

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.020

循环球转向器变比齿条齿扇的逆向和正向结合设计

刘莹苹¹, 王庆涛²

(1. 大连创新零部件制造公司, 辽宁 大连 116620; 2. 大连华锐重工集团有限公司, 辽宁 大连 116041)

摘要:以循环球转向器的变比齿条齿扇传动副为例, 阐述逆向设计与正向设计相结合的设计过程。通过 3D 扫描点云数据取得的齿廓面上点坐标数据, 推算出齿条齿扇基本几何参数。基于 CATIA 设计软件平台, 依据理论推算的齿条与齿扇的传动关系公式和变比形式创建标准的齿条和齿条刀具模型, 使用布尔减模拟齿条刀具展成加工过程, 创建变比的齿扇模型。逆向设计结合理论计算和参数化模型的正向设计, 得到所需的设计图形和设计参数, 可指导后续变比齿廓的加工。

关键词:循环球转向器; 变比齿条齿扇; 正逆向结合设计; CATIA 逆向设计; 参数化模板; 提取点云坐标值

中图分类号:TH132.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)04-0108-07

Reverse and Forward Combined Design of Variable Ratio Rack and Sector Gear in Recirculating Ball-type Steering Gear

LIU Yingping¹, WANG Qingtao²

(1. Dalian Innovation Parts Manufacturing Company, Dalian 116620, China;

2. Dalian Huarui Heavy Industry Group Co., Ltd., Dalian 116041, China)

Abstract: Taking the rack and sector gear of recirculating ball type steering gear as an example, describes the designing process of reverse and forward designs. The point coordinate data on the tooth profile surface is obtained from the 3D scanned point cloud data, and the basic geometric parameters of the rack and sector gear is calculated. Based on the CATIA design software platform, standard rack and tool models are built with the transmission relationship formula and variable ratio of rack and sector gear by theoretical calculation, and the development and processing process of gear cutting tool are simulated by Boolean reduction to establish variable ratio sector gear model. Reverse design is combined with theoretical calculation and forward design of parametric model to obtain the desired design graphics and parameters, which can serve as the guidance for variable ratio tooth profile machining.

Keywords: recirculating ball-type steering gear; variable ratio rack and sector gear; reverse and forward combined design; reverse design in CATIA; parameterized template; obtain coordinate values of point cloud

0 引言

为了兼顾汽车转向操控的稳定性与灵敏性, 转向系统常选用变传动比形式, 在配装循环球转向器的整车上, 常采用转向螺母上齿条与转向摇臂轴上齿扇变比传动。根据整车结构和运动特性, 整车厂提出转向系统传动比和变比范围, 各生产企业发挥优势, 采用不同的变比形式, 一般分标准齿条匹配变比齿扇、标准齿扇匹配变比齿条或非标齿条匹配非圆齿扇。当技术引进阶段没有足够经验或者为了缩短开发周期, 常采用逆向设计。

逆向设计需要验证和转化成设计图形和参数, 文献[1]介绍了对非圆齿扇提取静态尺寸参数和分析啮合动态性能的反求设计过程, 并采用 Matlab 仿真验证。文献[2]中通过在 Matlab 编程中实现变传动比的齿条齿扇的二维建模以及加工仿真, 并在 SolidWorks 中二次建模。文献[3]利用范成仿真法原理, 实现循环布尔减模拟具有标准渐开线齿形的工具齿扇(刀具)加工变比齿条齿廓的过程。文献[4]完成仿形铣刀参数化建模系统, 并利用仿形加工原理, 模拟仿形铣刀加工变比齿条齿廓的过程。本文以另一种变比形式标准齿条匹配变比齿扇为例, 基于 CATIA 软件, 对 3D 扫描获取实物的点云模型进行点坐标数据提取和

基金项目:辽宁省企业技术创新重点项目(2022XCP167); 大连市工业企业技术创新项目(202201205)

第一作者简介:刘莹苹(1979—), 女, 河北保定人, 高级工程师, 本科, 研究方向为 EPS 电动助力转向装置研发, liuyingping00@163.com。

几何参数推导,将输出的点坐标数据用于与理论计算取得的齿廓点坐标值或曲线进行比较,对依据几何参数创建的模型与点云模型的齿廓进行偏差分析,以及将理论计算得到齿廓点的坐标数据导入到模型中生成齿廓的点线面,具体设计过程和方法如下。

