

基于大型制造虚拟数字工装测量平台应用研究

王志华 周小青 刘 颖

(北京新立机械有限责任公司检测校准实验室,北京 100074)

摘 要 分析了某大型特种部件制造过程中产生的难点,基于激光跟踪数字测量定位技术,论述了虚拟数字工装测量平台的设计原理,结合实例详细阐释了测量平台在大型特种部件制造过程中的应用,采取坐标数组控制方法,解决了制造过程难点。经实践验证,该测量平台能有效辅助大型特种部件制造并有效控制质量。

关键词 大型特种部件 激光跟踪仪 虚拟数字工装 控制

Research on the Application of Virtual Digital Process Equipment Measuring Platform Based on Large Scale Manufacture

WANG Zhi-hua ZHOU Xiao-qing LIU Ying

(The Testing and Calibration Laboratory of Beijing Xinli Machinery Limited Liability Company, Beijing 100074)

Abstract Difficulties of a large-scale special parts in the manufacturing process were analyzed. The design principle of virtual digital Process Equipment measuring platform was discussed, which based on the laser tracking digital measuring and positioning technology. Combined with an example, the application of measuring platform in the manufacturing process of large-scale special parts was explained in detail, and the coordinate array control method was adopted to solve the difficulties in manufacturing process. By the verification in practice, the measuring platform can effectively assist the manufacture of large-scale special parts and effectively control the quality.

Key words The large-scale special parts Laser Tracker Virtual digital Craft Equipment Control

1 引 言

随着航空、航天、船舶等大型装备制造技术的发展,大型特种部件的加工制造发生了根本性变革,数字协调工装辅助制造正逐步取代了传统实物协调工装辅助制造,这主要得益于激光跟踪仪的广泛使用。大型特种部件的制造通常离不开各种辅助工

装,传统的实物工装需要制作各种工具、样件作为辅助依据,制作难度较大,周期一般较长,成本不易控制,安装检查不方便,制造过程通常只能定性传递数据。然而,数字工装测量定位技术却可以弱化实物工装的使用,通过激光跟踪仪和制造系统充分结合,建立虚拟数字工装测量平台,可实现实物工装几乎全部功能,且具有独特的测量定位能力,进而实现高难度大型特种部件的制造。虚拟数字工装测量平台

的优点在于节省人力、财力和物力,还能大大减小制造过程的误差积累,提高制造精度,缩短制造周期。

2 大型特种部件制造难点分析

某大型特种部件结构如图1所示,其主体为钣金框架式焊接结构,由一定厚度的钢板折弯拼焊而成,内部为网格式立筋结构,整体焊接成型,焊道较长,焊接变形不易控制,焊接时采用优化焊接顺序等工艺方法控制焊接变形。

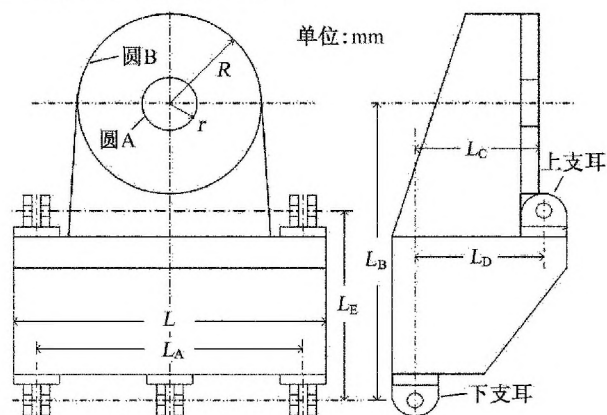


图1 大型特种部件结构简图

该特种部件尺寸较大,其上支耳和下支耳在独立制造完成后,采用组合焊接方式将其固连在主体框架上,然后再对每个支耳各侧面、底面及其中心孔进行精密加工。经过实践研究,制造过程将会出现以下两个难题:

(1) 主体框架焊接变形对每个支耳焊接位置的影响是显著的。图1中通过圆A中心的竖直面为设计中心面,主体框架变形后,设计中心面两侧将会出现不对称结构。此时,确定上下两组支耳的正确焊接位置,为后续精密加工每个支耳各侧面、底面及其中心孔留出准确工艺余量成为难点之一。

