

中华人民共和国工业和信息化部机械计量
技术规范 JJFZ（机械）XXXX-XXXX

智能驾驶用制动油门机器人校准规范

（报批稿）

Calibration Specification for Brake and Throttle Robot of Intelligent Driving

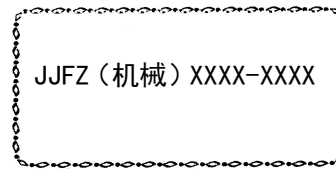
20**—**—**发布

20**—**—**实施

中华人民共和国工业和信息化部发布

智能驾驶用制动油门机器人校准 规范

Calibration Specification of Brake and
Throttle Robot of Intelligent Driving



归口单位：中国机械工业联合会

主要起草单位：中汽研汽车检验中心（天津）有限公司

北京艾尔动力科技有限公司

中汽智能科技（天津）有限公司

参加起草单位：中汽零部件技术（天津）有限公司

中汽研新能源汽车检验中心（天津）有限公司

本规范主要起草人：

陈 曦（中汽研汽车检验中心（天津）有限公司）

余福珍（北京艾尔动力科技有限公司）

奚瑞轩（中汽智能科技（天津）有限公司）

刘文彬（中汽研汽车检验中心（天津）有限公司）

参加起草人：

白 天（中汽研汽车检验中心（天津）有限公司）

王宵阳（中汽零部件技术（天津）有限公司）

韦 振（中汽研新能源汽车检验中心（天津）有限公司）

姜 与（中汽研汽车检验中心（天津）有限公司）

沈亮屹（中汽智能科技（天津）有限公司）

孔令名（中汽智能科技（天津）有限公司）

肖广宇（中汽研汽车检验中心（天津）有限公司）

本规范条文由中国机械工业联合会负责解释

目 录

引 言.....	IV
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语.....	1
3.1 智能驾驶用制动油门机器人	1
4 概述.....	1
5 计量特性.....	2
5.1 外观.....	2
5.2 计量性能.....	2
6 校准条件.....	2
6.1 环境条件.....	2
6.2 测量标准及设备.....	2
7 校准项目和校准方法.....	3
7.1 校准项目.....	3
7.2 校准方法.....	3
8 校准结果表达.....	8
9 复校时间间隔.....	8
附录 A 踏板行程误差测量不确定度评定校准结果示例.....	9
附录 B 油门开度示值误差校准结果测量不确定度评定示例.....	13
附录 C 制动踏板力示值误差校准结果测量不确定度评定示例.....	16

引言

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

智能驾驶用制动油门机器人校准规范

1 范围

本规范适用于测试试验用制动油门机器人（以下简称“制动油门机器人”），或具有类似功能设备的校准。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJF 1001—2011 通用计量术语及定义

JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示

JJF 1071—2010 国家计量校准规范编写规则

JJF 1169—2007 汽车制动操纵力计校准规范

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

3 术语

3.1 制动油门机器人 brake and throttle robot

用于测试过程中，可自动控制车辆制动踏板和油门踏板动作的装置，具备踏板速度调节、行程控制、力值输出等功能，配套采样系统实现相关参数的数据采集与反馈。

4 概述

制动油门机器人是智能驾驶测试系统的核心执行部件，主要由机械执行机构、力 / 位移传感器、数据采集模块等组成，用于模拟驾驶员对制动踏板和油门踏板的操作，实现制动踏板力、制动踏板行程、油门开度的精准控制，同时通过采样系统记录相关参数数据。

