21040000079007 18 黄美发. fbd
第 42 卷 第 5 期 仪 器 仪 表 学 报 Vol. 42 No. 5
2021 年 5 月 Chinese Journal of Scientific Instrument May 2021

DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2107341

基于误差来源的孔轴直线度检测的测点优化方法*

黄美发[1,2],刘廷伟[1],唐哲敏[1],刘振辉[1]
(1. 桂林电子科技大学机电工程学院 桂林 541004; 2. 桂林电子科技大学广西制造系统与先进制造技术重点实验室 桂林 541004)

摘 要:针对测量间距的选择难以兼顾准确及效率的问题,提出一种基于误差来源的孔轴直线度检测的测点优化方法。分析实际零件的误差来源,得到零件表面形状的尺寸误差;根据误差来源和直线度公差的工程语义,构建零件表面形状的模拟函数;基于误差理论的原理,在模拟函数的基础上分析测量间距与误差评定值的关系,构建测点集精度函数;对于给定的公差和加工方法,基于蒙特卡罗法仿真原理随机生成一系列模拟表面,用建立的测点集精度函数分析和统计各模拟表面的最佳测量间距,并进一步分析真实零件的最佳测量间距。最后,通过两个工程实例分别验证提出方法的准确性和有效性;实例结果表明,与理论方法相比,实例一(实例二)的轴向和径向的测点数分别减少 1 994(226)个和 42(396)个,提出的方法在满足精度的条件下提高了测量效率。

关键词: 误差来源;测点;模拟函数;蒙特卡罗法;孔轴直线度
中图分类号: TH124 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460. 2030

A measuring point optimization method for hole shaft straightness detection based on error source

Huang Meifa[1,2], Liu Tingwei[1], Tang Zhemin[1], Liu Zhenhui[1]
(*1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Manufacturing System and Manufacturing Technology, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China*)

Abstract: When the measuring distance is selected, it is difficult to balance the accuracy and efficiency. To address this issue, an optimization method of measuring point based on error source for hole shaft straightness detection is proposed. The error source of real part is analyzed. Then, the dimensional error of surface shape of part is obtained. According to the engineering semantics of the error source and straightness tolerance, the simulation function of the surface shape of the part is established. Based on the principle of error theory, the relationship between the measured distance and the error evaluation value is analyzed, which is based on the simulation function. And the point set accuracy function is formulated. For the given tolerance and machining method, a series of simulated surfaces are randomly generated based on the Monte Carlo method simulation principle. By using the precision function of the set of measured points, the best measuring distance of each simulated surface is analyzed and counted. In further, the best measuring distance of real parts is analyzed. Finally, two engineering examples are implemented to evaluate the accuracy and effectiveness of the proposed method. Compared with the theoretical method, results show the number of axial and radial measuring points in the first example is reduced by 1 994 (226) and 42 (396), respectively. The proposed method improves the measuring efficiency under the condition of satisfying the accuracy.

Keywords: error source; measure point; simulation function; Monte Carlo method; hole shaft straightness

收稿日期:2021-01-06 Received Date: 2021-01-06
*基金项目:国家自然科学基金(51765012)、广西研究生教育创新计划(YCSW2020163)项目资助

0 引言

精密测量技术是工程科学的基础,几何误差测量历来是精密测量技术的一项重要课题[1-2]。直线度公差是零件标注几何公差中较为常见的类型,其包括给定平面内和给定任意方向。在信息化、数字化制造环境下,为检测机械产品的直线度误差,三坐标测量机(coordinate measuring machine, CMM)等数字化的精密测量装备已广泛应用于离线、在线或在位测量之中[3-4]。由于孔轴类零件具有相同曲率半径,检测直线度误差时布点经常采用等间距的方式,而在不同的测量间距下进行测量得到的误差评定结果不同。在企业内测量间距一般是根据检测人员的经验或企业标准来选择,国际标准和国家标准中并未给出确定测点数的理论依据[5]。若选取的间距过大,则采集不完整,造成表面信息丢失;反之,若间距过小,则测量成本提高,而精度无显著提升[6]。因此,选择更合适的测量间距以准确反映被测表面特征尤其重要。

近年来,许多学者研究测点的自动生成方法,发现测点特征对表面拟合精度和测量效率有显著的影响[1]。针对平面、圆柱面、圆锥面和球面要素的测量,主要采用低差异序列的随机分布方法,包括 Hammersley 序列[7]、叶序理论[8]、改进 Halton 序列[9]等。对于自由曲面的测量,采用基于数学过程的方法,方法包括奈奎斯特采样定理[10]、压缩感知模型[11]、Zernike 模型[12]、Gaussian RBF-BS 模型[13]、Greedy search 算法[14]和粒子群算法[15]等。以上方法是测点自适应分布、提高测量精度和测量路径优化的研究,对零件误差源本身的深入分析还比较欠缺,主要是测量时或初步测量后进行测量间距的优化调整[16]。

新一代 GPS(geometrical produce specifications)标准理论与应用对提取操作进行理论定义,只撰写了提取操作包括测点分布和测量点数的概念。国家标准推荐的测点分布方法,包括:鸟笼法、母线法、圆周线法和随机布点法,其中鸟笼法、母线法和圆周线法统称为等间距布点法[4]。相关标准只推荐测点分布方法而未给出测量间距。然后,Qi 等[17]根据标准提供的圆周线测点分布方式研究测点数生成,该理论方法是先确定截止波长或截止波动数,然后根据理论最小测点密度的原理计算轴向和径向的测点数。该方法最终得到的测点数较多,从而降低测量效率和增加测量成本。

对于孔轴零件标注直线度而言,柱面曲率变化很小,通常采用等间距测量即可,更关心的是测点分布的最佳间距[18]。如何在测量前根据零件误差来源制定或初步制定合适的测量间距,当前仍缺乏有效方法。

美国的洛斯阿拉莫斯实验室[19]在20世纪40年代提出了蒙特卡罗法(或称随机抽样法)。目前,该方法广泛应用在随机过程的模拟。其特征在于根据目标优化问题的概率密度而随机生成大量的伪随机数,用生成的伪随机数来模拟实际数据,从而解决目标优化问题。

