

# 动态车辆称重物理模型与提高动态称重准确度研究

山东省交通厅公路局 张波

山东省计量科学研究院 鲁新光

山东省尤洛卡自动化装备股份有限公司 邓铁六 周杉杉

**【摘要】** 提出了车辆低速匀速驶过长方形秤台时长方向挠曲振动是导致动态称重不准确的主要原因，认定振动时质量块加速运动对传感器产生的惯性力影响称重准确度，建立了动态车辆称重的物理模型，给出动态称重瞬时值分布的极差，表明要提高动态称重准确度，应对秤台加大阻尼、减小振幅、适当提高共振频率，并设计制造了分体式小秤台强阻尼动态衡样机，经计量测试证明性能优于长方形大秤台。

**【关键词】** 计量学；分体式秤台；物理模型；动态车辆称重

## 一、引言

我国高速公路为遏制超限运输，普遍采用动态车辆自动衡进行计重收费。静态衡对车辆称重，准确度 $\pm 0.5\% \sim \pm 0.1\%$ ，而动态衡进行轴称重累加求得整车总重量，准确度甚至达不到 $\pm 3\%$ 。文献[1, 2]研究了车辆驶过秤台震动对称重的影响及其消除方法。文献[3]研究了车辆自身振动的影响及消除方法。本文提出了长方形秤台当重车通过时，长方向挠曲振动强烈（在一定车速范围内产生共振）影响动态称重准确度。对秤台长方向挠曲振动的影响及消除方法进行了研究。

## 二、三种振动干扰动态称重

理论轴称重曲线见图 1。

研究发现，汽车驶过秤台存在三种振动：

第一种，频率较高机械振动（频率 $< 200\text{Hz}$ ）：若称重传感器对它响应，则在轴称重曲线上叠加着振动干扰，见图 2。

第二种，车辆自身振动：轴质量与减震弹簧组合振动。重车轴质量大于 10t，振动频率小于 2.5Hz，周期大于 0.4s，车过秤台有效称重时间大多小于 0.4s，这种振动影响很难消除。车辆快速或加减速驶过不平路面时，振动强烈对称重影响很大；但车辆低速匀速驶过平整路面时，振幅小，影响不大。

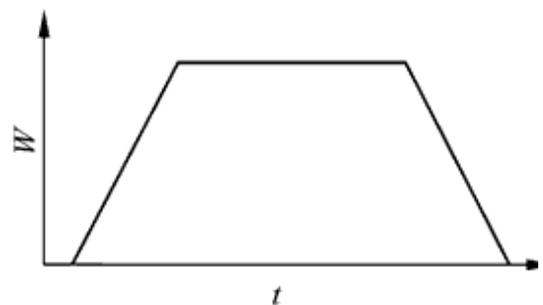


图 1 理论的轴称重曲线

第三种，秤台长方向挠曲变形振动：由于动态衡长 $>3\text{m}$ 、宽 $0.8\text{m}$ 。重车通过时，秤台中部挠度达到 $3\sim 4\text{mm}$ 。这种振动频率很低，低通滤波不能消除，对动态称重准确度影响很大，本文着重研究这种振动的影响和消除方法。

### 三、动态车辆称重的物理模型

长方形秤台称重时，车辆垂直秤台长边通过见图3，秤台长方向发生挠曲变形为主要振动形式。

秤台弹性变形等效刚度为 $k$ ，见图4。秤台振动时，秤台等效质量 $m$ 和车轴质量 $M$ 等效于质量块，驶上秤台的轴重施加的力 $W=Mg$ 产生阶跃载荷，破坏系统平衡引起振动，其主频率（基频）与车速有关，周期约等于轴通过秤台时间的2倍。当车速加快阶跃载荷主频率接近秤台挠曲振动固有频率时将引起强烈振动（共振）。设主谐波振幅为 $rMg$ ， $r$ 为谐波系数，小于1，其圆频率为 $\omega=2\pi/T$ ， $T$ 为周期。若秤台还受到阻尼力 $(-a\dot{y})$ ，则称重系统的物理模型见图4。

