

超偏载装置计量车测量结果的不确定度评定

段小军¹ 赵小康² 何蕾² 蔡增晖²

(1. 国家轨道衡计量站, 北京 100081; 2. 北京华横科技有限公司, 北京 100081)

【摘要】为对铁道货车超偏载检测装置提供量值传递, 保证超偏载装置计量车量值统一、准确可靠, 国家轨道衡计量站建立了超偏载装置计量车检定装置。根据 JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》的规定, 结合超偏载装置计量车检定装置多参数测量的特点, 采用 GUM 法对其每一参数进行不确定度评定, 分析结果表明满足量值传递和溯源的要求。

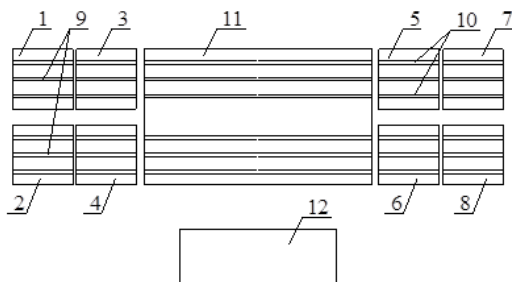
【关键词】计量; 超偏载装置计量车; 不确定度评定。

1. 引言

铁道货车超偏载检测装置全天候检测通过铁路货车的装车质量, 及时发现并处理超载、偏载、偏重等情况, 是保障中国铁路运输安全的重要计量设备。为使其溯源至国家基准, 确保检测数据准确可靠, 国家轨道衡计量站研究建立了国铁集团计量标准: 超偏载装置计量车检定装置(以下简称“检定装置”), 用于检定超偏载装置计量车, 确保检定超偏载装置计量车偏重差、整车重心偏离量、转向架重心偏离量和整车重量四个参数准确可靠, 并能够溯源至国家基准。本文根据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》和 JJG(铁道) 208-2017《超偏载装置计量车》检定规程对偏载装置计量车的测量结果进行不确定度评定。

2. 超偏载装置计量车检定装置结构组成和工作原理

检定装置包括标准超偏载检测装置、标准轨道衡和机车车辆轮对内距尺(以下简称“内距尺”)。标准超偏载检测装置由 8 个独立称重单元、过渡区及计算机组成(见图 1), 每个称重单元由称重台面、称重传感器、称重指示器构成, 静态测量超偏载装置计量车的轮重, 内距尺测量超偏载装置计量车的轮对内距, 标准轨道衡测量超偏载装置计量车的整车质量。综合测量并计算出偏重差、前(后)转向架重心偏离量、整车重心偏离量、整车质量等参数。



1~8 分别为 1~8 号称重单元 9—称量轨 10—检定轨 11—过渡区 12—秤房

图 1 标准超偏载检测装置示意图

超偏载装置计量车是铁路特种车辆，通过调整超偏载装置计量车车内的配重块位置，经超偏载装置计量车检定装置测量并计算出超偏载装置计量车偏重差、前（后）转向架重心偏离量、整车重心偏离量等技术参数，用于检定铁道货车超偏载检测装置。