针对现有方法中存在的不足,本文将蒙特卡罗法引入到直线度检测的测点优化中[20]。分析实际零件的误差来源,构建模拟实际零件表面的函数;对于给定的模拟表面构建测点集精度函数;对于给定的公差和加工方法,基于蒙特卡罗法仿真原理随机生成一系列模拟表面,用建立的测点集精度函数分析和统计各模拟表面的最佳测量间距,并进一步分析真实零件的最佳测量间距。最后,通过实例验证提出方法的准确性和有效性。

1 圆柱体直线度误差的来源

1.1 零件表面的实际形状

加工误差来源通常认为在零件材料、切削用量和刀具几何参数等确定性的条件下产生。实际上,就算是在相同条件下,加工出来的两个零件不会完全相同,会存在随机误差[16]。本文研究在相同装夹方式下(一端卡盘夹紧、一端卡盘夹紧和另一端顶尖支承、两端项尖支承,加跟刀架等),切削力与温度的作用使零件形貌发生弯曲变形,典型的误差模型包括锥形、凹形、凸形和香蕉形等。因此,在给定加工条件下预测零件误差来源,即尺寸误差。把尺寸误差分解为确定性误差和随机性误差,分别用 δ_S、δ_C 和 δ_R 分别表示尺寸误差、确定性误差和随机性误差。

在零件材料、切削用量和刀具几何参数等确定性的因素下,分析主切削力(F_c)和背切削力(F_p)作用使圆柱类零件发生弯曲变形,产生的误差称为确定性误差,误差分析如图1所示。假设零件初始直径为 d_w 和理论切削深度为 a_p,由于加了跟刀架使得刀具和零件退让,造成加工后的直径($d_{m,z}$)大于公称直径,如式(1)所示。

$$\left(\frac{d_{m,z}}{2}\right)^2 = \left(\frac{d_w}{2} - a_p + u_1 - u_x\right)^2 + (u_2 - u_y)^2 \quad (1)$$

其中,u_x 和 u_y 分别为背切削力(F_p)和主切削力(F_c)作用的变形量,u_1 和 u_2 表示刀具在 X 轴和 Y 轴方向的退让。

退让值 u_1 和 u_2 相对于弯曲变形量(u_x 和 u_y)可以忽略,则对式(1)进行整理得到直径,如式(2)所示。

$$d_{m,z} = 2\sqrt{\left(\frac{d_w}{2} - a_p - u_x\right)^2 + u_y^2} \quad (2)$$

由图1分析得到零件上某 z 坐标值对应的确定性误差 δ_C,如式(3)所示。

$$\delta_C = d_{m,z} - (d_w - 2a_p) \quad (3)$$

但是,加工误差的大小还会受到不确定因素温度的影响。因此,除了确定性误差外,还需要考虑温度的变化而产生的随机误差 δ_R,如式(4)是关于温度变化量 ΔT_z 和零件加工位置 L_z 的函数,其中 L 为零件测量长度、$a_e(\Delta T_z)$ 为不同温度条件下随机误差曲线斜率,反映随机误差与温度的变化程度。因此,在给定加工条件下计算尺寸误差 δ_S,如式(5)所示。

$$\delta_R = a_e(\Delta T_z)(L_z - L) \tag{4}$$

$$\delta_S = \delta_C + \delta_R \tag{5}$$

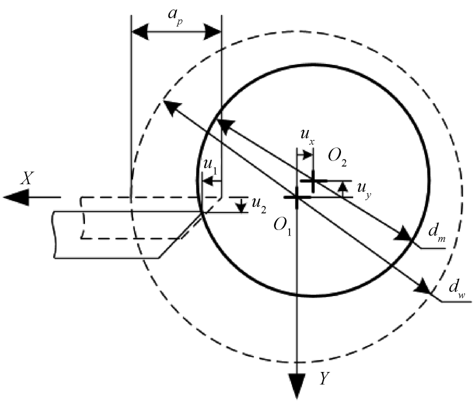


图 1 零件尺寸误差的几何分析

Fig. 1 Geometric analysis of part size error

1.2 直线度的几何约束

较为常见的给定任意方向的直线度公差,如图 2 所示。图 2(a)是应用最大实体要求(maximum material requirement, MMR)时给定任意方向的直线度标注,符号为 M;图 2(b)是动态公差图,表示圆柱体的轴线应在其公差带内,公差带为直径等于公差值 Φt 内的最小外接圆柱面所限定的区域[3],$\Phi t \in [T_G, T_G+]$。公差框图里应用 MMR 公差原则,轴线误差在尺寸公差和直线度公差共同作用形成综合公差值内,保证功能要求的情况下适当放宽直线度公差值的大小,提高可装配性。直线度对圆柱体具有如下要求:

1)d_M 和 d_L 分别表示最大实体尺寸和最小实体尺寸,其 d_M 等于公称直径(d)加上偏差(es)、d_L 等于公称直径(d)加下偏差(ei),圆柱体的局部尺寸(d_a)应介于[d_L,d_M]之间;d_{MV} 表示最大实体实效尺寸,其大小等于最大实体尺寸(d_M)加公差值(T_G)。d_{fe} 表示圆柱体的体外作用尺寸,是在给定长度上,与实际孔体外接触的最大理想表面的直径,其大小不得超出 d_{MV};

2)当 $d_a=d_M$ 时,对应的几何公差值大小为 T_G;当 $d_a=d_L$ 时,尺寸公差补偿几何公差,对应的几何公差值大小为 T_G+,即 $T_G+=es-ei+T_G$;

