



REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE CONTROLE ATIVO DA SUSPENSÃO DE AUTOMÓVEIS

Fabiano Henrique de Paula
Aparecido Carlos Gonçalves

fabiano@dem.feis.unesp.br
cido@dem.feis.unesp.br

Universidade Estadual Paulista – UNESP – Departamento de Engenharia Mecânica
Caixa Postal 31 – 15385-000 Ilha Solteira, São Paulo, Brasil

Luiz Daré Neto

ldaren@feb.unesp.br

Universidade Estadual Paulista – UNESP – Departamento de Engenharia Mecânica
Bauru, São Paulo, Brasil

Resumo. *Vários estudos sobre sistemas de suspensão ativa em veículos vêm sendo realizados recentemente devido ao melhor conforto que estes proporcionam durante uma viagem (Hrovat, 1997; Ray, 1998; Yue et al, 1989). Um sistema de suspensão ativa é formado por sensores, servo-válvulas, atuadores e microprocessadores. O movimento vibratório do veículo é medido por sensores colocados na estrutura e nos componentes da suspensão do mesmo. O controle do sinal para regular a servo-válvula é determinado pelo processador que utiliza as medidas obtidas através dos sensores. De acordo com as medidas obtidas, o processador determina taxas diferentes de fluxo (implicando em diferentes pressões) para o atuador. O atuador por sua vez, controla a força do sistema de suspensão (Yoshimura & Isari, 1997). A forma do atuador muda muito e, de acordo com a sua localização e a modelagem do conjunto adotado, é que se classifica o sistema de suspensão (Lin, 1998). Mesmo o veículo real possuindo algumas incertezas e não linearidades, a geração de um sistema de suspensão ativa é, normalmente, feita através de uma modelagem linear. Neste trabalho é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema abrangendo o estado atual do desenvolvimento e as tendências futuras dos sistemas de suspensão ativa.*

Palavras-chave. *Suspensão Ativa, Controle, Vibrações, Conforto*

1. INTRODUÇÃO

Há muitos séculos o Homem vem se defrontando com problemas de transporte. Inicialmente, numa primeira fase, seus esforços foram dirigidos à construção de veículos que não dependessem de tração animal. Com a invenção da máquina a vapor (século XVIII), ocorreu sua instalação em veículos. Um triciclo a vapor, foi o primeiro a ser construído (França 1771). Esse triciclo iniciou um processo que não se interrompeu mais, isto é, a produção de automóveis (veículos com propulsão própria Yve et al, 1989; Yoshimua et al, 1990).

Nesse momento houve uma separação entre veículos com restrição de movimento (locomotivas) e veículos com liberdade de movimento, estes últimos que deram origem aos atuais automóveis.

Inúmeras foram as conquistas nessa época, porém a produção de veículos automotores veio a atingir grande significância somente no final do século seguinte, com a criação e aperfeiçoamento dos motores de combustão interna.

No início do século XX, a produção de veículos já alcançava quantidades razoáveis de produção, foi quando no final da primeira década deste século, Henry Ford, lançou e aperfeiçoou a primeira linha de montagem em série de veículos. Esta linha utilizava o conceito de que cada funcionário é responsável por um trabalho. O primeiro veículo a ser produzido foi o Ford T.

A evolução do conhecimento humano nas áreas de interesse da indústria automobilística viabilizou aos automóveis constantes evoluções. Desde então, os pesquisadores ligados a produção de automóveis vem buscando um aperfeiçoamento dos modos de produção, materiais a serem utilizados, combustíveis, estética, aerodinâmica, segurança e conforto dos ocupantes do automóvel.

No início do século XX não havia grandes preocupações ou mesmo tecnologia para o desenvolvimento de automóveis com considerável conforto e segurança. Desde então a evolução foi muito grande. Considerando somente as últimas três décadas deste século novas tecnologias surgiram para estas áreas como, sistema de freio ABS (Anti-lock Block System), Air Bags, Controle de Tração e Controle de Suspensão Ativa que é o foco deste trabalho.

