



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102809364 B

(45) 授权公告日 2014. 10. 22

(21) 申请号 201210236183. 8

(22) 申请日 2012. 07. 09

(73) 专利权人 天津大学

地址 300072 天津市南开区卫津路 92 号

(72) 发明人 何改云 张美 刘欣 贾红洋

(74) 专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代

理事务所 12201

代理人 温国林

(51) Int. Cl.

G01B 21/20(2006. 01)

(56) 对比文件

JP 特开平 10-277888 A, 1998. 10. 20,

CN 101413793 A, 2009. 04. 22,

CN 102168965 A, 2011. 08. 31,

何改云. 形位误差的逼近原理及算法研究. 《

中国博士学位论文全文数据库》. 2007, 全文.

何改云 等. 复合位置度误差的最小条件解
析算法. 《计量技术》. 2004, 6-9.

审查员 邢明浩

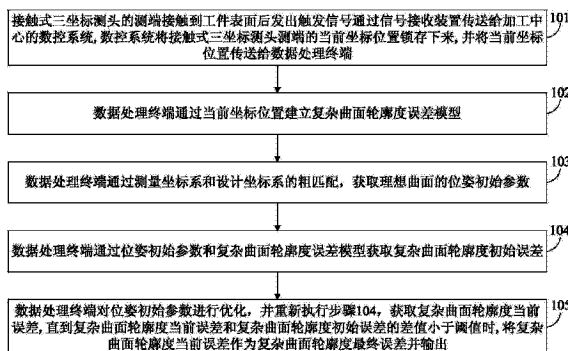
权利要求书2页 说明书8页 附图1页

(54) 发明名称

一种确定复杂曲面轮廓度误差的方法

(57) 摘要

本发明公开了一种确定复杂曲面轮廓度误差的方法, 涉及复杂曲面评定领域, 数控系统将当前坐标位置传送给数据处理终端; 数据处理终端通过当前坐标位置建立复杂曲面轮廓度误差模型; 通过测量坐标系和设计坐标系的粗匹配, 获取理想曲面的位姿初始参数; 数据处理终端通过位姿初始参数和复杂曲面轮廓度误差模型获取复杂曲面轮廓度初始误差; 数据处理终端对位姿初始参数进行优化, 并重新获取复杂曲面轮廓度当前误差, 直到复杂曲面轮廓度当前误差和复杂曲面轮廓度初始误差的差值小于阈值时, 将复杂曲面轮廓度当前误差作为复杂曲面轮廓度最终误差并输出。通过本方法获取到的最终误差接近复合最小条件的理论值, 降低了工件误费率和生产成本, 提高了检测精度。



1. 一种确定复杂曲面轮廓度误差的方法,其特征在于,所述方法包括以下步骤:

(1) 接触式三坐标测头的测端接触到工件表面后发出触发信号通过信号接收装置传送给加工中心的数控系统,所述数控系统将所述接触式三坐标测头测端的当前坐标位置锁存下来,并将所述当前坐标位置传送给数据处理终端;

(2) 所述数据处理终端通过所述当前坐标位置建立复杂曲面轮廓度误差模型;

(3) 所述数据处理终端通过测量坐标系和设计坐标系的粗匹配,获取理想曲面的位姿初始参数;

(4) 所述数据处理终端通过所述位姿初始参数和所述复杂曲面轮廓度误差模型获取复杂曲面轮廓度初始误差;

(5) 所述数据处理终端对所述位姿初始参数进行优化,并重新执行步骤(4),获取复杂曲面轮廓度当前误差,直到所述复杂曲面轮廓度当前误差和所述复杂曲面轮廓度初始误差的差值小于阈值时,将所述复杂曲面轮廓度当前误差作为复杂曲面轮廓度最终误差并输出;

所述数据处理终端通过所述当前坐标位置建立复杂曲面轮廓度误差模型具体包括:

1) 所述数据处理终端获取复杂曲面轮廓度公差带;

$$|(p-q)n^q| \leq \frac{t}{2}$$

其中, p 点为测量点, q 点为理论点, n^q 表示理想曲面上 q 的法向量, t 为公差值;

2) 所述数据处理终端通过所述复杂曲面轮廓度公差带建立所述复杂曲面轮廓度误差模型;

$$d(p, S) = x_p x_{n^q} - x_q x_{n^q} + y_p y_{n^q} - y_q y_{n^q} + z_p z_{n^q} - z_q z_{n^q}$$

$$+ \begin{bmatrix} y_p z_{n^q} - z_p y_{n^q} \\ z_p x_{n^q} - x_p z_{n^q} \\ x_p y_{n^q} - y_p x_{n^q} \\ -x_{n^q} \\ -y_{n^q} \\ -z_{n^q} \end{bmatrix}^T \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{pmatrix}$$

