



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103292654 B

(45) 授权公告日 2015. 11. 25

(21) 申请号 201310230254. 8

(22) 申请日 2013. 06. 11

(73) 专利权人 桂林电子科技大学

地址 541004 广西壮族自治区桂林市七星区  
金鸡路 1 号桂林电子科技大学东区机  
电工程学院

(72) 发明人 黄美发 陈磊磊 唐哲敏 彭治国  
鲍家定 王灿 杨孟杰

(51) Int. Cl.

G01B 5/00(2006. 01)

G01B 5/08(2006. 01)

(56) 对比文件

RU 2190829 C2, 2001. 10. 10, 全文.

CN 102445137 A, 2012. 05. 09, 全文.

JP 特开 2001-66132 A, 2001. 03. 16, 全文.

刘飞. 圆柱度误差的测量与评价.《中国优秀  
硕士学位论文全文数据库》. 2009, (第 1 期), 全

文.

彭晓南等. 基于最大内接圆法的圆度误差测  
量实现方法.《工具技术》. 2008, 第 42 卷 (第 1  
期), 第 118-121 页.

孙茉莉. 一种最小外接圆法圆度误差评价实  
现方法.《工具技术》. 2010, 第 44 卷 (第 5 期),  
第 109-111 页.

审查员 公羽

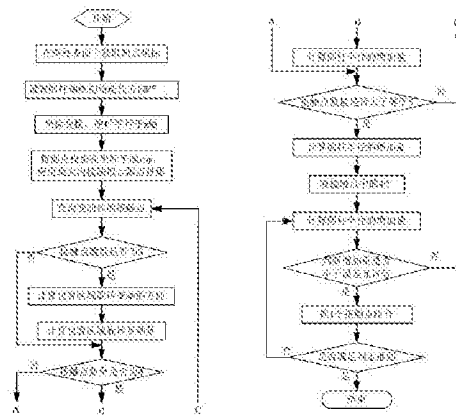
权利要求书6页 说明书16页 附图2页

(54) 发明名称

一种计算圆柱体零件作用尺寸的方法

(57) 摘要

一种计算圆柱体零件作用尺寸的方法, 该方  
法首先测量并获取被测圆柱面上的测点坐标; 然  
后给出圆柱的初始参数, 将测点投影在垂直于轴  
线的平面内, 通过对包容区域的平移变动, 计算投  
影圆的作用尺寸, 从而搜索到包容区域的 3 个接  
触点; 然后通过包容区域的旋转变动及圆柱半径  
的变动, 分别搜索与包容区域接触的第 4 个与第 5  
个测点; 当接触点的数量大于等于 5 时, 以 4 个接  
触点为 1 个组合, 在保持 4 点接触的条件下, 进一  
步变动圆柱半径, 然后换 1 个组合, 继续变动圆柱  
半径, 依次迭代计算, 直到满足判别准则, 输出圆  
柱的作用尺寸、圆柱度误差以及圆柱轴线参数的  
最优值。本发明可准确计算出满足作用表面判别  
准则的圆柱半径最优值及圆柱度误差。



1. 一种计算圆柱体零件作用尺寸的方法,用于计算圆柱体的最大内接尺寸,其特征在于,包括如下步骤:

步骤 1:将被测圆柱置于测量平台上,在测量空间直角坐标系中测量并获取圆柱表面上的点  $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  代表测点数目且  $n$  为大于 5 的正整数;所有测点  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  形成测点集  $\{P_i\}$ ;

步骤 2:随机给出圆柱的参数,即圆柱的轴线  $L$  方向矢量  $V^C(a, b, 1)$ ;进行坐标系的旋转变换,使坐标系  $z$  轴平行于圆柱轴线  $L$  方向矢量  $V^C$ ;坐标变换后,将测点  $P_i$  投影在  $xoy$  平面内,得到测点  $P_i$  坐标  $(X_i, Y_i)$ ;所有测点  $P_i(X_i, Y_i)$  形成测点集  $\{P_i\}$ ;

步骤 3:在点集  $\{P_i\}$  中,任意取出 3 个测点,并计算 3 个测点组成三角形的外接圆心  $O^R(x_0, y_0)$ ,作为圆心  $O^R$  的迭代初始值;

步骤 4:依次计算测点集  $\{P_i\}$  中各测点到圆心  $O^R$  的距离;并记录测点集  $\{P_i\}$  中各测点到圆心坐标  $O^R$  距离的最小距离所对应的测点,得到误差包容区域内边界的接触点集合  $\{B_k\}$ ;

步骤 5:判断误差包容区域内边界的接触点集合  $\{B_k\}$  中是否只有 1 个接触点;

如果只有 1 个接触点,则该接触点为有效接触点,此时包容区域平移的方向矢量  $V_T^R$  等于圆心坐标  $O^R$  减去接触点坐标,跳转到步骤 8;

如果接触点数量大于 1,则跳转到下一步;

步骤 6:判断误差包容区域内边界的接触点集合  $\{B_k\}$  中是否只有 2 个接触点;

如果只有 2 个接触点,则这 2 个接触点为有效接触点,此时包容区域平移的方向矢量  $V_T^R$  等于圆心坐标  $O^R$  减去 2 个接触点连线的中点坐标,跳转到步骤 8;

如果接触点数量大于 2,则跳转到下一步;

步骤 7:计算各个接触点  $(x_k^D, y_k^D)$  相对圆心  $O^R$  的相位角  $\alpha_k^R$ ,

$$\alpha_k^R = \begin{cases} \arctan \frac{y_k^D - y_0}{x_k^D - x_0}, & x_k^D - x_0 > 0 \\ \arctan \frac{y_k^D - y_0}{x_k^D - x_0} + \pi, & x_k^D - x_0 < 0 \end{cases}$$

所有接触点的相位角  $\alpha_k^R$  形成集合  $\{\alpha_k^R\}$ ,对  $\{\alpha_k^R\}$  中的元素进行排序,得到向量  $\{\beta_k^R\}$ ,计算向量  $\{\beta_k^R\}$  中相邻 2 个相位角  $\{\beta_k^R\}$  之差,

$$\Delta_k^R = \begin{cases} |\beta_{k+1}^R - \beta_k^R| & k \neq n^D \\ |\beta_1^R - \beta_{n^D}^R| & k = n^D \end{cases}$$

$n^D$  为接触点的数量; 计算  $\max\{\Delta_k^R\}$ , 如果  $\max\{\Delta_k^R\} < \pi/2$ , 则满足锐角三角形准则, 跳转到步骤 9; 如果  $\max\{\Delta_k^R\} \geq \pi/2$ , 查询  $\max\{\Delta_k^R\}$  对应的 2 个接触点, 所查询到的 2 个接触点有效接触点, 其余接触点为无效接触点, 此时包容区域平移的方向矢量  $V_T^R$  等于圆心坐标  $O^R$  减去 2 有效接触点连线的中点坐标;

步骤 8: 依次计算包容区域变动到与每个非接触测点  $P_i$  接触时的圆心虚拟位置  $O_i$ ;

首先分别计算各个非接触测点  $P_i$  和其中一个有效接触点的垂直中分线, 然后计算垂直中分线与过圆心  $O^R$  且方向矢量为  $V_T^R$  的直线的交点, 即为包容区域变动到与该测点  $P_i$  接触时, 圆心的虚拟位置  $O_i$ , 所有的非接触测点对应的  $O_i$  组成集合  $\{O_i\}$ , 计算各个非接触测点对应的  $O_i$  到圆心  $O^R$  的距离  $|O^R O_i|$ , 所有的  $|O^R O_i|$  构成集合  $\{|O^R O_i|\}$ , 在集合  $\{|O^R O_i|\}$  中, 剔除  $V_T^R$  与  $O^R O_i$  异向的对应元素, 然后查询集合  $\{|O^R O_i|\}$  中的最小值, 即为包容区域的平移变动量  $S$ ; 根据包容区域变动量  $S$  以及移动方向矢量  $V_T^R$ , 计算圆心的坐标  $O^R(x_0, y_0)$ ; 转到步骤 4;

步骤 9: 进行与步骤 2 中相逆的坐标变换, 测点坐标还原到原始值, 计算  $O^R$  坐标变换后的坐标  $P_0^C(X_0, Y_0)$ , 即为圆柱轴线 L 上一点, 圆柱轴线 L 以  $V^C$  为方向矢量;

步骤 10: 依次计算测点集  $\{P_i\}$  中各个测点到轴线 L 的距离; 并记录测点集  $\{P_i\}$  中各个测点到轴线 L 距离的最小值, 所记录距离最小值对应的测点集合为包容区域内边界的接触点集合  $\{P_j^D\}$ , 所记录距离的最小值为圆柱的半径  $R$ ;

步骤 11: 判断包容区域内边界的接触点集合  $\{P_j^D\}$  中接触点的数量是否为 3;

如果接触点的数量等于 3, 则对接触点进行的坐标转换, 使坐标系 z 轴正向与圆柱轴线 L 的方向矢量  $V^C$  同向且平行, 对接触点按其 z 轴坐标进行由小到大的排序, 使  $P_1^D$ 、 $P_2^D$ 、 $P_3^D$  的 z 轴坐标递增, 此时误差包容区域旋转变动的方向矢量  $V_R^C$  等于轴线 L 方向矢量  $V^C$  与  $P_1^D P_3^D$  的矢量叉乘; 设置旋转变动角度  $\sigma$  的初始值; 计算  $V^C$  与  $P_1^D P_3^D$  的点乘, 如果点乘结果等于 0, 跳转到步骤 18, 如果点乘结果不等于 0, 跳转到下一步;

如果接触点的数量不为 3, 跳转到步骤 14;

步骤 12: 计算  $V^C$  绕  $V_R^C$  旋转  $\sigma$  角度后的矢量方向  $V^{C'}$ ; 然后, 将 3 个接触点投影在垂直于  $V^{C'}$  的平面内, 并计算 3 个接触点的外接圆的圆心, 根据外接圆心与  $V^{C'}$  确定旋转后的圆柱的轴线  $L'$ ;

步骤 13: 计算所有非接触点到  $L'$  的距离  $d_i$ , 如果  $\min\{d_i\} > R$ , 则表示变动量不足, 旋

转角度  $\sigma$  变为  $2\sigma$  ; 否则, 变动过大, 其余非接触测点超出包容区域, 旋转角度  $\sigma$  变为  $\sigma/2$  ;

判断  $\sigma$  前后两次的迭代值之差是否小于设定的误差允许值 ; 若  $\sigma$  前后两次的迭代值之差小于设定的  $\sigma$  误差允许值, 则说明找到第 4 个接触点, 则将  $V^{C'}$  赋值给  $V^C$ , 跳转到步骤 10 ; 若  $\sigma$  前后两次的迭代值之差不小于设定的  $\sigma$  误差允许值, 则跳转到步骤 12 ;

步骤 14 : 判断包容区域内边界的接触点集合  $\{P_j^D\}$  中接触点的数量是否为 4 ;

如果接触点的数量等于 4, 设定圆柱半径增加量  $\Delta R$  的初始值, 跳转到下一步 ;

如果接触点的数量不等于 4, 则跳转到步骤 17 ;

步骤 15 :  $\Delta R$  加当前的圆柱半径  $R$  得到  $R'$ , 得到尺寸变动后圆柱, 其轴线为  $L''$ , 根据 4 个接触到轴线  $L''$  的距离等于  $R'$  的关系, 以轴线  $L''$  的方向矢量、轴线  $L''$  上一点为未知量, 分别得到 4 个四元非线性方程, 通过非线性方程组可以得到圆柱的轴线  $L''$  的方向矢量、轴线  $L''$  上一点 ;

