

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200910084275.7

[51] Int. Cl.

G01B 11/24 (2006.01)

G01B 11/06 (2006.01)

G01B 11/03 (2006.01)

G01B 11/00 (2006.01)

[43] 公开日 2009年10月7日

[11] 公开号 CN 101551240A

[22] 申请日 2009.5.15

[21] 申请号 200910084275.7

[71] 申请人 北京工业大学

地址 100124 北京市朝阳区平乐园100号

[72] 发明人 石照耀 林家春

[74] 专利代理机构 北京思海天达知识产权代理有限公司

代理人 张慧

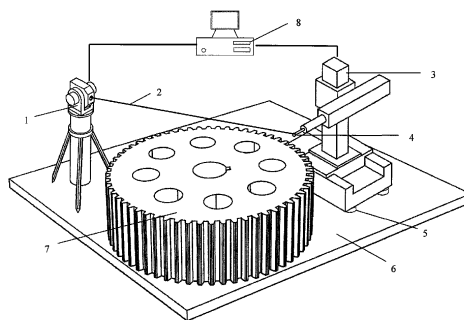
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

[54] 发明名称

基于激光跟踪技术的大型齿轮测量方法

[57] 摘要

本发明是一种利用激光跟踪仪的大型齿轮测量方法，能够对直径大于500mm的齿轮进行测量，特别适合3000mm的特大型齿轮测量。本发明通过拟合的方法先确定被测齿轮的端面，然后再确定被测齿轮的轴线，进而建立了被测齿轮坐标系。再利用激光跟踪仪建立三坐标测量单元沿三个运动轴的坐标系统，然后通过坐标变换建立被测齿轮坐标系和三坐标测量单元的坐标变换关系。测量前，根据测量参数的不同，对三坐标测量单元进行标定，标定的结果用于对测量误差的补偿。本发明首次将激光跟踪仪应用到大齿轮测量当中，实现对直径大于500mm大齿轮的齿形、齿向、接触线、齿厚、齿面三维拓扑误差的测量，为大齿轮的测量提供了一种新的高精度测量手段。



1、基于激光跟踪技术的大型齿轮测量方法，其特征在于，该方法包括以下步骤：

1) 利用激光跟踪仪建立被测齿轮的端平面和基准轴线

i) 首先将被测齿轮放置在地基上，然后利用激光跟踪仪在被测齿轮端平面上采样3个以上的点，通过切比雪夫准则拟合确定一平面作为被测齿轮的实际端平面；

ii) 如果齿轮有中心孔，则在孔内沿圆周方向采样3个以上的点；如果齿轮有旋转轴，则在轴上沿圆周方向采样3个以上的点，采样的数据点按最小二乘法拟合一个圆，过拟合的圆的圆心向实际端平面作垂线，该垂线即为齿轮的旋转轴线；

iii) 以齿轮的旋转轴线与实际端平面的交点为坐标原点，齿轮的旋转轴线为 Z_1 轴，在步骤i)中所确定的被测齿轮的实际端平面上任选两个互相垂直的方向 X_1 、 Y_1 ， X_1 、 Y_1 与 Z_1 构成被测齿轮坐标系 $\sigma_1(O_1; X_1, Y_1, Z_1)$ ；

2) 确定被测齿轮和三坐标测量单元的位置

利用激光跟踪仪建立三坐标测量单元沿三个运动轴的坐标系统 $\sigma_2(O_2; X_2, Y_2, Z_2)$ ，然后通过坐标变换建立被测齿轮坐标系 σ_1 和 σ_2 的关系；

3) 调整三坐标测量单元相对于被测齿轮的位置并对参数进行测量

①测量齿廓偏差、齿厚测量的方法如下：

i) 标定三坐标测量单元：根据步骤2)中的坐标变换结果，调整三坐标测量单元的位置，使坐标系 σ_2 的 X_2Y_2 平面与被测齿轮坐标系 σ_1 的 X_1Y_1 平面平行，调整后三坐标测量单元新的坐标系 σ_2' 与 σ_1 的位置关系按照步骤2)进行重新标定，标定的结果用于误差补偿；

ii) 然后应用标定后的三坐标测量单元对被测齿轮的齿廓偏差、齿厚测量进行测量；

iii) 按照步骤i)中坐标的标定结果对步骤ii)中的测量结果进行误差补偿。

②测量螺旋线偏差、齿轮接触线、齿面三维拓扑误差方法如下：

i) 标定三坐标测量单元：根据步骤2)中坐标变换的结果，调整三坐标测量单元的位置，使坐标系 σ_2 的 Z_2 轴与被测齿轮坐标系 σ_1 的 Z_1 轴平行；调整后

