

可变体机翼多物理场分布式光纤集成测试技术*

Multi-physical Integrated Testing Technology Based on Distributed Optical Fiber Sensor of Morphing Wing

徐海伟 曾捷 张晓丽 梁大开 / 南京航空航天大学

摘 要: 介绍了可变体机翼技术和可变体机翼多物理场光纤集成测试技术的研究现状。

关键词: 可变体机翼; 多物理场; 光纤; 测试

Keywords: morphing wing; multi-physical; optical fiber; testing

0 引言

可变体机翼通过分布在其内部的智能传感系统、分析与决策系统以及驱动机构,实现翼型的自适应改变。国内外相关技术和研究的发展趋势表明,“可变体”是未来飞行器性能改善的重要技术途径。从发达国家探索可变体机翼的研究历程来看,可变体机翼多物理场耦合机制及信息分布特征提取技术研究能够为新型可变翼体结构设计和翼型控制提供可靠的参考依据,因此针对可变体机翼的探索与实现必须和先进的飞行试验、监控与测试新原理、新方法紧密联系起来。

1 可变体机翼技术研究现状

可变体机翼具有翼型自适应能力,它可以随着马赫数、迎角、大气扰动和任务(如机动、巡航、盘旋)等飞行条件的变化自适应改变机翼形状。通过按需变形,可以有效改善翼面流场、延缓气流分离、增加升力、减少阻力,从而提高飞行器机动性和载荷能力,抑制气动噪声与振动,并能改善雷达探测的散射截面从而有利于飞行器的隐身。因此在众多新概念飞行器中,特别希望能够研制出类似于蝙蝠的“可变体飞行器”。可变体机翼技术需要集合飞行性能、推进技

术、结构、材料、气动力和飞行控制系统等多门学科,并综合考虑飞机的飞行控制系统、结构柔性、空气动力相互耦合因素。目前,国内外有关可变体机翼的研究主要有基于智能材料结构驱动技术和基于柔性机构技术两类。

智能材料结构又称机敏结构,是将传感、控制及驱动元件等紧密融合在材料或结构中,通过机械、热、光、化学、电、磁等激励和控制,使结构除具有承受载荷的能力外,还具有识别、分析、处理及控制等多种功能。这种集传感器、驱动器、信号处理器和控制系统于一体的材

阻测量精度高、线性好,测温范围大,便于远距离传输,对温度响应是其电阻增量的变化,感温部分尺寸较大、热惯性较大,不适用点测温 and 温度变化快的场合。

热电偶可测量 $-200 \sim 1800^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度,个别情况也可以测量更高或更低的温度。与其他测温方法相比,其优点是准确度较高、测温范围较广、动态响应较快、便于远距离多点测量和自动记录,且结构简单、便于维护。缺点是热电

偶插入被测介质中会破坏温度场而引入测量误差,以及受热电极材料熔点的限制,其测温上限不能太高。

这三种测温方法是飞行试验测温领域中最实用有效的方法。科研试飞结果表明,所有测试数据都准确有效,可达到试飞的要求。

AST

参考文献

[1] 常健生.检测与转换技术[M].北

京:机械工业出版社,1998.

[2] 赵觉良.航空发动机气动参数测量[M].北京:国防工业出版社,1996.

[3] 张铁生.飞机试飞工作手册[M].北京:国防工业出版社,1998.

[4] 王昌明.传感与测试技术[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005.

