



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103542820 B

(45) 授权公告日 2016. 03. 09

(21) 申请号 201310475996. 7

US 2005/0017967 A1, 2005. 01. 27,

(22) 申请日 2013. 10. 12

审查员 黄蓓

(73) 专利权人 中国人民解放军 63926 部队

地址 100192 北京市海淀区清河小营甲 1 号

(72) 发明人 张笈玮 邴光利 李博平 练晓丽

(74) 专利代理机构 北京市浩天知识产权代理事

务所(普通合伙) 11276

代理人 韩龙 李淑敏

(51) Int. Cl.

G01B 11/30(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101248330 A, 2008. 08. 20,

CN 101632001 A, 2010. 01. 20,

CN 102798412 A, 2012. 11. 28,

JP 特开平 5-52548 A, 1993. 03. 02,

KR 10-0222921 B1, 1999. 03. 15,

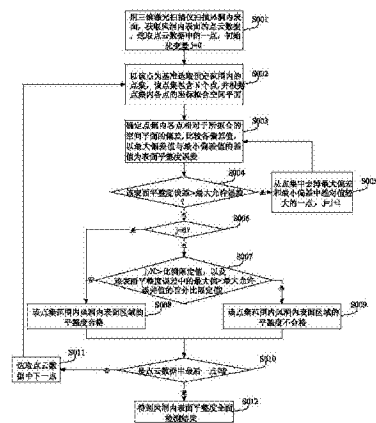
权利要求书1页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

一种检测风洞内表面平整度的方法

(57) 摘要

本发明提供了一种检测风洞内表面平整度的方法,包括步骤:(a)用三维激光扫描仪扫描风洞内表面,获取风洞内表面的点云数据;(b)选取点云数据中的一点,以该点为基准选取预定范围内的点集并拟合空间平面;(c)逐点确定点集内各点的偏差,以最大偏差值与最小偏差值的差值为该点集范围内的风洞内表面区域的表面平整度误差;(d)将表面平整度误差与预先设定的最大允许误差作比较并且结合其他预先设定的标准来确定该点集范围内风洞内表面区域的平整度是否合格;(e)对步骤(a)获取的点云数据中的其他各点逐点按照步骤(b)~(d)进行检测。其可实现风洞内表面平整度的全范围检测。



1. 一种检测风洞内表面平整度的方法,其特征在于,包括如下步骤:
  - (a) 用三维激光扫描仪扫描风洞内表面,获取风洞内表面的点云数据;
  - (b) 选取点云数据中的一点,以该点为基准选取预定范围内的点集并根据点集内各点的坐标拟合空间平面;
  - (c) 确定点集内各点相对于所拟合的空间平面的偏差,比较各偏差值,以最大偏差值与最小偏差值的差值为该点集范围内的风洞内表面区域的表面平整度误差;
  - (d) 判断表面平整度误差是否大于最大允许误差,如果步骤(c)得到的第一个表面平整度误差小于或等于最大允许误差,则该点集范围内风洞内表面区域的平整度合格,否则对比最大偏差和最小偏差的绝对值,将两点中偏差绝对值较大的一点从点集中去除,偏差绝对值相同时从两点中去除任意一点,然后返回步骤(c),直到步骤(c)得到的后续的表面平整度误差小于或等于最大允许误差时,判断从点集中去除的点数占原点集总点数的比例是否大于比例限定值,同时判断表面平整度误差中的最大值是否大于最大允许误差值的百分比限定值,如果该比例不大于比例限定值并且表面平整度误差中的最大值不大于最大允许误差值的百分比限定值,则该点集范围内风洞内表面区域的平整度合格,否则不合格;
  - (e) 对步骤(a)获取的点云数据中的其他各点逐点按照步骤(b)~(d)进行检测,直到得到风洞内表面平整度全面检测结果。
2. 根据权利要求1所述的检测风洞内表面平整度的方法,其特征在于:步骤(a)进一步包括将三维激光扫描仪置于风洞内部,使三维激光扫描仪的激光发射器发射的激光沿风洞轴线方向扫描风洞内表面,获取风洞内表面的点云数据通过三维激光扫描仪接收器接收。
3. 根据权利要求1或2所述的检测风洞内表面平整度的方法,其特征在于:所述三维激光扫描仪为相位式三维激光扫描仪。
4. 根据权利要求1所述的检测风洞内表面平整度的方法,其特征在于:步骤(b)进一步包括以获取的风洞内表面点云数据中的任意一点为球心,选取预定长度为直径,建立球形,该球形面所包含的点构成点集,根据点集内各点的坐标拟合空间平面。
5. 根据权利要求4所述的检测风洞内表面平整度的方法,其特征在于:在所述步骤(b)中建立的球形选取的直径为2m。
6. 根据权利要求1或4所述的检测风洞内表面平整度的方法,其特征在于:根据点集内各点的坐标拟合空间平面是采用最小二乘法。
7. 根据权利要求1所述的检测风洞内表面平整度的方法,其特征在于:在风洞内表面材质为水磨石材质。