(2) 实现上、下两组支耳中心孔(特别是三个下支耳)长距离一体精密镗削加工,保证各组支耳中心孔的同轴度以及上、下两组支耳中心孔轴线的平行度成为难点之二,这也是该部件制造最为关键的问题。

3 虚拟数字工装测量平台应用研究

针对该大型特种部件制造过程中不可避免的两

个难点问题,本文在大量实践的基础上应用空间大尺寸测量技术,建立了一套基于大型特种部件制造虚拟数字工装测量平台,以充分辅助其难点位置的制造。

3.1 虚拟数字工装测量平台原理设计

虚拟数字工装测量平台是基于激光跟踪测量技术,将测量和工艺方法结合,融合制造平台和装卡调节控制机构而建立的一种数字化测量定位技术。

激光跟踪仪是一种空间大尺寸三维坐标测量系统,其以球坐标系方式实现对被测目标空间三维坐标的测量。如图2所示,坐标系由激光跟踪头水平轴线和垂直轴线及其交点组成。将目标反射镜放置于被测点P,激光跟踪头发射并接收目标反射镜返回的激光束,通过测得激光跟踪头偏转的两个角度参量 α 、 β 以及激光跟踪头中心O到被测点P的距离参量L,通过公式(1)可求得被测点的空间坐标P(x, y, z)^[5]。

$$\begin{cases} x = L \sin \beta \cos \alpha \\ y = L \sin \beta \sin \alpha \\ z = L \cos \beta \end{cases} \quad (1)$$

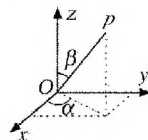


图2 激光跟踪仪测量坐标系示意图

距离参量L由激光跟踪仪中的激光干涉系统测得,角度参量由激光跟踪仪中的两个测角编码器测得。公式(1)表示激光跟踪仪的机器坐标系,其被固化在系统内,作为开始一个新测量任务的起始坐标系。通过空间齐次坐标变换,可将P点的空间坐标转换到用户自定义的坐标系中,以达成用户要求的数据输出。

可见,激光跟踪仪可以测量预制造目标的空间位置,并可实现数字坐标数组输出。将输出数据反馈给制造平台和装卡调节机构,即可调节非预期位置进入预期控制限,确保目标位置制造质量满足设计要求。鉴于以上分析,虚拟数字工装测量平台设计了四个系统:装卡调节机构与预制造平台、待测目标数字化与初始定位、系统光学路径优化与数据采集以及数据处理与目标位置调节。如图3所示为测量平台原理框图。

基于大型特种部件制造的装卡调节机构与预制

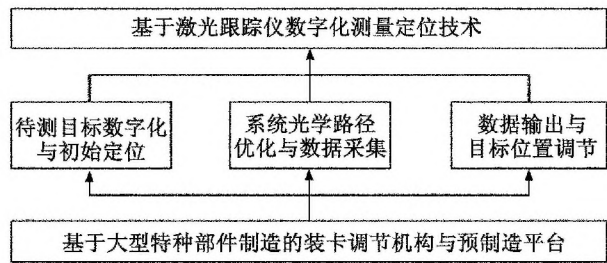


图3 虚拟数字工装测量平台原理框图

造平台主要用于搭建预制造系统,准备相应制造条件。待测目标数字化与初始定位系统将待测目标参数转化为待测数字坐标数组,通过装卡调节机构将该目标初始定位于大致位置。系统光学路径优化与数据采集系统依据待测目标位置考虑目标反射镜的光学路径,适度优化获取激光跟踪仪最佳放置位置,以利于高效完成待测目标的参数测量。光学路径优化完成后,启动测量程序进行待测目标的数据采集。数据输出与目标位置调节系统实现测量数据处理输出,并依据输出数据调节非预期目标位置参数,使之达到预期质量。

3.2 虚拟数字工装测量平台实践应用

虚拟数字工装测量平台是针对大型特种部件制造特点,利用激光跟踪测量技术开发出的一套具有通用性、灵活性和准确性的先进辅助测量平台,减少了多种实物工装的使用,缩短了工作准备周期,大幅度提高了制造效率和质量。在实际使用过程中测量平台保证了该大型特种部件难点位置制造合格率达到100%。

3.2.1 支耳焊接测量定位方法

大型特种部件主体框架焊接变形情况如图4所示,以主体框架中心面为基准,根据设计尺寸焊接各支耳,采用大型铣床铣削每个支耳各侧面和圆A的工艺预留量,可能会使支耳加工后出现厚薄不均匀现象或者圆A与圆B出现严重不同心,致使装配连接出现问题。

