

ICS 43.040

CCS T 23

团 体 标 准

T/DLJX 0014—2025

电动循环球式转向器偏心齿扇设计

Design of eccentric sector gear for recirculating ball type electrical power steering gear

2025 – 09 – 12 发布

2025 – 09 – 22 实施

大连市机械行业协会 发布

目 次

前言	III
引言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号和缩略语	2
5 齿条与偏心齿扇传动	3
5.1 偏心齿扇	3
5.2 偏心齿扇齿廓	4
5.3 偏心量范围	4
5.4 偏心齿扇的作用和影响	4
5.5 配对齿条	4
5.6 齿条与偏心齿扇通用传动关系	4
6 偏心对转向器传动比的影响	5
6.1 偏心影响齿条与齿扇传动比公式	5
6.2 偏心后转向器传动比	6
6.3 偏心对转向器传动比影响	6
7 齿条与偏心齿扇传动比的修正	6
7.1 传动比修正	6
7.2 传动比完全修正	7
7.3 传动比部分修正	7
8 齿条与偏心齿扇传动关系	7
8.1 齿条与完全修正后偏心齿扇传动关系	7
8.2 齿条与部分修正后偏心齿扇传动关系	8
8.3 齿条与不修正偏心齿扇传动关系	8
9 偏心齿扇加工指导	9
9.1 齿条刀具与偏心齿扇工件	9
9.2 齿条刀具加工偏心齿扇的方法	9
9.3 齿条刀具加工偏心齿扇展成关系	9
9.4 加工数据表达方式	11
10 设计验证	11
附录 A （规范性）公式变形表达	12
附录 B （规范性）偏心引起的传动比偏差	13

附录 C	(资料性) 偏心影响齿条与齿扇传动比曲线.....	15
附录 D	(资料性) 完全修正后齿条与齿扇传动比曲线.....	17
附录 E	(资料性) 部分修正后齿条与齿扇传动比曲线.....	19

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。

本文件由大连创新零部件制造公司提出。

本文件由大连市机械行业协会归口。

本文件起草单位：大连创新零部件制造公司、北京理工大学电动车辆国家工程研究中心、河北鲸龙汽配有限公司、山东先锋摩托有限公司、山东时风（集团）有限责任公司汽车设计研究院、北京奥特尼克科技有限公司。

本文件主要起草人：刘莹苹、侯训波、施国标、刘彦超、王强、朱训栋、刘公星、高胜、张胜、洪阳、王帅、冷冶。

本文件为首次发布。

引 言

本文件的发布机构提请注意，声明符合本文件时，可能涉及到 6.1、6.3、7.2、7.3、8.1、8.2、8.3、9.3、附录 A、附录 B，与 ZL202210093535.2《循环球式转向器偏心齿扇的传动比修正及展成加工方法》相关的专利的使用。

本文件的发布机构对该专利的真实性、有效性和范围无任何立场。

该专利持有人已向本文件的发布机构承诺，他愿意同任何申请人在合理且无歧视的条款和条件下，就专利授权许可进行谈判。该专利持有人的声明已在本文件的发布机构备案。相关信息可以通过以下联系方式获得：

专利持有人姓名：大连创新零部件制造公司

地址：大连市开发区 48 号地 创新零部件工业园 116620

请注意除上述专利外，本文件的某些内容仍可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

电动循环球式转向器偏心齿扇设计

1 范围

本文件规定了循环球式转向器中偏心齿扇的相关术语和定义、齿条与偏心齿扇传动、偏心对转向器传动比的影响、齿条与偏心齿扇传动比的修正、齿条与偏心齿扇传动关系、偏心齿扇加工指导等。

本文件适用于电动循环球式转向器总成生产单位的转向摇臂轴偏心齿扇部分设计开发,以及整车厂等使用单位的应用选型。

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 1356 通用机械和重型机械用圆柱齿轮 标准基本齿条齿廓

GB/T 3374.1 齿轮 术语和定义 第1部分:几何学定义

GB/T 35360 汽车转向系统术语和定义

T/DLJX 0009 电动循环球式转向器传动比设计

T/DLJX 0010 电动循环球式转向器非偏心齿扇参数设计

3 术语和定义

GB/T 1356、GB/T 3374.1、GB/T 35360、T/DLJX 0009和T/DLJX 0010中界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

偏心齿扇 *eccentric sector gear*

指循环球式转向器中转向摇臂轴的齿扇齿廓曲面几何中心线与摇臂轴中心线不重合的齿扇。

3.2

偏心量 *e* *eccentric distance*

指偏心齿扇的齿廓曲面几何中心线与摇臂轴中心线的距离,偏心量用 e 表示,单位为(mm)。

3.3

传动比完全修正 *full correction of transmission ratio*

指完全消除齿扇偏心引起的传动比偏差。即消除以转向摇臂轴中心线为基准旋转时齿扇几何中心线沿齿条移动方向位移偏差 Δx 引起的传动比偏差,以及消除沿垂直齿条移动方向位移偏差 Δy 引起的传动比偏差。

3.4

传动比部分修正 partial correction of transmission ratio

指部分消除齿扇偏心引起的传动比偏差。即消除以转向摇臂轴中心线为基准旋转时齿扇几何中心线沿齿条移动方向位移偏差 Δx 引起的传动比偏差, 或者消除沿垂直齿条移动方向位移偏差 Δy 引起的传动比偏差。实际应用中, 部分修正特指消除齿条移动方向位移偏差 Δx 引起的传动比偏差。

4 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件。

a : 齿条(螺杆)与齿扇中心距(mm)。

α : 啮合角或齿扇分度圆压力角($^{\circ}$)。

α_T : 齿条齿形角($^{\circ}$)。

B : 齿扇轴向宽度(mm)。

d : 分度圆直径或节圆直径(mm)。

d_a : 齿扇中剖面齿顶圆直径(mm)。

d_f : 齿扇中剖面齿根圆直径(mm)。

e : 齿扇齿廓中心与摇臂轴中心的偏心量(mm)。

i_g : 螺杆与齿条传动比($^{\circ}/\text{mm}$), 为定值。

i_w : 电动循环球式转向器角传动比(简称转向器传动比), 为定值。

$i_w(\varphi)$: 以齿扇几何中心点为基准的转向器瞬时传动比(简称转向器瞬时传动比), 为变值。

$i'_w(\varphi)$: 以转向摇臂轴心点为基准的转向器瞬时传动比, 为变值。

i_{wA} : 转向器的中位定比区段传动比(简称转向器的中位传动比)。

i_{wB} : 转向器的两侧定比区段传动比(简称转向器的两侧传动比)。

i_p : 齿条与齿扇传动比($\text{mm}/^{\circ}$), 为定值。

$i_p(\varphi)$: 以齿扇几何中心点为基准的齿条与齿扇瞬时传动比($\text{mm}/^{\circ}$), 为变值。

$i_{p\pm}(\varphi)$: 齿条左移时, 以齿扇几何中心点为基准的齿条与齿扇瞬时传动比($\text{mm}/^{\circ}$), 为变值。

$i_{p\mp}(\varphi)$: 齿条右移时, 以齿扇几何中心点为基准的齿条与齿扇瞬时传动比($\text{mm}/^{\circ}$), 为变值。

$i'_p(\varphi)$: 以转向摇臂轴心点为基准的齿条与偏心齿扇瞬时传动比($\text{mm}/^{\circ}$), 为变值。

$i'_{p\text{设计}}(\varphi)$: 以转向摇臂轴心点为基准的齿条与偏心齿扇设计传动比($\text{mm}/^{\circ}$), 为变值。

$i'_{p\pm}(\varphi)$: 齿条左移时, 以转向摇臂轴心点为基准的齿条与偏心齿扇瞬时传动比($\text{mm}/^{\circ}$), 为变值。