步骤 16 : 依次计算所有非接触到  $L''$  的距离  $d_i'$ , 所有非接触测点对应的  $d_i'$  组成集合  $\{d_i'\}$ , 如果  $\min\{d_i'\} > \Delta R + R$ , 则表示变动量不足,  $\Delta R$  变为  $2\Delta R$  ; 如果  $\min\{d_i'\} \leq \Delta R + R$ , 则变动过大, 其余非接触测点超出包容区域,  $\Delta R$  变为  $\Delta R/2$  ;

判断  $\Delta R$  前后 2 次的迭代值之差是否小于设定的  $\Delta R$  误差允许值 ; 如果  $\Delta R$  前后 2 次的迭代值之差小于设定的  $\Delta R$  误差允许值, 说明找到第 5 个接触点, 将  $L''$  的方向矢量、轴线  $L''$  上一点分别赋值给轴线  $L$  的参数  $V^C$ 、 $P_0^C$ , 并判断是否满足判别准则, 若满足则跳转到步骤 18, 若不满足判别准则, 跳转到步骤 10 ; 如果  $\Delta R$  前后 2 次的迭代值之差不小于设定的  $\Delta R$  误差允许值, 则跳转到步骤 15 ;

步骤 17 : 判断包容区域内边界的接触点集合  $\{P_j^D\}$  中接触点的数量是否大于等于 5 ;

如果接触点的数量小于 5, 跳转到步骤 10 ;

如果接触点的数量大于等于 5, 以接触点集合中 4 个为 1 个组合, 并以其中 1 个组合为计算对象, 根据步骤 15、16 中的试探性微量调整的方法确定  $\Delta R$  ;

判断  $\Delta R$  是否小于设定的  $\Delta R$  误差允许值 ; 如果  $\Delta R$  小于设定的  $\Delta R$  误差允许值, 判断是否满足判别准则, 如果满足则跳转到步骤 18, 如果不满足判别准则, 换 1 个组合, 重新计算  $\Delta R$ , 重新进行判断, 依次迭代下去 ; 如果  $\Delta R$  大于设定的  $\Delta R$  误差允许值, 将计算得到的  $L''$  的参数赋值分别给圆柱轴线  $L$  的参数  $V^C$ 、 $P_0^C$ , 然后跳转到步骤 10 ;

步骤 18 : 输出圆柱度误差、圆柱半径的最优值  $R$  以及圆柱轴线  $L$  的参数。

2. 一种计算圆柱体零件作用尺寸的方法, 用于计算圆柱体的最小外接尺寸, 其特征在于, 包括如下步骤 :

步骤 1 : 将被测圆柱置于测量平台上, 在测量空间直角坐标系中测量并获取圆柱表面上的点  $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  代表测点数目且  $n$  为大于 5 的正整数 ; 所有测点  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  形成测点集  $\{P_i\}$  ;

步骤 2:随机给出圆柱的参数,即圆柱的轴线  $L$  方向矢量  $V^C(a, b, 1)$ ;进行坐标系的旋转变换,使坐标系  $z$  轴平行于圆柱轴线  $L$  方向矢量  $V^C$ ;坐标变换后,将测点  $P_i$  投影在  $xoy$  平面内,得到测点  $P_i$  坐标  $(X_i, Y_i)$ ;所有测点  $P_i(X_i, Y_i)$  形成测点集  $\{P_i\}$ ;

步骤 3:在点集  $\{P_i\}$  中,任意取出 3 个测点,并计算 3 个测点组成三角形的外接圆心  $O^R(x_0, y_0)$ ,作为圆心  $O^R$  的迭代初始值;

步骤 4:依次计算测点集  $\{P_i\}$  中各测点到圆心  $O^R$  的距离;并记录测点集  $\{P_i\}$  中各测点到圆心坐标  $O^R$  距离的最大距离所对应的测点,得到误差包容区域外边界的接触点集合  $\{B_k\}$ ;

步骤 5:判断误差包容区域外边界的接触点集合  $\{B_k\}$  中是否只有 1 个接触点;

如果只有 1 个接触点,则该接触点为有效接触点,此时包容区域平移的方向矢量  $V_T^R$  等于接触点坐标减去圆心坐标  $O^R$ ,跳转到步骤 8;

如果接触点数量大于 1,则跳转到下一步;

步骤 6:判断误差包容区域外边界的接触点集合  $\{B_k\}$  中是否只有 2 个接触点;

如果只有 2 个接触点,则这 2 个接触点为有效接触点,此时包容区域平移的方向矢量  $V_T^R$  等于 2 个接触点连线的中点坐标减去圆心坐标  $O^R$ ,跳转到步骤 8;

如果接触点数量大于 2,则跳转到下一步;

步骤 7:计算各个接触点  $(x_k^D, y_k^D)$  相对圆心  $O^R$  的相位角  $\alpha_k^R$ ,

$$\alpha_k^R = \begin{cases} \arctan \frac{y_k^D - y_0}{x_k^D - x_0}, & x_k^D - x_0 > 0 \\ \arctan \frac{y_k^D - y_0}{x_k^D - x_0} + \pi, & x_k^D - x_0 < 0 \end{cases}$$

所有接触点的相位角  $\alpha_k^R$  形成集合  $\{\alpha_k^R\}$ ,对  $\{\alpha_k^R\}$  中的元素进行排序,得到向量  $\{\beta_k^R\}$ ,计算向量  $\{\beta_k^R\}$  中相邻 2 个相位角  $\{\beta_k^R\}$  之差,

$$\Delta_k^R = \begin{cases} |\beta_{k+1}^R - \beta_k^R| & k \neq n^D \\ |\beta_1^R - \beta_{n^D}^R| & k = n^D \end{cases}$$

$n^D$  为接触点的数量;计算  $\max\{\Delta_k^R\}$ ,如果  $\max\{\Delta_k^R\} \leq \pi/2$ ,则满足锐角三角形准则或直径准则,跳转到步骤 9;如果  $\max\{\Delta_k^R\} > \pi/2$ ,查询  $\max\{\Delta_k^R\}$  对应的 2 个接触点,所查询到的 2 个接触点有效接触点,其余接触点为无效接触点,此时包容区域平移的方向矢量  $V_T^R$  等于 2 个有效接触点连线的中点坐标减去圆心  $O^R$  坐标;

步骤 8:依次计算包容区域变动到与每个非接触测点  $P_i$  接触时的圆心虚拟位置  $O_i$ ;

首先分别计算各个非接触测点  $P_i$  和其中一个有效接触点的垂直中分线,然后计算垂直中分线与过圆心  $O^*$  且方向矢量为  $V_F^*$  的直线的交点,即为包容区域变动到与该测点  $P_i$  接触时,圆心的虚拟位置  $O_i$ ,所有的非接触测点对应的  $O_i$  组成集合  $\{O_i\}$ ,计算各个非接触测点对应的  $O_i$  到圆心  $O^*$  的距离  $|O^*O_i|$ ,所有的  $|O^*O_i|$  构成集合  $\{|O^*O_i|\}$ ,在集合  $\{|O^*O_i|\}$  中,剔除  $V_F^*$  与  $O^*O_i$  异向的对应元素,然后查询集合  $\{|O^*O_i|\}$  中的最小值,即为包容区域的平移变动量  $s$ ;根据包容区域变动量  $s$  以及移动方向矢量  $V_T$ ,计算圆心的坐标  $O^*(x_0, y_0)$ ;转到步骤 4;

步骤 9:进行与步骤 2 中相逆的坐标变换,测点坐标还原到原始值,计算  $O^*$  坐标变换后的坐标  $P_0^C(X_0, Y_0)$ ,即为圆柱轴线  $L$  上一点,圆柱轴线  $L$  以  $V^C$  为方向矢量;

步骤 10:依次计算测点集  $\{P_i\}$  中各个测点到轴线  $L$  的距离;并记录测点集  $\{P_i\}$  中各个测点到轴线  $L$  距离的最大值,所记录距离最大值对应的测点集合为包容区域外边界的接触点集合  $\{P_j^U\}$ ,所记录距离的最大值为圆柱的半径  $R$ ;

步骤 11:判断包容区域外边界的接触点集合  $\{P_j^U\}$  中接触点的数量是否为 3;

如果接触点的数量等于 3,则对接触点进行的坐标转换,使坐标系  $z$  轴正向与圆柱轴线  $L$  的方向矢量  $V^C$  同向且平行,对接触点按其  $z$  轴坐标进行由小到大的排序,使  $P_1^U$ 、 $P_2^U$ 、 $P_3^U$  的  $z$  轴坐标递增,此时误差包容区域旋转变动的方向矢量  $V_R^C$  等于轴线  $L$  方向矢量  $V^C$  与  $P_3^U P_1^U$  的矢量叉乘;设置旋转变动角度  $\sigma$  的初始值;计算  $V^C$  与  $P_1^U P_3^U$  的点乘,如果点乘结果等于 0,跳转到步骤 18,如果点乘结果不等于 0,跳转到下一步;

如果接触点的数量不为 3,跳转到步骤 14;

步骤 12:计算  $V^C$  绕  $V_R^C$  旋转  $\sigma$  角度后的矢量方向  $V^{C'}$ ;然后,将 3 个接触点投影在垂直于  $V^{C'}$  的平面内,并计算 3 个接触点的外接圆的圆心,根据外接圆心与  $V^{C'}$  确定旋转后的圆柱的轴线  $L'$ ;

步骤 13:计算所有非接触测点到  $L'$  的距离  $d_i$ ,如果  $\max\{d_i\} < R$ ,则表示变动量不足,旋转角度  $\sigma$  变为  $2\sigma$ ;如果  $\max\{d_i\} \geq R$ ,变动过大,其余非接触测点超出包容区域,旋转角度  $\sigma$  变为  $\sigma/2$ ;

判断  $\sigma$  前后两次的迭代值之差是否小于设定的误差允许值;若  $\sigma$  前后两次的迭代值之差小于设定的  $\sigma$  误差允许值,则说明找到第 4 个接触点,则将  $V^{C'}$  赋值给  $V^C$ ,跳转到步骤 10;若  $\sigma$  前后两次的迭代值之差不小于设定的  $\sigma$  误差允许值,则跳转到步骤 12;

步骤 14:判断包容区域外边界的接触点集合 $\{P_i^U\}$ 中接触点的数量是否为 4;

如果接触点的数量等于 4,设定圆柱半径减小量 $\Delta R$ 的初始值,跳转到下一步;

如果接触点的数量不等于 4,则跳转到步骤 17;

步骤 15: $\Delta R$ 加当前的圆柱半径 $R$ 得到 $R'$ ,得到尺寸变动后圆柱,其轴线为 $L''$ ,根据 4 个接触到轴线 $L''$ 的距离等于 $R'$ 的关系,以轴线 $L''$ 的方向矢量、轴线 $L''$ 上一点为未知量,分别得到 4 个四元非线性方程,通过非线性方程组可以得到圆柱的轴线 $L''$ 的方向矢量、轴线 $L''$ 上一点;

