

子午线轮胎的径向振动

L. E. Kung 著 李静萍译 贺海留校

摘要 利用旋转的非线性叠层薄壳有限元(FEM)预测了3种子午线轿车轮胎的自由振动,重点是轮胎径向对称和径向振动的模型,测量了频率并与预测值进行了比较。利用其中一个FEM轮胎模型研究了充气压力、帘布层帘线模量、帘布层帘线经向密度、帘布层胶料模量、带束层角度及带束层帘线经向密度对轮胎固有频率的影响。另外,利用所预测的3种轮胎的固有频率和振型,预估了它们的频率响应函数并与测量结果进行了比较。

在从轮胎接地处到汽车内部的扰动传递过程中,轮胎的共振效应起着重要作用。轮胎在减轻某些频率下的振动的同时,加重了另外一些频率下的振动。直到利用有限元法抛开轮胎模拟某些现象后,计算这些共振特性才成为可能,但是相当困难。

这项在不断发展中的工作的总目的是开发出一种轮胎和汽车整体共振特性的预测方法,从而进一步改善轮胎乘坐舒适性,降低轮胎开发成本^[1]。本研究涉及了3种轿车轮胎固有频率的模型和试验验证。还给出了一组参数研究及这3种轮胎频率响应函数的计算值,并与测量值进行了比较。

1 有限元模型及振型标志

本研究所用的有限元示于图1,它是几何非线性的,兼具薄膜特性和弯曲刚性的旋转薄壳单元。通过利用叠层复合材料公式计算力和力矩合量,获得轮胎的力学性能。每个元素由2个波节圆和在各波节的6个自由度组成。6个自由度为3个曲线位移及其沿元素切线坐标的微商。该有限元曲线位移 w, u, v 表示为:

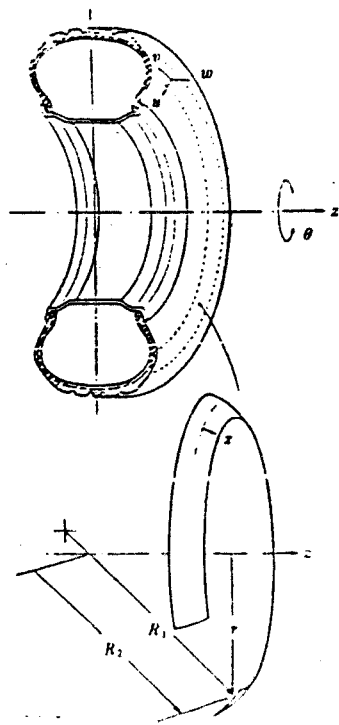
$$w(x, \theta) = (a_1 + a_2 x + a_3 x^2 + a_4 x^3) \cos(N\theta - \varphi)$$

$$u(x, \theta) = (a_5 + a_6 x + a_7 x^2 + a_8 x^3) \cos(N\theta - \varphi)$$

$$v(x, \theta) = (a_9 + a_{10} x + a_{11} x^2 + a_{12} x^3) \cos(N\theta - \varphi)$$

式中 N 代表周向波数,在后面的振型标志中用到。另一文章^[2]中提供了一有限元模型的细节,这里不详述。例如,为了获得子午线轿

车轮胎的固有频率和振型,必须给轮胎模型充以特定的压力以达到几何非线性平衡状态。下一步是通过特征值分析,计算充气的非线性平衡状态线性振动的固有频率和振型。



12个自由度/元素

每一波节圆的6个自由度:

$$[w, u, v, w_x - \frac{u}{R_1}, u_x, v_x]$$

图1 非线性有限元

通过周向波数和径向波节数,对特征值分析的固有频率和振型分类。周向波数是围绕轮胎圆周的完整波形即波峰和波谷的数

目,径向波节数是沿轮胎横截面的波节即零径向位移点的数目。图 2 和 3 分别为这些数的图例。因此图 3 中的偶和奇波节数分别表明了轮胎横截面上观察到的轮胎振动的对称和非对称模型。另外,对话式计算机绘图是一个非常有效的工具,它使振动模型非常形象地呈现于工程师面前,以阐述有限元分析的繁琐结果。