5 计量特性

5.1 外观

制动油门机器人应有产品铭牌，产品铭牌上标明设备名称、型号规格、制造厂名称、生产日期、出厂编号等。

5.2 计量性能

5.2.1 踏板行程、油门开度

踏板行程：测量范围（0~180）mm（含初始位置），最大允许误差 ± 2 mm；

油门开度：测量范围0%~100%，最大允许误差 $\pm 1\%$ 。

5.2.2 制动踏板力

测量范围（0~1500）N，最大允许误差 ± 2 N。

6 校准条件

6.1 环境条件

环境温度：10℃~40℃

环境湿度：小于等于85% RH

6.2 测量标准及设备

测量标准的测量范围应覆盖被校设备的测量范围，并具有足够高的分辨力、准确度和稳定性。测量标准应具有良好的屏蔽和接地，配套设备不应影响该测试系统的正常工作。

表1 测量标准一览表

序号	名称	技术要求	备注
1	无线加速度（角度测量）传感器	加速度测量范围： ± 16 g，角度测量范围： X、Z轴 $\pm 180^\circ$ ，Y轴： $\pm 90^\circ$ ，最大允许 误差：X、Z轴 $\pm 0.2^\circ$ ，Y轴： $\pm 0.1^\circ$	其他具有类似功能，且满足测量标准的扩展不确定度（ $k=2$ ）应不

			大于被校设备参数最大允许误差绝对值的三分之一。
2	制动踏板力标准装置	力值测量范围：（0~1500）N，不低于700N， 准确度等级：0.1级。	或其他有类似功能的设备。
3	线位移传感器	测量范围：（0~500）mm，不低于150mm， 最大允许误差：±0.1%FS	或其他有类似功能的设备。
4	关节臂三坐标	测量范围：不低于1m，最大允许误差：±0.5 mm	或其他有类似功能的设备。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

测试系统的校准项目如表 2 所示。

表 2 校准项目一览表

序号	校准项目名称	校准方法的条款
1	踏板行程示值误差	7.2.2
2	油门开度示值误差	7.2.3
3	制动踏板力示值误差	7.2.4

7.2 校准方法

7.2.1 外观检查

被校制动油门机器人应附有铭牌，标明仪器名称、型号、制造厂名、出厂编号、额定参数等信息；机械执行机构无变形、卡滞，传感器安装牢固，连接线无破损、松动；通电后，控制系统、显示模块、数据采集模块工作正常，无异常报警。

通电后开关、显示屏、测量仪表和各种状态指示灯（标志）应工作正常。制动油门机器人应运转正常，最大踏板速度应不低于 1000mm/s，数据采集系统采样频率应不低于

100 Hz。

7.2.2 踏板行程示值误差

1. 将线位移传感器与制动油门机器人踏板精准连接,确保传感器测量方向与踏板行程运动方向一致;调整关节臂三坐标测量系统,使其测量探头能稳定采集踏板行程特征点位置。通过控制器发出指令,控制制动油门机器人运行至最大制动距离(100%)位置,待机构静止后,同时利用线位移传感器和关节臂三坐标测量系统记录此时的踏板行程示值,记为 $L_{100\%,1}$ 重复上述操作2次,分别记录示值 $L_{100\%,2}$ 、 $L_{100\%,3}$ 。通过控制器将制动距离工况依次设置为90%、60%、30%,或其他需要的工况控制值,每个工况下均重复3次操作,分别记录各工况对应的三次踏板行程示值:90%工况对应 $L_{90\%,1}$ 、 $L_{90\%,2}$ 、 $L_{90\%,3}$;60%工况对应 $L_{60\%,1}$ 、 $L_{60\%,2}$ 、 $L_{60\%,3}$;30%工况对应 $L_{30\%,1}$ 、 $L_{30\%,2}$ 、 $L_{30\%,3}$;其他校准点类似。

2. 对每个设定工况下的三次踏板行程测量示值,采用算术平均法计算平均示值,计算公式如下:

$$\bar{L}_k = \frac{L_{k,1} + L_{k,2} + L_{k,3}}{3} \quad (1)$$

式中:

$\bar{L}_k$ ——第 k 个设定工况下的踏板行程平均示值, mm;

k ——取值为30%、60%、90%、100%,或其他需求点。

$L_{k,1}$ 、 $L_{k,2}$ 、 $L_{k,3}$ ——第 k 个设定开度工况下三次测量的踏板行程示值, mm。

3. 以最大行程开度(100%)对应的平均行程示值 $\bar{L}_{100\%}$ 为基准,计算其他各设定开度各工况下的理论行程值,再与对应工况的实际平均示值对比,得到踏板行程误差,计算公式如下:

理论行程值计算:

$$L_{k,0} = \bar{L}_{100\%} \times k \quad (2)$$

式中:

$L_{k,0}$ ——第 k 个设定工装下的踏板行程理论值, mm;

k ——设定开度工况比例(30%取0.3、60%取0.6、90%取0.9、或其他值)。

行程误差计算：

$$\Delta L_k = \bar{L}_k - L_{k,0} \quad (3)$$

式中：

ΔL_k —— 第 k 个设定开度工况下的踏板行程误差，mm。

7.2.3 油门开度示值误差

1. 将关节臂三坐标测量系统固定于稳定平台，校准测量探头；以制动油门机器人踏板转轴为旋转基准，确定踏板特征点（如踏板末端中心点），建立角度测量坐标系，确保测量方向与踏板旋转轨迹一致。通过控制器发出指令，控制制动油门机器人运行至最大油门开度（100%）位置，待机构静止后，用关节臂三坐标测量系统测量踏板特征点的旋转角度；重复该操作 2 次，分别记录示值 $\theta_{100\%,2}$ 、 $\theta_{100\%,3}$

通过控制器依次将油门开度设置为 90%、60%、30%（“可根据被校设备的实际特性曲线，增加特征点进行校准），每个开度下均重复步骤 2 的操作：

90%开度：记录 3 次测量角度 $\theta_{90\%,1}$ 、 $\theta_{90\%,2}$ 、 $\theta_{90\%,3}$ ，

60%开度：记录 3 次测量角度 $\theta_{60\%,1}$ 、 $\theta_{60\%,2}$ 、 $\theta_{60\%,3}$

30%开度：记录 3 次测量角度 $\theta_{30\%,1}$ 、 $\theta_{30\%,2}$ 、 $\theta_{30\%,3}$

或其他需求点。

2. 对每个设定开度下的 3 次测量示值，采用算术平均法计算平均示值，计算公式如下：

$$\bar{\theta}_k = \frac{\theta_{k,1} + \theta_{k,2} + \theta_{k,3}}{3} \quad (4)$$

式中：

$\bar{\theta}_k$ —— 第 k 个设定开度下的油门开度平均测量示值，单位为度（°）；

k —— 设定开度等级，取值为 30%、60%、90%、100%；

$\theta_{k,1}$ 、 $\theta_{k,2}$ 、 $\theta_{k,3}$ —— 第 k 个设定开度下 3 次测量的油门开度示值，单位为度（°）。

以 100%开度对应的平均角度示值为 $\bar{\theta}_{100\%}$

基准，计算其他设定开度下的理论角度值，计算公式如下：

$$\theta_{k,0} = \bar{\theta}_{100\%} \times \alpha_k \quad (5)$$

式中：

$\theta_{k,0}$ —— 第 k 个设定开度下的油门开度理论值，单位为度（°）；

α_k —— 设定开度比例系数（30%取 0.3、60%取 0.6、90%取 0.9）；

$\bar{\theta}_{100\%}$ —— 100%开度下的油门开度平均测量示值（作为基准值），单位为度（°）。

3. 开度示值误差计算

每个设定开度下的油门开度示值误差为实际平均示值与理论值的差值，计算公式如下：

$$\Delta\theta_k = \bar{\theta}_k - \theta_{k,0} \quad (6)$$

式中：

$\Delta\theta_k$ —— 第 k 个设定开度下的油门开度示值误差，单位为度（°）；

若 $\Delta\theta_k$ 为正值，说明实际开度角度大于理论值；若为负值，说明实际开度角度小于理论值。

7.2.4 制动踏板力示值误差

根据机器人制动踏板力的测量量程，均匀选取 5 个校准点，分别为：0%（零点）、25%、50%、75%、100%。若机器人量程较小或有特殊要求，可适当调整校准点数量，但至少应包含零点、50%和 100%三个关键点。

通过制动踏板力标准装置，按从小到大的顺序依次施加对应校准点的力值，待力值稳定后，同步采集机器人力传感器示值 F_{in} ， $n = 1, 2, 3$ ，代表 3 次测量和标准力传感器示值 F_{sn} ，每个校准点重复测量 3 次，记录每次的采集数据。

