

中华人民共和国工业和信息化部
石油和化工计量技术规范

JJF（石化）XXXX—202X

柴油十六烷值机校准规范

Calibration Specification for Diesel Cetane Number Test Machines

（报批稿）

202X-XX-XX发布202X-XX-XX实施

中华人民共和国工业和信息化部发布

柴油十六烷值机 校准规范

Calibration Specification for
Diesel Cetane Number Test Machines

归口单位：中国石油和化学工业联合会

主要起草单位：中石化（洛阳）科技有限公司

山东省计量科学研究院

中国计量科学研究院

参加起草单位：中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院

上海沪顺石化装备有限公司

本规范委托全国石油和化工行业计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

王桂英（中石化（洛阳）科技有公司）

张 森（山东省计量科学研究院）

谢宗畴（中石化（洛阳）科技有公司）

白正伟（中石化（洛阳）科技有公司）

张正东（中国计量科学研究院）

李凤伟（中石化（洛阳）科技有公司）

郭 波（山东省计量科学研究院）

李 硕（中国计量科学研究院）

参加起草人：

赵丽萍（中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院）

丁明林（上海沪顺石化装备有限公司）

目录

引言.....	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语和定义.....	(1)
4 概述.....	(2)
5 计量特性.....	(3)
6 校准条件.....	(3)
6.1 环境条件.....	(3)
6.2 测量标准及其他设备.....	(3)
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.....	(8)
8.1 校准记录.....	(8)
8.2 校准证书.....	(8)
8.3 不确定度.....	(8)
9 复校时间间隔.....	(8)
附录 A 柴油十六烷值机参数调节与设定.....	(9)
附录 B 柴油十六烷值机校准记录格式.....	(10)
附录 C 柴油十六烷值机校准证书的内页格式.....	(11)
附录 D 柴油十六烷值机示值误差测量结果不确定度评定示例.....	(12)
附录 E 转速误差测量结果不确定度评定示例.....	(14)

引 言

本规范依据JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》等基础性系列规范进行编制。

本规范主要参考了GB/T 386-2021《柴油十六烷值测定法》和GB/T 33298-2016《柴油十六烷值的测定 风量调节法》制定。

本规范为首次发布。

柴油十六烷值机校准规范

1 范围

本规范适用于压燃式发动机燃料十六烷值试验机的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1071-2010 国家计量校准规范编写规则

