

# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—202X

## 转动惯量测量仪校准规范

Calibration Specification for MOI Measuring Machine

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布



# 转动惯量测量仪校准规范

Calibration Specification for

MOI Measuring Machine

JJF XXXX-202X

本规范经国家质量监督检验检疫总局 XXXX 年 XX 月 XX 日批准,并自  
XXXX 年 XX 月 XX 日起施行。

归口单位: 全国质量密度计量技术委员会

主要起草单位: 北京航天计量测试技术研究所

参加起草单位:

本规范委托全国质量密度计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

王小三      北京航天计量测试技术研究所

参加起草人：

## 目 录

引 言	V
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语和计量单位	1
3.1 术语	1
3.1.1 转动惯量 Moments of Inertia (MOI)	1
3.1.2 转动惯量测量仪 MOI Measuring Machine	1
3.1.3 转动惯量标准 Standard MOI	1
3.2 计量单位	1
4 概述	1
4.1 原理	1
4.1.1 扭摆法转动惯量测量仪	1
4.1.2 落体法转动惯量测量仪	2
4.1.3 三线摆法转动惯量测量仪	3
4.2 构造	3
4.2.1 扭摆法转动惯量测量仪	3
4.2.2 落体法转动惯量测量仪	3
4.2.3 三线摆法转动惯量测量仪	4
4.3 分类	4
4.4 用途	4
5 计量特性	4
5.1 重复性	4
5.2 示值误差	4
6 校准条件	4
6.1 环境条件	4
6.2 校准标准及其它设备	4
6.2.1 校准用设备	4
6.2.1.1 转动惯量标准	4
6.2.1.2 其它有关测量用计量器具	4
7 校准项目和校准方法	5
7.1 校准项目	5
7.2 示值误差校准方法	5
7.3 测量不确定度评定	5
8 校准结果表达	5

---

9 复校时间间隔.....	6
附录 A.....	7
附录 B.....	8
B.1 转动惯量示值误差校准结果 .....	8
附录 C.....	9
C.1 概述.....	9
C.2 转动惯量校准结果的不确定度评定.....	9
C.3 转动惯量校准结果测量不确定度评定实例 .....	11

---

# 引 言

本规范根据 JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》规定的规则编写。

本校准规范给出了转动惯量测量仪计量特性的校准条件、校准项目和校准方法。

本规范系首次发布。



---

# 转动惯量测量仪校准规范

## 1 范围

本校准规范适用于转动惯量测量仪的校准。

## 2 引用文件

本校准规范引用下列技术条件

JJG99 砝码

JJG539 数字指示秤

JJG1036 电子天平

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本校准规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本校准规范。

## 3 术语和计量单位

### 3.1 术语

#### 3.1.1 转动惯量 Moments of Inertia (MOI)

刚体绕轴转动时惯性的度量，表征回转物体保持其匀速圆周运动或静止时的特性。

#### 3.1.2 转动惯量测量仪 MOI Measuring Machine

测量刚体对定轴的转动惯量的仪器，按测量方法分，一般有：扭摆法、落体法、三线摆法等。

#### 3.1.3 转动惯量标准 Standard MOI

具有一定质量，对确定回转轴具有已知转动惯量，用于校准转动惯量测量仪的实物量具。

### 3.2 计量单位

使用的单位：千克二次方米 ( $\text{kgm}^2$ )、克二次方米 ( $\text{gm}^2$ )、(g)、公斤 (kg) 和吨 (t)、毫米 (mm)、厘米 (cm)、米 (m)。

## 4 概述

### 4.1 原理

实际工作中，不同的测量方法对应不同的测量原理。

#### 4.1.1 扭摆法转动惯量测量仪

如图 1 所示，采用气浮或机械轴承，构建可绕定轴转动的扭摆系统，通过刚性连接，赋予扭摆系统刚度，测量时，通过主动驱动，使扭摆系统偏离平衡位置后释放，扭摆系统做正弦扭摆，测量扭摆周期，通过公式 (1) 测量待测物体转动惯量的测量方法为扭摆法。

