



中华人民共和国国家标准

GB/T 40731—2021

精密减速器回差测试与评价方法

Method of test and evaluation for lost motion of precision reducer

2021-10-11 发布

2022-05-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号、说明和单位 2

5 测试设备 4

6 被试件及安装 4

7 测试条件 5

8 静态测试与数据处理 5

 8.1 安装形式 5

 8.2 测试步骤 5

 8.3 数据处理 6

 8.4 测试位置数 8

9 动态测试与数据处理 8

 9.1 安装形式 8

 9.2 测试转速 8

 9.3 测试步骤 8

 9.4 数据处理 9

10 评价方法 10

 10.1 通则 10

 10.2 方法 10

参考文献 12

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国齿轮标准化技术委员会(SAC/TC 52)提出并归口。

本文件起草单位：北京工业大学、宁波中大力德智能传动股份有限公司、陕西渭河精密传动有限公司、湖北科峰智能传动股份有限公司、苏州绿的谐波传动科技股份有限公司、郑州机械研究所有限公司、深圳市兆威机电股份有限公司、广东金力变速科技股份有限公司、哈尔滨精达测量仪器有限公司、浙江环动机器人关节科技有限公司、深圳市三多乐智能传动有限公司、万鑫精工(湖南)股份有限公司、淄博纽氏达特行星减速机有限公司、集美大学、中原工学院。

本文件主要起草人：石照耀、徐航、于渤、王志刚、岑国建、李剑敏、吴俊峰、李谦、李平、黎冬阳、周广才、张靖、杨东平、周清泉、安利书、罗善明、罗利敏、张彦君、舒伟明、辛栋、王笑一、刘丽雪、朱忠刚、陈斌、田联明、李文、许建民、丁宏钰、余泳。

精密减速器回差测试与评价方法

1 范围

本文件规定了精密减速器回差的测试设备、被试件及安装、测试条件,以及静态测试、动态测试、数据处理和评价方法。

本文件适用于对回差有要求的行星、行星摆线、谐波齿轮及其他类型的精密减速器(以下简称“精密减速器”)的回差测试与评价方法。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 35089—2018 机器人用精密齿轮传动装置 试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