3)当尺寸公差的上偏差等于 0 时,则 $d_M=d$。

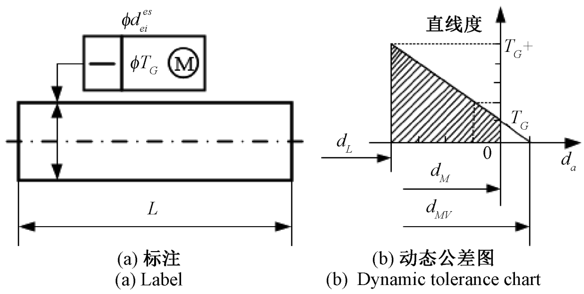


图 2 直线度公差和动态公差图

Fig. 2 Straightness tolerance and dynamic tolerance chart

1.3 零件表面形状的模拟

根据零件尺寸误差分析结果模拟应用 MMR 时任意方向的直线度的零件表面形状。如图 2(a)的检测零件,当符合 1.2 节直线度对圆柱体的要求 1)和 2)时,尺寸误差补偿直线度公差,则直线度公差的允许值变大,导致模拟测点所在的区域变宽。假设在圆柱体零件表面模拟系列的测点,且测点的随机误差服从正态分布[21],画出如图 3 所示的测量列分布曲线图,其中 $f(\delta)$ 为正态分布的分布密度。为得到零件表面形状的模拟函数,其具体分析如下:

计算第 k 个测点的实际直径,实际直径等于公称直径加上允许的误差值(称为综合误差),如式(6)所示。

$$d + \bar{x} + x_k = d_{a,k} \tag{6}$$

其中,d 为公称直径,x_k($k=1, 2,\cdots, K$)为 0~1 内的随机变量,所有的 x_k 集合服从正态分布:$x_k \sim N(T_G/2,\sigma)$,$\bar{x}$ 为 x_k 的随机均值,$d_{a,k}$ 为第 k 个测点的实际直径。

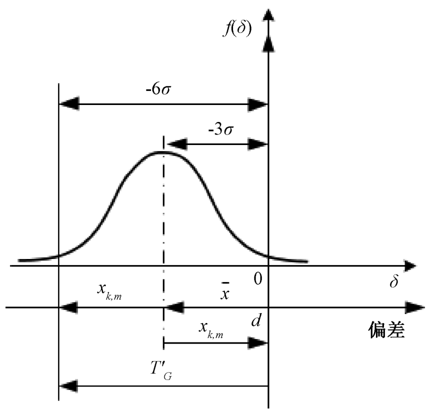


图 3 测量列分布曲线图

Fig. 3 Measuring column distribution curve

当单次测量随机变量 x_k 相对于 $\bar{x}$ 到达上极限值($x_{k,M}$)时,则实际直径为极大值($d_{a,M}$),则式(6) 变成式(7):

$$d + \bar{x} + x_{k,M} = d_{a,M} \tag{7}$$

当零件标注信息满足要求 3)时,则 $d = d_{a,M}$,从而得到 $\bar{x} + x_{k,M} = 0$。

相似的,当单次测量随机变量相 x_k 对于 $\bar{x}$ 到达下极限值($x_{k,m}$)时,则实际直径为极小值($d_{a,m}$),则式(7)变成式(8):

$$d + \bar{x} - x_{k,m} = d_{a,m} \tag{8}$$

当零件标注信息满足要求 3)时,实际直径的极小值等于最小实体尺寸,而 T'_G 为尺寸误差补偿直线度公差后直线度公差的允许值,即 $T'_G = \delta_S + T_G$,由于 $d_{a,m} - d = T'_G$,从而得到 $\bar{x} - x_{k,m} = T'_G$。

根据误差理论与数据处理,当 $|\delta| = 3\sigma$ 时单次测量不超出 $|\delta|$ 的概率为 99.73%[21]。由于 $|T'_G| = 6\sigma$,所以径向截面上某个测量点的实际直径,如式(9)所示,从而得到应用 MMR 时任意方向的直线度公差的零件表面形状的模拟函数。

$$d + \frac{T'_G}{2} + \frac{T'_G}{6} x_k = d_{a,k} \tag{9}$$

2 给定模拟表面的测量截面数分析

2.1 测点集的模拟

根据如图 4(a)所示零件标注,生成评定直线度误差的测点集。由于圆柱类的零件具有相同曲率半径,测量时布点一般采用等间距采样(均匀分布)的方法,即在 Z 轴方向均匀提取 I 个截面。

如图 4(b)所示在 X、Y 和 Z 方向分别由 3 个尺度的轴向误差和径向误差合成。根据 1.3 节给定零件的模拟表面形状,求被测零件截面上的所有测点 $\{\boldsymbol{q}_{k,i} \mid \boldsymbol{q}_{k,i} = (x_{k,i},\ y_{k,i},\ z_{k,i})^{\mathrm{T}};k = 1,\ 2,\cdots,\ K(K>3);i = 1,\ 2,\cdots,\ I\}$ 作为提取组成要素—被测零件的表面,因此建立测点集精度模拟函数,如式(10)所示。

$$\begin{cases} \boldsymbol{z}_{k,i} = \sum\limits_{i=1}^{I} \dfrac{L}{I} i \\ \boldsymbol{x}_{k,i} = \sum\limits_{j=1}^{3} \left(a_j \dfrac{d_{a,k}}{2} \sin\left(\dfrac{2^j \pi k}{K} \right) \right) \\ \boldsymbol{y}_{k,i} = \sum\limits_{j=1}^{3} \left(a_j \dfrac{d_{a,k}}{2} \cos\left(\dfrac{2^j \pi k}{K} \right) \right) \end{cases} \tag{10}$$

其中,$j(j = 1,2,3)$表示 3 个误差尺度的幅值和频率系数;$a_j = 1/(1.11 \times 10^{j-1})$表示第 j 个 $d_{a,k}$ 的权重系数,使得 $\sum\limits_{j=1}^{3} \left(a_j \dfrac{d_{a,i}}{2} \right) \approx \dfrac{d_{a,i}}{2}$。