GB/T 386柴油十六烷值测定法

GB/T 33298柴油十六烷值的测定 风量调节法

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 术语和定义

以下术语和定义适用于本规范。

3.1 十六烷值 cetane number

在规定条件下表示柴油着火性能的约定数值。

注：着火性能是指在一个标准发动机内，在控制燃料流速、喷油时间和压缩比的条件下测定着火滞后期。

3.2 副标准燃料 secondary reference fuels

具有稳定的十六烷值，并可替代正标准燃料，用于计算柴油十六烷值的高十六烷值烃类燃料和低十六烷值烃类燃料及其按体积比组成的混合物。

3.3 压缩比 compression ratio

活塞在下止点与活塞在上止点时（包括预燃烧室在内的燃烧室体积）的体积之比。

3.4 着火滞后期 ignition delay

燃料从喷油到燃烧之间的时间，以曲轴旋转角度（°）表示。

3.5 喷油提前角 injection advance

喷油器开始喷油到上止点为止的曲轴旋转角度。

3.6 十六烷值表 cetane meter

通过输入的复合变送器脉冲显示喷油提前角和着火滞后期的电子仪表。

3.7 手轮读数 handwheel reading

转动大手轮调节发动机的压缩比时，在标定刻度尺上得到的读数。

3.8 气量表读数 airflow meter reading

气量表上显示的表示进入气缸风量相对多少的数字。用于内插法计算对应的十六烷值。

3.9 风量调节 airflow regulation

通过调节压缩压力，进而改变气缸不同进气量的调节。

4 概述

柴油十六烷值机主要用于评价柴油的着火性能。柴油十六烷值是在规定的标准操作条件下，使用专用的发动机，将待测样品的着火性质与已知十六烷值标准燃料的着火性质进行比较测定的。常用的方法有两种：1) 方法 A：参照 GB/T 386 规定的标准操作条件，采用可连续改变压缩比的专用单缸发动机进行测定，以得到待测样品和用于比较的两个标准燃料的手轮读数，根据手轮读数用内插法计算出十六烷值；2) 方法 B：参照 GB/T 33298 规定的标准操作条件，采用可连续改变进气量的专用单缸发动机进行测定，以得到待测样品和用于比较的两个标准燃料的进气量读数，根据气量表读数用内插法计算出十六烷值。

柴油十六烷值机主要由下列标准部件和系统组成：配有燃料泵的曲轴箱，装有预燃型气缸盖的气缸，热虹吸循环夹套冷却系统、带有切换阀的多燃料罐系统、喷油器、电子控制部分、排气管等。柴油十六烷值机组成示意图见图 1。

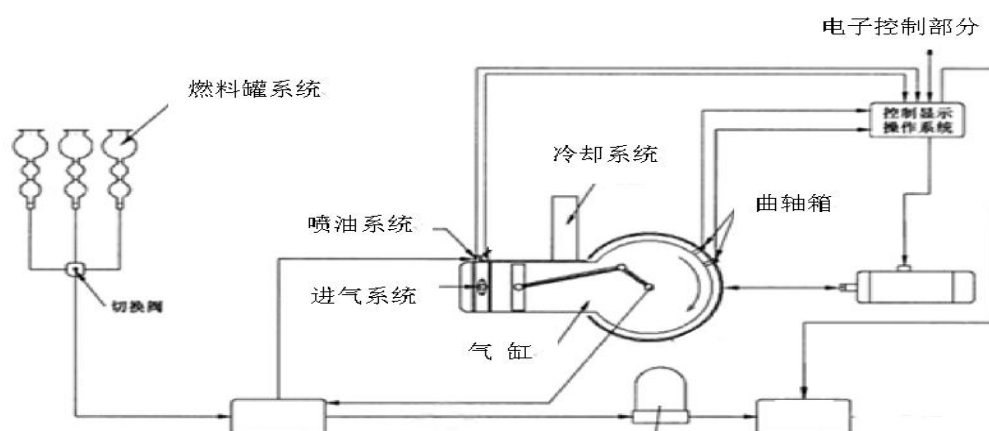


图 1 十六烷值机组成示意图

5 计量特性

计量特性的技术指标见表1。

表1 柴油十六烷值机计量特性一览表

序号	项目	技术要求
1	发动机转速误差	$\pm 1.0\%$
2	十六烷值机示值误差	± 4.0
3	十六烷值机示值重复性	≤ 0.9
注：以上各项指标不是用于合格性判别，仅作参考。		

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 温度条件

环境温度：（5～30）℃。

6.1.2 湿度条件

相对湿度： $\leq 85\%$ 。

6.1.3 其他条件

工作环境应无影响仪器正常工作的电磁场及干扰气体，校准现场应保持通风并采取安全措施。

6.2 测量标准及其它设备

测量标准及其它设备见表2。

表2 校准项目和校准设备

序号	校准项目	测量标准名称及技术要求
1	发动机转速误差	0.5级转速表， $\pm 0.5\%$
2	十六烷值机示值误差	十六烷值标准物质， $U \leq 2.5$ ， $k=2$
3	十六烷值机示值重复性	

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

柴油十六烷值机的校准项目见表2。

7.2 校准方法

7.2.1 校准前检查

- 1) 仪器应具有名称、型号、制造厂、出厂编号等标识。
- 2) 仪器各部件齐全且连接良好,各旋钮及按键应能正常工作,无其他影响使用性能缺陷。
- 3) 仪器开机启动预热后,参照柴油十六烷值机参数设定表(见附录A)检查试验条件,并核查润滑油温度($57^{\circ}\text{C} \pm 8^{\circ}\text{C}$)、气缸夹套冷却温度($100^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$)、吸入空气温度($66^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$)等条件是否符合试验要求。