三坐标测量单元新的坐标系 σ'_2 与 σ_1 的位置关系按照步骤2)进行重新标定,标定的结果用于误差补偿;

ii) 然后应用标定后的三坐标测量单元对被测齿轮的螺旋线偏差、齿轮接触线、齿面三维拓扑误差进行测量;

iii) 按照步骤i)中坐标的标定结果对步骤ii)中的测量结果进行误差补偿。

2、根据权利要求1中所述的基于激光跟踪技术的大型齿轮测量方法,其特征在于:步骤3)中的步骤①和步骤②所述的对测量结果进行误差补偿的方法如

$$\text{下: } \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_2 \\ y'_2 \\ z'_2 \end{bmatrix}$$

上式中: (x'_2, y'_2, z'_2) 为被测点在 σ'_2 中的坐标, (x, y, z) 为被测点进行误差补偿后的坐标, $b_{ij} = \mathbf{e}'_i \cdot \mathbf{e}_j = \cos(\mathbf{e}'_i, \mathbf{e}_j)$, $i=1,2,3$; $j=1,2,3$, $\cos(\mathbf{e}'_i, \mathbf{e}_j)$ 为坐标系 σ'_2 与坐标系 σ_1 各坐标轴之间夹角的方向余弦。

基于激光跟踪技术的大型齿轮测量方法

技术领域

本发明涉及一种利用激光跟踪仪的大型齿轮测量方法，可实现对直径大于500mm的齿轮进行测量，特别适合3000mm的特大型齿轮测量，属于精密测试技术与仪器、机械传动技术领域。

背景技术

约定俗成，把直径大于500mm的齿轮称为大齿轮。特大型齿轮通常是指直径大于3000mm的齿轮。

齿轮测量一般分为：以齿廓、螺旋线和齿距测量为基础的分析式测量；以综合测量（双面啮合、单面啮合测量）为基础的功能式测量。对中小规格齿轮而言，分析式测量和功能式都得到了广泛应用。但对大齿轮而言，受尺寸和重量的限制，其主要测量方式是分析式测量。典型的分析式测量仪器是齿轮测量中心，此外，通用的坐标测量机也被用于大齿轮测量。这类台式仪器的特点是将被测齿轮放在仪器上进行检测，由于量仪精度高、测量条件好，可实现高精度测量且可测量齿轮的多个误差项目。目前，世界上最大的齿轮测量中心是德国Klingelnberg公司生产的P300，可测齿轮最大直径为3000mm。大型台式量仪基本上沿用了中、小模数台式量仪的展成测量原理和坐标测量技术，只是尺寸的放大，属于“以大测大”。受机械结构和制造技术的限制，3000mm几乎是这类仪器的测量极限。因此，没有测量特大型齿轮的台式仪器。

理论上讲，直径3000mm以下的中大模数齿轮的测量问题是得到解决了的。但实际中，这些量仪不适合安放在生产现场而一般安装在计量室内，由于大型齿轮搬运麻烦、在仪器上的安装调试齿轮也不方便，加之仪器价格昂贵，影响了这类仪器的应用。针对台式量仪的这些局限性，将仪器置于齿轮上或在机床上对齿轮进行就地测量或在线测量，就成了大齿轮测量的顺理选择。

但对大型齿轮而言，无论上置式测量还是在机测量，其共同问题是测量仪器与被测齿轮的位置如何精确确定，也即测量基准难以确定；而在机测量，

测量精度又严重依赖机床的原始精度。因此，如何提高测量精度一直是困扰特大型齿轮上置式测量和在机测量的难题。

特大型齿轮参数、尺寸和重量大到了超常规的程度，使其精度测量方法发生了从量到质的突变！用常规的精度测量方法已很难实现其测量，这正严重影响了特大型齿轮的制造精度、性能和质量！

