



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 1008—2006

标准齿轮

Master Gears

2006-03-08 发布

2006-07-01 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

标准齿轮检定规程

Verification Regulation of

Master Gears

JJG 1008—2006

本规程经国家质量监督检验检疫总局 2006 年 3 月 8 日批准，并自 2006 年 7 月 1 日起施行。

归口单位：全国几何量长度计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

参加起草单位：中国航空工业第一集团公司第三〇四研究所

本规程委托全国几何量长度计量技术委员会负责解释

本规程主要起草人：

李 锐 （中国计量科学研究院）

张 伟 （中国计量科学研究院）

参加起草人：

崔岩梅 （中国航空工业第一集团公司第三〇四研究所）

目 录

1 范围·····	(1)
2 引用文献·····	(1)
3 术语和符号·····	(1)
4 概述·····	(1)
5 计量性能要求·····	(2)
6 通用技术要求·····	(2)
7 计量器具控制·····	(3)
7.1 检定条件·····	(3)
7.2 检定项目·····	(4)
7.3 检定方法·····	(4)
7.4 检定结果的处理·····	(12)
7.5 检定周期·····	(12)
附录 A 齿轮公差表·····	(13)
附录 B 齿廓倾斜偏差和齿廓形状偏差的计算方法·····	(21)
附录 C 螺旋线倾斜偏差和螺旋线形状偏差的计算方法·····	(22)
附录 D 齿距测量不确定度分析示例·····	(23)
附录 E 径向跳动测量不确定度分析示例·····	(26)

标准齿轮检定规程

1 范围

本规程规定了标准齿轮的检定项目、检定要求和检定方法，适用于标准齿轮的首次检定和后续检定。

齿轮的校准也可以参照本规程进行。

2 引用文献

本规程引用下列文献：

- GB/T 3374—1992 《齿轮基本术语》
- GB/T 10095.1—2001 idt ISO 1328—1: 1997 《渐开线圆柱齿轮 精度 第1部分：轮齿同侧齿面偏差的定义和允许值》
- GB/T 10095.2—2001 idt ISO 1328—2: 1997 《渐开线圆柱齿轮 精度 第2部分：径向综合偏差与径向跳动的定义和允许值》
- GB/T 13924—1992 《渐开线圆柱齿轮精度检验规范》
- GB/Z 18620.1—2002 idt ISO/TR 10064—1: 1996 《圆柱齿轮 检验实施规范 第1部分：轮齿同侧齿面的检验》
- GB/Z 18620.2—2002 idt ISO/TR 10064—2: 1996 《圆柱齿轮 检验实施规范 第2部分：径向综合偏差、径向跳动、齿厚和侧隙的检验》
- JJG 332—2003 齿轮渐开线样板检定规程
- JJG 408—2000 齿轮螺旋线样板检定规程
- 使用本规程时，应注意使用上述引用文献的现行有效版本。

3 术语和符号

3.1 标准齿轮

标准齿轮是用作计量标准器具的渐开线圆柱齿轮，精度等级符合GB/T 10095.1—2001和GB/T 10095.2—2001中（1~5）级的要求。

3.2 本规程涉及的其他术语和符号参照引用文献。

4 概述

4.1 标准齿轮用于确定齿距类测量仪单个齿距偏差和齿距累积总偏差的示值误差，也适用于确定齿轮径向跳动检查仪的径向跳动示值误差。

4.2 标准齿轮还可以用于各种类型齿轮测量仪示值误差的验证。

4.3 标准齿轮用作测量齿轮时，可直接对其他齿轮进行检验。

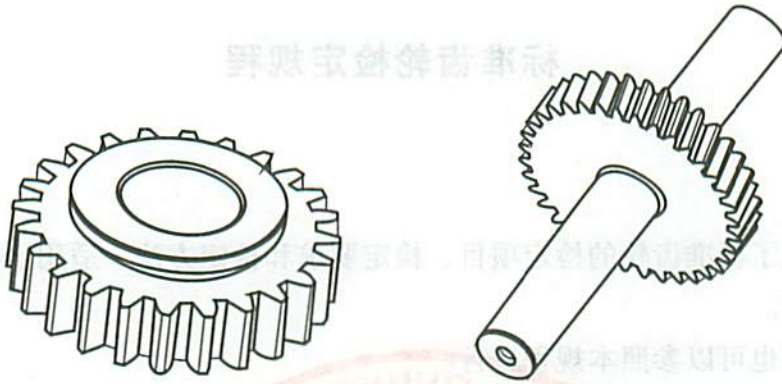


图1 标准齿轮

5 计量性能要求

5.1 稳定性

标准齿轮应稳定可靠，各项检定结果的年变化量均不应大于检定不确定度的 $\frac{2}{3}$ ，否则应缩短检定周期、降级使用或建议不作为标准齿轮使用。

5.2 工作面的表面粗糙度

标准齿轮工作面的表面粗糙度应达到表1的要求。

表1 标准齿轮工作面粗糙度 R_a 要求 μm

控制部位 \ 齿轮精度等级	1	2	3	4	5
中心孔	0.2		0.4		0.4
顶尖孔	0.1		0.1		0.2
齿面	0.4		0.4		0.8

5.3 标准齿轮的精度等级

标准齿轮的精度等级依据单个齿距偏差 f_{pt} 、齿距累积总偏差 F_p 、齿廓总偏差 F_α 、螺旋线总偏差 F_β 、径向跳动 F_r 5 个项目的检定结果，按照附录 A 规定的公差值进行划分。

6 通用技术要求

6.1 标识

6.1.1 标准齿轮上应标明模数、齿数、压力角、螺旋角等设计参数及精度等级。

6.1.2 标准齿轮应将齿序做标记，齿序应按顺时针排列。

6.1.3 标准齿轮应具有生产厂标记、出厂编号。

6.2 外观

标准齿轮的齿面、定位面和连体式齿轮的顶尖孔不应有碰伤、锈蚀及影响其计量性能的其他缺陷。

7 计量器具控制

计量器具控制包括首次检定和后续检定。

7.1 检定条件

7.1.1 环境条件

检定工作环境应没有影响测量的振动、电磁干扰、灰尘和腐蚀性气体。

检定工作场所的环境温度应达到表 2 要求，温度变化率应小于 0.5℃/h，相对湿度小于 70%。标准齿轮在检定前应置于检定场所不少于 8h。

表 2 检定工作环境的温度控制要求

℃

齿轮精度等级 检定项目	1	2	3	4	5
齿距累积总偏差 F_p	20 ± 1.0		20 ± 2.0		
齿廓总偏差 F_a	20 ± 0.5		20 ± 1.0		20 ± 2.0
螺旋线总偏差 F_β	20 ± 0.5		20 ± 1.0		20 ± 2.0
径向跳动 F_r	20 ± 1.0		20 ± 2.0		

7.1.2 检定用设备

检定用设备见表 3。

表 3 标准齿轮检定用设备

齿轮精度等级 检定项目	1	2	3	4	5
齿廓总偏差 F_a	C		C, J, M		
螺旋线总偏差 F_β	C		C, D, L, M		
齿距累积总偏差 F_p	C		C, ZH, M		
单个齿距偏差 f_{pt}	C		C, ZH, M		
径向跳动 F_r	C, M, T				
表面粗糙度 R_a	CC, CY				

