

内 容 简 介

本书讲述了汽车振动的试验室试验、道路试验和试验研究的方法。提出用于评价悬挂性能及其参数、特性和解决分析问题的主要方法,特别着重于统计分析的方法。

本书适于从事汽车及其它运输车辆的研究、试验和调整的工程技术人员阅读。

Колебания автомобиля. Испытания и
исследования Под ред. Я. М. Певзнера.
Москва, «Машиностроение», 1979

* * *

汽车振动的试验与研究

【苏】Я·М·别符兹聂尔 等著

于长林 译

章一鸣 万耀青 陈炎 校

★

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

•

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 $6\frac{5}{8}$ ·字数166千字

1987年1月北京第一版·1987年1月北京第一次印刷

印数 0,001—1,950·定价2.20元

•

统一书号: 15033·6140

前 言

当前，不经过相应的试验和实验研究工作的程序，研究汽车结构是不可能的。在设计悬挂时，由于其作用复杂，因而这种工作尤为必要。悬挂应使驾驶员、乘客、运输货物和汽车本身悬挂部分减轻振动，并保证汽车的最优控制和行驶安全。

很早就极为重视悬挂试验，但是近年来对从试验结果所得到的信息数量和质量的要求急剧提高，而使试验方法复杂化。这与当前对悬挂质量的更加严格要求以及专门设备和仪器统计评价要求的广泛使用密切相关。

经验表明，在大多数情况下，甚至使用电子计算机进行计算汽车振动系统的特性也不能相当精确。计算模型一般把实际系统大大简化了，计算模型的显著简化不是非常精确的，因为在模型中要求引入很多系数和非线性关系，在设计阶段是未知的。

因而，在设计阶段，悬挂的特性以及取决于这些特性的汽车使用性能指标的评价也只能是近似的，只有在试验样品试验时，才能确定实际特性和实际指标的数值，可能与计算结果有很大误差。

在进行试验时要解决的问题是多种多样的，但是仍可将其分为三个主要类型。

在试验的第一阶段，确定和评价振动系统参数和特性，以及取决于这些特性的汽车性能的指标问题（评价试验）。

在评价所得参数、特性和指标时，应将其与标准、规格和技术条件的要求比较，并根据某种汽车的统计数据和文献中介绍的情况，与在使用中性能良好的其它汽车试验中所得相应数据比较。

译者的话

本书是根据Я.М.别符兹聂尔(Я.М.ПЕВЗНЕР)等所著《汽车振动的试验与研究》(Колебания автомобиля Испытания и исследования)一书译出,原书由世界著名的汽车振动权威Р.В.罗廷贝尔格(Р.В.РОТЕНБЕРГ)审校。

本书对汽车振动试验的研究比较全面,方法比较先进。对静力试验、动力试验、道路试验、行驶平顺性试验、车轮与道路接触的稳定性试验、汽车振动统计分析方法和各种试验仪器设备都作了详尽介绍,尤其是动力试验方法和稳定性试验方法的介绍很有实用价值。

有关汽车振动试验与研究的著作,目前国内还很少,特别是比较全面系统介绍道路试验和试验室试验原理、试验方法和仪器设备的著作,几乎没有。然而,国内对这方面的技术书籍又很需要,为了满足这一需要,我们将此书译出,推荐给我国广大读者。译者希望本书对汽车工业生产设计人员,科研人员和高等学校有关专业师生有所裨益,为实现我国四化的宏伟目标作出一点微薄的贡献。

由于译者水平所限,译文中错误和不妥之处在所难免,敬希读者批评指正。

译者

1984年8月25日

目 录

前 言

第一篇 试验室试验	1
第一章 静力试验	1
垂直弹性特性的确定.....	1
横向角弹性特性曲线及其它特性曲线的确定.....	5
试验数据处理.....	9
结果分析.....	11
第二章 动力试验	16
自由振动.....	16
正弦激励.....	23
单位阶跃激励.....	53
随机激励.....	62
悬置质量的惯性矩.....	71
第二篇 道路试验	75
第三章 仪 器	75
在道路条件下的振动记录与分析.....	75
试验室分析.....	88
第四章 汽车振动的统计分析方法	93
数学期望.....	95
方差和均方值.....	98
分布函数.....	103
相关函数.....	106
频谱密度.....	111
两个随机过程的相互统计特性.....	128
第五章 行驶平顺性试验	132

