

# RLV 热防护系统健康监测研究进展

杜善义, 解维华, 张博明, 汤 毅

(哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150006)

**摘 要:** 分析了热防护系统健康监测技术的现状和特点, 比较分析了基于压电陶瓷的几种典型的健康监测技术。指出了对于嵌入式的压电传感器, 基于能量和波的衰减建立的分析方法有效可行; 针对贴片式压电陶瓷检测系统, 介绍了基于模态分析的方法, 指出了不足。总结了今后的发展方向。

**关键词:** 热防护系统 (TPS); 结构健康监测; 压电陶瓷

**中图分类号:** V475.2; V525

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-1328(2007)01-0001-08

## 0 引言

为了减少航天器和航天员损失, 美国等西方国家从二十世纪 50 年代就开始航天器故障诊断技术研究。在二十世纪 70 年代提出了航天器集成健康管理 (IVHM) 这个概念, 航天器集成健康管理 (IVHM) 系统<sup>[1]</sup>就是一系列用来使航天器健康管理行为自动化的工具和行为过程的集合。它是集系统状态监测、故障诊断和故障修复为一体的集成健康管理系统。它包含地面健康管理 (IGHM) 系统和机载健康管理 (IVHM) 系统。但两者都是建立在各个子系统的健康监测基础之上的。在空间飞行器众多的监测位置中, 比如液体储箱, 热防护系统, 机翼结构, 迎风边缘, 推进结构, 着陆齿轮, 热防护 (TPS) 是最关键的位置。因为, 如果热防护系统中存在没有检测到的损伤, 将会导致灾难性的后果, 比如 2003 年 2 月, 美国的哥伦比亚航天飞机出事, 使 7 名航天员永远的留在了太空。为此美国政府为宇航局追加了 7 亿美元用以改进航天安全。其中用于开发在太空中, 检修航天飞机热防护系统损伤的技术方法就花费了大约 3800 万美元。前不久发射的发现号航天飞机, 在起飞的过程中曾有两片碎片从外挂的燃料箱上落下, 万幸的是没有砸到航天飞机上, 否则后果不堪设想。

热防护系统发展至今曾出现多种结构形式<sup>[2]</sup>, 包括各种隔热毡 (瓦) 形式、夹层结构形式、钛多层壁

结构、金属防热结构、C-C 面板的防热结构, 他们与机身结构的连接方式或者直接贴在表面上, 或者螺栓连接在机身上。金属热防护系统和 G-C 面板的防热结构被认为是最有发展潜力的防热形式, 是实现可重复使用飞行器 (RLV) 计划的关键技术, 他们的形式虽然不尽相同, 但是都需要采用机械连接方式与机身相连。

在恶劣的飞行环境中, 热防护系统可能面临多种形式的损伤, 例如, 连接螺栓的松动甚至脱落, 蒙皮的开裂、烧毁, 结构的温度过高, 涂层的破损, 面板的开裂等等。而任何一种失效形式的出现, 如果在发射前不能及时发现并处理, 都将会导致在再入的过程中, 热空气通过破损的热防护系统直接进入内部结构, 产生一系列的负面反应, 导致整个飞行器毁掉, 造成航天人员伤亡。

除了安全性的要求, 还有两个方面的要求迫切需要开发一个新的健康监测系统, 那就是节省费用和减少停飞时间。空间飞行器完成一次飞行后, 在下次飞行前必须进行检测、修补和替换。当前的维护工作主要依赖于手工, 航天飞机上大概有大约 20000 块防热瓦<sup>[3]</sup>, 现在完成一次检测得需要几个月的时间, 而且花费巨大。NASA 几年前开始研究第二代的 RLV, 目标是在中期将费用节省一个数量级, 长期计划是节省两个数量级<sup>[4]</sup>。而目前不管是军用还是商用飞行器, 其平均服役费用的 25% - 30%<sup>[3]</sup>都是花费在检测和修理上。在时间上的目标是要求

数天以后就可以实现再次飞行, 达到这两个目标的关键就是减少地面操作费用和时间, 开发更为经济、高效的<sup>[4]</sup>结构健康监测系统, 这些都促进了 TPS 健康监测研究的发展。

## 1 国内外研究现状

对于盖板式防热结构的健康监测研究, 主要有两个方面制约着它的发展: 一方面是它的应用环境, 另一方面是其复杂的结构形式。

从环境上看, 由于热防护系统的特殊应用环境, 使得对于它的健康监测存在着很大的难度, 概括起来主要是以下几个方面:

- (1) 如何选择合适的传感器, 使其能够检测所有损伤形式。
- (2) 如何在不改变现有结构形式的情况下, 将传感器集成到现有系统中。
- (3) 如何设计传感器, 使其对于结构性能影响最小, 质量增加最小, 费用增加最小。
- (4) 如何分布传感器的位置, 既保证其灵敏度, 又保证其安全。
- (5) 如何开发一个算法, 能够快速实现损伤检测。
- (6) 如何实现损伤的定位、定量化甚至对寿命做出估计。

从结构形式看, 目前盖板式防热结构主要是两种形式, 区别只是在于面板, 一种面板是碳/碳复合材料的, 或者碳/碳化硅的, 这种形式用于鼻锥以及机翼前沿等高温区域; 另一种面板形式是金属蜂窝夹芯板, 用于机身的大面积防热, 但是金属蜂窝夹芯板这种复杂形式使得健康监测更加的困难。

板式的 TPS 结构由于采用机械连接方式, 所以与粘接方式连接的 TPS 瓦相比, 更容易维护和检测。但是板式结构同样引发了螺栓松动问题, 集承载和防热功能于一身的面板的损伤也是一个大问题。热防护系统的损伤可以分为四个级别<sup>[5]</sup>: ① 支架底部的松动; ② 面板的松动; ③ 撞击; ④ 严重的板的损坏。如图 1 所示, 这四种级别是监测的主要部分。

国外这方面的研究工作主要集中在以下两个单位: 斯坦福大学(Fu-Kuo Chang; Jinkyu Yang and D. G. Watters); 美国的空军研究实验室协同代顿大学研究所(Mark Derriso, Steven Olson)。他们的研究对

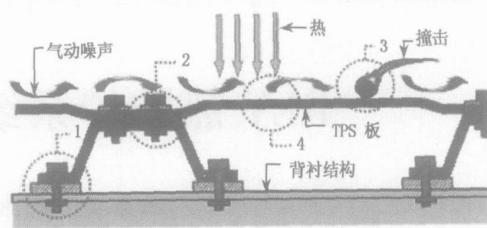


图 1 TPS 健康监测示意图

Fig. 1 Sketch map of health monitoring on TPS

象基本一致, 都是以支架结构的盖板式碳-碳防热结构为样件, 利用压电陶瓷传感器进行健康监测; 不同的是背衬结构的材料, 斯坦福大学 Jinkyu Yang, Fu-Kuo Chang 采用的是铝质, 而美国空军研究实验室的 Mark Derriso 采用的是金属钛。斯坦福大学的 Fu-Kuo Chang 及 Jinkyu Yang<sup>[5]</sup>提出了一种嵌入式的、分级的监测思想, 从能量角度, 利用小波分析对时域信号进行分析, 实现了螺栓松动的识别, 后来(05 年)提出了一种基于能量衰减<sup>[6]</sup>的分析方法。美国空军实验室的 Mark Derriso 利用结构的振动特性和模态进行频率响应分析, 用频率间隔作为结构健康监测的分类特性来检测螺栓松动失效。

在航天防热结构的健康监测上应用光纤传感器是研究的另一个热点。应用中的一个首要问题就是很难找到耐高温的光纤, 而且价格昂贵, 并且信号衰减很严重, 可用的仅仅是不带传感器的裸露的光纤; 第二个问题就是埋入的处理方法问题。在过去的一些研究工作<sup>[7-12]</sup>一直致力于将光纤埋入金属, 并取得了部分关键性的进展, 在此基础上 ESA(欧洲航天局)利用高速高压氧气燃烧技术试验验证了将光纤传感器埋入材料后经受极端热处理的可能性<sup>[3]</sup>, 从而提供一个结构健康监测方法。另外有一些相关的工作<sup>[13-18]</sup>致力于用兰姆波方法检测复合材料板及金属的损伤研究, 国内现在还没有类似的研究工作, 只有一些相关的基础研究。北京工业大学的高峰, 利用压电导率的变化, 对于梁结构的裂纹和螺栓松动定性的进行了研究<sup>[19]</sup>, 试验中将压电片贴在了螺栓附近。国防科技大学的杨光瑜, 采用压电陶瓷阻抗分析法<sup>[20]</sup>, 对梁结构的螺栓松动进行了研究。

## 2 基于压电陶瓷的 TPS 结构健康监测方法

损伤检测作为结构健康监测的基础, 长期以来

一直都是一个非常活跃的研究领域,检测的方法在数量上很多,但是从技术上可以分为基于模态分析的方法和基于试验信号处理的方法,基于试验信号处理的损伤检测方法不需要识别结构的动态参数,它是通过对比损伤结构与未损伤结构的响应信号、或者响应信号的某种特征参数来识别损伤。直接测量到的动态响应参数要经过处理才能提取到有用的特征参数,用于处理信号的方法很多,但总体上可以归为两类,一类是在时间域上,对响应信号进行分析。一类是求取信号的非时域特征,如信号峰值、能量积分,通过比较这些值识别结构的损伤。对于机械连接方式的盖板式防热板,总的检测思想是:利用投捕法(pitch-catch method)进行检测,即从制动器发送诊断波,然后传感器接收带有损伤信息的信号,通过损伤引起的信号变化分析结构的健康状态。