发明内容

为了实现大齿轮的高效高精度测量，本发明提供一种基于激光跟踪技术的坐标式大齿轮测量仪，可对直径大于 500mm 的大齿轮的齿形、齿向、接触线、齿厚、齿面三维拓扑误差进行高精度测量。

本发明解决技术问题所采用的技术方案是：根据国家标准（GB/T 10095.1），齿轮的齿廓偏差是指实际齿廓偏离设计齿廓的量，该量在端平面内垂直于渐开线齿廓的方向计值；螺旋线偏差是指在端平面基圆切线方向上测得的实际螺旋线偏离设计螺旋线的量。因而要测量齿轮的齿廓偏差和螺旋线偏差，必须确定齿轮的端平面。本发明所采用的方法包括如下步骤：

1) 利用激光跟踪仪建立被测齿轮的端平面和基准轴线

i) 首先将被测齿轮放置在地基上，然后利用激光跟踪仪在被测齿轮端平面上采样 3 个以上的点，通过切比雪夫准则拟合确定一平面作为被测齿轮的实际端平面；

ii) 如果齿轮有中心孔，则在孔内沿圆周方向采样 3 个以上的点；如果齿轮有旋转轴，则在轴上沿圆周方向采样 3 个以上的点，采样的数据点按最小二乘法拟合一个圆，过拟合的圆的圆心向实际端平面作垂线，该垂线即为齿轮的旋转轴线；

iii) 以齿轮的旋转轴线与实际端平面的交点为坐标原点，齿轮的旋转轴线为 z_1 轴，在步骤 i) 中所确定的被测齿轮的实际端平面上任选两个互相垂直的方向 x_1 、 y_1 ， x_1 、 y_1 与 z_1 构成被测齿轮坐标系 $\sigma_1(O_1; x_1, y_1, z_1)$ ；

2) 确定被测齿轮和三坐标测量单元的位置

利用激光跟踪仪建立三坐标测量单元沿三个运动轴的坐标系统 $\sigma_2(O_2; X_2, Y_2, Z_2)$ ，然后通过坐标变换建立被测齿轮坐标系 σ_1 和 σ_2 的关系；

3) 调整三坐标测量单元相对于被测齿轮的位置并对参数进行测量

①测量齿廓偏差、齿厚测量的方法如下:

i) 标定三坐标测量单元: 根据步骤 2) 中的坐标变换结果, 调整三坐标测量单元的位置, 使坐标系 σ_2 的 x_2y_2 平面与被测齿轮坐标系 σ_1 的 x_1y_1 平面平行, 调整后三坐标测量单元新的坐标系 σ'_2 与 σ_1 的位置关系按照步骤 2) 进行重新标定, 标定的结果用于误差补偿;

ii) 然后应用标定后的三坐标测量单元对被测齿轮的齿廓偏差、齿厚测量进行测量;

iii) 按照步骤 i) 中坐标的标定结果对步骤 ii) 中的测量结果进行误差补偿。

②测量螺旋线偏差、齿轮接触线、齿面三维拓扑误差方法如下:

i) 标定三坐标测量单元: 根据步骤 2) 中坐标变换的结果, 调整三坐标测量单元的位置, 使坐标系 σ_2 的 z_2 轴与被测齿轮坐标系 σ_1 的 z_1 轴平行; 调整后三坐标测量单元新的坐标系 σ'_2 与 σ_1 的位置关系按照步骤 2) 进行重新标定, 标定的结果用于误差补偿;

ii) 然后应用标定后的三坐标测量单元对被测齿轮的螺旋线偏差、齿轮接触线、齿面三维拓扑误差进行测量;

iii) 按照步骤 i) 中坐标的标定结果对步骤 ii) 中的测量结果进行误差补偿。

对上述对测量结果进行误差补偿的方法如下:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_2 \\ y'_2 \\ z'_2 \end{bmatrix}$$