$i'_{p\mp}(\varphi)$: 齿条右移时, 以转向摇臂轴心点为基准的齿条与偏心齿扇瞬时传动比($\text{mm}/^{\circ}$), 为变值。

i_{PA} : 齿条与齿扇的中位定比区段传动比($\text{mm}/^{\circ}$) (简称齿条与齿扇的中位传动比)。

i_{PB} : 齿条与齿扇的两侧定比区段传动比($\text{mm}/^{\circ}$) (简称齿条与齿扇的两侧传动比)。

π : 圆周率($\pi \approx 3.1415926$)。

m : 定比传动时齿扇模数(mm), 变比传动时齿扇中位中齿模数(mm), 为定值。

$m(\varphi, n, i)$: 齿扇瞬时模数(mm), 为变值。

P_h : 螺杆导程(mm)。

R : 齿扇分度圆半径或节圆半径(mm), 为定值。

$R(\varphi)$: 齿扇瞬时分度圆半径或节圆半径(mm), 为变值。

R_b : 齿扇基圆半径(mm), 为定值。

$R_b(\varphi)$: 齿扇瞬时基圆半径(mm), 为变值。

δ : 啮合间隙(mm), 指齿条与齿扇啮合时, 非工作齿面间沿齿条移动方向的距离。

s : 齿条位移 (mm)。

$s(\varphi)$: 以齿扇齿廓几何中心点为基准的齿条位移 (mm)。

$s'(\varphi)$: 以转向摇臂轴心点为基准的齿条位移 (mm)。

φ : 以齿扇齿廓几何中心点为基准的齿扇转角或以转向摇臂轴心点为基准的摇臂轴转角 ($^{\circ}$)。

φ_A : 变比起点角度 ($^{\circ}$)。

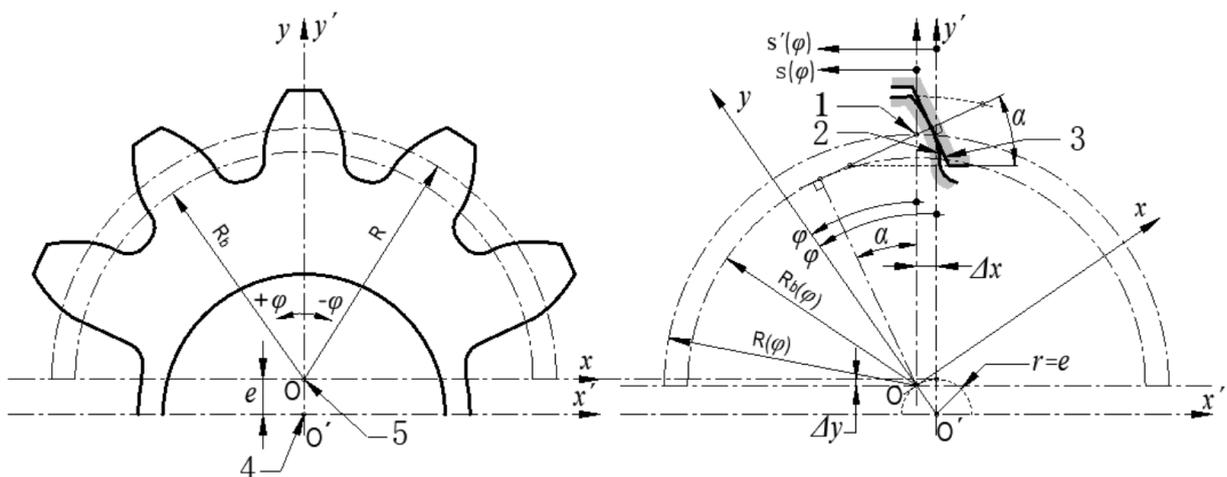
φ_B : 变比止点角度 ($^{\circ}$)。

z : 齿扇全齿数。

5 齿条与偏心齿扇传动

5.1 偏心齿扇

偏心齿扇的结构、坐标系、偏心布置形式、主要尺寸和传动示意等见图1, 图1中所涉及到的尺寸、参数等定义, 将被本文件全文所引用。



标引序号说明:

1—瞬时节点;

2—齿扇齿廓线;

3—齿条齿廓线;

4—转向摇臂轴心点 O' ;

5—齿扇齿廓几何中心点 O ;

Δx —齿条移动方向位移偏差, 单位mm, $\Delta x = e \cdot \sin(\pi\varphi/180)$;

Δy —垂直齿条移动方向位移偏差, 单位mm, $\Delta y = e \cdot [1 - \cos(\pi\varphi/180)]$ 。

图1 偏心齿扇坐标系和传动示意图

图1中, 齿扇齿廓的几何中心点为 O , 坐标系为 xOy ; 转向摇臂轴的旋转中心点为 O' , 坐标系为 $x'O'y'$, 点 O 设置在点 O' 之上, 靠近于齿条侧。转向摇臂轴以点 O' 为中心旋转时, 齿扇齿廓几何中心点 O 以偏心量 e 为半径绕点 O' 旋转, 点 O 相对于 O' 产生沿齿条移动方向位移偏差 Δx 和沿垂直齿条移动方向位移偏差 Δy 偏移。转向摇臂轴旋转时, 齿扇齿廓旋转角度与转向摇臂轴的转角相同, 用 φ 表示, 逆时针旋转为正, 顺时针方向为负。

5.2 偏心齿扇齿廓

偏心齿扇的齿廓设计，按T/DLJX 0010中廓线设计执行，齿扇及其齿廓的几何中心为点O，点O与转向摇臂轴的旋转中心点O'有偏心量 e 。

5.3 偏心量范围

偏心量 e 具体数值根据产品设计需求设定，通常偏心量 e 范围：0.3~0.6mm，不同厂家设计经验不同，一般限制偏心齿扇所引起的转向器传动比变化范围应小于等于设计值的3%。

5.4 偏心齿扇的作用和影响

5.4.1 补偿中间齿面磨损

转向器的传动间隙特性要求中位小转角时，齿条与齿扇传动间隙较小，而大转角时的传动间隙较大，既对中位频繁转向造成的中位啮合齿面磨损进行补偿，又兼顾转向器全转角范围内的空载输入力矩特性。齿扇存在切削角，调整齿扇的轴向位置，补偿磨损后间隙量。

实现转向器传动间隙特性，通常做法有二种：齿条中间齿槽宽适当缩减和偏心齿扇。偏心齿扇传动间隙随转角渐进式变化，传动平稳。

偏心齿扇由中间位置向两侧旋转时，偏心量 e 的分量 $e \cdot \cos\varphi$ 影响啮合间隙，啮合间隙 δ 随转角 φ 变化的关系式为：

$$\delta = 2e \cdot (1 - \cos\varphi) \cdot \tan\alpha_T \dots\dots\dots (1)$$

式中：

齿扇转角 φ (°) 一般取 $-50^\circ \sim 50^\circ$ ；

齿条齿形角 α_T (°) 一般取 25° 、 27° 、 28° 、 30° 。

5.4.2 影响传动比

采用偏心齿扇会对传动比产生影响，偏心量 e 使转向器的传动比增大，在小范围内连续变化，让驾驶员在转向过程中感受到连续、自然的转向力变化，提升驾驶体验和操控性。

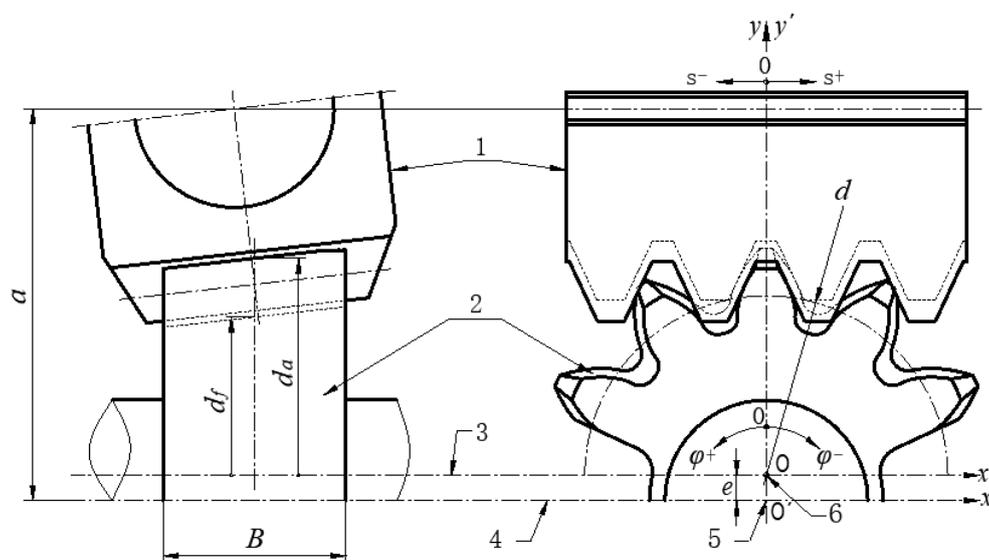
以转向摇臂轴心点为基准旋转到某转角时，齿扇几何中心点产生沿齿条移动方向位移偏差 Δx 和沿垂直齿条移动方向位移偏差 Δy ，两个方向的位移偏差引起传动比偏差，齿条左移（齿条左齿廓与齿扇右齿廓啮合）与齿条右移（齿条右齿廓与齿扇左齿廓啮合）的传动比偏差不一致。

