

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.06.07

一种基于数学模型的自动测量方法

王凯, 陈艳平, 王成, 王国星, 王静, 顾帅

(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

摘要: 为适应航天产品批量化及高效化的研制需求, 提出一种基于产品数学模型的自动测量方法, 在对产品数学模型进行数理分析的基础上, 在装配组件上预置标定实物并标定其位置信息, 装配过程以标定物为测量对象, 利用仪器自动采样、自动评价, 实现对组件装配状态的快速测量及判定。经试验证明: 该方法自动化程度高、应用面广、适应性强, 可以降低现场数据差错率, 显著提升测量效率。

关键词: 自动测量方法; 原理; 应用

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)06-0029-04

An Automatic Measurement Method Based on Mathematical Model

WANG Kai, CHEN Yanping, WANG Cheng, WANG Guoxing, WANG Jing, GU Shuai

(Beijing satellite manufacturing Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: In order to meet the requirements of batch and high-efficiency development of aerospace products, an automatic measurement method based on product mathematical model is proposed. On the basis of analyzing product mathematical model, a calibrated object is preset on the assembly module and its position is calibrated. The calibrated object is taken as the measurement target in the assembly process and the instrument is used to self-calibrate it. Dynamic sampling and automatic evaluation functions of the instrument, we can achieve rapid measurement and determination of the assembly status of the components. Experiments show that this method has high automation, wide application and strong adaptability. It can reduce the error rate of field data and significantly improve the measurement efficiency.

Key words: automatic measurement method; principle; application

0 引言

航天产品研制中, 常涉及对高位目标装配或试验状态的位姿测量, 装配状态测量中, 还需对产品的调整操作予以现场指导, 确保产品达到合适状态。传统测量方法采用全要素采样、现场处理、人工评价的方式, 需要测量人员进行长时间的高空采集作业, 操作强度大, 安全风险高; 繁琐的数据处理环节, 大量占用生产主线时间, 影响产品研制进度, 难以适应产品批量化及快速化研制需求。因此, 本文提出一种基于产品数学模型的自动测量方法, 简化操作流程, 提升测量效率。

1 方法原理

此基于产品数学模型的自动测量方法的流程为:

①以产品数学模型为基础, 分析组件被测特征与理论基准间的位置关系; ②在组件上制备相对其位置固定的标定物, 通过标定方法, 获得两者空间位置关系; ③装配过程中, 建立产品装配基准, 并实现仪器对标

定物自动采样; ④根据标定结果, 结合产品模型, 完整分析出组件(模型中包含的所有特征信息, 如特征点、线、面等)的位置、姿态信息; ⑤如果状态不合格, 根据分析结果, 快速制定出调整方案, 指导进一步的调整操作, 直到最终呈合格状态。

方法流程如图 1 所示。

2 方法应用

以某卫星外部载荷支架结构装调测量过程为例, 对本方法应用过程予以阐述。该卫星结构装配阶段呈竖直置放状态, 所述载荷支架位于结构最顶部, 离地高度约为 8 m。

2.1 数模分析

以产品数学模型为基础, 对组件相对装配基准 Q (或星体基准) 的理论位置关系进行分析、解算。采取自定义组件特征坐标系的方式, 以组件上的特征孔、特征面等作为构建元素, 确保遵循定义方式简单、测量方法简便的原则。