模拟得到测点集之后,以每个截面 i 的最小二乘圆心 $\{\boldsymbol{p}_i \mid \boldsymbol{p}_i = (x_i,\ y_i,\ z_i)^{\mathrm{T}};i = 1,\ 2,\cdots,\ I\}$ 作为提取导出要素:被测圆柱体的中心线。截面上测点 $\boldsymbol{q}_{i,k}$ 到最小二乘圆心 $\boldsymbol{p}_i$ 的距离的平方如式(11)所示。

$$(x_{k,i} - x_i)^2 + (y_{k,i} - y_i)^2 = r_i^2 \tag{11}$$

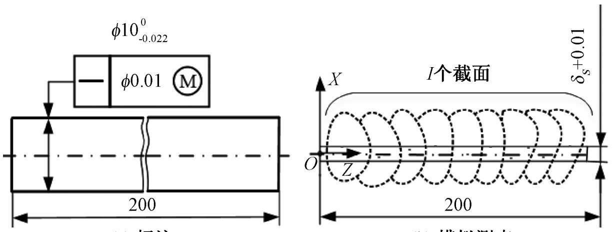
将式(11)展开,可以得到如式(12)所示。

$$x_{k,i}^2 + y_{k,i}^2 - 2x_{k,i}x_i - 2y_{k,i}y_i + x_i^2 + y_i^2 = r_i^2 \tag{12}$$

式(12)的 x_i, y_i 是微小量,可以将 x_i^2, y_i^2 视为二阶小量并忽略掉,整理得到求解最小二乘圆心的基本方程组,如式(13)所示。

$$\boldsymbol{Ax} = \begin{bmatrix} \cdots & \cdots & \cdots \\ 2x_{k,i} & 2y_{k,i} & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ r_i^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdots \\ x_{k,i}^2 + y_{k,i}^2 \\ \cdots \end{bmatrix} = \boldsymbol{B} \tag{13}$$

求解方程组的最小二乘解,就可以得到被测圆柱体的中心线测点集 $\{\boldsymbol{p}_i\}$,后面所述的截面数即为中心线测点个数。



(a) 标注
(a) Label

(b) 模拟测点
(b) Simulated measuring points

图 4 公差标注和模拟测点集

Fig. 4 Tolerance marking and simulated measuring point set

2.2 截面数与误差评定值的关系

根据形状误差的评定准则,对于应用 MMR 时任意方向的直线度公差的零件,通过 2.1 节得到中心线测点集 $\{\boldsymbol{p}_i\}$,调用评定算法对测点集进行误差评定[22]。分析零件的截面数对直线度误差评定值(体外作用尺寸)大小的影响。对于图 4 的测量零件,当在每个截面上采用固定的测点个数时,随着截面的个数逐渐增多导致直线度误差评定值也有逐渐变大的趋势,结果如图 5 所示。当截面数多到一定的时候,它包含有用点集的频率是稳定的,评定误差值基本趋于某个固定值而不受截面数增加的影响。然而,随着截面数增多,会影响测量效率和增加成本。应该在满足零件精度要求时,选择较合适的截面数。

3 给定公差和加工方法的截面数分析

根据国标提供的孔轴零件检测的测点分布方式,对于给定的公差和加工方法,根据测点集精度函数采用蒙特卡罗法生成一系列模拟表面。然后,分析和统计各种随机表面的最佳测量间距,并进一步分析实际零件的最佳测量间距。

基于蒙特卡罗法的仿真原理,以测量长度(L)、直线

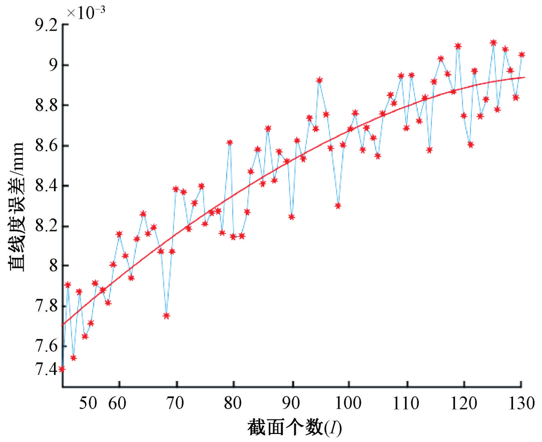


图 5 截面数与直线度误差评定值之间关系

Fig. 5 The relationship between the number of sections and the straightness evaluation error

度公差(T_G)、测量允差(ε)、圆周截面上的测点个数(K)和初始截面数(I_1)为输入,以测量零件的最佳间距(Δ)作为输出。具体流程如图 6 所示。

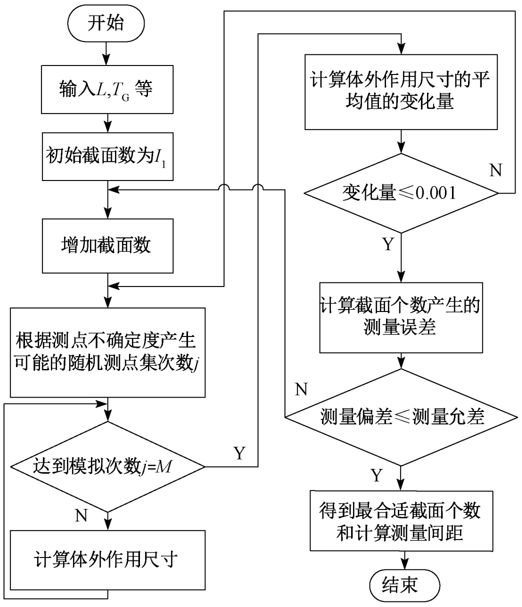


图 6 测点集模拟流程

Fig. 6 Measuring point set simulation process

1)开始时输入 L、T_G、ε 和 K。其中,K 应满足 $K>3$。采用 CMM 测量零件,得到每个截面上测点的经验计算公式,如式(14)所示。

$$\min\ K = \frac{2\pi}{\theta}$$

s. t.

$$\begin{cases} |\ \varepsilon_2\ | = R \times 0.005\ 8\theta^{3.9} \\ \varepsilon = \pm\sqrt{(\varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_2)^2} \end{cases} \tag{14}$$

其中,ε 为测量允差;ε_1 为三坐标测量机误差,查阅 CMM 检定书获得;ε_2 为测点个数造成的误差;R 为圆柱体的公称半径;θ 为测点之间的角度。

2)输入初始截面数的个数 I_1,逐渐增加截面的个数;

3)采用 2.1 节模拟函数公式得到符合正态分布的初始组序 $j=1$ 的测点集;

4)利用 2.2 节的误差评定方法得到零件体外作用尺寸,模拟 M 组相互独立的测点集,直到组序 $j=M$ 时计算得到 M 组测点集的体外作用尺寸平均值的变化量,国标规定 $M\geqslant 20$[4];

