DINCON 2011
10ª Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações
28 de agosto a 1º de setembro de 2011

UMA ABORDAGEM HIERÁRQUICA AO MÉTODO HÍBRIDO DE IDENTIFICAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS.

Leonardo B. L. Santos [1], *Leonardo D. Chiwiacowsky* [2], *Haroldo F. Campos-Velho* [3]

[1] Bolsista FAPESP de mestrado em Computação Aplicada (CAP), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, Brasil, santoslbl@gmail.com
[2] Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, Brasil, ldchiwiacowsky@unisinos.br
[3] Laboratório Associado de Computação Aplicada (LAC), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, Brasil, haroldo@lac.inpe.br

Resumo: Foi desenvolvida uma estratégia hierárquica, que melhora de forma significativa o desempenho na identificação de danos estruturais com o emprego do método híbrido (Algoritmo Genético + Formulação Variacional). A estratégia hierárquica neste estudo de caso necessitou de até 11 vezes menos tempo de processamento que a abordagem padrão.

Palavras-Chave: Aplicações de Engenharia, Problemas Inversos em vibração, dano estrutural.

1. INTRODUÇÃO

O problema direto em oscilações mecânicas é caracterizado pelo conhecimento das propriedades mecânicas da estrutura tendo como respostas observáveis dinâmicos. Um problema inverso em vibrações é expresso quando procura-se identificar alguma propriedade do sistema a partir de dados observacionais.

Por efeitos de uso ou intemperismo as propriedades mecânicas de uma estrutura podem sofrer alterações – tais mudanças nas propriedades de rigidez geram alterações detectáveis na resposta vibratória do sistema e é possível o monitoramento da integridade estrutural (*structural health monitoring* - *SHM*) por avaliação não-destrutiva (*non-destructive evaluation* - *NDE*). O confronto do valor de rigidez estimado (a qualquer tempo) com o apresentado no projeto da estrutura (configuração íntegra) permite inferir a presença de dano estrutural no sistema em avaliação [1,2].

Uma estratégia híbrida para detecção de danos foi recentemente proposta [3]. Naquela abordagem, a estimativa inicial necessária para o Método do Gradiente Conjugado (MGC) - formulação variacional resolvida via equação adjunta [4,5] - é obtida por um Algoritmo Genético Epidêmico (AGE). Este método foi aplicado pela primeira vez por Chiwiacowsky et al. em 2003 [6], e utilizado em problemas de detecção de danos em estruturas modeladas de forma discreta e contínua [7-10] e em um problema de tecnologias espaciais (detecção de danos em Estação Espacial Internacional [11]). O esquema foi aplicado também ao projeto ótimo (*optimal design*) de estruturas [12]. A robustez do método híbrido foi avaliada em relação à quantidade de elementos danificados e também em relação à intensidade do dano [1].

O objetivo central do presente artigo é desenvolver uma estratégia que possa melhorar o desempenho na identificação de danos estruturais, com o emprego do método híbrido, com a aplicação de uma abordagem hierárquica para avaliar os diferentes domínios em que os danos podem estar presentes.

2. METODOLOGIA

O modelo direto é apresentado e a solução na forma de elementos finitos é discutida. Após, uma breve descrição do algoritmo do método híbrido e da abordagem hierárquica é proferida a seguir. Maiores detalhes do método podem ser encontrados em [1,3,5].

2.1 – Discretização da estrutura em elementos finitos

Como fundamento para a solução de elementos finitos emprega-se o princípio dos trabalhos virtuais, que diz que para assegurar o equilíbrio de um corpo é necessário que para qualquer pequeno deslocamento virtual imposto ao corpo em seu estado de equilíbrio - e compatível com as condições de vínculo - o trabalho virtual interno total deve ser igual ao trabalho virtual externo total (princípio de conservação) [13].

O elemento finito do tipo barra é destinado a sistemas os quais apresentam vibrações longitudinais. A superposição das matrizes elementares (via blocos na diagonal principal), com aplicação das condições de contorno, dá origem à matriz de rigidez global da estrutura.