回差 lost motion

精密减速器输入端运动方向改变后到输出端运动方向跟随改变时,输出端在转角上的滞后量。

注: 8.3.3 中当 $k=3$ 时“静态测试几何回差”的值等于 GB/T 35089—2018 和 GB/T 36491—2018 中“回差”的值。

3.2

回差曲线 lost motion curve

精密减速器输出端在 360° 转角范围内,各转角位置的回差值所构成的曲线。

3.3

平均回差 mean lost motion

精密减速器输出端在 360° 转角范围内,各转角位置的回差值的算术平均值。

3.4

几何回差 geometric lost motion

精密减速器由于几何因素(设计、加工、装配等)所产生的回差。

3.5

弹性回差 elastic lost motion

精密减速器在额定转矩下,由于弹性变形所产生的回差。

3.6

总回差 total lost motion

精密减速器在额定转矩下,由于几何因素和弹性变形的综合作用所产生的回差。

3.7

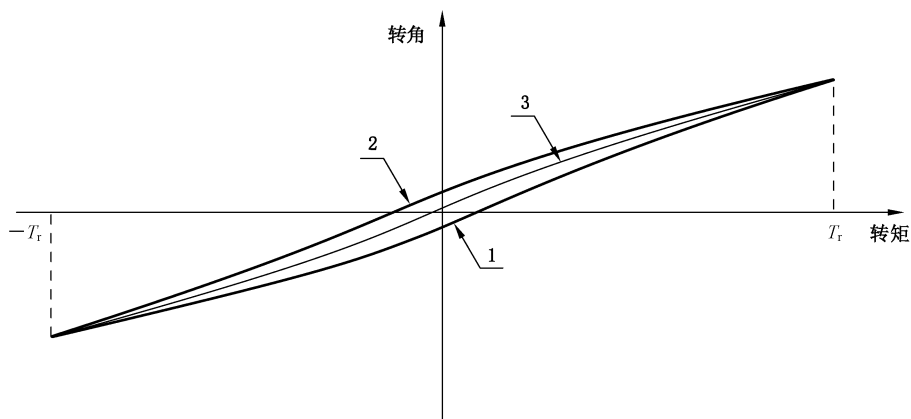
滞回曲线 hysteresis curve

输入端固定,给输出端逐渐加载至额定转矩后卸载,再反向逐渐加载至额定转矩后卸载,记录多组

输出端转矩、转角值,绘制完成的封闭的转矩-转角曲线。

如图 1 所示。

[来源:GB/T 36491—2018,3.9,有修改]



标引序号说明:

1 ——上升曲线 $f_+(T)$;

2 ——下降曲线 $f_-(T)$;

3 ——均值曲线 $f_m(T)$;

T_r ——精密减速器额定转矩。

图 1 滞回曲线和均值曲线

3.8

均值曲线 mean value curve

$f_m(T)$

滞回曲线的上升曲线 $f_+(T)$ 和下降曲线 $f_-(T)$ 中相同输出转矩对应输出转角的平均值所构成的曲线。

如图 1 所示。

3.9

传动误差 transmission error

输出端实际输出转角与理论输出转角之差。

[来源:GB/T 36491—2018,3.11]

3.10

双向传动误差曲线 bidirectional transmission error curve

在输出端 360° 转角范围内,在对应的转速、转矩下精密减速器的正、反向传动误差曲线。

3.11

回差静态测试 static test of lost motion

将精密减速器的输入端固定,通过输出端加载、卸载,获取滞回曲线而完成的回差测试。

3.12

回差动态测试 dynamic test of lost motion

通过测试精密减速器的双向传动误差曲线,获取回差曲线而完成的回差测试。

4 符号、说明和单位

表 1 中的符号适用于本文件。

表 1 符号、说明和单位

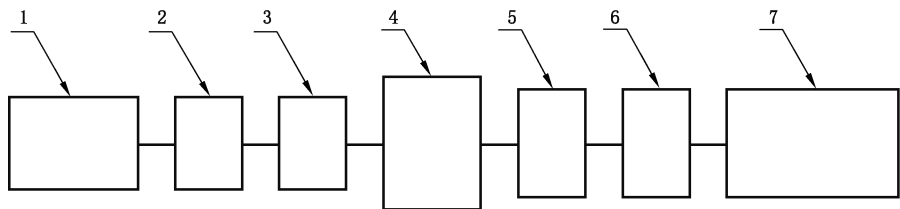
符号	说 明	单位
$f_{+}(T)$	上升曲线	—
$f_{-}(T)$	下降曲线	—
$f_m(T)$	均值曲线	—
k	静态测试相关系数	—
k_d	动态测试相关系数	—
T_r	输出端额定转矩	N · m
δ	静态测试总回差	(′)
δ_d	动态测试总回差	(′)
δ_e	静态测试弹性回差	(′)
δ_{ed}	动态测试弹性回差	(′)
δ_g	静态测试几何回差	(′)
δ_{gd}	动态测试几何回差	(′)
δ_s	静态测试的总回差 δ 、几何回差 δ_g 和弹性回差 δ_e 的公共代号	(′)
δ_{sd}	动态测试总回差 δ_d 、几何回差 δ_{gd} 和弹性回差 δ_{ed} 的公共代号	(′)
$\bar{\delta}$	静态测试总回差的平均值	(′)
$\bar{\delta}_d$	动态测试总回差的平均值	(′)
$\bar{\delta}_e$	静态测试弹性回差的平均值	(′)
$\bar{\delta}_{ed}$	动态测试弹性回差的平均值	(′)
$\bar{\delta}_g$	静态测试几何回差的平均值	(′)
$\bar{\delta}_{gd}$	动态测试几何回差的平均值	(′)
$\bar{\delta}_s$	静态测试的总回差平均值 $\bar{\delta}$ 、几何回差平均值 $\bar{\delta}_g$ 和弹性回差平均值 $\bar{\delta}_e$ 的公共代号	(′)
$\bar{\delta}_{sd}$	动态测试的总回差平均值 $\bar{\delta}_d$ 、几何回差平均值 $\bar{\delta}_{gd}$ 和弹性回差平均值 $\bar{\delta}_{ed}$ 的公共代号	(′)
$\delta_{\max}$	静态测试总回差的最大值	(′)
$\delta_{d\max}$	动态测试总回差的最大值	(′)
$\delta_{e\max}$	静态测试弹性回差的最大值	(′)
$\delta_{ed\max}$	动态测试弹性回差的最大值	(′)
$\delta_{g\max}$	静态测试几何回差的最大值	(′)
$\delta_{gd\max}$	动态测试几何回差的最大值	(′)
$\delta_{s\max}$	静态测试的总回差最大值 $\delta_{\max}$ 、几何回差最大值 $\delta_{g\max}$ 和弹性回差最大值 $\delta_{e\max}$ 的公共代号	(′)
$\delta_{sd\max}$	动态测试的总回差最大值 $\delta_{d\max}$ 、几何回差最大值 $\delta_{gd\max}$ 和弹性回差最大值 $\delta_{ed\max}$ 的公共代号	(′)
θ_{cr}	传动误差	(′)
σ	静态测试总回差的标准差	(′)
σ_d	动态测试总回差的标准差	(′)
σ_e	静态测试弹性回差的标准差	(′)