步骤 16:依次计算所有非接触到 $L''$ 的距离 $d_i'$ ,所有非接触测点对应的 $d_i'$ 组成集合 $\{d_i'\}$ ,如果 $\max\{d_i'\} < \Delta R + R$ ,则表示变动量不足, $\Delta R$ 变为 $2\Delta R$ ;如果 $\max\{d_i'\} \geq \Delta R + R$ ,则变动过大,其余非接触测点超出包容区域, $\Delta R$ 变为 $\Delta R/2$ ;

判断 $\Delta R$ 前后 2 次的迭代值之差是否小于设定的 $\Delta R$ 误差允许值;如果 $\Delta R$ 前后 2 次的迭代值之差小于设定的 $\Delta R$ 误差允许值,说明找到第 5 个接触点,将 $L''$ 的方向矢量、轴线 $L''$ 上一点分别赋值给轴线 $L$ 的参数 $\mathbf{V}^C$ 、 $P_0^C$ ,并判断是否满足判别准则,若满足则跳转到步骤 18,若不满足判别准则,跳转到步骤 10;如果 $\Delta R$ 前后 2 次的迭代值之差不小于设定的 $\Delta R$ 误差允许值,则跳转到步骤 15;

步骤 17:判断包容区域外边界的接触点集合 $\{P_i^U\}$ 中接触点的数量是否大于等于 5;

如果接触点的数量小于 5,跳转到步骤 10;

如果接触点的数量大于等于 5,以接触点集合中 4 个为 1 个组合,并以其中 1 个组合为计算对象,根据步骤 15、16 中的试探性微量调整的方法确定 $\Delta R$ ;

判断 $\Delta R$ 是否小于设定的 $\Delta R$ 误差允许值;如果 $\Delta R$ 小于设定的 $\Delta R$ 误差允许值,判断是否满足判别准则,如果满足则跳转到步骤 18,如果不满足判别准则,换 1 个组合,重新计算 $\Delta R$ ,重新进行判断,依次迭代下去;如果 $\Delta R$ 大于设定的 $\Delta R$ 误差允许值,将计算得到的 $L''$ 的参数赋值分别给圆柱轴线 $L$ 的参数 $\mathbf{V}^C$ 、 $P_0^C$ ,然后跳转到步骤 10;

步骤 18:输出圆柱度误差、圆柱半径的最优值 $R$ 以及圆柱轴线 $L$ 的参数。

## 一种计算圆柱体零件作用尺寸的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种计算圆柱体零件作用尺寸的方法,属于精密计量与计算机应用领域,可用于各种情况下圆柱形几何产品的合格性检测,并为零件加工过程以及加工工艺的改进提供指导。

### 背景技术

[0002] 圆柱是机械零件中最常见的组成要素之一,其精度对产品的质量、性能以及使用寿命具有重要的影响,而圆柱体的作用尺寸是圆柱形零件的主要技术参数。最大内接圆柱和最小外接圆柱统称为圆柱体的作用表面,最大内接圆柱的半径和最小外接圆柱的半径统称为圆柱体的作用尺寸。

[0003] 最大内接圆柱和最小外接圆柱的计算方法是基于光滑圆柱环规的检测原理所建立的计算方法。最大内接圆柱体现了被测孔所能通过的最大配合轴,由此获得的圆柱度误差可视为被测孔与最大配合轴之间的最大间隙;而最小外接圆柱体现了被测轴所能通过的最小配合孔,由此获得的圆柱度误差可视为被测轴与最小配合孔之间的最大间隙。

[0004] 圆柱体作用尺寸的计算,属于不可微复杂最优化问题。目前,国内外学者主要采用传统优化方法、智能算法、计算几何方法等。这些方法由于存在计算稳定性差、计算效率低、对采点数量有限制、计算结果难以达到精确解等缺陷,导致最大内接圆柱法与最小外接圆柱法很难在实际检测中应用。目前市场上一般都采用成熟的最小二乘法近似地计算圆柱体零件的作用尺寸。

### 发明内容

[0005] 为了克服上述技术缺点,本发明的目的是提供一种计算圆柱体零件作用尺寸的方法。本方法不仅提高了测量仪器测量圆柱体作用尺寸的精度,而且算法稳定性好、计算效率高,可以推广应用于其几何体作用尺寸的计算。

[0006] 本发明一种计算圆柱体零件作用尺寸的方法,用于计算圆柱体的最大内接尺寸,主要包括以下步骤:

[0007] 步骤1:将被测圆柱置于测量平台上,在测量空间直角坐标系中测量并获取圆柱表面上的点  $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$  代表测点数目且  $n$  为大于 5 的正整数;所有测点  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  形成测点集  $\{P_i\}$ 。

[0008] 步骤2:随机给出圆柱的参数,即圆柱的轴线  $L$  方向矢量  $V^c(a, b, 1)$ ;进行坐标系的旋转变换,使坐标系  $z$  轴平行于圆柱轴线  $L$  方向矢量  $V^c$ ;坐标变换后,将测点  $P_i$  投影在  $xoy$  平面内,得到测点  $P_i$  坐标  $(X_i, Y_i)$ ;所有测点  $P_i(X_i, Y_i)$  形成测点集  $\{P_i\}$ 。

[0009] 步骤3:在点集  $\{P_i\}$  中,任意取出 3 个测点,并计算 3 个测点组成三角形的外接圆



心  $O^k(x_0, y_0)$ , 作为圆心  $O^k$  的迭代初始值。

[0010] 步骤 4: 依次计算测点集  $\{P_i\}$  中各测点到圆心  $O^k$  的距离; 并记录测点集  $\{P_i\}$  中各测点到圆心坐标  $O^k$  距离的最小距离所对应的测点, 得到误差包容区域内边界的接触点集合  $\{B_k\}$ 。

[0011] 步骤 5: 判断误差包容区域内边界的接触点集合  $\{B_k\}$  中是否只有 1 个接触点;

[0012] 如果只有 1 个接触点, 则该接触点为有效接触点, 此时包容区域平移的方向矢量  $V_T^k$  等于圆心坐标  $O^k$  减去接触点坐标, 跳转到步骤 8;

[0013] 如果接触点数量大于 1, 则跳转到下一步。

[0014] 步骤 6: 判断误差包容区域内边界的接触点集合  $\{B_k\}$  中是否只有 2 个接触点;

[0015] 如果只有 2 个接触点, 则这 2 个接触点为有效接触点, 此时包容区域平移的方向矢量  $V_T^k$  等于圆心坐标  $O^k$  减去 2 个接触点连线的中点坐标, 跳转到步骤 8;

[0016] 如果接触点数量大于 2, 则跳转到下一步。

[0017] 步骤 7: 计算各个接触点  $(x_k^D, y_k^D)$  相对圆心  $O^k$  的相位角  $\alpha_k^k$ ,

[0018]

$$\alpha_k^k = \begin{cases} \arctan \frac{y_k^D - y_0}{x_k^D - x_0}, & x_k^D - x_0 > 0 \\ \arctan \frac{y_k^D - y_0}{x_k^D - x_0} + \pi, & x_k^D - x_0 < 0 \end{cases}$$

[0019] 所有接触点的相位角  $\alpha_k^k$  形成集合  $\{\alpha_k^k\}$ , 对  $\{\alpha_k^k\}$  中的元素进行排序, 得到向量  $\{\beta_k^k\}$ , 计算向量  $\{\beta_k^k\}$  中相邻 2 个相位角  $\{\beta_k^k\}$  之差,

[0020]

$$\Delta_k^k = \begin{cases} |\beta_{k+1}^k - \beta_k^k| & k \neq n^D \\ |\beta_1^k - \beta_{n^D}^k| & k = n^D \end{cases}$$

[0021]  $n^D$  为接触点的数量; 计算  $\max\{\Delta_k^k\}$ , 如果  $\max\{\Delta_k^k\} < \pi/2$ , 则满足锐角三角形准则, 跳转到步骤 9; 如果  $\max\{\Delta_k^k\} \geq \pi/2$ , 查询  $\max\{\Delta_k^k\}$  对应的 2 个接触点, 所查询到的 2 个接触点有效接触点, 其余接触点为无效接触点, 此时包容区域平移的方向矢量  $V_T^k$  等于圆心坐标  $O^k$  减去 2 有效接触点连线的中点坐标。

[0022] 步骤 8: 依次计算包容区域变动到与每个非接触测点  $P_i$  接触时的圆心虚拟位置  $O_i$ ;

[0023] 首先分别计算各个非接触测点  $P_i$  和其中一个有效接触点的垂直中分线, 然后计算

垂直中分线与过圆心  $O^R$  且方向矢量为  $V_T^R$  的直线的交点,即为包容区域变动到与该测点  $P_i^R$  接触时,圆心的虚拟位置  $O_i$ ,所有的非接触测点对应的  $O_i$  组成集合  $\{O_i\}$ ,计算各个非接触测点对应的  $O_i$  到圆心  $O^R$  的距离  $|O^R O_i|$ ,所有的  $|O^R O_i|$  构成集合  $\{|O^R O_i|\}$ ,在集合  $\{|O^R O_i|\}$  中,剔除  $V_T^R$  与  $O^R O_i$  异向的对应元素,然后查询集合  $\{|O^R O_i|\}$  中的最小值,即为包容区域的平移变动量  $S$ ;根据包容区域变动量  $S$  以及移动方向矢量  $V_T^R$ ,计算圆心的坐标  $O^R(x_0, y_0)$ ;转到步骤 4。

[0024] 步骤 9:进行与步骤 2 中相逆的坐标变换,测点坐标还原到原始值,计算  $O^R$  坐标变换后的坐标  $P_0^C(x_0, y_0)$ ,即为圆柱轴线  $L$  上一点,圆柱轴线  $L$  以  $V^C$  为方向矢量。

[0025] 步骤 10:依次计算测点集  $\{P_i\}$  中各个测点到轴线  $L$  的距离;并记录测点集  $\{P_i\}$  中各个测点到轴线  $L$  距离的最小值,所记录距离最小值对应的测点集合为包容区域内边界的接触点集合  $\{P_j^D\}$ ,所记录距离的最小值为圆柱的半径  $R$ 。

[0026] 步骤 11:判断包容区域内边界的接触点集合  $\{P_j^D\}$  中接触点的数量是否为 3;

[0027] 如果接触点的数量等于 3,则对接触点进行的坐标转换,使坐标系  $z$  轴正向与圆柱轴线  $L$  的方向矢量  $V^C$  同向且平行,对接触点按其  $z$  轴坐标进行由小到大的排序,使  $P_1^D$ 、 $P_2^D$ 、 $P_3^D$  的  $z$  轴坐标递增,此时误差包容区域旋转变动的方向矢量  $V_R^C$  等于轴线  $L$  方向矢量  $V^C$  与  $P_1^D P_3^D$  的矢量叉乘;设置旋转变动角度  $\sigma$  的初始值;计算  $V^C$  与  $P_1^D P_3^D$  的点乘,如果点乘结果等于 0,跳转到步骤 18,如果点乘结果不等于 0,跳转到下一步;

[0028] 如果接触点的数量不为 3,跳转到步骤 14。

[0029] 步骤 12:计算  $V^C$  绕  $V_R^C$  旋转  $\sigma$  角度后的矢量方向  $V^{C'}$ ;然后,将 3 个接触点投影在垂直于  $V^{C'}$  的平面内,并计算 3 个接触点的外接圆的圆心,根据外接圆心与  $V^{C'}$  确定旋转后的圆柱的轴线  $L'$ 。