3. 不确定度评定

依据检定规程，在规定环境条件下采用检定装置对超偏载装置计量车进行测量，测得 4 个参数，因此需分别对每一个参数的测量结果不确定度进行评定。

本文以测量 T6DK 8066308 超偏载装置计量车为例，对偏重差、转向架重心偏离量、整车重心偏离量、整车重量进行不确定度分析评定。

按照 JJG（铁道）208-2017《超偏载装置计量车》的计量要求，超偏载装置计量车的最大允许误差依次为：

偏重差：±130 kg；转向架（整车）重心偏离量：±10 mm；整车重量：±3.0×10⁻⁴。

3.1 测量数学模型

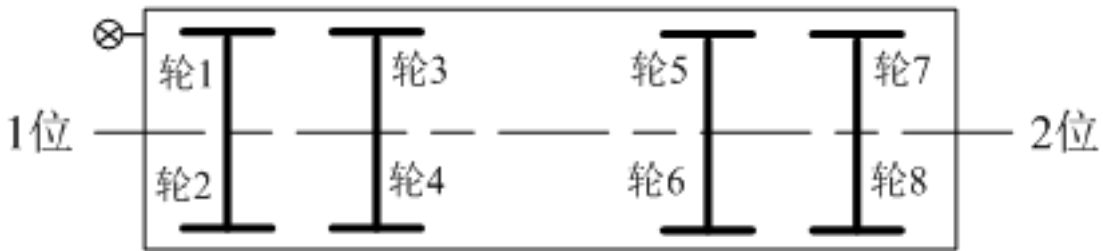


图 2 超偏载装置计量车 1 位、2 位示意图

$$\text{偏重差 } p = \frac{\sum_{j=1}^3 m_{Qj}}{3} - \frac{\sum_{j=1}^3 m_{Hj}}{3} \quad (1)$$

$$\text{前转向架重心偏离量 } \gamma_Q = \frac{\frac{\sum_{j=1}^3 m_{QLj}}{3} - \frac{\sum_{j=1}^3 m_{QRj}}{3}}{\frac{\sum_{j=1}^3 m_{QLj}}{3} + \frac{\sum_{j=1}^3 m_{QRj}}{3}} \times \frac{L}{2} \quad (2)$$

$$\text{后转向架重心偏离量 } \gamma_H = \frac{\frac{\sum_{j=1}^3 m_{HLj}}{3} - \frac{\sum_{j=1}^3 m_{HRj}}{3}}{\frac{\sum_{j=1}^3 m_{HLj}}{3} + \frac{\sum_{j=1}^3 m_{HRj}}{3}} \times \frac{L}{2} \quad (3)$$

$$\text{整车重心偏离量 } \gamma = \frac{\frac{\sum_{j=1}^3 m_{ZLj}}{3} - \frac{\sum_{j=1}^3 m_{ZRj}}{3}}{\frac{\sum_{j=1}^3 m_{ZLj}}{3} + \frac{\sum_{j=1}^3 m_{ZRj}}{3}} \times \frac{L}{2} \quad (4)$$

$$\text{超偏载装置计量车整车重量 } m = I + \Delta_x \quad (5)$$

式中： m_{QLj} —前转向架左侧第 j 次称量值 (kg)， $j=1, 2, 3$ ；

m_{QRj} —前转向架右侧第 j 次称量值 (kg)， $j=1, 2, 3$ ；

m_{HLj} —后转向架左侧第 j 次称量值 (kg)， $j=1, 2, 3$ ；

m_{HRj} —后转向架右侧第 j 次称量值 (kg)， $j=1, 2, 3$ ；

m_{ZLj} —整车左侧第 j 次称量值 (kg)， $j=1, 2, 3$ ；

m_{ZRj} —整车右侧第 j 次称量值 (kg)， $j=1, 2, 3$ ；

L —同轴两车轮踏面基点之间的距离 (mm)， $L = \text{轮缘内测距离} + 140$ ；

p —超偏载装置计量车偏重差，kg；

m —超偏载装置计量车整车质量值，kg；

I —标准轨道衡的示值，kg；

Δ_x —标准轨道衡在此称量点时的修正值，kg。

注：车辆行进方向为参考，公式中下角标 Q 表示前转向架，H 表示后转向架，L 表示左侧，R 表示右侧。

3.2 偏重差测量结果不确定度评定

3.2.1 不确定度分量的分析

根据公式 (1)，令 $\overline{m_Q} = \frac{\sum_{j=1}^3 m_{Qj}}{3}$ ， $\overline{m_H} = \frac{\sum_{j=1}^3 m_{Hj}}{3}$ 则数学模型变为公式 (6)

$$p = \overline{m_Q} - \overline{m_H} \quad (6)$$

根据数学模型分析，可知偏重差是通过前（后）转向架重量值计算得来，有前（后）转向架重量值 2 个不确定度分量；前（后）转向架重量值主要有 3 个不确定度来源，即重复性、分辨力和标准超偏载检测装置引入的标准不确定度分量。