上式中: (x'_2, y'_2, z'_2) 为被测点在 σ'_2 中的坐标, (x, y, z) 为被测点进行误差补偿后的坐标, $b_{ij} = e'_i \cdot e_j = \cos(e'_i, e_j)$, $i=1,2,3$; $j=1,2,3$, $\cos(e'_i, e_j)$ 为坐标系 σ'_2 与坐标系 σ_1 各坐标轴之间夹角的方向余弦。

本发明首次将激光跟踪仪应用到大齿轮测量当中, 实现对直径大于 500mm 大齿轮的齿形、齿向、接触线、齿厚、齿面三维拓扑误差的测量, 为大齿轮的测量提供了一种新的高精度测量手段。

附图说明

图 1 是本发明的测量系统构成图

图 2 为三坐标测量单元结构图

图 3 是本发明的齿廓偏差测量原理图

图 4 是本发明的螺旋线偏差测量原理图

图 5 为本发明的接触线测量原理图

图 6 是本发明的齿轮三维拓扑误差测量结果图

图 7 为本发明的测量流程图

图中：1. 激光跟踪仪，2. 激光跟踪仪发出的激光路径，3. 三坐标测量单元，4. 三坐标测量单元测头，5. 三坐标测量单元调整支撑，6. 地基，7. 被测齿轮，8. 计算机。

具体实施方式

下面结合附图对本实施例作进一步说明：

1. 利用激光跟踪仪建立被测齿轮的端平面和基准轴线

首先将被测齿轮放置在地基上，然后将激光跟踪仪 1 和三坐标测量单元 3 放置在被测齿轮 7 的旁边，并使三坐标测量单元的测头正对着被测齿轮的轮齿。测量过程中位置固定不动，激光跟踪仪 1、三坐标测量单元 3 和被测齿轮 7 放置于固定台面 5 上。首先利用激光跟踪仪在被测齿轮端平面上采样 3 个以上的点，通过切比雪夫准则拟合确定一平面作为被测齿轮的实际端平面。如果齿轮有中心孔，则在孔内沿圆周方向采样 3 个以上的点；如果齿轮有旋转轴，则在轴上沿圆周方向采样 3 个以上的点，采样的数据点按最小二乘法拟合一个圆。根据齿轮的轴线与端平面垂直，过最小二乘圆的圆心向实际端平面作垂线，该垂线即为齿轮的旋转轴线，并以此为基准建立与被测齿轮固连的笛卡尔直角坐标系 σ_1 ，具体为：以齿轮旋转轴线与实际端平面的交点为坐标原点，齿轮旋转轴线为 Z_1 轴，在被测齿轮的实际端平面上任选两个互相垂直的方向 X_1 、 Y_1 与 Z_1 构成被测齿轮坐标系 $\sigma_1(O_1; X_1, Y_1, Z_1)$ 。

2. 确定被测齿轮和三坐标测量单元的位置

根据国家标准的定义，测量齿轮的齿廓偏差时，所获取的齿廓偏差上的

点应位于同一个平面上，即齿轮的端平面。因而在进行齿廓偏差测量时必须保证三坐标测量单元的测头在被测齿轮的端平面内运动。本发明首先利用激光跟踪仪建立三坐标测量单元沿三个运动轴的坐标系统 $\sigma_2(O_2; X_2, Y_2, Z_2)$ ，然后通过坐标变换建立被测齿轮坐标系 σ_1 和 σ_2 的关系，具体为：先利用激光跟踪仪1跟踪三坐标测量单元3分别沿三个轴的运动，建立与三坐标测量单元3固连的直角坐标系 σ_2 ，如图2所示。通过坐标变换建立两个坐标系 σ_1 和 σ_2 和位置关系，并调整三坐标测量单元3使其与被测齿轮满足发明内容中所陈述的关系。坐标变换公式如下：

$$\sigma_1 \rightarrow \sigma_2 : \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \\ z_1 - z_0 \end{bmatrix}$$

上式中： (x_1, y_1, z_1) 为点在 σ_1 中的坐标， (x_2, y_2, z_2) 为点在 σ_2 中的坐标， (x_0, y_0, z_0) 为 σ_1 的坐标原点在 σ_2 中的坐标， $a_{ij} = e_i \cdot e_j = \cos(e_i, e_j)$ ， $(i=1,2,3; j=1,2,3)$ 表示坐标系 σ_1 与坐标系 σ_2 各坐标轴之间的夹角的余弦。