[0030] 步骤 13:计算所有非接触点到  $L'$  的距离  $d_i$ ,如果  $\min\{d_i\} > R$ ,则表示变动量不足,旋转角度  $\sigma$  变为  $2\sigma$ ;否则,变动过大,其余非接触测点超出包容区域,旋转角度  $\sigma$  变为  $\sigma/2$ ;

[0031] 判断  $\sigma$  前后两次的迭代值之差是否小于设定的误差允许值;若  $\sigma$  前后两次的迭代值之差小于设定的  $\sigma$  误差允许值,则说明找到第 4 个接触点,则将  $V^{C'}$  赋值给  $V^C$ ,跳转到步骤 10;若  $\sigma$  前后两次的迭代值之差不小于设定的  $\sigma$  误差允许值,则跳转到步骤 12。

[0032] 步骤 14:判断包容区域内边界的接触点集合  $\{P_j^D\}$  中接触点的数量是否为 4;

[0033] 如果接触点的数量等于 4,设定圆柱半径增加量  $\Delta R$  的初始值,跳转到下一步;

[0034] 如果接触点的数量不等于 4,则跳转到步骤 17。

[0035] 步骤 15:  $\Delta R$  加当前的圆柱半径  $R$  得到  $R'$ , 得到尺寸变动后圆柱, 其轴线为  $L''$ , 每个接触到轴线  $L''$  的距离等于  $R'$  的关系, 得到以下计算式,

[0036]

$$(x_j^0 - x_0')^2 + (y_j^0 - y_0')^2 + z_j^0^2 - [a(x_j^0 - x_0') + b(y_j^0 - y_0') + z_j^0]^2 - (a^2 + b^2 + 1)R' = 0$$

[0037] 其中  $(a', b', 0)$  为轴线  $L''$  的方向矢量,  $(x_0', y_0', 0)$  为轴线  $L''$  上一点, 以  $a'$ 、 $b'$ 、 $x_0'$ 、 $y_0'$  为未知量, 分别得到 4 个四元非线性方程, 通过非线性方程组可以求解出 4 个未知量, 得到圆柱的轴线  $L''$ 。

[0038] 步骤 16: 依次计算所有非接触到  $L''$  的距离  $d_i'$ , 所有非接触测点对应的  $d_i'$  组成集合  $\{d_i'\}$ , 如果  $\min\{d_i'\} > \Delta R + R$ , 则表示变动量不足,  $\Delta R$  变为  $2\Delta R$ ; 如果  $\min\{d_i'\} \leq \Delta R + R$ , 则变动过大, 其余非接触测点超出包容区域,  $\Delta R$  变为  $\Delta R/2$ ;

[0039] 判断  $\Delta R$  前后 2 次的迭代值之差是否小于设定的  $\Delta R$  误差允许值; 如果  $\Delta R$  前后 2 次的迭代值之差小于设定的  $\Delta R$  误差允许值, 说明找到第 5 个接触点, 将  $(a', b', 0)$ 、 $(x_0', y_0', 0)$  分别赋值给轴线  $L$  的参数  $P^C$ 、 $P_0^C$ , 并判断是否满足判别准则, 若满足则跳转到步骤 18, 若不满足判别准则, 跳转到步骤 10; 如果  $\Delta R$  前后 2 次的迭代值之差不小于设定的  $\Delta R$  误差允许值, 则跳转到步骤 15。

[0040] 步骤 17: 判断包容区域内边界的接触点集合  $\{P_j^D\}$  中接触点的数量是否大于等于 5;

[0041] 如果接触点的数量小于 5, 跳转到步骤 10;

[0042] 如果接触点的数量大于等于 5, 以接触点集合中 4 个为 1 个组合, 并以其中 1 个组合为计算对象, 根据步骤 15、16 中的试探性微量调整的方法确定  $\Delta R$ ;

[0043] 判断  $\Delta R$  是否小于设定的  $\Delta R$  误差允许值; 如果  $\Delta R$  小于设定的  $\Delta R$  误差允许值, 判断是否满足判别准则, 如果满足则跳转到步骤 18, 如果不满足判别准则, 换 1 个组合, 重新计算  $\Delta R$ , 重新进行判断, 依次迭代下去; 如果  $\Delta R$  大于设定的  $\Delta R$  误差允许值, 将计算得到的  $L''$  的参数赋值分别给圆柱轴线  $L$  的参数  $P^C$ 、 $P_0^C$ , 然后跳转到步骤 10。

[0044] 步骤 18: 输出圆柱度误差、圆柱半径的最优值  $R$  以及圆柱轴线  $L$  的参数。

[0045] 上述方法中, 所述的步骤 3 至步骤 8, 可以单独用来计算回转体零件截面圆的最大内接圆度以及作用尺寸。

[0046] 本发明另一种计算圆柱体零件作用尺寸的方法, 用于计算圆柱体的最小外接尺寸, 其特点是与最大内接尺寸的计算过程基本一致, 不同点在于查询接触点的方式、包容区域的变动方向, 包括如下步骤:

[0047] 步骤 1: 将被测圆柱置于测量平台上, 在测量空间直角坐标系中测量并获取圆柱表面上的点  $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$  代表测点数目且  $n$  为大于 5 的正整数; 所有测点  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  形成测点集  $\{P_i\}$ 。

[0048] 步骤 2:随机给出圆柱的参数,即圆柱的轴线  $L$  方向矢量  $V^C(a, b, 1)$ ;进行坐标系的旋转变换,使坐标系  $z$  轴平行于圆柱轴线  $L$  方向矢量  $V^C$ ;坐标变换后,将测点  $P_i$  投影在  $xOy$  平面内,得到测点  $E_i$  坐标  $(X_i, Y_i)$ ;所有测点  $E_i(X_i, Y_i)$  形成测点集  $\{E_i\}$ 。

[0049] 步骤 3:在点集  $\{E_i\}$  中,任意取出 3 个测点,并计算 3 个测点组成三角形的外接圆心  $O^R(x_0, y_0)$ ,作为圆心  $O^R$  的迭代初始值。

[0050] 步骤 4:依次计算测点集  $\{E_i\}$  中各测点到圆心  $O^R$  的距离;并记录测点集  $\{E_i\}$  中各测点到圆心坐标  $O^R$  距离的最大距离所对应的测点,得到误差包容区域外边界的接触点集合  $\{E_k\}$ 。

[0051] 步骤 5:判断误差包容区域外边界的接触点集合  $\{E_k\}$  中是否只有 1 个接触点;

[0052] 如果只有 1 个接触点,则该接触点为有效接触点,此时包容区域平移的方向矢量  $V_f^R$  等于接触点坐标减去圆心坐标  $O^R$ ,跳转到步骤 8;

[0053] 如果接触点数量大于 1,则跳转到下一步。

[0054] 步骤 6:判断误差包容区域外边界的接触点集合  $\{E_k\}$  中是否只有 2 个接触点;

[0055] 如果只有 2 个接触点,则这 2 个接触点为有效接触点,此时包容区域平移的方向矢量  $V_f^R$  等于 2 个接触点连线的中点坐标减去圆心坐标  $O^R$ ,跳转到步骤 8;

[0056] 如果接触点数量大于 2,则跳转到下一步。

[0057] 步骤 7:计算各个接触点  $(x_k^D, y_k^D)$  相对圆心  $O^R$  的相位角  $\alpha_k^R$ ,

[0058]

$$\alpha_k^R = \begin{cases} \arctan \frac{y_k^D - y_0}{x_k^D - x_0}, & x_k^D - x_0 > 0 \\ \arctan \frac{y_k^D - y_0}{x_k^D - x_0} + \pi, & x_k^D - x_0 < 0 \end{cases}$$

[0059] 所有接触点的相位角  $\alpha_k^R$  形成集合  $\{\alpha_k^R\}$ ,对  $\{\alpha_k^R\}$  中的元素进行排序,得到向量  $\{\beta_k^R\}$ ,计算向量  $\{\beta_k^R\}$  中相邻 2 个相位角  $\{\beta_k^R\}$  之差,

[0060]

$$\Delta_k^R = \begin{cases} |\beta_{k+1}^R - \beta_k^R| & k \neq n^D \\ |\beta_1^R - \beta_{n^D}^R| & k = n^D \end{cases}$$

[0061]  $n^D$  为接触点的数量;计算  $\max\{\Delta_k^R\}$ ,如果  $\max\{\Delta_k^R\} \leq \pi/2$ ,则满足锐角三角形准则或直径准则,跳转到步骤 9;如果  $\max\{\Delta_k^R\} > \pi/2$ ,查询  $\max\{\Delta_k^R\}$  对应的 2 个接触点,所查询到的 2 个接触点有效接触点,其余接触点为无效接触点,此时包容区域平移的方向矢量

$V_F^R$  等于 2 个有效接触点连线的中点坐标减去圆心  $O^R$  坐标。

[0062] 步骤 8 :依次计算包容区域变动到与每个非接触测点  $P_i$  接触时的圆心虚拟位置  $O_i$  ;

[0063] 首先分别计算各个非接触测点  $P_i$  和其中一个有效接触点的垂直中分线,然后计算垂直中分线与过圆心  $O^R$  且方向矢量为  $V_F^R$  的直线的交点,即为包容区域变动到与该测点  $P_i$  接触时,圆心的虚拟位置  $O_i$ ,所有的非接触测点对应的  $O_i$  组成集合  $\{O_i\}$ ,计算各个非接触测点对应的  $O_i$  到圆心  $O^R$  的距离  $|O^R O_i|$ ,所有的  $|O^R O_i|$  构成集合  $\{|O^R O_i|\}$ ,在集合  $\{|O^R O_i|\}$  中,剔除  $V_F^R$  与  $O^R O_i$  异向的对应元素,然后查询集合  $\{|O^R O_i|\}$  中的最小值,即为包容区域的平移变动量  $g$ ;根据包容区域变动量  $g$  以及移动方向矢量  $V_F^R$ ,计算圆心的坐标  $O^R(x_0, y_0)$ ;转到步骤 4。

[0064] 步骤 9 :进行与步骤 2 中相逆的坐标变换,测点坐标还原到原始值,计算  $O^R$  坐标变换后的坐标  $P_0^C(X_0, Y_0)$ ,即为圆柱轴线  $L$  上一点,圆柱轴线  $L$  以  $V^C$  为方向矢量。

[0065] 步骤 10 :依次计算测点集  $\{P_i\}$  中各个测点到轴线  $L$  的距离;并记录测点集  $\{P_i\}$  中各个测点到轴线  $L$  距离的最大值,所记录距离最大值对应的测点集合为包容区域外边界的接触点集合  $\{P_j^U\}$ ,所记录距离的最大值为圆柱的半径  $R$ 。

[0066] 步骤 11 :判断包容区域外边界的接触点集合  $\{P_j^U\}$  中接触点的数量是否为 3 ;

[0067] 如果接触点的数量等于 3,则对接触点进行的坐标转换,使坐标系  $z$  轴正向与圆柱轴线  $L$  的方向矢量  $V^C$  同向且平行,对接触点按其  $z$  轴坐标进行由小到大的排序,使  $P_1^U$ 、 $P_2^U$ 、 $P_3^U$  的  $z$  轴坐标递增,此时误差包容区域旋转变动的方向矢量  $V_R^C$  等于轴线  $L$  方向矢量  $V^C$  与  $P_2^U P_3^U$  的矢量叉乘;设置旋转变动角度  $\sigma$  的初始值;计算  $V^C$  与  $P_1^U P_3^U$  的点乘,如果点乘结果等于 0,跳转到步骤 18,如果点乘结果不等于 0,跳转到下一步;