5)根据测点模拟基于"直线度误差评定的结果服从正态分布"这一理论,设计判断条件:体外作用尺寸平均值的变化量小于 0.001 mm 时,模拟测点符合所要求大样本条件,且直线度误差服从正态分布,执行下一步;否则返回第 3)步骤,直到符合条件。

6)计算体外作用尺寸平均值与其(公称直径与综合公差值之和)之差的绝对值,即测量偏差。比较:测量偏差与测量允差,当测量偏差小于等于测量允差时,停止增加截面数;否则返回步骤 2)增加截面数,循环迭代直到符合判断条件,输出最后得到的最佳间距。

4 实例研究

4.1 实例一

如图 7 为塑料模具中顶杆零件的尺寸与几何公差的初步规范,采用 Matlab R2016b 软件模拟测量间距并进行测量结果的不确定度分析,用于验证提出方法的准确性。根据零件的标注信息,进行公差分析满足了 1.2 节直线度对圆柱体的 3 个要求。使用 Matlab R2016b 软件仿真零件加工时采用一端卡盘夹紧、另一端顶尖支承和加了跟刀架的装夹,在切削力与温度作用下的尺寸误差模型为凸形,如图 8 所示,最大极限的尺寸误差为 0.012 9 mm,符合尺寸公差要求。

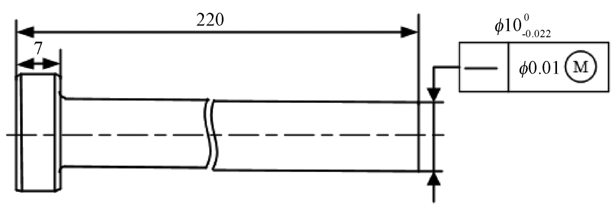


图 7 塑料模具的顶杆

Fig. 7 Ejector pin of plastic mold

然后,把尺寸误差补偿给直线度公差,得到直线度综合误差值 $T'_G=0.01+\delta_S$,根据式(9)得零件表面形状的模拟函数:$10+T'_G/2+x_i\cdot T'_G/6=d_{a,i}$。把测量长度 $L=213$ mm、测量允差 ε 为 0.003 2~0.010 6 mm,即取

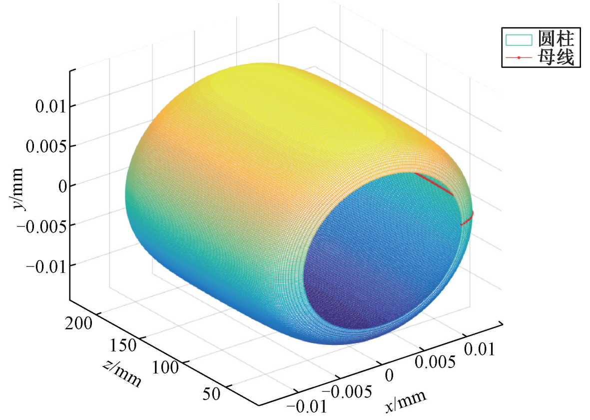


图 8　尺寸误差模型为凸形

Fig. 8　The convex model of size error

$\varepsilon=0.010\ 6$、三坐标测量机误差 $\varepsilon_1=0.003$ mm，带入式(14)计算单个圆周截面上的最少测点个数为 $K=86$。假设初始的截面数为 $I_1=40$，通过图 6 的测点集模拟流程，得到体外作用尺寸的平均值和测量偏差值，部分的结果如表 1 所示。

表 1　体外作用尺寸的平均值和测量偏差

Table 1　Mean value and measuring error of in EFS

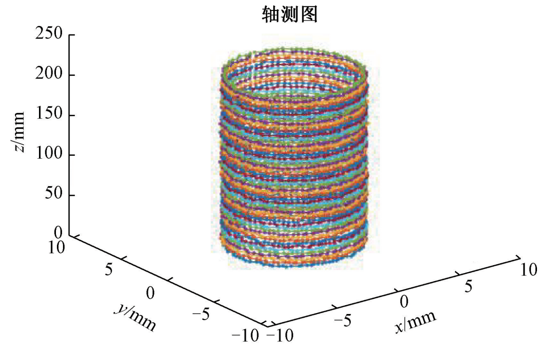
截面个数	体外作用尺寸的平均值/mm		测量偏差/mm
50	10.020 0	10.020 1	0.012 0
52	10.020 5	10.020 6	0.011 5
54	10.021 3	10.021 4	0.010 6
56	10.021 7	10.021 6	0.010 3
58	10.021 8	10.021 8	0.010 2

从表 1 中可以看出，随着测量截面数逐渐增加，体外作用尺寸的平均值随之变大，截面数到达一定数量时测量偏差变化量变小。当截面数为 $I=54$ 时，体外作用尺寸的平均值为 10.021 3 和 10.021 4 mm，对应的测量偏差为 0.010 6 mm，满足了测量偏差小于等于测量允差的判断条件，因此，该顶杆零件测量时建议采用截面数为 $I=54$，测量间距为 3.944 mm，总用时为 0.8 s。实例模拟测点如图 9 所示，图 9(a)表示虚拟圆柱的提取组成要素，图 9(b)表示虚拟圆柱的提取导出要素。

采用 Qi 等[17]提出的方法对该零件进行测点个数生成。首先要确定截止波长或截止波动数，其中截止波长 λ_{ec} 和截止波动数 f_{ec} 之间存在一定的转换关系：$f_{ec}=d/\lambda_{ec}$（d 为直径）。以波长为参数对要素进行轴向的测点数计算，如式(15)所示。

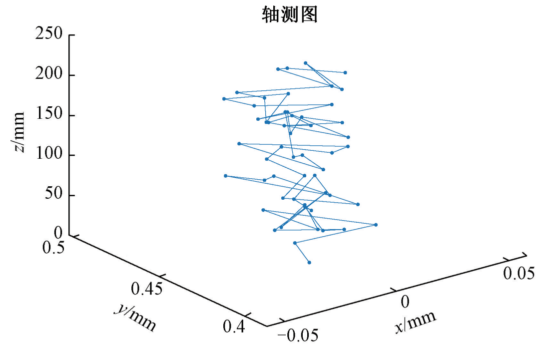
$$I=2^m\geqslant 2L/\lambda_{ec} \tag{15}$$