注：a) 表中 C 代表齿轮测量中心，J 代表渐开线检查仪，L 代表螺旋线检查仪，D 代表导程仪，M 代表坐标测量机，ZH 代表齿距检查仪，T 代表径向跳动检查仪，CC 代表粗糙度测量仪，CY 代表粗糙度样板。

b) 当能够确定最大允许误差满足表 4 的要求时，可以使用其他测量设备进行检定。

检定用设备的最大允许误差应满足表 4 的要求。

表 4 检定用设备的最大允许误差要求

检定项目 \ 齿轮精度等级	μm				
	1	2	3	4	5
单个齿距偏差 f_{pt}	±(0.6~0.9)		±(1.0~1.5)		±2.0
齿距累积总偏差 F_p	±(1.2~1.5)		±(1.6~2.0)		±2.5
齿廓总偏差 F_a	±(0.6~0.9)		±(1.0~1.2)		±1.5
螺旋线总偏差 $F_β$	±(0.8~1.1)		±(1.2~1.5)		±2.0
径向跳动 F_r	±1.0		±1.5		±2.0

7.1.3 测量安装

标准齿轮的测量安装优先选用锥度心轴，锥度心轴的锥度和径向跳动应小于或等于表 5 的要求。

表 5 锥度和径向圆跳动要求

项 目 \ 齿轮精度等级					
	1	2	3	4	5
锥度心轴的径向圆跳动	0.5μm		1.0μm		2.0μm
锥度心轴的锥度	1: 25000		1: 20000		1: 10000

当不使用锥度心轴安装定位时，应使用标准齿轮的定位基面安装定位。

当测量仪器具有安装误差修正功能时，可选择使用适当的方式修正安装误差。

7.2 检定项目

标准齿轮的检定项目列于表 6。

表 6 标准齿轮的检定项目

检定项目	首次检定	后续检定
稳定性	-	+
表面粗糙度 R_a	+	-
单个齿距偏差 f_{pt}		+
齿距累积总偏差 F_p	+	+
齿廓总偏差 F_a	+	+
螺旋线总偏差 $F_β$	+	+
径向跳动 F_r	+	+

注：“+”表示必须检定项目，“-”表示可不检项目。

7.3 检定方法

7.3.1 外观

目力观察。

7.3.2 工作面粗糙度

齿面、中心安装孔表面的粗糙度用粗糙度测量仪或用粗糙度比较样块比较检查；顶尖孔工作面的粗糙度用粗糙度比较样块比较检查。

7.3.3 单个齿距偏差和齿距累积总偏差

7.3.3.1 测头的选用

在确保不发生干涉的情况下，宜选择直径较大的测头。

7.3.3.2 测量位置的确定

齿距偏差应在齿轮的分度圆柱、齿宽中间位置的端平面上对左、右齿面进行测量；变位齿轮应在工作圆进行测量，单侧齿面工作的齿轮只测工作齿面。

7.3.3.3 检定方法

齿距偏差的检定方法分直接法和相对法。

使用直接法测量时，测头在齿宽中部端截面上分度圆（变位齿轮为工作圆）位置与齿面接触，测量时以圆分度装置定位，测头读取齿面在圆周切向上的位置变化量；或是以测头定位，由角度传感器读取齿面实际位置与齿面的理论位置之差，再经计算得到齿距偏差。

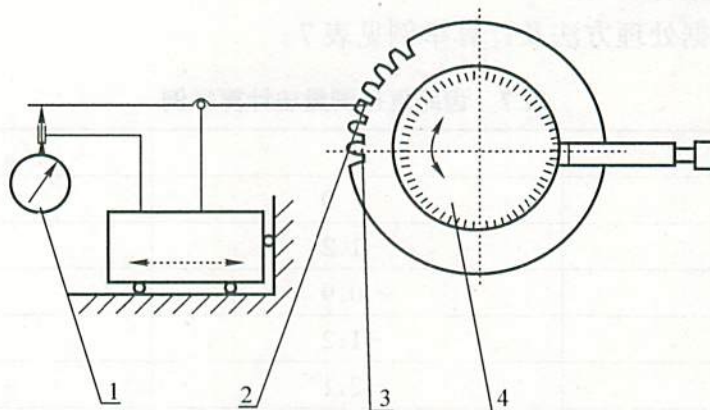


图2 直接法测量齿距

1—指示表；2—测量头；3—被测齿轮；4—测角传感器

使用相对法测量时，两测头与齿面的接触点应位于齿高中部同一圆柱面上，且两测头与齿面的夹角应一致，测头的探测方向应为端平面内齿轮的切线方向。测量时一测头用于圆周位置的定位，另一测头读取两相邻同侧齿面的相对位置变化量。

无论采用直接测量法或是相对测量法，当测量一周后，测头读数均应回零。对于3级及3级以上标准齿轮，测头回零时误差不得大于 $0.2\mu\text{m}$ ，对于4级以下标准齿轮，测头回零时误差不得大于 $0.5\mu\text{m}$ ，不满足此要求时，需重新进行测量。

7.3.3.4 数据处理

齿距偏差 f_{pt} 和齿距累积总偏差 F_p 应在被测齿轮分度圆切线方向计值，在其他方向测量时，应将测得值换算到分度圆切线方向，如果齿距偏差的测量方向是在基圆的切线方向，换算到分度圆切线方向的计算公式为：

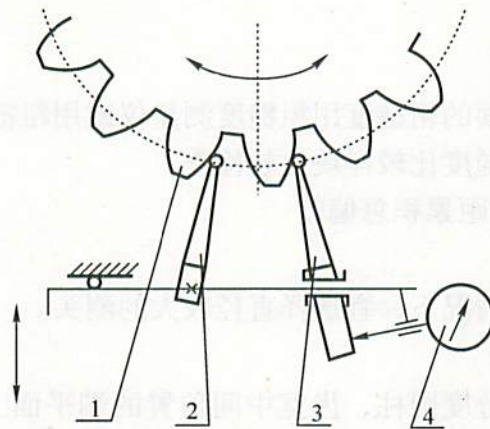


图3 相对法测量齿距

1—被测齿轮；2—定位侧头；3—活动侧头；4—指示表

$$F_{pi} = p_i / \cos \alpha_t \quad (1)$$

式中： F_{pi} ——计算后得到的齿距偏差值；

p_i ——在基圆的切线方向读出的齿距偏差值；

α_t ——被测齿轮的端面压力角。

a) 直接法测量数据处理

直接法测量数据处理方法及计算举例见表7。

表7 齿距直接测量法计算举例

μm

齿序	F_{pi}	$f_{pi} = F_{pi} - F_{pi-1}$
1	0	-0.6
2	-1.2	-1.2
3	-0.9	0.3
4	-1.2	-0.3
5	-2.1	-0.9
6	-2.4	-0.3
7	-1.8	0.6
8	-0.9	0.9
9	0.6	1.5
10	0.3	-0.3
11	1.2	0.9
12	1.5	0.3
13	2.7	1.2
14	3.3	0.6
15	2.4	-0.9
16	1.5	-0.9
17	1.5	0
18	0.6	-0.9

直接法测量读数 F_{pi} 的最大变化量即为齿距累积总偏差 F_p ，单个齿距偏差为将读数 F_{pi} 的后项减去前项所得数值，取全部数据中绝对值最大者，保留原符号，作为 f_{pt} 的检定结果。

$$\text{例中, } F_p = F_{p\max} - F_{p\min} = 3.3 - (-2.4) = 5.7\mu\text{m}$$

$$f_{pt} = 1.5\mu\text{m}$$

b) 相对测量法数据处理

相对测量法及计算举例见表 8。

表 8 齿距相对测量法计算举例 μm

齿序	读数 f_{pi}	单个齿距偏差 f_{pti} ($f_{pti} = f_{pi} - f_{pi\text{平均}}$)	齿距累积偏差 F_{pi} ($F_{pi} = \sum_{j=1}^i f_{ptj}$)
1	0	-0.6	-0.6
2	-0.6	-1.2	-1.8
3	0.9	0.3	-1.5
4	0.3	-0.3	-1.8
5	-0.3	-0.9	-2.7
6	0.3	-0.3	-3.0
7	1.2	0.6	-2.4
8	1.5	0.9	-1.5
9	2.1	1.5	0
10	0.3	-0.3	-0.3
11	1.5	0.9	0.6
12	0.9	0.3	0.9
13	1.8	1.2	2.1
14	1.2	-0.6	2.7
15	-0.3	-0.9	1.8
16	-0.3	-0.9	0.9
17	0.6	0	0.9
18	-0.3	-0.9	0
	平均值 $f_{pi\text{平均}} = 0.6$		$F_p = F_{p\max} - F_{p\min} = 5.7$