[0068] 如果接触点的数量不为 3,跳转到步骤 14。

[0069] 步骤 12 :计算  $V^C$  绕  $V_R^C$  旋转  $\sigma$  角度后的矢量方向  $V^{C'}$ ;然后,将 3 个接触点投影在垂直于  $V^{C'}$  的平面内,并计算 3 个接触点的外接圆的圆心,根据外接圆心与  $V^{C'}$  确定旋转后的圆柱的轴线  $L'$ 。

[0070] 步骤 13 :计算所有非接触测点到  $L'$  的距离  $d_i$ ,如果  $\max\{d_i\} < R$ ,则表示变动量不足,旋转角度  $\sigma$  变为  $2\sigma$ ;如果  $\max\{d_i\} \geq R$ ,变动过大,其余非接触测点超出包容区域,旋转角度  $\sigma$  变为  $\sigma/2$ ;

[0071] 判断  $\sigma$  前后两次的迭代值之差是否小于设定的误差允许值;若  $\sigma$  前后两次的迭

代值之差小于设定的  $\sigma$  误差允许值,则说明找到第 4 个接触点,则将  $V^C$  赋值给  $V^C$ ,跳转到步骤 10;若  $\sigma$  前后两次的迭代值之差不小于设定的  $\sigma$  误差允许值,则跳转到步骤 12。

[0072] 步骤 14:判断包容区域外边界的接触点集合  $\{P_j^D\}$  中接触点的数量是否为 4;

[0073] 如果接触点的数量等于 4,设定圆柱半径减小量  $\Delta R$  的初始值,跳转到下一步;

[0074] 如果接触点的数量不等于 4,则跳转到步骤 17。

[0075] 步骤 15: $\Delta R$  减去当前的圆柱半径  $R$  得到  $R'$ ,得到尺寸变动后圆柱,其轴线为  $L''$ ,每个接触点到轴线  $L''$  的距离等于  $R'$  的关系,得到以下计算式,

[0076]

$$(x_j^D - x_0')^2 + (y_j^D - y_0')^2 + z_j^D{}^2 - [a(x_j^D - x_0') + b(y_j^D - y_0') + z_j^D]^2 - (a^2 + b^2 + 1)R' = 0$$

[0077] 其中  $(a', b', 0)$  为轴线  $L''$  的方向矢量,  $(x_0', y_0', 0)$  为轴线  $L''$  上一点,以  $a'$ 、 $b'$ 、 $x_0'$ 、 $y_0'$  为未知量,分别得到 4 个四元非线性方程,通过非线性方程组可以求解出 4 个未知量,得到圆柱的轴线  $L''$ 。

[0078] 步骤 16:依次计算所有非接触点到  $L''$  的距离  $d_i'$ ,所有非接触测点对应的  $d_i'$  组成集合  $\{d_i'\}$ ,如果  $\max\{d_i'\} < \Delta R + R$ ,则表示变动量不足,  $\Delta R$  变为  $2\Delta R$ ;如果  $\max\{d_i'\} \geq \Delta R + R$ ,则变动过大,其余非接触测点超出包容区域,  $\Delta R$  变为  $\Delta R/2$ ;

[0079] 判断  $\Delta R$  前后 2 次的迭代值之差是否小于设定的  $\Delta R$  误差允许值;如果  $\Delta R$  前后 2 次的迭代值之差小于设定的  $\Delta R$  误差允许值,说明找到第 5 个接触点,将  $(a', b', 0)$ 、 $(x_0', y_0', 0)$  分别赋值给轴线  $L$  的参数  $V^C$ 、 $P_0^C$ ,并判断是否满足判别准则,若满足则跳转到步骤 18,若不满足判别准则,跳转到步骤 10;如果  $\Delta R$  前后 2 次的迭代值之差不小于设定的  $\Delta R$  误差允许值,则跳转到步骤 15。

[0080] 步骤 17:判断包容区域外边界的接触点集合  $\{P_j^D\}$  中接触点的数量是否大于等于 5;

[0081] 如果接触点的数量小于 5,跳转到步骤 10;

[0082] 如果接触点的数量大于等于 5,以接触点集合中 4 个为 1 个组合,并以其中 1 个组合为计算对象,根据步骤 15、16 中的试探性微量调整的方法确定  $\Delta R$ ;

[0083] 判断  $\Delta R$  是否小于设定的  $\Delta R$  误差允许值;如果  $\Delta R$  小于设定的  $\Delta R$  误差允许值,判断是否满足判别准则,如果满足则跳转到步骤 18,如果不满足判别准则,换 1 个组合,重新计算  $\Delta R$ ,重新进行判断,依次迭代下去;如果  $\Delta R$  大于设定的  $\Delta R$  误差允许值,将计算得到的  $L''$  的参数赋值分别给圆柱轴线  $L$  的参数  $V^C$ 、 $P_0^C$ ,然后跳转到步骤 10。

[0084] 步骤 18:输出圆柱度误差、圆柱半径的最优值  $R$  以及圆柱轴线  $L$  的参数。

[0085] 上述方法中,所述的步骤 3 至步骤 8,可以单独用来计算回转体零件截面圆的最小外接圆度以及作用尺寸。

[0086] 上述方法中,所述的技术方案,可以计算空间任意方向直线度。

[0087] 上述方法中,所述的步骤3至步骤8,可以计算任意方向线对线平行度误差。首先,进行坐标旋转变换,使基准线的方向矢量平行于 $z$ 正,同时被测线的离散点作相应的刚体旋转,此时被测线的包容圆柱在 $xoy$ 平面内投影为圆。然后可应用上述方法中所述的步骤3至步骤8,对被测线的离散点投影进行拟合。

[0088] 上述方法中,所述的步骤3至步骤8,可以计算任意方向线对面垂直度误差。首先进行坐标旋转变换,使基准面的法向矢量平行于 $z$ 正,同时被测线的离散点作相应的刚体旋转,此时被测线的包容圆柱在 $xoy$ 平面内投影为圆。然后可应用上述方法中所述的步骤3至步骤8,对被测线的离散点投影进行拟合。

[0089] 本发明依据圆柱自身的特征,在圆柱半径的优化方向上,对包容区域进行相应平移变动、旋转变动或平移变动,最终计算出圆柱参数最优值和圆柱度误差最优值。

[0090] 本发明的有益效果在于:

[0091] 计算得出的圆柱半径为最优值,接触点的相对位置满足判别准则,计算稳定性好、计算效率高。

[0092] 对于本领域技术人员来说,根据和应用本发明公开的构思,能够容易地对本发明方案进行各种变形和改变,应当注意的是,所有这些变形和改变都应当属于本发明的范围。

## 附图说明

[0093] 图1为本发明的圆柱的最大内接半径计算流程图。

[0094] 图2为本发明的圆柱的最大内接半径计算效果图。

[0095] 图3为本发明的圆柱的最小外接半径计算效果图。

## 具体实施方式

[0096] 实施例1:

[0097] 一种计算圆柱体零件作用尺寸的方法,用于计算圆柱体的最大内接尺寸,如附图1所示,包括如下步骤:

[0098] 步骤1:将被测圆柱置于测量平台上,在测量空间直角坐标系中测量并获取圆柱表面上的点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ 代表测点数目且 $n$ 为大于5的正整数;所有测点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 形成测点集 $\{P_i\}$ 。

[0099] 步骤2:随机给出圆柱的参数,即圆柱的轴线 $L$ 方向矢量 $V^c(a, b, 1)$ ;进行坐标系的旋转变换,使坐标系 $z$ 轴平行于圆柱轴线 $L$ 方向矢量 $V^c$ ;坐标变换后,将测点 $P_i$ 投影在 $xoy$ 平面内,得到测点 $P_i$ 坐标 $(X_i, Y_i)$ ;所有测点 $P_i(X_i, Y_i)$ 形成测点集 $\{P_i\}$ 。

[0100] 步骤3:在点集 $\{P_i\}$ 中,任意取出3个测点,并计算3个测点组成三角形的外接圆心 $O^k(x_0, y_0)$ ,作为圆心 $O^k$ 的迭代初始值。

[0101] 步骤4:依次计算测点集 $\{P_i\}$ 中各测点到圆心 $O^k$ 的距离;并记录测点集 $\{P_i\}$ 中各测点到圆心坐标 $O^k$ 距离的最小距离所对应的测点,得到误差包容区域内边界的接触点集

合 $\{B_k\}$ 。

[0102] 步骤5:判断误差包容区域内边界的接触点集合 $\{B_k\}$ 中是否只有1个接触点;

[0103] 如果只有1个接触点,则该接触点为有效接触点,此时包容区域平移的方向矢量 $V_F^R$ 等于圆心坐标 $O^R$ 减去接触点坐标,跳转到步骤8;

[0104] 如果接触点数量大于1,则跳转到下一步。

[0105] 步骤6:判断误差包容区域内边界的接触点集合 $\{B_k\}$ 中是否只有2个接触点;

[0106] 如果只有2个接触点,则这2个接触点为有效接触点,此时包容区域平移的方向矢量 $V_F^R$ 等于圆心坐标 $O^R$ 减去2个接触点连线的中点坐标,跳转到步骤8;

[0107] 如果接触点数量大于2,则跳转到下一步。

[0108] 步骤7:计算各个接触点 $(x_k^D, y_k^D)$ 相对圆心 $O^R$ 的相位角 $\alpha_k^R$ ,

[0109]

$$\alpha_k^R = \begin{cases} \arctan \frac{y_k^D - y_0^R}{x_k^D - x_0^R}, & x_k^D - x_0^R > 0 \\ \arctan \frac{y_k^D - y_0^R}{x_k^D - x_0^R} + \pi, & x_k^D - x_0^R < 0 \end{cases}$$

[0110] 所有接触点的相位角 $\alpha_k^R$ 形成集合 $\{\alpha_k^R\}$ ,对 $\{\alpha_k^R\}$ 中的元素进行排序,得到向量 $\{\beta_k^R\}$ ,计算向量 $\{\beta_k^R\}$ 中相邻2个相位角 $\{\beta_k^R\}$ 之差,

[0111]

$$\Delta_k^R = \begin{cases} |\beta_{k+1}^R - \beta_k^R| & k \neq n^D \\ |\beta_1^R - \beta_{n^D}^R| & k = n^D \end{cases}$$

[0112]  $n^D$ 为接触点的数量;计算 $\max\{\Delta_k^R\}$ ,如果 $\max\{\Delta_k^R\} < \pi/2$ ,则满足锐角三角形准则,跳转到步骤9;如果 $\max\{\Delta_k^R\} \geq \pi/2$ ,查询 $\max\{\Delta_k^R\}$ 对应的2个接触点,所查询到的2个接触点有效接触点,其余接触点为无效接触点,此时包容区域平移的方向矢量 $V_F^R$ 等于圆心坐标 $O^R$ 减去2有效接触点连线的中点坐标。

[0113] 步骤8:依次计算包容区域变动到与每个非接触测点 $P_i$ 接触时的圆心虚拟位置 $O_i$ ;