$$+ \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{pmatrix}^T \begin{bmatrix} -2(z_q z_{n^q} + y_q y_{n^q}) & x_q y_{n^q} + y_q x_{n^q} & x_q z_{n^q} + z_q x_{n^q} & 0 & -z_{n^q} & y_{n^q} \\ x_q y_{n^q} + y_q x_{n^q} & -2(x_q x_{n^q} + z_q z_{n^q}) & y_q z_{n^q} + z_q y_{n^q} & z_{n^q} & 0 & -x_{n^q} \\ x_q z_{n^q} + z_q x_{n^q} & y_q z_{n^q} + z_q y_{n^q} & -2(y_q y_{n^q} + x_q x_{n^q}) & -y_{n^q} & x_{n^q} & 0 \\ 0 & z_{n^q} & -y_{n^q} & 0 & 0 & 0 \\ -z_{n^q} & 0 & x_{n^q} & 0 & 0 & 0 \\ y_{n^q} & -x_{n^q} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{pmatrix}$$

其中,任意一复杂曲面绕 x, y, z 轴旋转的角度分别为 α, β, γ ;沿 x, y, z 轴的平移量为 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$;测量点 p 的坐标为 (x_p, y_p, z_p) ,理论点 q 的坐标为 (x_q, y_q, z_q) ,法向量 n^q 的坐标为 $(x_{n^q}, y_{n^q}, z_{n^q})$ 。

2. 根据权利要求1所述的一种确定复杂曲面轮廓度误差的方法,其特征在于,所述所述数据处理终端通过所述位姿初始参数和所述复杂曲面轮廓度误差模型获取复杂曲面轮廓度初始误差具体为:

所述数据处理终端将所述位姿初始参数带入到所述复杂曲面轮廓度误差模型中获取到所述测量点 p 到所述理想曲面的最大距离,将 2 倍的最大距离作为所述复杂曲面轮廓度初始误差。

一种确定复杂曲面轮廓度误差的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及复杂曲面误差评定领域,尤其涉及一种确定复杂曲面轮廓度误差的方法。

背景技术

[0002] 在航空航天、造船及汽车工业等领域,许多重要的零部件往往由高精度自由型面构成,这些部件对整个设备的寿命和安全性起着重要作用,所以自由曲面在工程实际中扮演着越来越重要的角色,由于自由曲面的加工过程复杂,加工成本过高,所以对其误差评定过程有着更高的要求,要求尽量准确地评定曲面误差,使其接近真实误差,通过避免误废来降低生产成本。

[0003] 在数控加工过程中,对工件进行测量的传统方法要使用各种常规量具(千分表和卡尺等)或设备(三坐标测量机等)。对于简单的几何量测量,操作者可以在数控机床上直接用量具测量;对于工件的几何特征或空间位置等比较复杂的测量问题,由于常规量具无法解决,操作者必须将工件转移到三坐标测量机上进行。但是使用这种测量方法时要对工件进行搬运、重新装夹和定位等一系列操作,在这期间往往会产生误差,这会对真实的误差产生影响,降低评定的效率。

[0004] 另一方面随着 CAD/CAM/CAI(计算机辅助设计/计算机辅助制造/计算机辅助检测)的发展以及加工精度从微米到纳米级的提高,GPS(产品几何量技术规范)体系也发生了巨大的变化。新一代 GPS 将着重提供一个适宜于 CAX(CAD/CAM/CAI 等各项技术的综合叫法)集成环境的、更加清晰明确、系统规范的几何公差定义。其最突出的特点就是强调用数学方法对产品的几何误差进行描述、定义、建模及信息传递。对公差的数学定义理论的研究在美国开展较早,并颁布了国际上第一个公差数学定义标准。

[0005] 如何精确得到轮廓度误差值依赖于简明合理的误差模型和快速有效地优化算法,近年来,国内外的学者对于给出各种几何形状的公差数学定义、建立轮廓度误差数学模型、寻找高效快速的优化算法都做出了深入研究,例如:

[0006] (1)U. Roy 和 B. Li 研究了形位公差的数学建模(参见 Roy U, Li B, 对于多面体对象几何公差(1. 形状公差)的注释与表示, Computer Aided Design, 1998, 30(2):151 ~ 161.)

[0007] (2)天津大学研究了球度、复合位置度公差的数学定义和误差模型(参见何改云. 形位误差的逼近原理及算法研究 [D]. 天津:天津大学, 2006.)

