

# 基于工程混凝土搅拌车平顺性建模与分析研究

三一重工股份有限公司 宋立霞 方传青

针对某新开发的大方量工程搅拌车，通过建立整车虚拟样机模型、试验路谱，研究整车在不同路面、不同工况下的振动特性，并通过与试验测试结果进行对比分析，建立一套针对工程车辆整车平顺性分析评价方法，为新产品开发与优化设计提供指导。

## 一、引言

随着工程机械的发展，国家混凝土政策的施行，为实现混凝土较长时间，较远距离运输，混凝土搅拌车被大量的使用，尤其是大方量的搅拌车市场需求量较大。同时混凝土搅拌车长期在重载、振动与冲击载荷下工作而且工作条件比较恶劣，所以对搅拌车平顺性研究显得尤为重要。

## 二、分析技术路线

以试验结果为判断标准，以仿真分析为指导，试验仿真相结合，构建整车动力学仿真模型和强化路面模型，控制整车在强化路面以 50km/h、60km/h 两种速度下进行仿真，通过与试验结果对比，分析修正轮胎、钢板弹簧及减震器等元件的非线性参数，建立与实际接近的整车动力学刚柔耦合模型，验证分析其平顺性性能，为指导改进搅拌车设计，提供改进建议。

## 三、仿真模型的建立

分析模型建立主要包括整车系统模型与各路谱模型，即车—路系统。建立准确的车—路系统模型必须通过试验获得各子系统准确的物体参数数据，运用恰当的建模方法、

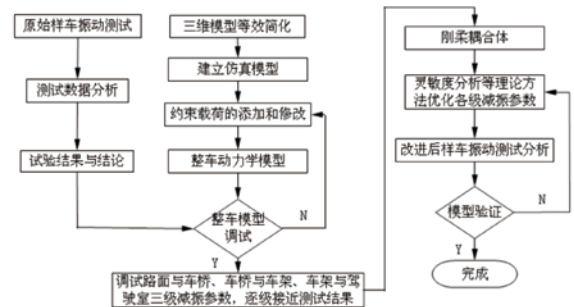


图1 技术路线

施加正确的载荷条件，才能建立可靠的虚拟模型。

### 1. 整车参数

简化后的分析模型主要包括：驾驶室、车架、搅拌筒前后台、搅拌筒、减速机、一桥、二桥、中后桥和平衡悬架系统等。

整车基本参数如表1所示、主要部件的质心位置和转动惯量如表2所示；其中，选取一桥中性平面、车架上端面、

表1 搅拌车整车基本参数

| 装备质量 (t) | 满载质量 (t) | 整车外形尺寸 (mm)     | 轴距 (mm)        | 前轴最大允许质量 (t) | 中后轴最大允许质量 (t) |
|----------|----------|-----------------|----------------|--------------|---------------|
| 18.3     | 54.3     | 11078×2505×3990 | 1700+3500+1350 | 13           | 18            |