O uso do controle da suspensão, que outrora era apenas uma visão futurista, torna-se a cada dia mais necessário, tanto para o conforto como para a segurança dos ocupantes. As pesquisas são intensas e detalhadas, como Lundström (1998) que apresenta um estudo sobre a absorção de energia de vibração pelo corpo humano.

2. CONTROLE DE SUSPENSÃO

A aplicação da “teoria do controle moderno” para o projeto de um sistema de suspensão tem sido o alvo de várias publicações ao longo das últimas três décadas (ElBeheiry, 1994).

A utilização de controladores em suspensões automotivas nas competições data do início da década de 1990, já com o grande desenvolvimento da indústria eletrônica dos microprocessadores. O uso desta tecnologia em veículos fabricados em série se deu no início do ano 2001. Essa tecnologia fora chamada de ABC (Active Body Control – Controle Ativo da Carroceria) e desenvolvida pela empresa alemã *Sachs* e apoio da montadora *Mercedes Benz*.

Existem vários sistemas de suspensão no mercado que podem ser subdivididos em suspensão Passiva, Ativa e Semi-Ativa.

2.1. Suspensão Passiva

A suspensão passiva é encontrada na maioria dos veículos. Consiste da utilização de molas e amortecedores com coeficientes de rigidez (k) e de amortecimento (c) constantes, ou seja, não há alterações nos parâmetros da suspensão de acordo com a qualidade do piso de rodagem.

O exemplo mais simples é a suspensão do tipo “Mc Pherson” que contém um braço inferior ligado ao conjunto telescópico formado pelo amortecedor e mola.

2.2. Suspensão Ativa

O sistema de suspensão ativa comporta-se como um sistema de banda larga, onde a correção dá-se numa grande faixa de frequências. A potência consumida nesse sistema é alta.

Este sistema utiliza inúmeros sensores que monitoram desde a aceleração do veículo até a altura da carroceria em relação ao plano de rodagem. As informações captadas são transferidas a uma unidade de processamento onde encontram-se as rotinas para geração do sinal de saída para o atuador. O atuador consiste, geralmente, de um cilindro hidráulico contendo válvulas de aberturas variáveis que limitam o fluxo de fluido para o cilindro. As válvulas são os elementos que controlam o movimento ascendente e descendente do êmbolo. Desta forma o sinal de entrada leva o sistema a corrigir as irregularidades do piso.

2.3. Suspensão Semi-Ativa

A suspensão semi-ativa contém elementos da suspensão ativa, bem como particularidades da suspensão passiva. Caracteriza-se pela alteração dinâmica do coeficiente de amortecimento tornando a suspensão mais ou menos amortecida.

Como a suspensão ativa, ela contém vários sensores que identificam os diversos parâmetros necessários para a correção das forças geradas pelos obstáculos do piso de rodagem.

Por não utilizarem elementos geradores de pressão (bombas) a potência consumida é muito baixa, comparada com o sistema ativo.

3. FUNCIONAMENTO DA SUSPENSÃO ATIVA

O Sistema de suspensão ativa é formado por elementos sensores, atuadores, unidade de processamento e os demais elementos de uma suspensão passiva. Na Fig. (1) é apresentado um modelo esquemático deste sistema.