2.2 – Método Híbrido

O pseudo-código básico do AG utilizado é apresentado na Figura 1. O pseudo-código do operador epidêmico [14], que é adicionado ao algoritmo apresentado, é exibido na Figura 2, ficando interno ao laço *while*. Os resultados aqui apresentados foram obtidos aplicando o operador epidêmico a cada 5 gerações sem alteração na matriz de rigidez estimada.

Algoritmo 1 Algoritmo Genético padrão

```
inicializar Pop(t)
avaliar Pop(t)
while critério de parada não for satisfeito do
  t ← t + 1
  selecionar Pop(t) de Pop(t-1)
  aplicar crossover em Pop(t)
  aplicar mutação em Pop(t)
  avaliar Pop(t)
end while
```

Figura 1: Pseudo-código de um Algoritmo Genético padrão. FONTE: *Chiwiacowsky, 2005* [2].

```
Se (K*(t) = K*(t − 1)) então
    cont_epidemia ← cont_epidemia + 1;
    Se (cont_epidemia > limite) então
        Aplicar o operador Epidemia sobre P(t);
    fim se
fim se
```

Figura 2: Pseudo-código do operador epidêmico a ser acoplado ao Algoritmo Genético inicialmente apresentado. FONTE: *Chiwiacowsky, 2005* [2].

2.3 – Etapas do Método de Gradiente Conjugado (MGC).

O Método de Gradiente Conjugado que será aqui utilizado é brevemente descrito a seguir em 7 passos, conforme em Santos (2010) [1]:

Passo 1: É escolhida uma aproximação inicial para a solução: matriz de rigidez inicial para o método iterativo. Tal escolha pode ser feita, por exemplo, tomando-se a matriz de rigidez da estrutura sem dano (dado de projeto).

Passo 2: Uso do problema direto (em qualquer domínio) como equação de restrição às possíveis soluções. De posse destas é calculada a função custo: distância entre a solução estimada e a proveniente do dado experimental. Tais soluções são funções do parâmetro a ser estimado, no caso, da matriz de rigidez. A distância utilizada no caso aqui apresentado foi a Euclidiana.

Passo 3: O problema é levado ao domínio dos multiplicadores de Lagrange via equação adjunta. É então calculado o gradiente da função custo com respeito à matriz de rigidez.A transformação do domínio é feita por uma sequência de integrações por partes, que removem as derivações dos termos do problema direto sem vínculo, colocando-as nos multiplicadores de Lagrange.

Passo 4: Determinação dos termos próprios do MGC: vetor direção descendente (p^k) e fator de ganho (γ):

$$p^k = -\nabla J^k \quad \text{se} \quad k = 0$$

$$p^k = -\nabla J^k + \gamma\, p^{k-1} \quad \text{se} \quad k = 1, 2, \ldots$$

$$\text{onde } \gamma = \frac{\|\nabla J^k\|_2^2}{\|\nabla J^{k-1}\|_2^2}.$$

Passo 5: Etapa principal do MGC: busca em linha na direção de p^k a fim de encontrar o valor do termo de comprimento descendente (β) :

$$\beta = Arg\ \min\ \varphi(r),$$

o qual deve minimizar a função escalar

$$\varphi(r) = J(\mathcal{K}^k + r\, p^k).$$

Passo 6: Atualização da solução estimada:

$$\mathcal{K}^{k+1} = \mathcal{K}^k + \beta\, p^k.$$

Passo 7: Incremento da variável de contagem das iterações, *k*, e avaliação do critério de parada (tipo Morozov [15]): distância entre dado observado e estimado menor que ε – este carrega a informação do nível de ruído (erro experimental) presente nos dados. Em todas as simulações aqui efetuadas usou-se ε = 0,05, isto é, 5% de ruído, do tipo gaussiano, multiplicativo no dado sintético.

2.4 – Abordagem hierárquica.

O método híbrido apresentou ótimos resultados em uma vasta gama de problemas [1,2,6-12], todavia, em casos de sistemas modelados com o uso de muitos graus de liberdade, a metodologia pode ser tornada mais eficiente. Uma possível solução para tal questão é: não usar uma discretização que provê muitos graus de liberdade, mas descrever a estrutura com o uso de um menor número de graus de liberdade (discretização mais grosseira) e seguir numa sequência de discretizações mais refinadas (maior número de elementos finitos, que implica em um maior número de graus de liberdade), cuja ordem sequencial de aplicação é dependente do encontro/descarte de dano em cada região.

