

Caracterização de uma mesa de 4 graus de liberdade e aplicação de controle ativo numérico

Characterization of a 4 degree of freedom workbench and numerical active control application

RESUMO

Matheus Franklin Savano
matheus.savano@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Edson Hideki Koroishi
edsonh@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

O presente trabalho é dedicado a caracterização e aplicação de controle ativo de vibrações em uma bancada de quatro graus de liberdade. A primeira etapa consistiu em obter um modelo representativo do sistema. Nesta etapa, foi aplicado um problema inverso baseado na Função Resposta em Frequência experimental para identificar os parâmetros desconhecidos da estrutura. Por fim, projetou-se os controladores utilizando o Regulador Linear Quadrático para a aplicação do controle ativo de vibrações. Os resultados demonstraram a eficácia da técnica de identificação e do controle LQR para a caracterização e atenuação de vibrações respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: Controle ativo de vibrações. LQR. Algoritmo Genético.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



ABSTRACT

THE PRESENT WORK IS DEDICATED TO THE CHARACTERIZATION AND APPLICATION OF ACTIVE VIBRATION CONTROL ON A FOUR DEGREE OF FREEDOM WORKBENCH. THE FIRST STEP CONSISTED OF OBTAINING A REPRESENTATIVE MODEL OF THE SYSTEM. IN THIS STEP, AN INVERSE PROBLEM BASED ON THE EXPERIMENTAL FREQUENCY RESPONSE FUNCTION WAS APPLIED TO IDENTIFY THE UNKNOWN PARAMETERS OF THE STRUCTURE. FINALLY, THE CONTROLLERS WERE DESIGNED USING THE QUADRATIC LINEAR REGULATOR FOR THE APPLICATION OF ACTIVE CONTROL. THE RESULTS DEMONSTRATED THE EFFECTIVENESS OF THE IDENTIFICATION TECHNIQUE AND THE LQR CONTROL FOR THE CHARACTERIZATION AND ATTENUATION OF VIBRATIONS RESPECTIVELY.

KEYWORDS: Active vibration control. LQR. Genetic Algorithm.

INTRODUÇÃO

Na engenharia, muitas são as áreas em que o estudo do fenômeno de vibração se aplica. Dentre essas áreas, podem-se destacar: projeto de máquinas, fundações, estruturas, motores e turbinas. O excesso de vibrações em componentes de máquinas ou estrutura pode causar uma série de consequências, como por exemplo: fadiga do material, aceleração do desgaste dos componentes, afrouxar elementos de fixação e gerar ruído excessivo (RAO, 2008).

Com isso, muitas pesquisas na área têm sido desenvolvidas a fim de atenuar vibrações, evitando assim, seus malefícios mencionados e otimizando os sistemas mecânicos. Dentre as técnicas para o controle de vibrações pesquisadas, tem-se o controle ativo de vibrações.

De maneira geral, o controle ativo consiste em produzir força de excitação no sentido contrário da vibração indesejada. Com isso, espera-se diminuir a amplitude do movimento oscilatório em um menor período de tempo (ANTHONY, 2000).

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta o uso de uma das técnicas de controle ativo, o Regulador Linear Quadrático (LQR), com o objetivo de analisar o comportamento do sistema proposto, visando a atenuação das vibrações.

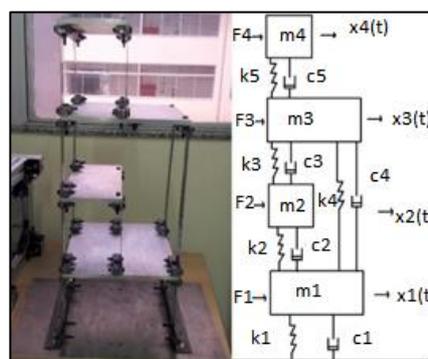
Para tal, o trabalho também apresenta a caracterização da bancada, que conta com o auxílio do algoritmo genético para a identificação dos parâmetros de rigidez e amortecimento experimentais, essenciais para a eficiência do método de controle.

MATERIAIS E MÉTODOS

A bancada de estudo foi fabricada com o auxílio do laboratório de usinagem da UTFPR Câmpus Cornélio Procópio. Essa bancada é um sistema de quatro graus de liberdade composto por quatro chapas de alumínio em uma estrutura metálica, ver figura 1.

Para retratar a rigidez e o amortecimento, utilizaram-se réguas de aço inoxidável.

Figura 1: Bancada experimental fabricada (à esquerda), representação esquemática do modelo (à direita)



Fonte: Autoria própria (2019).

A representação esquemática do sistema apresentado pôde ser realizada através de um sistema massa mola amortecedor. Essa representação pode ser vista também na figura 1. As equações que regem o movimento de cada massa do sistema foram determinadas. Para isso, foi feito o diagrama de corpo livre das forças atuantes para cada massa e utilizada a segunda lei de Newton, presente na Eq. (1).