1 点云逆向设计

变比齿条齿扇的逆向设计过程包括:取得点云数据,创建点云的基准轴、基准面和坐标系,点云的坐标系定位和调整,创建各参考截面,将截面上云点转化成特征点,最后输出特征点坐标数据,并通过对齿条和齿扇截取面上齿廓点分析,推算出基本几何参数。点云处理主要应用 CATIA 软件中外形设计的点云处理、曲面快速重建和创成式外形设计模块。

1.1 取得点云数据

使用 3D 扫描仪(如型号 Pomer-RA-7520)对齿扇和齿条进行扫描,正式扫描前设置定位标点、校准扫描仪、调整参数,尽量减小扫描误差。通过全方位扫描,获得初始的点云数据,经过预处理、降噪处理、孤立点处理、非连接项处理等,输出为 stl、iges 等格式的点云数据^[5-7]。文献[8]中提出了影响扫描精度的因素及改进措施,参照相关方法尽量提高 3D 扫描精度。在 CATIA 的点云处理模块,导入齿扇(如图 1 转向摇臂轴)和齿条(如图 2 转向螺母)的点云数据。

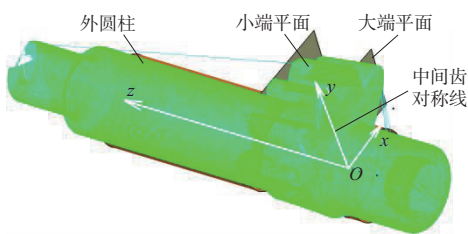


图 1 转向摇臂轴点云图

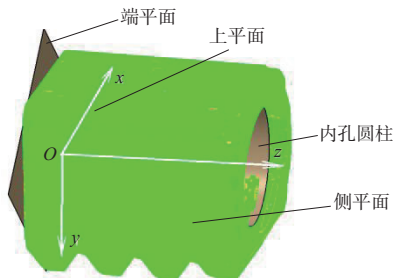


图 2 转向螺母点云图

1.2 创建点云基准轴、基准面和坐标系

进入 CATIA 曲面快速构建模块,使用基础曲面重构(basic surface recognition)工具,创建齿扇的基准轴和基准面如图 1 所示。基于基准轴和面设置坐标系,以外圆柱轴线和大端平面交点为坐标原点,以外圆柱轴线为 z 轴,以中间齿左右齿廓对称线为 y ,遵守右手坐标规则设置 x 轴。齿扇 y 轴的创建如图 3 所示,以原点为圆心创建多个同心圆弧,圆弧与中间齿的两侧齿廓相交两点,取同弧对应两点连线的中点,连接原点与各中点的连线并不重叠,所以对称轴线有误差,取均值或中间值会减小误差。齿条的基准轴和基准面如图 2 所示,设置坐标系以内孔圆柱轴线与端平面交点为原点,以内孔圆柱轴线为 z 轴,以平行于端平面与上平面交线方向为 x 轴,以平行于端平面与侧面交线方向为 y 轴。

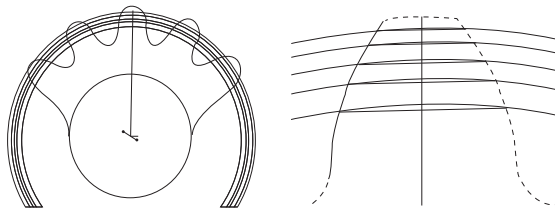


图 3 创建齿扇 y 轴示意图

1.3 点云坐标系的定位和调整

点云的坐标系与设计模型的参考坐标系是没有关联的,需要将上述创建的点云坐标系与模型设计参考坐标系重合。在点云处理模块有几种方法可以实现,如用罗盘对齐、用球状特征对齐、按约束移动点云等。此处装配模块,采用约束上述点云的基准轴和基准面与模型中的参考面的方式使轴系重合,然后将装配从产品生成 CATPart,输出的零件的坐标系就与参考坐标系重合。提前调整好点云在设计模型中的位置,便于后续创建截面、提取点坐标数据。