Na busca hierárquica, a função objetivo varia de nível a nível, no sentido de que a cada nível hierárquico o número de pares de frequências comparadas é diferente: mais freqüências serão comparadas quando maior o grau de refinamento (nível hierárquico).

Compreendido que dano é uma alteração da rigidez da estrutura, para um determinado nível hierárquico, uma diminuição do valor da rigidez do material significa uma diminuição no módulo de Young. Dentre as diversas opções para a construção dos níveis hierárquicos iniciais, optou-se por uma que é condição suficiente para não prejudicar a detecção de dano e que é a mais simples possível. Nos níveis hierárquicos menos refinados, a presença de um dano é computada via uma média aritmética de rigidez (ou média dos módulos de Young) dos elementos do nível mais refinado. Sendo assim, a cada nível hierárquico o valor de rigidez é atualizado da seguinte forma: a área é mantida constante, o comprimento é ajustado linearmente, e o módulo de Young por média aritmética. Dessa forma, a discretização hierárquica, apesar de simplificar a estrutura, e possivelmente não representar algumas de suas características (como supressão de alguns modos), em nada

DINCON 2011
10ª Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações
28 de agosto a 1º de setembro de 2011

prejudica o objetivo central, ou seja, detectar danos estruturais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na abordagem padrão, o método híbrido é aplicado à barra teste, discretizada com N elementos finitos. Para se avaliar o dano em uma barra de 1 m de comprimento, efetuou-se a discretização com 32 elementos finitos (cada elemento terá tamanho de 1/32 = 3,125 centímetros).

Para simular uma estrutura danificada, os danos foram inseridos nos seguintes elementos: 4, 7, 13 e 16, com as seguintes intensidades: 10%, 5%, 20% e 10%, respectivamente (Figura 3). O método inverso é testado com dados experimentais sintéticos, considerando espectros experimentais, obtidos pela solução do problema direto, adicionando-se um ruído branco gaussiano de intensidade 5%.

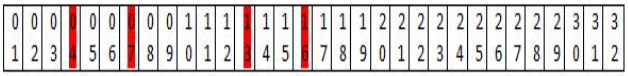

Figura 3: Barra discretizada em 32 elementos finitos. Presença de dano nos elementos 4,7,13 e16.

Para identificar os danos na barra, mostrada na Figura 3, é utilizado o método híbrido padrão e o método híbrido hierárquico. O processo híbrido hierárquico é descrito pelo seguinte procedimento:

- Dividir a estrutura em k partes, com $k < N$;
- Aplicar o método híbrido de avaliação de dano estrutural na barra discretizada em k elementos finitos;
- Para cada elemento i ($1 \le i \le k$), avaliar se o elemento apresenta dano. Se sim, então no próximo passo o elemento i será subdividido em k novos sub-domínios (elementos);
- O procedimento continua até o tamanho do menor elemento no passo presente ser igual ao menor refinamento estipulado.

Na Figura 4 é apresenta a sequência de avaliações para a barra-teste, usando a abordagem hierárquica com $k=2$. A seguir, é realizada a descrição detalhada em cada passo da busca hierárquica.

- Passo 1: A estrutura foi dividida em 2 elementos finitos. O método híbrido de estimação de dano estrutural foi aplicado e o resultado obtido foi: localizado dano no elemento-1: Dano(1)=1,375%, e no elemento-2 não foi detectado dano: Dano(2)=0%. Como no primeiro elemento foi encontrado dano, então no próximo passo este elemento será subdividido em outros 2 elementos; e como no segundo elemento não foi encontrado dano o elemento permanece inalterado (não será sub-dividido).