5.5 配对齿条

偏心齿扇的配对齿条的参数按照T/DLJX 0010中相关内容选择，但不设置中间齿槽宽缩减。

5.6 齿条与偏心齿扇通用传动关系

齿条与偏心齿扇传动及结构如图2所示。以转向摇臂轴心点O'为基准原点的齿条位移 $s'(\varphi)$ 与摇臂轴转角 φ 的关系，表达应用时需要满足的齿条与偏心齿扇的传动关系；以齿扇齿廓几何中心点O为基准原点的齿条行程 $s(\varphi)$ 与偏心齿扇转角 φ 的传动关系，表达加工齿扇齿廓几何形状时刀具与齿扇的传动关系。



标引序号说明:

- 1—螺母齿条或称齿条;
- 2—偏心齿扇;
- 3—齿扇几何中心线
- 4—转向摇臂轴线
- 5—转向摇臂轴心点 O' ;
- 6—齿扇齿廓几何中心点 O 。

图2 齿条与偏心齿扇传动及结构图

当齿扇以转向摇臂轴心点 O' 为基准点旋转时, 齿扇齿廓几何中心点 O 随转向摇臂轴转角 φ 不断变化, 对传动关系产生影响, 其通用关系式如下:

$$s'(\varphi) = s(\varphi) - e \cdot \sin(\pi\varphi/180) \mp e \cdot (1 - \cos(\pi\varphi/180)) \cdot \tan(\pi\alpha/180) \dots\dots\dots (2)$$

式中, 齿条左移时“ \mp ”取上符号, 齿条右移时“ \mp ”取下符号。如果没有特殊说明, 后续公式中“ \mp ”或“ \pm ”都是齿条左移取上符号, 齿条右移取下符号。

公式(2)还可表达为附录A中公式(A.1)。

6 偏心对转向器传动比的影响

6.1 偏心影响齿条与齿扇传动比公式

齿条与偏心齿扇的两种基准传动比关系式:

$$i_p'(\varphi) = \frac{|ds'|}{|d\varphi|} = i_p(\varphi) + \frac{e\pi}{180} \cos(\pi\varphi/180) \pm \frac{e\pi}{180} \tan(\pi\alpha/180) \sin(\pi\varphi/180) \dots\dots\dots (3)$$

注1: 在设定坐标系下 $s(\varphi)$ 带负号, 取绝对值后消除负号。

注2: 在 φ 的定义域为 $-50^\circ \sim 50^\circ$ 内, 取绝对值后符号如公式。

T/DLJX 0009 中提出的齿条与齿扇定比、线性变比和余弦变比传动, 当齿扇设置偏心量 e 时传动比关系式如下。

定比传动时，齿条与偏心齿扇传动比关系式：

$$i'_p(\varphi) = \frac{\pi m z}{360} + \frac{e\pi}{180} \cos(\pi\varphi/180) \pm \frac{e\pi}{180} \tan(\pi\alpha/180) \sin(\pi\varphi/180) \quad \dots\dots\dots (4)$$

线性变比传动时，齿条与偏心齿扇传动比关系式：

$$i'_p(\varphi) = \frac{e\pi}{180} \cos(\pi\varphi/180) \pm \frac{e\pi}{180} \tan(\pi\alpha/180) \sin(\pi\varphi/180) + \begin{cases} i_{PA} & 0 \leq |\varphi| < \varphi_A \\ i_{PA} + \frac{i_{PB} - i_{PA}}{\varphi_B - \varphi_A} (|\varphi| - \varphi_A) & \varphi_A \leq |\varphi| < \varphi_B \\ i_{PB} & \varphi_B \leq |\varphi| \end{cases} \quad \dots\dots (5)$$

余弦变比传动时，齿条与偏心齿扇传动比关系式：

$$i'_p(\varphi) = \frac{e\pi}{180} \cos(\pi\varphi/180) \pm \frac{e\pi}{180} \tan(\pi\alpha/180) \sin(\pi\varphi/180) + \begin{cases} i_{PA} & 0 \leq |\varphi| < \varphi_A \\ b_1 + b_2 \cos\left(\frac{\varphi_B - |\varphi|}{\varphi_B - \varphi_A} \pi\right) & \varphi_A \leq |\varphi| < \varphi_B \\ i_{PB} & \varphi_B \leq |\varphi| \end{cases} \quad \dots\dots (6)$$

式中：

$$b_1 = (i_{PA} + i_{PB}) / 2 \quad ;$$

$$b_2 = (i_{PB} - i_{PA}) / 2 \quad .$$

公式 (3)、(4)、(5) 和 (6) 还可表达为附录A中公式 (A.2)、(A.3)、(A.4) 和 (A.5)。公式 (4)、(5) 和 (6) 对应的传动比曲线参考附录C中图C.1、图C.2和图C.3。

6.2 偏心后转向器传动比

转向器传动比是由二级传动所叠加而成的，齿扇偏心后的关系式如下：

$$i'_w(\varphi) = i_g \times i'_p(\varphi) = \frac{360}{P_h} \times i'_p(\varphi) \quad \dots\dots\dots (7)$$

6.3 偏心对转向器传动比的影响

偏心齿扇在与齿条传动过程中，改变了转向器传动比的初始设计曲线，当设计偏心量 e 时，其影响规律如下：

$$i'_w(\varphi) - i_w(\varphi) = \frac{360}{P_h} [i'_p(\varphi) - i_p(\varphi)] = \frac{2e\pi}{P_h} \cos(\pi\varphi/180) \pm \frac{2e\pi}{P_h} \tan(\pi\alpha/180) \sin(\pi\varphi/180) \quad \dots\dots\dots (8)$$

公式 (8) 还可表达为附录A中公式 (A.6)。

7 齿条与偏心齿扇传动比的修正

7.1 传动比修正

齿扇偏心引起的传动比偏差 $|i'_p(\varphi) - i'_{p\text{设计}}(\varphi)|$ 与 $i'_{p\text{设计}}(\varphi)$ 和 $|i_{PB} - i_{PA}|$ (变比传动时)的关系决定是否修正。

首先，按照附录B中公式 (B.1) 计算不修正时传动比偏差。

当 $|i'_p(\varphi) - i'_{p\text{设计}}(\varphi)| \leq 3\% \times i'_{p\text{设计}}(\varphi)$ 且 $|i'_p(\varphi) - i'_{p\text{设计}}(\varphi)| \leq 30\% \times |i_{PB} - i_{PA}|$ 时, 不修正;

当 $|i'_p(\varphi) - i'_{p\text{设计}}(\varphi)| > 3\% \times i'_{p\text{设计}}(\varphi)$ 或 $|i'_p(\varphi) - i'_{p\text{设计}}(\varphi)| > 30\% \times |i_{PB} - i_{PA}|$ 时, 考虑部分修正。

然后, 按照附录 B 中公式 (B.2) 计算部分修正时传动比偏差。

当 $|i'_p(\varphi) - i'_{p\text{设计}}(\varphi)| \leq 3\% \times i'_{p\text{设计}}(\varphi)$ 且 $|i'_p(\varphi) - i'_{p\text{设计}}(\varphi)| \leq 30\% \times |i_{PB} - i_{PA}|$ 时, 进行部分修正;

当 $|i'_p(\varphi) - i'_{p\text{设计}}(\varphi)| > 3\% \times i'_{p\text{设计}}(\varphi)$ 或 $|i'_p(\varphi) - i'_{p\text{设计}}(\varphi)| > 30\% \times |i_{PB} - i_{PA}|$ 时, 进行完全修正, 完全修正时传动比偏差为零。

注: 关系式中的3%和30%系数为经验值, 可以根据产品和客户要求进行调整。

7.2 传动比完全修正

按偏心齿扇齿廓几何中心点 0 为基准原点进行齿扇传动比 $i_p(\varphi)$ 设计, 来满足以转向摇臂轴心点 O' 为基准原点的传动比 $i'_p(\varphi)$ 要求。完全修正后的齿条与偏心齿扇传动比关系式如下:

$$i_p(\varphi) = i'_p(\varphi) - \left(\frac{e\pi}{180} \cos(\pi\varphi/180) \pm \frac{e\pi}{180} \tan(\pi\alpha/180) \sin(\pi\varphi/180) \right) \dots\dots\dots (9)$$