## 2.1 传感器的设计

防热系统特殊的应用环境要求传感器能够在不改变结构现有构型的情况下集成到结构中,能够实现的关键损伤的监测。斯坦福大学的 Fu-Kuo Chang 及 Jinkyu Yang 等人针对盖板式热防护系统提出了一种分级监测的思想<sup>[5]</sup>,即在不修改结构构型的情况下,充分利用压电陶瓷(PZT)既可以作为制动器又可以作为传感器的特性,来完成损伤检测。为了检测如图1所示的四种损伤形式,最初设计的传感器构型如图2所示,垫片中的两个圆柱为压电陶瓷材料,直径、高皆为6.35毫米<sup>[21]</sup>。在压电陶瓷的底部有一薄层的电极层,用以连接外部的电线,这种垫片结构易于集成到现有的系统中,同时满足良好的灵敏度和耐用性。对于级别1可以通过埋在一个垫

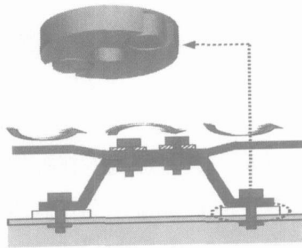


图2 第一代压电陶瓷传感器垫片

Fig. 2 First generation PZT-embedded sensor washer

片中的两个PZT完成,一个作为制动器,一个作为传感器。对于级别2,支架一端的一对PZT作为制动器,另一端的一对PZT作为传感器,诊断波沿支架

传播,如果面板连接处存在松动就能在响应信号中反映出来。与其他级别不同,级别3依赖于外部的激励源,使用被动的传感器网络进行检测,即将所有的PZT作为传感器来实现。级别4是指板的严重破坏,可以通过支架间的pitch-catch构型实现,一个支架中的4个PZT都作为制动器,而另一个支架的4个PZT都作为传感器。增加的制动器会提高远程的监测能力,也会提高系统的可靠性。

尽管第一代垫片经受住了噪声炉的试验验证,但是仍然暴露出一些问题:(1)耐久性的问题,第一代垫片中的PZT直接暴露在支撑结构的接触面上。那么在飞行中,传感器处在极端的机械载荷下会存在失效的可能性。(2)由于PZT与背衬结构直接接触,影响了传感器的灵敏度。(3)级别2损伤检测的灵敏度较低,而且存在级别1对级别2的干扰,当支架底部与面板处同时松动时,这种构型难以检测到面板的松动情况。因此,为了提高耐久性和灵敏度,必须修改第一代样件。

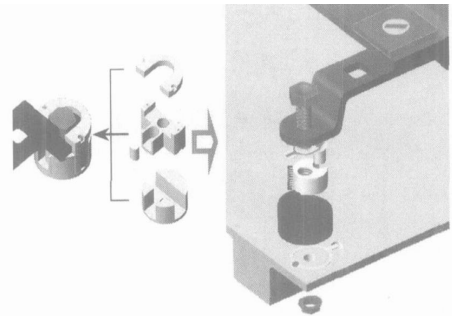


图3 第二代埋有PZT的传感器垫片

Fig. 3 Second generation PZT-embedded sensor washer

图3给出了第一代构型的修改型和最终的第二代垫片结构,修改型和第二代传感器垫片都是由几个部分构成的,埋入的PZT不需要直接接触支撑结构。对于这个新的构型,从制动器出来的诊断波主要沿着支架传播,不会像原来那样耗散到背衬结构中去,因此可以得到较高的灵敏度,同时减少了施加在PZT上的静压力,降低了传感器失效的可能性。第二代设计的另一个优点是:PZT传感器数量减少了一半,减少了信号分析的数据量,并易于布线。

## 2.2 算法

对于响应信号的一般的分析过程如图4所示,首先比较时域信号与基准信号的振幅,如果时域信

号没有发生变化,那么认为结构健康,无损伤存在。如果检测到时域信号发生了变化,那么进行相应的信号处理,根据损伤的特征参数进行判定,确定损伤形式及结构状态。对于盖板式的防热结构, Jinkyu Yang 和 Fu-Kuo Chang 通过比较不同扭力下对应的功率谱值,对于级别 1、2 的损伤进行了定性分霄。当检测到时域信号发生变化以后,进一步利用小波分析,经过一系列的离散小波变换,计算他们各自相对于基准信号的归一化的相关系数;如果相关系数的数值大于 1,损伤就是由支架的松动引起的,如果小于 1,就认为是面板的松动引起的。在不考虑时域信号增加的情况下,如果对射变换的值接近 1,则意味着两个地方都松了。