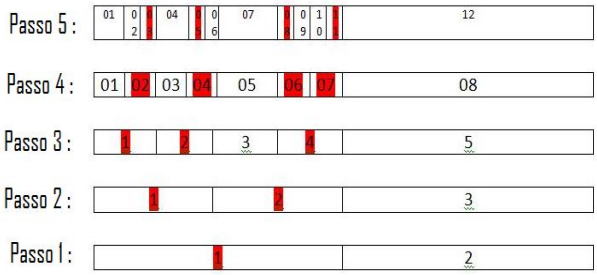

Figura 4: Diagrama com os 5 níveis hierárquicos (passos da abordagem): de baixo para cima.

- Passo 2: A estrutura neste passo tem 3 elementos, o primeiro e o segundo de mesmo tamanho e o terceiro com o dobro do tamanho dos outros. O resultado do método de estimação nela aplicado foi: Dano(1)=1.875%, Dano(2)=0.875%, Dano(3)=0%. Vale ressaltar que neste passo o elemento-3 é igual ao elemento-2 do passo anterior (de fato, Dano(3) deveria realmente ser nulo). Os elementos 1 e 2 (oriundos do elemento-1 do passo anterior) apresentaram dano, logo devem ser subdivididos.
- Passo 3: A estrutura tem 5 elementos. Os resultados da avaliação de dano foram: Dano(1)=2.5%, Dano(2)=1.25%, Dano(3)=0%, Dano(4)=1.75%, Dano(5)=0%.
- Passo 4: Os elementos 1, 2 e 4, do passo anterior, foram subdivididos cada um em dois elementos, ficando a estrutura com 8 elementos finitos. O método de identificação de danos forneceu os seguintes resultados: Dano(1)=0%, Dano(2)=5%, Dano(3)=0%, Dano(4)=2.5%, Dano(5)=0%, Dano(6)=1%, Dano(7)=2.5%, Dano(8)=0%.
- Passo 5: Neste passo há 12 elementos finitos, sendo que os elementos 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10 e 11 têm comprimento igual à precisão desejada para localização do dano, logo este deve ser o último passo da busca hierárquica, a copa da árvores de busca (busca semelhante à busca em largura). A avaliação de dano propiciou o seguinte resultado: Dano(1)=0%, Dano(2)=0%, Dano(3)=10%, Dano(4)=0%, Dano(5)=0%, Dano(6)=0%, Dano(7)=0%, Dano(8)=2%, Dano(9)=0%, Dano(10)=0%, Dano(11)=5%, Dano(12)=0%.

No último passo, o elemento-3 na abordagem hierárquica corresponde ao elemento-4 na abordagem padrão, da mesma forma, o elemento-5 corresponde ao elemento-7, o elemento-8 ao elemento-13 e o elemento-11 ao elemento-16. Portanto o resultado final, localização dos elementos

danificados e intensidade do dano, foram os mesmos obtidos via abordagem padrão.

O erro de estimação relativo médio, via abordagem padrão, foi de 1,34%, ou seja, 98,66% de eficácia na estimação (isto é, localização com 100% de acerto e intensidade com 98,66% de acerto), e na abordagem hierárquica o menor erro de estimação relativo médio foi de 0,07 – 99,93% de eficácia na estimação (localização com 100% de acerto e intensidade com 99,93% de acerto). Entretanto, enquanto a abordagem padrão demanda um TCPU (n) - tempo de computação da solução usando uma discretização com n elementos finitos – de TCPU(32)=1152 s; a busca hierárquica leva apenas 290 s (o tempo de CPU aqui é obtido somando-se os tempos de todos os passos intermediários: TCPU(2) + TCPU(3) + TCPU(5) + TCPU(8) + TCPU(12).

O TCPU do método híbrido não depende diretamente nem do número de elementos danificados nem da intensidade do dano, contudo a precisão da estimação é tão maior quanto menor o valor do dano, por isso a abordagem hierárquica não é apenas mais eficiente do que a abordagem padrão, mas também mais eficaz. Além disso, ela é mais promissora para operar com dados reais, uma vez que para uma pequena densidade de danos (razão entre número de elementos danificados e número total de elementos) a árvore gerada será estreita, no sentido de poucos vértices por passo.

Para o caso teste, com N=32, se for necessário aumentar a precisão, o que implica em aumentar o número N de elementos, por exemplo, N=64, o TCPU na abordagem padrão é 6125s, já na abordagem hierárquica o acréscimo ao TCPU será referente ao TCPU(12+4), que é de 247s, sendo o TCPU total, então, de 537s. A abordagem hierárquica é, portanto, mais robusta frente ao aumento da precisão necessária do que a abordagem padrão.