其中，L 为长度；7 为理论最小测点密度。



(a) 虚拟圆柱的提取组成要素

(a) Extracted integral feature of virtual cylinder



(b) 虚拟圆柱的提取导出要素

(b) Extracted derived feature of virtual cylinder

图 9　实例的模拟测点集

Fig. 9　Set of simulated measuring points of the example

以波动数为参数对要素进行径向的测点数计算如式(16)所示。

$$K=2^n\geqslant 7f_{ec}=7d/\lambda_{ec} \tag{16}$$

把已知 $L=213$ mm，$d=10$ mm，截止波长 $\lambda_{ec}=0.8$ 代入式(15)和(16)，得到 $I=2\ 048$ 个和 $K=128$ 个。从以上两种方法的结果可以看出，采用本文提出的测点优化方法得到测点个数明显较少。因此，本文提出的测点优化方法能够提高测量效率和降低测量成本。

截面数是影响坐标测量机评定直线度公差时计算评定结果不确定度的关键要素，给测点模拟和评定过程都带来不确定度。对该实例评定直线度误差用不同测点数量时分析测量结果的不确定度，如图 10 所示，以验证提出模拟方法的准确性。

基于蒙特卡罗法进行测量结果的不确定度计算，把截面上的测点个数为 $K=86$ 和截面数为 $I=54$ 代入不确定度分析过程，分析多组测点时被测零件的体外作用尺寸的包含区间、标准差和体外作用尺寸的平均值，从而判断零件是否合格。为得到被测零件的体外作用尺寸的包含概率为 95% 的包含区间，国标规定模拟次数 ≥10 000 次。不确定度分析结果如图 11 所示，该实例体外作用尺寸的包含区间为[10.007 8，10.020 2]，结果大致符合正

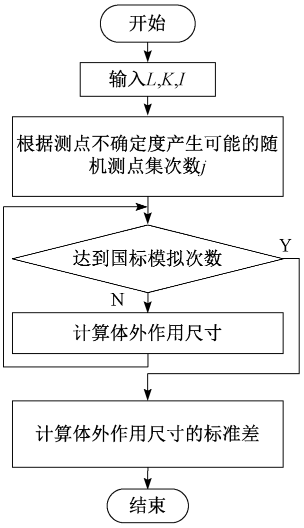


图 10 评定结果的不确定度分析流程

Fig. 10 Uncertainty analysis process of evaluation results

态分布;体外作用尺寸的平均值为 10.014 3 mm,标准差为 $\sigma=0.001\ 5$ mm,95% 置信区间的体外作用尺寸为 10.012 4 mm<10.032 mm,满足了综合误差要求,判定零件合格。求出模拟 10 000 次产生测量结果的不确定度为 $6\sigma=0.009$ mm,总用时约为 500 s,测点模拟算法的鲁棒性好。

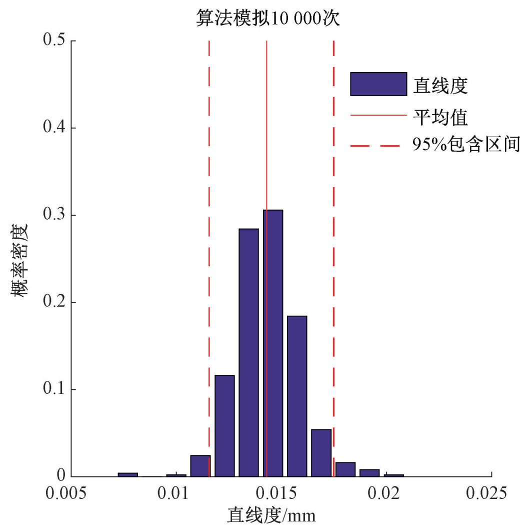


图 11 体外作用尺寸的包含区间

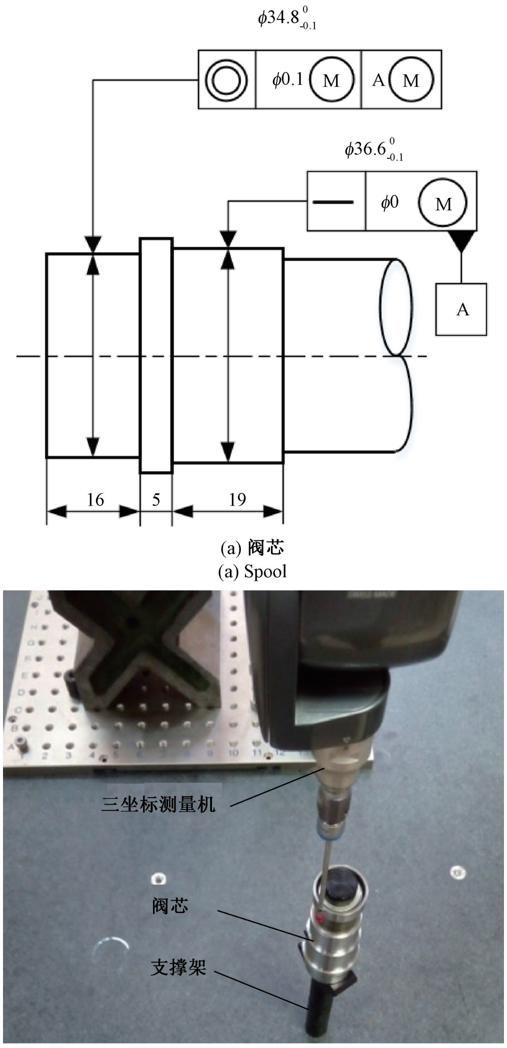
Fig. 11 Inclusive range of in EFS

当截面数为 $I=54$ 时,每增加两个截面,评定结果的变化量非常小,但是每增加一个截面时在零件表面上的测点数多了 86 个,则在满足精度要求情况下,随着测点数的增多同时也增加了测量时间和成本。从测量结果的不确定性分析中,在实际测量时使用测量间距为 3.944 mm 能够真实反映被测表面的实际轮廓。