作者简介:郭小波,工程师,主要从事飞机基础工艺、科研试飞工作。

料结构体现了生物特有的属性,从而使结构本身具备健康自诊断、环境自适应、损伤自修复的能力。基于智能结构技术的可变体机翼具有系统质量轻、灵敏度高、结构简单、气动性好等优点。但不足之处在于智能材料作动系统所产生的诱导应变通常不够大,效率也较低。将这一技术应用于整个实体机翼时,存在智能驱动器的行程不易测量,布置驱动器复杂等问题^[4,6]。

柔性机构是依靠构件元素具有的柔性输出全部(或部分)运动或力的机构。基于柔性结构技术的可变体机翼具有可减少构件数目、无间隙、震动或噪声小、无摩擦损耗等优点。该技术在实际应用中也存在一些问题,如反复变形容易引起疲劳破坏;对于集中柔性的柔性机构容易出现应力集中现象;大变形引起的非线性弹性变形会加大其分析和设计难度。此外,柔性机构对构件材料有较高的要求,但目前相关材料及其制作工艺还未能完全满足可变翼体柔性机构设计的要求;而且对于全柔性机构,其拓扑结构没有明显的规律,加工困难等一系列的问题给基于柔性机构自适应机翼的发展带来许多困难^[4-6]。

目前已有多个国内外航空研究小组在大力开展可变体机翼技术的研究。如美国空军实验室、空军材料总署和空军莱特-帕特森基地就智能材料在亚声速和跨声速自适应机翼上的应用进行了研究。亚声速自适应机翼的研究以F-18战斗机进行试验,对比了传统机翼与自适应机翼的性能差别,结果飞机的升力和滚动矩提高了10%^[6]。2003年,美国国防部高级研究规划局DARPA正式启动“可变体飞行器结构”计划,支持洛克希德·马丁公司、Hypercomp/ NexGen公司

等开展“可变体机翼”研究。再如,戴姆勒宇航公司与德国宇航研究院(DLR)提出了一种可变翼肋自适应机翼的构型。这种机翼的后缘能够平滑地连续变形,该机翼的升阻比较常规机翼的升阻比提高约17%^[7];在国内,南京航空航天大学陈勇等^[9]就电致伸缩材料作为自适应机翼驱动元件进行了研究,试验结果证明了模型的可行性。2008年,徐志伟等^[10]在国家自然科学基金资助下开展了“高超声速飞行器变体机翼基础研究”,并设计了一种基于SMA驱动的可变体机翼后缘分段结构,通过相邻后缘段之间安装的偏转驱动结构,使整体偏转通过后缘段累积效应实现,在此基础上制作该可变体机翼后缘的结构模型。2010年王帮峰等^[11]也相继开展了“基于智能柔顺变体机构的变体机翼基础研究”,提出了一种适用于变体机翼的具有主动变形能力的波纹式柔性蒙皮基体及相应制备方法。研究表明,当伸长量小于4%时,蒙皮基体线性伸长。在此范围内,可利用蒙皮自身的弹性使其恢复到原始形状,蒙皮基体自身产生的变形将大大降低变体机翼蒙皮变形时对驱动力的要求。

2 可变体机翼多物理场测试的意义

多物理场耦合是指在一个系统中,多个物理场交织在一起,互相影响,互相作用。可变体机翼在不同飞行姿态和条件下,其结构及驱动器受到力、电、磁、热等多物理场耦合作用。

一方面,可变体飞行器在不同的飞行姿态和外部条件下,不仅要承受复杂的外部载荷,其内嵌的驱动器件还要经受强电场、强磁场与高应力场的相互耦合作用,而且各种类型的功能材料(如形

状记忆合金、压电体、电活化及磁致伸缩材料等)性能也大都受到机载环境温度变化的影响;另一方面,基于压电材料、磁致伸缩材料、形状记忆合金等的智能变体机翼结构还存在多物理场耦合作用下的疲劳、损伤和断裂等失效问题,为实现对这些功能材料驱动性能的精确测量和控制,需要及时获取机翼翼表的应变场、温度场甚至磁场的分布信息,这些也能够为实现对机翼形变状态的有效检测和控制,并探索翼体智能结构在多物理场耦合作用下的失效机理提供理论和试验依据^[12-13]。2008年国家重点基础研究发展规划指南中明确提出“应研究飞行器结构的多物理场、多尺度和多不确定性的综合交叉基础”。

