级 正高 正高	014 外校 外校 外校 外校	Cu 分子筛协同等离子体脱除氮氧化物的实验研究	燃烧科学与技术	2004.10.5
349	余刚 刘岩 张辉 顾璠	中级 副高 正高	014 外校 外校 外校	沙砾油层的着火与燃烧特性	上海交通大学学报	2004.38.10
350	余刚 余奇 叶丹 顾璠 徐益谦	中级 初级 博士 正高 正高	014 外校 外校 外校 外校	单电极尖端放电等离子体 NOx 还原特性试验研究	西安交通大学学报	2004.38.3
351	余刚 姜效勤 翟晓东 顾璠	中级 正高	014 外校 外校 外校	低温等离子体-催化剂同脱硝技术中若干问题探讨	能源研究与利用	2004.00.1
352	蒋彦龙 陈国邦 G.Thummes	中级 正高	014 外校 外校	Experimental Investigation on DC Flow Suppression and Refrigeration Characteristics of a High-Performance Single-Stage GM-Type PTC	第二十届国家低温工程会议(ICEC20)	2004
353	蒋彦龙 陈国邦 G.Thummes	中级 正高	014 外校 外校	DC Flow Suppression in a single-stage G-M type pulse tube cooler	南京航空航天大学学报(英)	2004.21.4

354	蒋彦龙 陈国邦 甘智华 G.Thummes	中级 正高 副高	014 外校 外校 外校	高性能 G-M 型单级脉管制冷机直流抑制和制冷特性实验研究	低温物理学报	2004.26.2
355	蒋彦龙 陈国邦 甘智华 G.Thummes	中级 正高 副高	014 外校 外校 外校	回热器流阻对脉管制冷机稳定性的影响	低温物理学报	2004.26.3
356	蒋彦龙 陈国邦 G.Thummes	中级 正高	014 外校 外校	高性能 G-M 型单级脉管制冷机	南京航空航天大学学报	2004.36.4
357	蒋彦龙 陈国邦 G.Thummes	中级 正高	014 外校 外校	回热器填料布置方式对脉管制冷机性能影响实验研究	南京航空航天大学学报	2004.36.6
358	武艳	中级	014	Modeling and Numerical Simulation of Onboard Molecular Sieve Oxygen Generation System	南京航空航天大学学报(英)	2004.21.1
359	曹业玲 张大林	中级 副高	014 014	矩形通道空芯冷板的换热特性研究	流体机械	2004.32.7
360	余莉 夏文庆 朱春玲	中级 副高	014 014 014	降落伞设计软件的研制	计算机仿真	2004.21.12
361	余莉 施明恒 朱春玲	正高 副高	014 外校 014	Investigation on Drying Characteristic of Medical Pill Using Microwave-Convective Drying	南京航空航天大学学报(英)	2004.21.3
362	余莉 朱春玲	副高	014 014	精心选题、悉心指导:提高本科毕业设计两个重点	南京航空航天大学学报(社会科学版)	2004.6.9
363	马哲树 姚寿广 明晓	博士 正高 正高	014 外校 012	新型热管冷板传热性能的试验研究	南京航空航天大学学报	2004.36.2
364	马哲树 姚寿广	博士 正高	014 外校	带入口旋流器的文丘利油器燃烧出口热态流场的数值模拟	动力工程	2004.24.2

利用空心光纤完成了智能结构自诊断、自修复系统。空心光纤网络可以检测出结构损伤的位置,并将胶液输送至结构损伤处进行修复,从而实现对复合材料结构损伤的自诊断及自修复功能。另外,本文对空心光纤埋入复合材料结构后的相容性进行了试验和分析。

基于空心光纤的智能结构自诊断、自修复系统

The Self-diagnose and Self-repair System in Smart Composite Structure by Hollow Optical Fiber

◎ 梁大开 / 南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室

复合材料以其比强度和比模量高、成形方便等优越性而在现代工程中占有重要地位,并已在舰船、汽车、建筑以及化工容器等各个工程领域得到广泛地开发应用,尤其在航空航天领域中受到极大的关注。在飞行器的机身、机翼以及空间运载工具和卫星上都在大量开发应用复合材料构件作为

承力构件或蒙皮。现在,复合材料在先进军用飞机结构上的用量已达飞机总重的 40% 左右。而在直升机上,这一比例更可高达 60% 以上,并且还有进一步增长的趋势。在航天领域,对它的应用研究也日益增多,在航天飞行器和未来的空间基地中,复合材料结构将得到广泛的应用。这样,复合材料结构的修理

和使用保障技术就显得日益重要,引起了世界各国的广泛重视。

在复合材料结构中埋入传感元件及动作元件等,就构成了所谓智能结构。这种新型结构是一种能够感知自身状态变化并能够发出信号进行自我调节,自我修复的拟生命系统。它可以有效地解决复合材料的强度检测和监测

空系统同时使用。

针对低温环境的改进措施

为了确保在外场低温环境下系统的正常使用,FRBY2003-2J 复合材料修理系统采取了多种保障措施。

(1) FRBY2003-2J 复合材料热补仪和外部真空泵系统各自拥有一个自动加热系统,当机箱内环境温度低于 0°C ,自动加热系统就开始工作,确保机箱内环境温度高于 0°C 。自动加热系统独立于 FRBY2003-2J 复合材料热补仪的控制系统,具有很高的可靠性。

(2) 虽然采用了自动加热系统,FRBY2003-2J 复合材料热补仪控制系统、直流电源和气动系统的元件均尽量采用宽温系列的型号,以提高系统在低温环境下的可靠性。

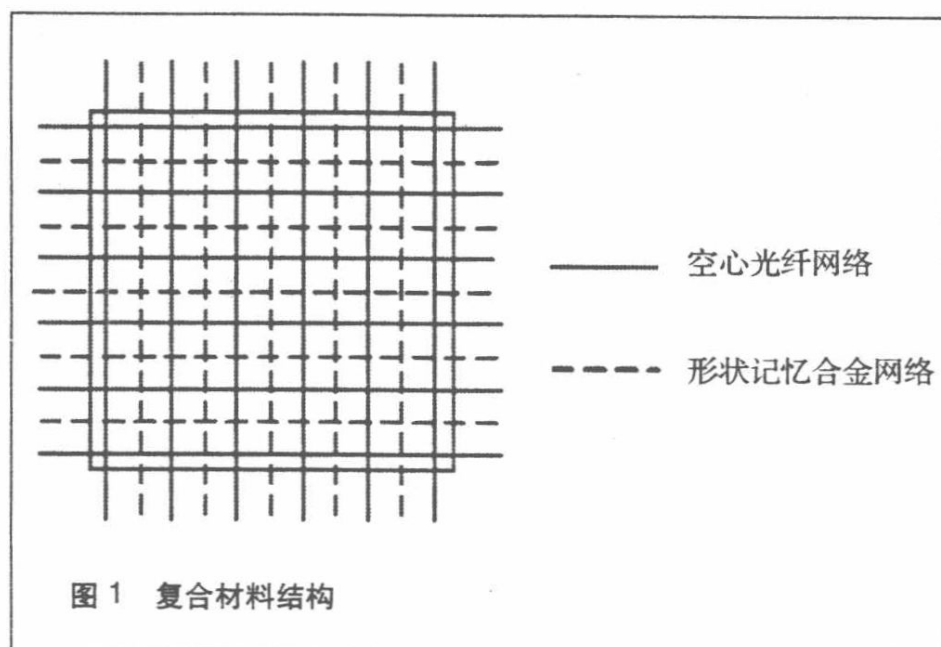
(3) 为了保证在低温环境下 FRBY2003-2J 复合材料热补仪的加热效率,用户可以同时使用两块电热毯对同一部位进行加热,其中一块主要是起低温补偿的作用。