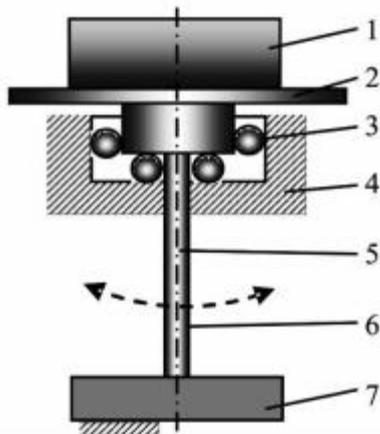
$$J = \frac{K}{4\pi^2} T^2 = AT^2 \quad (1)$$

式中：

$J$  ——物体对于扭摆转轴的转动惯量， $\text{kgm}^2$ ；

$T$  ——摆动周期，s；

$K$  ——与扭摆系统扭杆刚度有关的一个常量。



1-被测对象；2-测量平台；3-气浮或机械轴承；4-机架；5-定轴；6-扭杆；7-驱动与刹车机构

图 1 扭摆法转动惯量测量原理示意图

#### 4.1.2 落体法转动惯量测量仪

如图 2 所示，通过机械或气浮轴承，构建可绕定轴转动的转动系统，将质量、半径已知的圆形测量平台固定在转动系统上，并使测量平台的圆心过转轴，将吊线一端缠绕在圆盘上，一端通过等高的定滑轮悬挂一质量块，释放质量块后，转动系统将作匀角加速度运动，通过公式（2）测量待测物体转动惯量的测量方法为扭摆法。

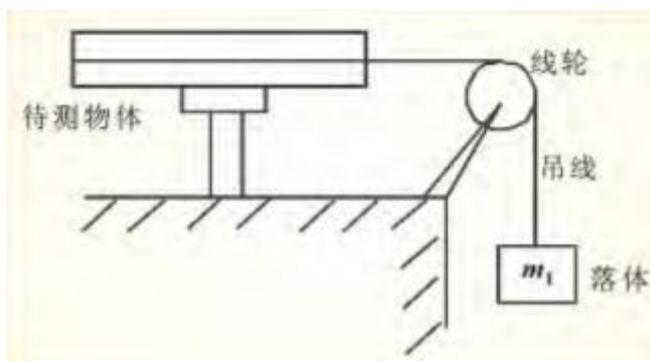


图 2 落体法转动惯量测量原理示意图

$$J = \frac{m_1 g R - m_1 R^2 \phi'' - T_0}{\phi''} - J_0 \quad (2)$$

式中：

$m_1$ —落体的质量，kg；

$R$ —圆形测量平台半径，m；

$\phi''$ —角加速度，rad/s<sup>2</sup>；

$T_0$  — 摩擦力矩, Nm;

$J_0$  — 转动惯量测量仪自身的转动惯量值,  $\text{kgm}^2$ 。

#### 4.1.3 三线摆法转动惯量测量仪

如图 3 所示, 当三线摆的下圆盘以  $OO'$  为轴转过一个角度时, 由于悬线张力的作用, 将使下圆盘在一确定的平衡位置左右往复扭动, 即做扭摆运动。若摆角很小, 则可视此扭动为角谐振动。通过公式 (3) 测量待测物体转动惯量的测量方法为扭摆法。

$$J = \frac{m_0 g R r}{4\pi^2 l} T^2 \quad (3)$$

式中:

$J$  — 被测对象绕  $OO'$  旋转的转动惯量,  $\text{kgm}^2$ ;

$m_0$  — 被测对象质量, kg;

$R$  — 下悬线节点距离转轴距离, m;

$r$  — 上悬线节点距离转轴距离, m;

$l$  — 悬线长度, m;