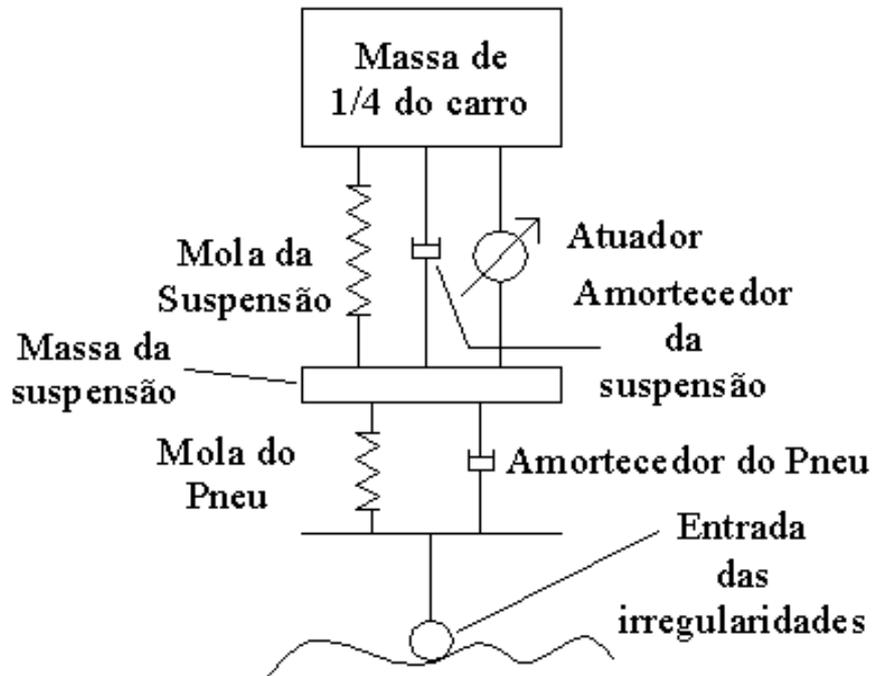


Figura 1. Modelagem de um sistema ativo de suspensão

3.1. Elementos Sensores

Neste sistema de suspensão existem os mais variados tipos de sensores. No caso do sistema desenvolvido pela *Sachs*, existem treze sensores espalhados pelo veículo.

Numa pista reta o elemento de maior importância é o sensor que mapeia a superfície do piso de rodagem. A partir deste sinal é que o sistema toma a decisão de compensar ou não as irregularidades. Os tipos mais encontrados são os de ultra som e lasers.

Trabalhando em conjunto existe um sensor de velocidade, que determinará o tempo necessário para que o sistema responda àquela irregularidade detectada.

Outro elemento de importância é o sensor de altura, que a todo momento estará medindo a altura da carroceria em relação ao solo. Dependendo da velocidade e das condições da pista a unidade de processamento poderá aumentar ou diminuir a distância entre a carroceria e o solo.

Também outro elemento de sensoriamento com grande importância para o sistema é o sensor que mede a deformação da mola.

3.2. Atuador

O elemento atuante no sistema de suspensão ativa geralmente é composto de um cilindro hidráulico com êmbolo que desloca-se em dois sentidos, e duas válvulas de abertura variável que controlam a entrada e saída de fluido no cilindro.

Se a força exercida pelo atuador é no sentido de aumentar a distância entre a carroceria e o solo, a primeira válvula aumenta a abertura e a segunda reduz a abertura para a passagem do fluido. Do contrário a primeira reduz a abertura e a segunda a abertura para a passagem do fluido.

A abertura da válvula que controla a entrada e saída de fluido no cilindro é determinada pela unidade de processamento do sistema ativo da suspensão.

3.3. Unidade de Processamento

A unidade de processamento é um microprocessador com uma rotina de programada internamente e responsável pela leitura dos dados provindos dos sensores, processamento e geração dos dados de saída.

Nele é que o sistema interage com a pista de rodagem. Decisões podem ser tomadas de acordo com o tipo de piso, velocidade, nível de rigidez da suspensão, dentre outras. O sistema identifica acelerações (arrancadas) e curvas, corrigindo-as e garantindo segurança e conforto aos ocupantes do veículo.

Tanto o sinal de entrada como o sinal de saída é amplificado e convertido em digital no caso do sinal de entrada e em analógico para o sinal de saída.

3.4. Funcionamento do Conjunto

O funcionamento do conjunto baseia-se na leitura instantânea dos dados provenientes dos sensores. No caso de uma reta, o sistema estará fazendo a leitura do sensor que está mapeando o piso, dependendo da velocidade do automóvel o sistema calcula o tempo para a futura reação do atuador.