结论

FRBY2003-2J 便携式复合材料修

理系统的功能和国外同类产品完全相同,能够胜任外场飞机复合材料损伤和金属结构损伤的修理任务。系统可以在低于 0°C 的低温环境下工作,而国外同类产品只能在 0°C 以上的环境下使用。相对于国外产品,FRBY2003-2J 热补仪的软件界面也非常友好,具有可视化和易操作的特点。FRBY2003-2J 目前已经在某型引进飞机蒙皮裂纹的修补、复合材料试验件修理疲劳试验中得到了成功的应用。

□



问题,从而可以扩大复合材料在航空航天器及各种工程结构中的应用范围。这种新型结构具有自诊断、自适应及自修复能力,可以大大提高结构的整体性能和安全性。因此,智能结构技术的发展和运用不仅对于我国科技和工业水平的提高具有重要的意义,而且也是当前国内外科学研究的热门课题之一。

智能复合材料结构的研究至今已有十余年的历史,它的自诊断和自适应技术得到了广泛的研究并已经取得了许多突破性进展。相对而言,由于它的自修复技术的研究难度极大,至今仍然只有少数国家进行着实验室研究。

复合材料结构的损伤一般有分层、脱胶、裂纹及穿孔等,这些损伤在理论上都是可以修理的。国外现在已制定了较为详细的复合材料结构损伤修理方法,系列化成套的修补材料和设备已大量推广和出售。但是,如何对复合材料

结构的损伤进行实时快速的修复,以提高飞机及其他工程结构的安全性还是一个难题。为了解决这一难题,我们进行了初步的研究,研制了基于空心光纤的自诊断、自修复系统。

系统工作原理

将空心光纤、形状记忆合金(SMA)丝分别组成网络埋入复合材料结构(图1),结合测控系统构成智能结构的自诊断、自修复系统(图2)。在系统中,空心光纤既充当传感元件,又充当结构损坏时的修复元件。复合材料结构的形变会使空心光纤传感网络输出的光强发生变化,通过光电转换、信号放大以及计算机数据采集系统,结合对复合材料结构力学性能的具体分析结果、图像处理及数据处理方法等,可判别出结构中的损伤情况及结构受到载荷的大小和作用位置,实现损伤的初步预报。一旦损伤发展至报警临界点时,空心光纤将断裂,利用空心光纤断裂处的光反射和光纤损耗可以得到复合材料断裂的具体位置。同时向注胶器的控制系统发出信号,利用空心光纤将自修复胶液输送至结构的损伤处对结

构进行快速自修复。

在系统检测到损伤发生的同时激励SMA丝使其收缩,减小了断裂处的间隙,从而使复合材料结构在生产局部断裂破坏时仍可在工作情况下进行有效的修复。另外,SMA丝在受到激励时,将使结构局部的温度上升,也有利于胶液的固化,从而提高了自修复的质量。

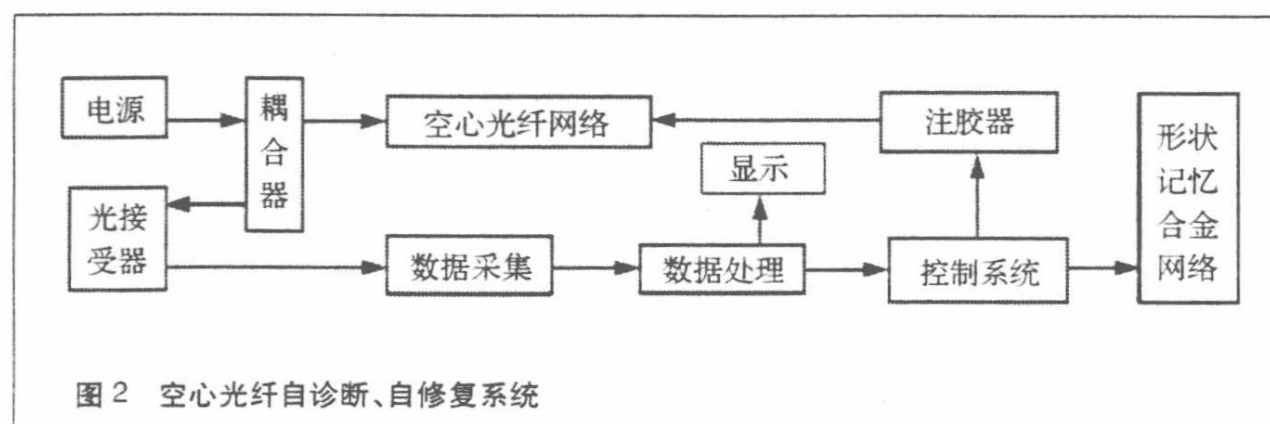
基于空心光纤的自诊断、自修复系统的构成

在自诊断、自修复系统中,空心光纤起到关键的重要。它既作为自诊断系统的传感元件,又构成了自修复系统的胶液传输通道。对它的研制及其性能的研究是完成系统关键技术之一。另外,系统所用胶液既要能够良好的修复复合材料结构的损伤,又要具有足够低的黏度,以便于在内径很细的空心光纤中传输。所以,对胶液的选择也是至关重要的。

1. 空心光纤性能的研究

空心光纤是自诊断、自修复智能结构中的关键功能元件。它是由纤芯、包层和涂敷层组成的一多层介质对称圆柱体结构,可以为修补用的胶液提供通道。

光在光纤中的传播要受到光纤的本征吸收、杂质吸收、原子缺陷、光纤的材料色散、模式色散、波导色散等的影响;另外,由于纤芯内表面不具有包层和涂敷层,当注满液体后,光在光纤中的传播就会因液体和空心光纤内壁接触面的不平及液体本身的性质等因素影响传光的效率。这些因素均使光纤中传输光功率随光纤长度发生衰减,且含胶液的空心光纤的衰减系数远大于普通光纤,使空心光纤的输出光强随光纤长度的变短而迅速增加。这样,就可以根据埋入复合材料中的空心光纤的传输光功率的变化计算出光纤在材料里断裂的具体位置,实现结构的载荷及损