$T$  — 扭摆周期, s。

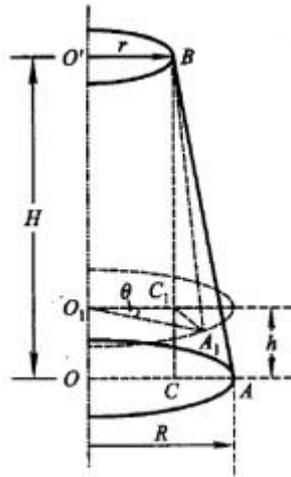


图3 三线摆法转动惯量测量原理示意图

## 4.2 构造

不同的测量方法对应不同的测量原理, 相应的测量仪的结构也不相同。

### 4.2.1 扭摆法转动惯量测量仪

如图 1 所示, 扭摆法转动惯量测量仪主要由机械或气浮轴承支承的平台作为承载平台, 辅以刚性系统 (弹簧或扭杆), 驱动系统, 周期测量系统组成。

### 4.2.2 落体法转动惯量测量仪

如图 2 所示，落体法转动惯量测量仪主要由机械或气浮轴承支承的平台作为承载平台，辅以定力矩加载系统（由滑轮和质量块组成），加速度测量系统，刹车系统组成。

#### 4.2.3 三线摆法转动惯量测量仪

如图 3 所示，三线摆法转动惯量测量仪主要由三条等长线悬挂的平台作为承载平台，辅以驱动系统，周期测量系统组成。

### 4.3 分类

转动惯量测量仪一般分为扭摆法转动惯量测量仪、落体法转动惯量测量仪和三线摆法转动惯量测量仪等。

### 4.4 用途

转动惯量测量仪主要用于测量刚体的转动惯量。

## 5 计量特性

### 5.1 示值误差

根据被校准设备标称测量范围的质量及转动惯量，按照转动惯量优先于质量的原则，选择一组转动惯量标准，将其依次加载到测量设备上，获得一组示值，取示值与转动惯量标准值的差值作为转动惯量测量仪的示值误差。

在进行示值误差校准的过程中，完成被校准设备的重复性测量。按照相同的转动惯量标准选择原则，选择用于重复性校准的转动惯量标准。将该标准加载到测量设备上，六次测量结果之间的一致性为该设备的重复性，用单次测定结果的标准偏差表示。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

环境条件应满足如下要求：

- a) 环境温度： $(20\pm 10)^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 相对湿度： $\leq 85\%$
- c) 其它条件：校准时不得有影响校准结果的干扰源。

### 6.2 校准标准及其它设备

#### 6.2.1 校准用设备

校准用设备应经过计量技术机构检定或校准，满足校准使用要求，并在有效期内。主要包含校准标准及其他设备。

##### 6.2.1.1 转动惯量标准

转动惯量标准具有一定的质量，实际工作中，考虑到转动惯量标准的通用性，一般要求转动惯量标准的质量值在测量设备负载质量范围内即可，如有多个转动惯量标准可选，优先选择质量值与测量设备测量对象的质量值相近的转动惯量标准。

转动惯量标准的扩展不确定度应不大于测量设备的转动惯量测量结果扩展不确定度的三分之一。

##### 6.2.1.2 其它有关测量用计量器具

- a)  $M_1$  等级砝码；
- b) 水平仪：分辨力；
- c) 高精度测距仪或游标卡尺：分辨力  $0.02\text{mm}$ ；

- d) 温度计的分辨力: 0.1℃;
- e) 湿度计的分辨力: 1%RH;
- f) 气压计的分辨力: 1kPa;

## 7 校准项目和校准方法

### 7.1 校准项目

- a) 示值误差。

### 7.2 示值误差校准方法

校准步骤如下:

- a) 根据转动惯量测量仪的承载能力及转动惯量测量范围, 选择一组合适的转动惯量标准, 预先确定一个标准值进行重复性测试;
- b) 测量转动惯量测量仪的测量平台的水平度, 如水平度大于 0.02", 调整其水平度至不大于 0.02", 将转动惯量测量仪最终的水平度记录入附录 A 格式 A.1 中的相应位置;
- c) 启动转动惯量测量仪工作, 得到其自身的转动惯量示值, 记为  $J_0$ , 将结果记录入附录 A 格式 A.1 中的相应位置;
- d) 根据转动惯量测量仪的使用要求, 加载一个转动惯量标准至测量仪上;
- e) 启动转动惯量测量仪工作, 得到加载转动惯量标准后的转动惯量示值, 记为  $J_2$ , 将结果记录入附录 A 格式 A.1 中的相应位置;
- f) 卸载转动惯量标准;
- g) 选取不同的转动惯量标准, 重复步骤 c) ~f), 完成转动惯量示值误差校准, 将结果记录入附录 A 格式 A.1 中的相应位置; 对于选定重复性测量点, 重复步骤 c) ~f) 6 次, 将结果记录入附录 A 格式 A.1 中的相应位置;
- h) 按照 5.2.2 的要求, 计算该测量仪的示值误差, 将结果记录入附录 A 格式 A.1 中的相应位置。