1.4 创建各参考截面

点云是整体数据,不能对单独点提取信息,而且点数量很多,为了减少工作量和简化后续处理,进行截取参考截面,具体操作如下:进入点云处理模块,使用截取面(planar sections)工具,创建齿扇截面(图 4)和齿条截面(图 5),在结构树中显示出所有截面特征。使用过滤器(filter)控制选择点的数量和间距筛除过密云点,使用移除(remove)删除偏差过大的云点。

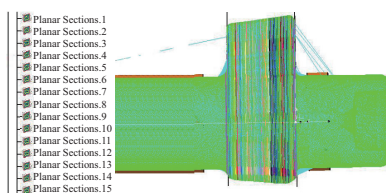


图4 齿扇截面图

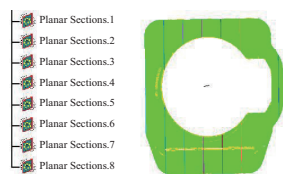


图5 齿条截面图

1.5 将截面上云点转化成特征点

截面得到的云点,能反映出截面形状,但不能取得点坐标。CATIA V5 R21 及以上版本可以使用点云/点变换工具直接转化成特征点。CATIA V5 R21 以下版本没有此功能按钮,需要通过坐标点方式创建点,点选云点创建点,此方法比较繁琐。

1.6 输出特征点坐标数据

所有点创建完后,可以使用知识工程中“设计表”工具,将点的坐标值输出到 Excel 表中,也可以进行宏程序开发,程序会遍历并测量几何图形集内的每一个点元素,测量点的绝对坐标值,并输出坐标值。下面使用 GetCoordinates Coord 语句,将“点集”中所有点的坐标数据直接输出为设定的名称和格式的文件,并保存到指定位置,关键程序段如下:

```
i = 1
Dim iPoint
For Each iPoint In body1. HybridShapes
Dim Coord(2)
iPoint. GetCoordinates Coord
Sheet1. cells(i + 1, 1) = iPoint. Name
Sheet1. cells(i + 1, 2) = Round( Coord(0), 6)
Sheet1. cells(i + 1, 3) = Round( Coord(1), 6)
Sheet1. cells(i + 1, 4) = Round( Coord(2), 6)
i = i + 1
Next
.....
myPath = "E:\工作-2024\坐标点\"
dateString = Format( Date, "yyyy-mm-dd" )
timeString = Format( Time, "-hh-mm-ss" )
newName = "点坐标-" & dateString & timeString & ".xlsx"
wb. SaveAsFilename; = myPath & newName
End Sub
```

程序运行完毕,输出坐标点数据表如图6所示。

	A1				
	A	B	C	D	
1		Coord/X	Coord/Y	Coord/Z	
2	点_591	548.7704	-27.5675	269.9236	
3	点_592	548.6339	-27.9041	270.0477	
4	点_593	548.5121	-28.1898	270.1577	
5	点_594	548.3583	-28.5643	270.2972	
6	点_595	548.1839	-28.9666	270.4544	
7	点_596	548.0038	-29.3532	270.6153	
8	点_597	547.8247	-29.6251	270.7697	
9	点_598	547.6442	-29.8686	270.924	
10	点_599	547.4617	-30.1215	271.0802	
11	点_600	547.2786	-30.3609	271.2362	
12	点_601	547.0948	-30.6022	271.3929	
13	点_602	546.9107	-30.8327	271.5493	
14	点_603	546.7266	-31.0515	271.7051	
15	点_604	546.541	-31.3101	271.864	

图6 坐标点数据表

1.7 推算齿条齿扇基本几何参数

对齿条点云模型进行分析,图7为截取齿条的一个剖面,推导出齿条齿廓的节距、中位模数、齿形角、齿条中位参数。中位模数是齿条模数即齿扇的中间位置的理论模数,中位模数与 π 乘积为节距,齿条中位是齿与槽宽相等处的中位线到螺母轴线的距离。对齿扇点云模型进行分析可以估算出全齿数、切削角、齿扇宽、削顶径等参数,基于基准截面得出齿外圆直径和分度圆直径,齿顶圆直径与分度圆直径差值的一半与中位模数的比为齿扇顶高系数,齿条中位与齿扇基准截面分度圆半径的和即为中心距。削顶径可直接测量,其作用是为了避免大端齿顶尖点。偏心距是齿扇轴心与支撑轴径的偏心量。假设偏心距和变位系数都为0,后续再进行优化调整。