伤位置的自诊断。

在受载荷、微弯等扰动影响下,空心光纤的输出光强也将发生变化。在系统中,光源采用高亮度发光二极管,通过简单的固定装置耦合到空心光纤,可以得到较稳定的光输出。

试验结果表明:弯曲角度的增大和弯曲半径的减小均会引起传光损耗增加;而当光纤受到拉伸变形时,输出光强下降,而当载荷卸除后,输出光强增加。当试件受到压缩变形时输出光强增加,卸载后同样会回复。所以,可以认为:空心光纤对材料的机械形变具有良好的感应能力,可以埋入复合材料中作为自诊断的功能元件使用。

2. 自修复胶液的选择

在自修复系统中,空心光纤中胶液的选择决定了系统能否正常工作及自修复的质量,所以,它的选择是非常重要的。由于空心光纤的内径很细,胶液的黏度必须很小,否则将难以在空心光纤中传输。另外,它也必须可对复合材料具有良好的修复效果。根据这些原则,系统采用了一种进口的瞬干系列胶作为自修复用胶。它是一种改性的氰基丙烯酸乙酯胶黏剂,为无色透明的低黏度液体,通用性好,可用于惰性表面以及粘接多孔、酸性和吸收性的材料等,填充间隙为 0.1mm,黏度为 20mPa·s,剪切强度为 22MPa,工作温度范围为 -54~80℃,固化时间小于 20 秒,适用于手工、半自动和全自动涂胶多种方式。另外,它还能通过注胶系统来涂胶。非常合适于在空心光纤自修复系统中应用。为了考察这两种胶液对复合材料结构的修复能力,我们对它们进行了复合材料结构修复试验,结果表明,它对复

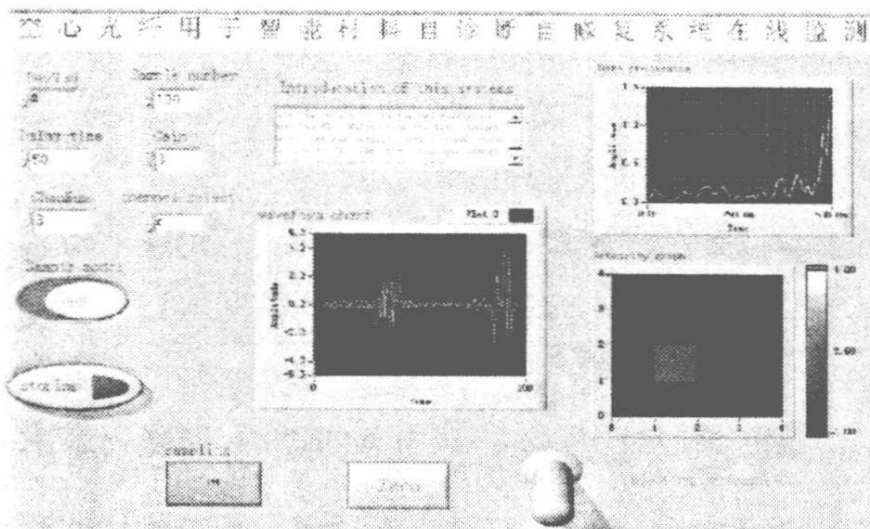


图3 智能结构自修复系统 LabVIEW 界面

合材料具有较强的粘接能力。因此,系统选择了这种瞬干胶作为自修复系统用胶。

3. 系统的软件和界面

在系统软件的编制中,选用 LabVIEW 作为测控界面的主要编程环境。LabVIEW 的执行顺序是按方块图间数据的传递来决定的,并不像传统文字式程序语言必须逐行地执行,这就节省了程序执行时间,而且用户可以设计出可同时执行多个程序的流程图。

系统采用了 PCL-818HD 数据采集卡,它不是 NI 公司的产品,不能直接用 Measurement&Automation 软件识别和实现驱动。但用 Function>>Advanced 子模板下的 CIN 图标,可以完成与 C 语言编写的 PCL-818HD 采集卡的驱动程序连接。

图 3 为用 LabVIEW 软件编写的主程序的前面板。主程序对采集卡获得的信号进行一些必要的预处理后,通过神经网络程序可以实现材料的应力分布显示和损伤决断。

空心光纤和复合材料的相互影响

埋入复合材料的空心光纤可用来监测结构的力学性能以及实行修复材料结构的损伤、断裂。但在实际工程应用中,埋入结构的空心光纤性能的变

化以及它对复合材料结构强度的影响是决定空心光纤是否具有实用价值的首要前提。空心光纤的直径较大,所以,对埋入的空心光纤和复合材料结构之间的相互影响进行研究就显得更有必要。

1. 埋入复合材料中空心光纤性能研究

空心光纤埋入到复合材料,可能会在空心光纤与复合材料的界面处产生应力集中,

从而影响空心光纤的传输性能,甚至造成空心光纤的损伤。产生上述原因的主要因素可能有三点:一是空心光纤在复合材料成形过程中的受压影响;二是胶黏剂的固化影响;三是复合材料在成形过程中,材料本身所产生的应力等方面的影响。这三点影响均是复合材料成形工艺过程中不可避免的。因而,在空心光纤用来作为监测复合材料结构完整性及力学性能的检测元件之前,必须对空心光纤受到的外界影响给予一定的评估分析,以确保在排除外界因素影响的前提下,实现检测的功能。

我们对 5 根埋了空心光纤的复合材料试件进行了未加载状态下的传输性能测试,其目的是为了分析空心光纤埋入前后性能的变化。试验结果表明:大直径的空心光纤埋入复合材料中并没有受到太多的影响。一方面,空心光纤的直径较大,有良好的强度和刚度,在制作中不容易发生光纤扭曲或弯曲的现象;另一方面,由于采用的是压力/真空罐压模的方法,从而使复合材料成形时空心光纤未受到很强的应力作用。试验结果说明,空心光纤埋入复合材料前后的性能变化很小,不会影响它在自诊断系统中的性能。

2. 埋入空心光纤对复合材料性能的影响

空心光纤的直径较粗,为了了解它埋入复合材料后对结构强度的影响,我们制成了埋有空心光纤的复合材料试件进行了拉伸和压缩试验。试件按国家标准 GB1446-83 制作,光纤的体积比为:拉伸试件:0.5%,压缩试件:0.2%。

在测试埋入空心光纤对复合材料性能影响的测试实验中,分别将埋入、不埋入空心光纤的拉伸和压缩的试样在万能材料试验机上进行了试验。试验结果表明,热固型纤维增强树脂基复合材料埋入与不埋空心光纤在拉伸试验中的差别很小,几乎没有什么影响,拉伸强度和刚度的相对变化率均在 3% 的范围内,可以满足工程使用的要求。压缩试验的结果显示,埋入与不埋空心光纤对结构的强度和刚度将产生一定的影响,分别约为 10% 和 13% 左右,在应用中应对此加以考虑。