表 1 符号、说明和单位（续）

符号	说 明	单位
σ_{ed}	动态测试弹性回差的标准差	(')
σ_g	静态测试几何回差的标准差	(')
σ_{gd}	动态测试几何回差的标准差	(')
σ_s	静态测试的总回差标准差 σ 、几何回差标准差 σ_g 和弹性回差标准差 σ_e 的公共代号	(')
σ_{sd}	动态测试的总回差标准差 σ_d 、几何回差标准差 σ_{gd} 和弹性回差标准差 σ_{ed} 的公共代号	(')

5 测试设备

- 5.1 组成示意图 2(不限于卧式或立式)。
- 5.2 相邻单元轴的同轴度误差应不大于 0.01 mm。
- 5.3 在被试件额定转速下,驱动转速的波动值应不大于 $\pm 1 \text{ r/min}$ 。
- 5.4 当进行回差动态测试时,应保证负载转矩稳定,负载转矩的波动值应不大于被试件额定转矩的 $\pm 1.5\%$ 。
- 5.5 转角测量误差应不大于被试件回差允许值的 1/3。
- 5.6 转矩转速传感器和角度传感器的规格、精度、动态响应等应与测试要求相适应。



- 标引序号说明:
- 1——驱动单元;
- 2——输入端转矩转速传感器(可选装);
- 3——输入端角度传感器;
- 4——被试件;
- 5——输出端角度传感器;
- 6——输出端转矩转速传感器;
- 7——加载单元。

图 2 测试设备组成示意图

6 被试件及安装

- 被试件应为可进行回差测试的产品或样机。被试件应有制造商规范的检查记录可用于测试分析。
- 被试件的安装应符合以下要求:
- 应按设计的功率流传输方向进行安装;
 - 输入和输出端的轴线与相邻单元的轴线同轴度误差应不大于 0.01 mm;
 - 运转应灵活、无滞涩。

7 测试条件

- 7.1 在回差测试前,被试件应按照设计要求进行跑合试验,跑合时间由供需双方商定。
- 7.2 跑合试验时应观察并记录:
- 各连接件、紧固件是否有松动;
 - 各密封处、各结合处是否有漏油、渗油;
 - 运转是否平稳,是否发生冲击、有异响;
 - 输出转速是否有异常波动。
- 7.3 回差测试应在被试件热平衡状态下和允许使用温度范围内进行。