[0008] (3)蔡敏、杨将新等研究了圆柱要素形状公差的数学模型(参见蔡敏、杨将新等,基于数学定义的圆柱要素形状公差数学模型的研究 [J]. 机械工程学报, 2003, 39(12):86 ~ 90)

[0009] (4)姜国华等研究了圆柱度要几何误差评定算法,将圆柱投影到平面上,于是圆柱度误差的评定转化为圆度误差的评定,再转动平面,得到最小的误差值(参见 S. Hossein, Guohua Jiang, et al, 圆柱要素几何特征的评定 [J]. Precision Engineering, 2003, 27(2):195 ~ 204)

[0010] (5) 朱利民等建立了点到曲面有向距离的数学模型,并用差分的方法得到了函数二阶泰勒展开式,并以展开式为目标函数进行优化,从而得到待求误差值。(参见 Limin Zhu, Zhenhua Xiong, et al, 基于距离函数的复杂曲面定位和轮廓度误差评定方法 [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(3):542 ~ 554), (Li Min Zhu, Xiao Ming Zhang, et al, 有向距离函数的几何意义以及其在曲面逼近中的应用 [J], Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2010, 10(4):1-10)

[0011] (6) 廖平等建立了基于分割逼近原理的点到复杂曲面的距离模型,并用遗传算法评定了复杂曲面轮廓度误差。(参见廖平, 基于遗传算法和分割逼近法精确计算复杂曲面轮廓度误差 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(10):1 ~ 7)

[0012] (7) 建立了基于欧氏范数下刚体运动学理论的复杂曲面粗匹配定位模型(参见徐毅, 李泽湘, 自由曲面的匹配检测新方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(1):106 ~ 108), (刘元朋, 刘晶等, 复杂曲面测量数据最佳匹配问题研究 [J], 中国机械工程, 16(12):1080 ~ 1082)

[0013] (8) 温秀兰研究了如何用遗传算法解决平面度和直线度误差评定(参见 Xiulan Wen, Aiguo Song, 用于评定平面度和直线度误差的一种改进的遗传算法 [J]. International Journal of Machine Tools&Manufacture, 2003, 43(11):1157 ~ 1162)

[0014] 发明人在实现本发明的过程中,发现现有技术中至少存在以下缺点和不足:

[0015] 上述研究成果大部分只建立了简单型面的误差评定,有些虽完成了复杂曲面的误差评定,但是评定出的误差值远远大于给定的公差带,造成工件误费率较高,提高了生产成本。

发明内容

[0016] 本发明提供了一种确定复杂曲面轮廓度误差的方法,本发明降低了工件误费率和生产成本,详见下文描述:

[0017] 一种确定复杂曲面轮廓度误差的方法,所述方法包括以下步骤:

[0018] (1) 接触式三坐标测头的测端接触到工件表面后发出触发信号通过信号接收装置传送给加工中心的数控系统,所述数控系统将所述接触式三坐标测头测端的当前坐标位置锁存下来,并将所述当前坐标位置传送给数据处理终端;

[0019] (2) 所述数据处理终端通过所述当前坐标位置建立复杂曲面轮廓度误差模型;

[0020] (3) 所述数据处理终端通过测量坐标系和设计坐标系的粗匹配,获取理想曲面的位姿初始参数;

[0021] (4) 所述数据处理终端通过所述位姿初始参数和所述复杂曲面轮廓度误差模型获取复杂曲面轮廓度初始误差;

[0022] (5) 所述数据处理终端对所述位姿初始参数进行优化,并重新执行步骤(4),获取复杂曲面轮廓度当前误差,直到所述复杂曲面轮廓度当前误差和所述复杂曲面轮廓度初始误差的差值小于阈值时,将所述复杂曲面轮廓度当前误差作为复杂曲面轮廓度最终误差并输出。

[0023] 所述所述数据处理终端通过所述当前坐标位置建立复杂曲面轮廓度误差模型具体包括:

[0024] 1) 所述数据处理终端获取复杂曲面轮廓度公差带；

$$[(p-q) \cdot n^q] \leq \frac{t}{2}$$

[0026] 其中, p 点为测量点, q 点为理论点, n^q 表示理想曲面上 q 的法向量, t 为公差值；

[0027] 2) 所述数据处理终端通过所述复杂曲面轮廓度公差带建立所述复杂曲面轮廓度误差模型；

$$d(p, S) = x_p x_{n^q} - x_q x_{n^q} + y_p y_{n^q} - y_q y_{n^q} + z_p z_{n^q} - z_q z_{n^q}$$

$$+ \begin{bmatrix} y_p z_{n^q} - z_p y_{n^q} \\ z_p x_{n^q} - x_p z_{n^q} \\ x_p y_{n^q} - y_p x_{n^q} \\ -x_{n^q} \\ -y_{n^q} \\ -z_{n^q} \end{bmatrix}^T \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{pmatrix}$$

$$+ \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{pmatrix}^T \begin{bmatrix} -2(z_q z_{n^q} + y_q y_{n^q}) & x_q y_{n^q} + y_q x_{n^q} & x_q z_{n^q} + z_q x_{n^q} & 0 & -z_{n^q} & y_{n^q} \\ x_q y_{n^q} + y_q x_{n^q} & -2(x_q x_{n^q} + z_q z_{n^q}) & y_q z_{n^q} + z_q y_{n^q} & z_{n^q} & 0 & -x_{n^q} \\ x_q z_{n^q} + z_q x_{n^q} & y_q z_{n^q} + z_q y_{n^q} & -2(y_q y_{n^q} + x_q x_{n^q}) & -y_{n^q} & x_{n^q} & 0 \\ 0 & z_{n^q} & -y_{n^q} & 0 & 0 & 0 \\ -z_{n^q} & 0 & x_{n^q} & 0 & 0 & 0 \\ y_{n^q} & -x_{n^q} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{pmatrix}$$