指标.....	133
主客观评价之间的相关性.....	142
规定标准.....	145
试验路段的选择.....	149
试验方法.....	154
结果重复率和可比性.....	158
结果分析与评价.....	159
评价的辅助方法.....	172
试验结果应用举例.....	176
第六章 车轮与道路接触的稳定性试验	182
指标.....	182
在道路试验中车轮垂直反作用力的测量方法.....	185
接触稳定性近似评估方法.....	192
参考文献.....	198

第一篇 试验室试验

第一章 静力试验

在静力试验时，要确定悬挂和轮胎弹性的静力特性曲线以及表征汽车振动系统性能的下列参数：悬置质量和非悬置质量的大小，悬挂刚度、规定的静力载荷的有效静荷挠度，轮胎刚度，最大动行程、干摩擦大小等。

垂直弹性特性的确定

悬挂垂直弹性特性曲线表示悬挂垂直载荷及其垂直变形间的关系，即悬置质量和非悬置质量的相对垂直位移转化到车轮上。

在分析悬挂动力试验室试验和道路试验结果和解决最优化问题时，从垂直弹性特性曲线可以得到用来预先评价悬挂性能的极为重要的原始信息，如图1为小轿车前悬挂垂直弹性的典型特性曲线。

在确定悬挂弹性特性曲线时，应注意其下列特点：

1. 由于悬挂中有干摩擦，所以负荷增加时的特性曲线与负荷减少时的特性曲线不重合。在悬挂的弹性元件中，在其支点上，在悬挂导向装置中和在减振器等都可能产生干摩擦。

2. 当变形速度可以不计时，一般在缓慢加载中所得到的弹性静态特性曲线与在快速加载中所得到的弹性动态特性曲线不同。典型的例子是带有弹性气动元件的悬挂，其中静态和动态特性曲线的区别是很大的。如果在带有钢弹性元件的悬挂中有橡胶衬套及支架等时，也可能有明显的区别。

3. 悬挂弹性特性曲线不仅决定于弹性元件的特性曲线，而且

也决定于其在悬挂中安装和固定的方法和导向装置的特点。所以根据已知的弹性元件的特性曲线计算悬挂弹性特性曲线经常有很大误差，并且也不能取代试验确定的特性曲线。

在没有专用试验台时，悬挂的垂直弹性特性曲线可以用符合部颁标准 OH 025 305—67 的最简设备来确定。此时将所试验悬挂的两个车轮置于磅秤上，并用压载物将车装到悬挂行程限制器的硬挡板位置。利用千斤顶或卷扬机使汽车车身抬高和下降来确定加载和减载的特性曲线。同时确定轮胎的弹性特性曲线。

为了避免误差，在确定垂直弹性特性曲线时，应具备下列条件：

1. 汽车各轮的支撑平面应在同一高度。

2. 应当排除轮胎与支撑面接触的平面上的水平反作用力，为此应在轮胎下放一特制平板，以保证在水平面上移动时摩擦最小。

3. 测定点的选择，应能保证为画出特性曲线所必需的足够的点数。建议负荷间隔不大于静负荷的 10~20% 来测定变形。

4. 测量位移的精确度应使误差值不超过 $\pm 1\text{mm}$ 。测量负荷的误差应不超过 2%。

5. 要将每个车轮置于不同的磅秤上，这样可以避免轮间负荷分配不均匀。

6. 在测定加载曲线过程中，变形应从小到大的方向改变，在测定减载特性线时，则由大到小的方向改变。因为变形方向的改变会引起摩擦力的方向改变，并产生错误的结果。

7. 悬挂变形等于从左右两边测量所得变形值和的一半，为了减少随机误差，进行一项试验不得少于 2~3 次。

在确定悬挂弹性曲线时，利用电测力仪做测力装置是适宜的。其优点是结构紧凑，在使用指针式仪表或笔录式仪表可以远距离测量。汽车科学研究所研制了测定负荷为 500, 750, 2000 和 5000kg 的 BAT—500, BAT—750, BAT—2T 和 BAT—5T 的测