8 静态测试与数据处理

8.1 安装形式

示意见图 3。应先将被试件的输入端固定,方可对被试件的输出端进行加载、卸载和反向加载等操作。

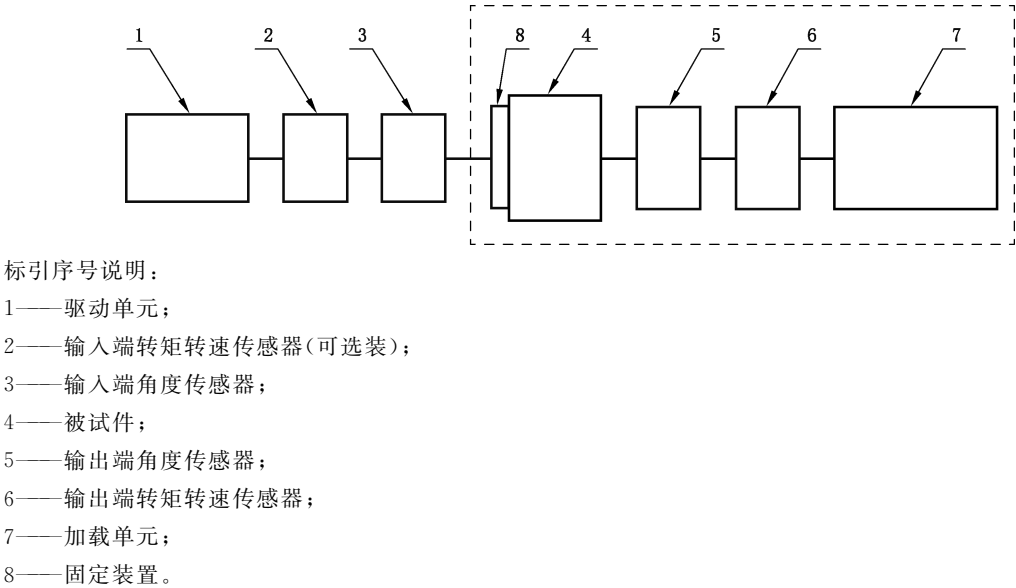
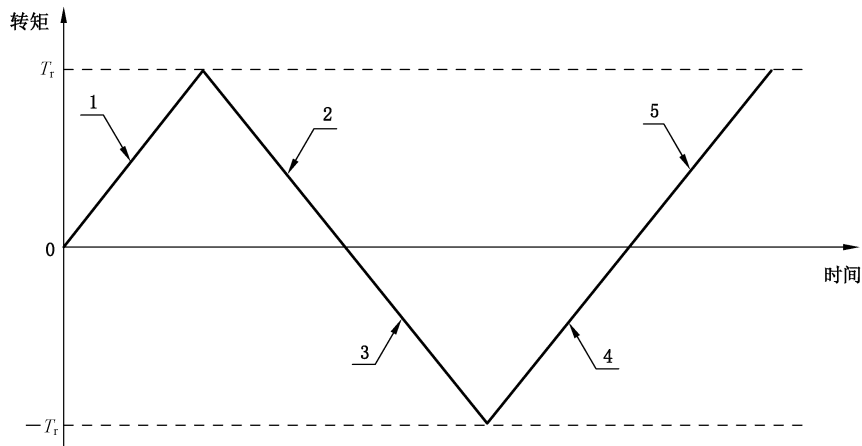


图 3 回差静态测试安装示意图

8.2 测试步骤

- 8.2.1 由试验者定义(宜遵从需方定义)被试件加载的正、反向,做好标识和记录。
- 8.2.2 给输出端循环加载、卸载。转矩的变化示意图 4,操作顺序如下:
- a) 输出端正向加载至额定转矩 T_r ;
 - b) 输出端卸载至 0;
 - c) 输出端反向加载至额定转矩 $-T_r$;
 - d) 输出端卸载至 0;
 - e) 输出端再正向加载至额定转矩 T_r 。



