



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102494657 A

(43) 申请公布日 2012. 06. 13

(21) 申请号 201110412612. 8

(22) 申请日 2011. 12. 12

(71) 申请人 北京建筑工程学院  
地址 100044 北京市西城区展览馆路 1 号

(72) 发明人 胡云岗 王晏民

(74) 专利代理机构 北京远大卓悦知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11369  
代理人 史霞

(51) Int. Cl.  
G01B 21/20(2006. 01)  
G01B 11/24(2006. 01)

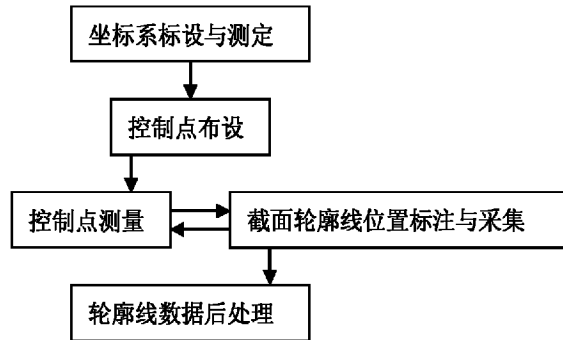
权利要求书 2 页 说明书 11 页 附图 3 页

(54) 发明名称

一种曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法

(57) 摘要

本发明涉及曲面工件轮廓线的测量及检测方法,公开了一种曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法。在本发明中,利用测头沿截面轮廓标注线扫描取点,形成测头轮廓线点云,并在截面轮廓标注线的左右两侧各增加一条扫描线,对于测头轮廓线点云中任一点 P 附近选取距离最近的若干点,并构建出拟合平面,通过拟合平面法矢实现点 P 的测球半径补偿 P'。利用该方法经投影计算后,可得到设计位置的测量轮廓线点云数据。本发明测量精度高,尤其可满足具有复杂曲面的大型工件的轮廓线测量及质量检测的要求。



1. 一种曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤一、利用测头沿待测工件的截面轮廓线扫描取点,形成测头轮廓线点云,利用测头在所述截面轮廓线的左右两侧各增加至少一条扫描线,形成至少一条左线点云和至少一条右线点云;

步骤二、提取所述测头轮廓线点云中的点P,从所述测头轮廓线点云中提取与点P距离最近的至少两个点,并且从每一条所述左线点云中均提取与所述测头轮廓线点云中的点P距离最近的至少一个点,从每一条所述右线点云中均提取与所述测头轮廓线点云中的点P距离最近的至少一个点,形成点组,利用所述点组拟合平面,并得到所述拟合平面的法矢,对点P沿法矢方向进行半径补偿,得到半径补偿点P';

步骤三、重复步骤二,得到由与所述测头轮廓线点云中的点对应的半径补偿点构成的截面轮廓线点云。

2. 如权利要求1所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法,其特征在于,所述步骤一中,利用测头在所述截面轮廓线的左右两侧各增加的扫描线的个数为一条。

3. 如权利要求2所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法,其特征在于,所述步骤二中,从所述测头轮廓线点云中提取位于点P前方的一个点和位于点P后方的一个点,从所述一条左线点云中提取与点P距离最近的两个点,从所述一条右线点云中提取与点P距离最近的两个点。

4. 如权利要求1所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法,其特征在于,所述步骤一中,利用测头沿待测工件的截面轮廓线扫描取点,是通过以下方式实现的:

将所述待测工件表面的截面轮廓线手工标注成截面轮廓标注线,选定待测工件的基准测量坐标系,使所述截面轮廓标注线所在平面垂直于所述基准测量坐标系的一个坐标轴,利用测头沿所述截面轮廓标注线扫描取点。

5. 如权利要求4所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法,其特征在于,所述步骤一中,利用测头沿待测工件的截面轮廓线扫描取点,形成测头轮廓线点云,利用测头在所述截面轮廓线的左右两侧各增加至少一条扫描线,形成至少一条左线点云和至少一条右线点云,是通过以下方式实现的:

利用测头沿待测工件截面轮廓线扫描取点,将扫描得到的点由测量系统的系统坐标系变换至基准测量坐标系内,形成测头轮廓线点云,

利用测头在所述截面轮廓线的左右两侧各增加至少一条扫描线,将扫描得到的点由测量系统的系统坐标系变换至基准测量坐标系内,形成至少一条左线点云和至少一条右线点云。

6. 如权利要求5所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法,其特征在于,所述步骤一中,利用测头沿截面轮廓线扫描取点,将扫描得到的点由测量系统的系统坐标系变换至基准测量坐标系内,形成测头轮廓线点云,

利用测头在所述截面轮廓线的左右两侧各增加至少一条扫描线,将扫描得到的点由测量系统的系统坐标系变换至基准测量坐标系内,形成至少一条左线点云和至少一条右线点云,

其中,将扫描得到的点由测量系统的系统坐标系变换至基准测量坐标系内,是通过以下方式实现的:

在所述待测工件的表面或附近选定基准点,且所述系统坐标系与所述基准测量坐标系共有至少三个基准点,所述系统坐标系通过所述至少三个基准点变换至所述基准测量坐标系。

7. 如权利要求 6 所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法,其特征在于,所述系统坐标系与所述基准测量坐标系共有的基准点的个数在四个以上。

8. 如权利要求 6 或 7 所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法,其特征在于,所述系统坐标系还包括围绕所述待测工件的周围设置的、与所述基准测量坐标系至少间隔一个系统坐标系的系统坐标系,且相邻两个系统坐标系共有至少三个基准点,且所述系统坐标系通过与其相邻的系统坐标系所共有的至少三个基准点变换至相邻的系统坐标系。

9. 如权利要求 8 所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法,其特征在于,所述相邻两个系统坐标系所共有的基准点的个数在四个以上,所述基准测量坐标系与与其相邻的系统坐标系所共有的基准点的个数在四个以上。