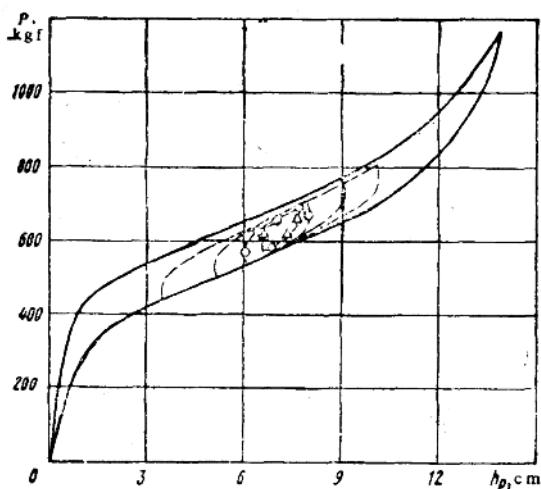


图1 小轿车前悬挂垂直弹性的特性曲线

$$1 \text{ kgf} = 9.80665 \text{ N}$$

力仪（应变测力仪）。

可用一般通用工具测量位移，使用电位计式位移传感器和感应式位移传感器可远距离测量。

使用的方法可能不同，有时使用两台绞车，一台用来升起悬挂部分，另一台使用绞车和滑轮系统将其向下拉紧^[40]。

在使用第三种车身加载方法时，或将汽车架牢，固定在专用支架的基座上，以使车轮离开地面。把测力仪的平台放在车轮下，利用千斤顶可把平台举伸或落下，从而实现加载和减载。

用上述各种方法测定悬挂弹性特性所需时间长，并且要有几个试验人员同时参加试验。采用自动加载并同时记录弹性特性的专用试验台，在这方面具有很大优点。以图2为例，图中所示为汽车科学研究所研制和使用的试验台的简图。所试验的悬挂的车轮9可置于测力仪10上，测力仪可在活动平板上任意水平移动。

悬挂部分的升降利用两个螺旋架4，在架上固定一横梁8。传动从电动机1开始经弹性联轴节5、圆柱齿轮减速器2及蜗轮、蜗杆减速器3到螺旋架。通过转轴7与联轴节6的刚性联接使两架同步移动。在试验车身或车架时，可以固定在横梁8上，或用压载物加载保证悬挂必要变形。

将测力仪和电位计式传感器11的应力和位移自动地记录在双座标的自动记录器上。这样，在试验过程中立即得到所需的悬挂的垂直弹性特性曲线图。在只有一个实验人员参加试验时，试验时间约为4~5min，横梁升降速度为100mm/min。为了避免动负荷作用对弹性特性曲线的影响，速度不能过快，与根据各点画出的特性曲线相比较，特性曲线的连续记录同样可以保证高度的精确性，并且在试验过程中，可以目视检查曲线图的形状。能够说明特性曲线的细节，这在根据各点画出曲线图时是难以觉察到的。

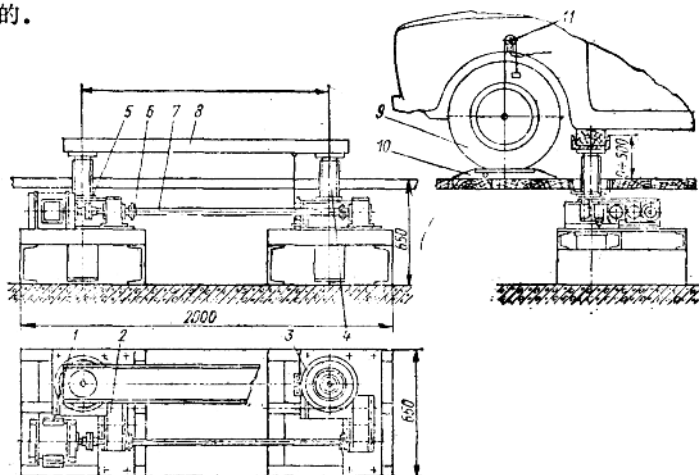


图2 确定悬挂弹性特性的试验台

试验确定悬挂弹性特性曲线的长期经验表明，在很多情况下，在改变变形幅度时，特性曲线也随之改变。在图1中，用虚

线表示各种幅度的垂直弹性特性曲线。从图3可见，在幅度改变时，不仅加载特性线及减载特性线之间的距离改变（即悬挂的摩擦改变），而且特性曲线的斜率也改变（即刚度改变）。产生这一现象的原因可能不同，并且由于悬挂结构的特点而产生的，在图1所示的情况中，在悬挂导向杆的铰接头中有橡胶衬套就是原因之一。橡胶衬套在同心扭转下工作，并且在悬挂变形不大时使刚度增大。在变形较大时，衬套两面旋转，这会使摩擦增加，类似现象可能发生在带有叶片间摩擦很大的叶片弹簧的悬挂中。