为此,运用虚拟数字工装测量平台进行测量定位,通过测量数据修正各支耳焊接位置,使其能平衡焊接变形带来的影响,从而确保各加工部位工艺余量。在该大型特种部件的各支耳中,设计要求主体框架边缘的四个支耳对称于中间支耳且对称于圆A中心。为此,可通过测量使圆A中心和主体框架中心共面,同时控制各支耳位置符合设计要求,并保证各部位铣削预留量。

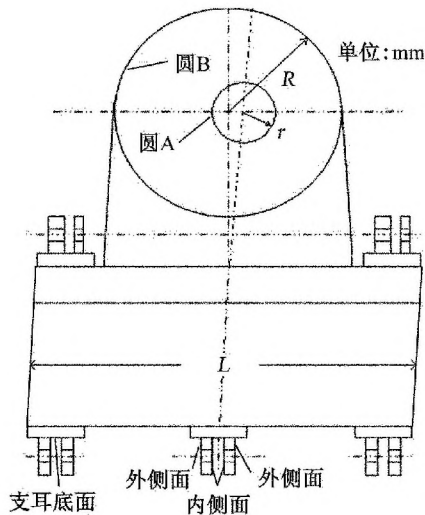


图4 主体框架变形时支耳组加工情况简图

各支耳预先由专用预紧夹持工装固定在主体框架的理论大致位置。如图5所示,图中各支耳中心的“十”字表示其中心位置。依据工艺图纸将各支耳“十”字中心位置转化为待测数字坐标数组 $[x_i, y_i, z_i]_{i=1 \sim 5}$,按照光路通畅且尽可能不转站原则寻找激光跟踪仪最佳测量位置,建立测量场站。

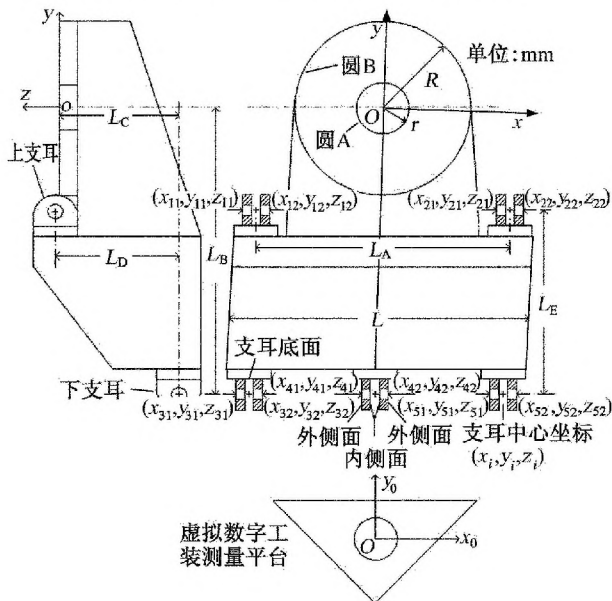


图5 支耳焊接测量定位示意图

采集基准坐标系数据,以圆B所在平面法向为Z轴正向,主体框架两侧数据与圆A构造的中心线为空间Y轴正向,坐标系原点选择圆A中心,应用变换矩阵将机器坐标系 $[x_0, y_0, z_0]$ 齐次变换为基准坐标系 $[x, y, z]$,所有测量数组均在基准坐标系下输

出。再采集每个支耳外截面圆心坐标数组 $[x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}]_{j=1 \sim 5}^{i=1 \sim 5}$, 见图5中箭头所指位置, 虚拟数字工装测量平台软件系统可计算构造出支耳“十”字中心坐标数组 $[x_i, y_i, z_i]_{i=1 \sim 5}$, 则各支耳位置控制条件见公式(2)。

$$\left\{ \begin{aligned} & [x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}]_{j=1 \sim 5}^{i=1 \sim 5} \Rightarrow [x_i, y_i, z_i]_{i=1 \sim 5} \\ & \begin{cases} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_A/2 \\ L_B - L_E \\ L_D - L_C \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \\ z_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_A/2 \\ L_B \\ L_C \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ L_B \\ L_C \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} y_{11} \\ z_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{12} \\ z_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{21} \\ z_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{22} \\ z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_B - L_E \\ L_D - L_C \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} y_{31} \\ z_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{32} \\ z_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{41} \\ z_{41} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{42} \\ z_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{51} \\ z_{51} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} y_{52} \\ z_{52} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_B \\ L_C \end{bmatrix} \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