公式 (9) 还可表达为附录A中公式 (A.7)。

公式 (9) 联合公式 (4)、(5) 和 (6) 得到定比、线性变比和余弦变比传动对应完全修正后齿条与偏心齿扇传动比关系式, 对应的传动比曲线参考附录D中图D. 1、图D. 2和图D. 3。

7.3 传动比部分修正

按偏心齿扇齿廓几何中心点 0 为基准原点进行齿扇传动比 $i_p(\varphi)$ 设计, 来满足以转向摇臂轴心点 O' 为基准原点的传动比 $i'_p(\varphi)$ 要求。部分修正采用只对齿扇齿廓几何中心点 0 位移偏差 Δx 引起的传动比偏差进行修正, 部分修正后的齿条与偏心齿扇传动比关系式如下:

$$i_p(\varphi) = i'_p(\varphi) - \frac{e\pi}{180} \cos(\pi\varphi/180) \dots\dots\dots (10)$$

公式 (10) 联合公式 (4)、(5) 和 (6) 得到定比、线性变比和余弦变比传动对应部分修正后齿条与偏心齿扇传动比关系式, 对应的传动比曲线参考附录E中图E. 1、图E. 2和图E. 3。

8 齿条与偏心齿扇传动关系

8.1 齿条与完全修正后偏心齿扇传动关系

齿扇齿廓完全修正后, 以齿扇齿廓几何中心点0为基准原点, 齿条行程 $s(\varphi)$ 与偏心齿扇转角 φ 的传动关系如下。

定比传动时, 齿条与完全修正后偏心齿扇传动关系式:

$$s(\varphi) = e \cdot \sin(\pi\varphi/180) \pm e \cdot (1 - \cos(\pi\varphi/180)) \cdot \tan(\pi\alpha/180) - \frac{\pi m z}{360} \varphi \dots\dots\dots (11)$$

线性变比传动时，齿条与完全修正后偏心齿扇传动关系式：

$$s(\varphi) = e \cdot \sin(\pi\varphi/180) \pm e \cdot (1 - \cos(\pi\varphi/180)) \cdot \tan(\pi\alpha/180) + \begin{cases} -i_{PA}\varphi & 0 \leq \varphi < \varphi_A \\ -i_{PA}\varphi - \frac{b_2}{w_2} \operatorname{sgn}(\varphi)(|\varphi| - \varphi_A)^2 & \varphi_A \leq \varphi < \varphi_B \\ -i_{PB}\varphi + w_1 b_2 \operatorname{sgn}(\varphi) & \varphi_B \leq \varphi \end{cases} \dots\dots (12)$$

余弦变比传动时，齿条与完全修正后偏心齿扇传动关系式：

$$s(\varphi) = e \cdot \sin(\pi\varphi/180) \pm e \cdot (1 - \cos(\pi\varphi/180)) \cdot \tan(\pi\alpha/180) + \begin{cases} -i_{PA}\varphi & 0 \leq \varphi < \varphi_A \\ -b_1\varphi + b_2 \operatorname{sgn}(\varphi) \left[\varphi_A + \frac{w_2}{\pi} \sin\left(\frac{\varphi_B - |\varphi|}{w_2} \pi\right) \right] & \varphi_A \leq \varphi < \varphi_B \\ -i_{PB}\varphi + w_1 b_2 \operatorname{sgn}(\varphi) & \varphi_B \leq \varphi \end{cases} \dots\dots (13)$$

上述传动关系式中：

$$w_1 = \varphi_A + \varphi_B ;$$

$$w_2 = \varphi_B - \varphi_A ;$$

$$b_1 = (i_{PA} + i_{PB}) / 2 ;$$

$$b_2 = (i_{PB} - i_{PA}) / 2 \circ$$

8.2 齿条与部分修正后偏心齿扇传动关系

齿扇齿廓部分修正后，以齿扇齿廓几何中心点0为基准原点，齿条行程 $s(\varphi)$ 与偏心齿扇转角 φ 的传动关系如下。

定比传动时，齿条与部分修正后偏心齿扇传动关系式：

$$s(\varphi) = e \cdot \sin(\pi\varphi/180) - \frac{\pi m z}{360} \varphi \dots\dots\dots (14)$$

线性变比传动时，齿条与部分修正后偏心齿扇传动关系式：

$$s(\varphi) = e \cdot \sin(\pi\varphi/180) + \begin{cases} -i_{PA}\varphi & 0 \leq \varphi < \varphi_A \\ -i_{PA}\varphi - \frac{b_2}{w_2} \operatorname{sgn}(\varphi)(|\varphi| - \varphi_A)^2 & \varphi_A \leq \varphi < \varphi_B \\ -i_{PB}\varphi + w_1 b_2 \operatorname{sgn}(\varphi) & \varphi_B \leq \varphi \end{cases} \dots\dots\dots (15)$$

余弦变比传动时，齿条与部分修正后偏心齿扇传动关系式：

$$s(\varphi) = e \cdot \sin(\pi\varphi/180) + \begin{cases} -i_{PA}\varphi & 0 \leq \varphi < \varphi_A \\ -b_1\varphi + b_2 \operatorname{sgn}(\varphi) \left[\varphi_A + \frac{w_2}{\pi} \sin\left(\frac{\varphi_B - |\varphi|}{w_2} \pi\right) \right] & \varphi_A \leq \varphi < \varphi_B \\ -i_{PB}\varphi + w_1 b_2 \operatorname{sgn}(\varphi) & \varphi_B \leq \varphi \end{cases} \dots\dots\dots (16)$$

上述传动关系式中：

$$w_1 = \varphi_A + \varphi_B ;$$

$$w_2 = \varphi_B - \varphi_A ;$$

$$b_1 = (i_{PA} + i_{PB}) / 2 ;$$

$$b_2 = (i_{PB} - i_{PA}) / 2 \circ$$

8.3 齿条与不修正偏心齿扇传动关系

齿扇齿廓不修正时，以齿扇齿廓几何中心 O 为基准原点，齿条行程 $s(\varphi)$ 与偏心齿扇转角 φ 的传动关系式同T/DLJX 0010中齿条与齿扇传动关系式。

9 偏心齿扇加工指导

9.1 齿条刀具与偏心齿扇工件

针对插齿设备加工偏心齿扇，如图3所示布置齿条刀具与偏心齿扇工件位置关系。齿条刀具本体的参数参照配对齿条的相关参数，不同处为齿顶高系数 $ha_0^*=1.00$ ，称之为标准齿条刀具。