各校准点单次测量的示值误差按下列公式计算：

$$\Delta_n = \frac{F_{in} - F_{sn}}{F_{sn}} \times 100\% \quad (7)$$

其中：

Δ_n —— 第 n 次测量的示值误差，%；

F_{in} —— 第 n 次测量的机器人力传感器示值，N；

F_{sn} —— 第 n 次测量的标准力传感器示值, N。

各校准点的平均示值误差按下列公式计算:

$$\Delta_{\text{avg}} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3}{3} \quad (8)$$

其中:

Δ_{avg} —— 某校准点的平均示值误差, %;

$\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ —— 该校准点 3 次测量的示值误差, %。

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反应，校准证书应至少包括以下信息：

- a)标题，如“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)客户的名称和地址；
- f)被校对象的描述和明确标识；
- g)进行校准的日期；
- h)如果与校准结果的有效性或应用有关时，应对校准过程中被校对象的设置和操作进行说明；
- i)校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- i)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)校准证书和校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- o)校准结果仅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。

9 复校时间间隔

复校周期建议不超过 1 年，由于复校时间间隔的长短是由设备的使用状况及其性能等诸多因素决定，使用单位可根据实际使用情况合理决定复校时间间隔。

附录 A

踏板行程误差校准结果测量不确定度评定示例

A.1 测量方法

采用间接测量法，以线位移传感器和关节臂三坐标测量系统作为标准器，依据本规范中各项技术要求、校准条件与校准方法的规定，校准制动油门机器人踏板行程示值误差。

被测对象为制动油门机器人，踏板行程测量范围（0~180）mm，分辨力 0.1mm。所使用线位移传感器测量范围（0~1000）mm，最大允许误差 $\pm 0.1\%$ FS；关节臂三坐标测量范围 0 m~3.5 m，最大允许误差 ± 0.5 mm。

依据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》进行不确定度评估。

A.2 测量模型

踏板行程示值误差按公式（A.1）进行计算：

$$\Delta L_k = \bar{L}_k - L_{k,0} \quad (\text{A.1})$$

其中：

ΔL_k ——第 k 个设定开度下的踏板行程示值误差，mm；

$\bar{L}_k$ ——第 k 个设定开度下 3 次测量的踏板行程平均示值，mm；

$L_{k,0}$ ——第 k 个设定开度下的踏板行程理论值 $L_{k,0} = \bar{L}_{100\%} \times k$ （单位：mm）；

$\bar{L}_{100\%}$ ——100%开度下 3 次测量的踏板行程平均示值，mm；

k ——设定开度比例（30%取 0.3、60%取 0.6、90%取 0.9、100%取 1.0）。

A.3 合成不确定度与灵敏系数

由测量模型可知，校准结果的主要不确定度来源为：

被校设备测量重复性引入的不确定度；

被校设备示值分辨力引入的不确定度；

标准器（线位移传感器+关节臂三坐标）示值误差引入的不确定度。

其灵敏系数分别为：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta L_k}{\partial \bar{L}_k} = 1 \quad (\text{A.2})$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta L_k}{\partial L_{k,0}} = -1 \quad (\text{A.3})$$

测量模型中各分量独立不相关，合成标准不确定度计算公式为：

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2} \quad (\text{A.4})$$

其中：

u_1 ——被校设备测量重复性与分辨力引入的合成标准不确定度；

u_2 ——标准器示值误差引入的标准不确定度。

A.4 标准不确定度来源与评定

A.4.1 被校设备测量重复性引入的不确定度 u_{1-1}

在重复性条件下，将制动油门机器人设定为 60% 开度（ $L_{60\%} = 0.6 \times L_{100\%} = 0.6 \times 180, \text{mm} = 108, \text{mm}$ ），使用线位移传感器和关节臂三坐标同步测量，共记录 10 次测量示值，数据见表 A.1。

表 A.1 重复性测量数据

测量次数	踏板行程示值/ (mm)	测量次数	踏板行程示值/ (mm)
1	108.2	6	108.1
2	108.3	7	108.3
3	108.1	8	108.2
4	108.4	9	108.0
5	108.2	10	108.2
平均值	108.2	标准偏差	0.12

根据贝塞尔公式计算单次实验标准偏差：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.12 \text{ mm} \quad (\text{A.5})$$

实际校准中重复测量 3 次，以算术平均值作为测量结果，故：

$$u_{1-1} = \frac{s}{\sqrt{3}} = \frac{0.12}{\sqrt{3}} \approx 0.069 \text{ mm} \quad (\text{A.6})$$