7.2.2 发动机转速误差

在发动机转动轴上选择转速表最容易照射到的位置粘贴反射标记,开启柴油十六烷值机,当转速达到设定校准点时(900r/min或1000r/min),运行稳定5min后,每隔1min读取转速表示值,重复测量6次,结果保留整数位,按公式(1)计算发动机转速误差。

$$\Delta R = \frac{R_s - \bar{R}}{\bar{R}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

ΔR ——发动机转速误差, %;

\bar{R} ——转速表6次测量值的算术平均值, r/min;

R_s ——发动机转速设定值, r/min。

7.2.3 十六烷值机示值误差及示值重复性

7.2.3.1 方法 A 测定步骤

7.2.3.1.1 十六烷值标准物质的测定

1) 装样

将十六烷值标准物质加入燃料罐中,仔细冲洗量管,排出从燃料罐至泵之间管线中的空气,将燃料切换阀置于能将燃料送入发动机的位置。

2) 燃料流速确定

检查燃料流速,调整燃料泵流速测微计至 13 mL/min,最终的流速应在 (60 ± 1) s 内进行测定。

3) 燃料喷射定时

调节喷油定时器测微计,使之达到 $13.0^{\circ} \pm 0.2^{\circ}$ 的喷油提前角。

4) 着火滞后期

调节手轮改变压缩比,使之达到 13.0 ± 0.2 的着火滞后期读数,按顺时针方向做最后的手轮调节,以消除手轮机械中的间隙及潜在误差。

5) 喷油提前角和着火滞后期的读数要求:

- a. 测试时间一般在 5min~10min 内,就会得到稳定的读数;
- b. 试样和每一标准燃料的读数时间都应该相近,并且应不小于 3min。

6) 记录读数:记录手轮读数作为燃料试样燃烧特性的有代表性的指示值。

7.2.3.1.2 副标准燃料的测定

按照如下操作步骤测定副标准燃料:

- 1) 根据十六烷值标准物质的参考值,配制两个接近其十六烷值的副标准燃料混合物,一般配制 400mL~500mL;
- 2) 按照 7.2.3.1.1 步骤测定两个副标准燃料;
- 3) 分别记录两个副标准燃料的手轮读数;
- 4) 如果标准物质的手轮读数在两个副标准燃料的手轮读数之间,就可继续进行测试,否则要配制其他配比的副标准燃料进行测试,直到达到要求为止。

7.2.3.1.3 重复测定

按照如下操作进行重复测定:

- 1) 按照 1 号副标准燃料、十六烷值标准物质、2 号副标准燃料的顺序,读取第 2 组手轮读数。测试过程中,仔细检查每一种燃料的试验操作参数,当操作状态平衡后,记录手轮读数 a 、 a_1 、 a_2 ,依据 7.2.3.3 节中公式 (2) 计算十六烷值。

两组测试全程的燃料转换顺序如图 2 所示。

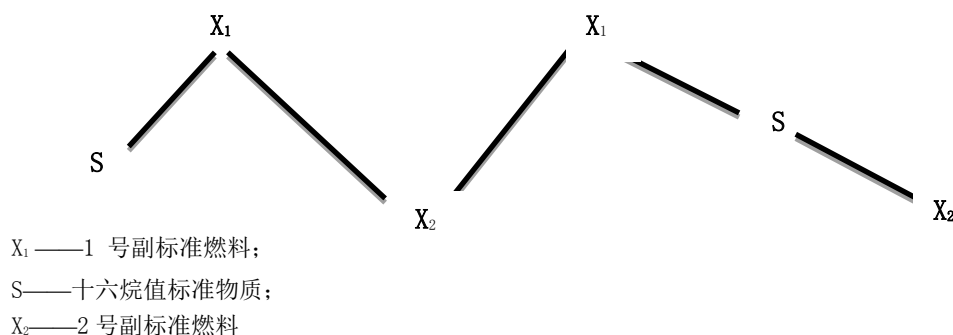


图 2 标准物质和副标准燃料读数顺序

- 2) 如果第一组手轮读数和第二组手轮读数计算的两个十六烷值之差不大于 1.4 个十六烷值单位,则由标准物质的两个手轮读数的平均值和每个副标准燃料的两次手轮读数的