车架中性平面的交点为原点，车右为  $X$  向，车前为  $Y$  向，车顶为  $Z$  向。

表 2 主要部件质量、质心位置及转动惯量表

| 名称        | 质量<br>(kg) | 质心位置 (mm) |         |       | 转动惯量 ( $\text{kg} \times \text{mm}^2$ ) |            |            |
|-----------|------------|-----------|---------|-------|-----------------------------------------|------------|------------|
|           |            | $X$       | $Y$     | $Z$   | $I_{xx}$                                | $I_{yy}$   | $I_{zz}$   |
| 驾驶室       | 800        | 0         | 562     | 408   | 4.473E+009                              | 5.597E+009 | 3.050E+010 |
| 车架        | 2696       | 0         | -4376.2 | -152  | 1.82E+010                               | 4.63E+008  | 1.86E+010  |
| 一桥        | 537        | 0         | -5.2    | -539  | 1.47E+010                               | 4.91 E+011 | 4.87E+011  |
| 二桥        | 537        | 0         | -1705   | -539  | 1.47E+010                               | 4.91 E+011 | 4.87E+011  |
| 中桥        | 900        | 0         | -5187   | -593  | 1.1E+009                                | 1.22E+009  | 3.3E+008   |
| 后桥        | 900        | 0         | -6542   | -593  | 1.1E+009                                | 1.22E+009  | 3.3E+008   |
| 搅拌筒       | 3612       | 0         | -5239.5 | 14755 | 1.81E+010                               | 4.08E+009  | 1.77E+010  |
| 搅拌筒<br>前台 | 187.2      | 0         | -1387.7 | 215.4 | 1.77E+007                               | 2.66E+007  | 3.4E+007   |
| 搅拌筒<br>后台 | 618.7      | 0         | -7908.4 | 583.6 | 3.58E+008                               | 3.17E+008  | 3.3E+008   |
| 后悬架       | 286        | 0         | -5882   | -518  | 4.19E+006                               | 5.52E+007  | 5.6E+007   |

2. 各子系统建模

车—路系统动力学建模主要包括前后板簧、减震器、轮胎、路面子系统。

(1) 前、后板簧建模。

钢板弹簧是汽车悬架中应用最广泛的一种弹性元件，前板簧建模参数如图 2 和表 3 所示，表中物理参数根据板簧材料获取，接触和衬套刚度为孔辉科技提供。

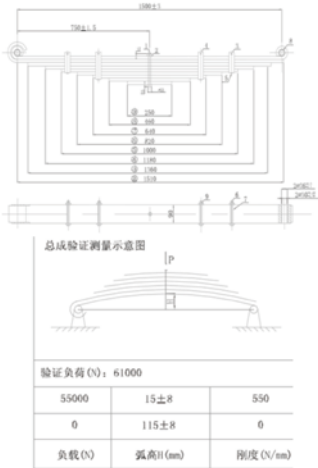


图 2 前板簧基本参数

前板簧模型采用 17 段等效簧片、16 段 beam 梁模拟，模型如图 3 所示。经验证静刚度与出厂刚度 550N/mm 存在一定偏差，误差为 0.27%，验证结果如图 4 所示。

表 3 前板簧物理参数

| 名称 | 剪切模量<br>( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) | 密度<br>( $\text{kg}/\text{mm}^3$ ) | 杨氏模量<br>( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) | 板簧碰撞刚度<br>( $\text{N}/\text{mm}$ ) | 衬套刚度                            |                                                    |
|----|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------|
|    |                                    |                                   |                                    |                                    | 线刚度<br>( $\text{N}/\text{mm}$ ) | 扭转刚度<br>( $\text{N} \times \text{mm}/\text{deg}$ ) |
| 取值 | 79900                              | 7.8e-6                            | 206000                             | 1000                               | 10000                           | 450000                                             |

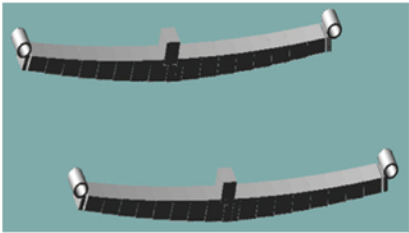


图 3 前板簧 beam 梁模拟模型

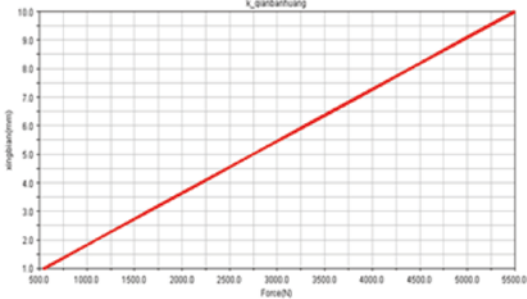


图 4 板簧静刚度验证

后板簧刚度较大，后板簧的刚度值、弧高及验证负荷等基本参数和物理参数如图 5 和表 4 所示。应用 ADAMS 软件的 Chassis 模块进行后板簧柔性体的构建，其模型主要采用离散梁法将后板簧离散化，每段视为一个刚体，每段之间用 beam 梁单元连接模拟。Beam 梁参数根据板簧截面形状与材质得出，整理后的后板簧模型如图 6 所示，并按照图 5 所示规定的验证负荷进行静刚度验证，其刚度值为 4333N/mm，符合规定要求。