## 一种曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及曲面工件轮廓线的测量及检测方法,尤其涉及一种曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法。

### 背景技术

[0002] 作为产品设计制造的一种手段,在 20 世纪 90 年代初,逆向工程开始引起各国工业界和学术界的高度重视,从此以后,有关逆向工程的研究与应用就一直受到人们关注,特别是随着现代计算机技术及测试技术的发展,利用 CAD/CAM 技术、先进制造技术来实现产品实物的逆向工程已成为 CAD/CAM 领域的一个研究热点,并成为逆向技术应用的主要内容。零件的数字化和 CAD 模型重建是逆向建模的两项关键技术。

[0003] 实施逆向工程,首先要提取对象表面的三维坐标信息,逆向工程采用的测量方法主要分为两大类:接触式和非接触式。在采用接触式测头测量时,由于测头半径的影响,得到的坐标数据并不是测头所触及的表面点的坐标,而是测头球心的坐标,当被测点的表面法矢方向和测轴方向一致时,测点坐标和测头中心相差一个测头半径值。通常测头半径在 0.25mm ~ 20mm 之间,如果忽略测头半径,即得到的数据不进行半径补偿处理,就会引起测量误差。当测头的压力矢(表面法矢)和测量截面在一个平面时,测量点曲线为平面曲线;当测头的压力矢(表面法矢)和测量截面不在一个平面时,测量点连线为空间曲线。一般来说,重建模型都偏大于实物原型,当反求模型的精度要求较高时,应对测量数据进行测头补偿。

[0004] 目前在 CMM(三坐标测量机)测量中广泛采用二维的自动补偿方法,即在测量时,将测量点和测头半径关系都处理成二维的情况,并将补偿计算编入测量程序中,在测量时自动完成数据的测头补偿。这种补偿方法简化了补偿计算,不影响测量采点和扫描速度,对一些由规则形状组成的表面测量,平面、二次曲面等,二维补偿是精确的。但对于一些自由曲面组成的复合曲面,测量时测点位置的曲面法矢通常和测轴不在同一平面内,此时按二维补偿会存在误差,在误差不能忽略的情况下,必须考虑对测量数据进行测头半径的三维补偿。

### 发明内容

[0005] 本发明设计开发了一种曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法。在本发明中,利用测头沿截面轮廓标注线扫描取点,形成测头轮廓线点云,并在截面轮廓标注线的左右两侧各增加一条扫描线,对于测头轮廓线点云中任一点 P 附近选取距离最近的若干点,并构建出拟合平面,通过拟合平面法矢实现点 P 的测球半径补偿 P'。利用该方法经投影计算后,可得到设计位置( )的测量轮廓线点云数据。本发明测量精度高,尤其可满足具有复杂曲面的大型工件的轮廓线测量及质量检测的要求。

[0006] 本发明提供的技术方案为:

[0007] 一种曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法,包括以下步骤:

[0008] 步骤一、利用测头沿待测工件的截面轮廓线扫描取点,形成测头轮廓线点云,利用测头在所述截面轮廓线的左右两侧各增加至少一条扫描线,形成至少一条左线点云和至少一条右线点云;

[0009] 步骤二、提取所述测头轮廓线点云中的点 P,从所述测头轮廓线点云中提取与点 P 距离最近的至少两个点,并且从每一条所述左线点云中均提取与所述测头轮廓线点云中的点 P 距离最近的至少一个点,从每一条所述右线点云中均提取与所述测头轮廓线点云中的点 P 距离最近的至少一个点,形成点组,利用所述点组拟合平面,并得到所述拟合平面的法矢,对点 P 沿法矢方向进行半径补偿,得到半径补偿点 P' ;

[0010] 步骤三、重复步骤二,得到由与所述测头轮廓线点云中的点对应的半径补偿点构成的截面轮廓线点云。

[0011] 优选的是,所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法中,所述步骤一中,利用测头在所述截面轮廓线的左右两侧各增加的扫描线的个数为一条。

[0012] 优选的是,所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法中,所述步骤二中,从所述测头轮廓线点云中提取位于点 P 前方的一个点和位于点 P 后方的一个点,从所述一条左线点云中提取与点 P 距离最近的两个点,从所述一条右线点云中提取与点 P 距离最近的两个点。

[0013] 优选的是,所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法中,所述步骤一中,利用测头沿待测工件的截面轮廓线扫描取点,是通过以下方式实现的:

[0014] 将所述待测工件表面的截面轮廓线手工标注成截面轮廓标注线,选定待测工件的基准测量坐标系,使所述截面轮廓标注线所在平面垂直于所述基准测量坐标系的一个坐标轴,利用测头沿所述截面轮廓标注线扫描取点。

[0015] 优选的是,所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法中,所述步骤一中,利用测头沿待测工件的截面轮廓线扫描取点,形成测头轮廓线点云,利用测头在所述截面轮廓线的左右两侧各增加至少一条扫描线,形成至少一条左线点云和至少一条右线点云,是通过以下方式实现的:

[0016] 利用测头沿待测工件截面轮廓线扫描取点,将扫描得到的点由测量系统的系统坐标系变换至基准测量坐标系内,形成测头轮廓线点云,

[0017] 利用测头在所述截面轮廓线的左右两侧各增加至少一条扫描线,将扫描得到的点由测量系统的系统坐标系变换至基准测量坐标系内,形成至少一条左线点云和至少一条右线点云。

[0018] 优选的是,所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法中,所述步骤一中,利用测头沿截面轮廓线扫描取点,将扫描得到的点由测量系统的系统坐标系变换至基准测量坐标系内,形成测头轮廓线点云,

[0019] 利用测头在所述截面轮廓线的左右两侧各增加至少一条扫描线,将扫描得到的点由测量系统的系统坐标系变换至基准测量坐标系内,形成至少一条左线点云和至少一条右线点云,

[0020] 其中,将扫描得到的点由测量系统的系统坐标系变换至基准测量坐标系内,是通过以下方式实现的:

[0021] 在所述待测工件的表面或附近选定基准点,且所述系统坐标系与所述基准测量坐

标系共有至少三个基准点,所述系统坐标系通过所述至少三个基准点变换至所述基准测量坐标系。

[0022] 优选的是,所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法中,所述系统坐标系与所述基准测量坐标系共有的基准点的个数在四个以上。

[0023] 优选的是,所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法中,所述系统坐标系还包括围绕所述待测工件的周围设置的、与所述基准测量坐标系至少间隔一个系统坐标系的系统坐标系,且相邻两个系统坐标系共有至少三个基准点,且所述系统坐标系通过与其相邻的系统坐标系所共有的至少三个基准点变换至相邻的系统坐标系。

[0024] 优选的是,所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法中,所述相邻两个系统坐标系所共有的基准点的个数在四个以上,所述基准测量坐标系与与其相邻的系统坐标系所共有的基准点的个数在四个以上。

[0025] 本发明所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法利用测头沿截面轮廓标注线扫描取点,形成测头轮廓线点云,并在截面轮廓标注线的左右两侧近距离各增加一条扫描线,对于测头轮廓线点云中任一点 P 附近选取距离最近的若干点,并构建出拟合平面,通过拟合平面法矢实现点 P 的测球半径补偿 P'。利用该方法经投影计算后,可得到设计位置的测量轮廓线点云数据。本发明测量精度高,尤其可满足具有复杂曲面的大型工件的轮廓线测量及质量检测的要求。

#### 附图说明

[0026] 图 1 为曲面轮廓测量方法的流程示意图。

[0027] 图 2 为测头轮廓线点云中点 P 的半径补偿的示意图。

[0028] 图 3 为截面投影的示意图。

[0029] 图 4 为实施例中基准测量坐标系的标设的示意图。

[0030] 图 5(a) 为实施例中控制点布设的俯视图。

[0031] 图 5(b) 为实施例中控制点布设的俯视倾斜图。

[0032] 图 6 为实施例中截面轮廓标注线的规划示意图。

#### 具体实施方式

[0033] 下面结合附图对本发明做进一步的详细说明,以令本领域技术人员参照说明书文字能够据以实施。

[0034] 如图 1 所示,本发明提供一种曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法,包括以下步骤:

[0035] 步骤一、利用测头沿待测工件的截面轮廓线扫描取点,形成测头轮廓线点云,利用测头在所述截面轮廓线的左右两侧各增加至少一条扫描线,形成至少一条左线点云和至少一条右线点云;

[0036] 步骤二、提取所述测头轮廓线点云中的点 P,从所述测头轮廓线点云中提取与点 P 距离最近的至少两个点,并且从每一条所述左线点云中均提取与所述测头轮廓线点云中的点 P 距离最近的至少一个点,从每一条所述右线点云中均提取与所述测头轮廓线点云中的点 P 距离最近的至少一个点,形成点组,利用所述点组拟合平面,并得到所述拟合平面的法

矢,对点 P 沿法矢方向进行半径补偿,得到半径补偿点 P' ;

[0037] 步骤三、重复步骤二,得到由与所述测头轮廓线点云中的点对应的半径补偿点构成的截面轮廓线点云。

[0038] 所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法中,所述步骤一中,利用测头在所述截面轮廓线的左右两侧各增加的扫描线的个数为一条。

[0039] 所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法中,所述步骤二中,从所述测头轮廓线点云中提取位于点 P 前方的一个点和位于点 P 后方的一个点,从所述一条左线点云中提取与点 P 距离最近的两个点,从所述一条右线点云中提取与点 P 距离最近的两个点。

[0040] 所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法中,所述步骤一中,利用测头沿待测工件的截面轮廓线扫描取点,是通过以下方式实现的:将所述待测工件表面的截面轮廓线手工标注成截面轮廓标注线,选定待测工件的基准测量坐标系,使所述截面轮廓标注线所在平面垂直于所述基准测量坐标系的一个坐标轴,利用测头沿所述截面轮廓标注线扫描取点。

[0041] 所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法中,所述步骤一中,利用测头沿待测工件的截面轮廓线扫描取点,形成测头轮廓线点云,利用测头在所述截面轮廓线的左右两侧各增加至少一条扫描线,形成至少一条左线点云和至少一条右线点云,是通过以下方式实现的:利用测头沿待测工件截面轮廓线扫描取点,将扫描得到的点由测量系统的系统坐标系变换至基准测量坐标系内,形成测头轮廓线点云,利用测头在所述截面轮廓线的左右两侧各增加至少一条扫描线,将扫描得到的点由测量系统的系统坐标系变换至基准测量坐标系内,形成至少一条左线点云和至少一条右线点云。

[0042] 所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法中,所述步骤一中,利用测头沿截面轮廓线扫描取点,将扫描得到的点由测量系统的系统坐标系变换至基准测量坐标系内,形成测头轮廓线点云,利用测头在所述截面轮廓线的左右两侧各增加至少一条扫描线,将扫描得到的点由测量系统的系统坐标系变换至基准测量坐标系内,形成至少一条左线点云和至少一条右线点云,其中,将扫描得到的点由测量系统的系统坐标系变换至基准测量坐标系内,是通过以下方式实现的:在所述待测工件的表面或附近选定基准点,且所述系统坐标系与所述基准测量坐标系共有至少三个基准点,所述系统坐标系通过所述至少三个基准点变换至所述基准测量坐标系。

[0043] 所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法中,所述系统坐标系与所述基准测量坐标系共有的基准点的个数在四个以上。

[0044] 所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法中,所述系统坐标系还包括围绕所述待测工件的周围设置的、与所述基准测量坐标系至少间隔一个系统坐标系的系统坐标系,且相邻两个系统坐标系共有至少三个基准点,且所述系统坐标系通过与其相邻的系统坐标系所共有的至少三个基准点变换至相邻的系统坐标系。