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [Ca]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F\} \quad (1)$$

A partir da equação (1) modelou-se esse sistema mecânico em espaço de estados, que dentre as principais vantagens, destacam-se a capacidade de trabalhar com múltiplas saídas e poder abordar problemas no domínio do tempo (OGATA, 2010).

A modelagem do sistema físico no espaço de estados é dada pelas Eq. (2) e Eq. (3).

$$\{\dot{X}(t)\} = [A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (2)$$

$$\{y(t)\} = [C]\{x(t)\} + [D]\{u(t)\} \quad (3)$$

Onde, $[A]$ é a matriz de estados, $[B]$ a matriz de entrada, $[C]$ a matriz de saída, $[D]$ a matriz de transmissão direta, $\{x(t)\}$ o vetor de estados, $\{y(t)\}$ o vetor de saída e $\{u(t)\}$ o vetor da força de excitação externa.

No entanto, embora fossem conhecidos os valores de massa da estrutura ($m_1=3,55$ Kg, $m_2=2,165$ Kg, $m_3= 3,24$ Kg e $m_4=1,865$ Kg), não eram conhecidos os valores das variáveis de rigidez e amortecimento que compõe a matriz dinâmica $[A]$.

Dito isso, os parâmetros do modelo físico foram obtidos pela metodologia do problema inverso, que diferentemente do problema direto, em que as saídas do sistema têm como base entradas e parâmetros conhecidos, o problema inverso consiste em estimar ou identificar os parâmetros do sistema com base na entrada e saída conhecidas (REPINALDO, 2018).

A saída coletada experimentalmente para a identificação foi a Função Resposta em Frequência (FRF). Para tal, foram utilizados os seguintes equipamentos: acelerômetros e martelo de impacto da fabricante PCB Piezotronics, e placa modelo Data Physics Quattro. Para todas as respostas foram feitas médias de 5 medições.

Com as respostas do sistema no domínio da frequência coletadas, foi possível utilizá-las para identificação dos parâmetros desconhecidos faltantes por algoritmo genético (AG), ou seja, o software desenvolvido com o auxílio do Matlab® com o método de otimização por AG teve como objetivo estimar parâmetros de rigidez e amortecimento do sistema que gerassem FRFs simuladas próximas às obtidas experimentalmente.

O algoritmo genético é um método matemático pseudo-aleatório de otimização. Essa técnica recebe esse nome, pois seus mecanismos de busca se assemelham com as leis de Darwin e Mendel sobre a evolução das espécies (TEIXEIRA, 2001).

Para a busca da melhor solução dos parâmetros de entrada, usam-se etapas de seleção, mutação e substituição, onde o mecanismo de sobrevivência definido pode ser aplicado às soluções candidatas (GOLDBERG, 1989).

O espaço de projeto utilizado é apresentado na tabela 1. Em seguida, a função objetivo, ou seja, a função que otimiza todos os parâmetros para todas as FRFs simultaneamente é apresentada pela Eq. (4).

Tabela 1 – Espaço de projeto para otimização.

Parâmetro (unidade de medida)	Limite inferior	Limite superior
K1 (N/s)	6000	9000
K2 (N/s)	5000	10000
K3 (N/s)	3000	9000
K4 (N/s)	500	3000
K5 (N/s)	3000	7000
C1 (Ns/m)	7	20
C2 (Ns/m)	0	2
C3 (Ns/m)	0	2
C4 (Ns/m)	0	2

Fonte: Autoria própria (2019).

$$(F.O.) = \sum \left| \frac{FRF_{exp} - FRF_{num}}{FRF_{exp}} \right| \quad (4)$$

O AG teve como parâmetros de configuração: População de 200 indivíduos, número de gerações igual a 1000, taxa de cross-over de 0,8 e número de vezes simuladas igual a 100.

Por fim, com os parâmetros identificados para o menor valor da função objetivo, isso é, o menor valor de diferença entre as curvas experimentais e simuladas, deu-se início ao projeto de controle ativo de vibrações da estrutura.

O método de controle empregado, como mencionado anteriormente, foi o regulador Linear quadrático (LQR – do inglês *Linear Quadratic Regulator*), que se insere na categoria de controle ótimo. Esse sistema de controle se baseia em adotar um vetor de controle $\{u(t)\}$ tal que um dado índice de desempenho seja minimizado, ver Eq. (5). Assim, esse problema pode ser determinado por uma matriz $[G]$ do vetor de controle ótimo, como mostrado na Eq. (6) (OGATA, 2010).

$$J = \int_0^{\infty} (\{x(t)\}^T [Q] \{x(t)\} + \{u(t)\}^T [R] \{u(t)\}) dt \quad (5)$$

$$\{u(t)\} = -[G] \{x(t)\} \quad (6)$$

O índice de desempenho é composto por matrizes hermitianas ou reais simétricas e definidas positivas $[Q]$ e $[R]$, onde a matriz $[Q]$ interfere diretamente no desempenho dos estados do sistema e $[R]$ na força de controle.