表 4 后板簧物理参数

| 名称 | 剪切模量<br>( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) | 密度<br>( $\text{kg}/\text{mm}^3$ ) | 杨氏模量<br>( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) | 板簧碰撞刚度<br>( $\text{N}/\text{mm}$ ) | 片簧摩擦系数 | 阻尼比 |
|----|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------|-----|
| 取值 | 79900                              | 7.8e-6                            | 206000                             | 1000                               | 0.15   | 0.1 |

(2) 减震器建模。

搅拌车采用双作用筒式减振器 SYM1250T 5，上端可绕上端带孔螺栓 1 轴线转动，下端通过带孔螺栓 8 与下连接叉 7 联接，下连接叉可绕下安装支座轴端的轴线转动，有效

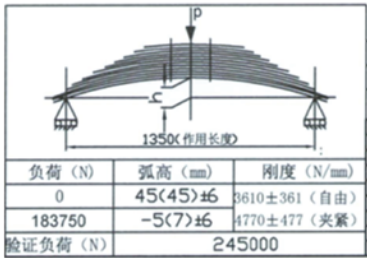


图 5 后板簧基本参数

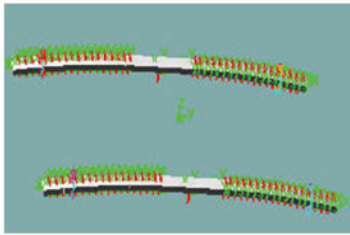


图 6 后板簧 beam 梁模拟模型

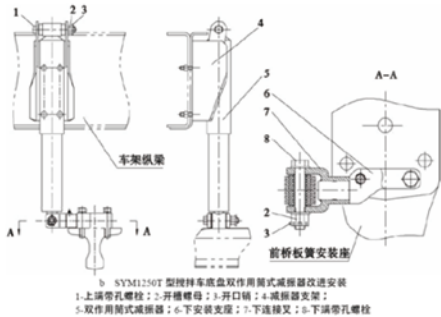


图 7 双向作用筒式减振器

消除因车架扭转变形造成减振器损,减振器结构如图 7 所示。

减振器模型主要采用非线性力元模拟,根据车架与车桥实际相对速度大小选取阻尼力,阻尼力曲线部分由浙川汽车减振器厂提供,减振器代号为 S45-275HH,在温度  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、行程 100mm、速度 0.52m/s 的条件下,减振器在排气后测量时阻力值应符合下述要求:复原阻力值  $P_f=9350\pm 850\text{N}$ 、压缩阻力值  $P_y=1300\pm 100\text{N}$ ,参数值由厂商提供;在已知阻尼力变化曲线条件下,采用单个阻尼力模拟减振器作用,搅拌车减振器阻尼力变化曲线用图 8 曲线表示,减振器模型如图 9 所示。建立表示阻尼力的曲线 spline\_1,为力随相对速度的变化关系,采用 AKISPL 函数表示 force。

(3) 轮胎建模。

轮胎建模准确性很大程度上取决轮胎的尺寸参数和动力学参数,搅拌车采用前进轮胎 12R22.5,对 mft\_truck315 轮胎特性文件进行特性参数的调试修改,调试后