为了更为准确的确定螺栓松动的位置,并实现对松动大小的估计,必须开发新的算法。Jinkyu Yang 和 Fu-Kuo Chang 提出一种新的基于能量衰减的分析方法,这种方法是利用诊断波在时域内的衰减特性进行分析,不像振动法那样在频域范围内考虑结构的频率响应,当然波的衰减取决于螺栓连接处的接触材料以及扭矩的大小。

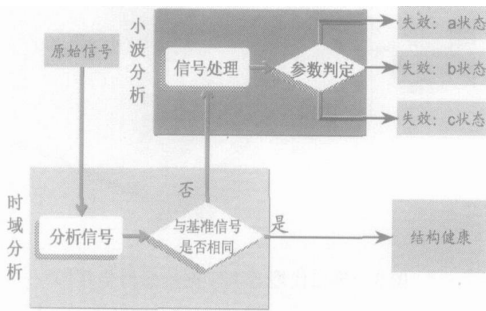


图 4 健康检测的流程图

Fig. 4 Flow chart of health monitoring procedures

与其他的检测方案相比,这基于衰减的方法在分析碳-碳防热板上有很多的优点。首先,由于波的衰减主要发生在传播路径上的局部区域,所以这个方法使得传感器的位置局部化,而振动法需要获得结构整体的信息。第二,衰减方法避免了困难的频域信号的处理,在衰减的方法中,当波穿过连接处发生衰减时,连接处螺栓松动的信息直接反映到传感器信号的时域衰减方式上。第三,既然采集信号的时域段较长,与其他短时测量的方法相比,比如飞行时间法<sup>[22]</sup> (time-of flight) 和相变位移法,衰减的方

法不依赖于测量设备的精度。

在损伤检测中,损伤的特征提取是一项关键技术。在基于衰减的分析方法中,对时域信号的螺栓松动信息的提取成为关键。由于传播信号在支架位置的衰减,记录的信号是大体上按照指数规律延迟的曲线,这样的信号可表示为:

$$y = A e^{-\beta t} \quad (1)$$

式中  $A$  是信号的振幅,  $\beta$  是衰减速度,因此可以通过跟踪传感器信号的衰减模式,即  $A$  和  $\beta$  的变化,推测出螺栓连接处的松动状态。对于一个实际的传感器信号,按指数衰减的曲线中  $A$  和  $\beta$  分别可以用能量和比衰减率代替,而响应信号的能量则可以表示成响应信号在时域  $[t_i, t_f]$  内的平方和的平均数:

$$E = \frac{1}{f_s} \sum_{t=t_i}^{t=t_f} V^2[t] \quad (2)$$

式中,  $f_s$  和  $V[t]$  分别为采样频率和离散的传感器信号。若定义比衰减率(SDC)为如下形式:

$$\Psi = \frac{\Delta W}{W} = \frac{a_{n-1}^2 - a_n^2}{a_{n-1}^2} \quad (3)$$

这里  $W$  是存储的最大弹性能,  $\Delta W$  是每周期的能量损失,  $a_n$  和  $a_{n-1}$  分别对应第  $n$  及第  $n-1$  个周期的振幅,由上式可得:

$$a_n = a_0 (1 - \Psi)^{n/2} \quad (4)$$

$a_0$  是第一振动波峰的振幅,上式表明第  $n$  个周期振幅的大小是比衰减率和时间的函数。利用窗口函数  $f[t]$  对响应的离散信号  $V[t]$  进行卷积变换:

$$V[t] = \frac{1}{N} \sum_{t'=0}^{N-1} V[t'] f[t-t'] \quad (5)$$

这里  $N$  是窗口中数据点的个数。移动平均的结果将会产生一个光滑的衰减曲线,对衰减曲线进行拟合就可以得到比衰减率。

提取出特征值-能量和 SDC 以后,就可以根据这两个特征值解释结构的状态。波在结构中传播之所以会发生能量的衰减,是因为结构中存在阻尼。阻尼可以分为两类,一类是结构的阻尼,能量的耗散出现在交接面,比如连接点和紧固件处;另一类是内部阻尼,能量的耗散是由于材料的非均匀性。从微观的角度看,所有机械加工的表面都是粗糙的,接触的表面都是一些有限的离散的接触面,实际接触的表面只是名义上的一部分。波的渗流和耗散仅仅出