### 7.3 测量不确定度评定

转动惯量测量仪校准结果的不确定度评定参见附录 B。

## 8 校准结果表达

校准结果应在校准证书或校准报告上反映。校准证书或报告应至少包括如下信息:

- a) 标题, “校准证书”;
- b) 实验室名称和地址;
- c) 进行校准的地点 (如果与实验室的地址不同);
- d) 证书或报告的唯一性标识 (如编号), 每页及总页数的标识;
- e) 送校单位的名称和地址;
- f) 被校对象的描述和明确标识;
- g) 进行校准的日期, 若与校准结果的有效性及应用有关时, 应说明被校对象的接收日期;
- h) 如果与校准结果的有效性及应用有关时, 应对被校样品的抽样程序进行说明;

- i) 对校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
  - j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
  - k) 校准环境的描述；
  - l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
  - m) 对校准规范的偏离的说明；
  - n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识，以及签发日期；
  - o) 校准结果仅是对被校对象有效的声明；
  - p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。
- 经校准的转动惯量测量仪，发给校准证书或校准报告，加盖校准印章。

## 9 复校时间间隔

转动惯量测量仪的复校时间建议为一年。

## 附录 A

### 转动惯量测量仪校准记录

A.1 转动惯量校准原始记录表的格式参见格式A.1。

第 页共 页

委托方: \_\_\_\_\_ 测量标准: \_\_\_\_\_ 温度: \_\_\_\_℃ 相对湿度: \_\_\_\_% 大气压力: \_\_\_\_ kPa

仪器型号: \_\_\_\_\_ 型号/规格: \_\_\_\_\_ 检测时间: \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_ 月 \_\_\_\_ 日

仪器编号: \_\_\_\_\_ 证书编号: \_\_\_\_\_ 有效期至: \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_ 月 \_\_\_\_ 日

制造商: \_\_\_\_\_ 制造商: \_\_\_\_\_ 依据标准: \_\_\_\_\_

证书号: \_\_\_\_\_ 不确定度: \_\_\_\_\_ 测量标准有效期至: \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_ 月 \_\_\_\_ 日

示值误差校准 (测量平台水平度: \_\_\_\_\_ )

结果 序列	示值 $J_0$ (kgm <sup>2</sup> )	标准值		示值 $J_2$ (kgm <sup>2</sup> )	示值误差 $J_2 - J_0$ (kgm <sup>2</sup> )
		质量 (kg)	转动惯量 (kgm <sup>2</sup> )		
1					
2					
...					重复性
$n$					

校准人:

核验人:

## 附录 B

## 转动惯量测量仪校准证书内页格式

## B.1 转动惯量示值误差校准结果

表 B.1 转动惯量示值误差校准结果

测量平台水平度				
测量工装水平度				
转动惯量标准		设备示值 /kgm <sup>2</sup>	示值误差 /kgm <sup>2</sup>	示值误差扩展不确定度 /kgm <sup>2</sup> (k=2)
质量 /kg	转动惯量参考值 /kgm <sup>2</sup>			

---

## 附录 C

### 转动惯量测量仪校准结果不确定度评定方法及实例

#### C.1 概述

C.1.1 测量对象：转动惯量测量仪测量结果。

C.1.2 测量标准：转动惯量校准装置。

C.1.3 校准依据：JJF XXXX-202X《转动惯量测量仪校准规范》

C.1.4 环境条件：(15~25)℃，校准过程中温度波动不大于 5℃/h。

C.1.5 测量过程：按照校准规范要求，用转动惯量校准装置校准转动惯量测量仪的转动惯量测量性能，取单次示值误差作为校准结果。

#### C.2 转动惯量校准结果的不确定度评定

##### C.2.1 数学模型

转动惯量校准的数学模型如式 (1)。

$$\Delta J = J_i - J_r \quad (1)$$

式中：

$\Delta J$  —转动惯量示值误差， $\text{kgm}^2$ ；

$J_i$  —转动惯量测量仪示值， $\text{kgm}^2$ ；

$J_r$  —转动惯量校准装置参考值， $\text{kgm}^2$ 。

##### C.2.2 不确定度来源分析

- a) 重复性引入的标准不确定度  $u_1$ ；
- b) 转动惯量参考值的不确定度引入的标准不确定度  $u_2$ ；
- c) 转动惯量测量仪分辨力引入的标准不确定度  $u_3$ ；
- d) 转动惯量测量仪示值误差引入的标准不确定度  $u_4$ ；
- e) 加载工装或测量台不水平引入的标准不确定度  $u_5$ 。