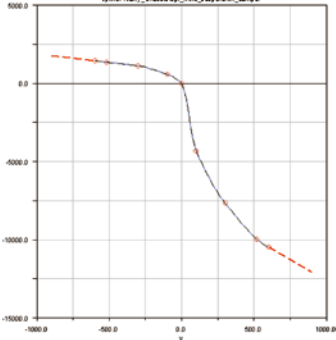


图 8 减振器力变化曲线

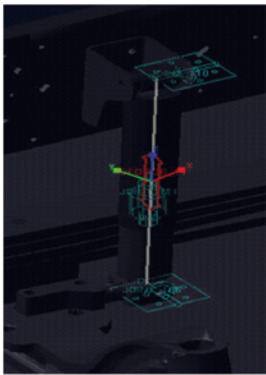


图 9 减振器模型

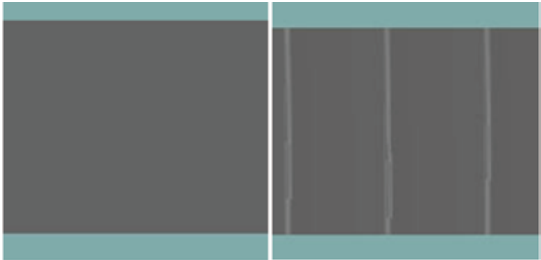
的轮胎模型主要参数如表 5 所示。

表 5 PAC2002 轮胎参数

| 名称 | 自由半径 (m) | 名义断面宽度 (m) | 名义高宽比 | 径向刚度 (N/m) | 径向阻尼 (N.s/m) | 外倾角 (deg) | 侧偏角 (deg) | 轮胎最大载荷 (N) |
|----|----------|------------|-------|------------|--------------|-----------|-----------|------------|
| 取值 | 0.528    | 0.215      | 0.8   | 3.8e+006   | 3550         | 0.2619    | 1.5708    | 75000      |

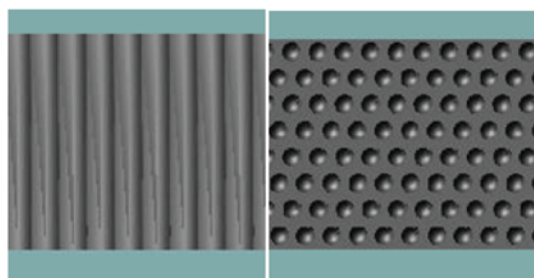
(4) 路面建模。

通过试验测得某大型试验场各路面数据参数,并使用 MATLAB 软件编辑路谱程序生成 txt 格式文件后转换成 Adams 所需要的 rdf 格式路面属性文件。试验路面包括: 2 维平路、波形路、搓板路和鱼鳞坑路,采用 rdf 特性文件导入软件后,显示效果如图 10 所示。



(a) 2D 平路

(b) 波形路



(c) 搓板路 (d) 鱼鳞坑路

图 10 路面模型

以上各路面模型均按照某大型试验场跑道实际尺寸建立,其中波形路长 50m、搓板路长 160m、鱼鳞路长 160,宽度均为 4.8m,使用 MATLAB 软件编辑路谱程序文件,构建模拟试验场地环形跑道,强化路与普通路全长共计 1880m,显示效果如图 11 所示。



图 11 模拟某大型试验场环形跑道模型

### 3. 车-路系统建模

将搅拌机驾驶室、车架、搅拌筒前后台、搅拌筒、减速机、一桥、二桥、中后桥和平衡悬架系统、路面等装配完成整车-路面模型,如图 12 所示。

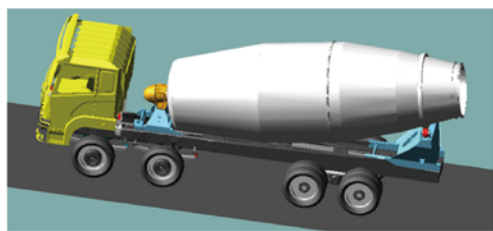


图 12 整车动力学模型

在一桥、二桥与轮胎转向节之间添加转向驱动以实现整车的转向控制,一桥转向函数:

```
STEP(time, 7.3, 0.0d, 7.8, -26.25d)+STEP(time, 27.7, 0.0d, 28.2, 26.25d)+STEP(time, 36.2, 0.0d, 36.7, -26.25d)+STEP(time, 56.67, 0.0d, 57.17, 26.25d)
```