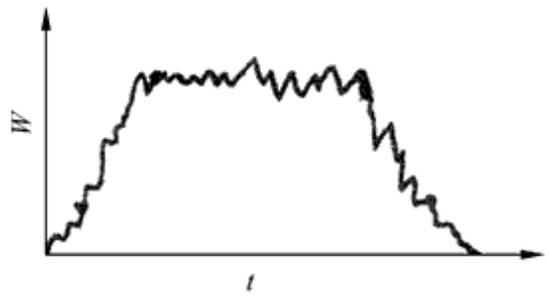


图2 有振动干扰的轴称重曲线

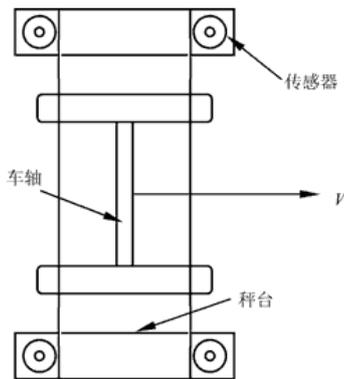


图3 车轴通过秤台

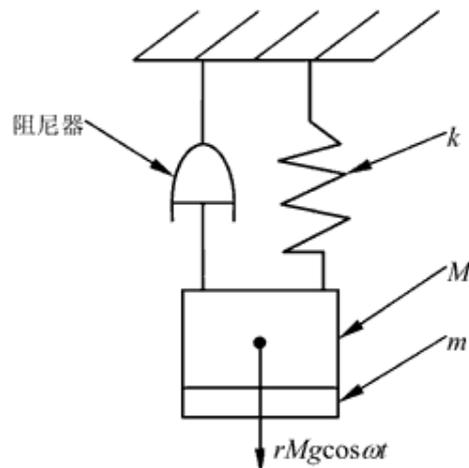


图4 秤台动态称重物理模型

质量块 $(m+M)$ 受力图如图5所示。

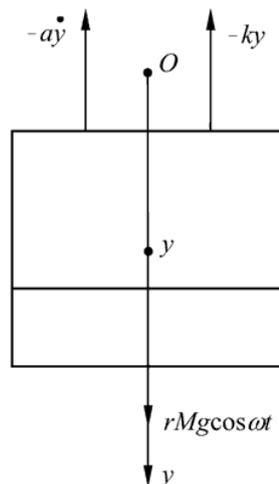


图5 质量块受力图

质量块运动方程为:

$$\ddot{y} + 2\beta \dot{y} + \omega_0^2 y = h \cos \omega t \quad (1)$$

式中:  $y$  为质量块 ( $m+M$ ) 重心纵坐标,

$$\begin{aligned} \omega_0^2 &= k / (m+M); \quad 2\beta = a / (m+M); \\ h &= r Mg / (m+M) \end{aligned} \quad (2)$$

其普遍解为:

$$y = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega_r t + \psi) + A \cos(\omega t + \phi) \quad (3)$$

$$\text{式中:} \quad \omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} \quad (4)$$

式 (3) 第一项为过渡过程, 第二项为稳定解。

稳定解的振幅  $A$  为:

$$A = h / \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2} \quad (5)$$

质量块 ( $m+M$ ) 支承于称重传感器上, 质量块对传感器的作用力包括: 车轴重  $Mg$  (注: 秤台重量已在称重系统自动调零时置为零); 质量 ( $m+M$ ) 加速振动时惯性力  $-(m+M) \ddot{y}$ , 因此称重瞬时值  $W$  为:

$$W = Mg - (m+M) \ddot{y} \quad (6)$$

#### 四、分析讨论

##### 1、质量块振动对称重的影响

由式 (6), 质量块振动对称重影响:

第一阶段: 车轴驶上称台, 等同阶跃载荷  $Mg$  加于秤台, 质量块 ( $m+M$ ) 向下加速运动,  $\ddot{y} > 0$ ,  $W = Mg - (m+M) \ddot{y} < Mg$ ;

第二阶段: 秤台挠曲到它对车轴的向上弹力大于  $Mg$ , 质量块先向下作减速运动至速度为零, 然后向上作加速运动到速度最大, 此阶段中,  $\ddot{y} < 0$ ,  $W > Mg$ ;