[0031] 其中, 任意一复杂曲面绕 x, y, z 轴旋转的角度分别为 α, β, γ ; 沿 x, y, z 轴的平移量为 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$; 测量点 p 的坐标为 (x_p, y_p, z_p) , 理论点 q 的坐标为 (x_q, y_q, z_q) , 法向量 n^q 的坐标为 $(x_{n^q}, y_{n^q}, z_{n^q})$ 。

[0032] 所述所述数据处理终端通过所述位姿初始参数和所述复杂曲面轮廓度误差模型获取复杂曲面轮廓度初始误差具体为：

[0033] 所述数据处理终端将所述位姿初始参数带入到所述复杂曲面轮廓度误差模型中获取到所述测量点 p 到所述理想曲面的最大距离, 将 2 倍的最大距离作为所述复杂曲面轮廓度初始误差。

[0034] 本发明提供的技术方案的有益效果是：本方法通过对位姿初始参数进行优化, 获取复杂曲面轮廓度当前误差；当差值小于阈值时, 将复杂曲面轮廓度当前误差作为复杂曲面轮廓度最终误差并输出；通过本方法获取到的最终误差接近给定的公差带, 降低了工件误费率和生产成本, 提高了检测精度。

附图说明

[0035] 图 1 为本发明提供的加工中心的结构示意图；

[0036] 图 2 为本发明提供的一种确定复杂曲面轮廓度误差的方法的流程图。

具体实施方式

[0037] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚, 下面将结合附图对本发明实施方式作进一步地详细描述。

[0038] 为了降低工件误费率和生产成本, 本发明实施例提供了一种确定复杂曲面轮廓度

误差的方法,参见图 1 和图 2,详见下文描述:

[0039] 101:接触式三坐标测头的测端接触到工件表面后发出触发信号通过信号接收装置传送给加工中心的数控系统,数控系统将接触式三坐标测头测端的当前坐标位置锁存下来,并将当前坐标位置传送给数据处理终端;

[0040] 如图 1 所示,接触式三坐标测头通过标准的锥柄安装在机床主轴上。二者的连接非常简便,但应注意的是测头与主轴轴线的对中性。接触式三坐标测头的主要功能是在工件表面进行采点,当接触式三坐标测头的测端接触到工件表面后发出触发信号并传送给信号接收装置。信号接收装置安装在加工中心的适当位置,用于接收接触式三坐标测头发出的触发信号,进行必要的信号调理后将触发信号传送给加工中心的数控系统。由于接触式三坐标测头与信号接收装置之间以红外线方式进行信号传输,所以信号接收装置安装时需要考虑加工中心工作过程中不要阻挡接触式三坐标测量测头和接收装置之间的信号传输。信号接收装置传送给加工中心的数控系统的仅仅是接触式三坐标测头接触到工件表面产生的触发信号,数控系统接收到触发信号后立即控制加工中心的伺服系统停止运动,并将安装在加工中心主轴处的接触式三坐标测头测端的当前坐标位置锁存下来。数控系统一方面接收通过通讯线路传输过来的需要测量的点的信息,一方面将已经测量完成的工件表面点的几何信息传送给数据处理终端。

[0041] 102:数据处理终端通过当前坐标位置建立复杂曲面轮廓度误差模型;

[0042] 其中,该步骤具体包括:

[0043] 1) 数据处理终端获取复杂曲面轮廓度公差带;

[0044] 对于复杂曲面要素轮廓度公差带是指直径等于公差值 t ,球心位于理想曲面 S 上的一系列圆球的两包络面所限定的区域,于是找到空间中一点到被测曲面要素的距离函数至关重要,点到理想曲面 S 的距离可以近似的表示为点到曲面上距离该点最近的一点的欧式距离 $d(p, S)$,