3.2.2 重复性引入的标准不确定度分量 U_c

用标准超偏载检测装置称量超偏载装置计量车的前（后）转向架重量，重复称量 10 次，偏重差测量结果如下：

2888, 2900, 2896, 2882, 2876, 2896, 2886, 2888, 2936, 2894 (单位: kg)。

则重复性可利用贝塞尔公式(7)计算,

$$u_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (7)$$

$$u_c = 16.37 \text{ kg}$$

3.2.3 标准超偏载检测装置(转向架4个称重单元)引入的不确定度分量

(1) 分辨力引入的标准不确定度分量 u_δ

标准超偏载检测装置数字仪表的分辨力为2 kg, 其分辨力引入的标准不确定度分量是一个区间的半宽为 $d/2$ 的均匀分布。

$$u_\delta = \frac{d}{2\sqrt{3}} = 0.58 \text{ kg}$$

(2) 上一级标准器引入的标准不确定度分量

上一级标准器引入的标准不确定度分量包括其计量性能的标准不确定度和不稳定性引入的不确定度。根据《标准超偏载检测装置》检定规程可得到最大允许误差为 $\pm 20 \text{ kg}$, 则标准不确定度

$$u_{B1} = \frac{|MPE|}{6} = 3.33 \text{ kg}。$$

从稳定性考核记录最大差值不超过6 kg, 因此上一级标准器稳定性引入的不确定度

$$u_{B2} = \frac{6}{2\sqrt{3}} = 1.73 \text{ kg}。$$

引入的标准不确定度分量 $u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2} = 3.75 \text{ kg}。$

(3) 标准超偏载检测装置(转向架4个称重单元)引入的不确定度分量

因各标准不确定度分量不相关, 所以 $u_{BZ} = \sqrt{u_\delta^2 + u_B^2} = 3.79 \text{ kg}$

3.2.4 偏重差标准不确定度

因各标准不确定度分量不相关, 且偏重差由标准超偏载检测装置的两个四台面组合得出, 所以

$$u = \sqrt{u_c^2 + u_{BZ}^2} = 17.2 \text{ kg}$$

3.2.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 即: $U = k \times u = 2 \times 17.2 \approx 34 \text{ kg}$

3.2.6 不确定度分析汇总

表 1 转向架偏重差测量结果不确定度分析一览表

不确定度分量			合成标准不确定度	扩展不确定度 ($k=2$)	最大可接受扩展不确定度
符号表示	不确定度来源	标准不确定度			
u_c	重复性	16.4	17.2	34	43
u_{BZ}	标准超偏载检测装置 (转向架 4 个称重单元)	3.8			

超偏载装置计量车偏重差最大允许误差: $\pm 130\text{kg}$, 由计算得到: $U_m = 34 \text{ kg} < \frac{1}{3} \times |\pm 130| = 43 \text{ kg} (k=2)$

3.3 转向架重心偏离量测量结果不确定度评定

3.3.1 不确定度分量的分析

用内距尺测得轮对内距为 1353.3 mm, 则同轴两车轮踏面基点之间的距离 $L=1353+140=1493.3$ mm, 根据公式 (2), 可计算前转向架重心偏离量。

$$\text{令 } C = \frac{\sum_{j=1}^3 m_{QLj}}{3}, D = \frac{\sum_{j=1}^3 m_{QRj}}{3}, \text{ 则数学模型变为公式 (8)}$$

$$\gamma_Q = \frac{C-D}{C+D} \times \frac{L}{2} \quad (8)$$

根据数学模型分析, 可知前转向架重心偏离量是与前转向架左 (右) 侧重量值和同轴两车轮踏面基点之间的距离有关, 主要有 3 个不确定度来源, 即测量结果的重复性、分辨力、内距尺和标准超偏载检定装置引入的标准不确定度分量。

3.3.2 测量结果重复性引入的标准不确定度分量 u_c

用标准装置对超偏载装置计量车进行重复测量 10 次, 前转向架重心偏离量测量结果如下: (单位: mm)

前转向架: -7.4, -7.2, -6.1, -5.4, -5.1, -6.0, -7.1, -7.2, -7.3, -7.4。则前转向架重复性引入不确定度为:

$$u_{cQ} = s_Q(y_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} = 0.88 \text{ mm}$$

后转向架: 32.6, 33.1, 31.6, 31.6, 31.3, 31.2, 32.7, 33.0, 32.5, 31.5。则后转向架重复性引入不确定度为:

$$u_{cH} = s_H(y_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} = 0.74\text{mm}$$