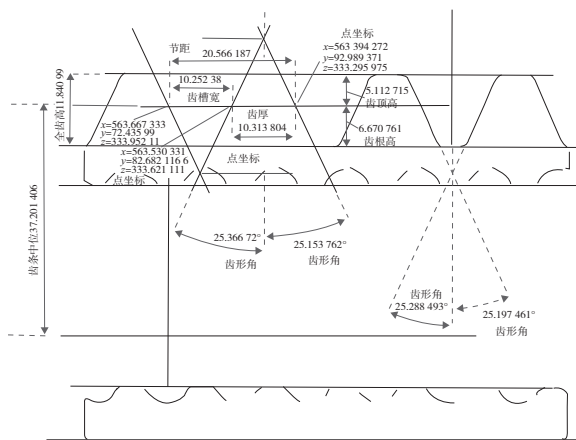


图7 齿条截面分析图

如果有条件可以使用循环球方向机检测试验台,进行输入输出传动比试验得到传动比曲线,获得传动比、变比起始角、变比终止角参数。

2 齿廓曲线理论计算

在理论计算方面,很多专家对变比齿条齿扇齿廓的数学模型进行过研究^[9-13],此处不做具体

说明。

2.1 变比齿条齿扇的相关理论研究

对变比齿条齿扇齿廓的研究有很多的文献资料。如文献[14]中按转向器的变比曲线计算出齿条与齿扇的传动关系,依此传动关系利用啮合原理解析法来求解变比齿廓曲面数据,再用齿条刀具模拟加工变比齿扇的齿廓曲面,通过数据点的向量外积来判断其有效性,依此可剔除无效齿廓数据点。选用共轭原理解析法,根据齿条的廓线方程和变比函数,求解齿扇齿廓参数方程,并通过在 Matlab 编程中实现变传动比齿条齿扇的二维建模。基于包络区间的变厚变比齿廓分段方法及齿轮元思想,提出变厚变比齿廓点的求解方法,建立变厚变比齿廓点计算的数学模型;设计变厚变比齿廓包络区间及变厚变比齿廓点云的求解算法。如文献[15]和文献[16]讲述了偏心齿扇的传动特性和传动比修正,按偏心旋转变化规律,在摇臂轴转角的各瞬时点上,用期望的传动比减去偏心齿扇所引起转向器传动比变化量来进行修正。文献[17]和文献[18]标准中提供了变比曲线表达式和齿条与非偏心齿扇传动关系式和各参数说明。

2.2 齿条位移与齿扇转角变比传动公式

如图 8 所示,提取常用的中凹线性变比型和中凹余弦变比型变比曲线结构形式对应的绝对齿条位移与非偏心齿扇转角传动公式,以及推算的增量齿条位移与齿扇转角传动公式。

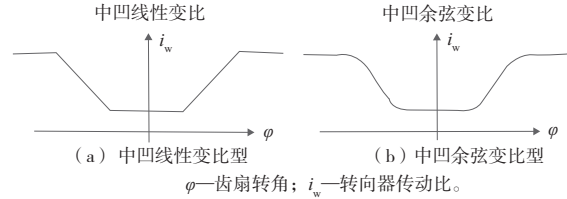


图 8 转向器变比曲线结构图

线性变比传动时,齿条的绝对位移与齿扇转角的关系式为

$$s(\varphi) = \begin{cases} i_{PA}\varphi & 0 \leq |\varphi| < \varphi_A \\ i_{PA}\varphi + \frac{b_2}{\omega_2} \operatorname{sgn}(\varphi) (|\varphi| - \varphi_A)^2 & \varphi_A \leq |\varphi| < \varphi_B \\ i_{PB}\varphi - \omega_1 b_2 \operatorname{sgn}(\varphi) & \varphi_B \leq |\varphi| \end{cases} \quad (1)$$

余弦变比传动时,齿条的绝对位移与齿扇转角的关系式为

$$s(\varphi) = \begin{cases} i_{PA}\varphi & 0 \leq |\varphi| < \varphi_A \\ b_1\varphi - b_2 \operatorname{sgn}(\varphi) \left[\varphi_A + \frac{\omega_2}{\pi} \sin\left(\frac{\varphi_B - |\varphi|}{\omega_2} \pi\right) \right] & \varphi_A \leq |\varphi| < \varphi_B \\ i_{PB}\varphi - \omega_1 b_2 \operatorname{sgn}(\varphi) & \varphi_B \leq |\varphi| \end{cases} \quad (2)$$