$$[0045] \quad d(p, S) = \| p - q \|_2$$

[0046] 其中, q 点为理想曲面 S 上与 p 点距离最近的点, p 点为测量点, q 点为理论点。

[0047] 进一步,将 $d(p, S)$ 在 q 点处线性解析

$$[0048] \quad d(p, S) \approx d(q) + \nabla d(q)^T \cdot (p - q)$$

[0049] 其中 $d(q)$ 表示点 q 到理想曲面 S 的距离, $\nabla d(q)^T$ 表示 $d(p, S)$ 函数在 q 的梯度值。引入的 eikonal equation (短时距方程)是波传播中遇到的非线性偏微分方程,具有如下形式 $|\nabla u(x)| = F(x), x \in \Omega, \text{s.t. } u|_{\partial\Omega} = 0$, Ω 是 R^n (n 维实数空间)中连通开区域, $F(x)$ 是输入的正值函数, ∇ 指梯度, $|\cdot|$ 代表欧式范数, $\partial\Omega$ 表示 Ω 的边界。在物理上,方程的解 $u(x)$ 表示的是从 Ω 的边界到 Ω 内部点的最短距离,当 $F=1$ 时,这个解代表的是从 Ω 边界到 Ω 内部的有向距离。设 $d(p, S)$ 为 $u(x)$, 可以将理想曲面外部作为连通开区域 Ω 的边界,则 $\nabla d(q, S) = 1, d(q, S) = 0$, 那么 $d(p, S)$ 的解即为理想曲面外一点到理想曲面 S 的最短距离,记 $\nabla d(q, S) = 1 = n^q, n^q$ 表示理想曲面上 q 的法向量,那么点到理想曲面 S 的有向距离函数可表示为 $d(p, S) = (p - q) \cdot n^q$ 。如果测量点 p 处于公差带内,则该测量点 p 应满足 $|(p - q) \cdot n^q| \leq \frac{t}{2}$, t 如上所示,代表的是公差值,可将这个式子定义为复杂曲面轮廓度公差带。

[0050] 2) 数据处理终端通过复杂曲面轮廓度公差带建立复杂曲面轮廓度误差模型。

[0051] 当理想曲面 S 的位姿发生变化时,即进行旋转平移运动时,与理想曲面 S 外测量点 p 对应的理论点 q 也会发生变化。

[0052] 如果一复杂曲面绕 x, y, z 轴旋转的角度分别为 α, β, γ , 沿 x, y, z 轴的平移量为 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$, 则 $\omega = [\alpha, \beta, \gamma], v = [\delta_x, \delta_y, \delta_z]$, 则空间坐标旋转矩阵为:

$$[0053] \quad R = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \cos\beta\sin\gamma & -\sin\beta \\ \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \sin\alpha\cos\beta \\ \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix}$$

[0054] 当 α, β, γ 足够小, 利用泰勒展开公式略去高阶项, 可得到 R 的近似矩阵 R^*

$$[0055] \quad R^* = \begin{bmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{bmatrix}$$

[0056] 为方便计算, 引入 $\hat{\omega}$ 矩阵, 即:

$$[0057] \quad \hat{\omega} = R^* - I = \begin{bmatrix} 0 & \gamma & -\beta \\ \gamma & 0 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 0 \end{bmatrix}, \text{其中 } I \text{ 为单位矩阵}$$

$$[0058] \quad R^* \text{ 可简化为 } R^* = \begin{bmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{bmatrix} = I + \hat{\omega}$$

[0059] 可证明: $\hat{\omega}x = \omega \times x$, x 为任意向量

[0060] 如果曲面只是进行微小的变化, 平移和旋转都很小时可以将有向距离函数表示为

$$d(p, S) = \left[p - \left(I + \hat{\omega} \right) \cdot q - v \right] \cdot \left[\left(I + \hat{\omega} \right) \cdot n^q \right]$$

[0061] 其代表的是点到运动曲面的有向距离函数, 利用差分运算可得到有向距离函数的一阶微分项, 将其与技术背景(5)中提到的论文作比较:

$$[0062] \quad \Delta d(p, S) = \left(p - \left(I + \hat{\omega} \right) \cdot q - v \right) \cdot \left(I + \hat{\omega} \right) \cdot n^q - (p - q) \cdot n^q$$

$$[0063] \quad = \left(p - q - \hat{\omega}q - v \right) \cdot \left(I + \hat{\omega} \right) \cdot n^q - (p - q) \cdot n^q$$

$$[0064] \quad = (p - q) \cdot n^q + (p - q) \cdot \hat{\omega}n^q - \left(\hat{\omega}q + v \right) \cdot n^q - \left(\hat{\omega}q + v \right) \cdot \hat{\omega}n^q - (p - q) \cdot n^q$$

[0065] 在论文模型中 p 和 q 的连线是与 n^q 相平行的线段, 所以上式中第二项为零, 并且由于旋转平移量很小, 二阶以上的项都可以忽略不计, 于是上式变为

$$[0066] \quad \Delta d(p, S) = - \left(\hat{\omega}q + v \right) \cdot n^q$$

$$[0067] \quad = -n^q \cdot v - \left(q \times n^q \right) \cdot \omega$$

[0068] 这就得到了与论文中同样的结果, 证明了模型的正确性, 将带有旋转平移量的有向距离函数作为目标函数。将公式整理后得到有向距离函数微分表达式为:

$$[0069] \quad d(p, S) = x_p x_{n^q} - x_q x_{n^q} + y_p y_{n^q} - y_q y_{n^q} + z_p z_{n^q} - z_q z_{n^q}$$