Ao ajustar empiricamente as matrizes $[Q]$ e $[R]$ do controlador, buscou-se uma combinação que atenua a vibração excitada no menor tempo possível.

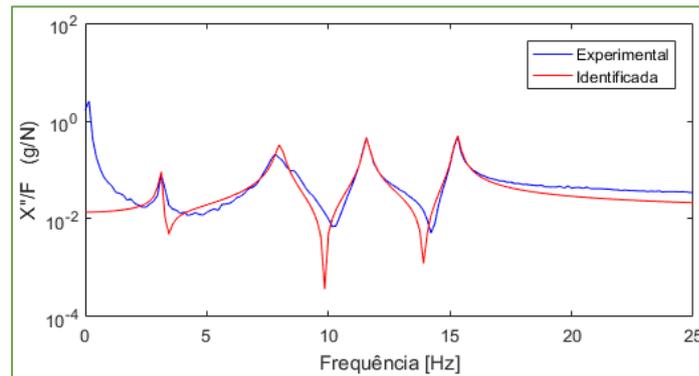
A força de excitação simulada foi de 31,23 N e foram considerados apenas os dois primeiros modos de vibrar para aumento da eficiência do controlador, reduzindo a força de atuação necessária.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros identificados com menor valor da função objetivo foram: $k_1 = 6844,8$ N/s; $k_2 = 7987,81$ N/s; $k_3 = 6146,98$ N/s; $k_4 = 1072,88$ N/s; $k_5 = 4941,79$ N/s; $c_1 = 15,497$ N*s/m; $c_2 = 0,248$ N*s/m; $c_3 = 6,9 \cdot 10^{-4}$ N*s/m; $c_4 = 0,009$ N*s/m; $c_5 = 0,009$ N*s/m.

A FRF identificada é apresentada na figura 2. Essa resposta é com base na combinação entre a força de excitação e aceleração da massa 1 da bancada.

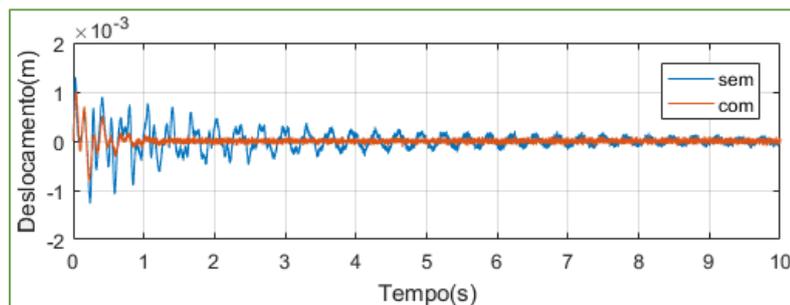
Figura 2 – FRF experimental e identificada.



Fonte: Autoria própria (2019).

Quanto ao método LQR para controle ativo de vibrações ativo, seu desempenho pode ser observado em uma das combinações de saída na figura 3. Nesse caso, a força de excitação e a saída em deslocamento são na massa 1 e a força de controle aplicada na massa 4.

Figura 3 – Deslocamento x Tempo, com e sem controle.



Fonte: Autoria própria (2019).

Para todas as combinações de respostas, o método de controle se mostrou válido. Quanto ao tempo de acomodação, os controladores posicionados na massa 1 ou 4 tiveram melhor desempenho, cerca de 1 segundo. No entanto, o controlador posicionado na massa 4 teve menor amplitude máxima da força de controle, em média 1,18 N.

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados nesse trabalho mostram a eficácia do método AG para a identificação de parâmetros desconhecidos em sistemas mecânicos. Além disso, a técnica de controle empregada (LQR) diminuiu consideravelmente o tempo de acomodação da estrutura quando submetida a vibrações.

Por fim, notou-se que a aplicação da força de controle aplicada na massa 4, de maneira geral, teve melhor eficiência, visto que, obteve bom desempenho com menores níveis de força utilizados.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à UTFPR e ao CNPq (Processo 402581/2016-4) por apoiar este trabalho.

REFERÊNCIAS

ANTHONY, D. K. Robust Optimal Design Using Passive and Active Methods if Vibration Control, 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – University of Southampton, Southampton.

GOLDBERG, D. E. Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning - University of Alabama, 1989.

OGATA, K. Engenharia de controle moderno: 5. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2010.

RAO, S. S. Vibrações Mecânicas: 1. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2008.

REPINALDO, J. P. Controle Modal aplicado a uma estrutura de 2 Graus de liberdade utilizando atuadores eletromagnéticos, 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio.

TEIXEIRA, R. L. Uma metodologia de projeto de controladores híbridos inteligentes com aplicações no controle ativo de vibrações mecânicas, 2001. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Uberlândia.