现在实际接触的表面, 波渗流和耗散的能量正比于实际的接触面积, 而根据赫兹微接触理论可知实际的接触面积与所用的压力的平方根成正比, 因此随着接触压力的增大, 会形成较大的接触面积, 结果, 当能量以渗流和耗散的形式在实际接触面积损失后, 仅有较少的能量传给传感器。

材料固有的均匀性是决定内阻尼大小的一个关键因素, 如果材料内阻尼较低, 则波的衰减较慢, 较高的阻尼会引起传导波较快的衰减, 较慢的衰减波

的能量降低, 但是拧紧面板处螺栓意味着支架与较高内阻的碳- 碳板材料连接在了一起, 使得整体的 SDC 增加, 拧紧支架底部的连接点, 意味着支架与内阻较低的铝质背衬材料连接在了一起, 将会使得整体的 SDC 减少。

2.3 算例

对于面板处和支架处螺栓不同的扭距力大小, 利用方程 2 和方程 5 分析检测信号, 计算出对应的能量值和 SDC 值, 建立正交化的能量等值线图和 SDC 的等值线图, 如图 7a 和 8a。对于某一特定的板或支架松动状态, 比如正交化的能量值和 SDC 值分

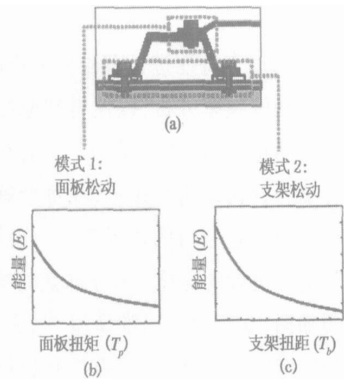


图 5 模式 1、2 中的能量变化 (a) 结构示意图 (b) 能量随面板扭矩的变化 (c) 能量随支架处扭矩的变化

Fig. 5 Variation of energy in modes 1 and 2

(a) Sketch map of structure (b) Torque of panel vs. energy (c) Torque of bracket vs. energy

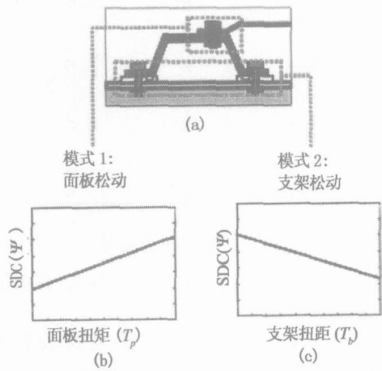


图 6 模式 1、2 中的 SDC 的变化 (a) 结构示意图 (b) SDC 随面板扭矩的变化 (c) SDC 随支架处扭矩的变化

Fig. 6 Variation of SDC in modes 1 and 2

(a) Sketch map of structure (b) Torque of panel vs. SDC (c) Torque of bracket vs. SDC

对应着较小的 SDC, 较快的衰减对应着较大的 SDC。SDC 在区分板松动和支架松动时具有关键的作用。如图 5、6 所示, 尽管两种情况拧紧螺栓都会使传递

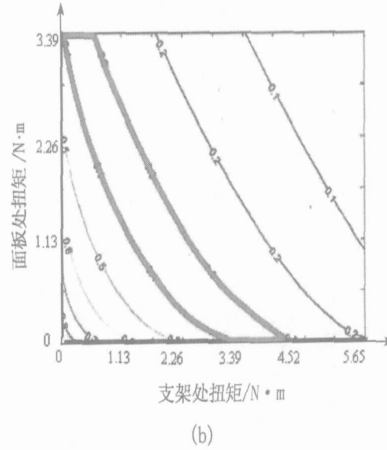
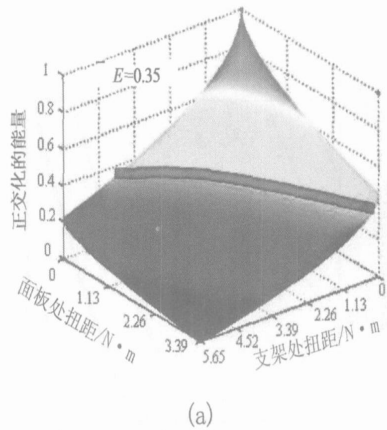


图 7 能量等值线 (a) 三维 (b) 二维

Fig. 7 Contour maps of energy (a) Three dimensional map (b) Two-dimensional map

别测得为 0.35 和 0.25, 图 7b 和图 8b 在能量和 SDC 图上分别给出了板/ 支架可能产生松动的区域。两个图叠加后即可得到一个最为可能的点。对应某一松动状态, 叠加的图如图 9 所示, 在该松动状态图中高亮的点对应着大约 2.82- 3.95N·m 的支架扭矩,