将读数 f_{pi} 列表后，首先计算读数的平均值 $f_{pi平均}$ ，将读数 f_{pi} 分别减去平均值 $f_{pi平均}$ ，得到单个齿距偏差 f_{pti} ，其中绝对值最大者，保留原符号，作为 f_{pt} 的检定结果。

由 1 号齿开始，将单个齿距偏差 f_{pt} 进行代数累加，得到对应齿的齿距累积偏差 F_{pi} ，齿距累积偏差的最大变化量即为齿距累积总偏差检定值 F_p 。

例中， $F_p = F_{pimax} - F_{pimin} = 2.7 - (-3.0) = 5.7\mu\text{m}$

$$f_{pt} = 1.5\mu\text{m}$$

c) 测量数据差异的处理

同一齿轮在使用直接法和相对法测量而数据出现差异时，以直接法检定的数据为准。

7.3.4 齿廓总偏差

7.3.4.1 测头的选用

选择测头时应注意：①测头不与齿根干涉；②测杆具有足够的刚度，且不与齿面干涉；③测头与齿面的接触点应位于基圆柱切平面上，位置误差不大于 0.02mm；④使用展成法测量时，为使测量包含整个齿高范围，必要时应使用接长测头。

7.3.4.2 测量位置的确定

齿廓偏差项目应在齿宽中部对齿轮沿圆周均布的四个齿的左右侧齿面进行测量，被测量的齿廓应包括全部有效工作范围。

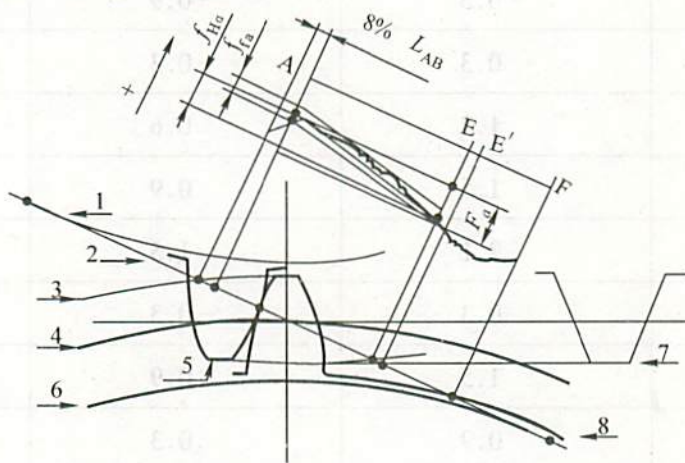


图 4 齿轮的有效工作范围

- 1—配对齿轮基圆；2—啮合线；3—被测齿轮顶圆；4—被测齿轮工作圆；
- 5—配对齿轮顶圆；6—被测齿轮基圆；7—配对齿条齿顶；8—被测齿轮根圆

有效工作范围的计算方法如下：

a) 在没有特殊说明的情况下，标准齿轮的有效啮合展开长度 L_{AE} （对应有效工作齿廓）按照与基本齿条啮合计算，计算公式为：

$$L_{AE} = \sqrt{r_a^2 - r_b^2} - \sqrt{r^2 - r_b^2} + \frac{(h_a - x_n)m_n}{\sin\alpha_t} \quad (2)$$

式中： r_a ——顶圆半径；

r_b ——基圆半径；

r ——分度圆半径；

h_a ——齿顶高系数；

x_n ——法向变位系数；

m_n ——法向模数；

α_t ——端面压力角。

工作部分起始点的展开长度 L_E 的计算公式为：

$$L_E = \sqrt{r^2 - r_b^2} - \frac{(h_a + x_n) m_n}{\sin \alpha_t} \quad (3)$$

b) 当标准齿轮工作齿高不能满足与基本齿条啮合的工作范围时，可以按照与其自身参数相同的齿轮啮合计算有效啮合的展开长度 L_{AE} ，其计算公式为：

$$L_{AE} = 2 \left(\sqrt{r_a^2 - r_b^2} - r_w \sin \alpha_{ut} \right) \quad (4)$$

式中： r_w ——工作圆半径；

α_{ut} ——工作圆端面压力角。

工作部分起始点的展开长度 L_E 的计算公式为：

$$L_E = 2 r_w \sin \alpha_{ut} - \sqrt{r_a^2 - r_b^2} \quad (5)$$

c) 当标准齿轮属于有特定配对齿轮的测量齿轮时，可以按照配对齿轮计算有效啮合的展开长度 L_{AE} ，计算公式为：

$$L_{AE} = \sqrt{r_{a1}^2 - r_{b1}^2} + \sqrt{r_{a2}^2 - r_{b2}^2} - a_w \sin \alpha_{ut} \quad (6)$$

工作部分起始点的展开长度 L_E 的计算公式为：

$$L_E = a_w \sin \alpha_{ut} - \sqrt{r_{a2}^2 - r_{b2}^2} \quad (7)$$

式中： r_{a1} ， r_{b1} ——被测标准齿轮顶圆和基圆半径；

r_{a2} ， r_{b2} ——配对齿轮齿顶圆和基圆半径；

a_w ——工作中心距。

对于齿宽大于 60mm 的齿轮，应至少测量上、中、下三个截面，上、下截面各距上、下端约 15% 齿宽。单侧齿面工作的齿轮只检验工作侧齿面。

7.3.4.3 检定方法

齿廓偏差的检定方法可分为展成法和坐标法。

使用展成法检定齿廓偏差时，将标准齿轮安装在仪器上，调整仪器的径向拖架到齿轮的设计基圆位置，使测头与被测齿面接触，从齿根向齿顶方向在齿廓的有效工作范围内进行检定，传感器采集齿廓偏差量，记录器将齿廓偏差绘制成偏差曲线。检定按所选定的齿序在左右齿面依次进行。

使用坐标法检定齿廓偏差时，将齿轮的相关设计参数输入控制软件菜单，选定被测齿和测量范围（范围见下节），启动控制软件对齿廓偏差进行检定，由输出设备获得偏

差曲线及评价结果。

7.3.4.4 齿廓总偏差的取值

a) 齿廓偏差在齿高有效工作范围内（即齿廓偏差曲线有效测量长度内）计值，误差的计值方向为端截面齿廓曲线的法向；

b) 从齿顶起始部分占有有效测量长度 8% 范围内，若齿廓偏差呈负值，则偏差可放大到允许值的 3 倍；

c) 在测量的各齿廓曲线中以测得的最大齿廓偏差作为检定结果；

d) 对于设计齿廓，偏差曲线应位于设计齿廓公差带范围内。

7.3.5 螺旋线总偏差

7.3.5.1 测头的选择

在确保不发生干涉的情况下，宜选用直径较大的测头。

7.3.5.2 测量位置的确定

螺旋线偏差应在分度圆（变位齿轮为工作圆）上对齿轮沿圆周均布的 4 个齿的左、右侧齿面的全齿宽进行测量，单侧齿面工作的齿轮只测工作侧齿面。

7.3.5.3 检定方法

螺旋线偏差测量应在基圆切平面进行，测头沿基圆的切线方向调整至分度圆（变位齿轮为工作圆）位置，测头的探测方向是在齿面的法线方向。测量时测头沿齿面螺旋线的测量位置由下向上运动，传感器采集螺旋线偏差量，记录器将螺旋线偏差绘制成偏差曲线。检定按所选定的齿序在左右齿面依次进行。