线性变比传动时,齿条的增量位移与齿扇转角的关系式为

$$S'(\varphi) = \begin{cases} i_{PA}S_i & 0 \leq |\varphi| < \varphi_A \\ i_{PA}S_i + \frac{b_2 S_i}{\omega_2} \operatorname{sgn}(\varphi) (2|\varphi| - 2\varphi_A - S_i) & \varphi_A \leq |\varphi| < \varphi_B \\ i_{PB}S_i & \varphi_B \leq |\varphi| \end{cases} \quad (3)$$

余弦变比传动时,齿条的增量位移与齿扇转角的关系式为

$$S'(\varphi) = \begin{cases} i_{PA}S_i & 0 \leq |\varphi| < \varphi_A \\ b_1 + \frac{b_2 \omega_2}{\pi} \operatorname{sgn}(\varphi) \left[\sin\left(\frac{\varphi_B - |\varphi - S_i|}{\omega_2} \pi\right) - \sin\left(\frac{\varphi_B - |\varphi|}{\omega_2} \pi\right) \right] & \varphi_A \leq |\varphi| < \varphi_B \\ i_{PB}S_i & \varphi_B \leq |\varphi| \end{cases} \quad (4)$$

式中: $s(\varphi)$ 为齿条位移; $S'(\varphi)$ 为齿条增量位移; i_{PA} 为中间线角传动比; i_{PB} 为两侧线角传动比; φ 为齿扇转角; φ_A 为变比起点角度; φ_B 为变比止点角度,变比转角范围从 φ_A 到 φ_B ; S_i 为循环单位步长;

$$\omega_1 = \varphi_A + \varphi_B; \omega_2 = \varphi_B - \varphi_A; b_1 = \frac{i_{PA} + i_{PB}}{2}; b_2 = \frac{i_{PB} - i_{PA}}{2};$$

$i_{PA} = \frac{P_h}{360} i_{WA} = \frac{\pi m Z_A}{360}$; $i_{PB} = \frac{P_h}{360} i_{WB} = \frac{\pi m Z_B}{360}$; m 为中位模数; Z_A 为中位齿数; Z_B 为两侧齿数; P_h 为螺杆螺距; i_{WA} 为转向器中间传动比; i_{WB} 为转向器两侧传动比。

3 创建参数化模型

在模型设计方面,使用 CATIA 的知识工程和二次开发技术创建变比齿条齿扇的参数化模型和开发自定义对话框,实现通过输入参数自动更新标准齿条、齿条刀具和齿扇毛坯模型,然后使用循环布尔减自动生成变比齿扇模型。

3.1 创建标准齿条、齿条刀具和齿扇毛坯模型

首先,创建标准齿条的参数化模型,齿条的主要参数有法向模数、齿条中位、顶高系数、齿形角、齿数、齿条中位距、齿条中位线到螺母轴线距离等,创建草绘面中齿形的尺寸、约束与参数的关系。然后,设计齿条刀具模型,齿条刀具齿顶高等于齿条齿顶高加顶隙;齿条刀具在齿条左右各增加一个齿,用于齿扇加工的最外齿廓。调整草绘面中与齿条不同的齿形尺寸、约束及参数关系等。最后,创建变比齿扇毛坯模型,包括齿扇外圆直径、扇齿数、切削角、齿扇宽、削顶径等参数,创建模型中的对应参数与尺寸约束关系,具体方法见文献[19]。将上述参数与自定义对话框中参数对应关联。啮合齿条、齿条刀具和齿扇毛坯(已加工成齿扇)模型如图9所示。

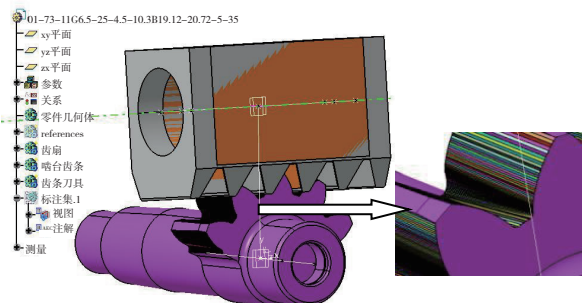


图9 参数化模型及齿廓成型图

3.2 创建自定义对话框

结合 CATIA 二次开发技术和 VBA 的窗体设计,创建基本参数(图10)和加工仿真自定义对话框(图11)。基本参数对话框中的参数包括全齿数、中位模数、起始角、终止角、齿形角、变位系数、齿条中位、中心距、切削角、齿扇宽、偏心距、顶高系数、削顶径和外圆直径,这些参数与上述模型中参数对应关联。在基本参数中输入逆向设计中推算的几何参数,点击“更新基础模型”按钮,将模型中参数重新赋值,更新齿条、齿条刀具和齿扇毛坯模型,赋值语句如:

```
Set parameters1 = part1.Parameters
Set realParam1 = parameters1.Item("齿条中位")
realParam1.Value = Val(H1.Text)
Set realParam2 = parameters1.Item("全齿数")
realParam2.Value = Val(z.Text)
.....
```



图10 基本参数对话框

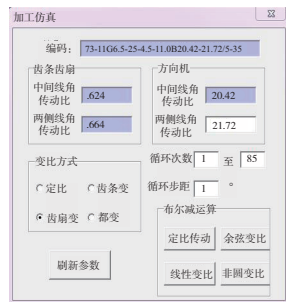


图11 加工仿真对话框

加工仿真对话框中参数包括齿条齿扇传动比(中间/两侧)、转向器(方向机)传动比(中间/两侧)、变比方式(包括定比、齿条变、齿扇变、齿条齿扇都变)、循环次数、循环步距、编码。点击“刷新参数”,根据基本参数窗口的参数计算齿条齿扇和转向器传动比。方向机两侧线角传动比根据逆向中测得的数值输入,另外传动比按下列关系式设置(参数定义如2.2中所述):

$$Me.iPA.Text = Round(\pi * m * z_A / 360, 3)$$

$$Me.iPB.Text = Round(iw_B * Ph / 360, 3)$$

$$Me.iwA.Text = Round(\pi * m * z_A / Ph, 3)$$

合理设置循环次数和循环步距,协调精度与计算速度间的矛盾关系。按照变比形式选择定比传动、线性变比、余弦变比或非圆变比,案例属于齿扇余弦变比,点击“余弦变比”按钮,模拟展成加工过程进行循环布尔减运算,生成齿扇模型的齿廓,3.3节将详细说明。

3.3 生成变比齿扇模型的齿廓

在同一个零件模型不同几何体中放置齿条刀具和齿扇毛坯。按照齿条齿扇传动比关系,齿扇旋转一个步距角度,齿条移动对应单步距离,再使用布尔减将相交的部分从齿扇毛坯上减去。循环重复上述动作,直到生成变比齿扇的全部齿廓。由于是变比传动,对应齿扇一个步距转角的齿条移动距离在不同位置是不同的,对应公式如式(3)和式(4)所示。

每个循环齿条齿扇都是在上一循环的基础上

增量变化,每次循环的齿扇旋转特征和布尔减特征(含累计移动特征的齿条)以及齿条的移动特征都会累积,多次循环后数据量很大,运算速度很慢,甚至造成内存不足和软件闪退。为了减少循环负担,固定特征复杂的齿扇,让齿条每次循环都从零点出发,完成移动和反向旋转,保证齿条齿扇相对运动。这样齿条不再携带累积特征,齿扇虽然携带累积的布尔减特征但是不需要进行旋转操作。这时齿条的移动位移和旋转角度公式见式(1)和式(2),注意旋转方向相反。具体操作流程如图12所示。