为实现变体机翼在多物理场耦合作用下的自适应动态变形功能,还面临如下困难。首先,随着翼体结构对物理场测试需求的增加,单点测量系统所获取的数据已经无法满足对于飞行器飞行环境物理场测量与分析的需求,而繁多的多场采集系统硬件设备存在测量灵活性差,系统的安全性和可靠性低的缺点,并严重限制了在需要进行多个物理场集成测试的场合。其次,可变体机翼依靠植于机构中的传感器感知机翼的应力、应变等信息,因其特殊的作用以及与机翼结构的特殊布置关系,要求传感器必须能和基体材料融为一体,对原材料影响小;尺寸小不影响结构外形;频率响应高、稳定性高且受外界干扰少,感知信号频带宽。因此研究具有多参量、高通量及自修复功能的新型机翼智能集成监测网络技术已成为时下关注的热点和难点。

3 基于分布式光纤传感网络的变体机翼测试技术的研究现状

光纤传感器是传感器技术发展的一个重要方向,包括目前实验室阶段的

* 航空科学基金资助项目(2008ZD52047); 611航空科研基金。

研究成果,已实现70多种物理量检测,应用前景非常广阔,如位移、压力、温度、速度、加速度、振动、转动、弯曲、应变、磁场、电压和电流等。光纤传感器不仅具有质量轻、直径细、体积小、耐腐蚀、便于组网等属性,还具有完美的传、感一体的独特优点,可以在同一根光纤上布置许多传感点,构成分布或准分布传感系统,从而大大简化智能材料结构中自诊断系统的复杂程度,光纤传感器被国内外的研究者们一致公认为最适合于构成智能材料结构中分布式自诊断网络的传感器类型。将光纤埋入结构中,可连续监测结构内部待测参数的变化情况,可满足结构监测高精度、远距离、分布式和长期性技术要求。目前国内外相关研究单位已积极开展基于智能材料结构的新型航空航天器多功能集成测试研究工作。

2010年,美国国家航空航天局(NASA)在一种改进的扑食者B无人机飞行器(NASA'Ikhana)翼表上,采用分布式光纤监测结构完整性,如图1所示。



图1 扑食者B无人机飞行器

研究表明,用光纤做翼表结构应变监测,既不影响飞行时空气动力学性能,又能实时、充分、安全地提供机翼形状信息。研究进一步说明,此试验通过光纤监测结构完整性,目的是发展机翼变形的主动控制,使飞行器在起飞、巡航和着陆时获得最优的空气动力学性能^[14]。此外,NASA还开展了一项光纤机敏结构与蒙皮计划,首次将光纤传感器埋入先进聚合物复合材料蒙皮中,用以监控复合材料应变与温度^[15]。美国诺斯罗普·格鲁门公司利用压电传感器及光纤传感器,监测具有隔段的F-18机翼结构的损伤及应变。洛克希德·马丁公司将光纤Bragg光栅传感网络应用于X-33航天飞机结构件的应力和温度的准分布监测^[16],如图2所示。美国波音公司在波音777采用光纤FBG光栅传感技术实现了对飞机温度、应力应变等物理参数的测试^[17]。