使用展成法测量的仪器在调整时需修正仪器在径向的定位误差，修正的方法是使用齿轮渐开线样板确定仪器基圆半径测量误差，在调整仪器径向测量位置时对此误差予以修正，详细步骤参见 JJG 408—2000 齿轮螺旋线样板检定规程；

导程式仪器基圆刻尺读数应调整为标准齿轮的基圆数值，切向刻尺读数应为分度圆上的展开长，展开长 L 的计算式为：

$$L = r_b \tan \alpha_{ur} \quad (8)$$

式中： r_b ——基圆半径；

α_{ur} ——工作圆端面压力角。

数控式仪器在检定螺旋线偏差时，将齿轮的相关设计参数输入控制软件菜单，选定被测齿和测量范围，启动控制软件对螺旋线偏差进行检定，由输出设备获得偏差曲线及评价结果。

7.3.5.4 螺旋线偏差的取值

a) 螺旋线偏差在全齿宽范围内计值，其中靠近两端面 5% 齿宽范围内（或一个模数范围内，取其较小者）偏向齿体内的偏差可以放大到规定公差的 3 倍。偏差的计值方向为端截面齿廓曲线的法向；

b) 在所测量的各齿曲线中以测得的最大螺旋线偏差作为检定结果；

c) 对于设计齿向线，螺旋线偏差曲线应位于设计齿向线公差带范围内。

7.3.6 径向跳动

7.3.6.1 测头的选择

采用双面接触法测量时,应选择适当的测头直径使其在分度圆(变位齿轮为工作圆)与左右齿面同时接触。

测头最佳直径的计算公式为:

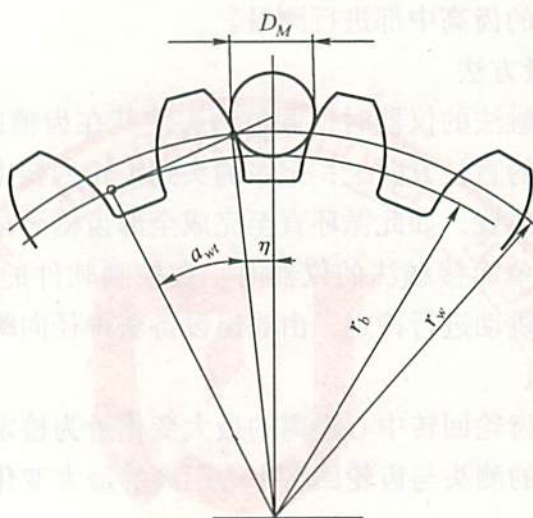


图5 测球直径的计算

$$\text{对于外齿轮: } D_M = \frac{d_w \sin \eta}{\cos(\alpha_{wt} + \eta)} \cos \beta_b \quad (9)$$

式中: D_M ——最佳测头的直径;

d_w ——工作圆(节圆)直径;

η ——在端平面内测头与两齿面接触点所夹向心角的一半,近似计算时,可以取 $\eta = 90/z$;

β_b ——基圆螺旋角;

α_{wt} ——工作圆端面压力角。

$$\cos \alpha_{wt} = \frac{r \cos \alpha_t}{r_w} = \frac{z}{z + 2x} \cdot \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \quad (10)$$

式中: z ——被测齿轮齿数;

x ——变位系数;

β ——分度圆螺旋角。

当不能使用最佳直径的测头时,可在标准系列中选择相近的测头,但应注意当所选用的测头与最佳测头相差过大时会引起测量数值的变化,必要时应予以修正*。

*注:由于修正计算的繁琐,可以对修正作如下处理:当测头直径比最佳直径小时,在齿廓偏差和螺旋线偏差的影响下径向跳动的变化会更为灵敏,此时不需要对径向跳动偏差测得值进行修正;当测头直径比最佳测头大时,径向跳动偏差测得值有可能减小10%或更多,此时需将测得值增加10%。

采用单面接触法测量时，应选择直径较小的测头，确保测头在工作圆上与齿面单面接触。

为减小齿廓偏差和螺旋线偏差对径向跳动测量的影响，测量应使用球形测头。在特殊需要时可以选用测量砧、棱柱体或锥形测头。

7.3.6.2 测量位置的确定

径向跳动在全部齿槽的齿高中部进行测量。

7.3.6.3 径向跳动的测量方法

使用径跳仪等双面接触法的仪器时，调整测头使其在齿槽内与双侧齿面同时接触，测头的探测方向应在齿轮的直径方向上；记录测头到齿轮回转中心的相对距离后，退出测头使下一齿槽进入测量位置，如此循环直至完成全部齿槽测量。

使用齿轮测量中心等单面接触法的仪器时，在控制软件的菜单中输入相关设计参数，启动控制软件对径向跳动进行检定，由输出设备获得径向跳动曲线及评价结果。

7.3.6.4 径向跳动的取值

双面接触法取测头与齿轮回转中心距离的最大变化量为检定结果。

单面接触法取计算出的测头与齿轮回转中心距离的最大变化量为检定结果。

7.4 检定结果的处理

标准齿轮精度等级的判定按照本规程 5.3 条的规定进行。

当标准齿轮因磨损、磕碰、划伤、锈蚀等原因而不能达到原有精度等级时，允许降低精度等级使用。

按本规程的规定，检定合格的标准齿轮出具检定证书；检定不合格的出具检定结果通知书，注明不合格项目。

检定证书应包含以下内容：

- a) 检定时环境条件；
- b) 检定项目的检定结果；
- c) 检定项目的偏差曲线；偏差曲线必须注明放大倍率，放大倍率在偏差方向选用 1000:1，当 1000:1 放大倍率不适用时可以使用其他倍率。非偏差方向根据需要选用 1:1；2:1；4:1；5:1 或 10:1 放大倍率；
- d) 检定的技术依据；
- e) 检定所用设备；
- f) 检定结果的不确定度；
- g) 检定时间及证书有效期；
- h) 所用锥度心轴的信息：自带心轴或心轴的标准器编号；
- i) 标准齿轮的精度等级。

7.5 检定周期

检定周期一般不超过 1 年。

经连续三个周期以上检定证明标准齿轮数据稳定时，后续检定周期延长为 2 年。

附录 A

齿轮公差表

表 A1 单个齿距极限偏差 $\pm f_{pt}$ μm

分度圆直径 d/mm	法向模数 m_n/mm	精度等级							
		0	1	2	3	4	5	6	7
$20 < d \leq 50$	$0.5 \leq m_n \leq 2$	0.9	1.2	1.8	2.5	3.5	5.0	7.0	10.0
	$2 < m_n \leq 3.5$	1.0	1.4	1.9	2.7	3.9	5.5	7.5	11.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	1.1	1.5	2.1	3.0	4.3	6.0	8.5	12.0
	$6 < m_n \leq 10$	1.2	1.7	2.5	3.5	4.9	7.0	10.0	14.0
$50 < d \leq 125$	$0.5 \leq m_n \leq 2$	0.9	1.3	1.9	2.7	3.8	5.5	7.5	11.0
	$2 < m_n \leq 3.5$	1.0	1.5	2.1	2.9	4.1	6.0	8.5	12.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	1.1	1.6	2.3	3.2	4.6	6.5	9.0	13.0
	$6 < m_n \leq 10$	1.3	1.8	2.6	3.7	5.0	7.5	10.0	15.0
	$10 < m_n \leq 16$	1.6	2.2	3.1	4.4	6.5	9.0	13.0	18.0
	$16 < m_n \leq 25$	2.0	2.8	3.9	5.5	8.0	11.0	16.0	22.0
$125 < d \leq 280$	$0.5 \leq m_n \leq 2$	1.1	1.5	2.1	3.0	4.2	6.0	8.5	12.0
	$2 < m_n \leq 3.5$	1.1	1.6	2.3	3.2	4.6	6.5	9.0	13.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	1.2	1.8	2.5	3.5	5.0	7.0	10.0	14.0
	$6 < m_n \leq 10$	1.4	2.0	2.8	4.0	5.5	8.0	11.0	16.0
	$10 < m_n \leq 16$	1.7	2.4	3.3	4.7	6.5	9.5	13.0	19.0
	$16 < m_n \leq 25$	2.1	2.9	4.1	6.0	8.0	12.0	16.0	23.0
	$25 < m_n \leq 40$	2.7	3.8	5.5	7.5	11.0	15.0	21.0	30.0