3. 调整三坐标测量单元相对于被测齿轮的位置

进行齿廓偏差测量时，根据上述坐标变换的结果，调整三坐标测量单元的位置，使坐标系 σ_2 的 X_2Y_2 平面与被测齿轮坐标系 σ_1 的 X_1Y_1 平面平行。调整后三坐标测量单元新的坐标系 σ_2' 与 σ_1 的位置关系按照步骤2进行重新标定，标定的结果用于误差补偿。

进行螺旋线偏差测量时，根据步骤2)中坐标变换的结果，调整三坐标测量单元的位置，使坐标系 σ_2 的 Z_2 轴与被测齿轮坐标系 σ_1 的 Z_1 轴平行。调整后三坐标测量单元新的坐标系 σ_2' 与 σ_1 的位置关系按照步骤2进行重新标定，标定的结果用于误差补偿。

4. 齿廓偏差和螺旋线偏差的测量

测量齿廓偏差时，锁定三坐标测量单元的 Z_2 轴，仅在 XY 平面内移动测头进行齿廓数据的获取；测量螺旋线偏差时，三坐标测量单元的 X, Y, Z 三个轴联动获取被测齿面上的一条螺旋线数据。采样获得的数据含有三坐标测量单元的调整误差，按步骤3)标定的结果进行误差修正。最后按国家标准(GB/T 10095.1)中的方法计算被测齿轮的齿廓和螺旋线偏差，同时给出测量结果的

不确定度。

5. 齿轮接触线的测量

进行齿轮接触线测量时，按步骤 3 测量螺旋线偏差的方法调整三坐标测量单元。接触线位于齿轮基圆柱切平面内。首先根据被测齿轮的参数，计算理论接触线轨迹，然后控制三坐标测量单元的测头沿接触线轨迹运动，理论接触线轨迹与实际接触线轨迹的差值即为接触线误差。

6. 齿厚的测量

进行齿厚测量时，按步骤 3 测量齿廓偏差的方法调整三坐标测量单元。通过测量同一个轮齿的在齿廓中部与分度圆的交点的坐标值，利用软件进行数据处理获得齿厚测量结果。

7. 齿面三维拓扑误差的测量

进行齿面三维拓扑误差测量时，按步骤 3 测量螺旋线偏差的方法调整三坐标测量单元。根据被测齿轮的参数，规划三坐标测量单元测头的运动轨迹，获取齿轮轮齿的实际测量数据，通过与理论轮齿相比较，获得被测齿轮三维拓扑误差。

8. 测量误差修正

由于三坐标测量单元不可能调整到非常理想的位置，即 σ_1 与 σ_2 的各个轴不完全平行，所以会产生测量误差。为了提高测量精度，根据坐标系标定的结果和变换矩阵进行坐标测量单元调整误差补偿，同时对温度变化引起的测量误差一并进行补偿。

理想情况下，调整后三坐标测量单元新的坐标系 σ_2 与 σ_1 各个轴应完全平行，实际上不可能调整到理想的情况，此时各个轴之间仍存在一定的角度，即 $a_{ij} = e'_i \cdot e_j = \cos(e'_i, e_j) \neq 1$ 。对上述测量后的数据按以下公式进行误差补偿：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_2 \\ y'_2 \\ z'_2 \end{bmatrix}$$

其中： (x'_2, y'_2, z'_2) 为点在 σ_2 中的坐标， (x, y, z) 为点修正后的坐标

$b_{ij} = e'_i \cdot e_j = \cos(e'_i, e_j)$ ， $(i=1,2,3; j=1,2,3)$ 为坐标系 σ_2 与坐标系 σ_1 各坐标轴夹角的方向余弦。

图3为测量齿轮齿廓偏差的示意图,图中三坐标测量单元3的测头4沿 XY 平面运动采集被测齿轮的齿廓形状数据。图4为测量齿轮螺旋形偏差的示意图,图中三坐标测量单元3的测头4沿 x,y,z 三个方向运动完成齿面上一条螺旋线形状数据的获取。图5为测量齿轮接触线示意图,图中三坐标测量单元3的测头4沿 x,y,z 三个方向运动完成齿面上一条接触线形状数据的获取。图6为三坐标测量单元所获取的齿轮齿面拓扑误差理论值与实际值的比较结果图。详细的测量流程如图7所示。