在汽车实际行驶条件中，悬挂变形在很大范围内变化，所以应考虑变形幅度对弹性特性曲线的影响。在相当于静负荷的中间位置偏移时，建议用最大偏移为 $\pm 2\text{cm}$ 、 $\pm 1\text{cm}$ 确定悬挂垂直弹性特性曲线。

横向角弹性特性曲线及其它特性曲线的确定

在垂直平面上（此平面垂直于汽车纵向对称平面）作用于悬挂上的力矩和该平面上悬挂角变形（即悬挂部分和非悬挂部分的转角）间的关系称为悬挂的横向角弹性特性曲线。应分别测定汽车前后悬挂的横向角弹性特性曲线。此时，作用于悬挂的力矩为相应轴线的左右轮所承受，而角变形等于悬挂部分相对轮中心连接线的转角。

和垂直弹性特性曲线一样，在没有专用试验台的情况下，横向角弹性特性曲线可用最简单的设备得到（见OH 025 305—67）。为此将左右轮置于单独的测力仪或磅秤上。将横梁紧紧地固定在汽车车身（车架）上。可以使用不同方法形成加载力矩。第一种方法为沿横梁移动重物（压载物），第二种方法是将相等的垂直负荷和反向负荷从汽车左右加于横梁端部。在这两种情况中，都根据测力仪读数 ΔP 的变化（增加或减少）测定加载力矩 M 。

应当指出，根据加于横梁上的力的大小直接测定加载力矩是错误的，因为在悬挂横向角变形的情况下，由于悬挂部分的重心

侧向移动而形成辅加力矩。

在进行试验时必须控制两轮的总垂直负荷保持不变，即悬挂只承受力矩，而不承受垂直力。轮子支撑面的水平反作用应当消除。

使用误差不超过5'的光学象限测角仪测量横向的车身倾角 β

$$\beta_p = \beta - \beta_m$$

式中 β_p ——悬挂横向角变形的角度； β_m ——轮胎变形形成的角度。

为排除 β_m ，必须测量轮胎的变形，这就使试验复杂化。如果轮胎内空气压力能达到使其变形最小，则 β_m 可忽视不计，就可以得到理想的近似值，取下轮胎后也可进行试验。

横向角弹性特性曲线可对车身中线的左右倾斜角画出。特性曲线的例子（小轿车后悬挂）如图3所示，特性曲线的上线表示车身在一个方向（例如沿顺时针方向）回转，下曲线表示反向的回转。由于在悬挂中存在干摩擦，所以两条曲线不重合。在图3

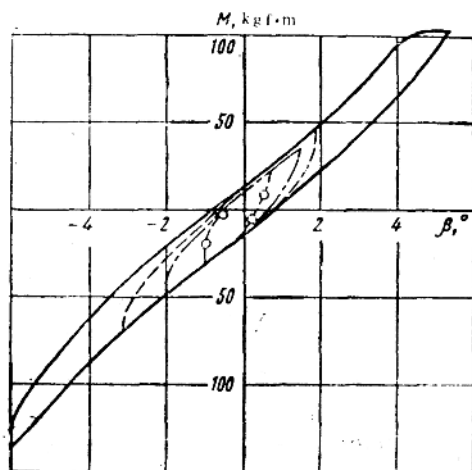


图3 小轿车前悬挂横向角弹性特性曲线

$$1 \text{ kgf} \cdot \text{m} = 9.80665 \text{ N} \cdot \text{m}$$

中所示的特性曲线特点是与中间位置不对称的。这种非对称性很普遍，并且是由悬挂导向装置的非对称性所造成的结果（在这种情况下，导向装置包括横拉杆）。

用上述方法确定悬挂横向角弹性特性曲线比较困难，需要几个试验人员参加，并要事先准备汽车，所以在这种情况下试验过程的简单化和自动化比确定垂直弹性特性曲线更为必要。为此汽车科学研究所使用了上节所说的试验台（图2），同时（图4）所试验的悬挂车轮置于两个测力仪2上，而另一悬挂车轮置于试验台的活动台1上，一个活动台升起，另一个落下，这样就在横向上形成加载力矩。特性曲线自动记录在双座标记录器上，记录力矩值可利用电测力仪读数之差，可利用带有相应转换器的线性位移传感器或陀螺式传感器做角位移传感器。全部试验不超过4~5分钟。这种方法产生误差的原因是试验悬挂的车轮承受的垂直载荷不是绝对固定不变的。此外，有时很难得到所试验悬挂的相当大的横向角变形，在这样情况下应闭锁车轮在活动台上的另一悬挂。