国内外对普通光纤埋入复合材料中的性能影响已经进行了大量的研究,其结果为:光纤埋入复合材料结构对结构的拉伸强度和刚度影响较小,分别为 1% 和 3%,而对压缩强度和压缩刚度有较大的影响,分别 10% 和 15% 左右。这和我们空心光纤埋入复合材料结构的试验结果基本一致。

热固型纤维增强树脂基复合材料埋入与不埋空心光纤进行的对比实验结果说明,空心光纤埋入树脂基复合材料中对其性能的影响和埋入普通光纤造成的影响相当。在考虑这一因素进行适当处理的情况下,不会影响到树脂基复合材料在工程结构中性能和使用。上述试验为空心光纤在智能材料自诊断与自修复这一研究方法可行性和实用性提供了依据。

复合材料修复试验

着重对工程中常用的两种复合材料——玻璃钢及纸蜂窝复合材料进行了修复性能的测试与研究。其中,纸蜂窝复合材料修复后的力学性能达到或超过原来的指标,玻璃钢复合材料修复后,其拉伸试件达到原来值的 1/3,而压缩试件达到原来值的 2/3 以上。

1. 纸蜂窝复合材料的修复性能

对纸蜂窝复合材料破坏的弯曲试验,是采用 400mm×200mm 的小试样进行的。对同一试样进行三处位置的弯曲测试。在试样完全弯曲破坏的条件下,通过空心光纤灌注胶液对破坏处进行修复,再进行弯曲测试,结果表明,修复后纸蜂窝复合材料达到正常材料的测试性能。三次测试结果都没有在修复的地方出现破坏,这充分说明运用空心光纤实现纸蜂窝复合材料自修复是可行的。

通过观察发现,空心光纤注胶修复纸蜂窝复合材料的注胶速度很快,基本上能恢复或超过材料原有的性能。而且,由于试件制作时,考虑了埋入式空心光纤在试件中的位置及埋置的方向,因而在注胶时,通过一根空心光纤就能够使纸蜂窝复合材料小试样在全部断裂部位处都充满了胶液,从而极大地提高了空心光纤的使用效率和纸蜂窝复合材料修复的成功率。

2. 玻璃纤维复合材料的修复性能

为了探究空心光纤对玻璃纤维复合材料损伤、断裂的修复能力及修复质量,将空心光纤埋入复合材料内,制作了 II 型标准 (GB1446-83) 的拉伸压缩试样,拉伸、压缩断裂试样利用空心光纤注胶修补,再在材料力学试验机上进行性能测试。试验结果表明:对拉伸和压缩破坏的玻璃钢复合材料试件进行修复,性能分别可以达到原值的 1/3 和 2/3。经分析认为,主要原因在于拉伸主

要由纤维受载,破坏造成纤维断裂,修复效果不好;压缩为基体承受,破坏造成基体开裂,修复效果较好。

结论

系统采用空心光纤构成了复合材料结构的自诊断、自修复系统,结果表明:空心光纤不但能够作为功能性传感元件埋入复合材料对其拉伸压缩等机械性能进行监测,可以对二维复合材料进行受力位置判断和损伤识别;而且可以作为自修复胶液的通道,对复合材料结构中的损伤进行修复。另外,由试验可知,空心光纤的埋入造成结构本身强度的下降在工程允许的范围之内。所以,利用空心光纤有望解决智能复合材料结构中损伤的自诊断、自修复这一难题,具有明显的理论意义和实用价值。和国外的研究相比,我们在以下方面具有创新:

1. 利用以空心光纤网络对结构进行自诊断,判定复合材料应力分布;
2. 利用空心光纤作为胶液的传输通道,解决了胶液流出困难和较大损伤修复问题;
3. 利用 SMA 网络提高了损伤的修复质量。 □

首架 EMB170 交付

据悉,巴西航空工业公司日前向波兰航空公司交付了其订购的 10 架 EMB170 飞机的第一架,这也是巴西航在取得欧洲航空安全局 (EASA) 为 EMB170 飞机颁发的型号合格证后交付的首架飞机。此前,EMB170 飞机已经获得了巴西适航当局 (CTA) 和美国联邦航空局 (FAA) 的型号许可证,该飞机还获得了欧洲联合航空局 (JAA) 的推荐书。

旋转反射镜式超声传感器的研究

李东升¹, 梁大开¹, 王昌明²

(1. 南京航空航天大学 航空科技智能材料与结构重点实验室, 南京 210016; 2. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘 要:针对小管道在役检测的特点,对旋转反射镜式传感器结构的不漏检条件进行了详细分析,并对单焦距超声传感器用于小管道在役检测时的相对误差进行了讨论;在超声检测分析的基础上,对旋转反射镜式传感器进行了结构设计,它由超声传感器、平面反射镜、旋转机构、微型电机和连接器等部件组成;小管道液浸超声检测室内试验表明,在适当的采样率和系统增益情况下,反射镜式超声传感器可用于小管道的在役检测。

关键词:旋转反射镜;超声传感器;小管道;在役检测

中图分类号:TP212.9

文献标识码:A

Research on Single Ultrasonic Sensor with a Rotating Planar Reflector

LI Dong-sheng¹, LIANG Da-kai¹, WANG Chang-ming²

(1. The Aeronautic Science Key Lab. for Smart Materials and Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Mechanical Engineering School, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aimed at the on-line inspection of small-diameter pipelines, the condition of complete coverage of circumference for the pipeline has been extensive studied for single ultrasonic sensor with a rotating planar reflector. Relative error has also been studied for the single focus ultrasonic sensor. Based on the ultrasonic analysis, the structure design for single ultrasonic sensor with a rotating planar reflector, which is made up of ultrasonic sensor, planar reflector, rotating part, micro-motor and links is given. The immersion test for small-diameter pipeline shows that single ultrasonic sensor with a rotating planar reflector are available for on-line inspection of small-diameter pipelines at the proper sampling frequency and system amplitude.