2006年,韩国Seung-Man Yang等^[18]在用形状记忆合金作成的驱动机构的某变形机翼根部埋入光纤FBG传感器,用



图2 粘贴于X-33航天飞机液氢燃料罐的分布式光纤传感系统

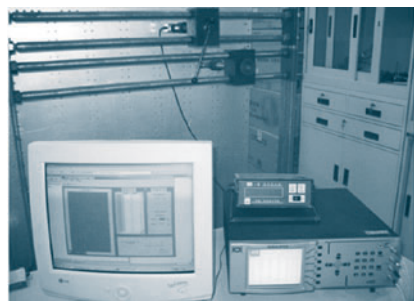


图3 基于分布式光纤传感网络的机翼合段监测系统

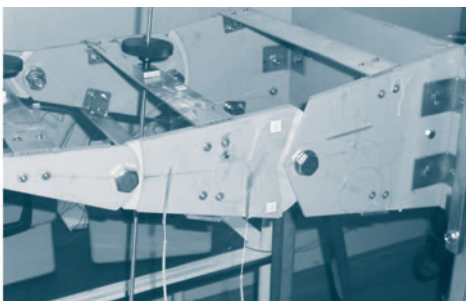


图4 基于分布式光纤传感网络的变体机翼应变场监测系统

于动态振动信号的测试。试验表明,翼型变化角度攻击时,该光纤传感系统能成功监测翼体动力学不稳定现象。2010年,德国宇航研究院(DLR)R.Konrath等^[19]研究用光纤传感测量技术对微小飞行器(MAV)在风洞低雷诺数、下滑飞行条件下的物理参量进行集成测试。该研究表明,通过光纤传感测量技术可以同时测得气动力学负荷、瞬态模型位置、机翼变形和流场分布。英国Cranfield大学还研制了一种基于光纤末端散斑干涉图像监测的飞机结构损伤监测系统^[20]。该系统采用直径200/230 μm 的多模光纤振动传感器,将其固定于碳纤维复合材料飞机结构件中进行空间光斑检测。当结构发生损伤时,外部扰动施加在光纤上,散斑发生变化(总强度保持不变)。

在国内,部分高校和科研机构也紧跟着国际研究前沿开展了相关研究工作。南京航空航天大学智能材料与结构健康监测研究所梁大开等^[21]以某型飞机机翼盒段为研究对象,构建了基于波分复用结构的分布式光纤Bragg光栅传感网络测量盒段试件应变监测系统,运用波长监测方法实现对盒段结构承受载荷情况的有效监测,如图3所示。结果表明,传感器的波长偏移与载荷成线性关系,传感器的最大载荷监测灵敏度达3.09 $\mu\text{m}/\text{N}$ 。哈尔滨工业大学杜善义院士等^[22-23]开展了光纤光栅传感器、EFPI应变传感器和基于熔锥形光纤耦合器的声发射传感器的研究,应用光纤传感器对复合材料结构固化过程进行监测,并对复合材料结构进行损伤识别,开展了复合材料压力容器的结构健康监测等研究工作。2010年,南京航空航天大学曾捷等利用多物理场耦合数值分析软件对可变体机翼后缘缩比模型进行应力场与温度场的耦合数值分析,并采用分布式光纤光栅传感阵列监测翼体结构关键部位应变分布情

况,如图4所示。通过数值仿真与试验测试研究了翼体结构在不同应力、温度场交叉耦合作用下的应变场变化趋势。

值得指出的是,目前常用于航空结构健康监测的光纤传感器主要有光纤F-P法铂腔传感器、光纤干涉型传感器和光纤Bragg光栅传感器等几类。光纤F-P法铂腔传感器尽管可以对结构温度和应变进行单点测量,但由于难以实现波分复用,因而不便于大尺寸航空结构件的健康状态监测。而干涉型光纤传感器在动态信号监测领域具有一定优势,但其同样因为存在难以组成分布式监测网络而使其应用受到限制。相比之下,光纤Bragg光栅传感器不仅采用波长调制,可以根据被测结构承载特点设计多种准分布式光纤传感网络拓扑结构(波分复用型、空分复用型及组合复用型),而且还可以根据被测参数特点(温度、应变、磁场等),设计不同的FBG敏感封装形式,并且光纤光栅解调设备采样通道和采样频率也在不断提高,因此基于分布式光纤FBG传感网络的航空结构多物理场监测技术应用潜力巨大。此外,随着光时域反射技术(OTDR)的飞速发展,美国sunrise通讯公司研制的新型高精度光时域反射计,将可以消除波分复用技术的带宽限制,实现真正意义的全范围分布式检测,该技术能够为监测裂纹引起的结构应变场变化提供帮助。

4 结束语

本文首先简述了国内外可变体机翼技术研究发展的现状和多物理场测试的意义。在此基础上,详细介绍了基于分布式光纤自诊断传感阵列可变体机翼多物理场集成监测技术研究现状。‘AST

参考文献

[1] Stanewsky E. Adaptive wing and

flow control technology [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2001, 37: 583–667.