4.2 实例二

通过模拟某真实阀芯的测量间距,再用三坐标测量机测量,验证提出方法的有效性。

图 12(a)为某企业提供的某阀芯的公差设计,圆柱面要素标注有同轴度公差,其基准要素 A 标注应用 MMR 时任意方向的直线度公差,通过公差分析满足了 1.2 节直线度对圆柱体的 3 个要求。



(a) 阀芯
(a) Spool

(b) 实物测量
(b) Actual measuring

图 12 某阀芯的公差设计和验证

Fig. 12 Tolerance design and verification of a spool

计算测量允差 $\varepsilon=0.01\sim0.033\ 3$ mm,即取 $\varepsilon=0.033\ 3$ mm、三坐标测量机误差 $\varepsilon_1=0.003$ mm。基于蒙特卡罗法的测量间距模拟方法,得到单个圆周截面上的最少测点个数为 $K=116$,采用不同截面数得到体外作用尺寸的平均值及测量偏差,一部分的结果如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,当截面数 $I=30$ 时,体外作用尺寸的平均值为 36.668 9 和 36.668 8 mm,对应的测量

表 2 体外作用尺寸的平均值及其测量偏差

Table 2 The average value of in EFS and its measuring error

截面个数	体外作用尺寸的平均值/mm		测量偏差/mm
20	36.652 6	36.652 7	0.047 4
22	36.655 8	36.655 7	0.044 2
24	36.661 5	36.661 4	0.038 2
26	36.664 4	36.664 3	0.035 6
28	36.665 2	36.665 2	0.034 8
30	36.668 9	36.668 8	0.031 1

偏差为 0.031 1 mm,总用时为 0.64 s,此结果满足了测量偏差小于等于测量允差的判断条件,则该塑料模具的顶杆零件测量时建议采用截面数 $I=30$, 测量间距为 0.633 mm。然后,采用 Qi 等[17]提出的方法对该零件进行测点个数生成。把已知 $L=19$ mm, $d=36.6$ mm,截止波长 $\lambda_{ec}=0.8$ 代入式(15)和式(16),得到 $I=256$ 个和 $K=512$ 个。此结果显示,比本文提出的优化方法得到的测点个数多。

在安装温度传感器的机床上,车削加工采用一端卡盘夹紧、另一端顶尖支承和加跟刀架装夹方式,刀具材料为 YT15,对材料为 45 钢的零件进行切削加工。在满足 CMM 使用要求的条件下,使用三坐标测量机为 Hexagon Metrology (Qing Dao)生产的 GLOBAL CLASSIC SR 07. 10. 07,测量精度为 0.003 mm,在圆周截面上的测点个数为 116,截面数分别为 30 和 48 进行测量,如图 12(b)所示。30 个截面的测量数据如表 3 所示。

表 3 某阀芯的测量数据

Table 3 Measuring data of a spool mm

i	x_i	y_i	z_i
1	278.488	16.046	584.069
2	280.844	18.341	584.066
3	288.65	22.050	584.065
4	295.469	22.166	584.068
5	303.811	18.392	584.078
6	310.604	2.799	584.105
7	306.716	−7.201	584.115
8	297.276	−13.460	584.119
9	291.746	−14.131	584.118
10	283.607	−11.918	584.111
11	274.428	7.658	588.841
12	275.769	11.768	588.835
13	280.171	17.765	588.828
14	284.484	20.646	588.824
15	291.407	22.406	588.825
16	305.213	17.135	588.841
17	309.054	11.601	588.852
18	307.795	−5.681	588.875
19	299.836	−12.544	588.879
20	289.529	−13.923	588.877
21	275.549	−3.060	596.248
22	274.788	−0.916	596.244
23	274.106	5.053	596.236
24	275.444	11.017	596.227
25	282.108	19.281	596.216
26	296.235	22.017	596.220
27	303.296	18.792	596.229
28	309.663	10.073	596.245
29	310.414	1.187	596.258
30	299.417	−12.722	596.270

测量结果如表 4 所示,采用 48 或 30 个截面进行零件测量,其评定结果证明该零件合格,两个结果仅相差 0.003 3 mm,但是采用 48 个截面测量比采用 30 个截面测量时在零件表面上的测点数多 2 088 个,则在满足精度要求情况下,随着测点个数的增多同时也增加了测量时间和成本。对于该实例,在实际测量中可认为使用测量间距为 0.633 mm 能够真实反映被测表面的实际轮廓。

表 4 某阀芯的测量结果

Table 4 Measuring results of a spool

截面个数	评定结果/mm	评定时间/s
48	36.585 7	0.006 2
30	36.582 4	0.005 2

5 结 论

本文研究基于误差来源的孔轴直线度检测的测点优化,是属于统计分析方法。其特征在于:预测零件误差来源,和根据误差理论规定随机测量的概率范围构建测点集精度函数;分析了测量间距与评定误差之间的关系,以蒙特卡罗法流程图的形式给出了孔轴直线度检测的测点个数生成过程。然后采用两个实例验证了提出方法的准

确性和有效性,与理论方法相比,实例一(实例二)的轴向和径向的测点数分别减少 1 994(226)个和 42(396)个。解决了相关标准只推荐测点分布方法而未给出测量间距的实际问题,且对现有方法进行优化,为了辅助测量人员选择最佳的测点个数,提高测量效率和降低测量成本。对本文提出以下进一步研究的设想:1)“不确定度”是公差规范过程与测量认证过程的连接桥梁,保证产品功能的实现和测量结果的可溯源性。因此可以研究不确定度对公差规范过程与测量认证过程的影响。2)根据本文提出的方法,研究标注在孔轴零件上的几何公差的智能化测量。

参考文献

[1] 郭世杰, 武建新, 乔冠, 等. 数控机床几何误差正弦低次多项式参数化建模与应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 136-146.
GUO SH J, WU J X, QIAO G, et al. Study on parametric modeling and application of sinusoidal low-order polynomials for geometric error of CNC machine tool[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 136-146.