Key words: rotating planar reflector; ultrasonic sensor; small-diameter pipeline; on-line inspection

1 引言

管道在役检测一般指管道内部的在役检测,它分为漏磁检测和超声检测两种。其中,超声检测具有直接测量和定量化的特点,检测精度高。漏磁检测仅限于材料表面和近表面的检测,检测精度相对较低。管道在役检测系统由管内介质压力差驱动,利用携带的超声、漏磁、电涡流等传感或检测元件在管道内边行走边检测,通过其内部存储器记录相应的检测数据,待检测结束后,再取出记录磁带,由外部计算机完成存储数据的最终处理^[1]。

目前,管道超声在役检测主要采用阵列式压电传感器,各传感器在周向呈阵列固定在检测头上,并垂直于管道壁。小管道在役检测因受结构限制,需采

用旋转平面反射镜式单传感器^[2],即单个宽频超声传感器与管道轴线平行,传感器发射的宽频超声波经不锈钢平面反射镜反射,反射镜则由微电机驱动,从而实现对被测管道壁状态的检测,该结构特别适于小管道的在役检测。

2 管道超声在役检测原理

管道超声在役检测原理如图1所示。垂直于管道壁的超声传感器对管道壁发出一组宽频超声波脉冲后,传感器首先接收到被测管壁的一次界面波,随后接收到被测管壁的缺陷波或一次底波。则传感器至管道内壁的距离 A 与管道壁厚度 T 为

$$A = v_t t_s / 2 \quad (1)$$

$$T = v_t t_b / 2 \quad (2)$$

式中 t_s 为一次界面波时间; t_b 为缺陷波或一次底波时间; v_i 为超声波在介质中的声速; v_s 为超声波在管道中的声速。

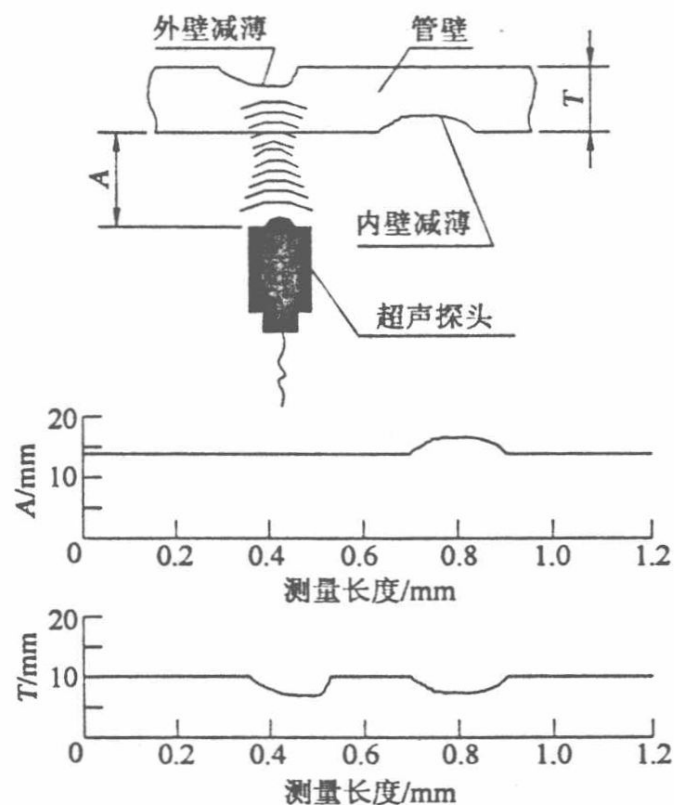


图1 管道超声在役检测原理

当管道外壁受损减薄时,距离 A 曲线不变;而当管道内壁受损减薄时,距离 A 曲线与壁厚 T 曲线呈反对称。根据这两条曲线,可确定被测管壁厚度,及管道是内壁受损减薄还是外壁受损减薄^[3]。

3 超声检测分析

聚焦声束经平面反射镜反射后,仍会聚在某点。即平面反射镜仅改变聚焦声束方向,不影响其他参数^[4]。在实际应用中,常取反射镜倾斜角为 45° ,即入射轴线与反射轴线垂直。

3.1 不漏检条件

若反射镜旋转速度为 n_s ,轴向重叠系数为 μ ,周向重叠系数为 β ,传感器将在管道内表面作螺旋扫描,扫描带轴向不漏检条件为

$$v \leq (1-\mu)n_s\Phi_p \quad (3)$$

式中 Φ_p 为传感器焦柱直径; v 为传感器轴向扫描速度。

扫描带周向不漏检条件为

$$n_s \geq \frac{(1-\beta)\Phi_p f_p}{\pi d} \quad (4)$$

式中 f_p 为脉冲重复频率; d 为被测管道内径。于是,旋转反射镜式单传感器的不漏检条件为

$$n_s \geq \max\left\{\frac{v}{(1-\mu)\Phi_p}, \frac{(1-\beta)\Phi_p f_p}{\pi d}\right\} \quad (5)$$

3.2 单焦距传感器分析

采用液浸聚焦法检测柱面工件时,在两个相互垂直平面内,柱面工件中的焦点位置往往不重合,即

传感器在两个相互垂直平面内的焦距不相等,因此需选用双焦距超声传感器。

设 P' 点为柱面工件中的焦点, S' 为管道壁内表面顶点,平面反射镜倾斜角为 45° ,取归一化指标 $\delta = 2S'P'/d$,则单焦距超声传感器检测柱面工件时,在传感器垂直于柱面工件表面情况,以及聚焦声束经平面反射镜反射情况时,柱面工件中焦柱直径和焦柱长度的相对误差如图2所示。

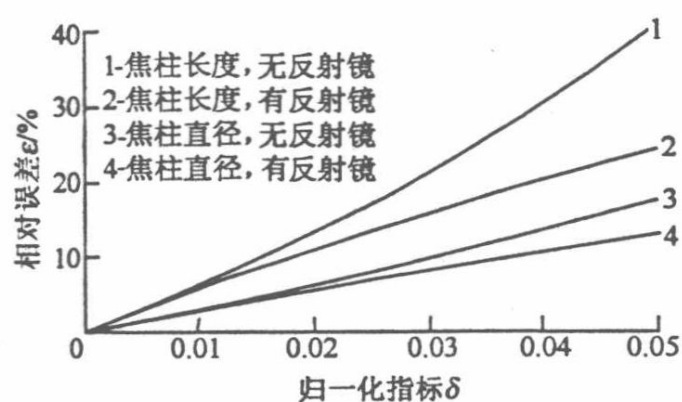


图2 单焦距超声传感器相对误差

4 压电传感器型式设计

由不漏检条件可知,采用液浸聚焦法检测管道时,由于焦柱直径远小于晶片直径,欲满足管道的轴向和周向不漏检条件,所需压电传感器将迅速增加,显然该条件很难满足。不过,只要合理选择超声传感器型式及参数,采用液浸聚焦法检测管道壁的大面积受损减薄时,其检测精度仍较高。

计算表明,小管道在役检测时压电传感器型式及参数的选择与是否采用平面反射镜有着密切关系。当采用阵列式多传感器时,压电传感器直径较小,其加工制造困难。而采用旋转反射镜式单传感器时,传感器直径为 $\varnothing 10 \sim 20$ mm,易于加工制造。不过,由于声程较长,其反射声压较小。