公式(2)同时控制同侧支耳组之间的同轴度以及每个支耳的理论焊接位置, 依据焊接工艺公差和工艺预留量设定控制限, 其控制限较宽, 通常为 $\pm(0.5 \sim 1) \text{ mm}$ 。在虚拟数字工装测量平台的测量监控下, 按照公式(2)输出数组调节超出控制限的支耳进入理论焊接位置。至此, 每个支耳的焊接位置确定, 紧固预紧夹持工装, 工人采用点焊方式预固定, 测量监控无异常后, 可以转入下道工序进行完全焊接、探伤和铣削加工。特别应该注意的是, 支耳组各侧面铣削加工去除工艺预留量时, 应遵循以上测量基准和测量数据方可保证加工质量。

3.2.2 支耳中心孔镗削测量定位方法

支耳组中心孔精密镗削加工是该大型特种部件制造的关键工序, 也是极具难度的制造过程。经分析论证, 选取动力头镗床作为支耳中心孔镗削制造平台。

如图6所示, 动力头镗床工作过程中, 其机头在传递精密主轴旋转动力的同时向左方缓慢移动, 进

而带动镗刀实现镗削加工。三个活动支座均可沿工作基面左右独立直线移动, 至合适位置后紧固。主轴孔套采用耐磨耐高温材料制作, 以使精密主轴在运动过程中保持持续稳定和同轴旋转。精密加工每组支耳中心孔采用一次装卡镗削, 且精密主轴同轴旋转精度较高, 对于同轴长距离孔径具有独特的精密镗削加工优势, 因此完全满足支耳同轴度设计要求。



图6 动力头镗床结构简图

但是其最大的问题在于本身没有测量定位系统, 这意味着镗削加工过程无法准确保证垂直于精密主轴的所有关联部位尺寸和位置公差, 因此仅仅依靠动力头镗床与普通检验手段对支耳中心孔进行精密镗削加工, 将无法保证上下两组支耳轴线的平行度以及两组轴线的空间距离。为此, 采用虚拟数字工装测量平台辅助动力头镗床实现关键工序制造。

为了使动力头镗床具备测量定位功能, 可将虚拟数字工装测量平台与动力头镗床作为一个整体系统, 就如同先进的大型数控加工中心一样具备镗削加工功能和测量定位功能。因此, 测量定位技术转化为大型特种部件加工找正技术。也就是说, 精密镗削各支耳中心孔前, 可应用该系统的测量定位功能对工件进行加工基准找正, 系统的工作基面、精密主轴和测量平台位置相对固定不动, 该大型特种部件的位置随着基准找正过程而适度调整。

如图7所示, 依据工艺图纸将圆A中心以及圆B所在平面 z_1, z_2, z_3 与 z_4 点位置(法线垂直于圆B所在平面)转化为数字坐标数组。同理, 按照光路通畅且尽可能不转站原则寻找激光跟踪仪最佳测量位置, 建立测量场站。采集基准坐标系数据, 以动力头镗床工作基面法向为空间Z轴正向, 精密主轴镗削方向为空间X轴正向, 坐标系原点可由采集的精密主轴数据构造至中间支耳附近位置, 其Y向与Z向零点与精密主轴轴线重合。应用变换矩阵将机器坐标系 $[x_0, y_0, z_0]$ 齐次变换为基准坐标系 $[x, y, z]$, 所有的测量数组均在基准坐标系下输出, 以完成精密镗加工找正。