平均值计算十六烷值。

3) 如果由第一组和第二组手轮读数计算的十六烷值之差大于 1.4, 就按标准物质、1 号副标准燃料和 2 号副标准燃料的测定顺序(与第一组手轮读数测定顺序相同)再进行测定, 所测定的手轮读数作为第三组手轮读数。

4) 由标准物质和两个副标准燃料的第三组手轮读数, 依据 7.2.3.3 节中公式(2) 计算十六烷值。

5) 如果第二组手轮读数和第三组手轮读数计算的两个十六烷值之差不大于 1.4 个十六烷值单位, 则由第二组和第三组手轮读数的平均值计算十六烷值。

6) 如果由第二组和第三组手轮读数计算的十六烷值之差大于 1.4, 就应寻找原因。

7.2.3.2 方法 B 测定步骤

7.2.3.2.1 十六烷值标准物质的测定步骤

1) 装样

将十六烷值标准物质加入进样管, 彻底冲洗燃料系统管线, 在操作中避免进入空气, 否则可能会引起测定机器工作失常。

2) 燃料流速的测量和调节

为加快调节测量速度, 通常使用 10mL 计量泡, 如果需要加大进油量, 则逆时针旋转油量调节旋钮, 反之则减少进油量, 最终的流速为 $10 \text{ mL} / (90 \text{ s} \pm 1.5 \text{ s})$ 或 $20 \text{ mL} / (180 \text{ s} \pm 3.0 \text{ s})$, 得到正确的燃料流速后, 记录相应的供油量调节旋钮读数作为参考。

3) 喷油提前角调整

调节喷油提前角的调节旋钮, 使之达到 $20.0^\circ \pm 0.2^\circ$ 的喷油提前角。

4) 着火滞后期测量

旋转进气量调节旋钮, 最终使着火滞后期表固定在 $20.0^\circ \pm 0.2^\circ$ 的范围内, 记录气量表读数。

5) 着火滞后期的读数要求:

- 测试时间一般在 5min~10min 内, 读数就会稳定, 记录稳定后读数;
- 试样和每一标准燃料的读数时间都应该一致, 相差应不大于 3min。

7.2.3.2.2 副标准燃料的测定步骤

按照 7.2.3.1.2 步骤配制和测定两个副标准燃料。

7.2.3.2.3 重复测定

按照 7.2.3.1.3 步骤进行重复测定，至少重复三次，重复试验时要重新检查全部试验条件，以保证在标准条件下进行试验。

7.2.3.3 十六烷值的计算

依据标准物质的手轮或气量表读数的平均值和两个副标准燃料的手轮或气量表读数的算术平均值，根据公式（2）通过内插法计算十六烷值 X_i 为：

$$X_i = CN_1 + (CN_2 - CN_1)(a - a_1)/(a_2 - a_1) \quad (2)$$

式中：

X_i ——标准物质的十六烷值；

CN_1 ——1 号副标准燃料的十六烷值；

CN_2 ——2 号副标准燃料的十六烷值；

a ——标准物质手轮或气量表读数的算术平均值；

a_1 ——1 号副标准燃料手轮或气量表读数的算术平均值；

a_2 ——2 号副标准燃料手轮或气量表读数的算术平均值。

7.2.3.4 十六烷值机示值误差及示值重复性的计算

7.2.3.4.1 示值误差

按照 7.2.3.1 或 7.2.3.2 的步骤，对十六烷值标准物质，分别重复测量 2 次，计算十六烷值的算术平均值，结果保留一位小数，按公式（3）计算十六烷值机示值误差 ΔX 为：