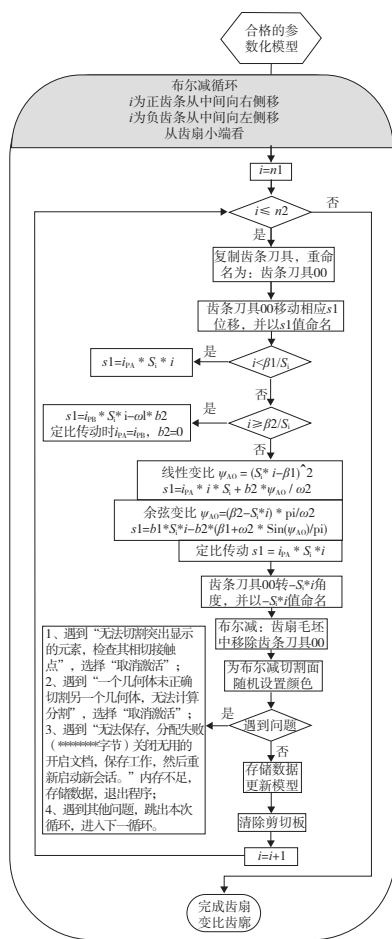


图12 布尔减循环流程图

余弦变比齿条位移程序段为

```

If i <= beta1 / Si Then
s1 = iPA * i * Si
Else
If i >= beta2 / Si Then
s1 = iPB * i * Si - omega1 * b2
Else
psiA0 = (beta2 - i * Si) * pi / omega2
s1 = b1 * i * Si - b2 * (beta1 + omega2 * Sin(psiA0) / pi)
End If

```

End If

线性变比,齿条位移程序段为

```

If i <= beta1 / Si Then
s1 = iPA * i * Si
Else
If i >= beta2 / Si Then
s1 = iPB * i * Si - omega1 * b2
Else
psiA0 = (i * Si - beta1) ^ 2
s1 = iPA * i * Si + b2 * psiA0 / omega2
End If
End If

```

程序执行完后,齿扇齿廓成型(见图9)。上述参数化模型的创建实现了输入参数自动更新齿条和齿扇的模型,高效且适用强,为传统的模型创建节约了重复操作过程,并且交互性好。整体上缩短了开发周期,提高了设计开发的效率和质量,缩短甚至省去试加工过程。

4 逆向设计与正向设计联合开发

逆向设计结合参数化模型和理论计算,具体从以下三方面进行比较、分析和关联。

4.1 点云齿廓提取的点坐标值与理论数据对比

逆向设计中对点云处理后输出齿扇齿廓上点坐标数据(图6)和推算的几何参数,基于几何参数理论计算输出点坐标数组拟合形成齿廓曲线方程,将逆向离散点坐标与理论拟合齿廓曲线在Excel线性图表中进行比较(图13)。这种方法可用于确定和优化几何参数,检验理论计算合理性,也可用于检验加工零件是否合格,验证加工方法等。

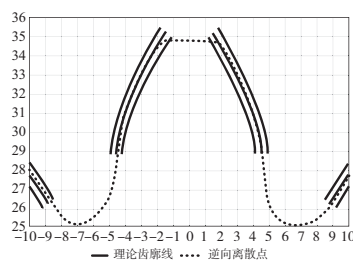


图13 逆向离散点与理论齿廓线误差检测示意图

4.2 点云齿廓与齿扇模型的齿廓进行偏差分析

将逆向设计中推算出的齿条齿扇几何参数输入到参数化模型中,更新模型,并完成展成模拟过程,生成齿条齿扇模型。将生成的变比齿扇模型和点云模型放置在同一个零件模型中,对模型和点云的齿廓进行偏差分析(图14)。可见齿廓存

在明显的偏移误差。这可能是 y 轴的定位不准确或几何参数估算偏差引起的。当遇到其他情况,如齿廓整体径向偏离,可能是变位系数设置不当;如齿廓偏差从两侧向中间逐渐加大,可能是偏心距设置不当;如齿扇的中间齿廓对应,两侧齿廓不对应,可能是设置的两侧传动比不准确或变比终止角不准确等。这种方法可用于检验和优化逆向设计推演的几何参数。

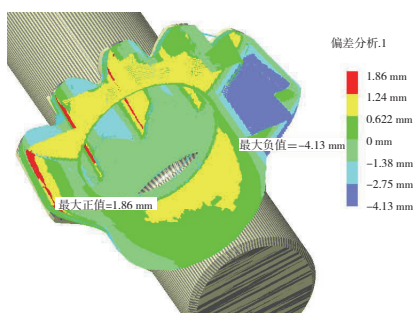


图 14 模型和点云的齿廓偏差分析图

4.3 理论计算的齿廓点坐标值或齿廓曲线导入 CATIA 生成零件模型

将理论计算得到齿廓点的坐标数据,通过 CATIA 知识工程的设计表导入到模型中,再点生成线,线生成面,由面再围成实体模型(图 15)。或者使用 Excel 自带的 Feuil1. Main 宏程序,将 Excel 文件中插入 StartLoft (开始导入)、EndLoft (结束导入)、StartCurve (开始曲线) 和 EndCurve (结束曲线) 语句,同一条曲线上的所有点放置在 StartCurve 和 EndCurve 之间,对导入的坐标点直接生成若干分段的曲线,使用多截面曲面将线生成面,封闭曲面形成实体模型。此种方法生成的齿扇齿廓与循环布尔减模拟展成加工生成的齿廓进行比较,可以实现互相检验。控制数据密度,平衡精度与数据处理量之间的取舍。