第三阶段: 从速度最大, 向上作减速运动到速度为零, 再向下作加速运动到速度最大, 此阶段中  $\ddot{y} > 0$ ,  $W < Mg$ ;

此后又重复到第二阶段, 如此反复进行。

##### 2、阻尼对称重的影响

初始条件  $t=0$ ,  $y=0$ ,  $\dot{y}=0$ , 在  $\omega = \omega_0$  时, 若  $\beta \ll \omega_0$ , 可得

$$y = \frac{h}{2\beta\omega_0} (1 - e^{-\beta t}) \sin \omega_0 t \quad (7)$$

即阻尼很小时, 受迫振动是一种振幅逐渐增大的简谐振动, 见图 6, 其振幅为:

$$A = \frac{h}{2\beta\omega_0} = \frac{\omega_0}{2\beta} \frac{h}{\omega_0^2} = \frac{\omega_0}{2\beta} \frac{rMg}{k} \quad (8a)$$

结合式 (2) 得

$$A = \frac{rMg}{2\beta\sqrt{m+M}\sqrt{k}} \quad (8b)$$

式中  $rMg/k$  为车轴重主谐波分量能引起的最大静态变形量。

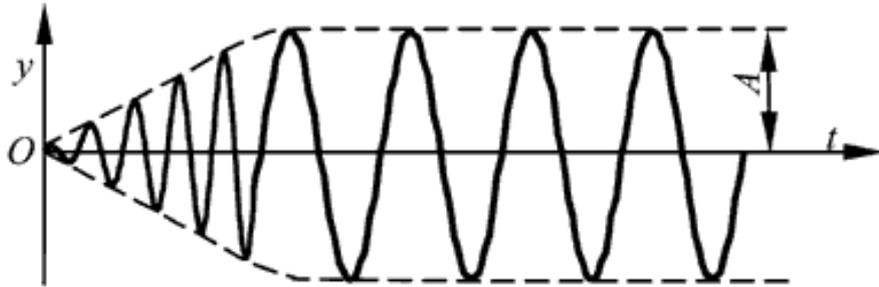


图 6 振幅逐步增大的受迫振动

若  $\omega_0 / 2\beta > 1$ ，振幅可比最大静态形变大许多倍，这时产生共振。

若  $\beta > \omega_0 / 2$ ，则  $A < rMg/k$ ，不发生共振。

由稳定解：

$$y = ASin\omega_0 t$$

$$\ddot{y} = -\omega_0^2 ASin\omega_0 t$$

称重瞬时值为：

$$W = Mg + (m+M) \omega_0^2 ASin\omega_0 t$$

$W$  在  $Mg - (m+M)\omega_0^2 A$  到  $Mg + (m+M)\omega_0^2 A$  之间变动，其极差为：

$$\delta = 2(m+M)\omega_0^2 A = rMg\omega_0 / \beta \quad (9a)$$

结合式(2)得

$$\delta = \frac{rMg}{\beta} \sqrt{\frac{k}{m+M}} \quad (9b)$$

由式(8)和(9)：阻尼系数  $\beta < \omega_0 / 2$ ，就可能产生共振。因此必须加大对秤台挠曲变形振动的阻尼；同时  $\beta$  越大则  $\delta$  越小，动态称重准确度越高。

### 3、秤台刚度对称重准确度的影响

由式(8b)，当  $\beta$  一定时，加大秤台挠曲刚度  $k$ ，可使位移振幅  $A$  变小，似乎有利于提高动态称重准确度；但由式(9b)称重极差  $\delta$  却随  $k$  增大而增大，这是由于  $k$  大时，位移振幅固然小了，但共振频率  $\omega_0$  高了，加速度振幅  $\omega_0^2 A$  变大，所以加大  $k$  会降低动态称重准确度。

### 4、大秤台试验数据与理论对照

长方形大秤台称重与车速的关系如表 1。

表 1 长方形大秤台计量测试数据

/(%)

车速/km·h <sup>-1</sup>	慢	8~9	12~13	16~18	备注
平均值误差	2.1	2.5	16.8	-8.5	不加胶板阻尼
	2.3	3.7	11.8	-5	加有小胶板阻尼
测量重复性	-0.48~0.68	-0.09~0.09	-7.9~5	-0.7~0.4	不加胶板阻尼
	-0.7~0.5	-1.1~1.4	-1~0.97	-2~1.6	加有小胶板阻尼