表 A2 齿距累积总公差 F_p μm

分度圆直径 d/mm	法向模数 m_n/mm	精度等级							
		0	1	2	3	4	5	6	7
$20 < d \leq 50$	$0.5 \leq m_n \leq 2$	2.5	3.6	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0
	$2 < m_n \leq 3.5$	2.6	3.7	5.0	7.5	10.0	15.0	21.0	30.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	2.7	3.9	5.5	7.5	11.0	15.0	22.0	31.0
	$6 < m_n \leq 10$	2.9	4.1	6.0	8.0	12.0	16.0	23.0	33.0
$50 < d \leq 125$	$0.5 \leq m_n \leq 2$	3.3	4.6	6.5	9.0	13.0	18.0	26.0	37.0
	$2 < m_n \leq 3.5$	3.3	4.7	6.5	9.5	13.0	19.0	27.0	38.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	3.4	4.9	7.0	9.5	14.0	19.0	28.0	39.0
	$6 < m_n \leq 10$	3.6	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0	41.0
	$10 < m_n \leq 16$	3.9	5.5	7.5	11.0	15.0	22.0	31.0	44.0
	$16 < m_n \leq 25$	4.3	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0	48.0
$125 < d \leq 280$	$0.5 \leq m_n \leq 2$	4.3	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	35.0	49.0
	$2 < m_n \leq 3.5$	4.4	6.0	9.0	12.0	18.0	25.0	35.0	50.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	4.5	6.5	9.0	13.0	18.0	25.0	36.0	51.0
	$6 < m_n \leq 10$	4.7	6.5	9.5	13.0	19.0	26.0	37.0	53.0
	$10 < m_n \leq 16$	4.9	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0	39.0	56.0
	$16 < m_n \leq 25$	5.5	7.5	11.0	15.0	21.0	30.0	43.0	60.0
	$25 < m_n \leq 40$	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0	47.0	67.0

表 A3 齿廓总公差 F_α μm

分度圆直径 d/mm	法向模数 m_n/mm	精度等级							
		0	1	2	3	4	5	6	7
$20 < d \leq 50$	$0.5 \leq m_n \leq 2$	0.9	1.3	1.8	2.6	3.6	5.0	7.5	10.0
	$2 < m_n \leq 3.5$	1.3	1.8	2.5	3.6	5.0	7.0	10.0	14.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	1.6	2.2	3.1	4.4	6.0	9.0	12.0	18.0
	$6 < m_n \leq 10$	1.9	2.7	3.8	5.5	7.5	11.0	15.0	22.0
$50 < d \leq 125$	$0.5 \leq m_n \leq 2$	1.0	1.5	2.1	2.9	4.1	6.0	8.5	12.0
	$2 < m_n \leq 3.5$	1.4	2.0	2.8	3.9	5.5	8.0	11.0	16.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	1.7	2.4	3.4	4.8	6.5	9.5	13.0	19.0
	$6 < m_n \leq 10$	2.0	2.9	4.1	6.0	8.0	12.0	16.0	23.0
	$10 < m_n \leq 16$	2.5	3.5	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0
	$16 < m_n \leq 25$	3.0	4.2	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0
$125 < d \leq 280$	$0.5 \leq m_n \leq 2$	1.2	1.7	2.4	3.5	4.9	7.0	10.0	14.0
	$2 < m_n \leq 3.5$	1.6	2.2	3.2	4.5	6.5	9.0	13.0	18.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	1.9	2.6	3.7	5.5	7.5	11.0	15.0	21.0
	$6 < m_n \leq 10$	2.2	3.2	4.5	6.5	9.0	13.0	18.0	25.0
	$10 < m_n \leq 16$	2.7	3.8	5.5	7.5	11.0	15.0	21.0	30.0
	$16 < m_n \leq 25$	3.2	4.5	6.5	9.0	13.0	18.0	25.0	36.0
	$25 < m_n \leq 40$	3.8	5.5	7.5	11.0	15.0	22.0	31.0	43.0

表 A4 齿廓形状公差 f_{α}

μm

分度圆直径 d/mm	法向模数 m_n/mm	精度等级							
		0	1	2	3	4	5	6	7
$20 < d \leq 50$	$0.5 \leq m_n \leq 2$	0.7	1.0	1.4	2.0	2.8	4.0	5.5	8.0
	$2 < m_n \leq 3.5$	1.0	1.4	2.0	2.8	3.9	5.5	8.0	11.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	1.2	1.7	2.4	3.4	4.8	7.0	9.5	14.0
	$6 < m_n \leq 10$	1.5	2.1	3.0	4.2	6.0	8.5	12.0	17.0
$50 < d \leq 125$	$0.5 \leq m_n \leq 2$	0.8	1.1	1.6	2.3	3.2	4.5	6.5	9.0
	$2 < m_n \leq 3.5$	1.1	1.5	2.1	3.0	4.3	6.0	8.5	12.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	1.3	1.8	2.6	3.7	5.0	7.5	10.0	15.0
	$6 < m_n \leq 10$	1.6	2.2	3.2	4.5	6.5	9.0	13.0	18.0
$125 < d \leq 280$	$10 < m_n \leq 16$	1.9	2.7	3.9	5.5	7.5	11.0	15.0	22.0
	$16 < m_n \leq 25$	2.3	3.3	4.7	6.5	9.5	13.0	19.0	26.0
	$0.5 \leq m_n \leq 2$	0.9	1.3	1.9	2.7	3.8	5.5	7.5	11.0
	$2 < m_n \leq 3.5$	1.2	1.7	2.4	3.4	4.9	7.0	9.5	14.0
$125 < d \leq 280$	$3.5 < m_n \leq 6$	1.4	2.0	2.9	4.1	6.0	8.0	12.0	16.0
	$6 < m_n \leq 10$	1.7	2.4	3.5	4.9	7.0	10.0	14.0	20.0
	$10 < m_n \leq 16$	2.1	2.9	4.0	6.0	8.5	12.0	17.0	23.0
	$16 < m_n \leq 25$	2.5	3.5	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0
$125 < d \leq 280$	$25 < m_n \leq 40$	3.0	4.2	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0