$$\Delta X = \bar{X} - X_s \quad (3)$$

式中：

ΔX ——十六烷值机示值误差；

\bar{X} ——2 次十六烷值测量值 X_1 ， X_2 的算术平均值；

X_s ——十六烷值标准物质的标准值。

7.2.3.4.2 示值重复性

根据 7.2.3.1 或 7.2.3.2 中两次重复测量结果，按公式（4）计算十六烷值机示值重复性 δ 为：

$$\delta = X_{\max} - X_{\min} \quad (4)$$

式中：

δ ——十六烷值机示值重复性；

X_{\max} ——十六烷值测量值的最大值；

X_{\min} ——十六烷值测量值的最小值。

8 校准结果

8.1 校准记录

校准记录应详尽记录测量数据和计算结果。推荐的校准记录格式见附录B。

8.2 校准证书

经校准的柴油十六烷值机应出具校准证书，校准结果应在校准证书上反映。校准证书包括的信息应符合JJF 1071-2010中5.12的要求，推荐的校准证书内页格式见附录C。

8.3 不确定度

校准证书应给出相应校准项目的扩展不确定度，评定示例见附录D和附录E。

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由柴油十六烷值机的使用情况、使用者、柴油十六烷值机本身质量等因素所决定，因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔，建议一般不超过一年。

附录 A

柴油十六烷值机参数调节与设定

推荐参数

表 A.1 柴油十六烷值机参数表

参数		方法 A	方法 B
测试范围		30~65	30~65
气缸直径:		82.22 mm (3.250in)	90 mm
活塞行程:		114.3 mm (4.50in)	90 mm (气缸行程)
气缸容量:		611729 mm ³ (37.33in ³)	573 mL
气 门 间隙:	进气阀	(0.20 ±0.025) mm	(0.20 ±0.025) mm
	排气阀	(0.20 ±0.025) mm	(0.20 ±0.025) mm
喷油传感器间隙:		(1.00 ±0.02) mm	(1.00 ±0.02) mm
压缩比范围:		8:1~36:1	1:1~50:1
发动机转速:		(900 ±9) r/min	(1000 ±10) r/min
润滑油压力:		(172~207) kPa	—
润滑油温度:		(57 ±8) °C	(57 ±8) °C
气缸夹套冷却液温度:		(100 ±2) °C	(100 ±2) °C
吸入空气温度:		(66 ±0.5) °C	(66 ±0.5) °C
喷油器开启压力:		(10.30 ±0.34) MPa	(12.75 ±0.5) MPa
喷油提前角:		13 °	20 °
喷油器流速:		(13 ±0.2) mL/min	90 s ±1.5 s/10 mL 或 180 s ±3 s/20 mL
喷油器冷却温度		(38 ±3) °C	—

附录 B

柴油十六烷值机校准记录格式

共 页 第 页

送校单位				
仪器名称		型号		
制造厂		出厂编号		
客户地址		校准地点		
校准日期		环境温度/℃		
相对湿度/%		大气压/kPa	/	
依据技术文件	JJF (石化) xxx-202x柴油十六烷值机校准规范			
记录编号		证书编号		
校准使用的计量基 (标) 准装置 (含标准物质) / 主要仪器				
名称	测量范围	不确定度/ 准确度等级	证书编号	有效期至

B.1 校准前检查

检查项目	检查结果		
外观检查	是否符合要求: <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否		
校准方法	<input type="checkbox"/> 方法 A <input type="checkbox"/> 方法 B		
条件核查	润滑油温度, °C	气缸夹套冷却液温度, °C	吸入空气温度, °C