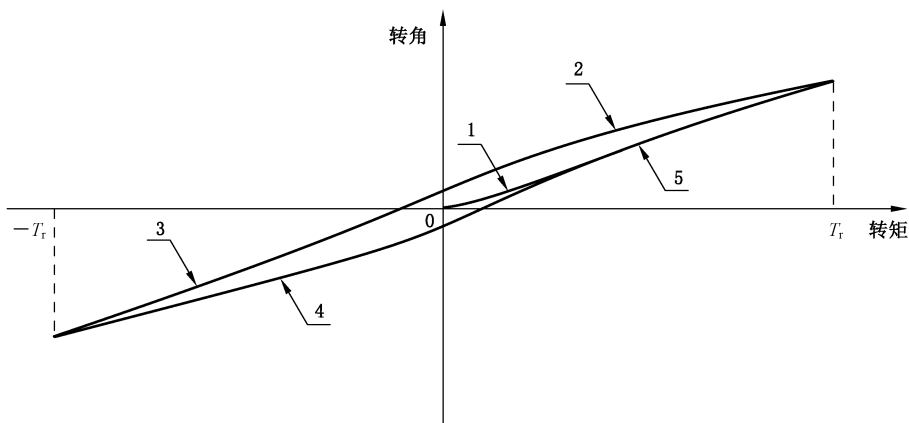
标引序号说明：

- 1——输出端正向加载至额定转矩 T_r ；
- 2——输出端卸载至 0；
- 3——输出端反向加载至额定转矩 $-T_r$ ；
- 4——输出端卸载至 0；
- 5——输出端再正向加载至额定转矩 T_r 。

图 4 回差静态测试加载、卸载示意曲线

8.2.3 在 8.2.2 的测试过程中,应同步对输出端的转矩和转角进行采样。

8.2.4 以 8.2.2b)~8.2.2e)过程中测试的输出端的转矩为横坐标,输出端的转角为纵坐标,绘制一条封闭曲线(滞回曲线),见图 5。在 8.2.2b)~8.2.2e)的过程中,每个步骤的采样点数不宜少于 100 个。



标引序号说明：

- 1——输出端正向加载至额定转矩 T_r ；
- 2——输出端卸载至 0；
- 3——输出端反向加载至额定转矩 $-T_r$ ；
- 4——输出端卸载至 0；
- 5——输出端再正向加载至额定转矩 T_r 。

图 5 回差静态测试的滞回曲线

8.3 数据处理

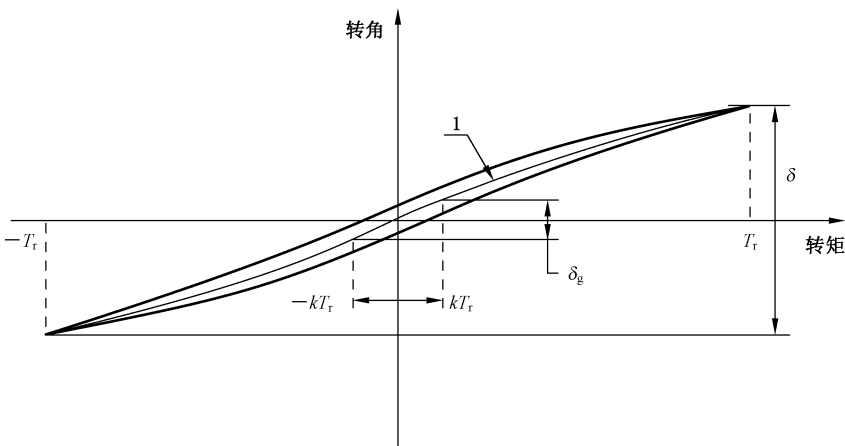
8.3.1 采用插值法,对 $f_+(T)$ 、 $f_-(T)$ 进行插值处理。