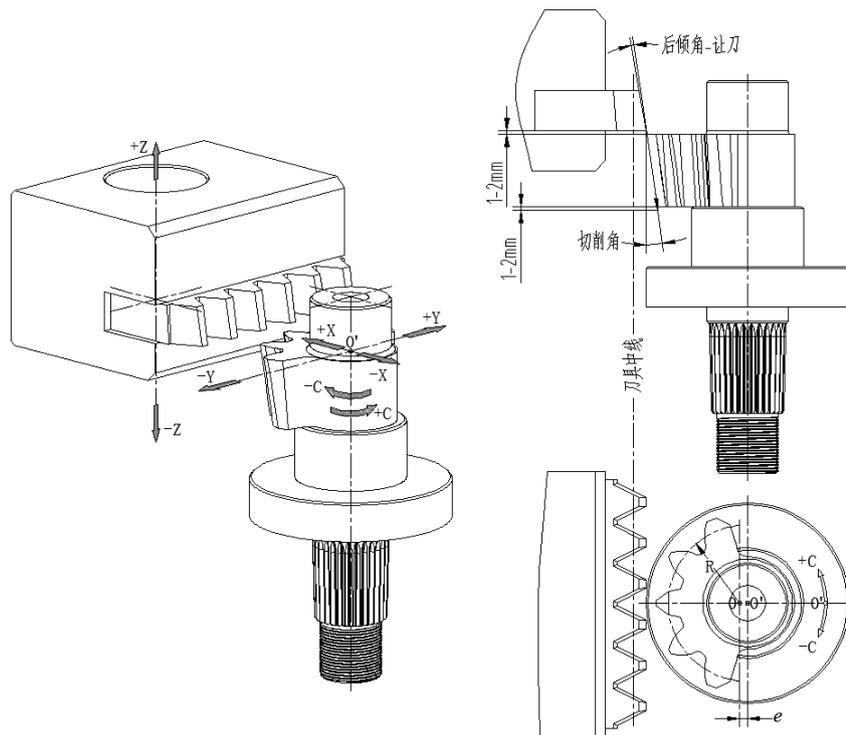


图3 齿条刀具与偏心齿扇工件的关系图

9.2 齿条刀具加工偏心齿扇的方法

根据插齿设备的加工能力可选择二轴联动或三轴联动方式实施展成加工偏心齿扇。

当采取二轴联动的方式展成加工偏心齿扇时，选用对应偏心量的偏心夹具定位夹紧，使设备C轴与偏心齿扇的齿扇齿廓几何中心 O 点重合，通过C轴和Y轴联动实现展成加工。

当采取三轴联动的方式展成加工偏心齿扇时，插齿设备C轴旋转轴心点与转向摇臂轴工件的轴心点 O' 始终重合，而偏心齿扇齿廓几何中心点 O 与转向摇臂轴工件的轴心点 O' 存在偏心量 e ，通过C轴、X轴和Y轴联动实现展成加工。此种方法无需匹配偏心夹具定位，更换品种效率高。

不管采取二轴联动还是三轴联动方式，完全修正的加工情况复杂，且不常用，在本文件中不作说明。

9.3 齿条刀具加工偏心齿扇展成关系

9.3.1 二轴联动加工的展成关系

当采取二轴联动和偏心定位夹具实施展成加工时，加工偏心齿扇的展成运动关系是指工作台沿Y轴横移（横移位置 y ，单位：mm）与C轴旋转（旋转角度为 c ，单位： $^\circ$ ）的联动关系。C轴转角 c 等同于齿

扇转角 φ , Y轴位移 $y(c)$ 等同齿条行程的负值 $-s(\varphi)$, 取值是由于齿条行程与Y轴横移的方向相反。进行传动比部分修正的展成关系公式为齿条与偏心齿扇关系式(14)、(15)和(16)取负; 不修正的展成关系公式同T/DLJX 0010中齿扇的加工展成关系式。

9.3.2 三轴联动加工的展成关系

当采取三轴联动实施展成加工时, 如图4所示, 加工偏心齿扇的展成运动关系是指工作台沿X轴纵移(纵移位置 x , 单位: mm)和Y轴横移(横移位置 y , 单位: mm)与C轴旋转(旋转角度为 c , 单位: $^\circ$)的联动关系, 通用公式如下:

$$\begin{cases} x(c) = e[1 - \cos(\pi c / 180)] \\ y(c) = e \cdot \sin(\pi c / 180) - s(c) \end{cases} \dots\dots\dots (17)$$

其中, 工作台 X 轴纵移坐标只与偏心量 e 和设备 C 轴转角有关, 不随传动比形式变化。

其中, 工作台 Y 轴横移坐标即与偏心量 e 和设备 C 轴转角有关, 又随传动比形式变化, 具体情况如下。

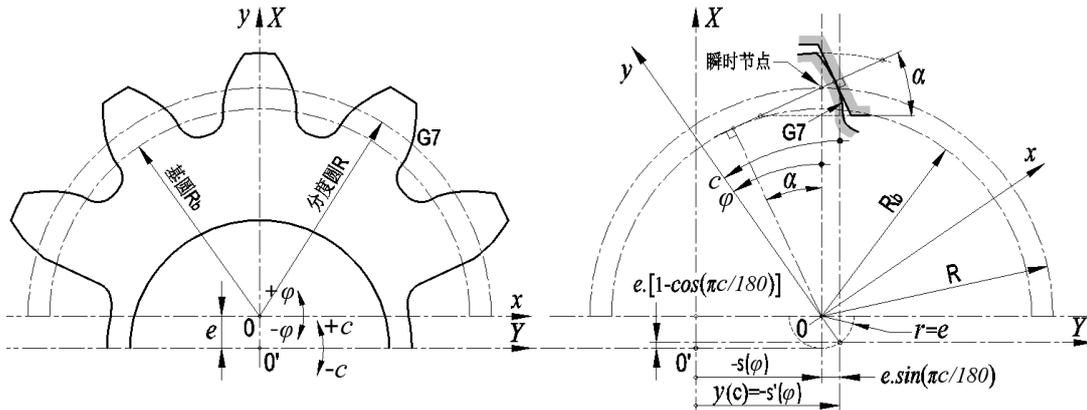


图4 三轴联动加工偏心齿扇的运动关系示意图

传动比不修正时, 加工偏心齿扇的展成关系公式如下。

不修正时, 定比齿扇的加工展成关系式:

$$y(c) = e \cdot \sin(\pi c / 180) + \frac{\pi m z}{360} c \dots\dots\dots (18)$$

不修正时, 线性变比齿扇的加工展成关系式:

$$y(c) = e \cdot \sin(\pi c / 180) + \begin{cases} i_{PA} c & 0 \leq |c| < c_A \\ i_{PA} c + \frac{b_2}{w_2} \operatorname{sgn}(c) (|c| - c_A)^2 & c_A \leq |c| < c_B \\ i_{PB} c - w_1 b_2 \operatorname{sgn}(c) & c_B \leq |c| \end{cases} \dots\dots\dots (19)$$

不修正时, 余弦变比齿扇的加工展成关系式:

$$y(c) = e \cdot \sin(\pi c / 180) + \begin{cases} i_{PA} c & 0 \leq |c| < c_A \\ b_1 c - b_2 \operatorname{sgn}(c) \left[c_A + \frac{w_2}{\pi} \sin\left(\frac{c_B - |c|}{w_2} \pi\right) \right] & c_A \leq |c| < c_B \\ i_{PB} c - w_1 b_2 \operatorname{sgn}(c) & c_B \leq |c| \end{cases} \dots\dots\dots (20)$$

传动比部分修正时，加工偏心齿扇的展成关系公式如下。

部分修正时，定比齿扇的加工展成关系式：

$$y(c) = \frac{\pi m z}{360} c \quad \dots\dots\dots (21)$$

部分修正时，线性变比齿扇的加工展成关系式：

$$y(c) = \begin{cases} i_{PA}c & 0 \leq |c| < c_A \\ i_{PA}c + \frac{b_2}{w_2} \operatorname{sgn}(c)(|c| - c_A)^2 & c_A \leq |c| < c_B \\ i_{PB}c - w_1 b_2 \operatorname{sgn}(c) & c_B \leq |c| \end{cases} \quad \dots\dots\dots (22)$$

部分修正时，余弦变比齿扇的加工展成关系式：

$$y(c) = \begin{cases} i_{PA}c & 0 \leq |c| < c_A \\ b_1 c - b_2 \operatorname{sgn}(c) \left[c_A + \frac{w_2}{\pi} \sin \left(\frac{c_B - |c|}{w_2} \pi \right) \right] & c_A \leq |c| < c_B \\ i_{PB}c - w_1 b_2 \operatorname{sgn}(c) & c_B \leq |c| \end{cases} \quad \dots\dots\dots (23)$$

上述展成关系式中：

$$c_A = \varphi_A ;$$

$$c_B = \varphi_B ;$$

$$w_1 = c_A + c_B ;$$

$$w_2 = c_B - c_A ;$$

$$b_1 = (i_{PA} + i_{PB}) / 2 ;$$

$$b_2 = (i_{PB} - i_{PA}) / 2 。$$

9.4 加工数据表达方式

按图3所示位置为零点，依据偏心齿扇齿廓代号（见T/DLJX 0010中相关内容），以及采用的二轴联动或三轴联动加工方式，以及选定的不修正或部分修正方式，编制所对应的齿扇加工展成关系式。对于变比齿廓还应给出变比曲线形式和展成数据表（见T/DLJX 0010附录中相关内容），用于识别和指导加工。关系式中系数应保留小数点后5位有效数字，保证计算精度，使计算误差控制在 $\pm 0.001\text{mm}$ 之内。