[0045] 所述的曲面轮廓测量及检测的测头半径补偿方法中,所述相邻两个系统坐标系所共有的基准点的个数在四个以上,所述基准测量坐标系与与其相邻的系统坐标系所共有的基准点的个数在四个以上。

[0046] 测量风力机叶片、飞机机身等大型曲面工件的外轮廓,一方面要求的精度越来越高,另一方面需要在现场进行快速的数据采集。就现有的测量手段而言,相对于其他三坐标

测量机、摄影测量、经纬仪测量等系统,激光跟踪仪测量系统具有精度高、效率高、测量范围大、体积小、便于携带、能够进行现场工作等优点,特别适合于不便于移动的大型工件的精密测量。因此,本发明使用激光跟踪仪测量系统。并且,测头扫描过程中,为手持扫描。

[0047] 1、激光跟踪仪测量系统的工作原理及测量要求

[0048] 激光跟踪仪测量系统大都由激光跟踪头、控制器、计算机、反射器(测头)及测量附件等组成。其基本工作原理是,跟踪头发射激光对反射器进行跟踪,由仪器的双轴测角系统和测距系统测算出反射器在球坐标系中的空间位置,再利用仪器校准参数和气象传感器对系统误差和大气环境误差进行补偿,得到精确的空间坐标。其中测距系统由相对距离测量的激光干涉测距仪(IFM)和绝对距离测量的装置(ADM)组成,在跟踪过程中如发生断光,后者可用于恢复测量。

[0049] 激光跟踪仪的测量方式包括静态目标测量、动态目标跟踪测量等。静态目标测量有单点平均测量、拟合测量或隐藏点测量等方式。动态跟踪测量为激光跟踪仪所特有,可以按设定的时间或距离间隔连续采样。

[0050] 激光跟踪仪具有较高的测量精度,以API的T3为例,仪器标称跟踪半径60m、IFM测量精度 $0.5\mu\text{m}/\text{m}$ 、ADM测量精度 $15\mu\text{m}$ 、测角精度 $3.5\mu\text{m}/\text{m}$ 。但仪器的这些精度指标并不是绝对不变,其与测量环境、仪器自身稳定性、跟踪距离等密切相关。测量环境中的气压、温度、湿度,甚至振动不仅会影响仪器本身的性能,而且对待测工件也有较大的影响,因此不同环境下的测量结果有时会出现较大差异。仪器的稳定性要求在使用前必须进行校准和充分预热。一般仪器的配套软件都提供了校准功能,仪器在经过运输或测量环境发生变化后,都需要重新校准。由于仪器的高精密性,预热过程引起仪器结构细微变化将影响仪器的精度,因而要求高精度的测量须进行充分预热。另外,还需考虑测量距离与角度对测量结果的影响,一般而言测量距离越近、测角越小精度越高。

[0051] 综合以上激光跟踪仪的测量原理及影响激光跟踪仪测量精度的因素,在进行高精度测量时要求:(1)测量距离尽量保持在限制范围之内,这不仅缩短了测量距离,而且也减小了测角的范围;(2)要保证激光跟踪仪及待测工件的固定;(3)尽量保证工作环境的温度与气压恒定;(4)测量前进行仪器校准和充分预热;(5)被测对象周围有足够的空间以保证测量的不受限制。

[0052] 2、大型曲面工件轮廓线测量方法

[0053] 如果大型曲面工件有设计数据,可以直接在设计坐标系下扫描获取测量数据,将减少数据转换的误差且便于数据的比较。另外,对于大型曲面工件,激光跟踪仪在一个位置不能将数据整体测完,需要进行多站测量,这样控制点的布设与测量就是一项必要而重要的工作。

[0054] 一般利用激光跟踪仪测量系统进行大型曲面工件轮廓线的测量,可分为以下步骤(如图1所示):(1)坐标系标设与测定;(2)控制点布设与测量;(3)轮廓线位置标注与采集;(4)轮廓线数据后处理。其中(2)中控制点的测量与(3)是相互交差进行的,即采取边控制边采集的方法。

[0055] 3、坐标系标设与测定

[0056] 选定待测工件的基准测量坐标系。尽量选择大型曲面工件的设计坐标系为基准测量坐标系,且最好使该基准测量坐标系的某一轴(如Z轴)垂直于轮廓线(也就是截面轮



廓标注线所在平面)。将设计坐标系作为基准测量坐标系,是为了将最终得到的轮廓线数据与设计数据进行比较,方便评价测量精度。但是实际上,并不仅限于设计坐标系的选择。

[0057] 为了确定基准测量坐标系,并且也为了方便基准测量坐标系与测量系统的系统坐标系之间进行坐标转换,需要首先在待测工件的表面或者附近选择出至少三个基准点。此处将用于标记基准测量坐标系的基准点又称之为特征点。特征点标设的原则是:(1)特征点的设计坐标能够确定;(2)为保证基准测量坐标系和系统坐标系的坐标转换的精度,特征点的个数不能少于4个;(3)特征点不能位于同一条直线上;(4)在一个测站上激光跟踪仪能够同时观测到所有特征点;(5)通常特征点位于待测工件的表面。

[0058] 在对特征点进行观测时,由于激光跟踪仪获取的是测头中心坐标而非特征点坐标,因此也需要对扫描得到的数据进行测头半径补偿。而这个测头半径的补偿过程既可以选择本发明的测头半径补偿方法,也可以选择现有技术中方法。如采用拟合法或补偿法来测量。拟合法是利用带尖针的加长杆,并使针尖位于特征点,激光跟踪仪扫描位于加长杆顶部测头中心的转动轨迹,再通过拟合球心的方法获取特征点的坐标。也可用其他一些拟合方法,如拟合平面,通过三面相交于一点的原理来获取点坐标等。补偿法需要借助异形底座,将底座放置于特征点附近,使得特征点与测头中心的位置相对固定且相互的空间关系(如距离)确定,通过计算补偿空间关系的方法获取特征点坐标。具体实测时,可根据方便的原则来选择特征点的测量方法。