0- 0.56N·m 的面板扭矩。在美国空军研究中心进行的噪声振动试验表明: 建立的算法能够很好的可以成功的识别模拟环境下的失效模式。

3 基于模态分析的方法

这种方法的检测思想是: 认为结构的损伤会改变结构的物理特性, 比如质量、阻尼, 和刚度, 而这些又影响着模态参数, 如固有频率, 固有振型, 模态阻尼。Mark Derriso 基于模态分析方法<sup>[23]</sup>对从理论上对热防护系统的健康状态进行了分析, 分析中认为螺栓的松动会影响连接处的刚度, 进而会影响结构的动态特性, 从而利用测得的振动响应来检测螺栓是否松动、失效。

利用结构的动态特性进行有限元分析时, 首先进行一系列的自然频率分析, 以便得到原始结构和损伤结构的振动特性和振型。在有限元分析模型中可以不包含金属背衬结构和螺栓, 在每个螺栓的位置施加固定的或者是自由的边界条件, 分别对应未损的或者是完全失效的螺栓。对于防热结构的模态分析可采用如图 10 所示的二维模型<sup>[24]</sup>, 在 15 个螺栓位置施加固定的边界条件, 模拟没有损伤的结构状态。若释放一个位置的边界条件, 即可模拟失落一个螺栓的情况。计算表明若存在螺栓脱落则会出现新的振型。

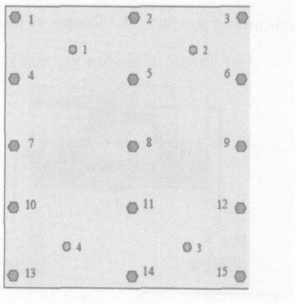


图 10 二维模态分析模型

Fig. 10 Model of two-dimensional modal analysis

试验时将四个压电陶瓷传感器安装在背衬上, 每个传感器都位于 TPS 板四个象限的中心。激励信号加在右上象限上, 其余的传感器记录响应。认为所有螺栓的预紧力大小为 2.26N·M 代表未损的情况; 损伤的情况是指将一个螺栓向逆时针方向旋转 1/4 周, 拧到这个程度可以认为移除了螺栓位置的所有压缩力。损伤的和未损时每种状态的平均传递函数, 虽然在整个的分析带宽内看起来很相似, 但是在某个特定的频率带宽内会出现不同, 将整个频率带宽内的传递函数振幅求和就可以得到它的结构特

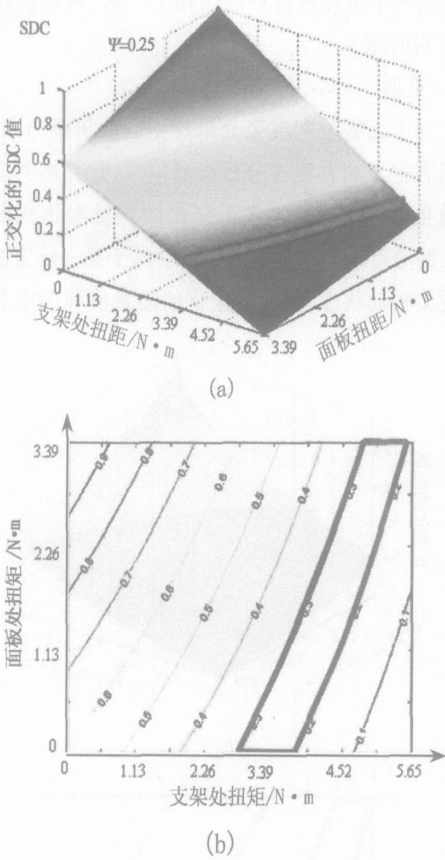


图 8 SDC 等值线图 (a) 三维 (b) 二维

Fig. 8 Contour maps of SDC (a) Three dimensional map (b) Two-dimensional map

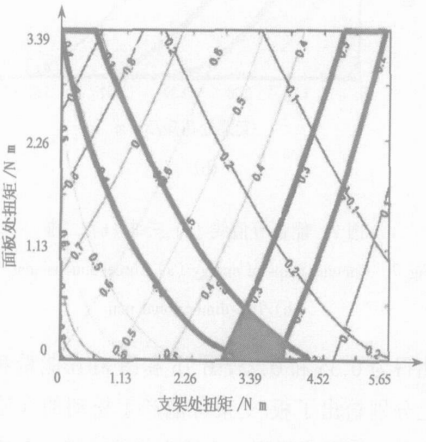


图 9 叠加结果

Fig. 9 The results of overlap

性。未损时结构的传递函数振幅要比受损时大。这种分析方法,只能从结构动态特性的变化指出结构是否受损,但是不能指出响应的位置。当损伤状态扩展到 15 个螺栓中任意一个螺栓丢失时,健康和损伤的状态则很难加以区分。