[2] Samuel J, Pines D. Design and Testing of a Pneumatic Telescopic, Wing for Unmanned Aerial Vehicles [J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(4), 1088–1099.

[3] Ricci S. Conceptual Design of an Adaptive Wing for a Three Surfaces Airplane [A]. 46th. AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference [C]. Austin, Texas, 2005, 1–14.

[4] 杨志春, 谢江. 自适应机翼技术的分类和实现途径 [J]. 飞行力学, 2008(5).

[5] 黄则兵, 葛文杰, 马利娥. 柔性机构的研究现状及其在仿生领域的应用前景 [J]. 第十四届全国机构学学术研讨会暨第二届海峡两岸机构学学术交流会议论文集, 2004.

[6] 黄杰, 葛文杰. 自适应机翼的发展现状及其关键技术研究 [J]. 航空兵器, 2010(2).

[7] 裘进浩, 边义祥, 季宏丽等. 智能材料结构在航空领域的应用 [J]. 航空宇航制造技术, 2009(3).

[8] 李哲, 葛文杰, 王和平. 柔性变形机翼后缘拓扑优化设计 [J]. 计算机仿真, 2009年3月.

[9] 陈勇, 顾仲权, 陶宝祺等. 主动控制后缘附翼模型的实验研究 [J]. 振动工程学报, 2002(1).

[10] 杨媛, 徐志伟. 基于SMA的飞行器可变机翼驱动结构研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2010(1).

[11] 牟常伟, 王帮峰, 葛瑞钧等. 可主动变形的波纹式蒙皮基体制备及驱动特性 [J]. 兵器材料科学与工程, 2010(2).

[12] 杜善义. 近空间飞行器及其关键技术 [J]. 兵器知识, 2009.

[13] 方岱宁, 裴永茂, 高旭等. 电磁

智能材料多物理场耦合性能检测技术.

[14] Fedor Mitschke, Fiber-Optic Sensors [M]. Germany: 2010, 5: 247–256.

[15] 芦吉云. 光纤智能夹层自诊断系统研究 [D]. 2006.

[16] 袁慎芳, 邱雷, 吴建等. 大型飞机的发展对结构健康监测的需求与挑战 [J]. 航空制造技术, 2009(22).

[17] 常飞, 韩庆, 尚柏林. 光纤技术在军用飞机结构健康监测监控中的研究 [J]. 科学技术与工程, 2008.

[18] Seung-Man Yang. Characteristics of smart composite wing with SMA actuators and optical fiber sensors [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 23 (2006) 177–186.

[19] R. Konrath. Simultaneous Measurements of Unsteady Aerodynamic Loads, Flow Velocity Fields, Position and Wing Deformations of MAVs in Plunging Motion [J]. 2010.

[20] 奇共金, 雷洪, 景鹏. 基于先进传感器技术的航空材料无损检测进展 [J]. 航空制造技术, 2009(4).

[21] 芦吉云, 梁大开等. 基于准分布式光纤光栅传感器的机翼盒段载荷监测 [J]. 南京航空航天大学学报, Vol. 41 No. 2 Apr. 2009(2).

[22] 杜善义, 张晓晶, 陈吉安等. 光纤传感技术的研究现状及其发展前景 [J]. 宇航学报, 2004(4).

[23] 杜善义, 张博明. 飞行器结构智能化研究及其发展趋势 [J]. 宇航学报, 2007年04期.

作者简介: 徐海伟, 硕士研究生, 主要从事光纤传感及其结构健康监测研究。

曾捷, 副教授, 主要从事光纤传感及其结构健康监测研究。