表 A5 齿廓倾斜极限偏差 $\pm f_{H\alpha}$ μm

分度圆直径 d/mm	法向模数 m_n/mm	精度等级							
		0	1	2	3	4	5	6	7
$20 < d \leq 50$	$0.5 \leq m_n \leq 2$	0.6	0.8	1.2	1.6	2.3	3.3	4.6	6.5
	$2 < m_n \leq 3.5$	0.8	1.1	1.6	2.3	3.2	4.5	6.5	9.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	1.0	1.4	2.0	2.8	3.9	5.5	8.0	11.0
	$6 < m_n \leq 10$	1.2	1.7	2.4	3.4	4.8	7.0	9.5	14.0
$50 < d \leq 125$	$0.5 \leq m_n \leq 2$	0.7	0.9	1.3	1.9	2.6	3.7	5.5	7.5
	$2 < m_n \leq 3.5$	0.9	1.2	1.8	2.5	3.5	5.0	7.0	10.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	1.1	1.5	2.1	3.0	4.3	6.0	8.5	12.0
	$6 < m_n \leq 10$	1.3	1.8	2.6	3.7	5.0	7.5	10.0	15.0
	$10 < m_n \leq 16$	1.6	2.2	3.1	4.4	6.5	9.0	13.0	18.0
	$16 < m_n \leq 25$	1.9	2.7	3.8	5.5	7.5	11.0	15.0	21.0
$125 < d \leq 280$	$0.5 \leq m_n \leq 2$	0.8	1.1	1.6	2.2	3.1	4.4	6.0	9.0
	$2 < m_n \leq 3.5$	1.0	1.4	2.0	2.8	4.0	5.5	8.0	11.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	1.2	1.7	2.4	3.3	4.7	6.5	9.5	13.0
	$6 < m_n \leq 10$	1.4	2.0	2.8	4.0	5.5	8.0	11.0	16.0
	$10 < m_n \leq 16$	1.7	2.4	3.4	4.8	6.5	9.5	13.0	19.0
	$16 < m_n \leq 25$	2.0	2.8	4.0	5.5	8.0	11.0	16.0	23.0
	$25 < m_n \leq 40$	2.4	3.4	4.8	7.0	9.5	14.0	19.0	27.0

表 A6 螺旋线总公差 F_p μm

分度圆直径 d/mm	法向模数 m_n/mm	精度等级							
		0	1	2	3	4	5	6	7
$20 < d \leq 50$	$4 \leq b \leq 10$	1.1	1.6	2.2	3.2	4.5	6.5	9.0	13.0
	$10 < b \leq 20$	1.3	1.8	2.5	3.6	5.0	7.0	10.0	14.0
	$20 < b \leq 40$	1.4	2.0	2.9	4.1	5.5	8.0	11.0	16.0
	$40 < b \leq 80$	1.7	2.4	3.4	4.8	6.5	9.5	13.0	19.0
	$80 < b \leq 160$	2.0	2.9	4.1	5.5	8.0	11.0	16.0	23.0
$50 < d \leq 125$	$4 \leq b \leq 10$	1.2	1.7	2.4	3.3	4.7	6.5	9.5	13.0
	$10 < b \leq 20$	1.3	1.9	2.6	3.7	5.5	7.5	11.0	15.0
	$20 < b \leq 40$	1.5	2.1	3.0	4.2	6.0	8.5	12.0	17.0
	$40 < b \leq 80$	1.7	2.5	3.5	4.9	7.0	10.0	14.0	20.0
	$80 < b \leq 160$	2.1	2.9	4.2	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0
$125 < d \leq 280$	$4 \leq b \leq 10$	1.3	1.8	2.5	3.6	5.0	7.0	10.0	14.0
	$10 < b \leq 20$	1.4	2.0	2.8	4.0	5.5	8.0	11.0	16.0
	$20 < b \leq 40$	1.6	2.2	3.2	4.5	6.5	9.0	13.0	18.0
	$40 < b \leq 80$	1.8	2.6	3.6	5.0	7.5	10.0	15.0	21.0
	$80 < b \leq 160$	2.2	3.1	4.3	6.0	8.5	12.0	17.0	25.0

表 A7 螺旋线形状公差 f_{IP} 和螺旋线倾斜极限偏差 $\pm f_{\text{IP}}$ μm

分度圆直径 d/mm	法向模数 m_n/mm	精度等级							
		0	1	2	3	4	5	6	7
$20 < d \leq 50$	$4 \leq b \leq 10$	0.8	1.1	1.6	2.3	3.2	4.5	6.5	9.0
	$10 < b \leq 20$	0.9	1.3	1.8	2.5	3.6	5.0	7.0	10.0
	$20 < b \leq 40$	1.0	1.4	2.0	2.9	4.1	6.0	8.0	12.0
	$40 < b \leq 80$	1.2	1.7	2.4	3.4	4.8	7.0	9.5	14.0
	$80 < b \leq 160$	1.4	2.0	2.9	4.1	6.0	8.0	12.0	16.0
$50 < d \leq 125$	$4 \leq b \leq 10$	0.8	1.2	1.7	2.4	3.4	4.8	6.5	9.5
	$10 < b \leq 20$	0.9	1.3	1.9	2.7	3.8	5.5	7.5	11.0
	$20 < b \leq 40$	1.1	1.5	2.1	3.0	4.3	6.0	8.5	12.0
	$40 < b \leq 80$	1.2	1.8	2.5	3.5	5.0	7.0	10.0	14.0
	$80 < b \leq 160$	1.5	2.1	3.0	4.2	6.0	8.5	12.0	17.0
$125 < d \leq 280$	$4 \leq b \leq 10$	0.9	1.3	1.8	2.5	3.6	5.0	7.0	10.0
	$10 < b \leq 20$	1.0	1.4	2.0	2.8	4.0	5.5	8.0	11.0
	$20 < b \leq 40$	1.1	1.6	2.2	3.2	4.5	6.5	9.0	13.0
	$40 < b \leq 80$	1.3	1.8	2.6	3.7	5.0	7.5	10.0	15.0
	$80 < b \leq 160$	1.5	2.2	3.1	4.4	6.0	8.5	12.0	17.0

表 A8 径向跳动公差 F_r μm

分度圆直径 d/mm	法向模数 m_n/mm	精度等级							
		0	1	2	3	4	5	6	7
$20 < d \leq 50$	$0.5 \leq m_n \leq 2$	2.0	3.0	4.0	5.5	8.0	11	16	23
	$2 < m_n \leq 3.5$	2.0	3.0	4.0	6.0	8.5	12	17	24
	$3.5 < m_n \leq 6$	2.0	3.0	4.5	6.0	8.5	12	17	25
	$6 < m_n \leq 10$	2.5	3.5	4.5	6.5	9.5	13	19	26
$50 < d \leq 125$	$0.5 \leq m_n \leq 2$	2.5	3.5	5.0	7.5	10	15	21	29
	$2 < m_n \leq 3.5$	2.5	4.0	5.5	7.5	11	15	21	30
	$3.5 < m_n \leq 6$	3.0	4.0	5.5	8.0	11	16	22	31
	$6 < m_n \leq 10$	3.0	4.0	6.0	8.0	12	16	23	33
	$10 < m_n \leq 16$	3.0	4.5	6.0	9.0	12	18	25	35
	$16 < m_n \leq 25$	3.5	5.0	7.0	9.5	14	19	27	39
$125 < d \leq 280$	$0.5 \leq m_n \leq 2$	3.5	5.0	7.0	10	14	20	28	39
	$2 < m_n \leq 3.5$	3.5	5.0	7.0	10	14	20	28	40
	$3.5 < m_n \leq 6$	3.5	5.0	7.0	10	14	20	29	41
	$6 < m_n \leq 10$	3.5	5.5	7.5	11	15	21	30	42
	$10 < m_n \leq 16$	4.0	5.5	8.0	11	16	22	32	45
	$16 < m_n \leq 25$	4.5	6.0	8.5	12	17	24	34	48
	$25 < m_n \leq 40$	4.5	6.5	9.5	13	19	27	36	54

附录 B

齿廓倾斜偏差和齿廓形状偏差的计算方法

作为精度等级判定的依据，只需对齿廓总偏差 F_a 进行判断。

根据需要，可以按照定义由齿廓总偏差 F_a 求得齿廓倾斜偏差 $f_{H\alpha}$ 和齿廓形状偏差 $f_{H\beta}$ ，如果检定设备不带有自动处理齿廓倾斜偏差和齿廓形状偏差的计算机数据处理系统，则需要对数据进行人工处理。

以齿廓总偏差曲线为依据，作有效评价范围内所有检定数据的最小二乘中线（即平均齿廓线），此中线在有效评价范围两端齿廓偏差坐标最大值与最小值之间代数差即为齿廓倾斜偏差。

