

文章编号: 1002-0268 (2003) 01-0144-04

车辆整车振动模型自由度的模糊选择

张立军, 符朝兴, 王岩松
(辽宁工学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要: 运用模糊数学理论, 本文分析了车辆整车振动模型自由度与计算精度之间的关系。以整车模型的参数作为因素集, 以驾驶员座椅 1/3 倍频带加速度均方根值作为评价集, 用模糊综合评判确定了整车振动模型的自由度, 并用试验验证了该方法的正确性。该方法对整车振动的理论研究有参考价值。

关键词: 车辆模型; 自由度; 模糊选择

中图分类号: U462

文献标识码: A

Fuzzy Selection for Freedom Degree of Vehicle Vibration Model

ZHANG Li-jun, FU Chao-xing, WANG Yan-song
(Liaoning Polytechnical Institute, Liaoning Jinzhou 121001, China)

Abstract: Based on fuzzy theory, the relationship between the freedom degree of vehicle vibration model and the accuracy of calculation is analyzed in this paper. The freedom degree of vehicle is determined by using fuzzy comprehensive judgment with the parameters of vehicle model and the RMS of driver seat in 1/3 octave frequency band form as factor sets and appraisal sets respectively. Finally, the validity of this method has been verified. This paper provides a reference for the studies of vehicle vibration.

Key words: Vehicle model; Degree of freedom; Fuzzy selection

在进行汽车振动系统响应分析时一般要根据所研究问题的具体情况建立一定自由度的振动系统模型。模型的精度不仅与模型自由度数目有关, 而且还与模型参数的精度有关。尽管少自由度模型的模型参数容易获得, 但模型误差较大。多自由度模型虽然更接近实际系统, 但是要精确地给出模型每一参数的数值也不是一件轻而易举的事情, 这需要有相应的实验设备以及有效的实验方法。此外不同的实验方法所测量参数的精度也不同。特别是有些参数很难得到, 只能估算。而且随着自由度的增加, 这种矛盾就越突出。因此如何建立一个具有合理自由度的模型是很值得研究的。也就是说, 要对建立的数学模型进行评价, 模型评价是建模的先期工作, 虽然不是对模型结果的最后评价, 但在分析、预测模型的实用性时有很大的帮助, 可以减少一些盲目性。

为了进行评价, 就必须提出评价准则, 模型评价应从以下几个方面来考虑, 即模型的精确性、通用性

和有效性。模型评价准则常与建模原则相辅相成。以往选择模型自由度的常用方法一是根据各参数对目标函数的影响率的不同, 略去影响率较小的参数, 即略去其参数对应的自由度。二是建立几种不同的自由度模型, 然后进行比较分析, 选择模拟结果与实际结果相近的模型。这两种自由度的选择方法计算量大, 因素考虑的不全面。为了解决这种模型精确性与因素复杂性的矛盾, 应该科学合理地选择模型自由度。本文采用模糊数学中模糊综合评判的方法来解决这个问题。

1 模糊综合评判的基本过程

1.1 模糊数学的基本思想

模糊数学理论是上世纪 60 年代中期出现的一种新理论。1965 年美国控制论专家查德首先提出了模糊集合的概念。1971 年, 贝尔曼与查德首次合作探讨了模糊决策的方法。模糊决策它是为了解决模糊现

象而建立起来的。自然现象大体分为两类：一类是确定性现象，另一类是非确定性现象。通常把确定性现象用确定性的数学来表达。对于非确定现象又分为随机现象和模糊现象。随着研究问题的深化，研究的事物越来越复杂。而复杂的事物有两个特点：一是影响事物的因素众多，人们又不可能认识全部因素。只能在有限的一些因素上考察事物，这样一来，本来是清晰的现象也变得模糊了。二是研究难度加大，这使数学模型复杂化。于是模糊性逐次积累变得不可忽略。针对这个问题，查德教授总结出—条互克原理：即随着系统复杂性的增长，对其特性作出精确而有意义的描述能力相应降低，直到达到一个阈值，—旦超过它，精确性和有意义性几乎成为两个互相排斥的特征。模糊数学中的模糊综合评判，为解决上述问题提供了理论基础。

1.2 模糊综合评判的基本过程

模糊综合评判是在模糊环境中，考虑了多种因素的影响，关于某种目的对某事物所作出的综合决断或决策。

设 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 为 n 种因素构成的集合，称为因素集。 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 为 m 种决断所构成的集合，称为评判集。各因素的权重分配可视为 U 上的模糊集，记为

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_n) \in F(U)$$

其中， a_i 表示第 i 个因素的权重，它们满足归—化条件，即

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad (1)$$

此外，综合后的评判也应看作 V 上的模糊集，记为

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_m) \in F(V)$$

其中， b_j 反映了第 j 种决断在评判总体中所占的地位。假定

$$R = (r_{ij})_{n \times m} \quad (2)$$

是 U 与 V 之间的模糊关系，则利用 R 就可以得到一个模糊变换 T_R 。这样就不难构造一个模糊综合评判模型。模型综合评判模型要有 3 个基本要素：

1. 因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$
2. 评判集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$
3. 单因素评判，即模糊映射

$$f: U \rightarrow F(V)$$

$$U_i \xrightarrow{f} (u_i) = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}) \in F(V)$$

由 f 可诱导出一个模糊关系

$$R = R_f = \begin{bmatrix} f(u_1) \\ f(u_2) \\ \dots \\ f(u_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \in M_{n \times m} \quad (3)$$

由 R 再诱导一个模糊变换

$$T_R: F(U) \rightarrow F(V)$$

$$A \xrightarrow{T_R} (A) = A \circ R$$

这样三元体 (U, V, R) 构成了一个模糊综合评判模型，若输入一个权重分配

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_n) \in F(U)$$

则输出一个综合评判

$$B = A \circ R = (b_1, b_2, \dots, b_m) \in F(V) \quad (4)$$

于是有

$$(b_1, b_2, \dots, b_m) = (a_1, a_2, \dots, a_n) \cdot$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中， $b_i = \bigvee_{j=1}^n (a_i \cdot r_{ij})$ ， $i = 1, 2, \dots, m$ 。

假如 $b_j = \min \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ 则得出决断 U_j ，即 U_j 是所要选择的决策。

2 汽车整车模型自由度的模糊选择

2.1 模型自由度的确定原则

为了保证模型有可比性，要使下面的 2 个条件成立：(1) 保证汽车的整车质量不变；(2) 汽车的重心位置不变。

模型最低自由度的选择原则：(1) 能够反映四轮输入；(2) 能够反映车身主要振动；(3) 能够反映驾驶员的振动。

根据上面 3 个基本条件得到最低的自由度数为 7 个。它们分别是：四个车轮振动，车身垂直振动，座椅的垂直振动和车身的纵向角振动，共 7 个自由度。

模型最高自由度的选择原则：(1) 能够反映四轮输入；(2) 除能够反映车身的俯仰振动外，还要有侧倾振动，以及车身的弹性变形；(3) 车身上的振动系统除座椅外，还要考虑发动机振动的影响，即加上发动机的振动。

根据以上 3 个条件可以把汽车的最高自由度暂定为 11 个自由度 (如图 1 所示)。最高自由度也可以再多选择一些，但考虑是一种理论研究，如果把每个部

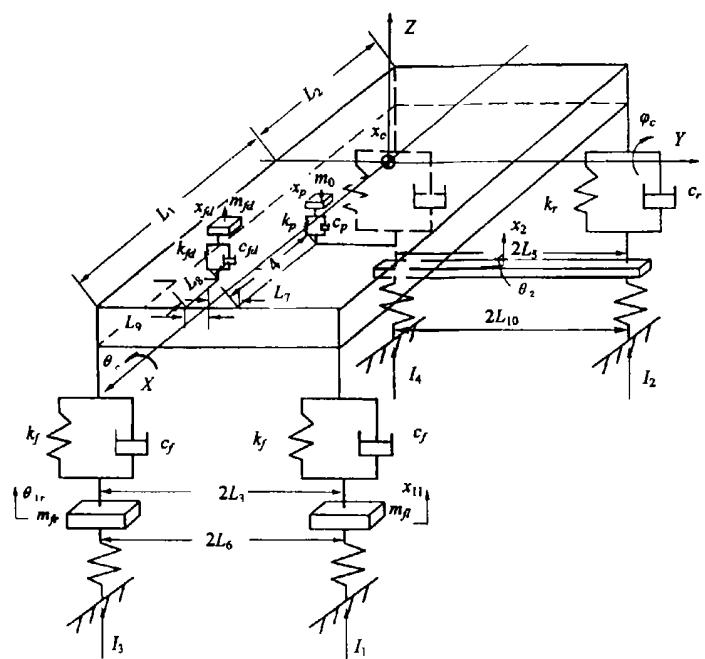


图 1 11 个自由度汽车模型

件都考虑进去，不但没有必要，而且也非常繁琐。因此车身上系统除了座椅外，只是增加了发动机。因为发动机是车身上系统的主要振动部件，是汽车的主要振动源之一。以发动机为代表来说明自由度的选取原则，具有典型性和必要性。若还需要考虑车身上系统其他部件的自由度，可以按照上述方法来增加自由度。本文考虑以上部件所决定的自由度，只是想简要地说明问题，能够满足证明的要求为目的而选取的。故最高自由度定为 11 个。

2.2 模型自由度的模糊选择

在进行汽车平顺性评价时，驾驶员座椅上振动总的加权加速度平均值是一个重要的评价指标，也是评价汽车行驶平顺性力学模型的好坏重要指标。因此在选择力学模型的自由度个数时，用这个指标作为目标函数进行评价。根据以上分析构造以下汽车平顺性模糊综合评价模型，设

$$U = \{k_p, c_p, k_{fd}, c_{fd}, m_{ce}, k_b, k_g, J_x, J_y, k_{ff}, k_{tr}, k_f, k_r, c_f, c_r\}$$

因素集各参数的意义： k_p 为座椅刚度； c_p 为座椅阻尼系数； k_{fd} 为发动机支承刚度； c_{fd} 为发动机支承阻尼系数； m_{ce} 为汽车的簧载质量； k_b 为车身弯曲刚度； k_g 为车身扭转刚度； J_x 为簧载质量绕其质心的横向转动惯量； J_y 为簧载质量绕其质心的纵向转动惯量； k_{ff} 为前轮胎刚度； k_{tr} 为后轮胎刚度； k_f 为前钢板弹簧刚度； k_r 为后钢板弹簧刚度； c_f 为前悬

架阻尼系数； c_r 为后悬架阻尼系数。

从上面的因素集中可以看到，因素集中的各个参数为汽车平顺性整车模型的主要参数，它们对汽车行驶平顺性都有一定的影响。评价集 $V = \{n_1, n_2, \dots, n_m\}$ ；评价集 n_i 为模型的自由度的个数， $n_i = i$ 。

2.2.1 U 与 V 之间模糊关系元素 r_{ij} 的计算

设 ξ_j 为 j 个自由度模型 1/3 倍频带总的加权加速度均方根值；设 Δm_i 为各因素 U_i 的误差，且 U_i 的取值为 m_i ，则误差率为

$$\Delta t_i = \Delta m_i / m_i$$

设 r_{ij} 为 U_i 对 ξ_j 的影响率，且当 U_i 变化为 ΔU_i 时， ξ_j 变化为 $\Delta \xi_j$ 。则有

$$r_{ij} = (\Delta \xi_j / \xi_j) \tag{6}$$

2.2.2 权重分配 a_i 的计算方法

$$a_i = \Delta t_i / \sum_{i=1}^n \Delta t_i \tag{7}$$

则输出的综合评判为

$$B = A \circ R \tag{8}$$

假设 U_i 的误差率为

$$\Delta t = \{0.1, 0.1, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.15, 0.15, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1\}$$

由式 (6) 可以得到 U_i 对 ξ_j 的影响率为 r_{ij} ，见表 1。

模糊关系元素		表 1				
		n_7	n_8	n_9	n_{10}	n_{11}
k_0		0.0322	0.0255	0.02375	0.02340	0.0284
c_p		0.0393	0.0364	0.02146	0.02148	0.0288
k_{fd}		0	0	0	0	0.0022
c_{fd}		0	0	0	0	0.0046
m_{ce}		0	0	0.0025	0.0169	0.0153
k_b		0	0	0	0.0085	0.0072
k_t		0	0	0.0030	0.0030	0.0028
J_x		0	0.0535	0.0474	0.0483	0.0500
J_y		0.0056	0.0058	0.0600	0.0063	0.0054
k_f		0.0024	0.0028	0.0038	0.0033	0.0033
k_{tr}		0.0040	0.0190	0.0121	0.0119	0.0105
k_f		0.0480	0.0579	0.0508	0.0498	0.0472
k_r		0.0168	0.0114	0.0092	0.0111	0.0079
c_f		0.0070	0.0119	0.0056	0.0071	0.0083
c_r		0.0265	0.0138	0.0130	0.01245	0.0112

由表 (1) 可以得到 U 与 V 之间的模糊关系 R

$$R = \begin{bmatrix} 0.0322 & 0.2055 & 0.0238 & 0.0234 & 0.0284 \\ 0.0393 & 0.0364 & 0.0215 & 0.0215 & 0.0288 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0024 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0046 \\ 0 & 0 & 0.0025 & 0.0169 & 0.0153 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0085 & 0.0072 \\ 0 & 0 & 0.0030 & 0.0030 & 0.0028 \\ 0 & 0.0535 & 0.0474 & 0.0483 & 0.0500 \\ 0.0056 & 0.0058 & 0.0060 & 0.0063 & 0.0054 \\ 0.0024 & 0.0028 & 0.0038 & 0.0033 & 0.0033 \\ 0.0040 & 0.0019 & 0.0121 & 0.0119 & 0.0105 \\ 0.0480 & 0.0579 & 0.0508 & 0.0498 & 0.0472 \\ 0.0168 & 0.0114 & 0.0092 & 0.0111 & 0.0079 \\ 0.0070 & 0.0119 & 0.0056 & 0.0071 & 0.0083 \\ 0.0265 & 0.0138 & 0.0130 & 0.0125 & 0.0112 \end{bmatrix}$$

由式 (7)、式 (8) 可得

$$A = \begin{pmatrix} 0.048 & 0.048 & 0.095 & 0.095 & 0.095 \\ 0.095 & 0.095 & 0.071 & 0.071 & 0.048 & 0.048 & 0.048 \\ 0.048 & 0.048 & 0.048 \end{pmatrix}$$

$$B = A^{\circ} R = \begin{pmatrix} 0.0393 & 0.0535 & 0.0474 & 0.0483 \\ 0.0500 \end{pmatrix}$$

取 B 中最小值所对应的模型为在给定条件下所要选择的模型。上面所确定的模型是在给定条件下确定的, 当条件变化时应重新确定。确定的方法、原理相同。在上式中 B 值的最小值为 0.0393, 它对应模型的自由度为 7 个。

3 结论验证

为了验证上述结论, 本文采用了文献 [2] 所给的实际路面谱及左右轮辍相关函数。模型的结构参数参照文献 [1] 的数值, 并分析了参数误差, 认为其参数误差与上述取值基本相同。因此可以用文献 [1] 的实验数据来验证上述结论的正确性。图 2 给出了 7~11 自由度模型驾驶员座椅处的模拟 1/3 倍频带加速度均方根谱及 1/3 倍频带加速度加权均方根值。并在每一个图上附上试验得到车辆座椅上的 1/3 倍频程加速度均方根谱图及 1/3 倍频带总的加权加速度均方根值 σ 。通过图 2 可以看出, 1/3 倍频带加速度均方根值不随自由度的增加而减少, 而是没有规律地变化。经过计算得到 7~11 自由度的误差率分别为

1.49%、40.21%、59.43%、14.27%、52.38%。7 自由度模型的误差率相对较小, 其对应的模型较为精确。从 1/3 倍频程加速度均方根谱图上也可以看到 7 自由度的模型吻合比较好。这与模糊综合评判汽车平顺性的自由度的数量正好相符。因此可以证明模糊综合评判得到的结果是正确的, 由此可以得出模糊综合评判汽车自由度的数量的方法是可行的。

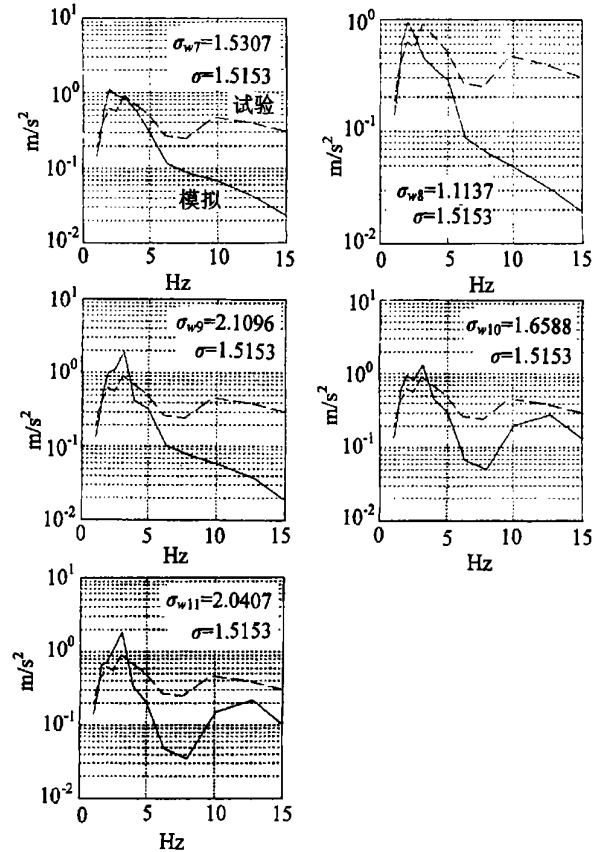


图 2 座椅 1/3 倍频程加速度均方根谱图

参考文献:

- [1] 张洪欣, 等. 汽车行驶平顺性计算机预测 [J]. 汽车工程, 1986 (3).
- [2] 张立军, 等. 汽车前后悬架固有频率的匹配研究 [J]. 汽车工程, 1998 (6).
- [3] 颜庆津. 数值分析 [M]. 北京航空航天大学出版社, 1991.
- [4] 李洪兴, 等. 工程模糊数学方法及应用 [M]. 天津科学技术出版社, 1993.