4. CONCLUSÕES

A abordagem hierárquica para o problema de identificação de danos estruturais foi apresentada e testada num problema de uma barra vibrante. A eficiência do método híbrido (MH) não depende da localização e intensidade dos danos, ou seja, o tempo de computação da solução depende apenas do número de elementos finitos na discretização utilizada. Já a eficácia do MH apresenta uma dependência frente ao número e intensidade dos danos, conforme discutido em [1]. Uma vez que, na busca hierárquica, as discretizações apresentam menos elementos danificados, com uma certa diluição da intensidade do dano, o resultado de estimação de dano é, realmente, melhor, ou seja, a busca hierárquica não é apenas mais eficiente que a estratégia padrão (discretização com grande número de elementos e homogênea), mas também mais eficaz.

REFERÊNCIAS

[1]PUB L. B. L. Santos, L. D. Chiwiacowsky, H. F. Campos Velho. Análise de robustez do método híbrido de estimação de dano estrutural. Anais do DINCON 2010.

[2] L. D. Chiwiacowsky (2005): Método Variacional e Algoritmo Genético em Identificação de Danos Estruturais. Tese de Doutorado em Computação Aplicada, INPE, São José dos Campos, Brasil.

[3] L. B. L. Santos (2011): Abordagem hierárquica ao método híbrido de estimação de danos em estruturas aeroespacias. Dissertação de mestrado em Computação Aplicada, INPE, São José dos Campos, Brasil.

[4]DOI O. M. Alifanov : Solution of an Inverse Problem of Heat Conduction by Iteration Methods, Journal of Engineering Physics, 26, 471–476 (1974).

[5]DOI O. M. Alifanov, V. V. Mikhailov : Solution of the Nonlineat Inverse Thermal Conductivity Problem by Iteration Method, Journal of Engineering Physics, 35, 1501–1506 (1978).

[6] L. D. Chiwiacowsky, H. F. de Campos Velho, P. Gasbarri (2003): The damage identification problem: a hybrid approach. Volume 2, Anais do DINCON 2003.

[7]DOI L. D. Chiwiacowsky, H. F. de Campos Velho : Different Approaches for the Solution of a Backward Heat Conduction Problem. Inverse Problems in Engineering, 11(3), 471–494 (2003).

[8] P. Gasbarri, L. D. Chiwiacowsky, H. F. de Campos Velho (2007): A comparison between frequency and time domain approaches for determining a structural damage using the adjoint method. Aerotecnica Missili e Spazio, 86(2), 53–69.

[9]DOI L. D. Chiwiacowsky, E. H. Shiguemori, H. F. de Campos Velho, P. Gasbarri, J. D. S. da Silva (2008): A Comparison of Two Different Approaches for the Damage Identification Problem. Journal of Physics: Conference Series (on-line), 124, p. 012017.

[10] L. D. Chiwiacowsky, H. F. de Campos Velho, P. Gasbarri (2006): A variational approach for solving an inverse vibration problem. Inverse Problems in Science and Engineering, 14(5), 557-577.

[11] D O I L. D. Chiwiacowsky, P. Gasbarri, H. F. Campos Velho (2008): Damage Assessment of Large Space Structures Through the Variational Approach. Acta Astronautica, 62(10–11), 592–604.

[12] DOI P. Gasbarri, L. D. Chiwiacowsky, H. F. de Campos (2008): A Hybrid Multilevel Approach for Aeroelastic Optimization of Composite Wing-box. EngOpt 2008 – International Conference on Engineering Optimization. Rio de Janeiro, Brazil.

[13] K. Bathe (1996): Finite Element Procedures. New Jersey: Prentice-Hall. 1033 p.

[14] F. L. L. Medeiros (2003): Algoritmo Genético Híbrido como um método de busca de estados estacionários de sistemas dinâmicos. Dissertação – INPE-CAP.

[15] V. Morozov, M. Stessin. Regularization methods for ill-posed problems. New York.