[0059] 经激光跟踪仪获取的特征点坐标是以激光跟踪仪中心位置为坐标原点的系统坐标系,根据特征点的在设计坐标系内的坐标则可以将系统在系统坐标系中所得所有测量数据都转换到设计坐标系内,从而实现曲面轮廓测量数据与设计数据的对比。坐标转换误差不能大于限差,要获得亚毫米级的轮廓数据,其限差应小于0.5mm。

#### [0060] 4、控制点布设与测量

[0061] 对于规模较小的工件,只需要确定一个系统坐标系就可以了。此时,激光跟踪仪在上述系统坐标系内可以完成对工件表面所有的轮廓标注线的测量,这些测量数据经过坐标变换可以全部转换至基准测量坐标系内。

[0062] 但是对于大型工件,仅设定一个系统坐标系往往不够。因此,需要在工件附近选择多个合适的系统坐标系,即多站式测量。多站式测量是指对固定在某处的测量目标进行测量时,把激光跟踪仪仅放置在一个测量位置不能完成测量工作,需要通过移动激光跟踪仪(或者布置多台激光跟踪仪),在不同的位置分别对测量目标进行测量,最后将各站测得的数据转到同一坐标系中进行统一处理。上述多个测量位置就对应着多个系统坐标系。

[0063] 为了保证多个系统坐标系之间的坐标转换的精度,还需要在待测工件的附近或表面选定至少三个基准点。此处,又把相邻两个系统坐标系之间的基准点称为控制点。控制点的布设原则为:(1)所有控制点应均匀分布在待测工件的四周;(2)对于相邻的两个测站(系统坐标系),理论上须观测3个相同控制点,但为了保证转站精度最好观测4个或以上;(3)在每一测站,需要观测的控制点还应均匀分布在激光跟踪仪的周围。

[0064] 将观测特征点的测站设为第一测站(假设此第一测站为第一系统坐标系),将激光跟踪仪的系统坐标系转换到设计坐标系内,这样激光跟踪仪测得的点坐标都是设计坐标系中的坐标值。接着对能观测到的控制点进行单点测量,且这些控制点可在第二站(假设此为与第一系统坐标系相邻的第二系统坐标系)能重复观测。这样就实现了第二系统坐标

系与第一系统坐标系之间的坐标转换。然后再将第二系统坐标系转换至基准测量坐标系。其余各站的测量均按以上方法进行。

[0065] 尽管激光跟踪仪的测量精度较高,但考虑环境、人为等因素的影响,对每个控制点须进行至少两次的独立测量,取较差范围内测量数据的平均值,才能进行下一站的测量。

[0066] 5、截面轮廓线标注与数据采集

[0067] 根据工件曲面形状,一系列的截面轮廓线位置需要在测量前被规划出来,而且要在待测工件上标注出位置的痕迹。激光跟踪仪系统的实时观测功能可较为容易地完成轮廓线位置的标注。由于已将截面与 Z 轴设为垂直,只需观测 Z 值坐标即可。但这时系统显示的仅为测头中心的 Z 坐标,与截面所在的 Z 值存在一个可以忽略的较小偏差。在标注时,位置痕迹的粗度不宜超过 1mm,以避免实测时测头偏移标注线中心过大。此外,在一个测站上,需将观测范围之内所有截面轮廓线位置标注出来。

[0068] 在对截面轮廓标注线扫描之前,设置好激光跟踪仪系统的各项测量参数,其中为确保精度可将距离采样频率设置为 1mm。扫描时,手持测头沿着截面轮廓标注线保持连续滑动以采集数据。虽然激光跟踪仪系统具有续光功能,但是在扫描时以不断光为好。在一个测站上,视仪器测量距离的限制,完成观测范围内的所有截面轮廓标注线的数据采集。

[0069] 为保证测量的精度,需要在测量过程中进行较差的检核。当仪器转站之前,再次对本站的两个以上控制点进行单点测量,与已观测的控制点数据进行比较,检查仪器的是否存在移动及环境改变导致的精度下降。当仪器转站并完成控制测量及坐标转换后,需要对上次扫描过的最后两条轮廓线重复扫描,与已扫描数据进行比较,判断是否存在较大偏差。

[0070] 6、测量数据中冗余数据的去除

[0071] 手持测头在扫描开始及结束时,会产生一些冗余数据。根据 Z 值坐标及点云数据的点间距,设置阈值可以将冗余点云清除。

[0072] 7、测头轮廓线点云中点 P 的半径补偿

[0073] 利用测头沿截面轮廓标注线扫描取点,形成测头轮廓线点云。采集所得的测头轮廓线点云仅为测头中心的坐标数据,要得到工件曲面的轮廓线点云,还必须进行测头半径的补偿。

[0074] 对于测头半径的补偿,关键在于解算出测量时测头位置的曲面法矢量。较为成熟的算法有三点共圆法、微平面法、最小二乘平面拟合法、包络面法、曲线拟合法等。通常要根据测量方法、测量对象的规则性、测量数据的线面要求等来确定测头半径的补偿方法。一般大型曲面体的表面较为复杂,结合激光跟踪仪手持测头测量的特点,可采用最小二乘平面拟合的方法。其原理是在测点 P 的一个小领域内,分别采集多个参考点,利用最小二乘法拟合出最佳平面,以该平面的法矢  $N_p$  近似作为点 P 处的法矢量进行半径补偿。

[0075] 本发明的基本原理是在工件截面轮廓标注线的两侧各增加至少一条与截面轮廓标注线平行的扫描线,并形成至少一条左线点云和至少一条右线点云。但是一般情况下,在截面轮廓标注线的左右两侧各增加一条扫描线,分别称为左线与右线,左线或者右线与截面轮廓标注线的距离视曲面形状而定,一般为 0.5cm 左右。这样在截面位置进行数据采集时将扫描出三条点云数据,分别为测头轮廓线点云、左线点云和右线点云。