## 一种检测风洞内表面平整度的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种检测表面平整度的方法,尤其涉及一种检测风洞内表面平整度的方法。

### 背景技术

[0002] 风洞,是指能人工产生和控制气流,以模拟飞行器或物体周围气体的流动,并可量度气流对物体的作用以及观察物理现象的一种管道实验设备,它是进行空气动力实验最常用、最有效的工具。实验时,常将模型或实物固定在风洞内反复地、经济地取得实验数据,为使实验结果准确,实验时的流动必须与实际流动状态相似,即必须满足相似律的要求,但由于风洞尺寸和动力的限制,在一个风洞中同时模拟所有的相似参数很困难。而风洞内表面的质量和精度是影响风洞内模拟风场品质的重要因素,内表面不平整会增加表面对风场气流的不利影响,导致风洞实验结果不准确,因此,在风洞工程建设中,对风洞内表面的表面平整度具有很高的要求。

[0003] 现有的检测方法采用长靠尺和楔形塞尺进行抽样检测,此种方式抽样数量有限,检测效率低,难以实现风洞内表面平整度的全面检测,无法为后续对风洞内表面平整度不符合标准的区域进行修补提供准确的依据,风洞内表面难以达到处处平整,风洞实验效果不够理想。但是随着三维激光扫描技术不断发展,这种技术已逐渐被应用在地形测绘、基坑检测、工业测量等领域,成为继 GPS 技术之后的又一项测绘技术革命。三维激光扫描能快速获取目标物体表面大量采样点的空间位置坐标,得到一个描述三维实体的点集合,即点云。对获取的点云数据进行处理,可得到物体的完整空间几何尺寸和特征参数,并可点云模型与标准模型进行对比,以可视化的偏差色谱云图显示对比结果。因此,三维激光扫描技术为解决风洞内表面平整度检测问题提供了新的思路。

### 发明内容

[0004] 为了解决以上问题,本发明提供了一种检测风洞内表面平整度的方法,其可实现风洞内表面平整度的全范围检测,避免抽样检测方法中可能漏检平整度误差过大部位的问题,而且可通过点云坐标准确定位检测位置,为后续对风洞内表面平整度不符合标准的区域进行修补提供准确的依据。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明采用如下技术方案:一种检测风洞内表面平整度的方法,包括如下步骤:(a)用三维激光扫描仪扫描风洞内表面,获取风洞内表面的点云数据;(b)选取点云数据中的一点,以该点为基准选取预定范围内的点集并根据点集内各点的坐标拟合空间平面;(c)确定点集内各点相对于所拟合的空间平面的偏差,比较各偏差值,以最大偏差值与最小偏差值的差值为该点集范围内的风洞内表面区域的表面平整度误差;(d)判断表面平整度误差是否大于最大允许误差,如果步骤(c)得到的第一个表面平整度误差小于或等于最大允许误差,则该点集范围内风洞内表面区域的平整度合格,否则对比最大偏差和最小偏差的绝对值,将两点中偏差绝对值较大的一点从点集中去除,偏差绝

对值相同时从两点中去除任意一点,然后返回步骤(c),直到步骤(c)得到的后续的表面平整度误差小于或等于最大允许误差时,判断从点集中去除的点数占原点集总点数的比例是否大于比例限定值,同时判断表面平整度误差中的最大值是否大于最大允许误差值的百分比限定值,如果该比例不大于比例限定值并且表面平整度误差中的最大值不大于最大允许误差值的百分比限定值,则该点集范围内风洞内表面区域的平整度合格,否则不合格;(e)对步骤(a)获取的点云数据中的其他各点逐点按照步骤(b)~(d)进行检测,直到得到风洞内表面平整度全面检测结果。

[0006] 进一步优化,步骤(a)进一步包括将三维激光扫描仪置于风洞内部,使三维激光扫描仪的激光发射器发射的激光沿风洞轴线方向扫描风洞内表面,获取风洞内表面的点云数据通过三维激光扫描仪接收器接收。