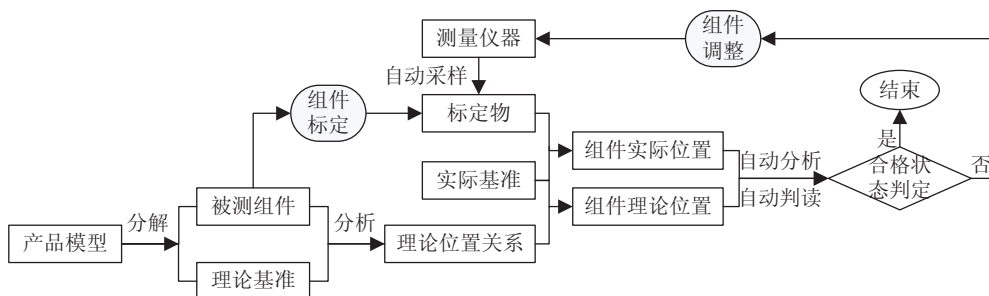


图 1 方法流程图

载荷支架理论安装状态如图 2 所示。

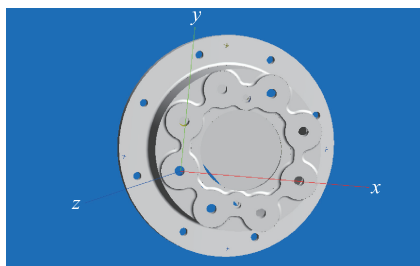


图 2 工件特征坐标系定义示意图

根据产品结构特征，将组件特征坐标系 W 定义为：以左下方安装孔中心为原点，原点指向右下方安装孔中心为 $+X$ 轴方向，原点指向左上方安装孔中心为 $+Y$ 轴方向，依据右手定则确定 $+Z$ 方向。按照上述规则，从设计模型上取三个特征点：左上方、左下方、右下方三个安装孔的中心。在图形处理软件中，可以获取上述特征点在装配基准 Q 下的坐标值。将上述组件的三维模型（含特征点坐标信息）以通用数据格式（如 IGS, TXT 等）导入测量软件 Spatial Analyzer 中。通过坐标转换算法，得到组件特征坐标系 W 与基准坐标系 Q 之间的数学转换关系，如图 3 所示。

2.2 组件标定

一般在装配前、零件状态下实施组件标定，选择合适的标定物，并通过适当方式确定标定物相对工件特征坐标系 W 的位置关系。

为确保自动测量过程能够顺利实现，标定物需具备磁性，从而通过磁力吸附专用测量球。标定物通过胶结方式与产品组件连接。自行设计制作的金属标定物形式如图 4 所示。

根据产品测量精度需求确定标定方法，可选的方式有跟踪仪测量法和三坐标测量法。本例中，载荷支架中心相对装配基准的位置度误差要求 $\phi 0.3 \text{ mm}$ ，精度需求相对宽松，故选择跟踪仪测量法。

标定物在组件上的布局，应满足空间分布合理性



图 3 坐标转换关系示意图

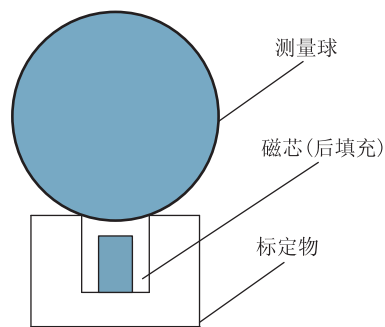


图 4 标定物设计形式

及实际采样可视性^[1]。空间分布上遵循以下几个规则：①标定物数量不少于 4；②标定物在空间各个方向的分布尺寸与组件最大尺寸相当；③避免标定物近似位于某一直线方向或位于某一平面上。

考虑现场环境及产品结构的复杂性，为保证实际测量中所有组件（可能涉及多个组件）、所有标定物的可视性，提出基于数学模型的标定物预设法^[2]，即输入多种测量需求信息，模拟实际测量场景，在测量软件中对仪器布局、标定物布设等进行仿真分析，如图 5

所示。具体流程为：在模拟场景中，以测量精度满足需求、仪器搬站次数最少为前提，对仪器最佳布设位置进行预设；确定组件的可被观测区域，根据标定物布设规则，拟定标定物的大致布设区域；在对多个组件的所有标定物进行统一分析的基础上，确定仪器的最终布设位置，进而精确确定每个组件上标定物的具体布设位置；结合现场情况，对测量路径的合理性予以分析确认（例如考虑高位采样中的支撑平台运行路线、采样人员调整操作便利性等因素）；根据上述分析结果，对标定物布设方案进行局部改进，制定最终方案。

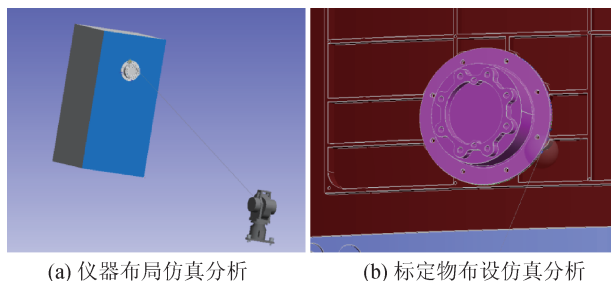


图5 标定物预设法

标定数据是后续测量的前提条件，装配过程中因组件已与其它零件或组件联接，难以重新实施标定，因此需要严格控制标定操作过程，确保测量结果的准确性。

获得标定数据后，根据以上得到的组件特征坐标系 W 与装配基准坐标系 Q 的转换关系，可以计算得到标定物相对于基准坐标系 Q 的坐标值^[3]，即标定物的理论坐标值。