[0076] 以测头轮廓线点云数据为基础,分别从左线点云和右线点云中提取合适的点,进而形成点组,拟合平面并获得法线,再进行测头半径的补偿。具体地,从测头轮廓线点云数

据的第二个点开始,提取在测头轮廓线点云中位于其前后的两个点,再分别从左线点云和右线点云中提取与该点距离最近的两个点,以包括该点在内的7个点拟合微平面(见图2),进行测头轮廓线点云数据的测头半径补偿。基本算法如下:

[0077] 平面方程的一般表达式如下:

[0078]  $Ax+By+Cz+D=0, C \neq 0,$

[0079] 改写为:

[0080]  $z = -\frac{A}{C}x - \frac{B}{C}y - \frac{D}{C},$

[0081] 记:

[0082]  $a_0 = -\frac{A}{C}, a_1 = -\frac{B}{C}, a_2 = -\frac{D}{C}$

[0083] 则:

[0084]  $z = a_0x + a_1y + a_2$

[0085] 对于  $n(n > 3)$  点  $(x_i, y_i, z_i), i = 0, 1, \dots, n-1$ , 来拟合平面方程,最小二乘方法要求:

[0086]  $S = \sum_{i=0}^{n-1} (a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i)^2$

[0087] 最小,则应满足:

[0088]  $\frac{\partial S}{\partial a_k} = 0 \quad k = 0, 1, 2,$

[0089] 即:

[0090] 
$$\begin{cases} \sum 2(a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i)x_i = 0 \\ \sum 2(a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i)y_i = 0 \\ \sum 2(a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i) = 0 \end{cases},$$

[0091] 有:

[0092] 
$$\begin{cases} a_0 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i y_i + a_2 \sum x_i = \sum x_i z_i \\ a_0 \sum x_i y_i + a_1 \sum y_i^2 + a_2 \sum y_i = \sum y_i z_i \\ a_0 \sum x_i + a_1 \sum y_i + a_2 n = \sum z_i \end{cases}$$

[0093] 代入  $P(x_p, y_p, z_p)$  周围7个点的坐标,解上述方程组,得  $a_0, a_1, a_2$ ,则有该平面的法矢量为  $N_p(a_0, a_1, -1)$ ,并进行单位化  $N_e$ ,则点P的补偿点P'的坐标为: $(x, y, z) = (x_p, y_p, z_p) - rN_e$ ,其中r为测头的半径。

[0094] 关于测头半径补偿的误差与测头半径及被测曲面体的表面曲率有关,测头半径越小,曲率越小,误差也越小。

[0095] 8、截面投影

[0096] 截面投影是将测头轮廓线点云中的点P的半径补偿点P'投影到对应的截面上。半径补偿点P'在截面轮廓线所在平面上的投影可由三个平面的交点来确定,第一个平面是过P'点的拟合平面,拟合平面的法矢与测头轮廓线点云中的点P所在拟合平面的法矢一致,故过点P'的拟合平面的法矢已经在说明书的上一部分已经求出;第二个平面是通过P'点及Z轴(或垂直截面的坐标轴)的平面;第三个为投影截面(截面轮廓线所在平面)(如图

3 所示)。

[0097] 设半径补偿点 P' 的坐标为 P' ( $x_0, y_0, z_0$ ), 需要投影到对应的截面  $z = z_i$  上。则过该点的拟合平面方程如下:

$$[0098] \quad a_0(x-x_0)+a_1(y-y_0)-(z-z_0) = 0$$

[0099] 第二个平面是通过该点及 Z 轴的平面, 其方程如下:

$$[0100] \quad xy_0-yx_0 = 0$$

[0101] 则三个平面的交点如下:

$$[0102] \quad \begin{cases} a_0(x-x_0)+a_1(y-y_0)-(z-z_0) = 0 \\ xy_0-yx_0 = 0 \\ z = z_i \end{cases}$$

[0103] 解该方程组, 得到点 P' ( $x_0, y_0, z_0$ ) 在截面上的投影点 P'' ( $x, y, z$ )。

[0104] 实施例

[0105] 本发明选择了风机叶片为测量对象, 它是风力发电机的关键构件。风力机叶片造型特殊、空间角度复杂、长度大、尺寸较多、技术要求严格。生产出来的叶片必须进行抽检, 采用本发明所述方法完成了某一待测叶片的截面轮廓线扫描测量, 并与设计尺寸进行了比较。该叶片长度为 32.8m, 根部端面直径 1.68m。激光跟踪仪测量系统选用 API 的 T3, 测量软件为 SPatial Analyer。

[0106] 风机叶片根部端面为圆环形平面, 可以用激光跟踪仪测量系统对该平面进行平面度及圆度的检测。设该平面为 XY 平面, 圆环中心为原点 O, Z 轴垂直于 XY 平面形成空间右手坐标系 (见图 4)。将上述坐标系作为基准测量坐标系, 此坐标系也是风机叶片生产时的设计坐标系。对于 X 与 Y 轴的方向, 可根据叶片生产时根部留有标识来建立, 即连线相互垂直的四个点 a、b、c、d, 这四个点设计坐标已知, 如 a 点的坐标为 (0.84, 0, 0), 可作为用于标记基准测量坐标系的特征点。在第一站测量时, 在系统坐标系下测量上述四个特征点, 通过激光跟踪仪测量系统的坐标转换功能, 将系统坐标系转换到设计坐标系。

[0107] 控制点布设与测量

[0108] 为了完成叶片的整体扫描, 将叶片进行了提升, 底部距离地面约 0.5m, 并且固定了叶片。在叶片周围共布设了 12 个控制点 (见图 5a), 其中 5 个控制点位于叶片正下方 (见图 5(b)), 这样相邻测站之间可以至少有 4 个共用控制点。按照叶片的尺寸及激光跟踪仪的测量距离, 共设置了 5 个测站来完成数据扫描, 见图 5(a)。