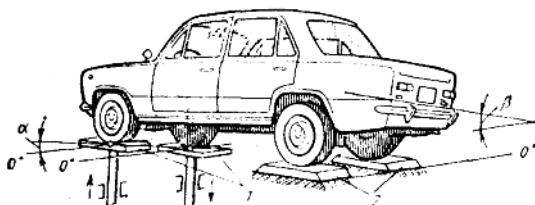


图4 确定悬挂横向角弹性特性曲线装置的简图

悬挂弹性横向角特性曲线一般在左右倾角为 $\pm 10^\circ$ 的范围内进行确定，因此，可以利用垂直加速度传感器做为车身倾角传感器，加速度传感器装在处于水平位置的汽车上，以使其灵敏度轴线垂直于对称的纵向平面上。在汽车倾斜时，从加速度传感器发出的放大信号进入双座标记录器的X轴上。

因为垂直弹性特性曲线，横向角弹性特性曲线可能取决于变

形幅度，各种幅度所得到的特性曲线示于图3。确定横向角弹性特性曲线可以在下列幅度中进行，即最大为 $\pm 4^\circ$ 和 $\pm 2^\circ$ 。

试验表明，在某些情况下，横向角弹性特性曲线也取决于作用在悬挂上的静力垂直负荷，特别是叶片弹簧悬挂^[38]。所以为了更加全面了解情况、应在使用中可能发出各种静力负荷的情况下，确定这些特性曲线。

在确定悬挂垂直弹性特性曲线的同时，进行确定悬挂系统的轮胎垂直弹性特性曲线，如第一节所述。用上述方法得到的轮胎垂直弹性的静态特性曲线，给出的只是在其工作的实际条件中轮胎性能的近似情况。在轮胎滚动和垂直振动的情况下，其动态特性曲线很多作者已进行了研究^[40, 62, 69]，但是讲述这些方法已超出本书的范围。

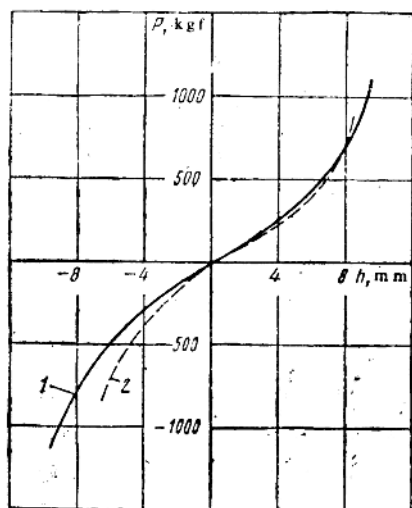


图5 国产(1)和国外产(2)的两辆小轿车前悬挂纵向弹性的特性曲线

除了垂直弹性特性曲线和横向角弹性特性曲线以外，有时必需确定在其它方向加载时悬挂的弹性特性。通常规定，悬挂纵向刚度不仅对于悬挂部分的水平加速度有很大影响，并且对于垂直加速度也有很大影响。

在有水平横向力时，悬挂刚度对可操纵指标影响极大。

确定悬挂的纵向和横向弹性特性曲线的特点是，可能最的

大变形的绝对值可能很小(一般不超过 $1 \sim 1.5\text{cm}$),而非线性曲线(即刚度)随变形的增加而急剧增加,所以测量变形在间隔不大时要很仔细地进行。

在试验时,通常要将车身固定不动,通过测力仪把负荷加到车轮(轴)上,同时使车轮能在所需方向自动移动。从中间位置向两边变形时,画下特性曲线,例如,图5所示为国内外生产的两辆高级小轿车前悬挂纵向弹性特性曲线^[18, 81],所画出的特性曲线是加载线和减载线的平均值,因为在这种情况下迟滞回线不大,把作用到两个车轮中心的力的向上方向(即向后轮)认为是正方向,尽管悬挂结构不同,也要注意两条曲线接近的情况。