重复性引入的标准不确定度分量取其最大值， $u_c=0.88\text{ mm}$ 。

3.3.3 内距尺引入的标准不确定度分量 u_L

(1) 分辨力引入的标准不确定度分量 u_δ

所使用的内距尺的分辨力为 0.1 mm ，则区间的半宽为 $d/2$ 的均匀分布，则有

$$u_\delta = \frac{0.1}{2\sqrt{3}} = 0.029\text{mm}$$

(2) 上一级标准器引入的标准不确定度分量 u_{BZ}

根据内距尺检定证书查得：上级计量标准 $U=0.3\text{ mm}$ ， $k=2$ ，则

$$u_{BZ} = \frac{0.3}{2} = 0.15\text{mm}$$

(3) 稳定性引入的标准不确定度分量 u_w

$$u_w = \frac{0.3}{2\sqrt{3}} = 0.09\text{mm}$$

(4) 合成标准不确定度 u_L

$$u_L = \sqrt{u_\delta^2 + u_{BZ}^2 + u_w^2} = 0.18\text{mm}$$

3.3.4 标准超偏载检测装置（转向架重心偏离量）引入的不确定度分量

(1) 标准超偏载检测装置转向架单侧引入的不确定度分量

a 分辨力引入的标准不确定度分量

标准超偏载检测装置数字仪表的分辨力为 2 kg ，则区间的半宽为 $d/2$ 的均匀分布，则有

$$u_\delta = \frac{d}{2\sqrt{3}} = 0.58\text{kg}$$

b 上一级标准器引入的标准不确定度分量 u_{BZ}

上一级标准器引入的标准不确定度分量包括其计量性能的标准不确定度和不稳定性引入的不确定度。根据《标准超偏载检测装置》检定规程可得到转向架单侧单侧最大允许误差质量允差为 $\pm 10\text{ kg}$ ，则

$$u_{BZ} = \frac{|MPE|}{6} = 1.66\text{kg}$$

c 稳定性引入的标准不确定度分量 u_w

从稳定性考核记录最大差值不超过 3 kg ，因此标准器稳定性引入的不确定度为：

$$u_w = \frac{3}{2\sqrt{3}} = 0.87\text{kg}$$

d 转向架单侧合成标准不确定度 u_T

因各标准不确定度分量不相关，所以

$$u_T = \sqrt{u_\delta^2 + u_{BZ}^2 + u_w^2} = 2.0$$

(2) 标准超偏载检定装置转向架重心偏离量标准不确定度 u_{ZXJ}

令 $A=C-D$, $B=C+D$, 则公式 (8) 变为公式 (9)。

$$\gamma = \frac{A}{B} \times \frac{L}{2} \quad (9)$$

因各标准不确定度分量不相关, 所以

$$u_A = u_B = \sqrt{2}u_T = 2.83\text{kg}$$

$$\gamma_Q = \frac{C-D}{C+D} \times \frac{1493.3}{2} = 6.62\text{mm}$$

$$\text{由 } \frac{u_{ZXJ}}{|\gamma|} = \sqrt{\left(\frac{u_A}{A}\right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{u_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{u_L}{L}\right)^2} \text{ 得到}$$

$$u_{ZXJ} = 0.053 \text{ mm}$$

3.3.5 合成不确定度 转向架合成标准不确定度 $u = \sqrt{u_C^2 + u_L^2 + u_{ZXJ}^2} = 0.9\text{mm}$

3.3.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 即: $U=k \times u=1.8\text{mm}$

3.3.7 不确定度分析汇总

符号表示	不确定度来源	标准不确定度	合成标准不确定度	扩展不确定度 ($k=2$)	最大可接受不确定度
u_c	重复性	0.88			
u_L	上一级标准器 (内距尺)	0.18			
u_{ZXJ}	上一级标准器 (超偏载装置计量车检定装置转向架重心偏离量)	0.053	0.9	1.8	3.3

转向架重心偏离量最大允许误差: $\pm 10 \text{ mm}$, 由其计算得到 $U=1.8 < 1/3 \times 10 = 3.3 \text{ mm}$ ($k=2$)。