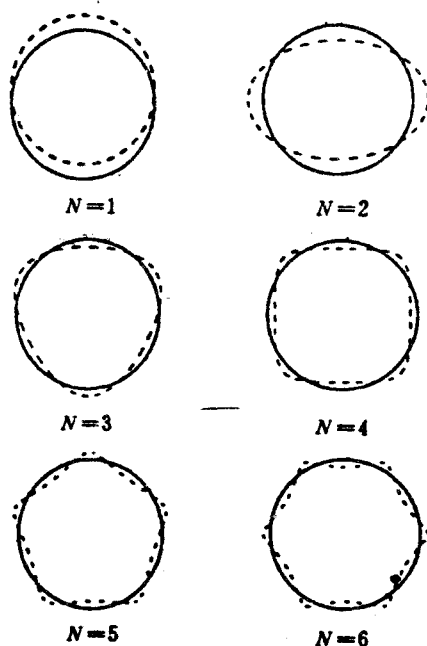


图 2 周向振型

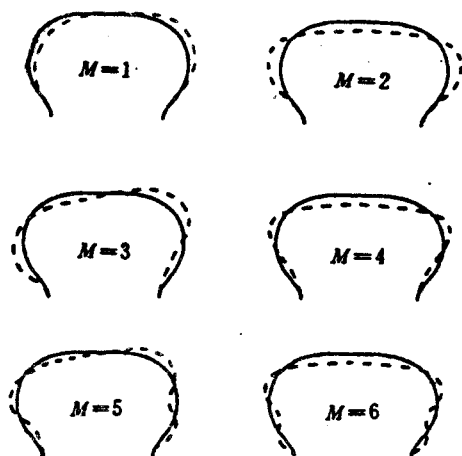


图 3 径向振型

2 结果与讨论

表 1 示出的是 3 种轮胎(P205/75R15, P195/75R14 和 P175/70R13)在 3 种充气压力下周向波节数从 1 一直到 7、径向波节数为 2 的固有频率的预测值和测量值。预测值与测量值之间的最大误差分别为 8%、4% 和 7%。该表表明了这些有限元模型预示的频率和由于充气压力的频率变化。

图 4 给出了 P195/75R14 轮胎在 3 种充气压力下的频率预测值。这组曲线的不同斜率代表了轮胎各阶振动对充气压力的灵敏度。最低阶($N=1$)灵敏度最小,同时随着 N 的增大,灵敏度提高。对于 $N=1$ 阶,充气压力提高 7kPa(1psi/0.07bar),轮胎的固有频率提高 0.5Hz。

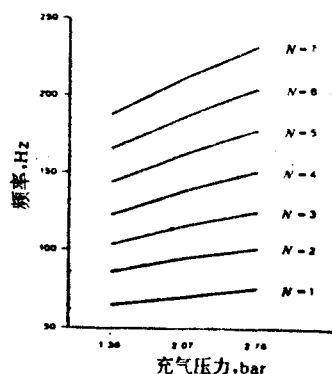


图 4 P195/75R14 轮胎的充气压力对轮胎固有频率的影响

图 5 示出了胎体帘线杨氏模量的变化对轮胎固有频率的影响。所有 7 阶的频率变化事实上是相同的,即模量提高 10%,频率约增大 2Hz。因此,轮胎帘线刚度较高导致轮胎的刚度较高和固有频率较高,反之亦然。

图 6 示出帘布层帘线经向密度变化对轮胎固有频率的影响。帘线经向密度改变 10%,频率变化范围为从 $N=1$ 阶的 1.1Hz 到 $N=7$ 阶的 1.8Hz。调整轮胎帘线数量所引起的固有频率的变化,与帘线模量的影响相似且影响较小。

表 1 3 种轮胎的固有频率

N	0. 138MPa(1. 38bar/20psi)		0. 207MPa(2. 07bar/30psi)		0. 276MPa(2. 76bar/40psi)	
	有限元模型	测量值	有限元模型	测量值	有限元模型	测量值
P205/75R15						
1	81	85	88	96	95	103
2	107	102	118	115	127	125
3	126	121	140	137	152	148
4	146	141	163	159	178	172
5	166	163	186	182	204	197
6	186	184	209	206	228	219
7	205	206	230	231	252	—
P195/75R14						
1	65	65	70	73	76	78
2	86	83	95	94	102	103
3	104	101	116	114	126	126
4	123	121	139	137	152	152
5	144	142	163	161	179	178
6	166	164	187	185	206	206
7	188	187	212	211	233	231
P175/70R13						
1	101	102	107	113	112	124
2	131	123	140	138	148	151
3	150	144	163	164	174	180
4	172	170	187	191	201	209
5	196	196	216	—	231	241
6	223	—	244	—	263	261
7	251	—	274	—	295	296

图 7 示出帘布层胶料模量变化对轮胎固有频率的影响。胶料模量改变 50%，频率变化范围为从 $N = 1$ 阶的 0. 7Hz 到 $N = 7$ 阶的 1. 2Hz。因此，帘布层胶料模量对轮胎固有频率的影响非常小。

图 8 示出带束层角度变化对轮胎固有频率的影响。角度每增大 10%，频率减小的范围从 $N = 1$ 阶的 0. 4 Hz 到 $N = 7$ 阶的小于 0. 1Hz。因此，带束层角度的影响比帘线模量和帘线经向密度的影响小。

图 9 示出带束层经向密度变化对轮胎固有频率的影响。该经向密度每提高 10%，频率减小的范围从 $N = 1$ 阶的 0. 8Hz 到 $N = 7$ 阶的 1. 8Hz。这一轮胎频率随带束层单位宽度帘线根数增多而降低的预测，似乎与基于通常经验的直觉不相符，需要进行一项试验来证明这个预测。

基于对上述参数的研究，有可能根据其对于轮胎固有频率的影响进行排序。对于所讨论轮胎的最低阶 ($N = 1$ 且 $M = 2$)，各参数单独改变 10%，这些参数影响的排序是：帘

布层帘线模量(2Hz)，充气压力(1. 5Hz)，帘布层帘线经向密度(1. 1Hz)，带束层经向密度(0. 8Hz)，带束层角度(0. 4Hz)和帘布层胶料模量(0. 1Hz)。

得到轮胎固有频率和振型之后，便可以利用模态叠加法^[3]进一步计算轮胎的动态响应。这是预测轮胎-车辆系统传递特性的主要手段。图 10 示出了以位于胎面中部加速度 ($g \cdot N^{-1}$) 表示的上述 3 种轮胎激振点的频