A.4.2 被校设备示值分辨力引入的不确定度 u_{1-2}

被校设备踏板行程示值分辨力为 0.1 mm，服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，区间半

宽 0.05mm，故：

$$u_{1-2} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} \approx 0.029 \text{ mm} \quad (\text{A.7})$$

$u_{1-2} < u_{1-1}$ 为避免重复计算，忽略 u_{1-2}

被校设备相关不确定度合成：

$$u_1 = u_{1-1} = 0.069 \text{ mm} \quad (\text{A.8})$$

A.4.3 标准器示值引入的不确定度 u_2

A.4.3.1 线位移传感器示值误差引入的不确定度

线位移传感器测量范围（0~1000） mm，最大允许误差 $\pm 0.1\% \text{FS}$ ，即 $\pm 1.0 \text{ mm}$ ，服从均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，区间半宽 0.5 mm ，故：

$$u_{2-1} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} \approx 0.289 \text{ mm} \quad (\text{A.9})$$

A.4.3.2 关节臂三坐标示值误差引入的不确定度

关节臂三坐标最大允许误差 $\pm 0.5 \text{ mm}$ ，服从均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，区间半宽 0.25 mm ，故：

$$u_{2-2} = \frac{0.25}{\sqrt{3}} \approx 0.144 \text{ mm} \quad (\text{A.10})$$

标准器相关不确定度合成：

$$u_2 = \sqrt{u_{2-1}^2 + u_{2-2}^2} = \sqrt{0.289^2 + 0.144^2} \approx 0.322 \text{ mm} \quad (\text{A.11})$$

A.5 标准不确定度分量一览表

表 A.2 标准不确定度分量一览表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值 (mm)	灵敏系数	评定方法
u_1	被校设备（重复性+分辨力）	0.069	1	A 类+B 类
u_2	标准器（线位移传感器+关节臂）	0.322	-1	B 类

A.6 合成标准不确定度

由于各标准不确定度分量独立不相关，因此，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{1^2 \times 0.069^2 + (-1)^2 \times 0.322^2} \approx \sqrt{0.00476 + 0.1037} \approx 0.33 \text{ mm} \quad (\text{A.12})$$

A.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，所以：

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.33 = 0.66 \text{ mm} \quad (\text{A.13})$$

测量不确定度报告： $U=0.7 \text{ mm}$ ($k=2$)。

附录 B

油门开度示值误差校准结果测量不确定度评定示例

B.1 测量方法

采用直接测量法，以关节臂三坐标测量系统作为标准器，依据本规范中各项技术要求、校准条件与校准方法的规定，校准制动油门机器人油门开度示值误差。

被测对象为制动油门机器人，油门开度测量范围 0%~100%，分辨力 0.1%；关节臂三坐标测量范围 0 m~3.5 m，最大允许误差±0.5 mm。

依据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》进行不确定度评估。

B.2 测量模型

油门开度示值误差按公式（B.1）进行计算：

$$\Delta\theta_k = \bar{\theta}_k - \theta_{k,0} \quad (\text{B.1})$$

其中：

$\Delta\theta_k$ ——第 k 个设定开度下的油门开度示值误差，°；

$\bar{\theta}_k$ ——第 k 个设定开度下 3 次测量的平均角度示值，°；

$\theta_{k,0}$ ——第 k 个设定开度下的理论角度值（ $\theta_{k,0} = \bar{\theta}_{100\%} \times \alpha_k$ ）°；

$\bar{\theta}_{100\%}$ ——100%开度下 3 次测量的平均角度示值（基准值），°；

α_k ——设定开度比例系数（30%取 0.3、60%取 0.6、90%取 0.9）。

B.3 合成不确定度与灵敏系数

由测量模型可知，校准结果的主要不确定度来源为：

- （1）被校设备测量重复性引入的不确定度；
- （2）被校设备示值分辨力引入的不确定度；
- （3）标准器（关节臂三坐标）示值误差引入的不确定度。

其灵敏系数分别为：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta\theta_k}{\partial \bar{\theta}_k} = 1 \quad (\text{B.2})$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta\theta_k}{\partial \theta_{k,0}} = -1 \quad (\text{B.3})$$