作两条上述最小二乘中线的平行线，使其在有效评价范围内包容齿廓总偏差曲线，这两条平行线在齿廓偏差方向的坐标距离即为齿廓形状偏差。



螺旋线倾斜偏差和螺旋线形状偏差的计算方法

作为精度等级判定的依据，只需对螺旋线总偏差 F_{β} 进行判断。

根据需要，可以按照定义由螺旋线总偏差 F_{β} 求得螺旋线倾斜偏差 f_{Hp} 和螺旋线形状偏差 f_{β} ，如果检定设备不带有自动处理螺旋线倾斜偏差和螺旋线形状偏差的计算机数据处理系统，则需要对数据进行人工处理。

以螺旋线总偏差曲线为依据，作有效评价范围内所有检定数据的最小二乘中线，此中线在有效评价范围两端螺旋线偏差坐标最大值与最小值之间代数差即为螺旋线倾斜偏差。

作两条上述最小二乘中线的平行线，使其在有效评价范围内包容螺旋线总偏差曲线，这两条平行线在螺旋线偏差方向的坐标距离即为螺旋线形状偏差。

附录 D

齿距测量不确定度分析示例

本例不确定度分析适用于直接法测量齿距累积总偏差，不针对某种特定的设备，仅用以说明不确定度分析的方法。

D.1 数学表达式

直接法测量齿距累积总偏差的数学表达式为：

$$F_p = F_{p_{\max}} - F_{p_{\min}} \quad (\text{D.1})$$

式中： $F_{p_{\max}}$ ——齿距偏差读数中最大值；

$F_{p_{\min}}$ ——齿距偏差读数中最小值。

而齿距偏差读数 F_{pi} 中的误差 $\delta_{F_{pi}}$ 可以由下式表达：

$$\delta_{F_{pi}} = e \sin(\theta_i + \varphi_0) + r\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5 + \delta_6 \quad (\text{D.2})$$

式中： e ——表征标准齿轮安装误差的偏心量；

θ_i ——第 i 齿角度；

φ_0 ——标准齿轮第一齿与偏心 e 之间的夹角；

δ_1 ——齿轮量仪的测角误差；

δ_2 ——齿轮量仪测头的探测误差；

δ_3 ——齿轮量仪的读数误差或量化误差；

δ_4 ——被测齿轮齿面形貌影响引入的误差；

δ_5 ——温度偏离标准状态及温度变化引入的误差；

δ_6 ——测量重复性引入的误差。

D.2 不确定度分量的评定

由 D.2 式分别对各种误差影响的变量求偏导，得到各影响量的灵敏系数，再根据其误差的分布情况，计算标准不确定度分量如下：

1) 测角误差的影响

仪器的测角误差 δ_1 按商品齿轮量仪实测能够达到的 $1''$ （计算中换算为弧度值）估计，误差分布为平均分布，自由度为无穷大，标准齿轮的分度圆半径按常用的规格 $r = 60\text{mm}$ 计算；

$$\text{灵敏系数} \quad c_1 = \frac{\partial \delta_{F_{pi}}}{\partial \delta_1} = r$$

$$\begin{aligned} \text{标准不确定度分量} \quad u_1 &= c_1 u(\theta) = 60 \times 10^3 \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times 4.8 \times 10^{-6} \\ &= 0.168 \mu\text{m} \end{aligned}$$

2) 测头探测误差的影响

测头的探测误差 δ_2 与测头的使用方法有关, 当测头仅用作定位使用时可以只考虑其定位精度, 而需要从测头读取测量数据时则带入测头有效量程内的最大允许误差值, 本例按 $0.5\mu\text{m}$ 估计, 平均分布, 取相对标准不确定度 20%, 自由度 $\nu_2 = 12$, 可得

$$c_2 = \frac{\partial \delta_{F_{\text{H}}}}{\partial \delta_2} = 1$$

$$u_2 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289\mu\text{m}$$

3) 测量安装的影响

安装误差由锥度心轴的跳动和测量设备的上下顶尖回转误差决定, 可以用径向和轴向的跳动来表征, 当工件为直齿轮时不考虑轴向跳动的的影响, 其径向跳动的的影响类似于一个偏心 e , 本例按 $e = 0.5\mu\text{m}$ 估计, 反正弦分布。设其相对标准不确定度为 25%, 自由度为 $\nu_3 = 8$, 得

$$c_3 = \frac{\partial \delta_{F_{\text{H}}}}{\partial e} = \sin(\theta_i + \varphi_0)$$

由于 $\theta_i + \varphi_0$ 所表达的出现最大读数或最小读数的位置不能预知, 这里取影响最大的情况, 即 $c_3 = 1$, 因此

$$u_3 = \frac{0.5}{\sqrt{2}} = 0.354\mu\text{m}$$

4) 读数误差的影响

读数误差, 在数字式设备中表现为量化误差, 按 $0.2\mu\text{m}$ 估计, 平均分布, 灵敏系数为 1, 自由度无穷大, 可得

$$u_4 = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.116\mu\text{m}$$

5) 齿面形貌的影响

齿面形貌差的齿轮使测量过程中采集到的数据带有一定不稳定性, 将其影响按 $0.2\mu\text{m}$ 估计, 平均分布, 灵敏系数为 1, 可得

$$u_5 = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.116\mu\text{m}$$

u_5 的相对标准不确定度取 20%, 自由度 $\nu_5 = 12$ 。

6) 温度影响

环境温度对齿距项目测量的影响主要取决于测量过程中的温度变化和测量设备对温度变化的敏感程度, 在已经限定实验室温度条件和规定了测量回零误差的情况下, 温度影响在测量误差中所占比重不大, 本次不确定度分析按 $0.1\mu\text{m}$ 估计, 平均分布, 自由度无穷大, 灵敏系数为 1, 可得

$$u_6 = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.058\mu\text{m}$$

7) 重复性的影响

测量重复性的影响可以由多次测量结果的统计分析得到, 本例分析中按 $0.3\mu\text{m}$ 估计, 平均分布, 自由度无穷大, 灵敏系数为 1, 因此可得

$$u_7 = \frac{0.3}{\sqrt{3}} = 0.173\mu\text{m}$$

D.3 合成标准不确定度

将各影响量的灵敏系数和标准不确定度分量列表如下:

表 D.1 标准不确定度分量一览表

序号	误差源	误差符号	灵敏系数 c_i	自由度 ν_i	标准不确定度分量 u_i
1	仪器测角误差	δ_1	r	∞	$0.168\mu\text{m}$
2	测头探测误差	δ_2	1	12	$0.289\mu\text{m}$
3	安装误差的影响	e	1	8	$0.354\mu\text{m}$
4	读数误差或量化误差	δ_3	1	∞	$0.116\mu\text{m}$
5	齿面形貌影响	δ_4	1	12	$0.116\mu\text{m}$
6	温度影响	δ_5	1	∞	$0.058\mu\text{m}$
7	测量重复性影响	δ_6	1	∞	$0.173\mu\text{m}$
合成标准不确定度 $u_{F_{pi}}$					$0.545\mu\text{m}$

根据列表, 可得齿距偏差测量读数的标准不确定度为:

$$u_{F_{pi}} = \sqrt{0.168^2 + 0.289^2 + 0.354^2 + 0.116^2 \times 2 + 0.058^2 + 0.173^2} = 0.545\mu\text{m}$$

根据 D.1 式, 齿距累计总偏差由两个读数得出, 且各读数的不确定度相同, 因此齿距总偏差测量结果的合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{2} \times 0.545 = 0.771\mu\text{m}$$

D.4 扩展不确定度

有效自由度为

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\frac{u_2^4}{\nu_2} + \frac{u_3^4}{\nu_3} + \frac{u_5^4}{\nu_5}} = \frac{0.771^4}{\frac{0.289^4}{12} + \frac{0.354^4}{8} + \frac{0.116^4}{12}} = 138$$