3.4 整车重心偏离量测量结果不确定度评定

3.4.1 不确定度分量的分析

用内距尺测得轮对内距为 1353.3 mm , 则同轴两车轮踏面基点之间的距离 $L=1353+140=1493.3 \text{ mm}$, 根据公式 (4), 可计算整车重心偏离量

$$\text{令 } C = \frac{\sum_{j=1}^3 m_{ZLj}}{3}, D = \frac{\sum_{j=1}^3 m_{ZRj}}{3}, \text{ 则数学模型变为公式 (10)。$$

$$\gamma_z = \frac{C-D}{C+D} \times \frac{L}{2} \quad (10)$$

根据数学模型分析,可知整车重心偏离量是与整车左(右)侧重量值和同轴两车轮踏面基点之间的距离有关,主要有3个不确定度来源,即测量结果的重复性、分辨力、内距尺和标准超偏载检测装置引入的标准不确定度分量。

3.4.2 测量结果重复性引入的标准不确定度分量 u_c

用检定装置对超偏载装置计量车进行重复测量10次,整车重心偏离量测量结果如下:(单位:mm)

11.8, 12.2, 12.0, 12.4, 12.4, 11.9, 12.0, 12.1, 11.9, 11.3。

则重复性可利用贝塞尔公式(7)计算, $u_c=0.32$ mm。

3.4.3 内距尺引入的标准不确定度分量 u_L

从3.3.3分析得知 $u_L=0.18$ mm。

3.4.4 标准超偏载检测装置(整车重心偏离量)引入的不确定度 u_z

(1)标准超偏载检测装置整车单侧引入的不确定度分量 u_F

①分辨力引入的标准不确定度分量 u_δ

标准超偏载检测装置数字仪表的分辨力为2kg,则区间的半宽为d/2的均匀分布,则有

$$u_\delta = \frac{d}{2\sqrt{3}} = 0.58$$

②上一级标准器引入的不确定度分量 u_{BZ}

上一级标准器引入的标准不确定度分量包括其计量性能的标准不确定度和不稳定性引入的不确定度。根据《标准超偏载检测装置》检定规程可得到整车单侧最大允许误差为 ± 20 kg,则

$$u_{BZ} = \frac{|MPE|}{6} = 3.33\text{kg}$$

③稳定性引入的标准不确定度分量 u_w

从稳定性考核记录最大差值不超过6kg,因此标准器稳定性引入的不确定度为

$$u_w = \frac{6}{2\sqrt{3}} = 1.73\text{kg}$$

④标准超偏载检测装置整车单侧引入的不确定度分量 u_F

因各标准不确定度分量不相关,所以

$$u_F = \sqrt{u_\delta^2 + u_{BZ}^2 + u_w^2} = 3.80\text{kg}$$

(2)标准超偏载检测装置整车重心偏离量引入的不确定度 u_z

令 $A=C-D$, $B=C+D$,则公式(10)变为公式(11)

$$\gamma = \frac{A}{B} \times \frac{L}{2} \quad (11)$$

因各标准不确定度分量不相关，所以

$$u_A = u_B = \sqrt{2}u_F = 5.37 \text{ kg}$$

$$\gamma_Q = \frac{C-D}{C+D} \times \frac{1493.3}{2} = 12.01 \text{ mm}$$

$$\text{由 } \frac{u_Z}{|\gamma_H|} = \sqrt{\left(\frac{u_A}{A}\right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{u_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{u_L}{L}\right)^2} \text{ 得到}$$

$$u_Z = 0.052 \text{ mm}$$

3.4.5 合成标准不确定度

$$u = \sqrt{u_C^2 + u_L^2 + u_Z^2} = 0.4 \text{ mm}$$

3.4.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，即： $U = k \times u = 0.8 \text{ mm}$

3.4.7 不确定度分析汇总

			mm		
符号表示	不确定度来源	标准不确定度	合成标准不确定度	扩展不确定度 ($k=2$)	最大可接受不确定度
u_c	重复性	0.32			
u_L	上一级标准器 (内距尺)	0.18	0.4	0.8	3.3
u_Z	上一级标准器 (超偏载装置计 量车检定装置 整车重心偏离 量)	0.052			

整车重心偏离量最大允许误差： $\pm 10 \text{ mm}$ ，由其计算得到

$$U = 0.8 \text{ mm} < 1/3 \times 10 = 3.3 \text{ mm} \quad (k=2)。$$

3.5 整车重量不确定度评定

3.5.1 不确定度分量的分析

根据数学模型公式(5)，分析可知整车重量测量结果不确定度主要有3个不确定度来源，即测量结果的重复性、分辨力和标准轨道衡引入的标准不确定度分量。

3.5.2 测量重复性引入的标准不确定度分量

用检定装置的设备标准轨道衡重复称量超偏载装置计量车10次，整车测量结果如下：(单位： kg)