B.2 发动机转速误差

仪器设定值 r/min	转速表测定值 r/min						平均值 r/min	转速误差	扩展不确定度 ($k=2$)
	1	2	3	4	5	6			

B.3 柴油十六烷值机示值误差和示值重复性

标准值	手轮或气 量表读数	测定值	平均值	示值误差	扩展不确 定度 ($k=2$)	重复性

校准员: 核验员:

附录 C

柴油十六烷值机校准证书的内页格式

证书编号××××—××××					
校准机构授权说明					
校准的技术依据: JJF (石化) xxx-202x 柴油十六烷值机校准规范					
校准环境条件及地点					
校准地点		环境温度/℃			
相对湿度/%		大气压/kPa			
校准使用的计量（基）标准装置					
名称	测量范围	不确定度/准确度等级/最大允许误差	计量（基）校准证书编号	有效期至	
校准结果					
1 发动机转速误差					
仪器设定值 (r/min)	测定值 (r/min)	转速误差	扩展不确定度 (k=2)		
2 柴油十六烷值机示值误差和示值重复性					
标准值	测定值	平均值	示值误差	扩展不确定度 (k=2)	重复性
备注					

附录 D

柴油十六烷值机示值误差测量结果不确定度评定示例

D.1 校准方法

校准方法见本规范 7.2.3。

D.2 测量模型

柴油十六烷值标准物质的 2 次测量结果的算术平均值与标准物质的标准值之差作为十六烷值机的示值误差，示值误差公式：

$$\Delta X = \bar{X} - X_s \quad (\text{D.1})$$

式中：

ΔX ——十六烷值机示值误差；

\bar{X} —— 2 次十六烷值测量结果的算术平均值；

X_s —— 十六烷值标准物质标准值。

D.3 方差和灵敏系数

$$u_c^2(\Delta X) = \left(\frac{\partial \Delta X}{\partial \bar{X}} \right)^2 u^2(\bar{X}) + \left(\frac{\partial \Delta X}{\partial X_s} \right)^2 u^2(X_s) \quad (\text{D.2})$$

$$\text{灵敏系数: } \frac{\partial \Delta X}{\partial \bar{X}} = 1 \quad \frac{\partial \Delta X}{\partial X_s} = -1$$

D.4 测量不确定度来源分析

十六烷值机示值误差测量不确定度来源包括标准值引入的不确定度分量 $u(X_s)$ 和仪器示值引入的不确定度分量 $u(\bar{X})$ ，其中仪器示值引入的不确定度分量 $u(\bar{X})$ 由测量重复性和手轮读数引入的分量组成。具体来源分析见表 1。

表 1 标准不确定度分量一览表

输入量	不确定度来源	不确定度分量
标准值引入的不确定度 $u(X_s)$	标准物质引入的分量	u_1
仪器示值引入的不确定度 $u(\bar{X})$	测量重复性引入的分量	u_2
	手轮读数引入的分量	u_3

D.5 测量不确定度计算

D.5.1 标准物质引入的不确定度分量 u_1

标准物质证书上可查到标准值的不确定度，以柴油十六烷值标准物质 GBW(E)120035 为例 ($U=2.5$, $k=2$)，则

$$u(X_s)=u_1=\frac{U}{k}=\frac{2.5}{2}=1.25 \quad (\text{D.3})$$

D.5.2 仪器示值引入的不确定度分量 $u(\bar{X})$

D.5.2.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_2

校准时标准物质重复测量 2 次，两次测定十六烷值结果为 52.2 和 51.7，重复性为 0.5，根据 A 类不确定度评定，极差法计算重复性引入的不确定度分量为：

$$u_2=\frac{R}{C\sqrt{n}}=\frac{0.5}{1.13\times 1.414}=0.31 \quad (\text{D.4})$$

D.5.2.2 手轮读数引入的不确定度分量 u_3

校准时标准物质的平均手轮读数为 $a=1527$ ，副标准燃料 $CN_1=49.9$ 的平均手轮读数为 $a_1=1500$ ，副标准燃料 $CN_2=54.5$ 的平均手轮读数为 $a_2=1541$ 。每刻度手轮读数影响十六烷值的量为： $\Delta=(54.5-49.9)/(1541-1500)=0.11$ 。