8.3.2 由滞回曲线按照公式(1)计算获得均值曲线 $f_m(T)$ ：

$$f_m(T) = \frac{f_+(T) + f_-(T)}{2}$$

.....(1)

8.3.3 总回差 δ 和几何回差 δ_g 的图解见图 6。



- 标引序号说明：
- 1 —— 均值曲线 $f_m(T)$ ；
 - T_r —— 输出端额定转矩；
 - k —— 静态测试相关系数；
 - δ_g —— 静态测试几何回差；
 - δ —— 静态测试总回差。

图 6 回差静态测试数据处理示意图

8.3.4 总回差 δ 、几何回差 δ_g 和弹性回差 δ_e 的计算分别见公式(2)～公式(4)。

$$\delta = f_m(T_r) - f_m(-T_r)$$

.....(2)

- 式中：
- δ —— 静态测试总回差；
 - $f_m(T)$ —— 均值曲线；
 - T_r —— 输出端额定转矩。

$$\delta_g = f_m(kT_r) - f_m(-kT_r)$$

.....(3)

- 式中：
- δ_g —— 静态测试几何回差；
 - k —— 静态测试相关系数，其推荐值见表 2，也可由供需双方商定。

$$\delta_e = \delta - \delta_g$$

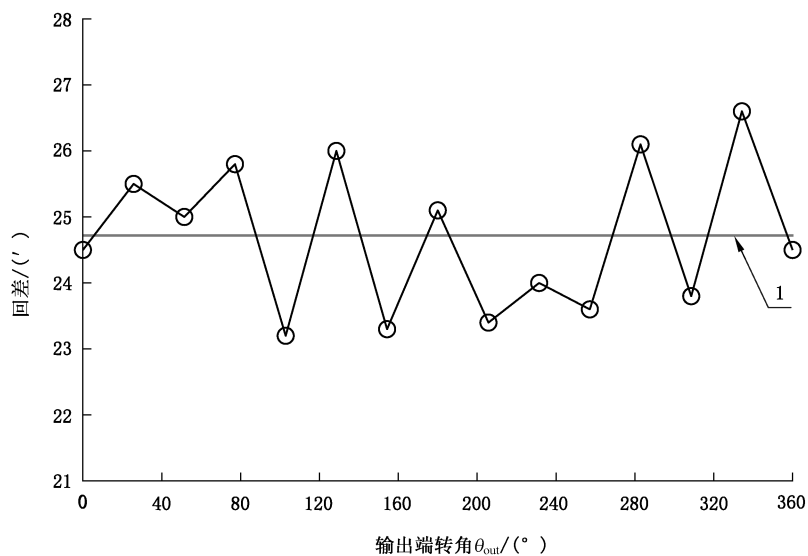
.....(4)

- 式中：
- δ_e —— 静态测试弹性回差。

表 2 k 推荐值

被试件类型	k 推荐值
精密行星摆线减速器	3%
谐波齿轮减速器	3%
其他减速器	由供需双方商定

8.3.5 重复步骤 8.3.1~8.3.4,在输出端不同位置进行回差静态测试,获得各个测试位置的总回差、几何回差和弹性回差值,由此获取总回差曲线、几何回差曲线和弹性回差曲线。此三种回差曲线的示意图见图 7。



标引序号说明:
1——平均回差。

图 7 静态测试的回差曲线示例

8.4 测试位置数

回差静态测试时,应在输出端 360° 转角范围内进行多个位置测试,测试位置数由供需双方商定。测试位置应在以上范围内均匀分布。

9 动态测试与数据处理

9.1 安装形式

示意图 2。当进行几何回差测试时,如果施加载荷要求为 0,宜断开输出端转矩转速传感器和加载单元。

9.2 测试转速

测试转速按以下方式选择:

- 输出端转速不宜大于 5 r/min,且几何回差、总回差的测试转速应相同;
- 当需方对测试转速有要求时,由供需双方商定。

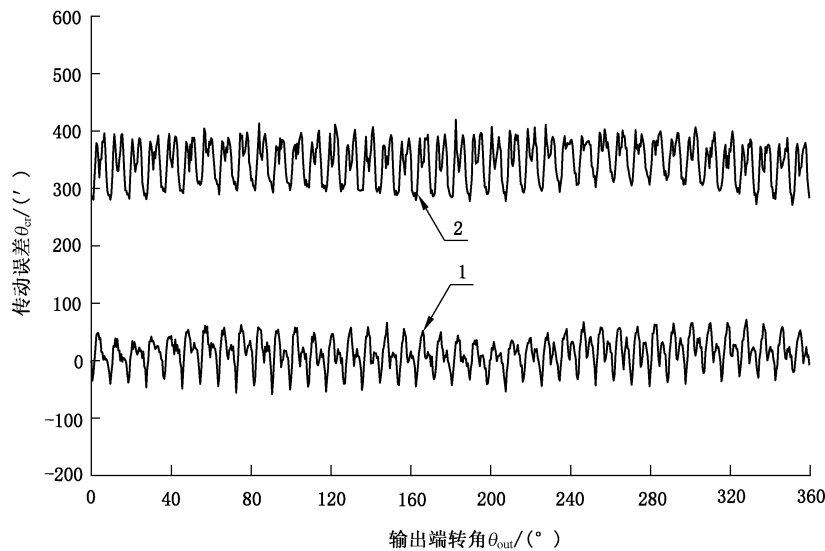
9.3 测试步骤

9.3.1 在设定转速、转矩下,测出被试件的正向传动误差曲线。传动误差的测试应根据 GB/T 35089—2018 进行。

9.3.2 使输入端正向多转一定的角度后反向旋转,在相同的转速、转矩下以相同的方法测出被试件的反向传动误差曲线。

9.3.3 以输出端转角为横坐标,以该角度对应的传动误差值为纵坐标,绘制双向传动误差曲线,见图 8。

传动误差测试中,正、反向的采样点数均应不少于 1 000 个。

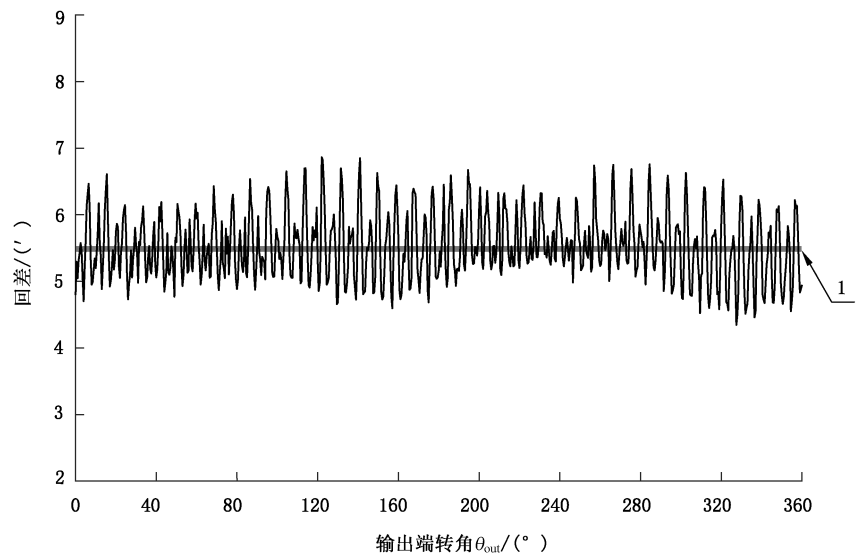


标引序号说明:
1——正向传动误差曲线;
2——反向传动误差曲线。

图 8 双向传动误差曲线示例

9.4 数据处理

9.4.1 图 8 中反向传动误差曲线与正向传动误差曲线对应点的代数差即构成回差曲线,见图 9。



标引序号说明:
1——平均回差。

图 9 动态测试的回差曲线示例

9.4.2 在设定转速、转矩($k_d T_r$)下,测试获得几何回差曲线,其中 k_d 的推荐值见表 3,也可由供需双方商定。

9.4.3 在设定转速、额定转矩下,测试获得总回差曲线。

9.4.4 总回差曲线与几何回差曲线之差为弹性回差曲线。

9.4.5 总回差曲线与几何回差曲线的测试应具有相同的测试起始位置,且除转矩外其他测试条件不变。

表 3 k_d 推荐值

被试件类型	k_d 推荐值
精密行星摆线减速器	0
谐波齿轮减速器	0
其他减速器	由供需双方商定

10 评价方法

10.1 通则

10.1.1 进行回差评价时,应注明所采用的标准(含年代号)、测试设备和测试方法。

10.1.2 以总回差、几何回差和弹性回差作为被试件回差的评价指标。

10.1.3 若回差的静态测试与动态测试的评价结果有争议时,以静态测试评价结果为准。

10.2 方法

10.2.1 应分别以平均值、最大值和标准差对被试件的总回差、几何回差和弹性回差进行评价。

10.2.2 基于回差静态测试获得的数据,评价方法见公式(5)~公式(7)。

$$\bar{\delta}_s = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \delta_s(i) \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$\bar{\delta}_s$ ——静态测试的总回差平均值 $\bar{\delta}$ 、几何回差平均值 $\bar{\delta}_g$ 和弹性回差平均值 $\bar{\delta}_e$ 的公共代号;

i ——回差静态测试的某一测试位置;

m ——回差静态测试的测试位置个数。