二桥的转向控制驱动函数为:

```
ATAN(TAN(.jiaobanche.yiqiao_zhuanjiao*pi/180)*418/588)*180/pi*1d
```

在中桥、后桥与轮胎之间添加旋转副和驱动力,实现整车的加速、匀速、减速等行驶工况,其直驱动力函数为:

```
IF(time-5.3:step(time,0,0,2,21),step(time,5.3,21,6.3,5),IF(time-29.0:step(time,6.3,5,28.5,5),step(time,29.0,5,30.5,21),IF(time-35.5:step(time,31,21,35-21),step(time,35.5,21,36.0,5),IF(time-58:step(time,36.0,5,58,5),step(time,58,5,59,21),step(time,59,21,61,21))))
```

## 四、整车平顺性分析与试验测试对比

### 1. 桥载分配调试

对进行一定程度的简化处理的整车模型,增加平衡质量块,保证整车质量符合实际情况,并对平衡质量块进行位置调整,调试整车动力学模型的各车桥桥载分布接近试验结果,结果如表 6 所示。

表 6 整车桥载分布调试结果对比

|      | 空载    |       |        |
|------|-------|-------|--------|
|      | 一轴    | 二轴    | 三四轴    |
| 试验测试 | 3.3t  | 4.37t | 11.02t |
| 仿真值  | 2.8t  | 4.39t | 11.66t |
| 误差率  | 15.1% | 0.4%  | 5.8%   |

经调平衡质量块和整车质量分配,基本保证模型的桥载分配与试验吻合。

### 2. 主要工况分析

通过控制函数控制整车在某大型模型试验路谱上进行周期行驶,实现搓板路等强化路面的行驶工况仿真分析,取整车在常用车速 50km/h 和 60km/h 工况,关键路面搓板路上的仿真与试验数据进行对比分析。

#### (1) 50km/h 时速工况。

将仿真的时域信号转换为 FFT 幅值谱,其中各桥的振动主峰频率仿真值为 24.17Hz、试验测试结果为 24.15Hz,车桥测点振动特性的仿真与试验结果对比情况如表 7 所示。

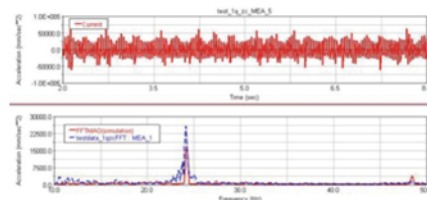


图 13 一桥振动幅值谱的仿真与试验对比

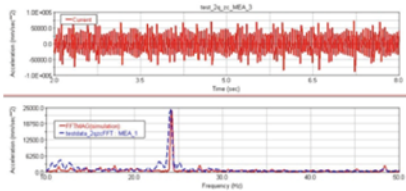


图 14 二桥振动幅值谱的仿真与试验对比

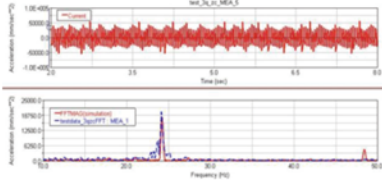


图 15 三桥振动幅值谱的仿真与试验对比

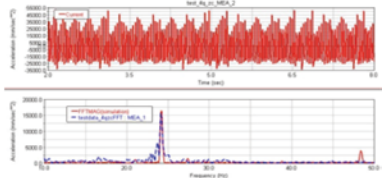


图 16 四桥振动幅值谱的仿真与试验对比

表 7 车桥振动特性幅值谱的仿真与试验结果对比

(单位:  $\text{m/s}^2$ )

|          | 一桥<br>左侧<br>峰值 | 一桥<br>右侧<br>峰值 | 二桥<br>左侧<br>峰值 | 二桥<br>右侧<br>峰值 | 三桥<br>左侧<br>峰值 | 三桥<br>右侧<br>峰值 | 四桥<br>左侧<br>峰值 | 四桥<br>右侧<br>峰值 |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 仿真<br>结果 | 18.546         | 18.545         | 23.900         | 23.898         | 17.955         | 17.771         | 16.452         | 16.314         |
| 试验<br>结果 | 25.032         | 24.813         | 24.589         | 22.752         | 20.065         | 20.121         | 15.951         | 16.513         |
| 误差<br>率  | 25.9%          | 25.2%          | 2.8%           | 5.0%           | 10.5%          | 11.6%          | 3.1%           | 1.2%           |