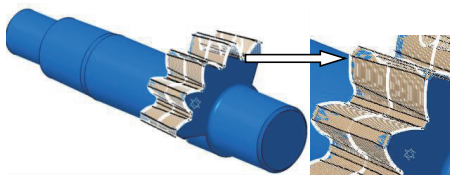


图 15 理论齿廓点生成齿廓展示图

5 结语

综上所述,从逆向设计提取到点坐标值和推导出基本几何参数,吸取先进技术或对标产品的经验,引入正向设计中,贯通逆向设计、理论计算和三维模

型之间的转化和对比,总结规律,优化参数,指导设计者综合考虑整车匹配需求、啮合特性、啮合强度等因素,选择更优的齿条齿扇设计几何参数。

参考文献:

- [1] 丁国龙,余金舫,王永龙,等. 汽车转向器摇臂轴非圆齿扇的反求设计与加工[J]. 机械设计与制造,2017(7): 201-204.
- [2] 王珍. 变比转向器非圆齿扇齿形研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2016:26-37.
- [3] 汪炜. 循环球式变比转向器齿轮副建模与动态特性分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2015:12-22.
- [4] 颜甜莉. 循环球变比转向器变厚变比齿廓数字设计与加工方法研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2017: 9-28.
- [5] 魏言标,郑磊,薛少兵,等. 基于三坐标测量和 3D 扫描的凸轮逆向建模设计[J]. 机械设计,2021,38(9): 71-74.
- [6] 陈明,王春海. 基于三坐标测量机的曲面零件逆向设计研究[J]. 微计算机信息,2006,22(6):202-204.
- [7] 王宝中,张富明,路春光,等. 正逆向设计在电动汽车外观曲面造型中的应用研究[J]. 机械设计与制造, 2018(2):131-134.
- [8] 周淑容,郑浩. 基于 3D 扫描的误差影响因素[J]. 模具制造,2021,21(10):64-67.
- [9] 牛子儒. 汽车机械变比转向器变比齿廓数字设计理论与方法研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2016:27-82.
- [10] 贺敬良,秦建旭,吴序堂. 变速比转向器齿扇设计理论研究[J]. 机械传动,2009,33(1):12-14,105.
- [11] 牛子儒,辛振波,李刚炎,等. 循环球变比转向器螺母变比齿廓数值建模与加工方法[J]. 工程科学与技术,2018,50(4):251-259.
- [12] 毛军红,李黎川,吴序堂,等. 变传动比齿条共轭曲面的数值计算方法[J]. 机械工程学报,2002,38(5): 52-55.
- [13] 张锡顺,唐俊,张伟. 汽车转向器齿条齿扇传动副的几何和啮合计算[J]. 汽车工程师,2014(2):45-47.
- [14] 侯训波,韩伟杰,王旭光,等. 偏心齿扇的循环球式转向器变传动比设计研究[J]. 机械传动,2023, 47(2):101-106.
- [15] 侯训波. 循环球转向器变比齿扇齿廓曲面的设计方法及检验方法:CN114611242A[P].2022-03-14.
- [16] 侯训波,刘莹苹. 循环球式转向器偏心齿扇的传动比修正及展成加工方法:CN114473074B[P]. 2022-11-18.
- [17] T/DLJX 0009-2023 电动循环球式转向器传动比设计[S]. 大连:大连机械行业协会,2023:1-9.
- [18] T/DLJX 0010-2023 电动循环球式转向器非偏心齿扇参数设计[S]. 大连:大连机械行业协会, 2023:1-17.
- [19] 刘莹苹. 一种汽车转向系统转向齿扇参数检验方法: CN116933428B [P]. 2024-03-29.

收稿日期:2024-06-19