由图2可看出,当 δ 较小时,单焦距传感器用于液浸法检测时的相对误差较小;而当 δ 一定时,旋转反射镜式单传感器检测时的相对误差较小。因此,单焦距传感器经平面反射镜反射后,可用于小管道的超声在役检测。

旋转反射镜式单传感器结构设计如图3所示。它由超声传感器、平面反射镜、旋转机构、微型电机和连接器等部件组成,这些部件布置在密封的圆柱筒体内。微型电机通过齿轮带动连接器转动,连接器上装有不锈制成的平面反射镜,超声传感器发射的超声波被反射并旋转后进入被检管壁,由管壁反射的超声波再经旋转并反射后,由传感器接收。

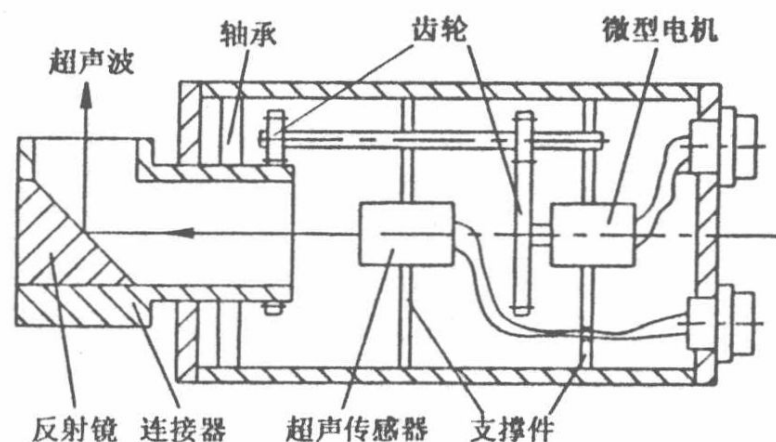


图3 旋转反射镜式单传感器结构

密封筒体外部有两个接口,其一是连接筒体内部的超声传感器和检测舱内的超声波发射、接收及相应信号采集、前置放大、处理系统,以实现超声波的发射、接收;其二是连接筒体内部的微型电机和电源舱内的电池,用于微型电机的供电,并为检测舱提供电源。

5 室内模拟试验

试验管道采用 $\varnothing 114\text{ mm} \times 4.5\text{ mm}$ 钢管,管道内外壁加工有宽度乘深度分别为 $3\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$, $4\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$, $5\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$, $6\text{ mm} \times 2.0\text{ mm}$ 的圆环槽,试验管段全部浸没在水中。采用液浸聚焦式单焦距超声传感器,传感器位于管道中心并平行于管道轴线,平面反射镜与管道轴线成 45° 夹角。

图4为采样间隔 $T=0.02\text{ }\mu\text{s}$ 时,采用反射镜式单传感器水浸检测小管道的试验波形。图中S为一

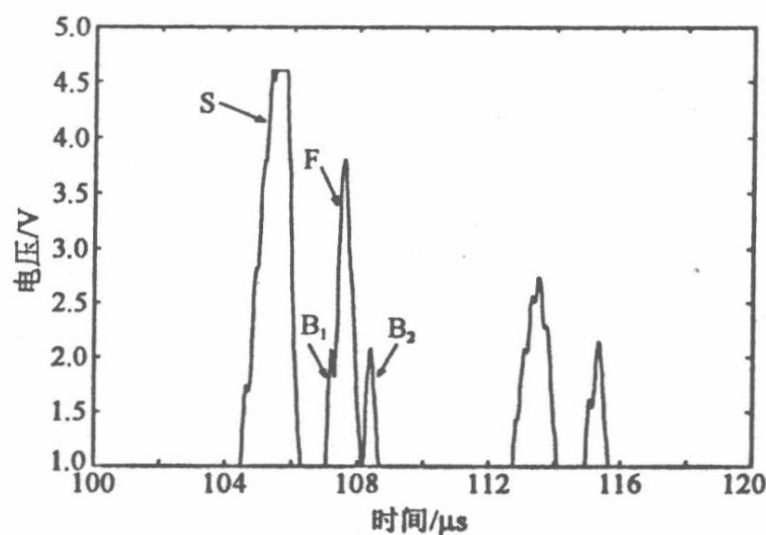


图4 液浸试验波形图

次界面波,F为缺陷波, B_1 为一次底波, B_2 为二次底波。被测部位上管道内壁加工有宽度乘以深度为 $6\text{ mm} \times 2.0\text{ mm}$ 的圆环槽,试验时仅采集一次界面波到二次底波之间的所有反射波。根据管道壁缺陷模式^[5],可求得管壁厚度为 2.13 mm ,相对误差为 6.5% 。

试验表明,在采样间隔小于 $0.02\text{ }\mu\text{s}$ 时,可有效地识别出缺陷波和一次底波。对设有圆环槽缺陷的试验管道而言,壁厚检测误差均小于 10% ,其中对管道内壁缺陷的检测精度高于管道外壁缺陷。

为了提高检测精度,应使采样时间与超声波同步电路的始脉冲发射时间同步,仅在一次界面波到二次底波之间使用很小的采样间隔采样,而无须采集全部反射波。这样既可以避免反射波信号的丢失,又可有效降低数据采集量及存储量。

6 结束语

管道在役检测法主要用于管道壁腐蚀缺陷及管道壁裂缝的检测,特别适于管道壁腐蚀减薄状况及其他减薄状况的在役检测。而小管道超声在役检测法则主要用于检测管道壁的大面积减薄量。理论分析及室内试验表明,在适当的采样率和系统增益的情况下,反射镜式单传感器可用于小管道的超声在役检测。

参考文献:

- [1] GOEDECKE H. Ultrasonic corrosion survey - what you get and what you don't get[J]. Pipes & Pipelines International, 1996, 41(1):5-17.
- [2] RAAD DE J A. Various methods of ultrasonic pipeline inspection: free-swimming and cable-operated tools[J]. Pipes & Pipelines International, 1989, 34(2):17-25.
- [3] GOEDECKE H. Corrosion surveys with the ultraScan pig[J]. Corrosion Prevention & Control, 1990, 37(2):33-36.
- [4] 张志勇. 水浸聚焦超声波探伤原理[M]. 北京:国防工业出版社,1985. 65-4
- [5] 李东升,王昌明,施祖康. 管道壁缺陷超声波在役检测的量化分析研究[J]. 仪器仪表学报,2002, 23(2):131-134.