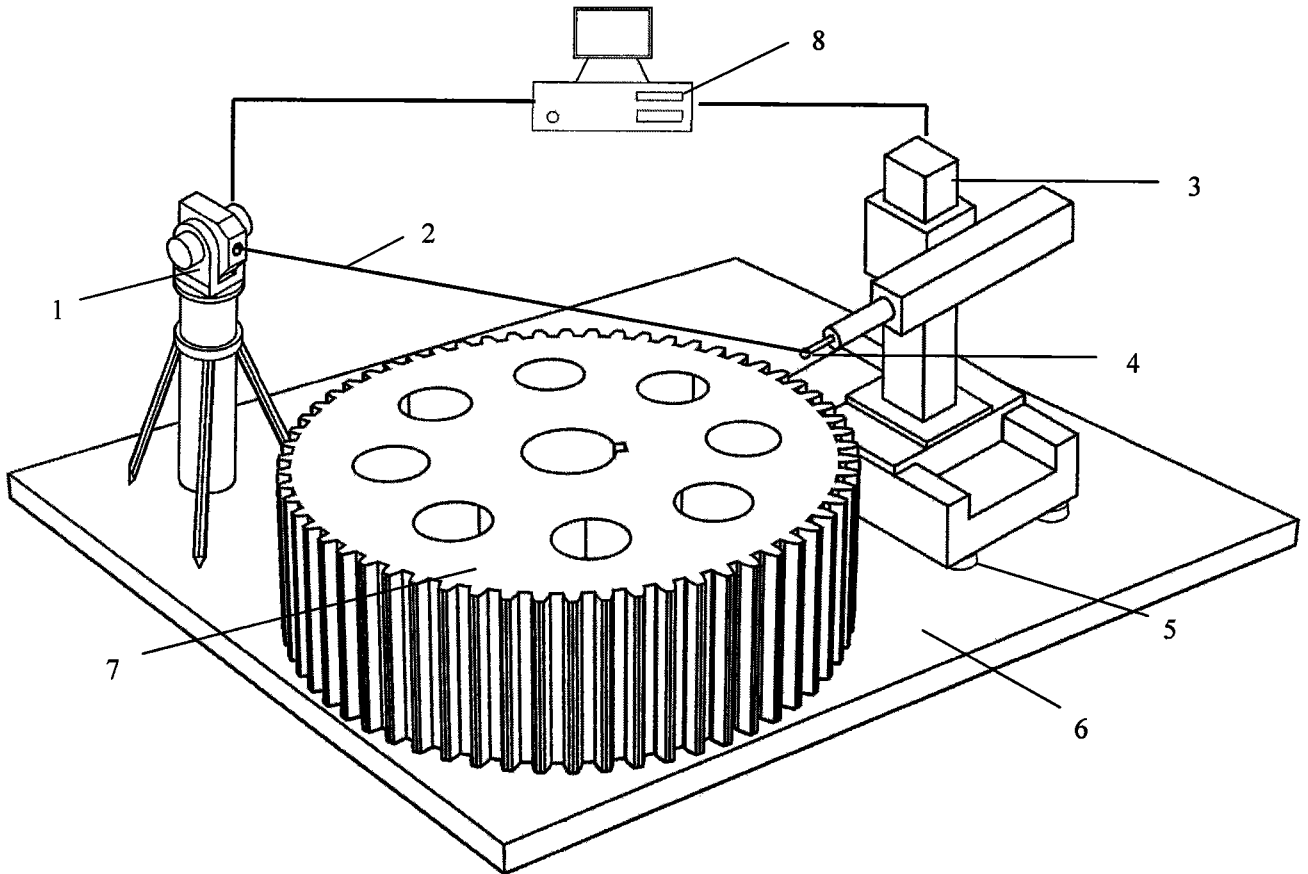


图 1

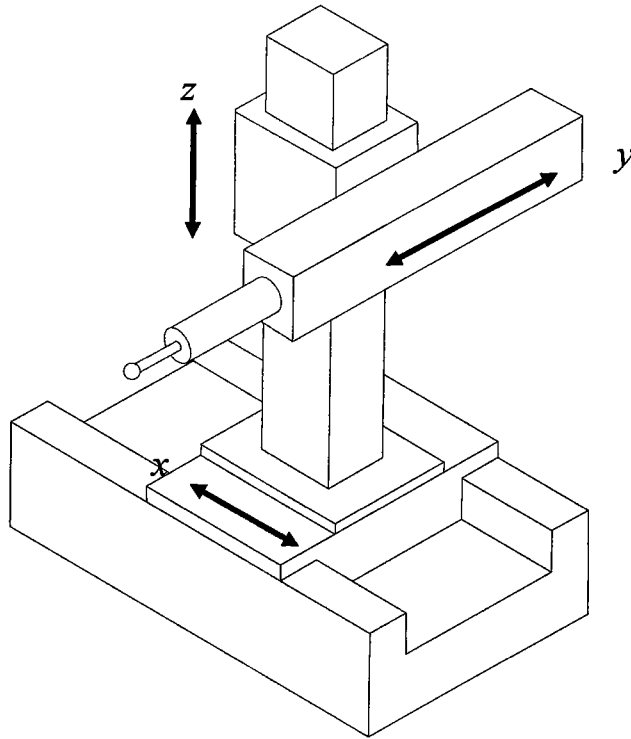


图 2