[0007] 进一步优化,所述三维激光扫描仪为相位式三维激光扫描仪。

[0008] 进一步优化,步骤(b)进一步包括以获取的风洞内表面点云数据中的任意一点为球心,选取预定长度为直径,建立球形,该球形面所包含的点构成点集,根据点集内各点的坐标拟合空间平面。

[0009] 进一步优化,在所述步骤(b)中建立的球形选取的直径为 2m。

[0010] 进一步优化,根据点集内各点的坐标拟合空间平面是采用最小二乘法。

[0011] 进一步优化,在风洞内表面材质为水磨石材质。

[0012] 进一步优化,步骤(d)中所述比例限定值为 20%。

[0013] 进一步优化,步骤(d)中所述最大允许误差值的百分比限定值为 150%。

[0014] 本发明相较于现有技术所具有的优势在于:本发明检测风洞内表面平整度的方法利用了三维激光扫描仪能够高效率、高精度获取内表面大量空间点坐标信息的优势,将实际内表面平整度信息以点云的形式复制到计算机中,通过分析内表面点云数据实现风洞内表面平整度的全面检测;同时其可实现内表面平整度的全范围检测,避免抽样检测方法可能漏检平整度误差过大部位的问题,而且可通过点云坐标准确定位检测位置,为后续对风洞内表面平整度不符合标准的区域进行修补提供准确的依据,从而使风洞内表面实现全面平整,提高了风洞实验时模拟风场的品质。

## 附图说明

[0015] 图 1 是本发明一个实施例所述检测风洞内表面平整度的方法的流程图。

## 具体实施方式

[0016] 下面,通过示例性的实施方式对本发明进行具体描述。然而应当理解,在没有进一步叙述的情况下,一个实施方式中的元件、结构和特征也可以有益地结合到其他实施方式中。

[0017] 如图 1 所示,本发明一个实施例所述的检测风洞内表面平整度的方法包括如下步骤:

[0018] (a) 用三维激光扫描仪沿风洞轴线方向扫描风洞内表面,获取风洞内表面的点云数据,具体过程为将三维激光扫描仪置于风洞内部,使三维激光扫描仪的激光发射器发射的激光扫描风洞内表面,获取风洞内表面的点云数据通过三维激光扫描仪接收器接收。这

里,三维激光扫描仪优选为相位式三维激光扫描仪。

[0019] (b) 选取点云数据中的一点,以该点为基准选取预定范围内的点集并根据点集内各点的坐标拟合空间平面,具体过程为以步骤(a)获取的风洞内表面点云数据中的任意一点为球心,以预定长度例如 2m 为直径,建立球形,该球形面所包含的点构成点集,根据点集内的点坐标通过最小二乘法拟合空间平面。

[0020] (c) 逐点确定点集内各点相对于所拟合的空间平面的偏差,比较各偏差值,以最大偏差值与最小偏差值的差值为该点集范围内风洞内表面区域的表面平整度误差。

[0021] (d) 判断表面平整度误差与预先设定的最大允许误差的大小:如果步骤(c)得到的第一个表面平整度误差小于或等于最大允许误差,则该点集范围内风洞内表面区域的平整度合格,如果表面平整度误差大于最大允许误差,则对比最大偏差和最小偏差的绝对值,将两点中偏差绝对值较大的一点从点集中去除,偏差绝对值相同时从两点中去除任意一点,然后返回步骤(c),直到步骤(c)得到的后续的表面平整度误差小于或等于最大允许误差时,判断从点集中去除的点数占原点集总点数的比例是否大于比例限定值,该比例限定值例如为 20%,同时判断该表面平整度误差中的最大值是否大于最大允许误差值的百分比限定值,该最大允许误差值的百分比限定值例如为 150%,如果该比例不大于比例限定值而且该表面平整度误差中的最大值不大于最大允许误差值的百分比限定值,则认为该点集范围内风洞内表面区域的平整度合格,否则,不合格。

[0022] (e) 对步骤(a)获取的点云数据中的其他各点逐点按照步骤(b)~(d)进行检测,直到得到风洞内表面平整度全面检测结果,即如果所有检测结果均合格,即认为该被检测风洞内表面全面平整度合格,否则,不合格。

[0023] 下面,通过一个具体的例子对上述步骤进行详细说明。

[0024] 本发明所述方法的检测对象为材质为水磨石的风洞内表面,具体检测方法如下:

[0025] 步骤 S001,通过相位式三维激光扫描仪对风洞内表面进行三维扫描,获取被测内表面的点云数据,选取点云数据中的一点,初始化变量  $j=0$ ;