文章编号:1002-0411(2004)01-0124-05

基于加权模糊推理的分布式飞机大气数据专家系统

姚宗信^{1,2}, 李明², 梁大开¹

(南京航空航天大学航空科技智能材料结构重点实验室, 江苏 南京 210016; 2. 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035)

摘要:飞机大气数据专家系统是对大气数据进行深层次处理的计算机系统. 本文将从结构、推理机和实现方法等方面对系统进行全面介绍. 该系统采用了分布式结构和加权模糊推理机制. 系统的软件实现采用了LISP语言; 系统的硬件实现基于多处理器网络系统. 最后, 概括了本文的研究重点和意义.*

关键词:分布式专家系统; 大气数据; 加权模糊推理; LISP语言; 多处理器网络

中图分类号: TP

文献标识码:

Distributed Air Data Expert System of Aircraft Based on Fuzzy Reasoning with Weights

YAO Zong-xin^{1,2}, LI Ming², LIANG Da-kai¹

(1. The Aeronautic Key Laboratory of Smart Material and Structure, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: Air data expert system of aircraft is a computer system applied for processing air data in a deep layer. In this paper, the structure mode, deducing mechanism and realization method of the expert system is introduced. The expert system utilizes distributed structure mode and mechanism of fuzzy reasoning with weights. The software of the expert system is realized by LISP language, while the hardware of the expert system is realized by multi-processor network. Finally, the importance and key problems of this study are given.

Keywords: distributed expert system; air data; fuzzy reasoning with weights; LISP language; multi-processor network

1 引言(Introduction)

大气数据专家系统(ADES——Air Data Expert System)是拟用于飞机机载环境的计算机系统,其基本功能是:基于大气数据系统获得的大气参数信息,利用机上用户系统的有关知识,进行深层次的推理,以获得对各用户系统具有指导作用的高级决策建议. 由于将复杂的数据处理工作移至大气数据系统内部进行,所以大大减轻了用户系统的负担. 否则,机上的各个用户系统需要分别对大气参数进行二次处理,供系统决策时使用,这将占用系统的有限资源,影响系统的反应速度. 对于飞控、火控、导航和发动机等重要系统,ADES系统的功能将更有意义.

由于ADES系统需要同时处理多个用户系统的问题,因此采用分布式结构. 同时,为了更合理地描述知识规则和推理过程,系统采用了加权模糊推机

制. 本文将着重阐述 ADES 系统的结构及其软硬件实现方法.

2 分布式飞机大气数据专家系统(Distributed air data expert system of aircraft)

2.1 专家系统的结构

分布式飞机大气数据专家系统的结构框图如图1所示.

由图1可知,分布式飞机大气数据专家系统大体上可分为信息接口、综合数据库和子系统三部分. 由于是机载系统,所以没有通常专家系统中的解释机制.

信息接口是专家系统的输入接口,用以输入大气数据和其他(如惯导、外挂管理和油量等)系统相关参数.

综合数据库包括输入信息分配数据库和输出信

* 收稿日期:2002-11-04
基金项目:国家自然科学基金资助项目(50135030)

息汇总数据库. 其中, 输入信息分配数据库用于将输入的大气数据和其他(如惯导、外挂管理和油量等)

系统相关参数按照不同子系统的驱动需求分配到不同子系统中.

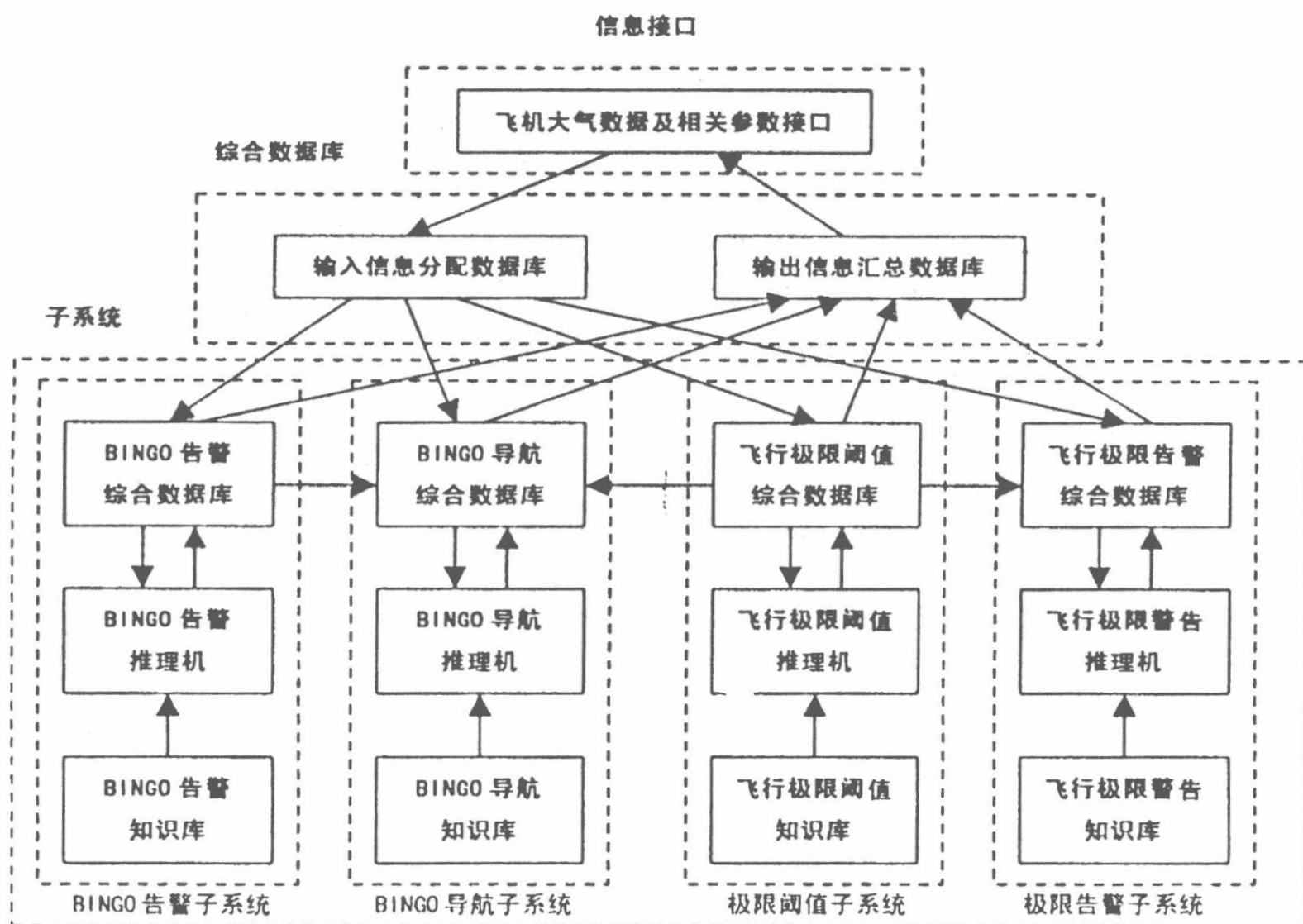


图1 分布式飞机大气数据专家系统的结构框图

Fig. 1 Framework of distributed air data expert system of aircraft

子系统包括了BINGO告警、BINGO导航、极限阈值和极限告警等四个子系统. 每个子系统又包括各自的综合数据库、推理机和知识库. 四个子系统受到驱动后, 实施并行推理计算.