测量模型中各分量独立不相关，合成标准不确定度计算公式为：

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2} \quad (\text{B.4})$$

其中：

u_1 ——被校设备测量重复性与分辨力引入的合成标准不确定度；

u_2 ——标准器示值误差引入的标准不确定度。

B.4 标准不确定度来源与评定

B.4.1 被校设备测量重复性引入的不确定度 u_{1-1}

在重复性条件下，将制动油门机器人设定为 60%开度，使用关节臂三坐标测量踏板特征点旋转角度，共记录 10 次测量示值，数据见表 B. 1。

表 B. 1 重复性测量数据

测量次数	角度示值 / (°)	测量次数	角度示值 / (°)
1	21.6	6	21.5
2	21.7	7	21.7
3	21.5	8	21.6
4	21.8	9	21.4
5	21.6	10	21.6
平均值	21.6	标准偏差	0.12

根据贝塞尔公式计算单次实验标准偏差：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.12^\circ \quad (\text{B.5})$$

实际校准中重复测量 3 次，以算术平均值作为测量结果，故：

$$u_{1-1} = \frac{s}{\sqrt{3}} = \frac{0.12}{\sqrt{3}} \approx 0.069^\circ \quad (\text{B.6})$$

B.4.2 被校设备示值分辨力引入的不确定度 u_{1-2}

被校设备油门开度示值分辨力为 0.1%，对应角度分辨力约 0.03°（以 100%开度对应 30°为例），服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，区间半宽 0.015°，故：

$$u_{1-2} = \frac{0.015}{\sqrt{3}} \approx 0.009^\circ \quad (\text{B.7})$$

$u_{1-2} < u_{1-1}$ 为避免重复计算，忽略 u_{1-2}

被校设备相关不确定度合成：

$$u_1 = u_{1-1} = 0.069^\circ \quad (\text{B.8})$$

B.4.3 标准器示值引入的不确定度 u_2

关节臂三坐标最大允许误差 $\pm 0.5 \text{ mm}$ ，换算为角度误差（以踏板特征点距离转轴200 mm为例）： $\Delta\theta = \arctan\left(\frac{0.5}{200}\right) \approx 0.143^\circ$ ，服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，区间半宽 0.143° ，故：

$$u_2 = \frac{0.143}{\sqrt{3}} \approx 0.083^\circ \quad (\text{B.9})$$

B.5 标准不确定度分量一览表

表 B.2 标准不确定度分量一览表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值 ($^\circ$)	灵敏系数	贡献量 ($^\circ$)	评定方法
u_1	被校设备（重复性+分辨力）	0.069	1	0.069	A类+B类
u_2	标准器（关节臂三坐标）	0.083	-1	0.083	B类

B.6 合成标准不确定度

由于各标准不确定度分量独立不相关，因此，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{1^2 \times 0.069^2 + (-1)^2 \times 0.083^2} \approx \sqrt{0.00476 + 0.0069} \approx 0.11^\circ \quad (\text{B.10})$$

B.7 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，则：

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.11 \approx 0.22^\circ \quad (\text{B.11})$$

换算为开度误差（以100%开度对应 30° 为例）：

$$\Delta\alpha = \frac{0.22}{30} \times 100\% \approx 0.73\%$$

测量不确定度报告： $U = 0.73\%$ ($k = 2$)。

附录 C

制动踏板力示值误差校准结果测量不确定度评定示例

C.1 测量方法

采用直接测量法，以制动踏板力标准装置（0.1 级）作为标准器，依据本规范中各项技术要求、校准条件与校准方法的规定，校准制动油门机器人制动踏板力示值误差。

被测对象为制动油门机器人，制动踏板力测量范围（0~500）N，分辨力 0.1N；制动踏板力标准装置测量范围（0~1500）N，准确度等级 0.1 级。

依据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》进行不确定度评估。

C.2 测量模型

制动踏板力单次测量示值误差按公式（C.1）进行计算：

$$\Delta_n = \frac{F_{in} - F_{sn}}{F_{sn}} \times 100\% \quad (C.1)$$

其中：

Δ_n ——第 n 次测量的示值误差，%；

F_{in} ——第 n 次测量的机器人力传感器示值，N；

F_{sn} ——第 n 次测量的标准力传感器示值，N。

各校准点平均示值误差：

$$\Delta_{avg} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3}{3} \quad (C.2)$$