注：实际车重 36.58t，每个车速范围称重 6 次以上。

由表 1 可见：(1) 车速 16km/h 以上，称重变小，但重复性好；(2) 车速 12~13km/h，称重变大很多，且无阻尼时分散性大，可能是共振所致；有弱阻尼误差略小，但重复性好，说明加阻尼可抑制共振；(3) 9km/h 以下，称重误差较小，重复性好。表明振动弱，对称重结果影响不大；(4) 不加阻尼，单纯提高秤台刚度，称重误差更大。

由以上分析可知，为提高水平路面低速匀速驶过车辆动态称重准确度，应从以下几个方面改进称重台：减小秤台挠曲振动振幅（减弱振动）；适当提高秤台固有振动频率（共振频率），避免共振；加阻尼吸收振动，抑制共振。

### 五、秤台改进试验

#### 1、分体式小秤台强阻尼动态汽车衡

称重台由两个平行布置的小秤台组成，见图 7。

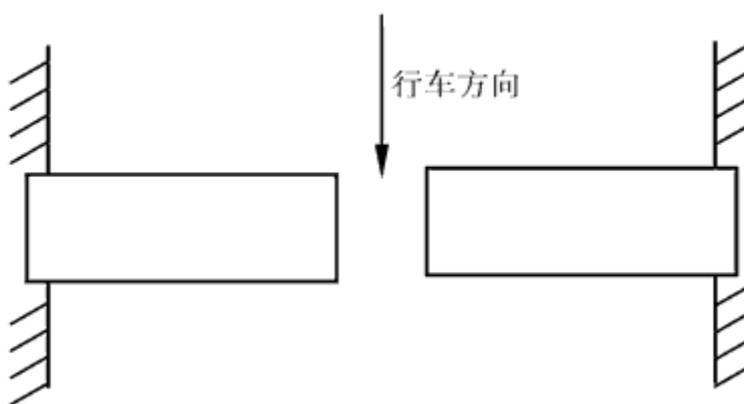


图 7 分体式小秤台

分体式动态汽车衡设计要点：

(1) 以两个 1500×500×130mm 小秤台取代 3400×800×200mm 长方形大秤台。将秤台长度减为 1/2.27，承重减为 1/2。因此称重时，秤台中心挠度将减为 1/4.5，振幅减小 4.5 倍。

(2) 小秤台采用 20mm 厚钢板焊接而成，刚度比大秤台大，提高了谐振频率，进一步降低了振

幅。

(3) 在秤芯与边框之间安装橡胶阻尼板，以弹簧保持稳定正压力，使阻尼作用长期保持稳定。

(4) 每个小秤台采用 3 只液压转换振弦式传感器称重（静定结构）取代 4 只传感器称重（静不定结构），有良好抗干扰能力，长期稳定性好。

该动态自动衡每秒采样 400 次，由微机进行数据处理，求出轴重累加求得整车总重量。

注：该分体式动态汽车衡已获国家发明专利。

## 2、计量测试结果

样机安装于山东省尤洛卡自动化装备股份有限公司。山东省计量科学研究院用标准车辆对动态衡进行了计量测试。测试数据见表 2、表 3。

表 2 分体式秤台轻车计量测试数据

序号	车速/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	位置	第一轴	第二轴	总车重/t	误差/t	百分误差/%
1	低速匀速	中	1.650	3.200	4.850	-0.01	-0.21
2	低速匀速	中	1.700	3.250	4.950	0.09	+1.85
3	中速匀速	中	1.650	3.250	4.900	0.04	0.82
4	中速匀速	中	1.650	3.250	4.900	0.04	0.82
5	高速匀速	中	1.650	3.200	4.850	-0.01	-0.21
6	高速匀速	中	1.650	3.250	4.900	0.04	0.82
7	中速匀速	偏左	1.650	3.200	4.850	-0.01	-0.21
8	中速匀速	偏左	1.700	3.150	4.850	-0.01	-0.21
9	中速匀速	偏右	1.700	3.150	4.850	-0.01	-0.21
10	中速匀速	偏右	1.600	3.150	4.750	-0.11	-2.26
平均值			1.660	3.205	4.865	0.005	0.10