2.2 系统的功能分布与驱动方式

BINGO告警子系统根据综合数据库中的航程数据、基于知识库、在推理机的作用下获得关于飞机是否达到BINGO告警条件的结论, 然后向输出信息汇总数据库和BINGO导航子系统的综合数据库输出该结论.

首先, BINGO导航子系统根据综合数据库中来自BINGO告警子系统的结论数据判断是否启动BINGO导航. 若需要进行BINGO导航, 则根据综合数据库中的气压高度和飞机重量数据、基于知识库、在推理机的作用下获得关于飞机应该怎样进行飞行的结论, 然后根据综合数据库中来自极限阈值子系统的结论数据判断飞机可否进行这样的飞行, 若可以, 则向输出信息汇总数据库输出该结论.

极限阈值子系统根据综合数据库中的飞行大气参数和外挂管理信息、基于知识库、在推理机的作用

下获得关于飞机极限(最大、最小)飞行状态(空速、攻角和过载等)的结论, 然后向输出信息汇总数据库以及极限告警和BINGO导航子系统的综合数据库输出该结论.

极限告警子系统根据综合数据库中的飞行大气参数和外挂管理信息以及来自极限阈值子系统的极限飞行状态数据、基于知识库、在推理机的作用下获得关于飞机是否达到极限飞行状态告警条件的结论, 然后向输出信息汇总数据库输出该结论.

上述四个子系统中, BINGO告警和极限告警两个子系统采用了数据驱动方式, 而BINGO导航和极限阈值两个子系统则采用了事件驱动方式.

2.3 任务粒度(R/C)分析

在分布式专家系统中需要把专家系统的功能合理地分解为若干个任务, 并把多个任务分配到多个处理器上并行执行, 共同完成问题求解. 一个任务在一片处理器上执行的时间开销主要由两部分组成, 一部分是任务用于推理求解的时间R; 另一部分是任务用于与其他处理器上的任务交换信息的通信时间C, 称比值R/C为任务的粒度(Granularity).

由于 ADES 系统中各子系统的功能相对比较独立,信息交互比较少,因此,用于处理器任务之间信息交换所开销的时间远小于用于推理求解所开销的时间,也就是说,ADES 系统属于任务粒度比较粗的系统。

3 基于加权模糊方法的推理机制^[1] (Deducing mechanism based on fuzzy method with weights)

在推理过程中,由于实际问题的证据和知识库中的知识含有不精确成分,因此本文所讨论的分布式专家系统中的各子系统均采用加权模糊推理方式,其理论基础如下。

在基于规则的专家系统中,规则被表示成:

$$R_1: E_{11} \cap E_{12} \cap \cdots \cap E_{1n_1} \rightarrow H_1$$

$$R_2: E_{21} \cap E_{22} \cap \cdots \cap E_{2n_2} \rightarrow H_2$$

...

$$R_m: E_{m1} \cap E_{m2} \cap \cdots \cap E_{mn_m} \rightarrow H_m$$

其中, E_{ij} 为前提条件项, H_i 为结论。在不精确推理中,为每条规则的前提、结论及规则本身引进了可信度的概念,但在选择可用规则时,采用前提完全匹配的原则,即数据库中的事实与规则条件完全匹配时,才能运用规则,从而推出结论。然而,实际上,一条规则的前提的各条件项的重要性是不相同的,因此,应该把这种重要性施加于规则之上。为此,把规则表示成如下形式:

$$R_i: [(W_{i1}, (E_{i1})/T_{i1}) \cap (W_{i2}, (E_{i2})/T_{i2}) \cap \cdots \cap (W_{in_i}, (E_{in_i})/T_{in_i})] \xrightarrow{CF_i} (H_i) \quad (1)$$

其中, $W_{ij} \geq 0$, 且 $\sum_{j=1}^{n_i} W_{ij} = 1$, W_{ij} 表示 E_{ij} 的重要性度量,即权; $0 \leq T_{ij} \leq 1$, T_{ij} 为条件项 E_{ij} 的真度; $0 \leq CF_i \leq 1$, CF_i 为规则 R_i 的可信因子。另外选定一个阈值 τ ($1/2 \leq \tau \leq 1$), 若规则 R_i 满足: $T_i = \sum_{j=1}^{n_i} W_{ij} \cdot T_{ij} \geq \tau$, 则规则 R_i 可选择。规则 R_i 的运用可推出结论 H_i 具有真度: $T(H_i) = CF_i \times T_i$ 。

上述推理方式避免了完全匹配的限制,有利于推出可信程度较高的结论。

4 专家系统的实现方法 (Realization method of the expert system)

4.1 基于 LISP 语言的软件实现方法^[2]

通常在 LISP 中,一个规则库的存储结构是一个分层结构的表。若规则库有 N 条规则,则规则库表就有 N 个顶层元素,每个顶层元素是一个规则子表,每个规则子表有 3 个元素,分别是规则名、包含 if 在内的规则前件和包含 then 在内的规则后件。一条规则的前件和后件是规则库表的第 3 层子表,前件子表和后件子表的第 1 个元素分别是 if 和 then,其余元素分别是规则前件中的多个条件和后件中的多个结论。

本文所讨论的专家系统为了构造式(1)所表示的规则,在前件子表中嵌入第 4 层子表,用于顺序存储条件项、条件权和条件真度;在后件子表中嵌入第 4 层子表,用于顺序存储结论项和结论可信度。

下面使用 setq 函数把 N 条规则写入一个规则库,直接将这 N 条规则组成一个表赋值给一个规则库符号名。

(setq rules

((rule1

(if ((E₁₁ W₁₁ T₁₁) (E₁₂ W₁₂ T₁₂)

...

(E_{1n₁} W_{1n₁} T_{1n₁}))

(then ((H₁ CF₁))))

(rule2

(if ((E₂₁ W₂₁ T₂₁) (E₂₂ W₂₂ T₂₂) ...

(E_{2n₂} W_{2n₂} T_{2n₂}))

(then ((H₂ CF₂))))

...

(ruleN

(if ((E_{N1} W_{N1} T_{N1}) (E_{N2} W_{N2} T_{N2})

...

(E_{Nn_N} W_{Nn_N} T_{Nn_N}))

(then ((H_N CF_N)))))

用 LISP 语言编制的产生式系统中,使用 setq 函数把已知的 M 条初始事实赋值给事实表 facts 构成综合数据库:

(setq facts

((fact1) (fact2) ... (factM)))

针对本文第 3 节所提出的加权模糊推理方法,利用 LISP 语言编制一个正向推理机,其中冲突消解策略是:若有多条可用规则,则按可用规则在规则表 rules 中的顺序选择第一条可用规则。

正向推理机函数 deduce 的表达式和功能如下:

函数表达式: