

# QUINDOS STEPGR 模块在显微镜 变焦凸轮测量中的应用和开发

徕卡显微系统（上海）质量部  
徐健健

**摘要：** 本文利用LEITZ坐标测量机QUINDOS7测量软件中的STEPGR模块在测量和评定工作范围大于360度时，使用3维最佳拟合测量轴向直动圆柱凸轮运动偏差、表面偏差的方法，从而消除在测量和加工中产生的基准定位不一致的影响。并对过程中使用的计算方法进行推算。通过对向量分析和实际例子的使用进行效果验证。

**关键词：** 直纹螺旋面、垂直于螺旋面的表面偏差、轴向直动圆柱凸轮、法向向量、三维最佳拟合、运动规律（LAW）偏差。

**参考资料：** QUINDOS STEPGR模块使用手册、 复旦大学数学系编《曲线与曲面》、电子工业部教材《精密机械设计（第二版）》。

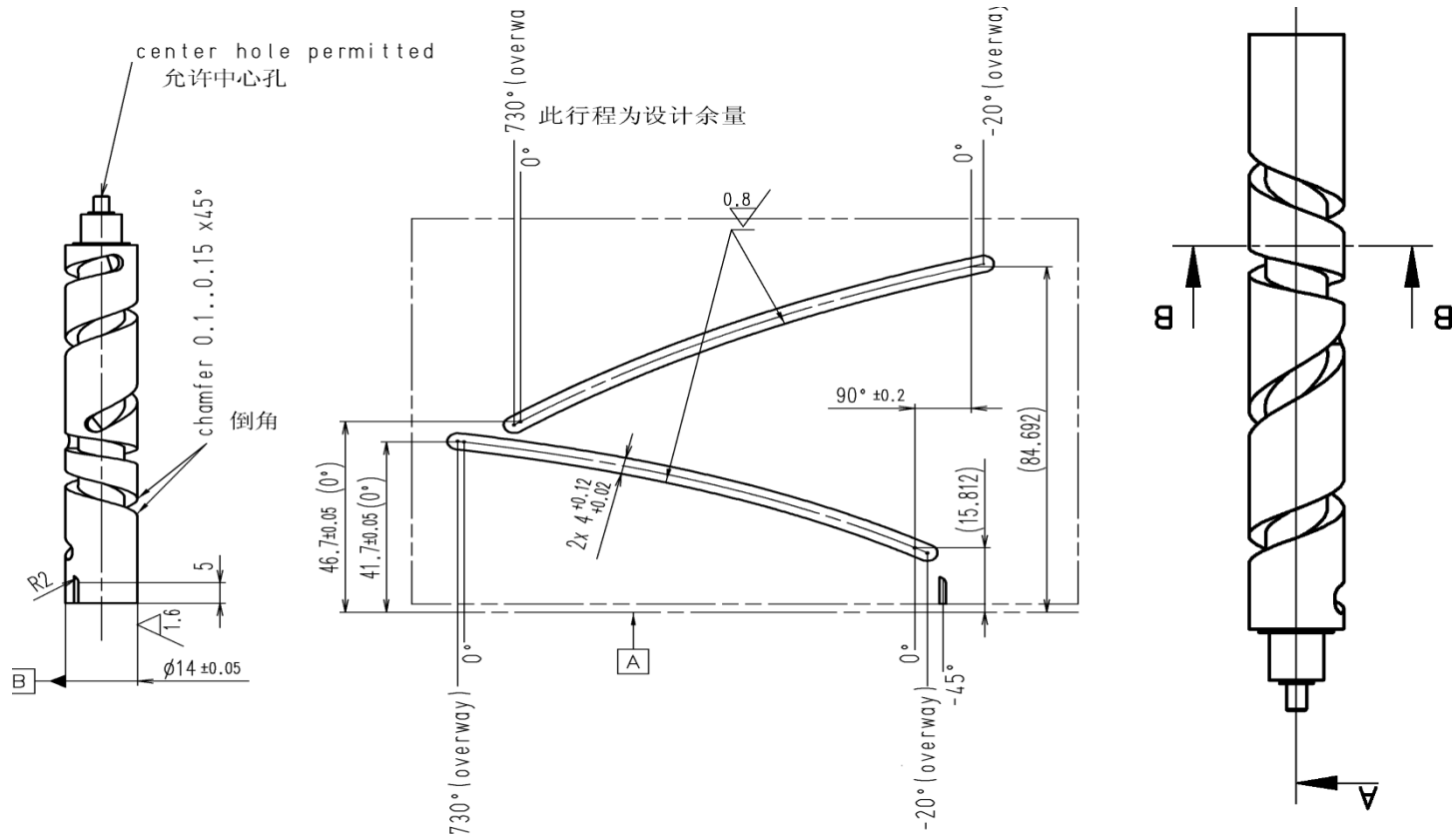
## 背景情况

手术显微镜中的自动变焦镜头的动力驱动由一组变焦凸轮（轴向直动圆柱凸轮）的旋转带动变焦镜头作无级变焦。其使用要求在驱动变焦的过程中始终保持成像的清晰，无抖动和蠕动发生。且变焦时，凸轮的工作旋转角度范围大（一般都在360度至900度之间）、形线的运动规律(Law)传递精度高，在整个工作范围内为变公差，最小的为0.003mm。在实际装配中对形线的形状有严格要求，但对其位置可适当放松（装配中适当微调）。这就要求在测量中，必须采用形线的三维最佳拟合的评定方法来消除测量和加工中定位误差的影响。况且在一般测量中，对回转体零件，坐标系的角向定位也没有很高的要求。

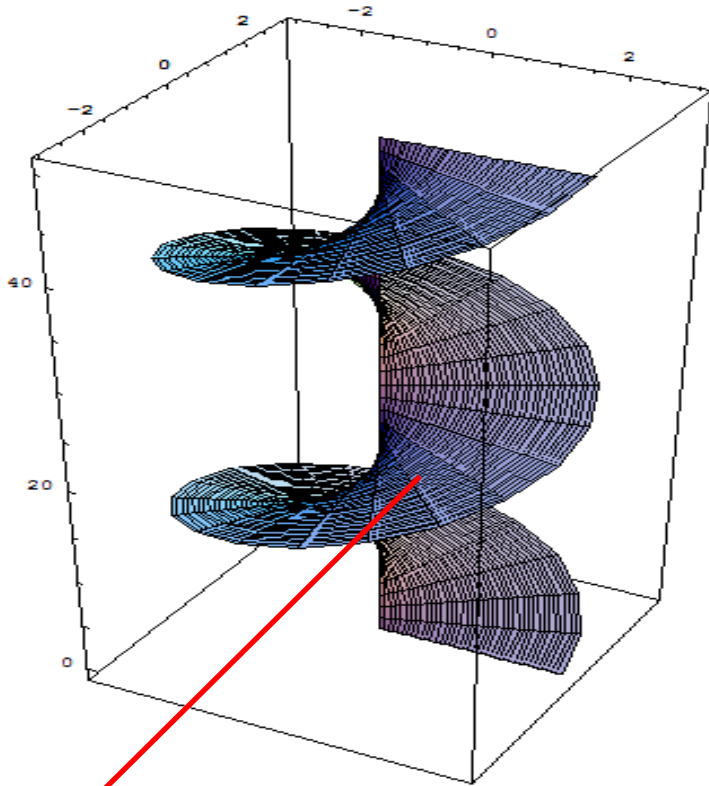
我厂在使用LEITZ测量机，Quindos7测量软件的STEPGR测量模块中，发现进行拟合功能时，该模块对于评定范围大于360度的零件不适用。限制了该模块3维拟合功能在回转大于360度的零件的使用。因此在加工、测量该类零件时产生误差，即测量结果显示零件偏差较大，但装配调试中似乎没有这么大的偏差。造成设计、加工、质量和装配意见分歧。

针对上述情况，我们考虑对STEPGR模块中轴向直动圆柱凸轮评定表面偏差程序进行修改，使其能满足公司生产需求。

# 凸轮零件示意图和展开图



# 直纹螺旋面的概念和加工



由不同的半径 $r$ 和不同的角度 $\theta$ 组成的曲线簇，互相交织组成的曲面。

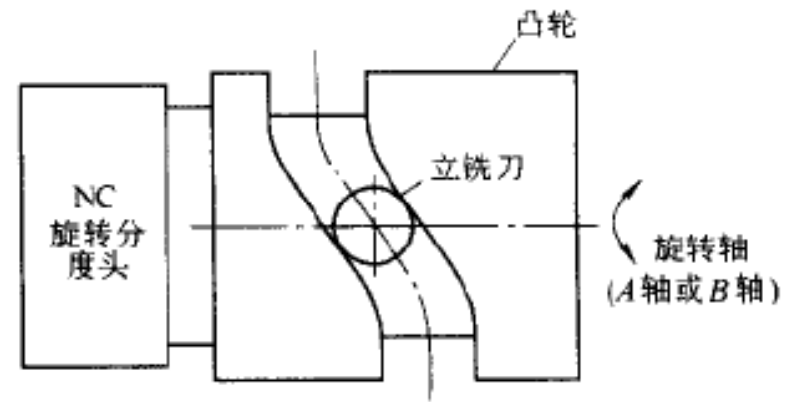
## 直纹螺旋面

$$x=r*\cos(\theta)$$

$$y=r*\sin(\theta)$$

$$z=F(\theta)$$

## 加工原理示意图



# 解决方案

为使测量满足要求，同时考虑借鉴STEPGR模块的使用。需通过测量点计算出垂直于名义螺旋面的形状偏差。即在实际测量中计算出测量点对应名义螺旋面的法向向量，进行沿此法向向量（或平行于）的偏差计算。进行如下改进：

1. 依据图纸给定的轴向直动圆柱凸轮的传递规律 $law(\theta, Z)$ ，在QUINDOS7中完成扫描测量、数据采集。
2. 利用测量出的实测点，计算凸轮各实测点垂直于名义螺旋面的三维法向向量。
3. 依据三维法向向量，将实测点往名义螺旋面中心方向进行法向偏移，得到实际测量的运动规律 $law$ 。
4. 计算相应测量点所对应的名义中心 $law$ 上的对应点。
5. 由于名义点和实际测量点是通过法向向量计算得到，则垂直于名义表面形状误差的结果可以直接通过比较计算出来。
6. 编辑修改STEPGR模块中垂直于表面的形状误差子程序，满足角度范围没有限制的需求。
7. 进行三维拟合处理后，再进行运动规律( $law$ )的计算，从而得到最佳拟合后的结果。

## 直纹螺旋面法向向量的计算

根据加工原理和设计给出的图纸数据，对于轴向直动圆柱凸轮的加工形线为直纹螺旋面，测量轨迹沿加工表面扫描测量所形成的不同半径和极角的轨迹在该螺旋面上，为直纹螺旋面上各自的测量结果点。其数学表达式为：

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \\ z = f(\theta) \end{cases}$$

它是分别由 $r$ 和 $\theta$ 二个参数，相互交织成的螺旋面参数方程。要计算螺旋面上任意点的法向量可利用偏导数的概念，分别求 $r$ 和 $\theta$ 的切向量 $N_r$ 和 $N_\theta$ 。

$$N_r = \left( \frac{\partial x}{\partial r}, \frac{\partial y}{\partial r}, \frac{\partial z}{\partial r} \right) = (\cos \theta, \sin \theta, 0)$$

$$N_\theta = \left( \frac{\partial x}{\partial \theta}, \frac{\partial y}{\partial \theta}, \frac{\partial z}{\partial \theta} \right) = (-r \sin \theta, r \cos \theta, f'(\theta))$$

由于 $N_r$ 和 $N_\theta$ 二向量不平行，它们的向量积为直纹螺旋面上对应测量点的法向向量 $N$ 。

## 直纹螺旋面法向向量的计算（续）

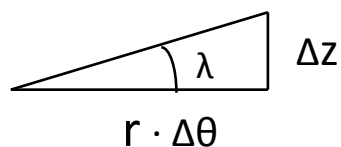
则法向向量的向量积： $\mathbf{N} = \mathbf{N}_r \times \mathbf{N}_\theta = ( \sin \theta \cdot f'_\theta , - \cos \theta \cdot f'_\theta , r )$

单位法向量： $\mathbf{n} = ( \mathbf{u}, \mathbf{w}, \mathbf{w} ) = \left( \frac{\sin \theta \cdot f'_\theta}{\sqrt{f'^2_\theta + r^2}}, - \frac{\cos \theta \cdot f'_\theta}{\sqrt{f'^2_\theta + r^2}}, \frac{r}{\sqrt{f'^2_\theta + r^2}} \right)$

式中： $f'_\theta = \frac{\Delta z}{\Delta \theta}$

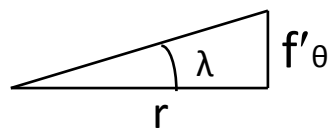
$r =$  测量圆极径

考虑编程方便、简化运算。不同的扫描测量半径其螺旋升角是不同的，引入螺旋升角  $\lambda$  计算。在凸轮测量数据展开图上 截取一段微区间，如图所示。弧长= $r \cdot \Delta \theta$



$$\tan \lambda = \Delta z / (r \cdot \Delta \theta) = \frac{\Delta z}{r \cdot \Delta \theta} = \frac{f'_\theta}{r}$$

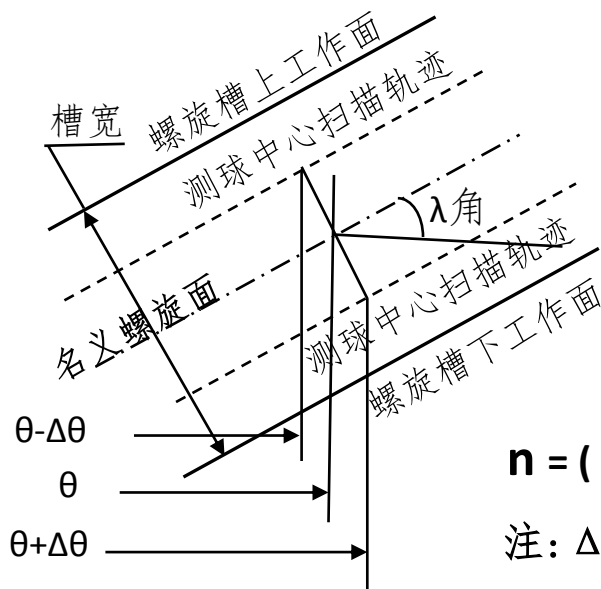
则： $\sin \lambda = \frac{f'_\theta}{\sqrt{f'^2_\theta + r^2}}, \cos \lambda = \frac{r}{\sqrt{f'^2_\theta + r^2}}$  因此上式可写成：



单位法向量： $\mathbf{n} = ( \mathbf{u}, \mathbf{w}, \mathbf{w} ) = ( \sin \theta \cdot \sin \lambda , - \cos \theta \cdot \sin \lambda , \cos \lambda )$

## 直纹螺旋面法向向量的计算（续）

给定一组数据或测量得到一组数据，就可以通过上面公式计算出相应的法向量。注意到，法向量与  $\theta$  角有关，式中的  $\theta$  角为各测量点在同一坐标系下的极角，在同一评价半径  $r$  处  $\lambda$  角相同。由于存在螺旋升角  $\lambda$  的关系，测量点与名义螺旋面上相应点的  $\theta$  角是不同的，存在一个差值  $\Delta \theta$ 。如图：



依据几何投影关系： $r \cdot \sin \Delta \theta = a \cdot \sin \lambda$ ， $\Delta \theta = \sin^{-1}(a \cdot \sin \lambda / r)$

式中： $r$  - 扫描测量半径(工作轨道半径, 图纸给出)

$a$  - 名义螺旋面至扫描测球中心的距离，实际测量中为 (滚轮半径 - 测针球半径)，为已知数。

因此，名义螺旋面上垂直于测量点单位法向量计算式：

$$\mathbf{n} = (U, W, W) = (\sin(\theta + / - \Delta \theta) \cdot \sin \lambda, -\cos(\theta + / - \Delta \theta) \cdot \sin \lambda, \cos \lambda)$$

注： $\Delta \theta$  前面的符号随螺旋面的左右旋向和上下测量面而定。

至此，通过测量点计算名义螺旋面上法向量的计算式准备完毕。

# 测量结果验证

依据上面的计算公式和各测量点在坐标系中各自对应的  $\theta$  和  $\lambda$  角度值,编写子程序嵌入STEPGR模块中。分别计算各测量点在空间坐标系中垂直于名义螺旋面的三维法向量  $(u, v, w)$ , 沿此方向 (或平行于) 为计算和评定垂直于名义螺旋面的表面偏差结果。

在测量计算中, 由于得到的是垂直于名义螺旋面的表面偏差, 且通过计算实际law的结果而得到, 因此可以计算出实际law的运动规律偏差和通过扫描测量上下二滚道工作面, 也可以计算出整个槽工作范围内宽度偏差的变化。因此, 通过扫描测量可同时得到law的运动规律偏差、垂直于名义螺旋面的表面偏差和整个工作范围内滚道槽宽度的偏差这三项测量要求。

## Q7 STEPGR 测量程序

!! Build CSY

BLDCSY (NAM=CSY\_E, TYP=CAR, SPA=CYL\_A, SDR=+Z, PLA=XDIR\_A, PDR=X, XZE=CYL\_A, YZE=CYL\_A, ZZE=Z\_ZER)

!! CAM GENERATE AND MEASUREMENT

USECSY CSY\_E

STEPGR (PAR=STEP\_PAR, CSY=CSY\_E, MES=Y, DEV=N, BCK=N, TRA=N, PAT=N, FIT=N)

!! EVALUATION & OUTPUT

START (WKP=HELICAL\_CAM, TOP=N)

PLS\_DELPAGE (ALL=Y)

PLS\_USEPLOTTER (DEV=PDFCreator)

!! Before Bestfit

STEPGR (PAR=STEP\_PAR, CSY=CSY\_E, MES=N, DEV=Y, BCK=N, TRA=Y, PAT=N, FIT=N)

!! Bestfit

STEPGR (PAR=STEP\_PAR, CSY=CSY\_E, MES=N, DEV=N, BCK=N, TRA=N, PAT=N, FIT=Y)

!! After Bestfit

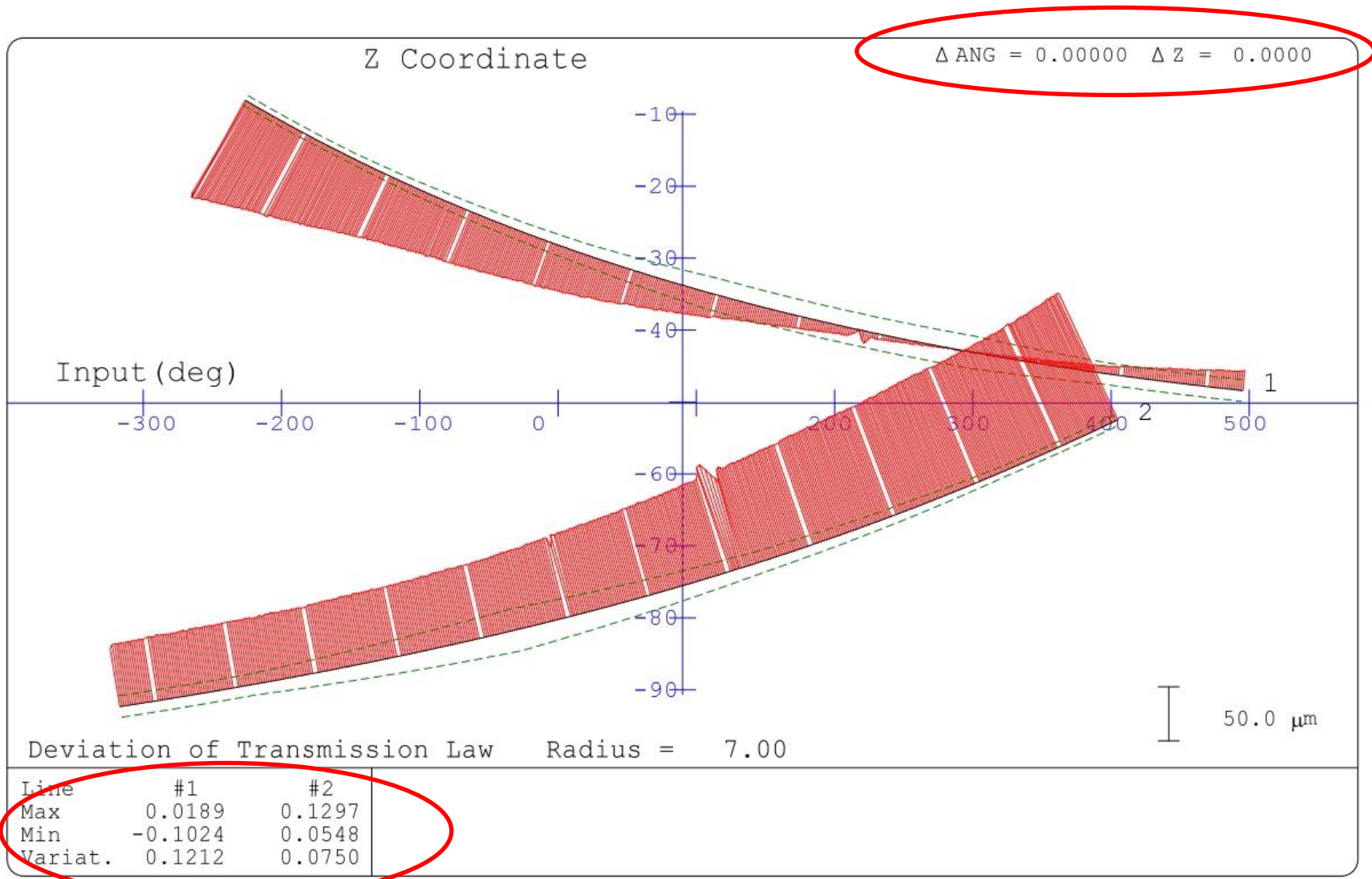
STEPGR (PAR=BFIT\_PAR, CPY=STEP\_PAR, CSY=CSY\_FIT, MES=N, DEV=Y, BCK=N, TRA=Y, PAT=N, FIT=N)

END

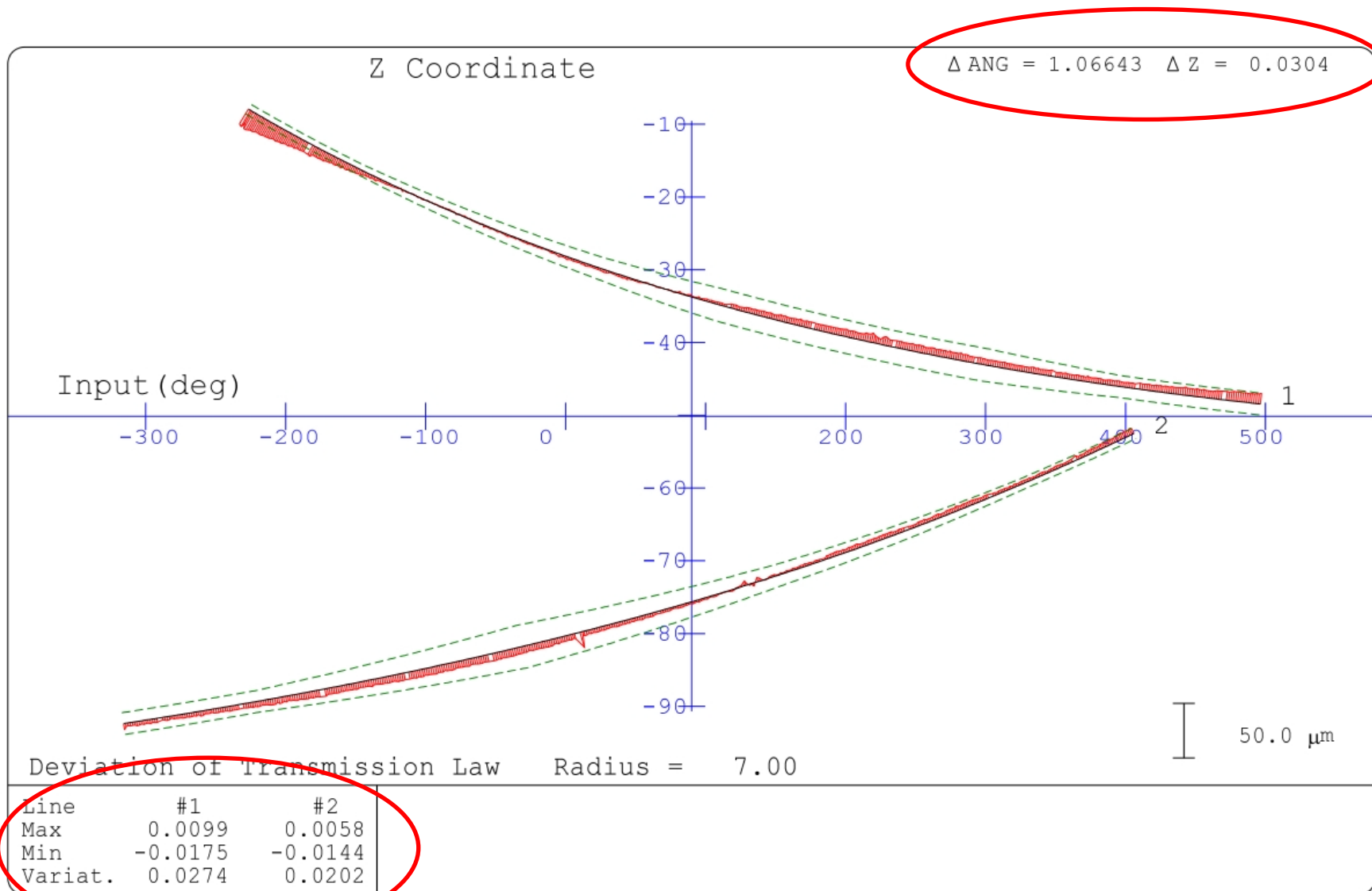
## 子程序中使用的主要 QUINDOS 指令代码

指令	目的
TRAELE	测量数据在直角坐标系和柱坐标系中相互转换
ACNOPT	计算垂直于理论螺旋面的偏差
ADJANG	调整数据在360度后显示361, 362 .....
ECON2D	计算各测量点在理论LAW中的相对位置
DIFF2D	求导数 $f' = dy/dx$
GENPTS	计算各测量点的三维法向向量(U, V, W)
MRGAPT	元素间各区域的数据交替和互换
SHFPTS	测量数据沿方向向量(U, V, W)偏移

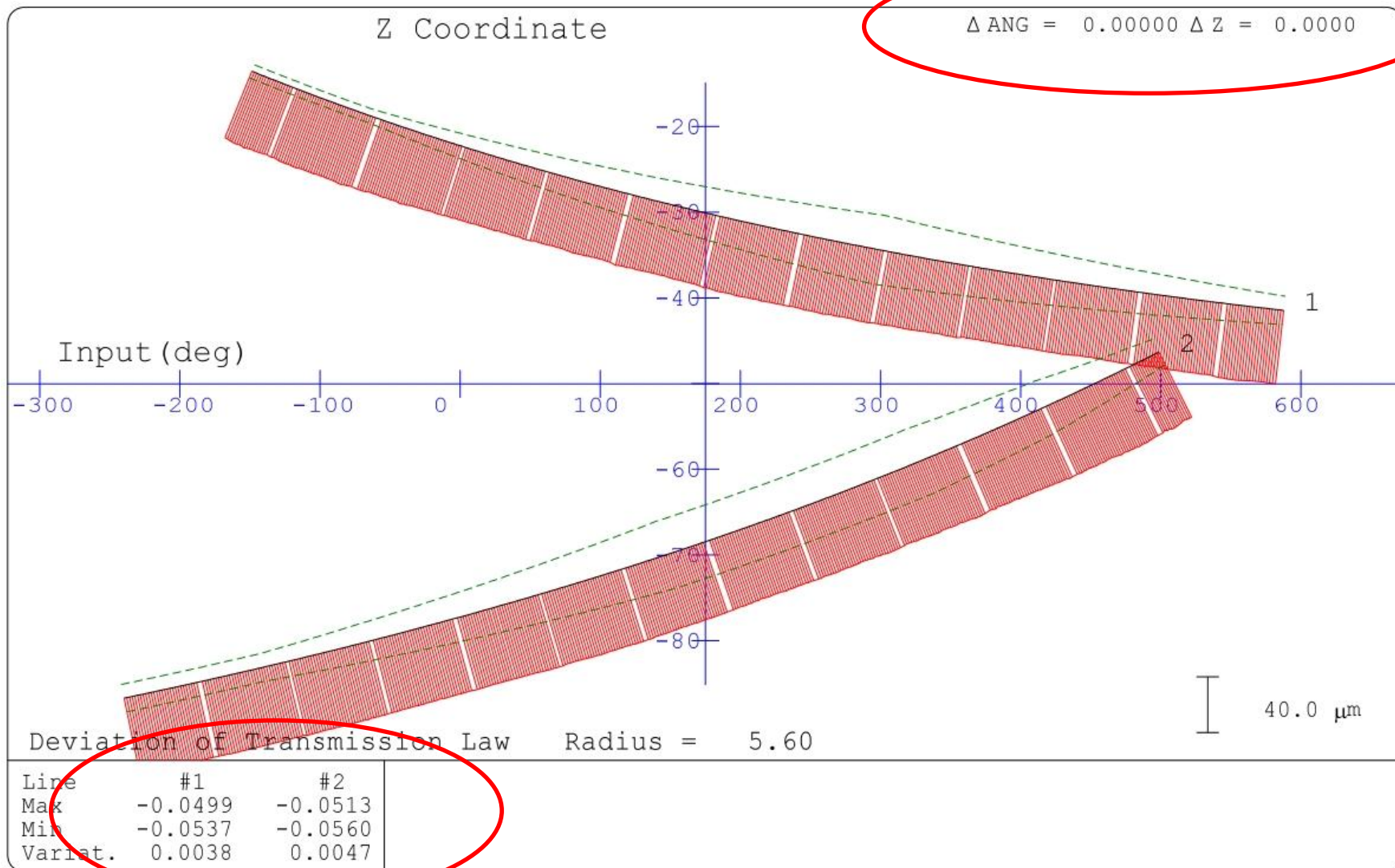
# 拟合前的测量结果(零件A)



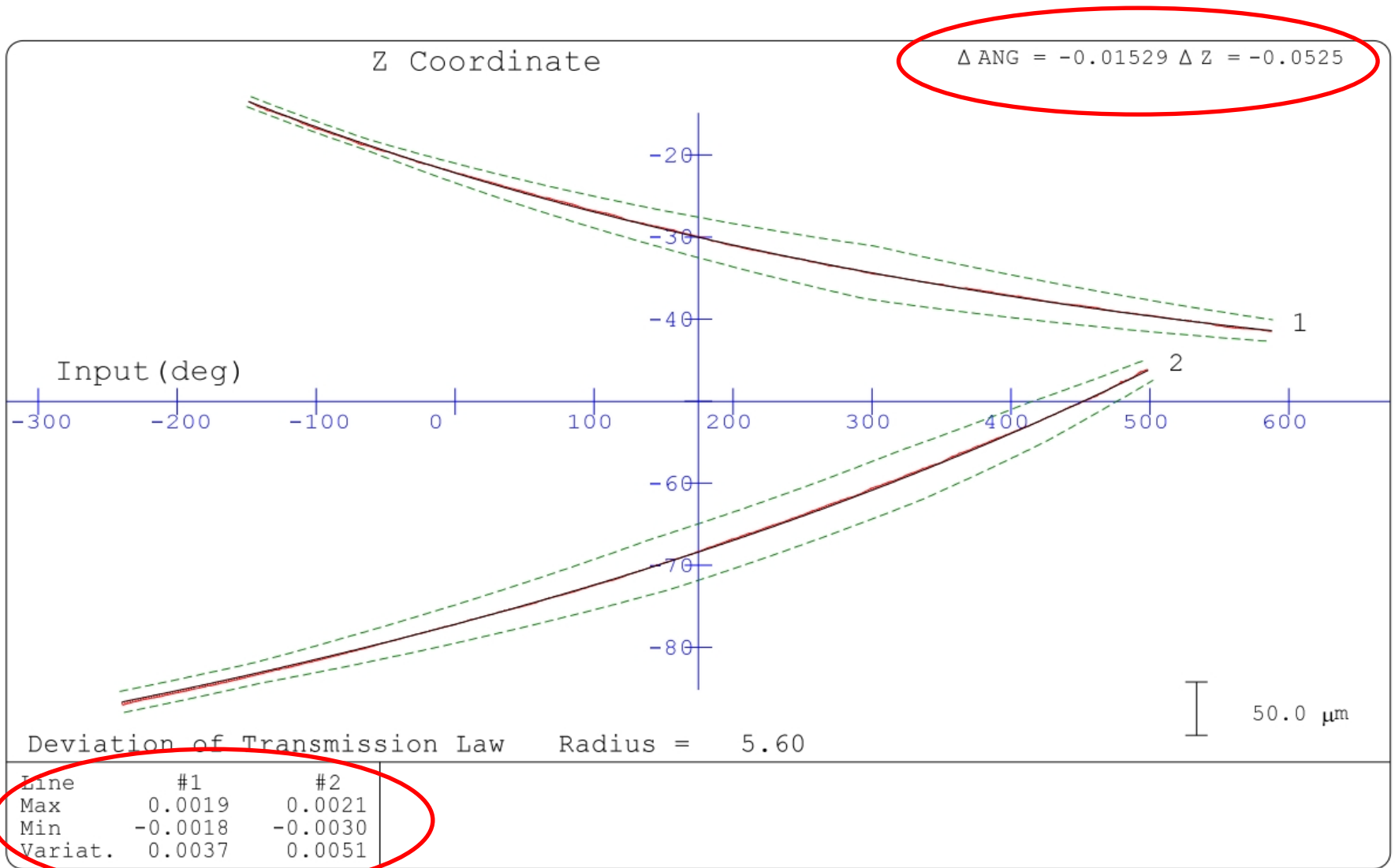
# 拟合后的测量结果(零件A)



# 拟合前的测量结果(零件B)

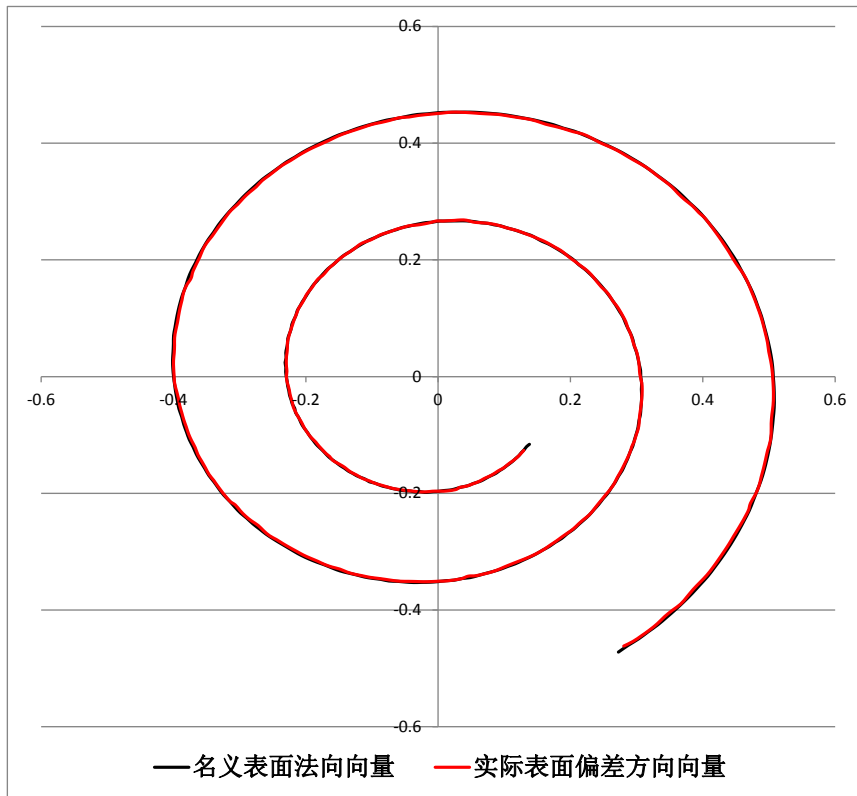


# 拟合后的测量结果(零件B)

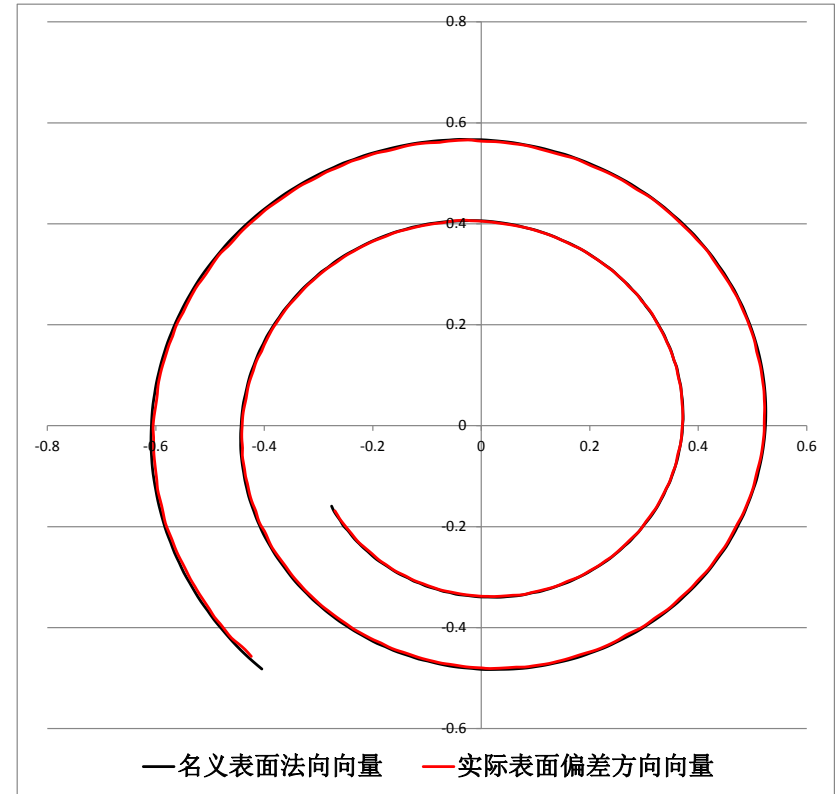


# 垂直于螺旋面偏差方向向量分析

下测量面

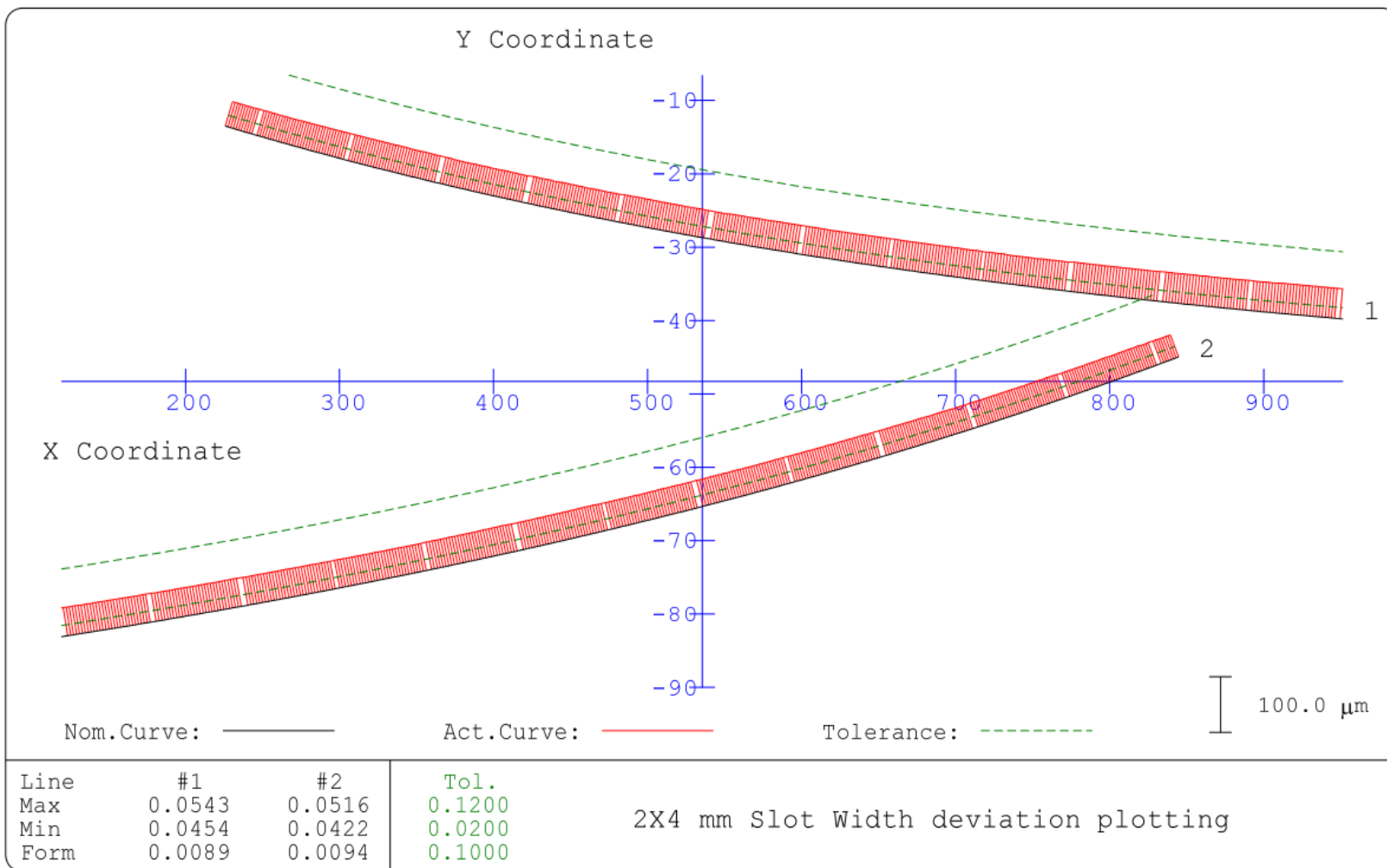


上测量面

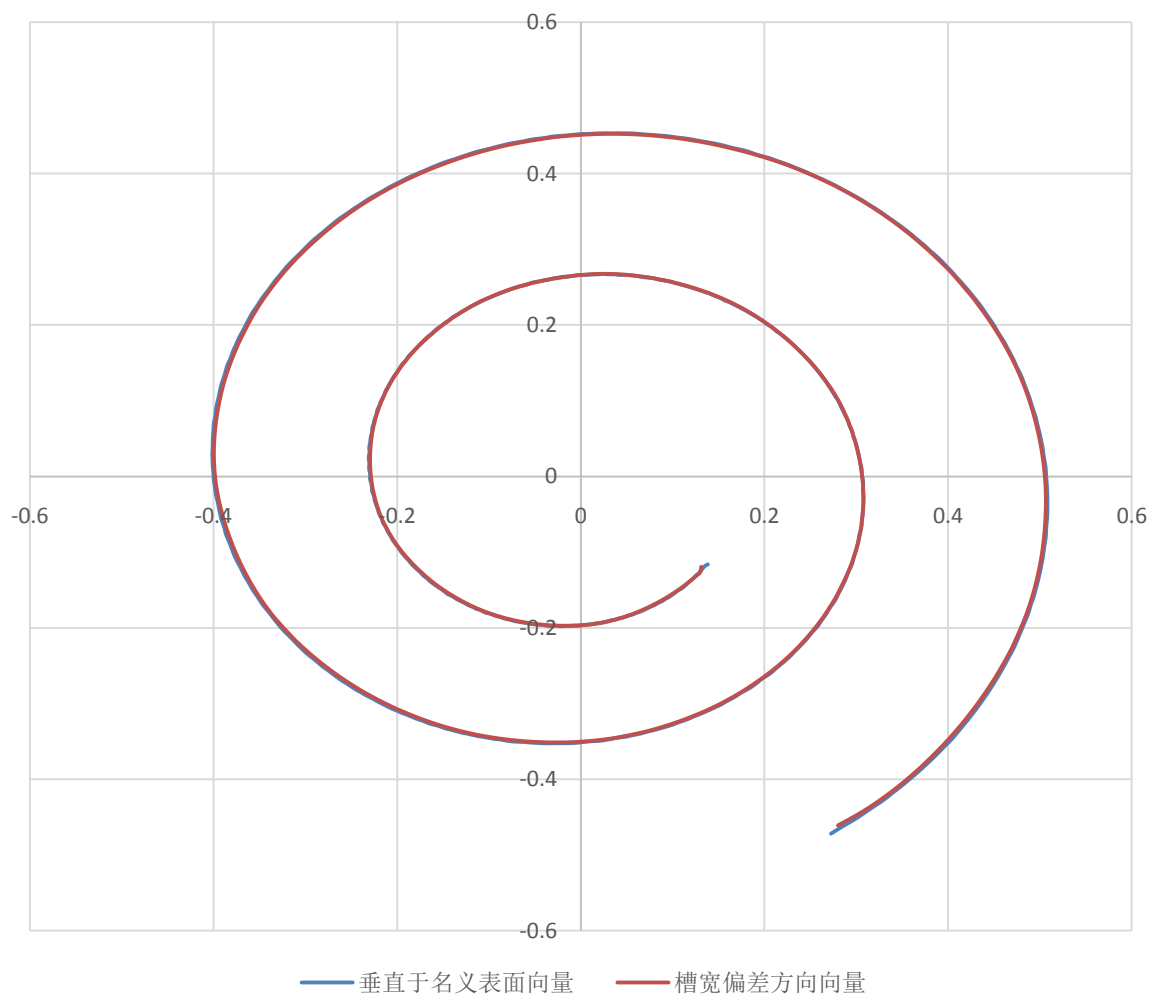


偏差评定方向和理论螺旋面法向向量(u, v)重叠一致。

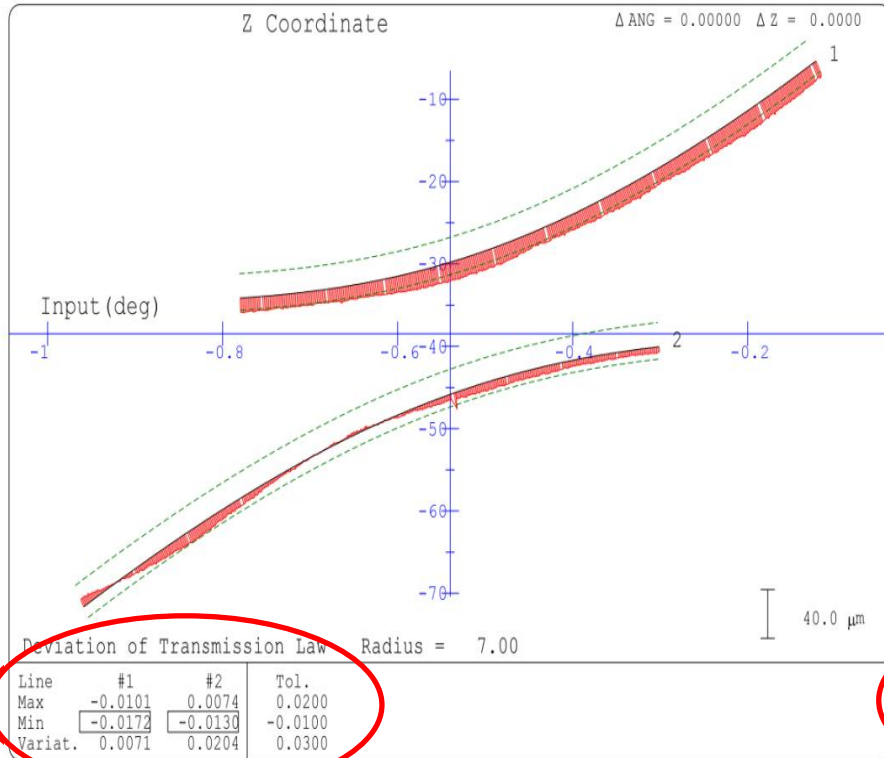
# 滚道槽宽度 (Slot Width) 偏差测量结果



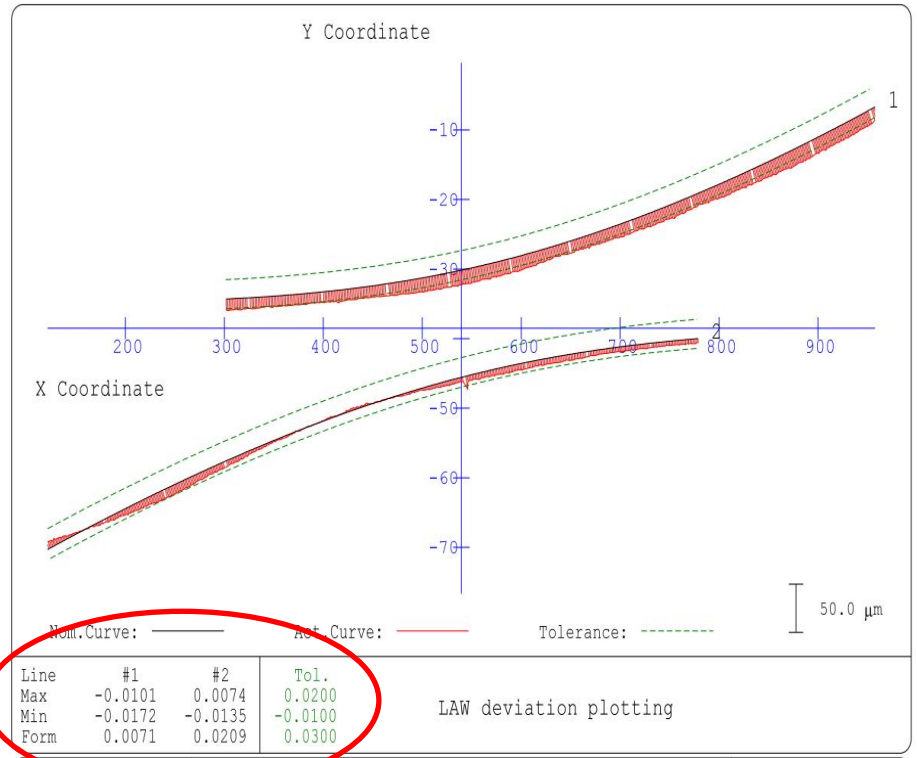
## 滚道槽宽度偏差方向向量 (U,V) 分析



# 运动规律LAW与STEPGR模块计算结果比较

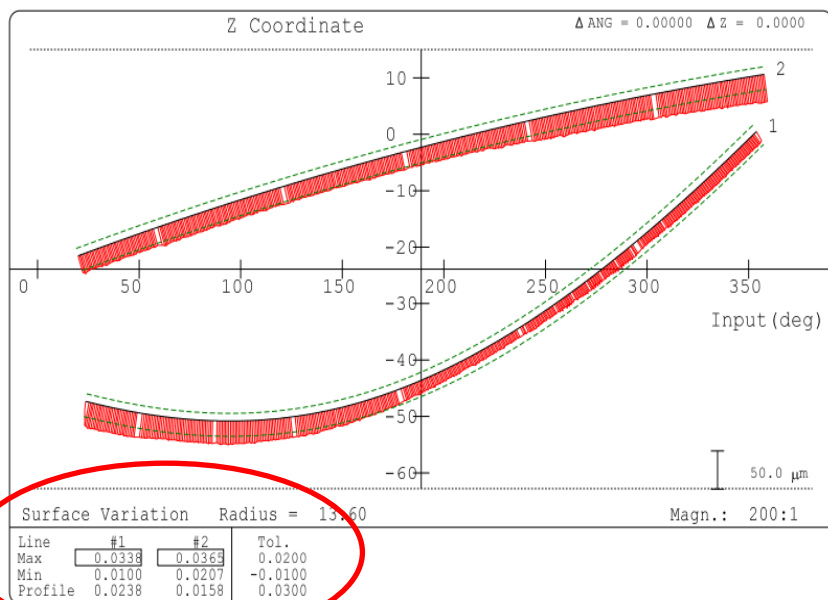


STEPGR模块计算结果

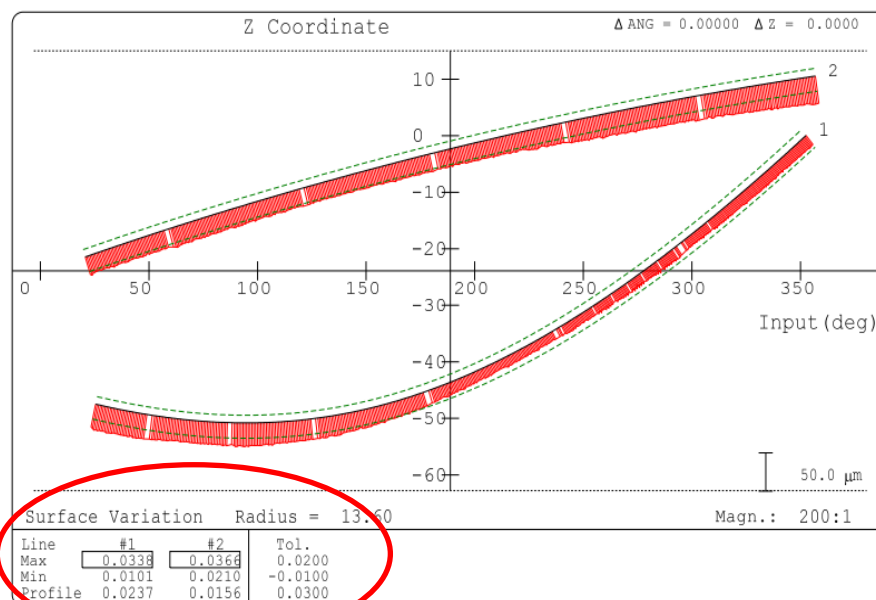


本文计算方法测量结果

# 与STEPGR模块结果比较 (小于360度零件) 表面形状偏差

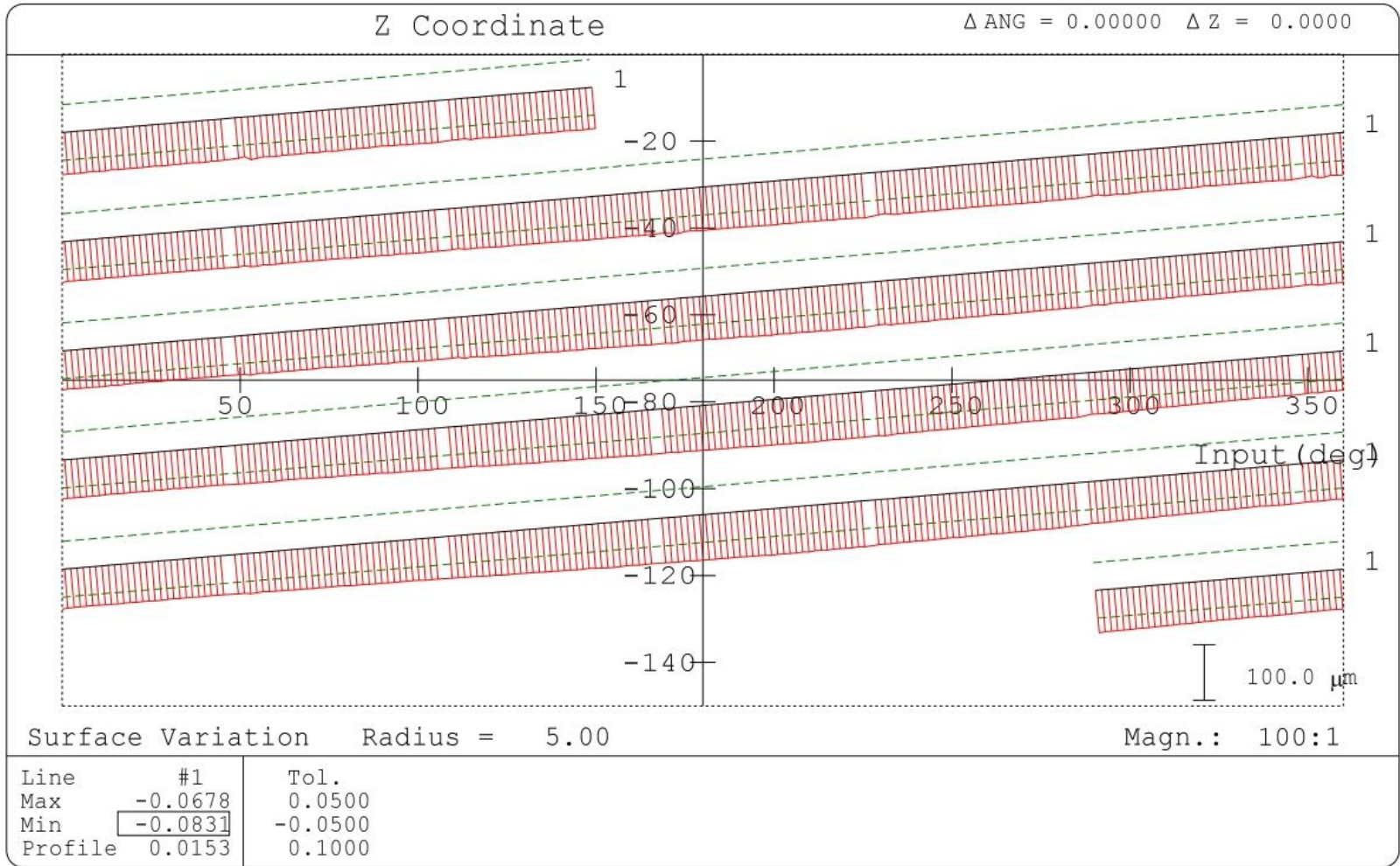


STEPGR 模块测量结果



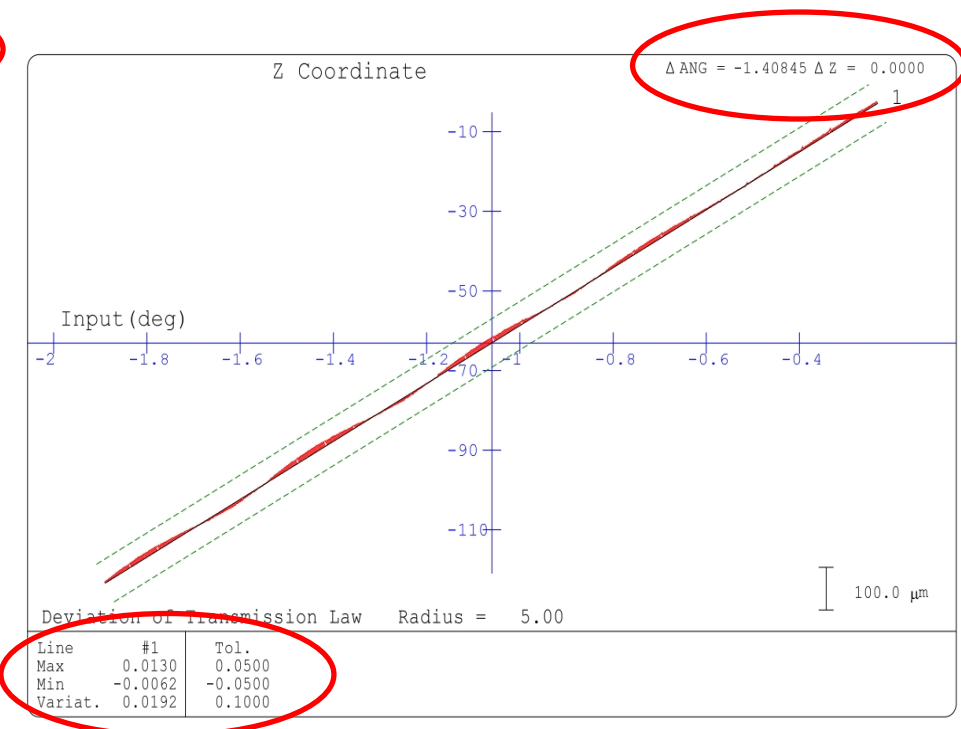
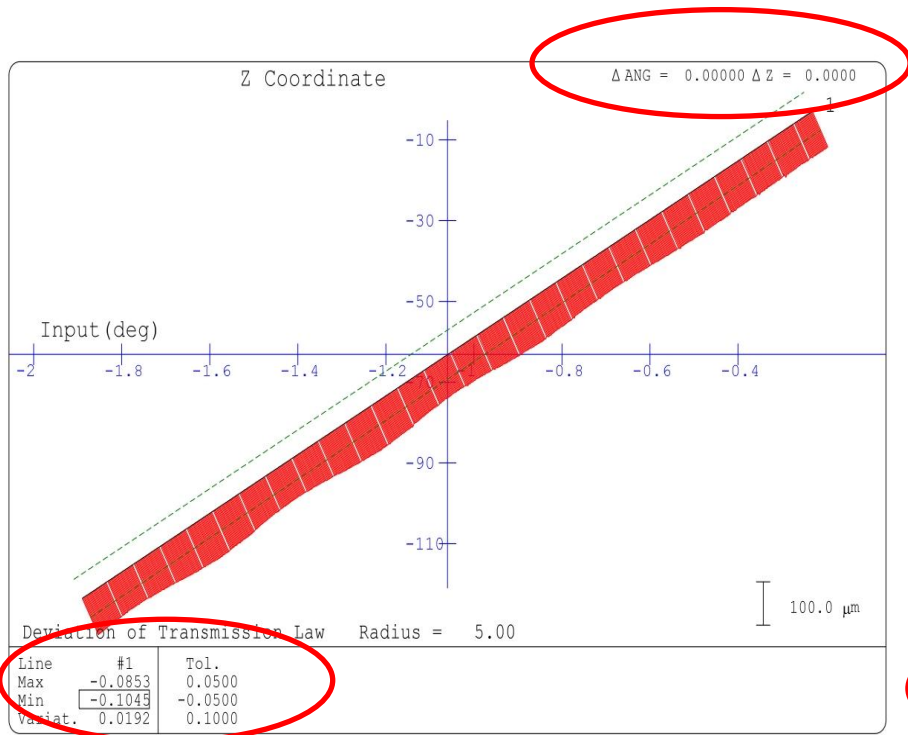
本文计算方法测量结果

# 测量一螺杆零件（近5圈约1600度）



拟合前的表面形状偏差

# 测量一螺杆零件（续）（近5圈约1600度）



运动规律偏差Law拟合前、后测量结果对比

# 结束语

从拟合前、后的测量结果图形中看出，拟合后稍加偏移或旋转（实际中旋转影响较多），形线的位置偏差和形状偏差大大缩小，其原因是由于测量中的定位基准和加工、装配基准不一致（或测量定位时偏差较大）所导致的，拟合后的结果才是零件的实际偏差。

坐标测量中的拟合处理是解决坐标系建立、测量定位的一种很好的方法。特别是回转体零件，它可以消除测量和加工基准不一致所产生的定位偏差，从而得到被测零件的实际偏差。对于质量检测人员需引起重视。

对于蜗杆摆动凸轮和圆柱摆动凸轮，由于其工作范围一般小于360度，STEPGR模块完全适用，是一款很好的专用模块。

轴向直动圆柱凸轮，由于其加工容易、能够实现所要求的任意运动规律、刚性好且装配方便、寿命长等优点。在机械制造行业有着广泛的应用，如纺织机械中的往复凸轮，槽筒等。均可根据公司自身的要求编写出完整的测量程序。

完稿于2022年春