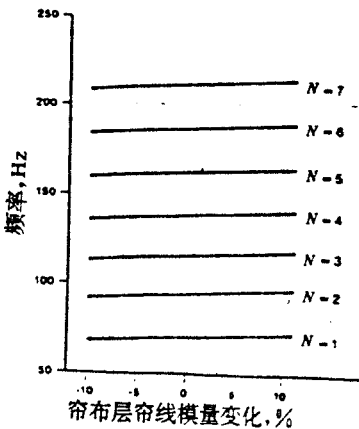


图 5 P195/75R14 帘布层帘线模量对轮胎固有频率的影响

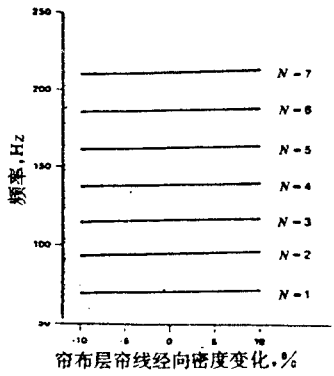


图 6 P195/75R14 帘布层帘线经向密度对轮胎固有频率的影响

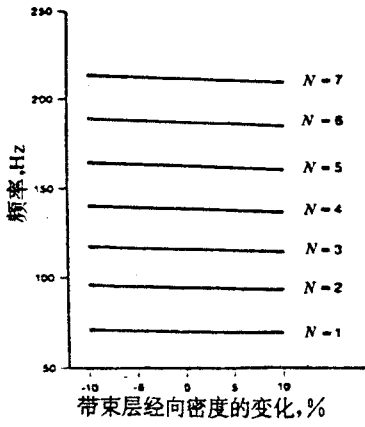


图 9 P195/75R14 轮胎带束层经向密度对轮胎固有频率的影响

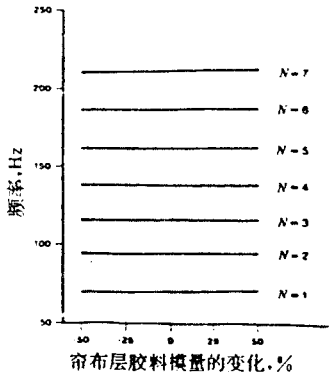


图 7 P195/75R14 轮胎帘布层胶料模量对轮胎固有频率的影响

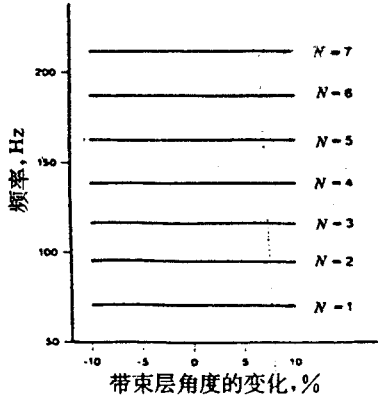


图 8 P195/75R14 轮胎带束层角度对轮胎固有频率的影响

率响应函数及与测量值的比较。所有 3 种轮胎的预测值和测量值的一致性是相当令人满意的。为了充分表征轮胎-车轮系统的特性,附加频率响应函数,诸如横向传递函数和轴激振点频率响应函数,仍是必要的。

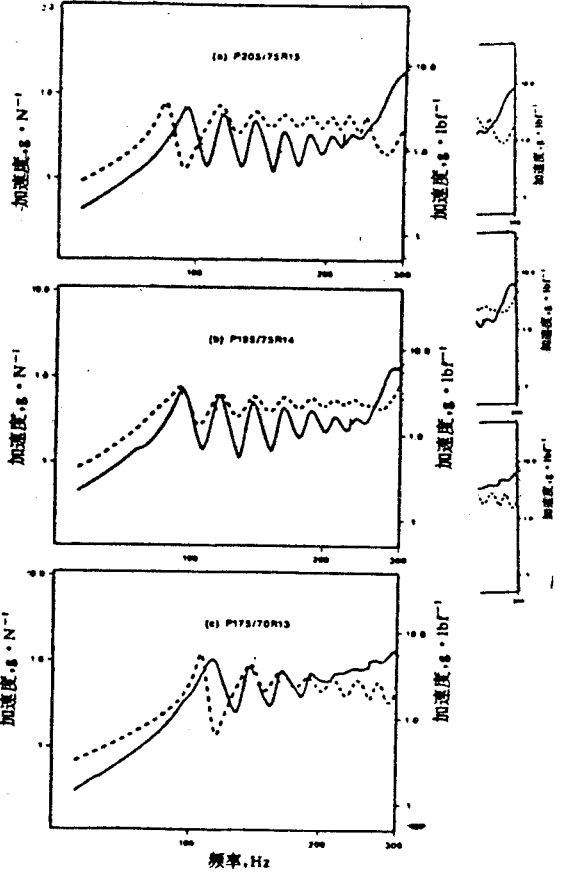


图 10 3 种轮胎的激振点加速度
...预测值;—测量值

3 小结

利用旋转的几何非线性叠层薄壳有限元的计算机轮胎模型,推进了对汽车子午线轮胎固有频率和振型的预测。预测了 P205/75R15, P195/75R14 和 P175/70R13 轮胎在 3 种充气压力下的固有频率,并与测量值进行了比较。对轮胎充气压力、帘布层帘线模量、帘布层帘线经向密度、帘布层胶料模量、

带束层角度及带束层经向密度等参数影响轮胎固有频率的研究,进行了介绍和排序。根据计算的固有频率和振型预示了这 3 种轮胎-车轮系统的频率响应,且与试验结果进行的比较是令人满意的。

参考文献(略)

译自 SAE 900759, P1—5