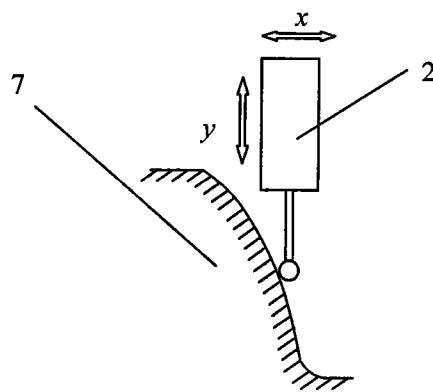


图 3

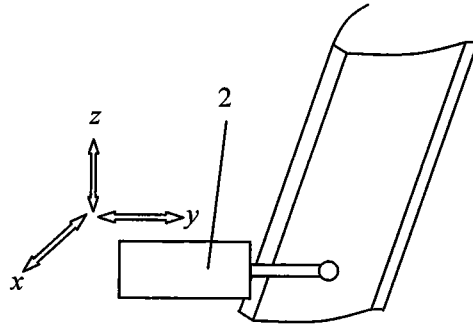


图 4

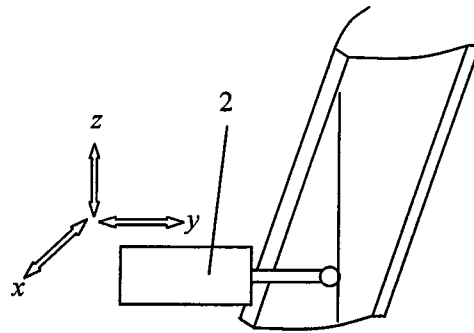