Para os casos excepcionais como aceleração, o sistema identifica a aceleração e evita que a frente do veículo venha a levantar-se. No caso das frenagens ocorre ao contrário, o sistema corrige a tendência que o veículo tem de levantar a traseira.

Outro caso excepcional, é quando o veículo entra em uma curva. A tendência natural do veículo seria levantar o lado do veículo correspondente a menor distância do centro da curva e comprimir o lado oposto. Novamente o sistema corrige evita este efeito da inércia.

No caso das irregularidades que o sistema desconsidera o conjunto de suspensão ativa age como uma suspensão passiva, trabalhando somente os elementos passivos (como molas, amortecedores etc.).

4. MODELAGEM DO SISTEMA

A modelagem matemática do sistema dinâmico é feita a partir do equilíbrio de forças tendo como base a figura 2,

$$M_C \ddot{X}_1 = -C_C (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) - K_C (X_1 - X_2) + U \quad (1)$$

$$M_S \ddot{X}_2 = C_C (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) + K_C (X_1 - X_2) + C_P (\dot{W} - \dot{X}_2) + K_P (W - X_2) - U \quad (2)$$

onde M_C , C_C e K_C são respectivamente, massa de $\frac{1}{4}$ do veículo, coeficiente de amortecimento viscoso (amortecedor) e coeficiente de rigidez da mola. M_S , C_P e K_P são respectivamente, massa da suspensão, coeficiente de amortecimento do pneu e coeficiente de rigidez do pneu. Os demais X_1 , X_2 , W e U são respectivamente, deslocamento da carroceria, deslocamento da suspensão, o deslocamento causado pelas irregularidades do piso e a força do atuador.

De acordo com a exigência de projeto e com os tipos das variáveis (lineares ou não), é que se escolhe a teoria a ser utilizada para a geração das funções a serem utilizadas na rotina interna do microprocessador. Alguns exemplos são, lógica Fuzzy, controle linear quadrático, dentre outras.

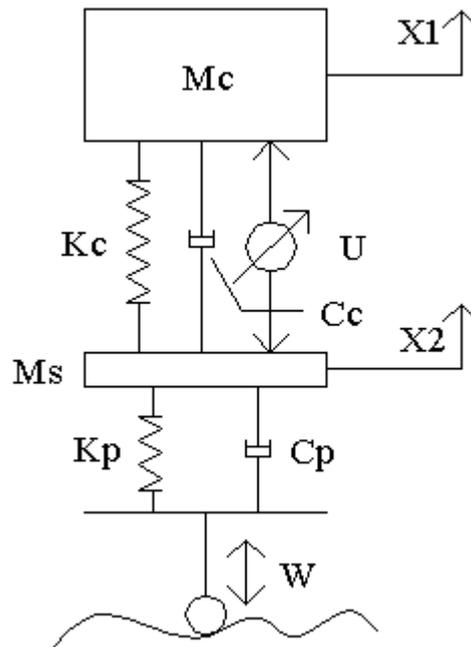


Figura 2. Modelo dinâmico do conjunto de suspensão ativa.

Tendo escolhido a forma de modelagem do atuador o próximo passo a ser feito é o trabalho matemático para a obter as equações. Com as equações já prontas, o próximo passo é fazer as rotinas para o processador.

5. CONCLUSÕES

A evolução dos microprocessadores das últimas três décadas levou o homem a criar a suspensão ativa, que apenas era um sonho distante na década de 1970. A evolução atual é muito grande, crescendo a taxas enormes, fazendo com que aqueles que eram os problemas para criar-se este tipo de suspensão fossem minimizados. No caso dos métodos para modelagem dos sistemas a evolução também foi boa, novas teorias e técnicas melhoraram a forma de trabalho.

As perspectivas futuras são as melhores possíveis.

6. AGRADECIMENTOS

Ao PPGEM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela infra-estrutura e pelo apoio e a CAPES, pelo fornecimento da bolsa de mestrado.

7. REFERÊNCIAS

- Ando, Y. and Suzuki, M., 1996, “Control of Active Suspension Systems Using the Singular Perturbation Method”, Control Eng. Practice, Vol. 4, No. 3, pp. 287 – 293.
- ElBeheiry, E.M. and Karnopp, D.C., 1996, “Optimal Control of Vehicle Random Vibration with Constrained Suspension Deflection”, Journal of Sound and Vibrations, Vol. 189(5), pp. 547 – 564.
- ElBeheiry, E.M., 2000, “Effects of Small Travel Speed Variations on Active Vibration Control in Modern Vehicles”, Journal of Sound and Vibrations, Vol. 232(5), pp. 857 – 875.

- Foo, E. and Goodall, R.M., 2000, “Active Suspension Control of Flexible-Bodied Railway Vehicles Using Electro-Hydraulic and Electro-Magnetic Actuators”, Control Engineering Practice, Vol. 8, pp. 507 – 518.
- Kawable, T., Isobe, O., Watanabe, Y., Hanba, S. and Miyasato, Y., 1998, “New Semi-Active Suspension Controller Design Using Quasi-Linearization and Frequency Shaping”, Control Engineering Practice, Vol. 6, pp. 1183 – 1191.
- Lundström, R. and Holmlund, P., 1998, “Absorption of Energy During Whole-Body Vibration Exposure”, Journal of Sound and Vibrations, Vol. 215(4), pp. 789 – 799.
- Nagai M., Moran, A., Tamura, Y. and Koizumi, S., 1997, “Identification and Control of Nonlinear Active Pneumatic Suspension for Railway Vehicles, Using Neural Networks”, Vol. 5, No. 8, pp.1137 – 1144.
- Yoshimura, T., Kume, A., Kurimoto, M. and Hino, J., 2001, “Construction of an Active Suspension System of a Quarter Car Model Using the Concept of Sliding Mode Control”, Journal of Sound and Vibrations, Vol. 239(2), pp. 187 – 199.
- Yoshimura, T.; Sugimoto, M.;1990, “An active Suspension for a Vehicle Traveling on Flexible Beams with an Irregular Surface”, J.Sound and Vibration, Vol. 138, pp433-445.
- Yve, C.; Butsuen,T.; Hedrick, J.K.; Alternative control laws for automotive active suspensions, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 111, (1989), 2, pp286-291.
<http://wolfman.eos.uoguelph.ca/~jzelek/matlab/>
<http://www.quatro-rodas.com.br>

BIBLIOGRAPHICAL REVISION ON ACTIVE CONTROL OF CAR SUSPENSION

Fabiano Henrique de Paula
Aparecido Carlos Gonçalves

fabiano@dem.feis.unesp.br
cido@dem.feis.unesp.br

Universidade Estadual Paulista – UNESP – Departamento de Engenharia Mecânica
 Caixa Postal 31 – 15385-000 Ilha Solteira, São Paulo, Brasil

Luiz Daré Neto

ldaren@feb.unesp.br

Universidade Estadual Paulista – UNESP – Departamento de Engenharia Mecânica
 Bauru, São Paulo, Brasil

***Abstract.** Several studies about active suspension systems in vehicles have been done recently due to the best comfort that these provide during a trip (Hrovat, 1997; Ray, 1998; Yue et al, 1989). An active suspension system is formed by sensor, servo-valves, actuator and microprocessors. The vehicle vibratory movement is measured by sensor placed on the structure and on the suspension components. The control of the signal to regulate the servo-valve is determined by the processor that uses the measures obtained through the sensor. According to the obtained measures, the processor determines different rates of flow (implying in different pressures) to the actuator. The actuator, on the other hand, controls the force of the suspension system (Yoshimura & Isari, 1997). The actuator shape changes a lot and, according to its location and the model of the adopted group, one can classifies the suspension system (Lin, 1998). Although the actual vehicle has some uncertainties and non-linearity, an active suspension system generated is, usually, done by a linear model. This work presents a bibliographical revision on the theme taking into account the current state of the development and the future tendencies of the active suspension systems.*

Keywords . Active Suspension, Control, Vibration, Comfort