[0109] 截面轮廓线标注与数据采集

[0110] 由于叶片的结构复杂, 除在 1 至 30m 之间按照 1m 等间隔规划截面轮廓线外, 在曲面曲率变化较大的地方, 如 0.1, 4.5, 23.7, 24.5, 25.5, 26.5, 27.2, 28.5, 29.7, 30.5 等部位增加了截面轮廓线的扫描 (如图 6 所示), 共计扫描了 40 个位置的截面轮廓线。按照本发明前文所详述的测头半径补偿方法采集所有位置的截面轮廓线数据和扫描线数据。

[0111] 测头半径补偿与轮廓线点云数据

[0112] 利用本发明的方法对所采集得到的测头轮廓线数据进行测头半径补偿。API 的 T3 激光跟踪测量系统选用的测头半径为 19.05mm。表 1 列出了 4.5m 处的三线扫描数据 (测头轮廓线点云、左线点云和右线点云), 序号代表测头轮廓线点云中的点 P 的位置编号, 在测头轮廓线点云中共计扫描了 2627 个点, 表中列出了其中的十个点的坐标数据。表 2 列出了

对应的半径补偿数据（也就是经过测头半径补偿得到的截面轮廓线点云数据）。同时，按照上文所提到的截面投影方法，将补偿后的数据投影到标准规划位置，故表 2 中也列出了 4.5m 处测头半径补偿后的投影位置数据。

[0113] 表 1 测头轮廓线点云、左线点云和右线点云的扫描数据（单位：mm）

[0114]

序号	左线点云			测头轮廓线点云			右线点云		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2258	992.6907	115.0811	4498.6539	988.5789	105.5804	4511.7879	990.5532	117.6303	4524.3859
2259	992.6565	116.0874	4498.9142	988.5572	104.3847	4511.7874	990.5296	118.9124	4524.4932
2260	992.5682	117.3752	4499.2347	988.5526	106.8167	4511.7378	990.3861	120.4358	4524.6816
2261	992.5396	118.8487	4499.5098	988.5473	103.0053	4511.5871	990.2702	122.1240	4524.6210
2262	992.4808	119.9310	4499.5556	988.4548	107.8604	4511.6725	990.1774	123.1588	4524.6582
2263	992.3983	121.2862	4499.6085	988.4289	108.9006	4511.5342	991.2500	92.7158	4521.9741
2264	992.3227	122.3146	4499.6724	988.4225	110.3602	4511.4942	991.2390	89.1410	4521.5969
2265	992.2080	123.4252	4499.7172	988.3428	111.6301	4511.4856	991.2381	94.3182	4522.0585
2267	992.1246	124.5573	4499.6576	988.3277	112.8151	4511.5252	991.2280	87.9354	4521.4043
2268	993.0762	94.9935	4494.6361	988.2636	114.0255	4511.4732	991.2191	90.9310	4521.8515

[0115] 表 2 测头半径补偿与投影数据（单位：mm）

[0116]

序号	测头轮廓线点云数据			测头半径补偿点云数据			截面轮廓线点云数据		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
2259	988.5572	104.3847	4511.7874	969.5072	104.3814	4511.7754	969.5146	104.3822	4500.0000
2260	988.5526	106.8167	4511.7378	969.5026	106.8144	4511.7310	969.5068	106.8148	4500.0000
2261	988.5473	103.0053	4511.5871	969.4973	103.0007	4511.5815	969.5007	103.0010	4500.0000
2262	988.4548	107.8604	4511.6725	969.4048	107.8555	4511.6680	969.4075	107.8558	4500.0000
2263	988.4289	108.9006	4511.5342	969.3789	108.8945	4511.5313	969.3807	108.8947	4500.0000
2264	988.4225	110.3602	4511.4942	969.3725	110.3536	4511.4917	969.3740	110.3538	4500.0000
2265	988.3428	111.6301	4511.4856	969.2928	111.6233	4511.4834	969.2941	111.6234	4500.0000
2267	988.3277	112.8151	4511.5252	969.2778	112.8089	4511.5229	969.2790	112.8090	4500.0000
2268	988.2636	114.0255	4511.4732	969.2136	114.0194	4511.4712	969.2147	114.0196	4500.0000
2269	988.2432	115.1280	4511.3993	969.1932	115.1221	4511.3975	969.1942	115.1222	4500.0000

[0117] 数据比较与分析

[0118] 为了检验本发明所述方法的正确性,将最终测量数据与设计数据进行了对比。方法是将最终得到的截面轮廓线的点云与设计数据的截面线进行了距离计算。从该表可以看出最大正距离为 1.438,最大负距离值为 -2.735,距离差值的均值为 0.159,方差值为 0.307,说明该叶片生产合格,从而验证了本发明所述方法的正确性。

[0119] 尽管本发明的实施方案已公开如上,但其并不仅仅限于说明书和实施方式中所列运用,它完全可以被适用于各种适合本发明的领域,对于熟悉本领域的人员而言,可容易地实现另外的修改,因此在不背离权利要求及等同范围所限定的一般概念下,本发明并不限于特定的细节和这里示出与描述的图例。