下支耳组加工找正时, 采集图中圆A中心坐标

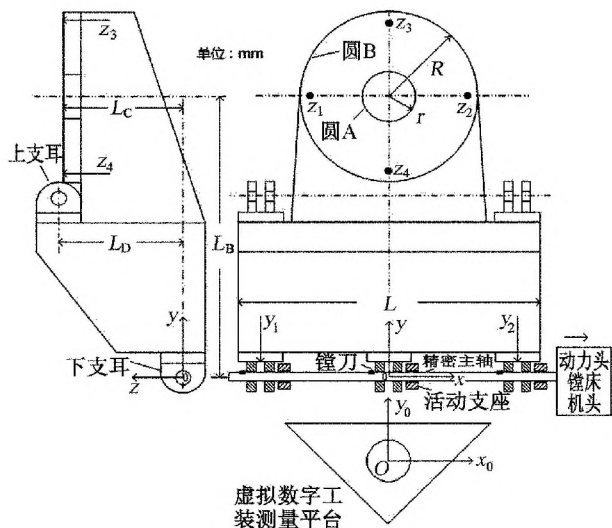


图7 上支耳中心孔镗削测量定位示意图

数组 $[x_A, y_A, z_A]$ 、箭头所指下支耳部位的坐标数组 $[y_1, y_2]$ 以及圆B所在平面点坐标数组 $[z_1, z_2, z_3, z_4]$, 找正控制条件见公式(3)。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |X| \\ L_B \\ L_C \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ C \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_C \\ L_C \\ L_C \\ L_C \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

式中: X ——圆A中心 X 坐标值,无需对其实施控制;
 C ——常数,找正完成后为定值; $[z_1, z_2, z_3, z_4]$ ——圆B所在平面采集四点,其 Z 坐标组成的数组。

坐标数组 $[x_A, y_A, z_A]$ 控制圆A中心与精密主轴的 Y 向距离;坐标数组 $[y_1, y_2]$ 控制下支耳组底面与精密主轴平行度;坐标数组 $[z_1, z_2, z_3, z_4]$ 控制圆B所在平面与动力头镗床工作基面平行度及其与精密主轴的 Z 向距离。

依据设计和镗削工艺公差设定控制限,此时控制限较为严格,通常为 $\pm(0.1 \sim 0.3)$ mm。虚拟数字工装测量平台按照公式(3)进行数据处理输出,同时计算出不符合找正条件的数据与对应控制限的差值矢量,在测量平台监控下,通过镗削装卡工装调节机构调节相应的差值矢量,直至所有数据进入设定控制限。此时,紧固镗削装卡工装及其调节机构,数

据监控无异常后开始镗削加工至工艺尺寸。

下支耳组镗削加工完成后,再进行上支耳组镗削加工。虽然该大型特种工件需要翻转重新装卡,但是其测量定位方法是一致的。此时需控制上支耳组与下支耳组中心轴线的平行度及其 Y 向、 Z 向距离。

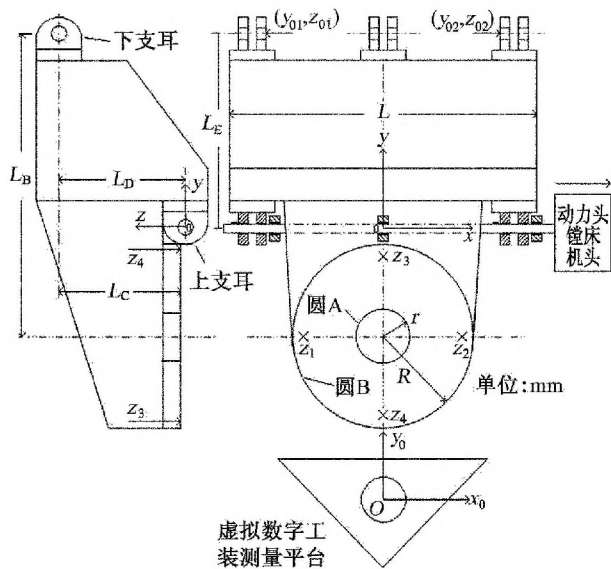


图8 下支耳中心孔镗削测量定位示意图

如图8所示,基准坐标系的建立与镗削下支耳时的原理相同,采集图中箭头所指部位的坐标数组 $[y_{0i}, z_{0i}]_{i=1,2}$ 和圆B所在平面 z_1, z_2, z_3 与 z_4 点位置(法线垂直于圆B所在平面)坐标数组 $[z_1, z_2, z_3, z_4]$,找正控制条件见公式(4)。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} y_{01} \\ z_{01} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{02} \\ z_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_E \\ L_D \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_D - L_C \\ L_D - L_C \\ L_D - L_C \\ L_D - L_C \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $[z_1, z_2, z_3, z_4]$ ——圆B所在平面采集四点,其 Z 坐标组成的数组。