图 5

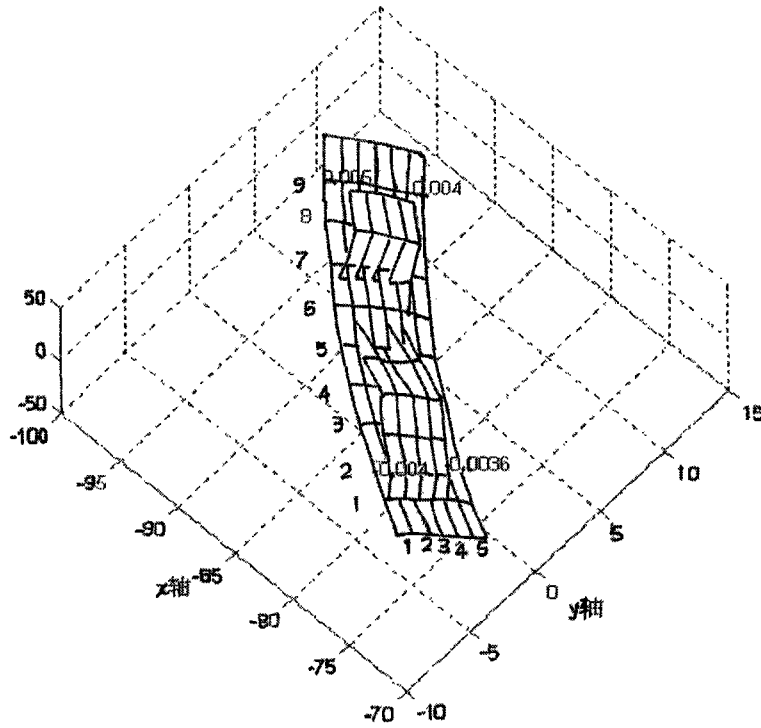


图 6

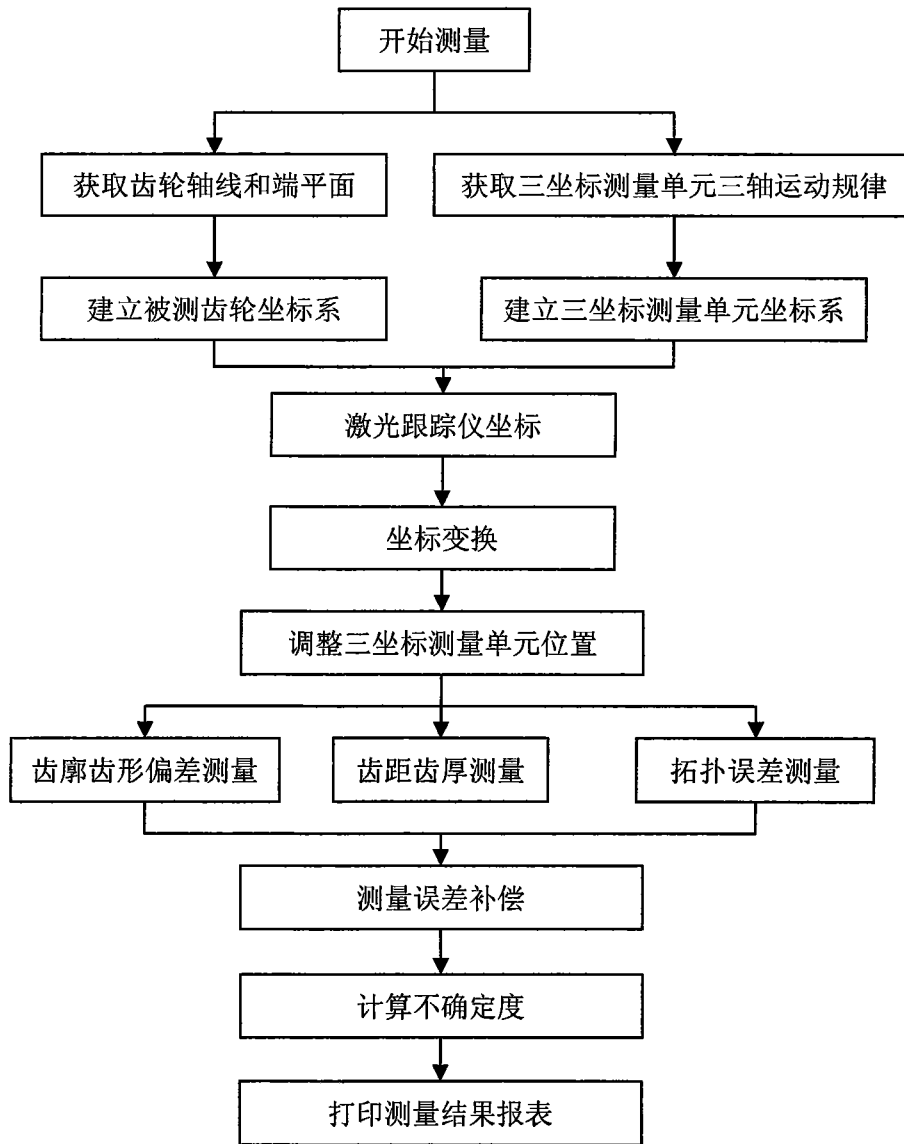


图 7