车架扭转刚度可能对悬挂部分的横向角振动有很大影响,对很多载重汽车来说,车架扭转刚度同样有像悬挂横向角刚度那样的方式。车架扭转刚度也可用5页所说的同样方法测定,根据测力仪的读数确定加载力矩,根据装在前后轮平面的车架上的角位移传感器读数测定车架扭转角。此时也应考虑到,在车身、驾驶室及其它机组固定在车架的情况下的扭转刚度会改变。

试验数据处理

为了确定振动系统参数:悬挂垂直刚度,有效静力挠度,摩擦力的大小,动力行程,需对悬挂垂直弹性曲线图进行处理,处理的例子如图6所示。理想的特性曲线(不考虑摩擦)像加载及减载线的中线那样,因此两条曲线间的垂线的距离被平分。悬挂刚度 c_0 等于负荷对变形的导数,即 $c_0 = dP/dh$,并且根据比例尺度由特性曲线切线的倾角正切来确定。悬挂的摩擦力常常随载荷的增加而改变,因此加载特性曲线和减载特性曲线有不同的倾斜度,在这样情况下, c_0 值可根据理想曲线确定或从加载和减载线所得的算术平均刚度 c_{0H} 和 c_{0B} 来确定。后一种办法给出更精确的结果,因为不必画出平均线的中间过程。上面已经指出,悬挂垂直弹性曲线一般决定于变形幅度。于是必需确定各种幅度的刚度。试验表

明,在变形不大时的垂直刚度可能超过变形大时的刚度40%以上。

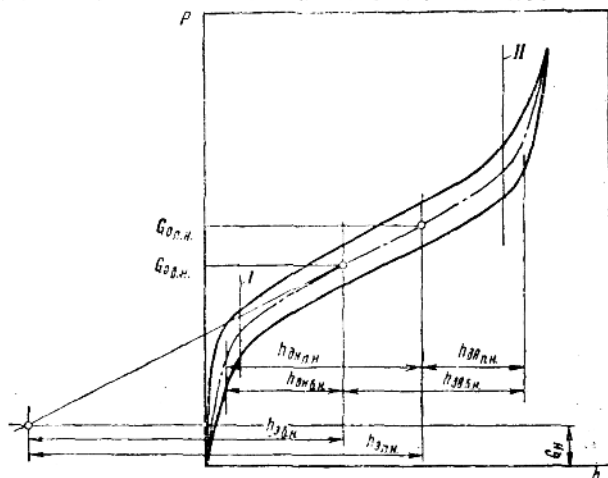


图6 悬挂垂直弹性特性曲线处理的例子

$G_{0П.Н}$ —满载汽车轴线上的载荷 $G_{0Б.Н}$ —无载汽车的轴载荷 G_H —非悬挂部分的重量 I—向下行程限制器接触 II—向上行程限制器接触
有效静挠度 h_0 由下面公式求出

$$h_0 = \frac{P_0}{c_{p0}} = \frac{G_0 - G_H}{c_{p0}}$$

式中 P_0 ——悬挂的静载荷; c_{p0} ——当载荷为 P_0 时的悬挂刚度; G_0 ——两个轮轴上的静载荷; G_H ——非悬挂部分的重量。

有效挠度可直接由图e所示曲线求出, 摩擦力 F_r 是根据比例尺大小从中线到加载线或减载线的垂直线的距离来确定。

与接触到行程限制器相应的悬挂变形在确定垂直弹性曲线的过程中或在各别测量的情况下已标出, 这些值在汽车左右两侧可能不同, 其算术平均值以垂线的形式画在曲线图中。

最大动力行程 $h_{дв}$ 和 $h_{дн}$ (储备行程) 是根据垂直特性曲线近似确定的, 这是由于行程受到悬挂变形的限制, 在这种变形下,

刚度急剧增加，并且载荷进一步增加不会引起变形极大增加（见图6）。储备行程至少必需根据汽车两种重量状态确定。

也可以用另一种方法确定悬挂动力行程，提出利用轴载荷超过静载荷^[60]一倍的悬挂变形作为小轿车的最大动力行程 $h_{\text{д.в.}}$ 。这种方法的优点是结果极为明确并具有单值性。