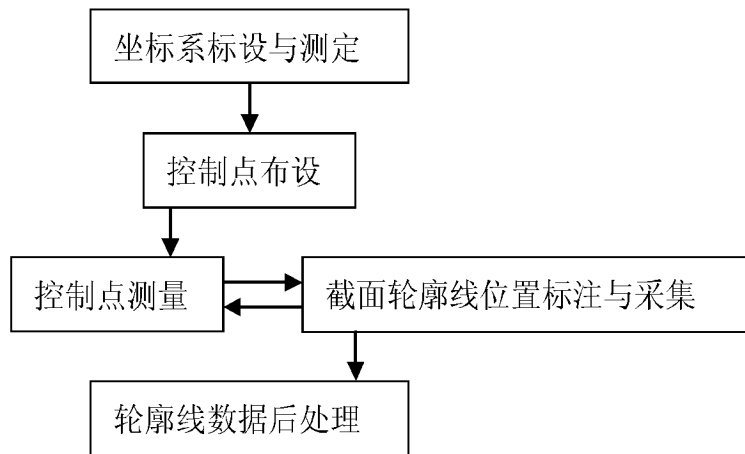


图 1

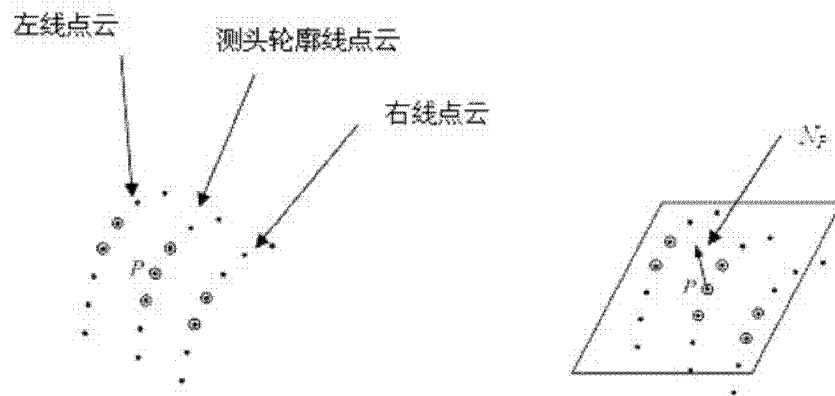


图 2

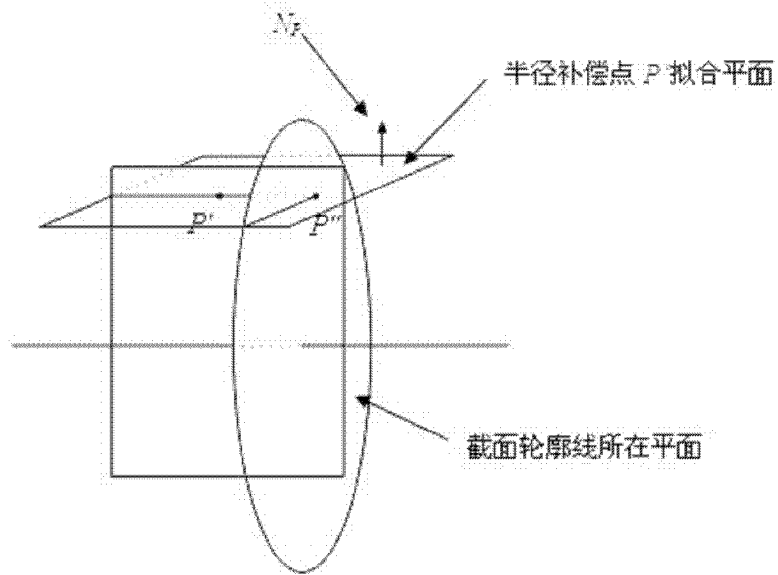


图 3

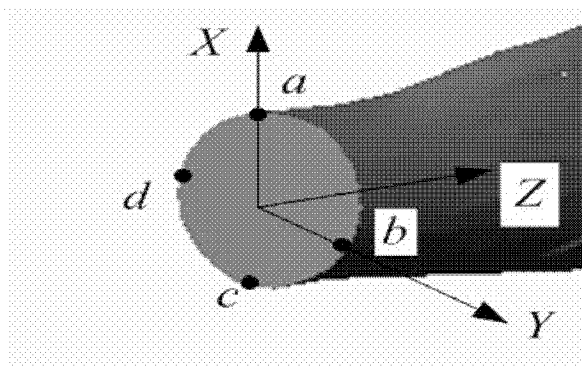


图 4

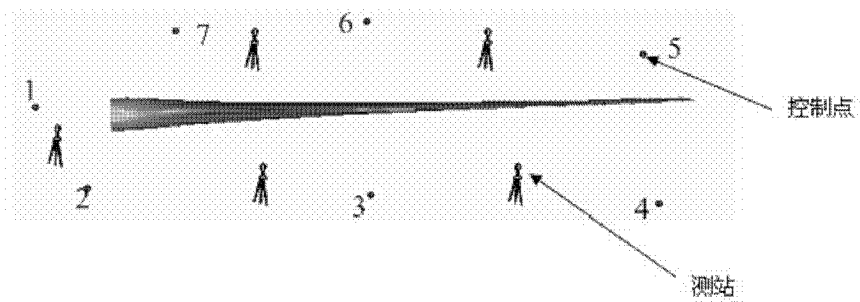


图 5(a)



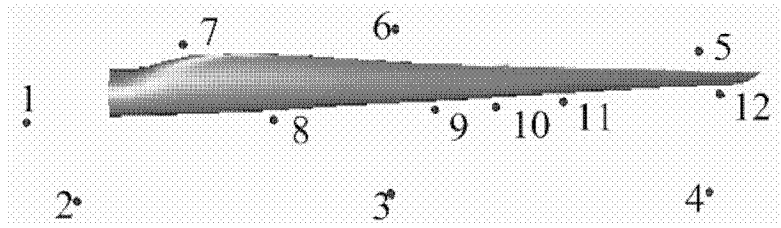


图 5(b)

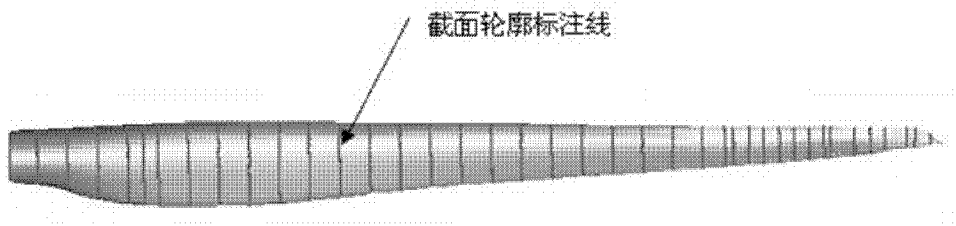


图 6