当自由度足够大时, 可以按正态分布处理, 取包含因子 $k=2$, 则扩展不确定度 U 为:

$$U = ku_c = 2 \times 0.771 = 1.542\mu\text{m}$$

D.5 检定不确定度报告

检定结果的扩展不确定度 $U = 1.54\mu\text{m}$, 由合成标准不确定度 $u_c = 0.77\mu\text{m}$, 包含因子 $k=2$ 得出。

附录 E

径向跳动测量不确定度分析示例

本例不确定度分析适用于双面接触法测量齿圈径向跳动，不针对某种特定的设备，仅用以说明不确定度分析的方法。

E.1 数学表达式

双面接触法测量齿圈径向跳动的数学表达式为：

$$F_r = F_{r\max} - F_{r\min} \quad (\text{E.1})$$

式中： $F_{r\max}$ ——径向跳动读数中最大值；

$F_{r\min}$ ——径向跳动读数中最小值。

径向跳动的读数 F_{ri} 中的误差 $\delta_{F_{ri}}$ 可以由下式表达：

$$\delta_{F_{ri}} = e \sin(\theta_i + \varphi_0) + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5 + \delta_6 \quad (\text{E.2})$$

式中： e ——表征标准齿轮安装误差的偏心量；

θ_i ——第 i 齿所对应的位置角度；

φ_0 ——标准齿轮第一齿与偏心 e 之间的夹角；

δ_1 ——读取径向跳动的指示表或传感器的示值误差；

δ_2 ——测量仪器调整状态引入的探测误差；

δ_3 ——测头直径偏离最佳值而引入的误差；

δ_4 ——齿面形貌影响引入的误差；

δ_5 ——温度偏离标准状态或温度变化引入的误差；

δ_6 ——测量重复性引入的误差。

E.2 不确定度分量评定

由 E.2 式分别对各种误差影响的变量求偏导，得到各影响量的灵敏系数，再根据其误差的分布情况，计算标准不确定度分量如下：

1) 指示表示值误差的影响

指示表的示值误差可以通过对其检验得到，根据相关的检定规程，取 δ_1 为 $1.2\mu\text{m}/0.03\text{mm}$ ，自由度为无穷大，误差平均分布，灵敏系数为 1，对应的分量标准不确定度为：

$$u_1 = \frac{1.2}{\sqrt{3}} = 0.694\mu\text{m}$$

2) 测量仪器调整状态的影响

此项探测误差主要考虑指示表的探测方向没有位于过齿轮直径的位置上，从而引起测量误差， δ_2 按 $0.2\mu\text{m}$ 取值，平均分布，灵敏系数为 1；

$$u_2 = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.116\mu\text{m}$$

u_2 的相对标准不确定度取 30%，自由度 $\nu_2 = 6$ 。

3) 测头直径的影响

测头直径偏离最佳值时接触点压力角改变，因而在同样齿槽变化时得到不一样的径向跳动读数，测头直径偏小时，径向跳动读数的变化更为灵敏，测头直径偏大时则相反，将此影响按照 $1.0\mu\text{m}$ 取值，平均分布，灵敏系数为 1；

$$u_3 = \frac{1.0}{\sqrt{3}} = 0.577\mu\text{m}$$

u_3 的标准相对不确定度取 25%，自由度 $\nu_3 = 8$ 。

4) 齿面形貌的影响

齿面形貌差的齿轮使测量数据不稳定，将其影响按 $0.2\mu\text{m}$ 估计，平均分布，灵敏系数为 1，可得

$$u_4 = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.116\mu\text{m}$$

u_4 的相对不确定度取 20%，自由度 $\nu_4 = 12$ 。

5) 温度影响

环境温度对径向跳动测量的影响主要取决于测量过程中的温度变化和测量设备对温度变化的敏感程度，一般情况下温度影响在测量误差中所占比重不大，将温度变化的影响按 $0.1\mu\text{m}$ 估计，平均分布，自由度无穷大，灵敏系数为 1，可得

$$u_5 = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.058\mu\text{m}$$

6) 测量重复性的影响

测量重复性的影响可以由多次测量结果的统计，经贝塞尔公式计算得到，自由度为无穷大，将测量重复性的影响按 $0.5\mu\text{m}$ 带入，平均分布，灵敏系数为 1，得

$$u_6 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289\mu\text{m}$$

7) 标准齿轮安装状态的影响

标准齿轮安装状态包含了齿轮在轴上的安装和轴在仪器上的安装两个环节，引入的误差主要表现为齿轮的径向跳动和端面跳动，当锥度心轴的锥度符合要求时，端面跳动的的影响可以忽略不计，径向跳动的的影响与仪器顶尖（或轴系）带入的误差一起形成安装偏心，其偏心量由符号 e 表示，将 E.2 式对 e 求偏导，得到灵敏系数

$$c_7 = \frac{\partial \delta_{F_n}}{\partial e} = \sin(\theta_i + \varphi_0)$$

取偏心量 $e = 0.5\mu\text{m}$ ，鉴于径向跳动需在所有齿槽内测量，偏心量必然全部带入测量结果，因此有

$$c_7 = 1$$

$$u_7 = 0.5\mu\text{m}$$

u_7 的相对不确定度取 20%，自由度 $\nu_7=12$ 。

E.3 合成标准不确定度

将各影响量的灵敏系数和标准不确定度分量列表如下：

表 E.1 标准不确定度分量一览表

序号	误差源	误差符号	灵敏系数 c_i	自由度 ν_i	标准不确定度分量 u_i
1	指示表或传感器示值误差	δ_1	1	∞	$0.694\mu\text{m}$
2	测量仪器调整状态引入的探测误差	δ_2	1	6	$0.116\mu\text{m}$
3	测头直径偏离最佳值而引入的误差	δ_3	1	8	$0.577\mu\text{m}$
4	齿面形貌影响	δ_4	1	12	$0.116\mu\text{m}$
5	温度影响	δ_5	1	∞	$0.058\mu\text{m}$
6	测量重复性影响	δ_6	1	∞	$0.289\mu\text{m}$
7	安装误差影响	e	1	12	$0.5\mu\text{m}$

根据 E.1 式，径向跳动由两个读数相减计算得出，且偏心量 e 在测量中的影响是叠加的，误差合成计算中也应将偏心量的影响叠加后再进行合成，因此径向跳动测量结果的标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{(0.694^2 + 0.577^2 + 0.116^2 \times 2 + 0.058^2 + 0.289^2) \times 2 + (0.5 + 0.5)^2} = 1.690\mu\text{m}$$

E.4 扩展不确定度

有效自由度为

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\frac{u_2^4}{\nu_2} + \frac{u_3^4}{\nu_3} + \frac{u_4^4}{\nu_4} + \frac{u_7^4}{\nu_7}} = \frac{1.690^4}{\frac{0.116^4}{6} + \frac{0.577^4}{8} + \frac{0.116^4}{12} + \frac{0.5^4}{12}} \approx 426$$

因自由度足够大，可以按正态分布处理，取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度 U 为：

$$U = ku_c = 2 \times 1.690 \approx 3.4\mu\text{m}$$

E.5 检定不确定度报告

检定结果的扩展不确定度 $U=3.4\mu\text{m}$ ，由合成标准不确定度 $u_c=1.69\mu\text{m}$ ，包含因子 $k=2$ 得出。

中华人民共和国
国家计量检定规程

标准齿轮

JJG 1008—2006

国家质量监督检验检疫总局发布

*

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

邮政编码 100013

电话 (010)64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

880 mm×1230 mm 16开本 印张2 字数40千字

2006年6月第1版 2006年6月第1次印刷

印数1—1 000

统一书号155026-2142 定价:26.00元