根据悬挂横向角弹性特性曲线可求出横向角刚度 c_{θ} ，它是依据车身在中间位置相应的平均特性线上点的斜切线得出。在该点上还可沿中线与特性上曲线或下曲线间距离来确定摩擦力矩 $M_{\text{т.в.}}$ ，根据确定悬挂刚度的 G_0 值沿轮胎弹性特性曲线求出轮胎刚度 $C_{\text{м.}}$ 。

悬置质量和非悬置质量大小是汽车振动系统的重要参数，为了确定有效静力挠度亦必须知道悬置质量的重量。悬置质量和非悬置质量之和 $M+m$ 是通过称量轴载荷来确定。为了确定 m 必需将汽车拆开并称量非悬挂部分，因为许多零件重量是在悬挂部分和非悬挂部分间进行分配（弹性元件，导向装置杠杆，减振器，转向操纵柱杆等），所以只能近似地确定 m 值。

由于试验人员不可能真实地拆卸汽车，所以在测定 m 时常常遇到很大困难。

汽车科学研究所正在研究不需拆卸汽车悬挂而能近似测量 m 值的一种动力试验方法，这种方法将在第二章叙述。

结 果 分 析

根据试验各项目的对得到的汽车振动系统的静态曲线和参数进行分析。

从悬挂弹性特性曲线可以得到对所研制汽车在试验第一阶段的有价值的资料，一般形式的特性线可以推测悬挂正常工作会存在的误差。以图7,a为例表示试验样车叶片弹簧的悬挂特性曲线，当悬挂变形时，其中弹簧的各叶片支在基片的卷耳上。图7,b为另一种小轿车试验样车的悬挂特性曲线，它有极大的摩擦，这种摩擦

随变形的增大而增加。

悬挂刚度，有效静力挠度和最大动力行程通常为设计者在设计时所依据的悬挂的几个参数。但是甚至基本弹性元件的刚度与

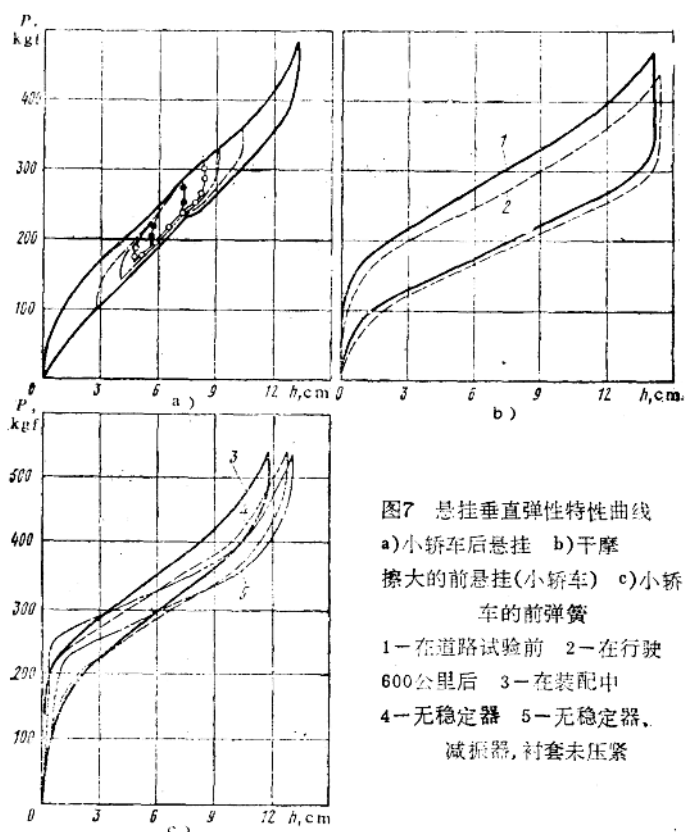


图7 悬挂垂直弹性特性曲线

a)小轿车后悬挂 b)干摩

擦大的前悬挂(小轿车) c)小轿
车的前弹簧

1—在道路试验前 2—在行驶
600公里后 3—在装配中

4—无稳定器 5—无稳定器、
减振器,衬套未压紧

计算数值相符的情况下，在计算数值和试验结果所得到的数值间也常常存在明显偏差。在试验时应弄清这种偏差的原因，主要原因是悬挂刚度与很多因素有关，而这些因素在计算时常常没有考