[0114] 首先分别计算各个非接触测点 $P_i$ 和其中一个有效接触点的垂直中分线,然后计算垂直中分线与过圆心 $O^R$ 且方向矢量为 $V_F^R$ 的直线的交点,即为包容区域变动到与该测点 $P_i$ 接触时,圆心的虚拟位置 $O_i$ ,所有的非接触测点对应的 $O_i$ 组成集合 $\{O_i\}$ ,计算各个非接触测点对应的 $O_i$ 到圆心 $O^R$ 的距离 $|O^R O_i|$ ,所有的 $|O^R O_i|$ 构成集合 $\{|O^R O_i|\}$ ,在集合 $\{|O^R O_i|\}$



中,剔除  $V_T^R$  与  $O^R O_i$  异向的对应元素,然后查询集合  $\{O^R O_i\}$  中的最小值,即为包容区域的平移变动量  $S$ ;根据包容区域变动量  $S$  以及移动方向矢量  $V_T^R$ ,计算圆心的坐标  $O^R(x_0, y_0)$ ;转到步骤 4。

[0115] 步骤 9:进行与步骤 2 中相逆的坐标变换,测点坐标还原到原始值,计算  $O^R$  坐标变换后的坐标  $P_0^C(X_0, Y_0)$ ,即为圆柱轴线  $L$  上一点,圆柱轴线  $L$  以  $V^C$  为方向矢量。

[0116] 步骤 10:依次计算测点集  $\{P_i\}$  中各个测点到轴线  $L$  的距离;并记录测点集  $\{P_i\}$  中各个测点到轴线  $L$  距离的最小值,所记录距离最小值对应的测点集合为包容区域内边界的接触点集合  $\{P_j^D\}$ ,所记录距离的最小值为圆柱的半径  $R$ 。

[0117] 步骤 11:判断包容区域内边界的接触点集合  $\{P_j^D\}$  中接触点的数量是否为 3;

[0118] 如果接触点的数量等于 3,则对接触点进行的坐标转换,使坐标系  $z$  轴正向与圆柱轴线  $L$  的方向矢量  $V^C$  同向且平行,对接触点按其  $z$  轴坐标进行由小到大的排序,使  $P_1^D$ 、 $P_2^D$ 、 $P_3^D$  的  $z$  轴坐标递增,此时误差包容区域旋转变动的方向矢量  $V_R^C$  等于轴线  $L$  方向矢量  $V^C$  与  $P_1^D P_2^D$  的矢量叉乘;设置旋转变动角度  $\sigma$  的初始值;计算  $V^C$  与  $P_1^D P_2^D$  的点乘,如果点乘结果等于 0,跳转到步骤 18,如果点乘结果不等于 0,跳转到下一步;

[0119] 如果接触点的数量不为 3,跳转到步骤 14。

[0120] 步骤 12:计算  $V^C$  绕  $V_R^C$  旋转  $\sigma$  角度后的矢量方向  $V^{C'}$ ;然后,将 3 个接触点投影在垂直于  $V^{C'}$  的平面内,并计算 3 个接触点的外接圆的圆心,根据外接圆心与  $V^{C'}$  确定旋转后的圆柱的轴线  $L'$ 。

[0121] 步骤 13:计算所有非接触点到  $L'$  的距离  $d_i$ ,如果  $\min\{d_i\} > R$ ,则表示变动量不足,旋转角度  $\sigma$  变为  $2\sigma$ ;否则,变动过大,其余非接触测点超出包容区域,旋转角度  $\sigma$  变为  $\sigma/2$ ;

[0122] 判断  $\sigma$  前后两次的迭代值之差是否小于设定的误差允许值;若  $\sigma$  前后两次的迭代值之差小于设定的  $\sigma$  误差允许值,则说明找到第 4 个接触点,则将  $V^{C'}$  赋值给  $V^C$ ,跳转到步骤 10;若  $\sigma$  前后两次的迭代值之差不小于设定的  $\sigma$  误差允许值,则跳转到步骤 12。

[0123] 步骤 14:判断包容区域内边界的接触点集合  $\{P_j^D\}$  中接触点的数量是否为 4;

[0124] 如果接触点的数量等于 4,设定圆柱半径增加量  $\Delta R$  的初始值,跳转到下一步;

[0125] 如果接触点的数量不等于 4,则跳转到步骤 17。

[0126] 步骤 15: $\Delta R$  加当前的圆柱半径  $R$  得到  $R'$ ,得到尺寸变动后圆柱,其轴线为  $L''$ ,每个接触到轴线  $L''$  的距离等于  $R'$  的关系,得到以下计算式,

[0127]

$$(x_j^D - x_0)^2 + (y_j^D - y_0)^2 + z_j^D{}^2 - [a(x_j^D - x_0) + b(y_j^D - y_0) + z_j^D]^2 - (a^2 + b^2 + 1)R' = 0$$

[0128] 其中  $(a', b', 0)$  为轴线  $L^{i'}$  的方向矢量,  $(x_0', y_0', 0)$  为轴线  $L^{i'}$  上一点, 以  $a', b', x_0', y_0'$  为未知量, 分别得到 4 个四元非线性方程, 通过非线性方程组可以求解出 4 个未知量, 得到圆柱的轴线  $L^{i'}$ 。

[0129] 步骤 16: 依次计算所有非接触点到  $L^{i'}$  的距离  $d_i'$ , 所有非接触测点对应的  $d_i'$  组成集合  $\{d_i'\}$ , 如果  $\min\{d_i'\} > \Delta R + R$ , 则表示变动量不足,  $\Delta R$  变为  $2\Delta R$ ; 如果  $\min\{d_i'\} \leq \Delta R + R$ , 则变动过大, 其余非接触测点超出包容区域,  $\Delta R$  变为  $\Delta R/2$ ;

[0130] 判断  $\Delta R$  前后 2 次的迭代值之差是否小于设定的  $\Delta R$  误差允许值; 如果  $\Delta R$  前后 2 次的迭代值之差小于设定的  $\Delta R$  误差允许值, 说明找到第 5 个接触点, 将  $(a', b', 0)$ 、 $(x_0', y_0', 0)$  分别赋值给轴线  $L$  的参数  $P^c$ 、 $P_0^c$ , 将各个接触点分别代入下式,

[0131]

$$\alpha_i = [\cos \theta, \sin \theta, z_i \cos \theta, z_i \sin \theta]^T$$

[0132] 其中  $\theta$  为接触点  $P_i$  相对轴线的相位角, 从而得到每个接触点对应的  $\alpha_i$ , 构造下列判别函数,

[0133]

$$J = \min_{\alpha_i} \sum_{k=1}^5 y_k$$

[0134]  $\Omega$  是由下列不等式组确定的可行域:

[0135]

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^I \lambda_i \alpha_i + y = \theta \\ \sum_{i=1}^I \lambda_i + y_5 = 1 \\ \lambda_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, I \\ y_k \geq 0 \quad k = 1, \dots, 4, 5 \end{cases}$$

[0136] 上式中, 第一个约束是矢量方程,  $\theta$  表示 4 维的零列向量, 第二、三个约束为数值方程,  $I$  为接触点的数量, 判断是最优解判别值  $J$  是否等于 0, 如果  $J$  等于 0 表示满足判别准则, 跳转到步骤 18, 如果  $J$  不等于 0 表示不满足判别准则, 跳转到步骤 10; 如果  $\Delta R$  前后 2 次的迭代值之差不小于设定的  $\Delta R$  误差允许值, 则跳转到步骤 15。

[0137] 步骤 17: 判断包容区域内边界的接触点集合  $\{P_i^0\}$  中接触点的数量是否大于等于 5;

[0138] 如果接触点的数量小于 5, 跳转到步骤 10;

[0139] 如果接触点的数量大于等于 5, 以接触点集合中 4 个为 1 个组合, 并以其中 1 个组合为计算对象, 根据步骤 15、16 中的试探性微量调整的方法确定  $\Delta R$ ;

[0140] 判断  $\Delta R$  是否小于设定的  $\Delta R$  误差允许值; 如果  $\Delta R$  小于设定的  $\Delta R$  误差允许值, 应

用步骤 16 的方法判断是否满足判别准则,如果满足则跳转到步骤 18,如果不满足判别准则,换 1 个组合,重新计算  $\Delta R$ , 重新进行判断,依次迭代下去;如果  $\Delta R$  大于设定的  $\Delta R$  误差允许值,将计算得到的  $L^c$  的参数赋值分别给圆柱轴线  $L$  的参数  $V^c$ 、 $R_0^c$ , 然后跳转到步骤 10。

[0141] 步骤 18:输出圆柱度误差、圆柱半径的最优值  $R$  以及圆柱轴线  $L$  的参数。

[0142] 以下通过实验实例,说明本发明所公布方法计算的有效性。

[0143] 在测量平台上,在圆柱体零件表面上获取 24 点,测点坐标如表 1 所示。应用本发明所公布的方法,计算出最大内接圆柱的作用半径为 14.99985062mm,圆柱轴线方向向量  $(-0.000459923841223342, -0.000624025400837475, 0.999999699531135)$ ,圆柱轴线上一点坐标为  $(432.422127159553, 137.332674827430, 0.252514286852374)$ ,圆柱度为 0.03418mm。计算的效果如附图 2 所示(图中,\*为测点,0为接触点),第 5、10、14、16、17 号测点为接触点。分别计算各个接触点的  $\alpha$  映射,并计算最优解的判别值  $J$ ,经计算  $J=1.1382e-014$ ,满足判别准则,计算出的圆柱作用半径及圆柱度误差为最优解。

[0144] 表 1 圆柱的测点坐标(单位:mm)

[0145]

| 测点编号 | x坐标       | y坐标       | z坐标       | 测点编号 | x坐标       | y坐标       | z坐标       |
|------|-----------|-----------|-----------|------|-----------|-----------|-----------|
| 1    | 447.47556 | 137.3431  | -92.99958 | 13   | 447.48749 | 137.37276 | -85.66769 |
| 2    | 440.00617 | 150.36197 | -93.05586 | 14   | 439.98814 | 150.36122 | -85.7225  |
| 3    | 424.95893 | 150.38625 | -93.05948 | 15   | 424.97535 | 150.38594 | -85.72581 |
| 4    | 417.45656 | 137.3433  | -93.00753 | 16   | 417.4618  | 137.37364 | -85.67423 |
| 5    | 425.00292 | 124.3788  | -92.95196 | 17   | 424.98576 | 124.38214 | -85.61846 |
| 6    | 439.9693  | 124.38485 | -92.9484  | 18   | 439.98586 | 124.38661 | -85.61504 |
| 7    | 439.98027 | 124.38204 | -89.28298 | 19   | 439.99686 | 124.38255 | -81.94842 |
| 8    | 424.99233 | 124.37691 | -89.28517 | 20   | 424.96931 | 124.37052 | -81.95173 |
| 9    | 417.46167 | 137.3578  | -89.34018 | 21   | 417.459   | 137.38801 | -82.007   |
| 10   | 424.96768 | 150.38132 | -89.3926  | 22   | 424.96877 | 150.40734 | -82.05929 |
| 11   | 439.9954  | 150.36113 | -89.38932 | 23   | 439.98606 | 150.37835 | -82.05603 |
| 12   | 447.48307 | 137.35783 | -89.33457 | 24   | 447.49399 | 137.38793 | -82.0014  |

[0146] 实施例 2:

[0147] 一种计算圆柱体零件作用尺寸的方法,用于计算圆柱体的最小外接尺寸时,包括如下步骤:

[0148] 步骤 1:将被测圆柱置于测量平台上,在测量空间直角坐标系中测量并获取圆柱表面上的点  $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$  代表测点数目且  $n$  为大于 5 的正整数;所有测点  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  形成测点集  $\{P_i\}$ 。