[0026] 步骤 S002,以选取的点为球心,提取直径为 2m 的球面所包容的点集的坐标,假设提取的点集共有  $N$  个点,并根据所提取点集的坐标拟合空间平面,具体拟合算法如下:

[0027] 设平面方程的一般表达式为:

[0028]  $Ax+By+Cz+D=0$ , 其中  $C \neq 0$ , 进一步计算出  $z = -\frac{A}{C}x - \frac{B}{C}y - \frac{D}{C}$ ;

[0029] 记:  $a_0 = -\frac{A}{C}, a_1 = -\frac{B}{C}, a_2 = -\frac{D}{C}$ , 则:  $z = a_0x + a_1y + a_2$

[0030] 设空间  $n$  ( $n \geq 3$ ) 个点的坐标为:  $(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, \dots, n$

[0031] 通过将该  $n$  个点采用最小二乘法拟合空间平面,则使  $\sum_{i=1}^n (a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i)^2$  最小。

[0032] 即满足:  $\frac{\partial S}{\partial a_k} = 0, k = 0, 1, 2$

[0033] 即:  $\begin{cases} \sum 2(a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i)x_i = 0 \\ \sum 2(a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i)y_i = 0 \\ \sum 2(a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i) = 0 \end{cases}$ , 其中  $\Sigma$  为  $\sum_{i=1}^n$  的简化求和符号。

$$[0034] \quad \text{可得:} \begin{cases} a_0 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i y_i + a_2 \sum x_i = \sum x_i z_i \\ a_0 \sum x_i y_i + a_1 \sum y_i^2 + a_2 \sum y_i = \sum y_i z_i \\ a_0 \sum x_i + a_1 \sum y_i + a_2 n = \sum z_i \end{cases}$$

$$[0035] \quad \text{即,} \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & n \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum x_i z_i \\ \sum y_i z_i \\ \sum z_i \end{pmatrix}$$

[0036] 解上述线性方程组求得： $a_0, a_1, a_2$ ，即得拟合空间平面方程  $z = a_0 x + a_1 y + a_2$ ；

[0037] 步骤 S003，计算点集内各点与拟合平面的偏差，比较各个偏差值，最大偏差值与最小偏差值的差值即为提取点集范围内的风洞内表面区域的表面平整度误差。其中第  $i$  个点与拟合平面的偏差  $d_i$  的具体算法如下：

$$[0038] \quad d_i = \frac{a_0 x_i + a_1 y_i - z_i}{\sqrt{a_0^2 + a_1^2 + 1}}$$

[0039] 设最大偏差值为  $d_{\max}$ ，最小偏差值为  $d_{\min}$ ，则表面平整度误差为  $d_{\max} - d_{\min}$ ；

[0040] 步骤 S004，判断步骤 S003 中获得的表面平整度误差是否大于预设的最大允许误差，如果该表面平整度误差大于最大允许误差，则进行到步骤 S005，如果该表面平整度误差不大于最大允许误差，则进行到步骤 S006；

[0041] 步骤 S005，对比最大偏差和最小偏差的绝对值，将两点中偏差绝对值较大的一点从点集中去除，偏差绝对值相同时从两点去除其中任意一点，并且  $j=j+1$  然后返回步骤 S003；

[0042] 步骤 S006，判断变量  $j$  是否等于 0，如果  $j=0$  则表明步骤 S003 中获得的第一个表面平整度误差即小于或等于最大允许误差，这时进行到步骤 S008，如果  $j$  不等于 0 则进行到步骤 S007；

[0043] 步骤 S007，判断从点集中去除的点数  $j$  占原点集总点数  $N$  的比例是否大于 20%，以及从步骤 S003 中获得的各个表面平整度误差中的最大值是否超过最大允许误差值的 50%，如果  $j/N$  不大于 20% 而且表面平整度误差中的最大值不超过最大允许误差值的 50%，则进入步骤 S008，反之则进入步骤 S009；

[0044] 步骤 S008，认为该提取点集范围内风洞内表面区域的表面平整度合格；

[0045] 步骤 S009，该提取点集范围内风洞内表面区域的表面平整度不合格；

[0046] 步骤 S010，判断点云数据中是否所有点都被检测过了，如果是则流程进行到步骤 S012 后结束，否则流程进行到步骤 S011；

[0047] 步骤 S011，选取点云数据中的下一点后返回步骤 S002；

[0048] 步骤 S012，得到风洞内表面平整度全面检测结果，即如果点云数据中所有点的检测结果均合格，即认为该被检测风洞内表面全面平整度合格，否则，不合格。

[0049] 其中，需要说明的是，本发明所检测的风洞内表面的材质不限于水磨石，还包括例如水泥砂浆等材质，上述实施例的风洞内表面材质仅是对本发明的一个举例，并不能限制本发明中风洞内表面材质。