$$\delta_{s-\max} = \max\{\delta_s(i)\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$\delta_{s-\max}$ ——静态测试的总回差最大值 $\delta_{\max}$ 、几何回差最大值 $\delta_{g-\max}$ 和弹性回差最大值 $\delta_{e-\max}$ 的公共代号。

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m [\delta_s(i) - \bar{\delta}_s]^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

σ_s ——静态测试的总回差标准差 σ 、几何回差标准差 σ_g 和弹性回差标准差 σ_e 的公共代号。

10.2.3 基于回差动态测试获得的数据,评价方法见公式(8)~公式(10)。

$$\bar{\delta}_{sd} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta_{sd}(j) \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

$\bar{\delta}_{sd}$ ——动态测试的总回差平均值 $\bar{\delta}_d$ 、几何回差平均值 $\bar{\delta}_{gd}$ 和弹性回差平均值 $\bar{\delta}_{ed}$ 的公共代号;

j ——回差动态测试的某一采样位置;

n ——回差动态测试的采样点数。

$$\delta_{sd-max} = \max\{\delta_{sd}(j)\} \dots\dots\dots (9)$$

式中：
 δ_{sd-max} ——动态测试的总回差最大值 δ_{dmax} 、几何回差最大值 δ_{gd-max} 和弹性回差最大值 δ_{ed-max} 的公共代号。

$$\sigma_{sd} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n [\delta_{sd}(j) - \overline{\delta_{sd}}]^2} \dots\dots\dots (10)$$

式中：
 σ_{sd} ——动态测试的总回差标准差 σ_d 、几何回差标准差 σ_{gd} 和弹性回差标准差 σ_{ed} 的公共代号。

参 考 文 献

- [1] GB/T 30819—2014 机器人用谐波齿轮减速器
 - [2] GB/T 36491—2018 机器人用摆线针轮行星齿轮传动装置 通用技术条件
 - [3] 齿轮手册编委会. 齿轮手册第二版(上)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
-