手轮读数的分辨率为 1 刻度，区间半宽为 $a=0.5$ ，估计服从均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，则：手轮读数引入的不确定度分量 u_3 为：

$$u_3=\Delta\times\frac{a}{k}=0.11\times\frac{0.5}{\sqrt{3}}=0.032 \quad (\text{D.5})$$

D.5.2.3 仪器示值引入的不确定度分量 $u(\bar{X})$

$$u(\bar{X})=\sqrt{u_2^2+u_3^2}=0.31 \quad (\text{D.6})$$

D.6 合成标准不确定度

$$u_c=\sqrt{u^2(\bar{X})+u^2(X_s)}=1.29 \quad (\text{D.7})$$

D.7 扩展不确定度

扩展不确定度 $U=k\cdot u_c$ ，取包含因子 $k=2$ ，则：

$$U=k\cdot u_c=2\times 1.29\approx 2.6, \quad (k=2) \quad (\text{D.8})$$

附录 E

转速误差测量结果不确定度评定示例

E.1 校准方法

校准方法见本规范 7.2.2。

E.2 测量模型

转速误差公式：

$$\Delta R = \frac{R_s - \bar{R}}{\bar{R}} \times 100\% \quad (\text{E.1})$$

式中：

ΔR ——发动机转速的误差，%；

\bar{R} ——转速表6次测量值的算术平均值，r/min；

R_s ——发动机转速设定值，r/min。

E.3 方差和灵敏系数

$$u_c(\Delta R) = \sqrt{c_{(\bar{R})}^2 \cdot u(\bar{R})^2} \quad (\text{E.2})$$

式中：

$$\text{灵敏系数: } c_{(\bar{R})} = \frac{\partial \Delta R}{\partial \bar{R}} = -\frac{R_s}{\bar{R}^2}$$

$u_c(\Delta R)$ ——转速误差的合成标准不确定度；

$u(\bar{R})$ ——输入量 \bar{R} 的标准不确定度，r/min；

E.4 测量不确定度来源分析

发动机转速误差测量不确定度来源包括转速表引入的不确定度分量 u_1 和转速测量重复性 u_2 引入的不确定度分量。

E.5 测量不确定度计算

E.5.1 转速表引入的不确定度分量 u_1

0.5 级转速表最大允许误差为 $\pm 0.5\%$ ，按均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = \frac{0.5\% \times 900}{\sqrt{3}} = 2.6 \text{ r/min} \quad (\text{E.3})$$

E.5.2 测量重复性引入的不确定度分量 u_2

由于校准时要求重复测量 6 次，测量结果分别为 906、904、896、901 和 898、902 (r/min)，平均值为 901 r/min，选择 A 类不确定度评定，用统计分析方法获得试验标准偏差来计算示值重复性引入的不确定度，则：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}{n-1}} \quad (\text{E.4})$$

$$u_2 = \frac{s}{\sqrt{6}} = \frac{3.7}{\sqrt{6}} = 1.5 \text{ r/min} \quad (\text{E.5})$$

u_1 和 u_2 彼此独立不相关，则：

$$u(\bar{R}) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 3.0 \text{ r/min} \quad (\text{E.6})$$

E.6 合成标准不确定度

按照公式 (E.2) 计算合成标准不确定度：

$$u_c(\Delta R) = \sqrt{\left(-\frac{R_s}{R^2}\right)^2 \cdot [u(\bar{R})]^2} = \sqrt{\left(-\frac{900}{901^2}\right)^2 \times 3.0^2} = 0.33\% \quad (\text{E.7})$$

E.7 扩展不确定度

扩展不确定度 $U = k \cdot u_c$ ，取包含因子 $k=2$ ，则：

$$U = k \cdot u_c(\Delta R) = 2 \times 0.33\% \approx 0.7\% \quad (k=2) \quad (\text{E.8})$$