[2] 徐诚, 王鑫鑫, 段世红, 等. 基于误差椭圆重采样的粒子滤波跟踪算法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 76-84.
XU CH, WANG X X, DUAN SH H, et al. Particle filter tracking algorithm based on error ellipse resampling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 76-84.

[3] PENG Z G, HUANG M F, ZHONG Y R, et al. A new method for interoperability and conformance checking of product manufacturing information [J]. Computers & Electrical Engineering, 2020, 85: 106650.

[4] 魏舜昊, 章家岩, 冯旭刚. 三坐标测量机高速测量过程动态误差分析与补偿[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 43-50.
WEI SH H, ZHANG J Y, FENG X G. Dynamic error analysis and compensation of CMM high speed measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5): 43-50.

[5] 全国技术产品文件标准化技术委员会(SAC/TC146). 产品几何技术规范(GPS)几何公差 检测与验证:GB/T 1958—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Technical Committee 146 on Technical Product Documentation of Standardization Administration of China (SAC/TC146). Geometrical Product Specifications (GPS)-Geometrical tolerance-Verification: GB/T 1958-2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.

[6] 冯维, 汤少靖, 赵晓冬, 等. 基于自适应条纹的高反光表面三维面形测量方法[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 119-127.
FENG W, TANG SH J, ZHAO X D, et al. Three-dimensional shape measurement method of high-reflective surfaces based on adaptive fringe-pattern [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 119-127.

[7] ZHANG T, YANG C, CHEN H, et al. Multi-objective optimization operation of the green energy island based on Hammersley sequence sampling[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 204(1):112316.

[8] CHRISTOPHE G, STÉPHANE D. Convergence in a disk stacking model on the cylinder[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2019, 132278.

[9] MANAL B, MICHAEL M. A computational investigation of the optimal Halton sequence in QMC applications[J]. Monte Carlo Methods and Applications, 2019, 25(3), 187-207.

[10] 王瀚, 邵忠喜, 付云忠, 等. 大尺寸直线度最佳测量间距计算方法[J]. 机算机集成制造系统, 2017, 23(1): 10-16.
WANG H, SHAO ZH X, FU Y ZH, et al. Calculation method for optimal measuring interval of large-scale straightness measurement [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 10-16.

[11] LI R, DUAN X M, HE W, et al. Entropy-assisted adaptive compressive sensing for energy-efficient visual sensors[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(1), DOI: 10.1007/s11042-020-08900-y.

[12] JIN C Y, LI D H, K E, et al. Phase extraction based on iterative algorithm using five-frame crossed fringes in phase measuring deflectometry[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2018, 105: 93-100.

[13] 武鹏飞, 张赞, 郑义, 等. 采样点分布对基于面形斜率径向基模型的自由曲面拟合精度的影响[J]. 光学精密工程, 2016, 24(7): 1564-1572.
WU P F, ZHANG Z, ZHENG Y, et al. Influence of sampling point distribution in freeform surfaces fitting with radial based function model [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(7): 1564-1572.

[14] LI B, FENG P F, ZENG L, et al. Path planning method for on-machine inspection of aerospace structures based on adjacent feature graph[J]. Robotics and Computer-

Integrated Manufacturing, 2018, 54(12): 17-34.

[15] ZAHMATI J, AMIRABADI H, MEHRAD V. A hybrid measurement sampling method for accurate inspection of geometric errors on freeform surfaces[J]. Measurement, 2018: S0263224118301891.

[16] SENTHILKUMAR, VAGHEESAN, JAYAPRAKASH, et al. Hybrid neural network-particle swarm optimization algorithm and neural network-genetic algorithm for the optimization of quality characteristics during CO_2 laser cutting of aluminium alloy[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2019, 41(8), DOI: 10. 1007/s40430-019-1830-8.

[17] QI Q F, PAGANI L, JIANG X Q, et al. Enabling metrology-oriented specification of geometrical variability-A categorical approach[J]. Advanced Engineering Informatics, 2019, 39(1): 347-358.

[18] 靳龙, 陈岳坪, 葛动元. 自由曲面几何偏差的空间统计分析[J]. 中国机械工程, 2020, 31(4):445-450.
JIN L, CHEN Y P, GE D Y. Spatial statistical analysis of geometric deviations of free-form surfaces[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(4): 445-450.

[19] 朱陆陆. 蒙特卡洛方法及应用[D]. 武汉:华中师范大学, 2014.
ZHU L L. The Monte Carlo method and application[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2014.

[20] LIU W W, ZHOU X H, LI H L, et al. An algorithm for evaluating cylindricity according to the minimum condition[J]. Measurement, 2020,158:107698.

[21] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
FEI Y T. Theory of errors and data processing[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2004.

[22] TANG Z M, HUANG M F, SUN Y H, et al. Rapid evaluation of coaxiality of shaft parts based on double maximum material requirements[J]. Measurement, 2019,147:106868.

作者简介

黄美发,2004 年于华中科技大学获得博士学位,现为桂林电子科技大学机电工程学院二级教授,主要研究方向为机电系统精度的智能设计、检测与控制理论与技术、制造系统建模与优化、虚拟设计、产品协同设计以及国际新一代精度理论体系的基础研究等。

E-mail: hmhmf@ guet. edu. cn

Huang Meifa received his Ph. D. degree from the Huazhong University of Science and Technology in 2004. He is currently a second-level professor in Mechanical and Electrical Engineering at Guilin University of Electronic Technology. His main research interests include intelligent precision design of electromechanical system, test and control theory, model and optimization of manufacturing system, virtual and cooperative design of product, and research of frame of next generation geometrical product specification and verification.

刘廷伟(通信作者),2018 年于桂林电子科技大学信息科技学院获得学士学位,现为桂林电子科技大学机电工程学院硕士研究生,主要研究方向为零件几何公差的智能设计、检测和评定方法等。

E-mail: 1055028054@ qq. com, eqLTWAICQL_com. @ 163. com

Liu Tingwei (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Institute of Information Technology, Guilin University of Electronic Technology in 2018. He is currently a master student in the School of Mechanical and Electrical Engineering at Guilin University of Electronic Technology. His main interests include intelligent design, detection and evaluation methods for geometric tolerances of parts.