将仿真的时域信号转换为 FFT 幅值谱, 其中各桥的振动主峰频率仿真值为 28.125Hz、试验测试结果为 28.07, 车桥测点振动特性的仿真与试验结果对比情况如表 8 所示。

从上面 50km/h 和 60km/h 试验与分析对比数据可以看到: 各桥振动主峰频率值的仿真结果与试验测试结果基本一致, 说明路面对整车动力学模型产生的振动激励符合实际情况。

结果存在一定的误差, 主要是由于试验测试误差, 模型简化及相关参数误差引起。

## 五、结语

本文通过介绍搅拌车各子系统模型建模方法、不同路谱

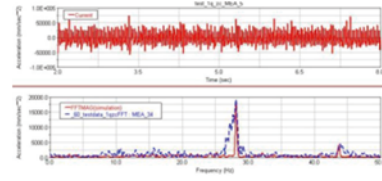


图 17 一桥振动幅值谱的仿真与试验对比

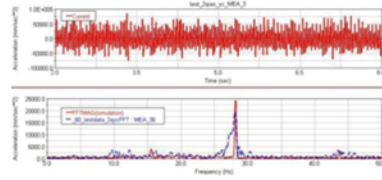


图 18 二桥振动幅值谱的仿真与试验对比

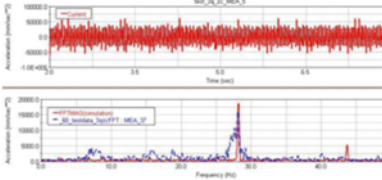


图 19 三桥振动幅值谱的仿真与试验对比

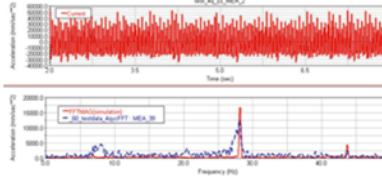


图 20 四桥振动幅值谱的仿真与试验对比

表 8 车桥振动特性幅值谱的仿真与试验结果对比

(单位:  $\text{m/s}^2$ )

|          | 一桥<br>左侧<br>峰值 | 一桥<br>右侧<br>峰值 | 二桥<br>左侧<br>峰值 | 二桥<br>右侧<br>峰值 | 三桥<br>左侧<br>峰值 | 三桥<br>右侧<br>峰值 | 四桥<br>左侧<br>峰值 | 四桥<br>右侧<br>峰值 |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 仿真<br>结果 | 17.487         | 17.485         | 24.133         | 24.131         | 18.608         | 18.375         | 16.755         | 16.609         |
| 试验<br>结果 | 19.152         | 17.740         | 21.101         | 19.631         | 16.027         | 16.432         | 13.332         | 13.450         |
| 误差<br>率  | 8.7%           | 1.4%           | 14.3%          | 22.9%          | 16.1%          | 11.8%          | 25.6%          | 23.4%          |

模型建立, 并对常用车速、关键路面下仿真振动数据与试验测试数据进行对比, 验证了建模方法与平顺性分析方法的准确性, 证明了利用该方法在解决该类问题上的正确性和可行性, 仿真分析结合试验测试的方法势必会成为今后产品设计与优化的主要方法, 通过试验测试数据验证并修正仿真模型, 反过来再利用仿真模型去指导、优化设计, 从而可以大大减少实验费用, 并且在较短的时间内开发出更好的产品。IM