

基于 GUM 法的标准轨道衡测量不确定度评定

□彭冲¹ 安爱民² 赵天宇² 王佳兴¹ 高翔¹

(1. 国家轨道衡计量站, 北京 100081

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司标准计量研究所, 北京 100081)

【摘要】标准轨道衡是检定轨道衡检衡车的计量标准, 其溯源的正确与否, 关系到自动轨道衡和数字指示轨道衡称量数据的准确性。介绍标准轨道衡结构及原理, 分析标准轨道衡测量不确定度来源。根据JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》, 采用测量不确定度GUM法评定标准轨道衡测量不确定度。评定结果表明, 标准轨道衡各个秤量点的测量结果的扩展不确定度均小于其最大可接受扩展不确定度, 满足量值溯源要求。

【关键词】标准轨道衡; 自动轨道衡; 数字指示轨道衡; 测量不确定度; 评定

文献标识码: A 文章编号: 1003-1870 (2024) 10-0019-04

引言

自动轨道衡和数字指示轨道衡是称量装载散装货物的铁路车辆质量的大型衡器, 是列入《中华人民共和国强制检定工作计量器具明细目录》的强制检定计量器具, 其称量结果既是企业贸易结算的依据, 也是铁路安全运输装载控制的依据。自动轨道衡和数字指示轨道衡的应用遍及铁路、煤炭、冶金、电力、石化、建材等行业, 量值准确与否事关企业的经济效益、社会效益, 对于社会经济发展和铁路运输安全具有重要意义。

国家轨道衡计量站研究建立了F₂等级公斤组砝码标准装置、标准轨道衡标准装置和检衡车标准装置, 使自动轨道衡和数字指示轨道衡检测测量值可以溯源至国家计量基准。根据JJG 2053—2016《质量计量器具计量检定系统表》, 自动轨道衡和数字指示轨道衡属于工作计量器具, 上级标准为轨道衡检衡车, 标准轨道衡是检定轨道衡检衡车的计量标准, 是国家授权的社会公用计量标准, 担负着全国轨道

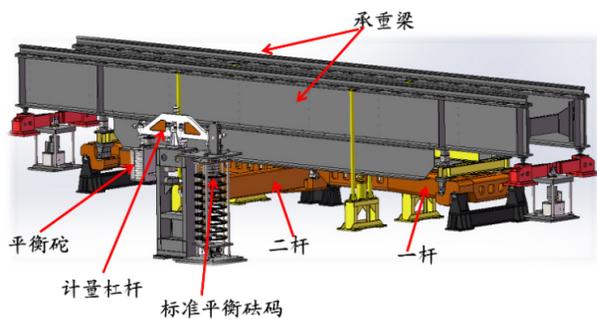
衡检衡车的首次、后续(含周期)检定任务, 是全国自动轨道衡和数字指示轨道衡量值准确和统一的基础, 准确度等级需达到高准确度级。标准轨道衡需要用F₂等级公斤组砝码标准装置检定, 检定方法是采用F₂等级砝码和专用小车组合成相应质量值对标准轨道衡进行检定。

为了验证标准轨道衡测量结果是否准确, 满足量值传递要求, 根据JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》和JJG 444—2023《标准轨道衡》, 采用GUM法对标准轨道衡测量结果进行不确定度评定。

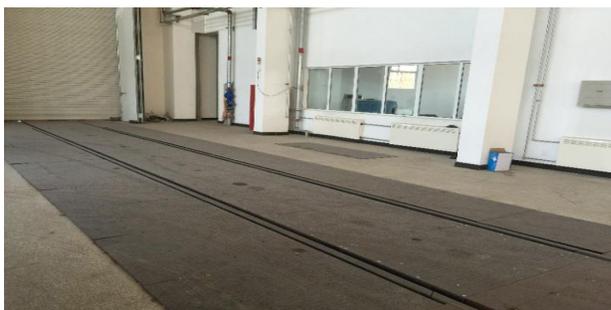
1 标准轨道衡结构及原理

1.1 结构

标准轨道衡由承重梁、2个一杠杆、1个二杠杆、1个计量杠杆、9个不等量的F₂等级标准平衡砝码、平衡砣、预测传感器和显示仪表、可编程控制器、加减码机构、称重传感器和显示仪表、液压休止机构等零部件构成。标准轨道衡如下图所示。



(a) 示意



(b) 实物

图 标准轨道衡

1.2 原理

标准轨道衡采用杠杆原理，通过两级杠杆，将称重台面承载的重量传递到天平计量杠杆，通过逻辑控制器控制天平计量杆自动减码，称重传感器和阻尼装置使得计量杠杆平衡，称量示值为减码质量值乘以总杠杆比与称重传感器输出质量值之和。

1.3 测量步骤

标准轨道衡在(18~40)t 称量范围内，检定分度值 $e_1=2\text{kg}$ ，实际分度值 $d_1=0.2\text{kg}$ ，最大允许误差为 $\pm 2\text{kg}$ 。(40~100)t 称量范围内，检定分度值 $e_2=5\text{kg}$ ，实际分度值 $d_2=0.5\text{kg}$ ，最大允许误差为 $\pm 5\text{kg}$ 。依据JJG 444—2023《标准轨道衡》检定规程，在规定环境条件下采用 F_2 等级砝码 $2\text{t} \times 44$ 块， $1\text{t} \times 8$ 块和专