##### C.2.3 测量不确定度评定

C.2.3.1 重复性引入的标准不确定度  $u_1$  按式 (2) 计算。

$$u_1 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (J_i - \bar{J})^2} \quad (2)$$

式中：

$n$ —试验次数；

$J_i$ —第*i*次转动惯量测量示值， $\text{kgm}^2$ ；

$\bar{J}$ — $n$ 次转动惯量测量均值， $\text{kgm}^2$ 。

#### C.2.3.2 转动惯量参考值的不确定度引入的标准不确定度 $u_2$

转动惯量参考值的不确定度引入的标准不确定度  $u_2$  根据实际情况确定，可参照上级证书或不确定度评定报告。

#### C.2.3.3 转动惯量测量仪分辨力引入的标准不确定度 $u_3$

转动惯量测量仪分辨力引入的标准不确定度  $u_3$  按式（3）计算。

$$u_3 = \frac{r}{2\sqrt{3}} \quad (3)$$

式中：

$r$ —转动惯量测量仪分辨力， $\text{kgm}^2$ 。

#### C.2.3.4 转动惯量测量仪示值误差引入的标准不确定度 $u_4$

转动惯量测量仪示值误差引入的标准不确定度  $u_4$  按式（4）计算。

$$u_4 = \frac{\Delta J}{2} \quad (4)$$

式中：

$\Delta J$ —转动惯量示值误差， $\text{mm}$ 。

#### C.2.3.5 加载工装或测量台不水平引入的标准不确定度 $u_5$

加载工装或测量台不水平会导致转动惯量校准装置的参考值发生变化，由于在工作过程中，一般不对该系统误差进行修正，处理时原则上将该误差值作为不确定度的一部分，考虑到已经对不水平进行了定量要求，该不确定度分量按公式（5）简化计算。

$$u_5 = J \times \alpha \quad (5)$$

式中：

$J$ —转动惯量参考值， $\text{kgm}^2$ ；

$\alpha$ —加载工装或测量台的水平度， $\text{mm/m}$ 。

#### C.2.4 合成不确定度评定

表 C.2 质心校准标准不确定度分量汇总表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	标准不确定度
$u_1$	重复性测量	A	$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
$u_2$	质心标准	B	/
$u_3$	分辨力	B	$\frac{r}{2\sqrt{3}}$
$u_4$	示值误差	A	$\frac{\Delta J}{2}$
$u_5$	质心加载不水平	B	$J \times \alpha$

各不确定度分量不相关，则合成不确定度按式（6）计算。

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} \quad (6)$$

#### C.2.5 扩展不确定度评定

取包含因子  $k=2$ ，则质心校准值的扩展不确定度按式（7）计算。

$$U = k \times u_c = 2 \times u_c \quad (7)$$

### C.3 转动惯量校准结果测量不确定度评定实例

C.3.1 采用转动惯量校准装置对一台转动惯量测量仪进行校准，得到的试验数据如表 C.5 所示。转动惯量校准装置、转动惯量测量仪信息如下：

- 校准装置质量范围：(100~800)kg，配置 50kg、100kg 质量块各 8 块；
- 校准装置的转动惯量测量范围及扩展不确定度：(35~350)kgm<sup>2</sup>， $U=0.01\%$  ( $k=2$ )；
- 转动惯量测量仪的负载范围：(100~1200) kg；
- 转动惯量测量仪的转动惯量测量范围及不确定度要求：(35~350)kgm<sup>2</sup>， $U=0.2\%$  ( $k=2$ )。