[0149] 步骤 2:随机给出圆柱的参数,即圆柱的轴线  $L$  方向向量  $V^c(a, b, 1)$ ;进行坐标系的旋转变换,使坐标系  $z$  轴平行于圆柱轴线  $L$  方向向量  $V^c$ ;坐标变换后,将测点  $P_i$  投影在  $xoy$  平面内,得到测点  $P_i$  坐标  $(X_i, Y_i)$ ;所有测点  $P_i(X_i, Y_i)$  形成测点集  $\{P_i\}$ 。

[0150] 步骤 3:在点集  $\{P_i\}$  中,任意取出 3 个测点,并计算 3 个测点组成三角形的外接圆

心  $O^R(x_0, y_0)$ , 作为圆心  $O^R$  的迭代初始值。

[0151] 步骤 4: 依次计算测点集  $\{P_i\}$  中各测点到圆心  $O^R$  的距离; 并记录测点集  $\{P_i\}$  中各测点到圆心坐标  $O^R$  距离的最大距离所对应的测点, 得到误差包容区域外边界的接触点集合  $\{B_k\}$ 。

[0152] 步骤 5: 判断误差包容区域外边界的接触点集合  $\{B_k\}$  中是否只有 1 个接触点;

[0153] 如果只有 1 个接触点, 则该接触点为有效接触点, 此时包容区域平移的方向向量  $V_T^R$  等于接触点坐标减去圆心坐标  $O^R$ , 跳转到步骤 8;

[0154] 如果接触点数量大于 1, 则跳转到下一步。

[0155] 步骤 6: 判断误差包容区域外边界的接触点集合  $\{B_k\}$  中是否只有 2 个接触点;

[0156] 如果只有 2 个接触点, 则这 2 个接触点为有效接触点, 此时包容区域平移的方向向量  $V_T^R$  等于 2 个接触点连线的中点坐标减去圆心坐标  $O^R$ , 跳转到步骤 8;

[0157] 如果接触点数量大于 2, 则跳转到下一步。

[0158] 步骤 7: 计算各个接触点  $(x_k^D, y_k^D)$  相对圆心  $O^R$  的相位角  $\alpha_k^R$ ,

[0159]

$$\alpha_k^R = \begin{cases} \arctan \frac{y_k^D - y_0}{x_k^D - x_0}, & x_k^D - x_0 > 0 \\ \arctan \frac{y_k^D - y_0}{x_k^D - x_0} + \pi, & x_k^D - x_0 < 0 \end{cases}$$

[0160] 所有接触点的相位角  $\alpha_k^R$  形成集合  $\{\alpha_k^R\}$ , 对  $\{\alpha_k^R\}$  中的元素进行排序, 得到向量  $\{\beta_k^R\}$ , 计算向量  $\{\beta_k^R\}$  中相邻 2 个相位角  $\{\beta_k^R\}$  之差,

[0161]

$$\Delta_k^R = \begin{cases} |\beta_{k+1}^R - \beta_k^R| & k \neq n^D \\ |\beta_1^R - \beta_{n^D}^R| & k = n^D \end{cases}$$

[0162]  $n^D$  为接触点的数量; 计算  $\max\{\Delta_k^R\}$ , 如果  $\max\{\Delta_k^R\} \leq \pi/2$ , 则满足锐角三角形准则或直径准则, 跳转到步骤 9; 如果  $\max\{\Delta_k^R\} > \pi/2$ , 查询  $\max\{\Delta_k^R\}$  对应的 2 个接触点, 所查询到的 2 个接触点有效接触点, 其余接触点为无效接触点, 此时包容区域平移的方向向量  $V_T^R$  等于 2 个有效接触点连线的中点坐标减去圆心  $O^R$  坐标。

[0163] 步骤 8: 依次计算包容区域变动到与各个非接触测点  $P_i$  接触时的圆心虚拟位置  $O_i$ ;

[0164] 首先分别计算各个非接触测点  $P_i$  和其中一个有效接触点的垂直中分线, 然后计算

垂直中分线与过圆心  $O^R$  且方向矢量为  $V_T^R$  的直线的交点,即为包容区域变动到与该测点  $P_i^R$  接触时,圆心的虚拟位置  $O_i$ ,所有的非接触测点对应的  $O_i$  组成集合  $\{O_i\}$ ,计算各个非接触测点对应的  $O_i$  到圆心  $O^R$  的距离  $|O^R O_i|$ ,所有的  $|O^R O_i|$  构成集合  $\{|O^R O_i|\}$ ,在集合  $\{|O^R O_i|\}$  中,剔除  $V_T^R$  与  $O^R O_i$  异向的对应元素,然后查询集合  $\{|O^R O_i|\}$  中的最小值,即为包容区域的平移变动量  $S$ ;根据包容区域变动量  $S$  以及移动方向矢量  $V_T^R$ ,计算圆心的坐标  $O^R(x_0, y_0)$ ;转到步骤 4。

[0165] 步骤 9:进行与步骤 2 中相逆的坐标变换,测点坐标还原到原始值,计算  $O^R$  坐标变换后的坐标  $P_0^C(x_0, y_0)$ ,即为圆柱轴线  $L$  上一点,圆柱轴线  $L$  以  $V^C$  为方向矢量。

[0166] 步骤 10:依次计算测点集  $\{P_i\}$  中各个测点到轴线  $L$  的距离;并记录测点集  $\{P_i\}$  中各个测点到轴线  $L$  距离的最大值,所记录距离最大值对应的测点集合为包容区域外边界的接触点集合  $\{P_j^U\}$ ,所记录距离的最大值为圆柱的半径  $R$ 。

[0167] 步骤 11:判断包容区域外边界的接触点集合  $\{P_j^U\}$  中接触点的数量是否为 3;

[0168] 如果接触点的数量等于 3,则对接触点进行的坐标转换,使坐标系  $z$  轴正向与圆柱轴线  $L$  的方向矢量  $V^C$  同向且平行,对接触点按其  $z$  轴坐标进行由小到大的排序,使  $P_1^U$ 、 $P_2^U$ 、 $P_3^U$  的  $z$  轴坐标递增,此时误差包容区域旋转变动的方向矢量  $V_R^C$  等于轴线  $L$  方向矢量  $V^C$  与  $P_2^U P_1^U$  的矢量叉乘;设置旋转变动角度  $\sigma$  的初始值;计算  $V^C$  与  $P_1^U P_3^U$  的点乘,如果点乘结果等于 0,跳转到步骤 18,如果点乘结果不等于 0,跳转到下一步;

[0169] 如果接触点的数量不为 3,跳转到步骤 14。

[0170] 步骤 12:计算  $V^C$  绕  $V_R^C$  旋转  $\sigma$  角度后的矢量方向  $V^{C'}$ ;然后,将 3 个接触点投影在垂直于  $V^{C'}$  的平面内,并计算 3 个接触点的外接圆的圆心,根据外接圆心与  $V^{C'}$  确定旋转后的圆柱的轴线  $L'$ 。

[0171] 步骤 13:计算所有非接触测点到  $L'$  的距离  $d_i$ ,如果  $\max\{d_i\} < R$ ,则表示变动量不足,旋转角度  $\sigma$  变为  $2\sigma$ ;如果  $\max\{d_i\} \geq R$ ,变动过大,其余非接触测点超出包容区域,旋转角度  $\sigma$  变为  $\sigma/2$ ;

[0172] 判断  $\sigma$  前后两次的迭代值之差是否小于设定的误差允许值;若  $\sigma$  前后两次的迭代值之差小于设定的  $\sigma$  误差允许值,则说明找到第 4 个接触点,则将  $V^{C'}$  赋值给  $V^C$ ,跳转到步骤 10;若  $\sigma$  前后两次的迭代值之差不小于设定的  $\sigma$  误差允许值,则跳转到步骤 12。

[0173] 步骤 14:判断包容区域外边界的接触点集合  $\{P_j^U\}$  中接触点的数量是否为 4;

[0174] 如果接触点的数量等于 4,设定圆柱半径减小量  $\Delta R$  的初始值,跳转到下一步;

[0175] 如果接触点的数量不等于 4, 则跳转到步骤 17。

[0176] 步骤 15:  $\Delta R$  减去当前的圆柱半径  $R$  得到  $R'$ , 得到尺寸变动后圆柱, 其轴线为  $L''$ , 每个接触到轴线  $L''$  的距离等于  $R'$  的关系, 得到以下计算式,

[0177]

$$(x_j^0 - x_0')^2 + (y_j^0 - y_0')^2 + z_j^0{}^2 - [a(x_j^0 - x_0') + b(y_j^0 - y_0') + z_j^0]^2 - (a^2 + b^2 + 1)R' = 0$$

[0178] 其中  $(a', b', 0)$  为轴线  $L''$  的方向矢量,  $(x_0', y_0', 0)$  为轴线  $L''$  上一点, 以  $a', b', x_0', y_0'$  为未知量, 分别得到 4 个四元非线性方程, 通过非线性方程组可以求解出 4 个未知量, 得到圆柱的轴线  $L''$ 。

[0179] 步骤 16: 依次计算所有非接触点到  $L''$  的距离  $d_i'$ , 所有非接触测点对应的  $d_i'$  组成集合  $\{d_i'\}$ , 如果  $\max\{d_i'\} < \Delta R + R$ , 则表示变动量不足,  $\Delta R$  变为  $2\Delta R$ ; 如果  $\max\{d_i'\} \geq \Delta R + R$ , 则变动过大, 其余非接触测点超出包容区域,  $\Delta R$  变为  $\Delta R/2$ ;

[0180] 判断  $\Delta R$  前后 2 次的迭代值之差是否小于设定的  $\Delta R$  误差允许值; 如果  $\Delta R$  前后 2 次的迭代值之差小于设定的  $\Delta R$  误差允许值, 说明找到第 5 个接触点, 将  $(a', b', 0)$ 、 $(x_0', y_0', 0)$  分别赋值给轴线  $L$  的参数  $P^c$ 、 $P_0^c$ , 并应用实施例 1 中步骤 16 的方法判断是否满足判别准则, 若满足则跳转到步骤 18, 若不满足判别准则, 跳转到步骤 10; 如果  $\Delta R$  前后 2 次的迭代值之差不小于设定的  $\Delta R$  误差允许值, 则跳转到步骤 15。

[0181] 步骤 17: 判断包容区域外边界的接触点集合  $\{P_j^0\}$  中接触点的数量是否大于等于 5;

[0182] 如果接触点的数量小于 5, 跳转到步骤 10;

[0183] 如果接触点的数量大于等于 5, 以接触点集合中 4 个为 1 个组合, 并以其中 1 个组合为计算对象, 根据步骤 15、16 中的试探性微量调整的方法确定  $\Delta R$ ;

[0184] 判断  $\Delta R$  是否小于设定的  $\Delta R$  误差允许值; 如果  $\Delta R$  小于设定的  $\Delta R$  误差允许值, 应用实施例 1 中步骤 16 的方法, 判断是否满足判别准则, 如果满足则跳转到步骤 18, 如果不满足判别准则, 换 1 个组合, 重新计算  $\Delta R$ , 重新进行判断, 依次迭代下去; 如果  $\Delta R$  大于设定的  $\Delta R$  误差允许值, 将计算得到的  $L''$  的参数赋值分别给圆柱轴线  $L$  的参数  $P^c$ 、 $P_0^c$ , 然后跳转到步骤 10。