#### 4 热防护系统健康监测的发展趋势

Sohn 和 Farrar<sup>[25]</sup> 在 Rytter<sup>[26]</sup> 在研究基础上提出了损伤检测的 5 个层次:(1) 识别出结构中是否有损伤产生;(2) 确定损伤的位置;(3) 识别损伤的类型;(4) 损伤严重程度的量化;(5) 估计结构的剩余寿命。而目前开展的研究,特别是热防护系统健康监测方面的研究,都局限于前两个层次;Fu-Kuo Chang 和 Jinkyu Yang 基于能量的衰减和比衰减率的变化对螺栓的松动给出了定量的估计,但是尚未达到真正量化的程度。因此,对于其他损伤类型的判断、损伤程度的量化以及剩余寿命的预测是未来研究的重点。

目前的研究方法主要是依赖于对试验信号的处理,因此对于信号处理方法的研究是研究发展的一个方向。当然若想从本质上实现结构的健康监测,必须深入分析结构形式和材料,了解损伤机理,掌握损伤对检测信号的影响情况,从理论分析上实现对损伤信号的解释。目前这方面的研究很少,将是今后研究工作努力的方向。

Frank S. Milos, David G. Watters<sup>[3,27]</sup> 开发了被动式 SensorTag 装置, Frank S. Milos 和 K. S. G. Karunarathne<sup>[28]</sup> 开发了主动式的 SensorTag 装置。它是一种利用集成在射频识别电路上的微片记录温度等信息的传感器装置,利用无线传输方式实现与外部的通讯。他们实现的主要是对温度的监测,未来的研究必然向无线通讯、传感器的微小化、传感器的多功能化方向发展。

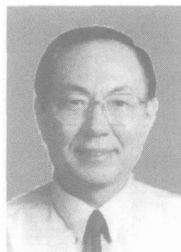
#### 参考文献:

- [1] 龙兵, 孙振明, 姜兴渭. 航天器集成健康管理系统研究[J]. 航天控制, 2003, 2[ LONG Bing, SUN Zhen-ming, JIANG Xing-wei. A study of integrated vehicle and ground health management technology for spacecrafts[J]. Spaceflight Control, Feb 2003]
- [2] David E. Myers, Carl J. Martin, and Max L. Bloss. Parametric weight comparison of advanced metallic R]. Ceramic Tile, and Ce-

ramic Blanket Thermal Protection Systems, NASA TM 2000

- [3] Frank S. Milos, David G. Watters, Joan B. Pallix. Wireless sub-surface micro sensors for health monitoring of thermal protection systems on hypersonic vehicles[R]. Proc. SPIE Vol. 4335
- [4] Antonio Paolozzi, Ferdinando Felli, Teodoro Valente. Preliminary tests for an intelligent thermal protection system for space vehicles [R]. Proc. SPIE Vol. 4234
- [5] Jinkyu Yang, Fu-Kuo Chang, Mark M. Derriso. Design of a built-in health monitoring system for bolted thermal protection panels[R]. Proc. of SPIE Vol. 5046
- [6] Jinkyu Yang, Fu-Kuo Chang. Verification of a built-in health monitoring system for bolted thermal protection panels[R]. Proc. of SPIE Vol. 5765
- [7] Asanuma H, Ichikawa K, Kishi T. Health monitoring of a continuous fiber reinforced aluminum composite with embedded optical fiber[J], Journal of Intelligent Material System and Structures, 1996, 7(1): 301 - 31
- [8] Haga o, Asanuma H, Koyama H. Mechanical and optical properties of optical fiber embedded super hybrid material. Advanced Composite Materials, 1998, 7(3): 239- 248
- [9] Paolozzi A, Felli F, Brotzu A. Embedding optical fibers into cast aluminum alloy[R]. Applied Mechanics in the Americas, Vol. 7, Proc. of PA CAM V/DINAME 99, Brazil, pp. 639- 642, Jan 1999
- [10] Asanuma H, Haga O, Ishii T, Takemoto K, Kurihara H and Ohira J. In-situ formation of sensor and actuator in polymer and metal based composites[R]. International Conference on Smart Materials, Structures and Systems, Bangalore, India, 79- 86, Jul, 1999
- [11] Paolozzi A, Felli F, Caponero M A. Global temperature measurement of aluminum alloy specimens with embedded optical fibers[R]. Structural Health Monitoring 2000, Ed. Fu-Kuo Chang, Proc. of 21st International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, pp. 257- 264, Sept., 1999
- [12] Felli F, Paolozzi A, Caponero M A. Fabrication of intelligent aluminum matrix composite[R]. Aluminum Transaction, Vol. 2, No. 2, pp. 189- 194, 2000. Proc. SPIE, Vol. 4234 167
- [13] Diamanti K, Hodgkinson J M, C. Soutis detection of low-velocity impact damage in composite plates using lamb waves[J]. Structural Health Monitoring. 3(1): 0033- 41
- [14] Seth S Kessler, S Mark Spearing, Constantinos Soutis. Damage detection in composite materials using lamb wave methods[J]. Smart Mater. Struct. 11 (2002) 269- 278
- [15] Jeong-Beom Ihn, Fu-Kuo Chang. Detection and monitoring of hidden fatigue crack growth using a built-in piezoelectric sensor/actuator network: I. Diagnostics[J]. Smart Mater. Struct. 13 (2004) 609- 620
- [16] Jeong-Beom Ihn, Fu-Kuo Chang. Detection and monitoring of hidden fatigue crack growth using a built-in piezoelectric sensor/actuator network: II. Validation using riveted joints and repair patches. Smart Mater. Struct. 13 (2004) 621- 630