表 C.5 不确定评定实例校准数据

测量平台水平度		0.011mm/m	
测量工装水平度		0.011mm/m	
转动惯量标准		设备示值 /kgm <sup>2</sup>	示值误差 /kgm <sup>2</sup>
质量 /kg	转动惯量参考值 /kgm <sup>2</sup>		
100	36.61	36.63	0.02
	49.61	49.58	-0.03
200	73.69	73.61	-0.08
	99.69	99.79	0.10
300	136.3	136.18	-0.12
	149.3	149.32	0.02
400	147.38	147.48	0.10
	199.38	199.39	0.01
500	196.99	196.79	-0.2
	235.99	235.68	-0.31
600	247.07	247.28	0.21
	273.07	273.09	0.02
700	296.68	296.89	0.21
	309.68	309.61	-0.07
800	346.76	346.75	-0.01
400	199.38	199.40	/
		199.32	/
		199.39	/
		199.38	/
		199.36	/
		199.40	/

## C.3.2 不确定分量的计算

C.3.2.1 重复性引入的不确定度分量  $u_1 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.031 \text{ kgm}^2$ 。

C.3.2.2 转动惯量参考值的不确定度引入的标准不确定度  $u_2$  由上级证书得到，上级证书给出的转动惯量参考值的扩展不确定度位 0.01% ( $k=2$ )，各点标准不确定度均为  $u_2=0.005\%$ 。

C.3.2.3 转动惯量测量仪分辨力引入的标准不确定度  $u_3 = \frac{r}{2\sqrt{3}} = \frac{0.01}{2\sqrt{3}} = 0.003 \text{ kgm}^2$ 。

C.3.2.4 转动惯量测量仪示值误差引入的标准不确定度  $u_4 = \frac{|\Delta J|}{2} \text{ kgm}^2$ 。

C.3.2.5 加载工装或测量台不水平引入的标准不确定度  $u_5 = J\alpha \text{kgm}^2$ 。

各不确定度分量及合成标准不确定度计算结果如表 C.7。

表 C.7 标准不确定度分量、合成不确定度汇总表

单位:  $\text{kgm}^2$

转动惯量参考值	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_c$
36.61	0.031	0.018	0.003	0.010	0.000	0.037
49.61	0.031	0.025	0.003	0.015	0.001	0.043
73.69	0.031	0.037	0.003	0.040	0.001	0.063
99.69	0.031	0.05	0.003	0.050	0.001	0.077
136.3	0.031	0.068	0.003	0.060	0.001	0.096
149.3	0.031	0.075	0.003	0.010	0.002	0.082
147.38	0.031	0.074	0.003	0.050	0.002	0.095
199.38	0.031	0.100	0.003	0.005	0.002	0.105
196.99	0.031	0.098	0.003	0.100	0.002	0.143
235.99	0.031	0.118	0.003	0.155	0.003	0.197
247.07	0.031	0.124	0.003	0.105	0.003	0.165
273.07	0.031	0.137	0.003	0.010	0.003	0.141
296.68	0.031	0.148	0.003	0.105	0.003	0.184
309.68	0.031	0.155	0.003	0.035	0.003	0.162
346.76	0.031	0.173	0.003	0.005	0.004	0.176

### C.3.3 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则转动惯量校准结果的扩展不确定度为：

$$U = k \times u_c = 2 \times u_c \quad (\text{kgm}^2)$$

以上各校准结果对应的扩展不确定度如表 C.8。

表 C.8 各校准点扩展不确定度汇总表

转动惯量参考值 / $\text{kgm}^2$	转动惯量校准结果 / $\text{kgm}^2$	$U (k = 2)$ / $\text{kgm}^2$	$U_{rel} (k = 2)$
36.61	36.63	0.07	0.19
49.61	49.58	0.09	0.18
73.69	73.61	0.13	0.18
99.69	99.79	0.15	0.15
136.30	136.18	0.19	0.14
149.30	149.32	0.16	0.11
147.38	147.48	0.19	0.13
199.38	199.39	0.21	0.11
196.99	196.79	0.29	0.15

---

转动惯量参考值 /kgm <sup>2</sup>	转动惯量校准结果 /kgm <sup>2</sup>	$U (k = 2)$ /kgm <sup>2</sup>	$U_{ret} (k = 2)$
235.99	235.68	0.39	0.17
247.07	247.28	0.33	0.13
273.07	273.09	0.28	0.10
296.68	296.89	0.37	0.12
309.68	309.61	0.32	0.10
346.76	346.75	0.35	0.10

---