用小车 $2\text{t} \times 2$ 辆，组合成18t, 30 t, 40 t, 84 t 和100 t 五个质量值，对标准轨道衡进行测量。测量时使用两辆专用小车，每辆小车上均匀装载一定数量的砝码，按称量由小到大的顺序连续进行。

2 标准轨道衡测量不确定度计算

2.1 测量模型

标准轨道衡测量模型为：

$$E=I-m \quad (1)$$

式(1)中， E 为标准轨道衡示值误差，kg； I 为标准轨道衡示值，kg； m 为上一级标准器（ F_2 等级砝码和专用小车组合质量）标称质量值，kg。

2.2 测量不确定度来源

根据标准轨道衡测量模型可知，标准轨道衡测量值受标准轨道衡测量重复性、标准轨道衡指示器分辨力和 F_2 等级砝码标准器的影响。标准轨道衡不确定度分量来源、评定方法和灵敏度系数见表1。

表1 标准轨道衡测量结果不确定度来源、评定方法和灵敏度系数

标准不确定度分量	不确定度来源	评定方法	灵敏度系数
u_1	标准轨道衡测量值重复性	A类评定	1
u_2	标准轨道衡指示器分辨力	B类评定	1
u_3	F_2 等级砝码标准器	B类评定	1

2.3 标准不确定度分量计算

2.3.1 标准轨道衡测量值重复性引入的标准不确定度分量 u_1

由标准轨道衡测量重复性引入不确定度分量 u_1 采用A类评定。在每个称量点重复性实验10次，测得值见表2。

表2 5个称量点测得值

kg

次数 称量点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
18t	18000.2	18000.6	18000.4	18000.2	18000.4	18000.8	18000.2	18000.4	18000.2	18000.8
30t	30000.4	30000.0	30000.2	30000.6	30000.6	30000.4	30000.2	30000.2	30000.8	30000.2
40t	40000.2	40000.0	40000.2	40000.6	40000.4	40000.2	40000.6	40000.8	40000.2	40000.0
84t	84001.5	84001.5	84002.0	84002.5	84001.0	84002.5	84000.5	84001.5	84002.0	84001.0
100t	100003.0	100003.5	100003.0	100003.0	100003.5	100003.5	100003.0	100003.5	100004.0	100002.0

利用贝塞尔公式法计算，可得单次测量结果的实验标准偏差 s ，即：

$$s = \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

式(2)中， x_i 为第 i 次测量的测得值； \bar{x} 为 n 次测量所得一组测得值的算术平均值； n 为测量次数。

实际测量中仅测量1次，则由标准轨道衡测量重复性引入的不确定度分量为：

$$u_1 = s \quad (3)$$

利用表2数据，由(2)式和(3)式计算，可得各个称量点由测量重复性引入的不确定度分量。单次测量实验标准偏差和测量重复性引入的不确定度分量见表3。

表3 单次测量结果的实验标准偏差和测量重复性引入的

称量点	不确定度分量	
	实验标准偏差	测量重复性引入的不确定度分量
18t	0.239	0.239
30t	0.246	0.246
40t	0.27	0.27
84t	0.658	0.658
100t	0.537	0.537

2.3.2 标准轨道衡指示器分辨力引入标准不确定度分量 u_2

由标准轨道衡指示器分辨力引入的不确定度分量用B类评定。标准轨道衡不同测量范围指示器分辨力也不同，假设指示器分辨力服从均匀分布（包含因子 k 取 $\sqrt{3}$ ），半宽为 $d/2$ ，则由标准轨道衡指示器分辨力引入的不确定度分量可由式(4)计算得到。

$$u_2 = \frac{d}{2\sqrt{3}} \quad (4)$$

标准轨道衡在(18~40)t称量范围内，检定分度值 $e_1=2\text{kg}$ ，实际分度值 $d_1=0.2\text{kg}$ 。(40~100)t称量范围内，检定分度值 $e_2=5\text{kg}$ ，实际分度值 $d_2=0.5\text{kg}$ 。由式(4)计算，可得各个称量点由指示器分辨力引入