C.3 合成不确定度与灵敏系数

由测量模型可知，校准结果的主要不确定度来源为：

- (1) 被校设备测量重复性引入的不确定度；
- (2) 被校设备示值分辨力引入的不确定度；
- (3) 标准器（制动踏板力标准装置）示值误差引入的不确定度。

其灵敏系数分别为：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta_n}{\partial F_{in}} = \frac{1}{F_{sn}} \quad (C.3)$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta_n}{\partial F_{sn}} = -\frac{F_{in}}{F_{sn}^2} \quad (C.4)$$

近似取 $F_{in} \approx F_{sn} = F_0$ （校准点标称值），则灵敏系数简化为：

$$c_1 \approx \frac{1}{F_0}, c_2 \approx -\frac{1}{F_0} \quad (C.5)$$

测量模型中各分量独立不相关，合成标准不确定度计算公式为：

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2} \quad (C.6)$$

其中：

u_1 ——被校设备测量重复性与分辨力引入的合成标准不确定度（N）；

u_2 ——标准器示值误差引入的标准不确定度（N）；

F_0 ——校准点标称值（取 250 N，50%）。

C.4 标准不确定度来源与评定

C.4.1 被校设备测量重复性引入的不确定度 u_1

C.4.1.1 测量重复性引入的不确定度 u_{1-1}

在重复性条件下，将制动踏板力标准装置施加 250 N 力值，记录机器人 10 次测量示值，数据见表 C.1。

表 C.1 重复性测量数据

测量次数	机器人力示值 / (N)	测量次数	机器人力示值 / (N)
1	250.2	6	250.1
2	250.3	7	250.3
3	250.1	8	250.2
4	250.4	9	250.0
5	250.2	10	250.2
平均值	250.2	标准偏差	0.12

根据贝塞尔公式计算单次实验标准偏差：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.12 \text{ N} \quad (C.7)$$

实际校准中重复测量 3 次，以算术平均值作为测量结果，故：

$$u_{1-1} = \frac{s}{\sqrt{3}} = \frac{0.12}{\sqrt{3}} \approx 0.069 \text{ N} \quad (C.8)$$

C.4.1.2 被校设备示值分辨力引入的不确定度 u_{1-2}

被校设备制动踏板力示值分辨力为 0.1 N，服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，区间半

宽 0.05N，故：

$$u_{1-2} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} \approx 0.029 N \quad (C.9)$$

$u_{1-2} < u_{1-1}$ 为避免重复计算，忽略 u_{1-2}

被校设备相关不确定度合成：

$$u_1 = u_{1-1} = 0.069 N \quad (C.10)$$

C.4.2 标准器示值误差引入的不确定度 u_2

制动踏板力标准装置准确度等级0.1级，测量范围（0~1500）N，最大允许误差 $\pm 0.1\% \times 250 = \pm 0.25N$ ，服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，区间半宽1.5N，故：

$$u_2 = \frac{1.5}{\sqrt{3}} \approx 0.87N \quad (C.11)$$

C.5 标准不确定度分量一览表

表 C.2 标准不确定度分量一览表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值（N）	灵敏系数（1/N）	评定方法
u_1	被校设备（重复性+分辨力）	0.069	4×10^{-3}	A类+B类
u_2	标准器（制动踏板力标准装置）	0.87	4×10^{-3}	B类

C.6 合成标准不确定度

由于各标准不确定度分量独立不相关，因此，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{(4 \times 10^{-3} \times 0.069)^2 + (4 \times 10^{-3} \times 0.87)^2} \approx \sqrt{7.6 \times 10^{-6} + 1.21 \times 10^{-5}} \approx 0.43\% \quad (C.12)$$

C.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，所以：

$$U_{rel} = k \times u_c = 2 \times 0.43\% \approx 0.86\% \quad (C.13)$$

测量不确定度报告： $U_{rel} = 0.86\%$ （ $k = 2$ ）。