公式(4)中,坐标数组 $[y_{0i}, z_{0i}]_{i=1,2}$ 控制上下两组支耳的空间距离及其中心轴线平行度,坐标数组 $[z_1, z_2, z_3, z_4]$ 制圆B所在平面与动力头镗床工作基面的距离及平行度。同理按照输出数据调整不符合控制限的差值矢量进入设定控制限,在测量平台监控下紧固装卡工装,数据无异常后即开始镗削加工至工艺尺寸。

(下转第4页)

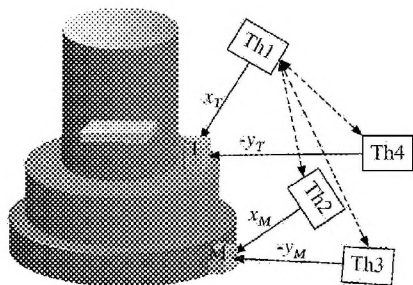


图7 确定基准镜之间的关系

通过 Th1、Th4, 可以得到从此时的 Th1 坐标系到 $O_T x_T y_T z_T$ 的过渡矩阵 M_{1T} ; 通过 Th2、Th3 及 Th1, 可以得到从此时的 Th1 坐标系到 $O_M x_M y_M z_M$ 的过渡矩阵 M_{1M} 。则由相机基准镜到定位环基准镜的过渡矩阵为

$$M_{TM} = M_{1T}^{-1} M_{1M} \quad (3)$$

在分别得到式(1)、(2)、(3)后, 视轴 S 在卫星本体坐标系 $Oxyz$ 下的表达式即被确定:

$$\vec{S} = M_M^{-1} M_{TM}^{-1} \vec{S}_T$$

后, 将其与工程可测的参照系关联, 逐步过渡, 求出

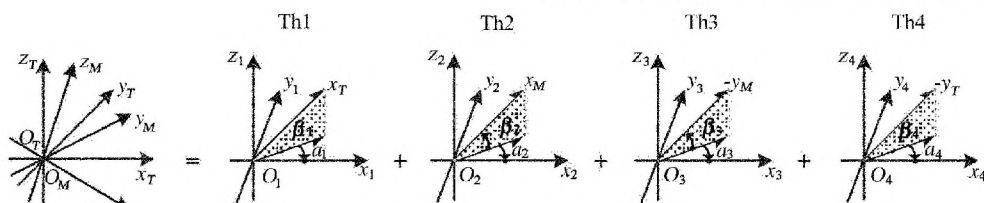


图8 基准镜相对关系的分解测量

4 结束语

根据上述实例分析, 空间虚拟轴的测量问题即为给出该虚拟轴在某个空间参照系下的精确数学表达, 在利用自身特征、通过专门技术捕获这个虚拟轴

中间参照系的变换关系, 从而获得期待的结果。在诸如载体固联星敏感器、多模式导引头等装置的空间测量领域, 这一形式可被具体应用。

(上接第 24 页)

至此, 该大型特种部件在虚拟数字工装测量平台的辅助下, 独特、高效的解决了制造过程难题, 整个过程质量受控, 完全符合设计和工艺要求, 满足后续装配对接条件。

4 结束语

综上所述, 虚拟数字工装测量平台将制造过程与测量技术充分集成, 对于大型特种部件的制造起到了举足轻重的作用。同时, 测量进入了制造现场, 参与了制造过程, 极大的提高了制造精度, 为制造合格的大型特种部件提供了质量保证, 有利于后续装配对接工作的开展。经过多个大型特种部件制造实践, 结果表明, 虚拟数字工装测量平台对于大型工件制造辅助测量定位具有一定的普遍性, 今后将在此

基础上不断完善测量平台的功能, 使其应用领域更加广泛。

参考文献

- [1] 石章虎, 兰勇等. 基于数字化装配的激光跟踪仪测量应用研究[J]. 航空制造技术, 2011(9): 54~56.
- [2] 王巍, 黄宇, 庄建平. 激光跟踪仪在飞机装配工装制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2004(12): 81~84.
- [3] 王佳, 胡朝晖. 激光跟踪虚拟坐标测量系统与自标定方法的实验研究[J]. 光学技术, 2001, 27(5): 447~450.
- [4] 李广云. LTD500 激光跟踪测量系统原理及应用[J]. 测绘工程, 2001, 12(4): 3~8.
- [5] 刘建新, 马强, 杨再华. 激光跟踪测量系统及其在航天器研制中的应用[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(3): 286~290.