$$[0070] \quad + \begin{bmatrix} y_p z_{n^q} - z_p y_{n^q} \\ z_p x_{n^q} - x_p z_{n^q} \\ x_p y_{n^q} - y_p x_{n^q} \\ -x_{n^q} \\ -y_{n^q} \\ -z_{n^q} \end{bmatrix}^T \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{pmatrix}$$

$$[0071] \quad + \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{pmatrix}^T \begin{bmatrix} -2(z_q z_{n^q} + y_q y_{n^q}) & x_q y_{n^q} + y_q x_{n^q} & x_q z_{n^q} + z_q x_{n^q} & 0 & -z_{n^q} & y_{n^q} \\ x_q y_{n^q} + y_q x_{n^q} & -2(x_q x_{n^q} + z_q z_{n^q}) & y_q z_{n^q} + z_q y_{n^q} & z_{n^q} & 0 & -x_{n^q} \\ x_q z_{n^q} + z_q x_{n^q} & y_q z_{n^q} + z_q y_{n^q} & -2(y_q y_{n^q} + x_q x_{n^q}) & -y_{n^q} & x_{n^q} & 0 \\ 0 & z_{n^q} & -y_{n^q} & 0 & 0 & 0 \\ -z_{n^q} & 0 & x_{n^q} & 0 & 0 & 0 \\ y_{n^q} & -x_{n^q} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{pmatrix}$$

[0072] 将上式作为复杂曲面轮廓度误差评定的数学模型。

[0073] 其中,测量点 p 的坐标为 (x_p, y_p, z_p) ,理论点 q 的坐标为 (x_q, y_q, z_q) ,法向量 n^q 的坐标为 $(x_{n^q}, y_{n^q}, z_{n^q})$ 。

[0074] 103:数据处理终端通过测量坐标系和设计坐标系的粗匹配,获取理想曲面的位姿初始参数;

[0075] 由于模型中测量点与理论点处于同一坐标系下,所以对于复杂曲面轮廓度误差的评定需要两个过程,一是需要将测量坐标系与设计坐标系对齐,以消除由于坐标系不同而带来的误差;二是利用优化算法对误差模型进行优化从而得到评定的结果。

[0076] 对于坐标系对齐,即粗匹配,采取基于特征点的坐标匹配方法,由于匹配过程不改变测量曲面或理想曲面的内在几何性质,所以可以将测量曲面或理想曲面看作刚体,旋转平移运动作为刚体运动,刚体运动不改变内积与外积运算的结果,于是测量曲面或理想曲面上点与点之间的距离不会因为旋转平移的发生而改变,这样就可以提取出特征点, P, Q 分别表示测量点集和理论点集, $O(x_{1z}, y_{1z}, z_{1z})$ 表示理论点集 Q 的中点, $O'(x_{cz}, y_{cz}, z_{cz})$ 表示测量点集 P 的中点具体流程如下:

[0077] 1) 取理论点集 Q 与测量点集 P 中点的坐标;

$$[0078] \quad O(x_{1z}, y_{1z}, z_{1z}) = \frac{\sum_{i=1}^n p_i(x, y, z)}{n}, O' = \frac{\sum_{i=1}^n q_i(x, y, z)}{n}$$

[0079] 其中, p_i 表示测量点集 P 中的任意点, q_i 表示理论点集 Q 中的任意点。

[0080] 2) 在整个理论点集 Q 与测量点集 P 中分别搜索距离中点最近的点作为第一特征点 p_{tz1}, q_{tz1} ;

[0081] 3) 遍历理论点集 Q 与测量点集 P 分别寻找与第一特征点距离最远的点作为第二特征点 p_{tz2}, q_{tz2} ;

[0082] 4) 遍历理论点集 Q 与测量点集 P 分别寻找与第二特征点距离最远的点分别作为第三特征点 p_{tz3}, q_{tz3} ;

[0083] 5) 以三个特征点为基础建立局部坐标系:

[0084] 两个局部坐标系的 X 轴分别为: $e_1 = \frac{p_{tz1} - p_{tz2}}{|p_{tz1} - p_{tz2}|}$, $e_1' = \frac{q_{tz1} - q_{tz2}}{|q_{tz1} - q_{tz2}|}$, Y 轴为

$$e_2 = \frac{e_1 \times (p_{tz1} - p_{tz2})}{|e_1 \times (p_{tz1} - p_{tz2})|}, e_2' = \frac{e_2 \times (q_{tz1} - q_{tz3})}{|e_2 \times (q_{tz1} - q_{tz3})|}, Z \text{ 轴为 } e_3 = e_1 \times e_2, e_3' = e_1' \times e_2'。$$

[0085] 6) 通过 $[e_1', e_2', e_3']^T R = [e_1, e_2, e_3]^T$, 可确定从测量坐标系到设计坐标系的旋转矩阵, 再通过 $K = p_{tz1} - q_{tz1}R$, 可确定平移向量。