注：实际车重 4.860t

表 3 分体式秤台重车计量测试数据

序号	车速/km·h <sup>-1</sup>	位置	第一轴	第二轴	第三轴	第四轴	总车重/t	误差	百分误差/%
1	低速匀速	中	7.400	7.300	11.750	10.900	37.350	-0.10	-0.27
2	低速匀速	中	7.550	7.050	11.750	10.900	37.250	-0.20	-0.53
3	中速匀速	中	7.500	7.150	11.300	11.000	36.950	-0.50	-1.34
4	中速匀速	中	7.450	7.200	11.150	11.350	37.150	-0.30	-0.80
5	高速匀速	中	7.650	7.200	11.250	11.000	37.100	-0.35	-0.93
6	高速匀速	中	7.050	7.000	12.100	11.600	37.750	0.30	0.80
7	中速匀速	偏左	7.700	7.200	10.800	11.650	37.350	-0.10	-0.27
8	中速匀速	偏左	7.500	7.300	11.600	11.400	37.800	0.35	0.93
9	中速匀速	偏右	7.750	7.200	12.450	10.800	38.200	0.75	2.00
10	中速匀速	偏右	7.700	7.350	10.650	11.400	37.100	-0.35	-0.93
平均			7.525	7.195	11.480	11.200	37.400	0.05	0.13

注：实际车重 37.450t

检定结果表明：该分体式强阻尼动态衡，车速≤20km/h 匀速通过时，动态称重达到国家动态衡 5 级标准（首检误差±2.5% 以内）。实际上，80% 的称重数据误差在±1% 以内，接近 2 级标准。平均值误差≤0.13%，表明该动态衡的系统误差很小。

为更好了解该称重系统性能，进行了高车速测试，结果见表 4。

表 4 分体式秤台高速时计量测试数据

车速/km·h <sup>-1</sup>	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均值/t	相对平均值 误差范围/%
11-12	7.75	7.65	7.75	7.70	7.85	7.75	-1.3~1.3
17-18	7.35	7.50	7.70	7.60	7.85	7.60	-2.9~2.9
20-23	8.20	8.30	8.30	8.32	8.35	8.30	-1.2~0.6
26-28	8.30	8.10	7.90	7.85	8.05	8.04	-2.2~3.0

注：实际车重 8.64t，以上均是未加微机修正的原始称重数据。

由表 4 可见, (1) 原始称重数据的平均值, 由于胶板摩擦阻力影响, 均较实际值小; (2) 11~18/km/h 范围, 称重平均值略有变化; (3) 20~23km/h 范围, 称重明显变大; (4) 26km/h 以上又明显变小。这些与 3.1 的分析吻合, 同时表明: 分体式小秤台加强阻尼后, 相对平均值的误差范围, 即极差明显变小, 都在 $\pm 3\%$ 以内, 无粗大误差。

## 五、结论

(1) 长方形秤台, 平整路面车辆低速匀速驶过秤台激起其长方向挠曲变形振动, 是影响动态称重不准确的主要原因。

(2) 加大阻尼, 减小振幅、提高固有振动频率, 是解决问题的基本方法。

(3) 分体式强阻尼小秤台, 每个秤台用 3 个传感器称重, 可显着提高动态称重的准确度。

(4) 路面不平, 车速过快及加减速等引起车辆自身振动, 对动态称重影响很大, 很难消除, 应极力避免。

(5) 若能做到平整路面、限速 10km/h 匀速通过, 则动态称重准确度可大为提高。

## 参考文献

1. 黄素莲, 等, 机动车重量动态监测软件设计[J], 数据采集与处理, 1994, 9(2), 138~142。
2. 吴小华, 等, 机动车动态称重计费系统称重传感器输出波形的改善[J], 南昌大学学报(理科版), 1994, 18(2), 186~190。
3. 凌杰, 等, 优化算法在汽车动态称重系统中的应用[J], 西安公路交通大学学报, 2001, 21(3), 77~79。
4. 邓铁六, 山东省尤洛卡自动仪表有限公司, 分体式动态汽车衡[P], 中国, ZL200710014267.6, 2007.4.47