[0050] 可以理解，本发明是通过一些实施例进行描述的，本领域技术人员知悉的，在不脱离本发明的精神和范围的情况下，可以对这些特征和实施例进行各种改变或等效替换。另外，在本发明的教导下，可以对这些特征和实施例进行修改以适应具体的情况及材料而不

会脱离本发明的精神和范围。因此，本发明不受此处所公开的具体实施例的限制，所有落入本申请的权利要求范围内的实施例都属于本发明所保护的范围内。

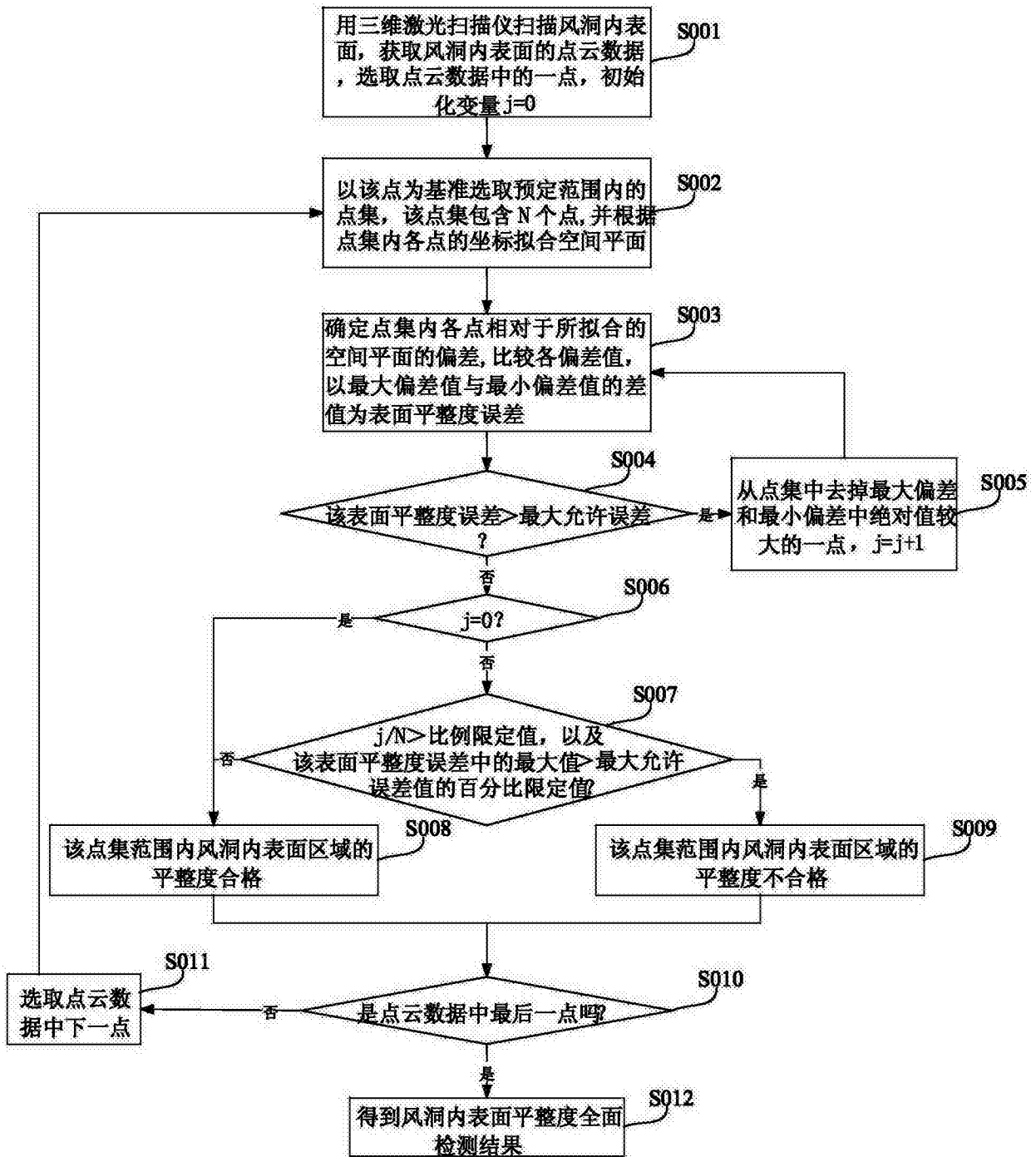


图 1