的不确定度分量见表4。

表4 指示器分辨力引入的不确定度分量 kg

称量点	指示器分辨力引入的不确定度分量
18t	0.058
30t	0.058
40t	0.058
84t	0.144
100t	0.144

2.3.3 F_2 等级砝码标准器引入标准不确定度分量 u_3

由 F_2 等级砝码标准器的不确定度引入的不确定度分量 $u_0(m)$ 用B类评定， F_2 等级砝码的质量允差为 $\delta(m)$ ，区间半宽 U 为 $|\delta(m)|/3$ ，包含因子 $k_1=2$ ，则由 F_2 等级砝码标准器的不确定度引入的不确定度分量 $u_0(m)$ 为：

$$u_0(m) = \frac{U}{k_1} = \frac{|\delta(m)|/3}{2} \quad (5)$$

依据JJG 99—2022《砝码》检定规程，砝码相邻两个周期的检定结果之差不得超过该砝码最大允许误差的1/3。标准砝码质量不稳定性引入的不确定度分量 $u_{inst}(m)$ 用B类评定，按均匀分布进行处理，包含因子 $k_2=\sqrt{3}$ ，扩展不确定度 U 可取为 $|\delta(m)|/3$ ，则由 F_2 等级砝码标准器质量不稳定性引入的不确定度分量 $u_{inst}(m)$ 为：

$$u_{inst}(m) = \frac{U}{k_2} = \frac{|\delta(m)|/3}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

由 F_2 等级砝码标准器的不确定度引入的不确定度分量 $u_0(m)$ 和由 F_2 等级砝码标准器质量不稳定性引入的不确定度分量 $u_{inst}(m)$ 互不相关，则 F_2 等级砝码标准器引入的不确定度分量 u_3 为：

$$u_3 = \sqrt{u_0(m)^2 + u_{inst}(m)^2} \quad (7)$$

根据JJG 99—2022《砝码》规程可得到 F_2 等级砝码的质量允差。 F_2 等级2000kg砝码最大允许误差为 $\pm 30\text{g}$ ， F_2 等级1000kg砝码的最大允许误差为 $\pm 16\text{g}$ 。由式(5)(6)(7)计算，可得各个称量点由 F_2 等级砝码标准器引入的不确定度分量见表5。

表5 F_2 等级砝码标准器引入的不确定度分量

kg

称量点	砝码组合	F_2 等级砝码标准器引入的不确定度分量
18t	专用小车2t×2辆、 F_2 等级砝码2t×7块	0.069
30t	专用小车2t×2辆、 F_2 等级砝码2t×13块	0.115
40t	专用小车2t×2辆、 F_2 等级砝码2t×18块	0.153
84t	专用小车2t×2辆、 F_2 等级砝码2t×40块	0.321
100t	专用小车2t×2辆、 F_2 等级砝码1t×8块、 F_2 等级砝码2t×44块	0.384

2.4 合成标准不确定度 u_c 和扩展不确定度

各不确定度分量不相关，因此，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (8)$$

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k \times u_c \quad (k=2) \quad (9)$$

利用各不确定度分量数据，由式(8)和式(9)计算，可得各个称量点测量结果的合成标准不确定度和扩展不确定度。各个称量点测量结果合成标准不确定度和扩展不确定度及其要求见表6。

表6 各个称量点测量结果合成标准不确定度和扩展不确定度及其要求

kg

称量点	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 ($k=2$)
	不确定度来源	标准不确定度分量			
18t	重复性	0.069	0.255	0.51	0.66
	分辨力	0.058			
	F ₂ 等级砝码标准器	0.239			
30t	重复性	0.115	0.278	0.56	0.66
	分辨力	0.058			
	F ₂ 等级砝码标准器	0.246			
40t	重复性	0.153	0.316	0.63	0.66
	分辨力	0.058			
	F ₂ 等级砝码标准器	0.27			
84t	重复性	0.321	0.746	1.49	1.66
	分辨力	0.144			
	F ₂ 等级砝码标准器	0.658			
100t	重复性	0.384	0.676	1.35	1.66
	分辨力	0.144			
	F ₂ 等级砝码标准器	0.537			

由表6可知，各个称量点测量结果扩展不确定均小于最大可接受扩展不确定度，符合JJF 1094—2002《测量仪器特性评定》规定要求，能够实现量值传递和溯源。

3 结语

标准轨道衡是检定轨道衡检衡车的计量标准，其溯源的正确与否关系到自动轨道衡和数字指示轨道衡称量数据的准确性。通过以上分析计算，标准轨道衡各个称量点测量结果扩展不确定度均小于其最大可接受扩展不确定度，满足量值溯源要求，适合开展检定工作。

参考文献

- [1] JJG444—2023 标准轨道衡[S].
- [2] JJG99—2022 砝码[S].
- [3] JJF1059.1—2012 测量不确定度评定与表示[S].
- [4] 彭冲.F1 等级20 kg 砝码测量审核实践[J]. 铁道技术监督, 2024(001):052.

- [5] 李学宝, 安爱民, 李世林等. 自动轨道衡偏载功能测量结果不确定度评定[J]. 中国测试, 2022, 48(S01):87-93.

- [6] 彭冲, 段小军, 侯秀林等. 基于GUM法评定指示装置显示毫伏数的标准测力仪测量结果不确定度[J]. 中国测试, 2021, 47(S02):6.

- [7] 安爱民. 数字指示轨道衡GUM法不确定度的评定[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2020, 25(6): 165-170.

- [8] 段小军, 李世林, 崔宝祥等. 超偏载装置计量车测量结果的不确定度评定[J]. 计量学报, 2020(41), (S01): 148-154.

作者简介

彭冲(1991—)，男，管理学硕士。现工作于国家轨道衡计量站，从事力学计量工作。