[0086] 通过上述步骤, 可以完成测量坐标系与设计坐标系的对齐, 通过粗匹配后, 测量点集 P 与理论点集 Q 处在小偏差范围内, 完全满足模型中对参数范围的要求, 在下面的精细匹配中就以上面建立的复杂曲面轮廓度误差模型作为目标函数进行误差评定。上述粗匹配的过程, 为本领域技术人员所公知, 具体实现时, 还可以采用其他的粗匹配方法, 本发明实施例对此不做限制。

[0087] 104 : 数据处理终端通过位姿初始参数和复杂曲面轮廓度误差模型获取复杂曲面轮廓度初始误差 ;

[0088] 该步骤具体为 : 将位姿初始参数带入到复杂曲面轮廓度误差模型中获取到测量点 p 到理想曲面 S 的最大距离, 将 2 倍的最大距离作为复杂曲面轮廓度初始误差。

[0089] 105 : 数据处理终端对位姿初始参数进行优化, 并重新执行步骤 104, 获取复杂曲面轮廓度当前误差, 直到复杂曲面轮廓度当前误差和复杂曲面轮廓度初始误差的差值小于阈值时, 将复杂曲面轮廓度当前误差作为复杂曲面轮廓度最终误差并输出。

[0090] 其中, 本发明实施例通过不断的迭代获取到复杂曲面轮廓度最终误差, 阈值根据实际应用中的需要进行设定, 具体实现时, 本发明实施例对此不做限制。

[0091] 其中, 数据处理终端对位姿初始参数进行优化为本领域技术人员所公知, 可以采用多种优化方法实现, 本发明实施例在此不做赘述。

[0092] 下面以具体的试验来验证本发明实施例提供的一种确定复杂曲面轮廓度误差的方法的可行性, 详见下文描述 :

[0093] 为了验证上述模型的有效性, 设计如下实验, 以生产中经常用到的蜗杆齿面与椭球面为例, 进行说明。

[0094] 对两种曲面分别进行了 5 组, 共计 10 组实验, 分别对两个测量点添加服从正态分布的 (0, 0.004), (0, 0.005), (0, 0.006), (0, 0.007), (0, 0.008) 的随机误差来近似加工误差, 分别用本方法和最小二乘法进行评定, 如下表所示 :

	本方法	最小二乘法	本方法	最小二乘法	本方法	最小二乘法	本方法	最小二乘法	本方法	最小二乘法
[0095]										
椭球面	0.39	0.6	0.32	0.53	0.30	0.59	0.38	0.54	0.40	0.70
	94	464	87	74	46	13	52	67	04	21

	蜗	0.36	0.5	0.33	0.72	0.47	0.65	0.35	0.63	0.38	0.93
	杆	81	236	99	58	23	07	95	11	38	26
[0096]	曲面										

[0097] 本方法评定出的误差值明显小于最小二乘法评定出的误差值,这样才会接近实际公差带,得到真实的误差值,得到高的检测精度,为生厂商提供真实的检测报告,降低误废率和生产成本。

[0098] 综上所述,本发明实施例提供了一种确定复杂曲面轮廓度误差的方法,本方法通过对位姿初始参数进行优化,获取复杂曲面轮廓度当前误差;当差值小于阈值时,将复杂曲面轮廓度当前误差作为复杂曲面轮廓度最终误差并输出;通过本方法获取到的最终误差接近给定的公差带,降低了工件误费率和生产成本,提高了检测精度。