10 设计验证

设计验证包括偏心齿扇齿廓设计有效性验证和采用偏心齿扇的转向器传动比符合性验证。

偏心齿扇齿廓设计有效性验证，按照T/DLJX 0010中齿顶宽检验和齿条与齿扇啮合传动验证内容执行。

采用偏心齿扇的转向器传动比符合性验证，试验方法按照QC/T 29096 中相应方法执行，技术要求按照QC/T 29097 中相应要求执行。

附录 A
(规范性)
公式变形表达

公式 (2) 还可表达为:

$$s'(\varphi) = s(\varphi) \mp e \cdot \tan(\pi\alpha/180) - \frac{e \cdot \sin(\pi(\varphi \mp \alpha)/180)}{\cos(\pi\alpha/180)} \dots\dots\dots (A.1)$$

公式 (3) 还可表达为:

$$i'_p(\varphi) = \frac{|ds'|}{|d\varphi|} = i_p(\varphi) + \frac{e\pi \cos(\pi(\varphi \mp \alpha)/180)}{180 \times \cos(\pi\alpha/180)} \dots\dots\dots (A.2)$$

公式 (4) 还可表达为:

$$i'_p(\varphi) = \frac{\pi mz}{360} + \frac{e\pi \cos(\pi(\varphi \mp \alpha)/180)}{180 \times \cos(\pi\alpha/180)} \dots\dots\dots (A.3)$$

公式 (5) 还可表达为:

$$i'_p(\varphi) = \frac{e\pi \cos(\pi(\varphi \mp \alpha)/180)}{180 \times \cos(\pi\alpha/180)} + \begin{cases} i_{PA} & 0 \leq |\varphi| < \varphi_A \\ i_{PA} + \frac{i_{PB} - i_{PA}}{\varphi_B - \varphi_A} (|\varphi| - \varphi_A) & \varphi_A \leq |\varphi| < \varphi_B \\ i_{PB} & \varphi_B \leq |\varphi| \end{cases} \dots\dots\dots (A.4)$$

公式 (6) 还可表达为:

$$i'_p(\varphi) = \frac{e\pi \cos(\pi(\varphi \mp \alpha)/180)}{180 \times \cos(\pi\alpha/180)} + \begin{cases} i_{PA} & 0 \leq |\varphi| < \varphi_A \\ b_1 + b_2 \cos\left(\frac{\varphi_B - |\varphi|}{\varphi_B - \varphi_A} \pi\right) & \varphi_A \leq |\varphi| < \varphi_B \\ i_{PB} & \varphi_B \leq |\varphi| \end{cases} \dots\dots\dots (A.5)$$

公式 (8) 还可表达为:

$$i'_w(\varphi) - i_w(\varphi) = \frac{360}{P_h} [i'_p(\varphi) - i_p(\varphi)] = \frac{2e\pi \cos(\pi(\varphi \mp \alpha)/180)}{P_h \cos(\pi\alpha/180)} \dots\dots\dots (A.6)$$

公式 (9) 还可表达为:

$$i_p(\varphi) = i'_p(\varphi) - \frac{e\pi \cos(\pi(\varphi \mp \alpha)/180)}{180 \times \cos(\pi\alpha/180)} \dots\dots\dots (A.7)$$

附 录 B
(规范性)
偏心引起的传动比偏差

B.1 位移偏差引起传动比偏差

齿条与偏心齿扇传动时，形成沿齿条移动方向位移偏差 Δx 和沿垂直齿条移动方向位移偏差 Δy ，位移偏差 Δx 和位移偏差 Δy 都能引起的传动比偏差。

B.2 齿扇不修正传动比偏差

齿扇齿廓不修正时，偏心引起的传动比偏差公式如下：

$$i'_p(\varphi) - i'_{p\text{设计}}(\varphi) = \frac{e\pi \cos(\pi(\varphi \mp \alpha)/180)}{180 \times \cos(\pi\alpha/180)} \dots\dots\dots (\text{B.1})$$

当 $\varphi = \pm\alpha$ 时，取最大值： $\frac{e\pi}{180 \times \cos(\pi\alpha/180)}$

B.3 齿扇部分修正传动比偏差

齿扇齿廓 Δx 部分修正后，偏心引起的传动比偏差公式如下：

$$i'_p(\varphi) - i'_{p\text{设计}}(\varphi) = \pm \frac{e\pi \tan(\pi\alpha/180) \sin(\pi\varphi/180)}{180} \dots\dots\dots (\text{B.2})$$

齿扇齿廓 Δy 部分修正后，偏心引起的传动比偏差公式如下：

$$i'_p(\varphi) - i'_{p\text{设计}}(\varphi) = \frac{e\pi \cos(\pi\varphi/180)}{180} \dots\dots\dots (\text{B.3})$$

注：实际应用中，部分修正中只消除垂直齿条移动方向位移偏差 Δy 引起的传动比偏差情况复杂，不做考虑。

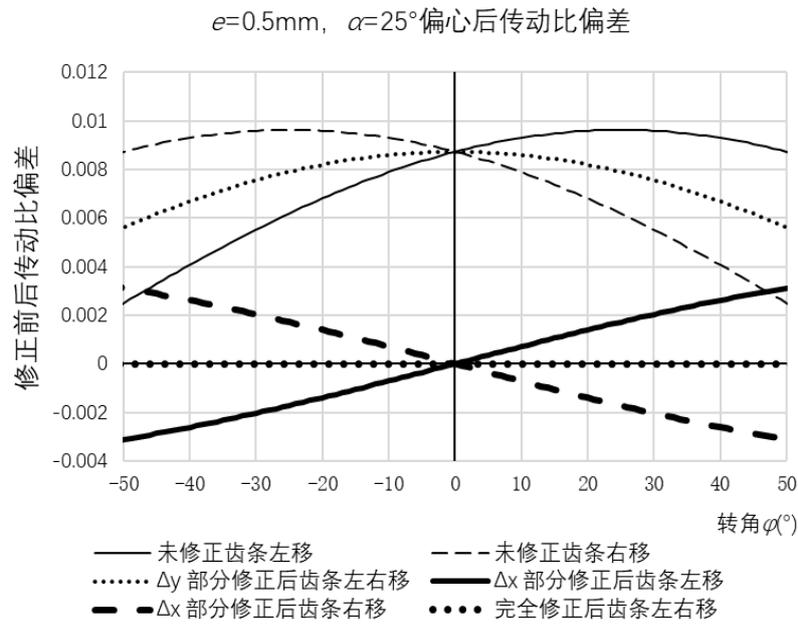
B.4 齿扇完全修正传动比偏差

齿扇齿廓完全修正后，偏心引起的传动比偏差公式如下：

$$i'_p(\varphi) - i'_{p\text{设计}}(\varphi) = 0 \dots\dots\dots (\text{B.4})$$

B.5 影响传动比偏差的参数

由公式 (B.1)、(B.2)、(B.3) 和 (B.4) 可见，偏心引起的传动比偏差只与偏心量 e 、齿扇分度圆压力角 α 、齿扇的转角 φ 有关，绘制齿扇齿廓修正前后，偏心引起的传动比偏差曲线如图 B.1。

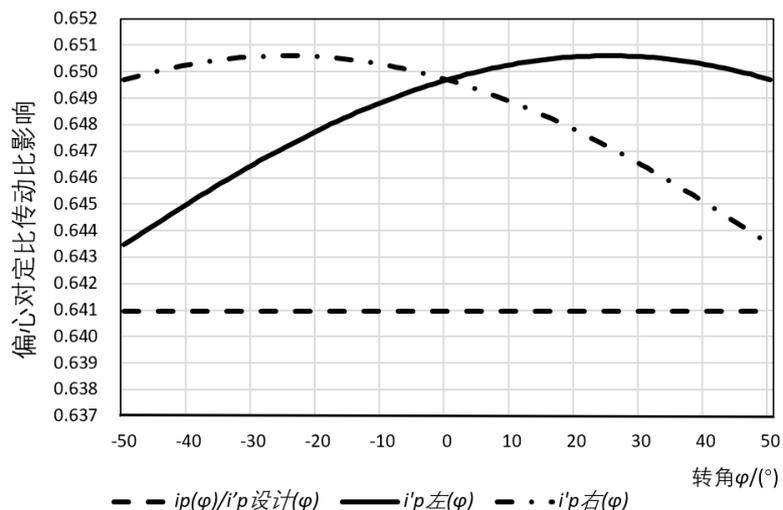


图B.1 齿扇齿廓修正前后传动比偏差曲线

附录 C
(资料性)
偏心影响齿条与齿扇传动比曲线

C.1 定比传动齿条与偏心齿扇传动比曲线

定比传动时，齿条与偏心齿扇传动比曲线如图 C.1:

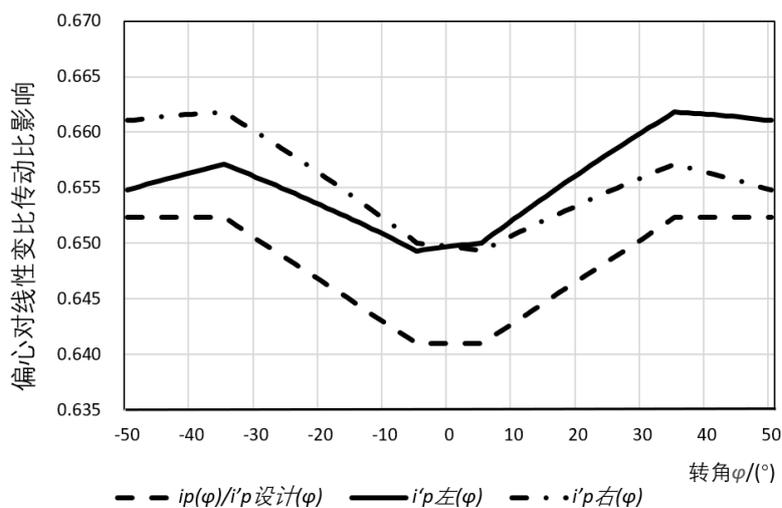


注：对应参数为： $m(\varphi)=6.5$ ， $e=0.5\text{mm}$ ， $z=11.5$ ， $i_p(\varphi)=0.641$ 。

图 C.1 齿条与偏心齿扇传动比曲线-定比

C.2 线性变比传动齿条与偏心齿扇传动比曲线

线性变比传动时，齿条与偏心齿扇传动比曲线如图 C.2:

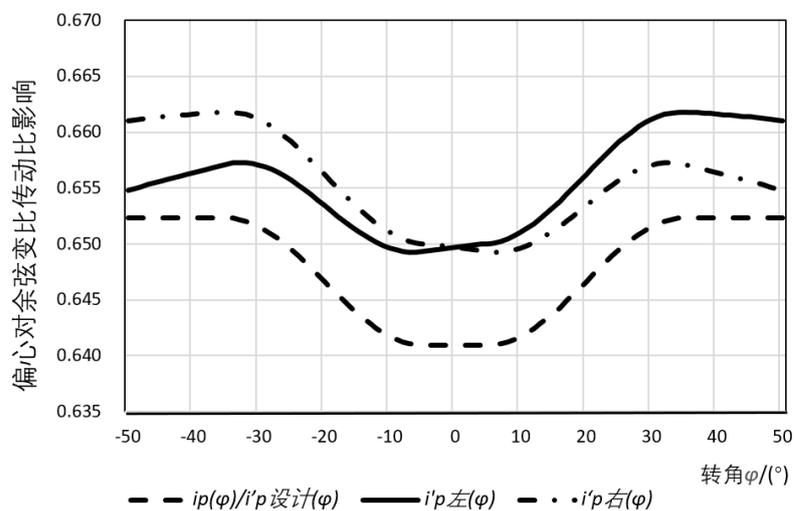


注：对应参数为： $m(5^\circ)=6.387$ ， $m(35^\circ)=6.5$ ， $Ph=11\text{mm}$ ， $e=0.5\text{mm}$ ， $\varphi_A=5^\circ$ ， $\varphi_B=35^\circ$ ， $z=11.5$ ， $i_{pA}=0.641$ ， $i_{pB}=0.652$ 。

图 C.2 齿条与偏心齿扇传动比曲线-线性变比

C.3 余弦变比传动齿条与偏心齿扇传动比曲线

余弦变比传动时，齿条与偏心齿扇传动比曲线如图 C.3:



注：对应参数为： $m(5^\circ)=6.387$, $m(35^\circ)=6.5$, $Ph=11\text{mm}$, $e=0.5\text{mm}$, $\varphi_A=5^\circ$, $\varphi_B=35^\circ$, $z=11.5$, $i_{PA}=0.641$, $i_{PB}=0.652$ 。

图 C.3 齿条与偏心齿扇传动比曲线-余弦变比

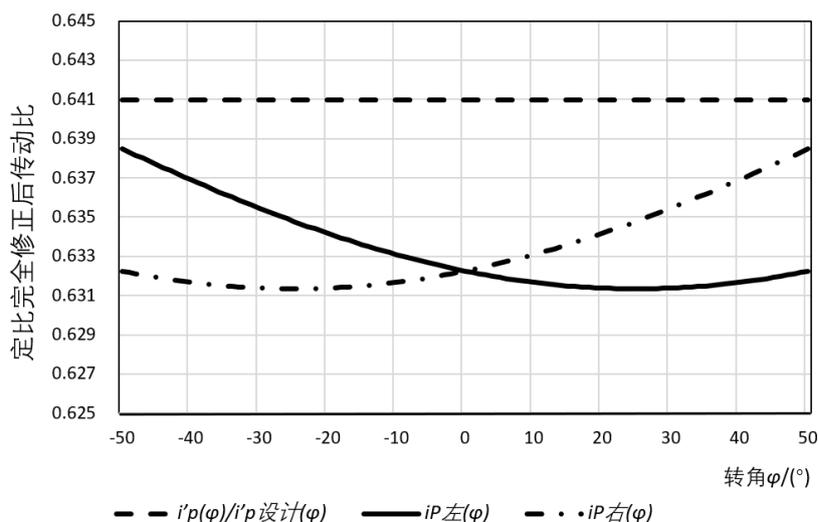
C.4 偏心对齿条与齿扇传动比的影响

由上可见，齿扇偏心使得传动比增大，而且齿条左移与齿条右移的传动比不同。

附录 D
(资料性)
完全修正后齿条与齿扇传动比曲线

D.1 完全修正后定比传动齿条与偏心齿扇传动比曲线

定比传动时，完全修正后的齿条与偏心齿扇传动比曲线如图 D.1:

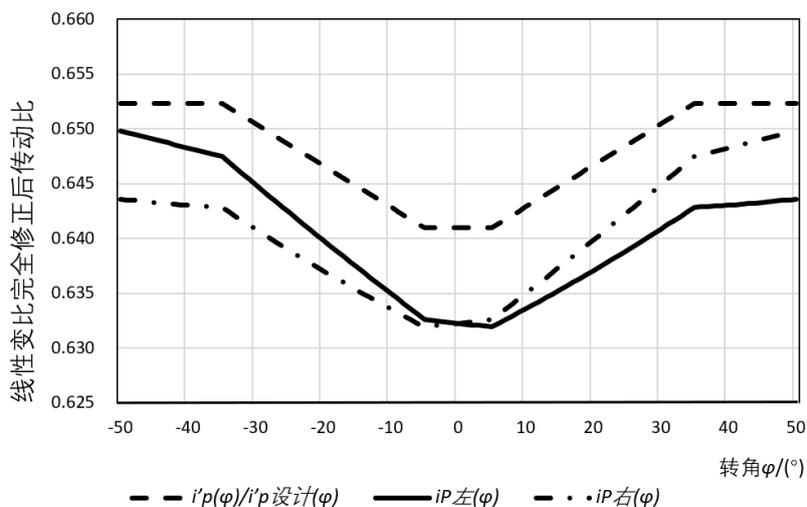


注：对应参数为： $m(\varphi)=6.5$ ， $e=0.5\text{mm}$ ， $z=11.5$ ， $i'_{p}(\varphi)=0.641$ 。

图 D.1 完全修正后齿条与偏心齿扇传动比曲线-定比

D.2 完全修正后线性变比传动齿条与偏心齿扇传动比曲线

线性变比传动时，完全修正后的齿条与偏心齿扇传动比曲线如图D.2:

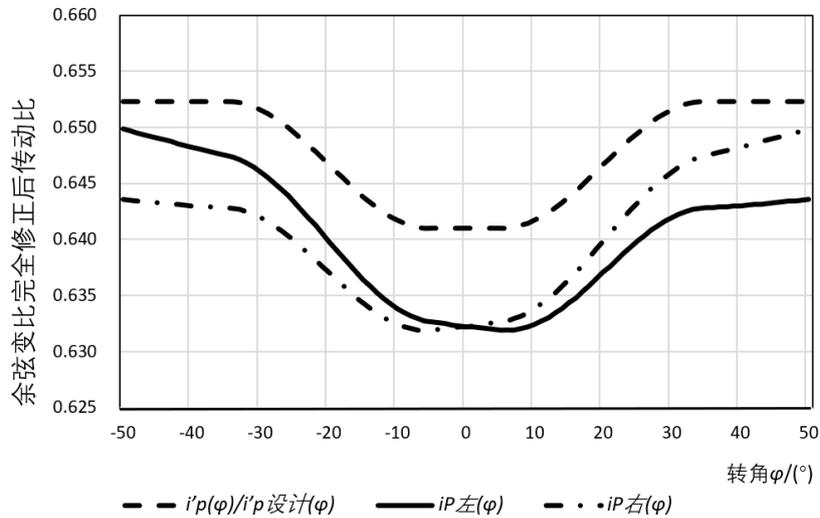


注：对应参数为： $m(5^\circ)=6.387$ ， $m(35^\circ)=6.5$ ， $Ph=11\text{mm}$ ， $e=0.5\text{mm}$ ， $\varphi_A=5^\circ$ ， $\varphi_B=35^\circ$ ， $z=11.5$ ， $i'_{pA}=0.641$ ， $i'_{pB}=0.652$ 。

图 D.2 完全修正后齿条与偏心齿扇传动比曲线-线性变比

D.3 完全修正后余弦变比传动齿条与偏心齿扇传动比曲线

余弦变比传动时，完全修正后的齿条与偏心齿扇传动比曲线如图D.3:



注：对应参数为： $m(5^\circ)=6.387$, $m(35^\circ)=6.5$, $Ph=11\text{mm}$, $e=0.5\text{mm}$, $\varphi_A=5^\circ$, $\varphi_B=35^\circ$, $z=11.5$, $i'_{PA}=0.641$, $i'_{PB}=0.652$ 。

图 D.3 完全修正后齿条与偏心齿扇传动比曲线-余弦变比

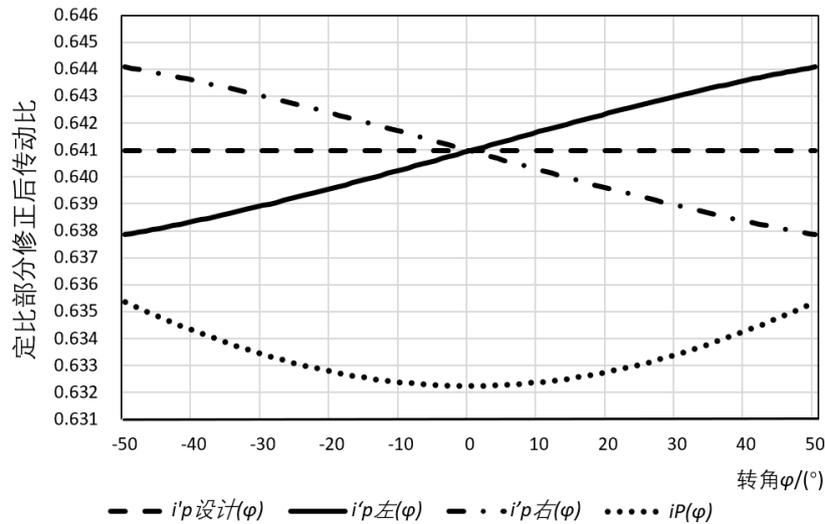
D.4 完全修正对齿条与偏心齿扇传动比的影响

由上可见，完全修正使得传动比满足设计要求，为修正齿条左移与齿条右移的不同传动比，修正后齿扇左右齿廓形状不同。

附录 E
(资料性)
部分修正后齿条与齿扇传动比曲线

E.1 部分修正后定比传动齿条与偏心齿扇传动比曲线

定比传动时，部分修正后的齿条与偏心齿扇传动比曲线如图 E.1:

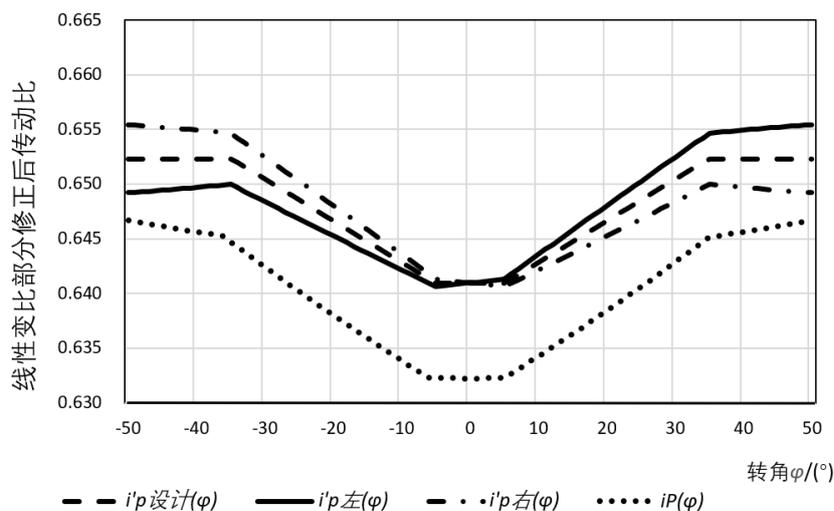


注：对应参数为： $m(\varphi)=6.5$ ， $e=0.5\text{mm}$ ， $z=11.5$ ， $i'p(\varphi)=0.641$ 。

图 E.1 部分修正后齿条与偏心齿扇传动比曲线-定比

E.2 部分修正后线性变比传动齿条与偏心齿扇传动比曲线

线性变比传动时，部分修正后的齿条与偏心齿扇传动比曲线如图E.2:

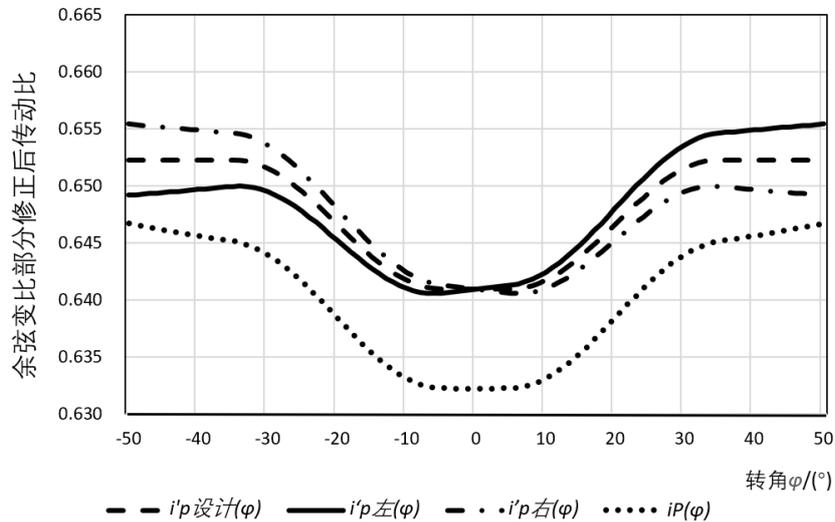


注：对应参数为： $m(5^\circ)=6.387$ ， $m(35^\circ)=6.5$ ， $Ph=11\text{mm}$ ， $e=0.5\text{mm}$ ， $\varphi_A=5^\circ$ ， $\varphi_B=35^\circ$ ， $z=11.5$ ， $i'p_A=0.641$ ， $i'p_B=0.652$ 。

图 E.2 部分修正后齿条与偏心齿扇传动比曲线-线性变比

E.3 部分修正后余弦变比传动齿条与偏心齿扇传动比曲线

余弦变比传动时，部分修正后的齿条与偏心齿扇传动比曲线如图E.3:



注：对应参数为： $m(5^\circ)=6.387$, $m(35^\circ)=6.5$, $Ph=11\text{mm}$, $e=0.5\text{mm}$, $\varphi_A=5^\circ$, $\varphi_B=35^\circ$, $z=11.5$, $i'_{PA}=0.641$, $i'_{PB}=0.652$ 。

图 E.3 部分修正后齿条与偏心齿扇传动比曲线-余弦变比

E.4 部分修正对齿条与偏心齿扇传动比的影响

由上可见，部分修正不能使传动比完全满足设计要求，而且齿条左移与齿条右移的传动比不同，但修正后齿扇左右齿廓形状相同，并且传动比偏差明显减小。