- [17] Tierang Liu, Martin Veidt, Sriawat Kitipornchai. Modeling the input-output behavior of piezoelectric structural health monitoring systems for composite plates[J]. *Smart Mater. Struct.* 12 (2003) 836–844
- [18] Jeong-Beom Ihn, Fu-Kuo Chang. Multi-crack growth monitoring at riveted lap joints using piezoelectric patches[R]. *Proc. SPIE Vol.* 4702
- [19] 高峰, 王德俊. 压电阻抗技术用于螺栓松紧健康诊断[J]. *中国机械工程*. 2001, 12(9) [GAO Feng, WANG De-jun. Bolt loosening diagnosis using piezoelectric impedance technology[J]. *Mechanical engineering of China*. Sep 2001, 12(9)]
- [20] 杨光瑜. 基于 PZT 阻抗分析的结构健康监测技术研究[D]. 2002, 国防科技大学 [YANG Guang-yu. The research of structural health monitoring using piezoelectric impedance technology [D]. 2002. National University of Defense Technology]
- [21] Jinkyu Yang, Fu-Kuo Chang, Mark M, Derriso. Design of a hierarchical health monitoring system for detection of multilevel damage in bolted thermal protection panels: a preliminary study[J]. *Structural Health Monitoring*. 2(2): 115–122
- [22] Calvin S. Wang, Fu-Kuo Chang. Diagnosis of impact damage in composite structures with built-in piezoelectrics network proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering, 2000, 3990: 13–19
- [23] Mark Derriso, William Braisted, John. The structural health monitoring of a mechanically attached thermal protection system[J]. March, 2004. AB/INFORM Trade & Industry. Pg. 36
- [24] Mark Derriso, Steven Olson, William Braisted. Detection of fastener failure in a thermal protection system[R]. *Proc. of SPIE Vol.* 5390
- [25] Sohn Hoon, Farrar Charles R. Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals[J]. *Smart Materials and Structures*. 2001, 10: 446–451
- [26] Rytter A, Krawczuk M, Kirkegaard P H. Experimental and numerical study of damaged cantilever[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 126(1): 60–65
- [27] Watters D G, Jayaweera P, Bahr A J. Design and performance of wireless sensors for structural health monitoring[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, v 17, n 3–4, March/April, 2004, p 393–408
- [28] Frank S. Milos, K. S. G. Karunaratne Active wireless temperature sensors for aerospace thermal protection systems[J]. *Proc. of SPIE Vol.* 5047



作者简介: 杜善义(1938–), 男, 哈尔滨工业大学教授、博士生导师, 中国工程院院士, 中国科协委员, 国际复合材料委员会执委, 现主要从事复合材料、固体力学、航天结构、智能材料与结构等领域的研究。  
通信地址: 哈尔滨市南岗区一匡街 2 号哈工大科学园 A 栋 3010# (150006)  
电话: (0451) 86412259

## Development of Health Monitoring Technology for Thermal Protection Systems

DU Shan-yi, XIE Wei-hua, ZHANG Bo-ming, TANG Jun

(Center for Composite Material, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China)

**Abstract:** Current status and characteristic of health monitoring technology of thermal protection system was analyzed. Several typical technologies based on the PZT were compared in this study. It was indicated that the analysis method based on the energy and attenuation was feasible and effective; the modal analysis method for the stick-on PZT diagnostic system was introduced, the shortage of method was pointed out. The development direction was summed up.

**Key words:** Thermal protection system (TPS); Structure health monitoring; Piezoelectric ceramics