[0099] 本领域技术人员可以理解附图只是一个优选实施例的示意图,上述本发明实施例序号仅仅为了描述,不代表实施例的优劣。

[0100] 以上所述仅为本发明的较佳实施例,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

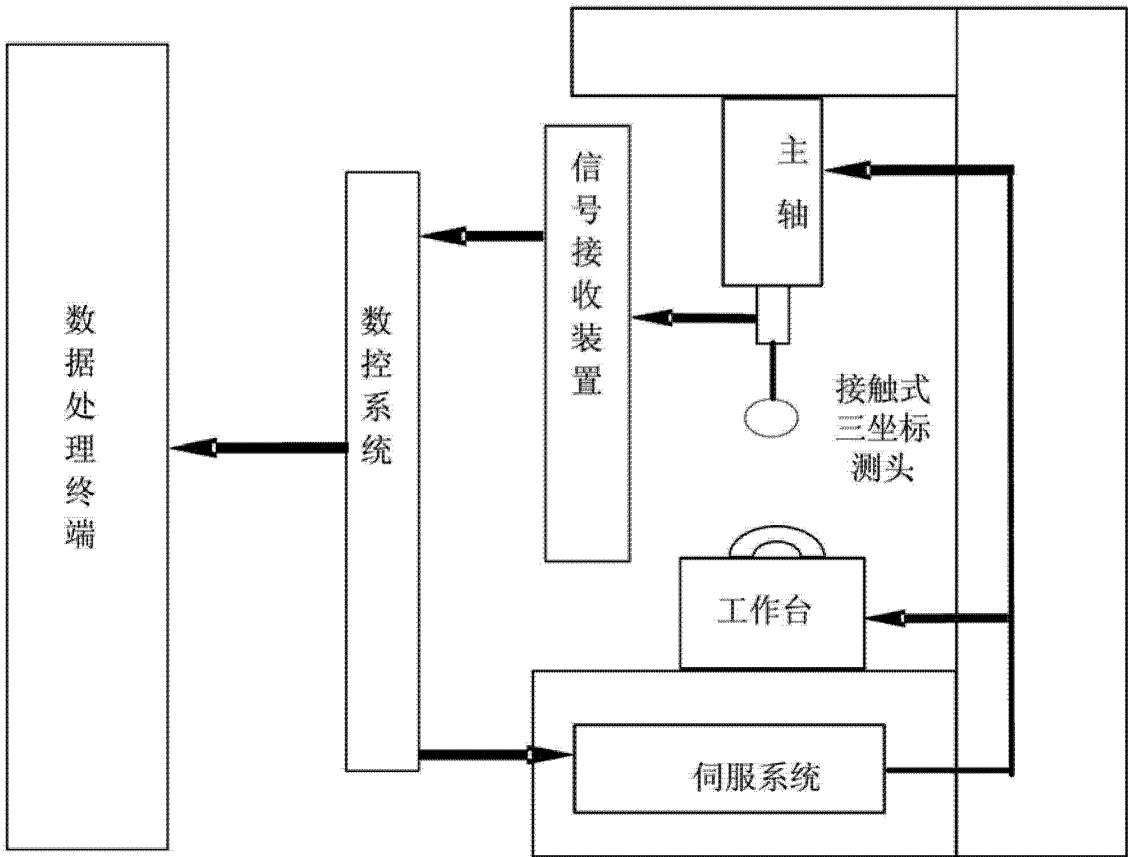


图 1

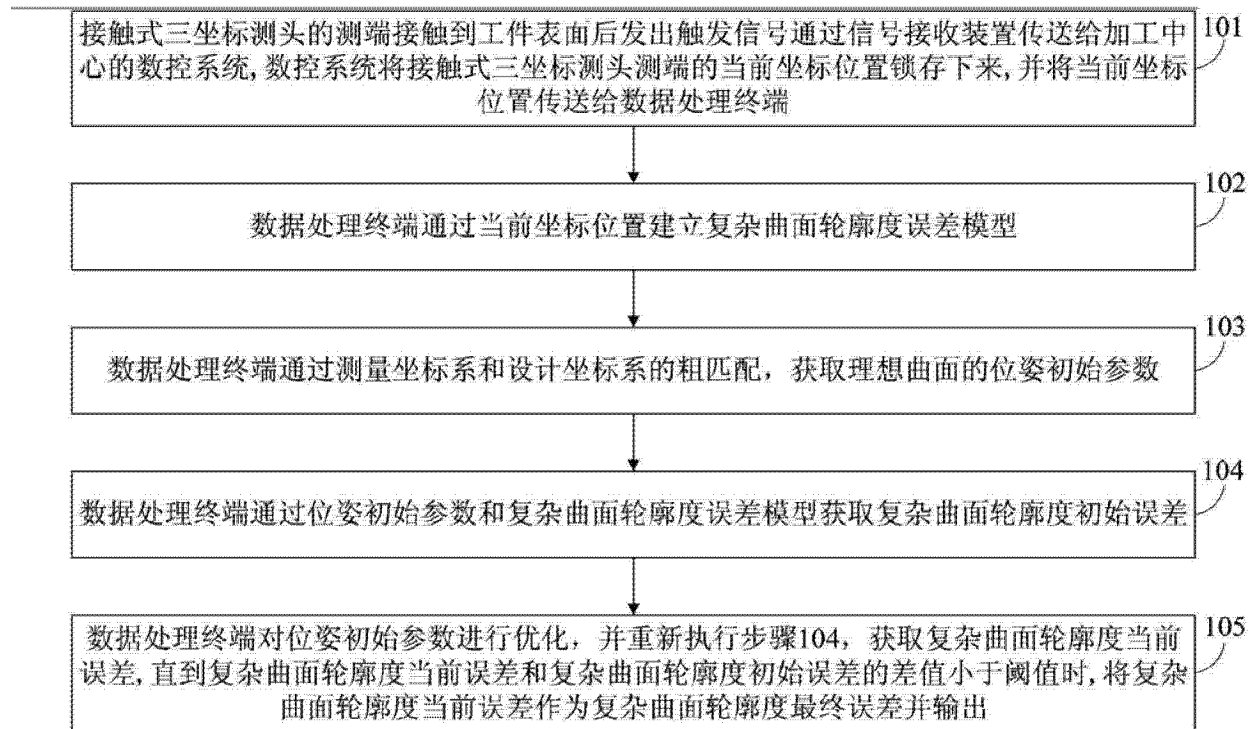


图 2