[0185] 步骤 18: 输出圆柱度误差、圆柱半径的最优值  $R$  以及圆柱轴线  $L$  的参数。

[0186] 以下通过实验实例, 说明本发明所公布方法计算的有效性。

[0187] 在测量平台上, 在圆柱体零件表面上获取 24 点, 测点坐标如表 2 所示。应用本发明所公布的方法, 计算出最大内接圆柱的作用半径为 11.9990887mm, 圆柱轴线方向矢量  $(0.00111825745503225, 0.000306176357337651, 0.999999327877925)$ , 圆柱轴线上一点坐标为  $(404.550573605996, 126.630909902755, 0.0446863090043053)$ , 圆柱度为 0.01475mm。计算的效果如附图 3 所示(图中, \* 为测点, ☆ 为接触点), 第 1、5、14、19、20 号测点为接触点。分别计算各个接触点的  $\mathcal{C}$  映射, 并计算最优解的判别值  $J$ , 经计算

$f=2.5931e-014$ , 满足判别准则, 计算出的圆柱作用半径及圆柱度误差为最优解。

[0188] 表 2 圆柱的测点坐标(单位 :*mm*)

[0189]

| 测点编号 | x坐标       | y坐标       | z坐标       | 测点编号 | x坐标       | y坐标       | z坐标       |
|------|-----------|-----------|-----------|------|-----------|-----------|-----------|
| 1    | 416.50196 | 126.62207 | -42.61907 | 13   | 416.50921 | 126.6223  | -35.28499 |
| 2    | 410.49696 | 137.01158 | -42.60984 | 14   | 410.50862 | 137.01277 | -35.27656 |
| 3    | 398.50797 | 136.99947 | -42.59217 | 15   | 398.51415 | 137.00824 | -35.25898 |
| 4    | 392.51838 | 126.62312 | -42.58308 | 16   | 392.51911 | 126.62285 | -35.24976 |
| 5    | 398.49642 | 116.23034 | -42.59151 | 17   | 398.50985 | 116.23174 | -35.25818 |
| 6    | 410.49805 | 116.22964 | -42.60937 | 18   | 410.50947 | 116.22875 | -35.27604 |
| 7    | 410.50638 | 116.22778 | -38.94272 | 19   | 410.51541 | 116.2301  | -31.6094  |
| 8    | 398.50449 | 116.23247 | -38.92521 | 20   | 398.51512 | 116.23001 | -31.59186 |
| 9    | 392.52266 | 126.62223 | -38.91647 | 21   | 392.51775 | 126.62182 | -31.58326 |
| 10   | 398.50907 | 137.00335 | -38.9252  | 22   | 398.51751 | 137.0105  | -31.59181 |
| 11   | 410.50058 | 137.01238 | -38.94329 | 23   | 410.51169 | 137.01117 | -31.60976 |
| 12   | 416.50494 | 126.62223 | -38.95278 | 24   | 416.51224 | 126.62176 | -31.61957 |

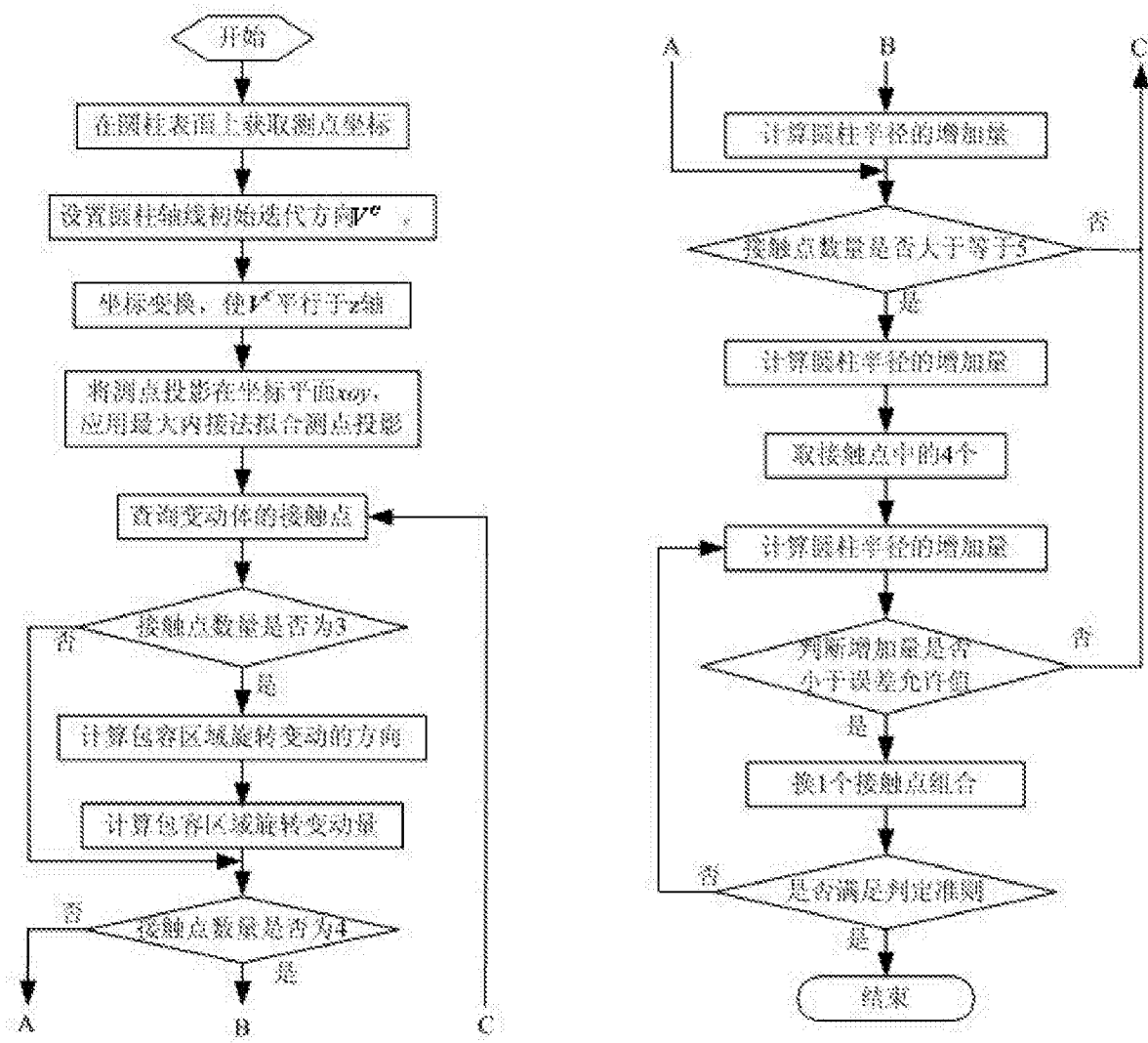


图 1



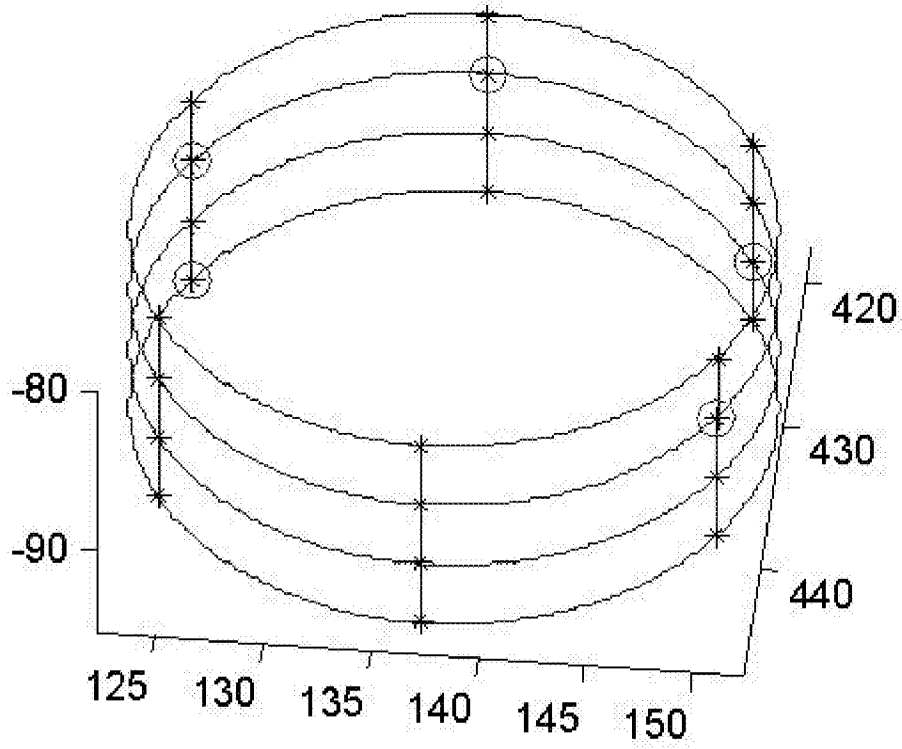


图 2

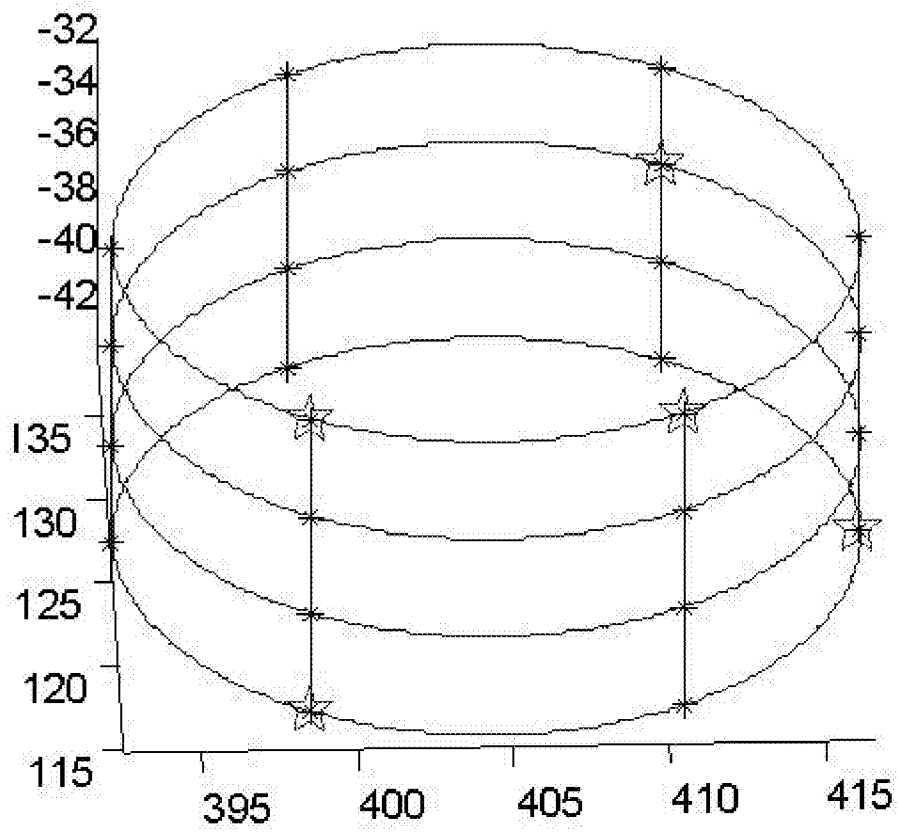


图 3