82160.8, 82161.2, 82160.7, 82160.9, 82160.9, 82161.0, 82160.8, 82160.7, 82160.8, 82160.8。

则重复性可利用贝塞尔公式(7)计算, $u(x)=0.15\text{ kg}$ 。在实际称量过程中, 称量两次, 取其平均值, 则

$$u_c = \frac{u(x)}{\sqrt{2}} = 0.11\text{ kg}, \quad n = 2$$

3.5.3 分辨力引入的不确定度分量 u_δ

标准轨道衡数字仪表在 40 t 以上的分辨力为 0.5 kg, 其分辨力引入的标准不确定度分量是一个区间的半宽为 $d/2$ 的均匀分布, 则有

$$u_\delta = \frac{d}{2\sqrt{3}} = 0.14\text{ kg}$$

3.5.4 标准轨道衡引入的不确定度分量 u_{BZ}

在用 F2 等级砝码检定标准轨道衡 40 t~84 t 的称量点, 标准轨道衡检定结果的扩展不确定度满足:

$$U \leq \frac{1}{3}|MPE|。最大允许误差 MPE = \pm 5\text{ kg} \quad U = \frac{1}{3}|MPE| = 1.67\text{ kg}, \quad k=2。$$

标准轨道衡引入的标准不确定度分量

$$u_{BZ1} = \frac{U}{k} = \frac{1.67}{2} = 0.84\text{ kg}$$

从标准轨道衡稳定性考核记录最大差值不超过 5 kg, 因此稳定性引入的不确定度

$$u_{BZ2} = \frac{5}{2\sqrt{3}} = 1.44\text{ kg}$$

标准轨道衡引入的标准不确定度分量

$$u_{BZ} = \sqrt{u_{BZ1}^2 + u_{BZ2}^2} = 1.67\text{ kg}$$

3.5.5 合成标准不确定度

$$u = \sqrt{u_c^2 + u_\delta^2 + u_{BZ}^2} = 1.7\text{ kg}$$

3.5.7 扩展不确定度 $k=2$, 即: $U=k \times u=3.4\text{ kg}$

3.5.8 不确定度分析汇总

表 4 整车重量测量结果不确定度分析一览表

			kg		
不确定度分量			合成标准不 确定度	扩展不确定度 ($k=2$)	最大可接受扩 展不确定度
符号表示	不确定度来源	标准不确定度			
u_c	重复性	0.11			
u_δ	分辨力	0.14	1.7	3.4	8.2
u_{BZ}	标准轨道衡	1.67			

超偏载装置计量车整车重量的最大允许相对误差为 $\pm 3.0 \times 10^{-4}$, 因此在 82160 kg 时, 其最大允

许误差为 24.6 kg。

由此可计算得到：
$$U = 3.4 < \frac{1}{3} \times |MPE| = \frac{1}{3} \times 24.6 = 8.2 \text{ kg} \quad (k = 2)$$

四、结论

通过以上分析和计算，超偏载装置计量车的偏重差、转向架重心偏离量、整车重心偏离量、整车重量的测量结果不确定度分别为 34 kg、1.8 mm、0.8 mm、8.2 kg， $k=2$ ，均小于其最大可接受扩展不确定度，满足计量检定规程的量值传递和溯源要求，能够开展超偏载装置计量车的检定工作要求。

[参考文献]

- [1] JJF 1059.1-2012, 测量不确定度评定与表示 [S].
- [2] JJF 1033-2016, 计量标准考核规范 [S].
- [3] JJG(铁道) 208-2017 超偏载装置计量车 [S].
- [4] 安爱民, 李学宝, 段小军, 等. 铁道货车超偏载检测装置量值溯源方案研究 [J]. 铁道技术监督, 2019, 47(9): 22-25.
- [5] 崔宝祥. 标准超偏载检测装置的研究 [J]. 计量技术, 2019, 2: 6-10.
- [6] 段小军, 崔宝祥, 李世林, 等. 标准超偏载检测装置称重单元的设计 [J]. 衡器, 2019, 48(1): 30-34.