上述工作可在产品正式装配前完成，减少对主线研制时间的占用。

2.3 现场采样

在测量现场，将跟踪仪架设到规划位置，对装配平台或航天主结构基准构成要素采样，建立装配基准 Q ；在测量文件的装配基准 Q 坐标系下，将标定物理论值点组 F 导入测量文件；将跟踪仪测量球放置于标定物上，逐一精确调整测量球的反射角度；以标定物理论值点组 F 为引导值，引导跟踪仪自动采样，获得标定物实际值点组 M 。如果涉及多个组件，可以成批导入，逐个采样。

上述操作中，应用到了跟踪仪的自动搜索、锁定功能^[4]，市场上的主流跟踪仪，均具备该功能。在标定物理论值与实际值存在位置偏差时，仪器会以理论值对应位置为中心，自动进行搜索，直到锁定测量球实际位置，设备控制器自动触发、采样。

为避免因环境或仪器等因素而产生数据异常情况，

建议进行三次以上重复测量，确认过程受控、数据可靠后，取合适的单次测量数据作为最终有效数据。

2.4 数据解算

对组件所有特征信息（包括特征点、线、面、体等）在装配基准 Q 下的实际位置或状态进行分析，可以按照以下方法^[5]：标定物相对装配基准 Q 的实际值点组 $M = (x, y, z, 1)^T$ ，标定物相对装配基准 Q 的理论值点组 $F = (x, y, z, 1)^T$ 。

为便于数据计算，采取逆向思维处理，即实际值与理论值并不完全一致时，则反映组件实际偏离理想状态。假设存在一个虚拟的装配基准 Q' ，工件相对该基准呈理想状态，则

$$F = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} M \quad (1)$$

式中： R 为旋转矩阵； T 为平移向量。

根据式(1)可得转换参数 R, T 的计算值，即得到实际基准 Q 与虚拟基准 Q' 的转换关系；从数模上可获得特征元素相对装配基准 Q 的理论关系，乘以上述矩阵的逆值，即可得到其相对装配基准 Q 的实际关系。零件特征分析示意如图6所示。



图6 零件特征分析示意图

图6(a)中，灰色为该零件的理论位置，粉色为其实际位置。图6(b)的数表显示了该零件实际位置相对于理论位置的数学转换关系式。若用于判断组件装配状态的测量特征为点元素，则标定物和组件可视为一个刚体，故通过标定物坐标值偏差可以直接判断出组件状态是否合格。

2.5 调整方案

根据产品整体偏移量及偏移方向，制定相应的调整措施，按照“分步调整、逐步趋近”的思路，使产品接近并达到理想状态。结合测量软件，以前述载荷支架调整为例进行详细说明。

对载荷支架装配状态下的姿态、位置提出要求，包括组件安装后的俯仰、扭摆角度偏差，组件端面中心的位置度，即在上下、左右、前后三个方向上的位移偏

差,如图7所示。本例中,在满足测量可达性的前提下,对标定物布设方式予以了规划,如图8所示,位姿参数的评价基准大致与装配基准Q坐标轴方向重合。

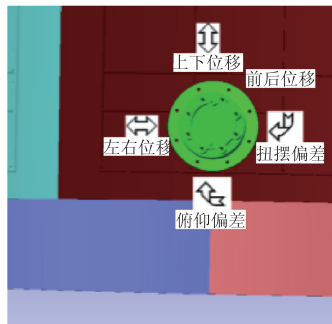


图7 特征姿态、位置状态需求

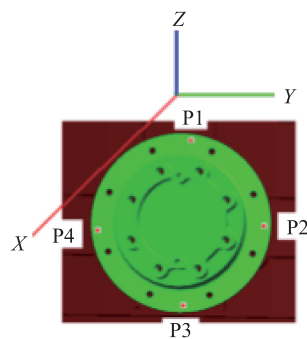


图8 标定物分布及基准方向定义

现场通过自动测量方式,得到各标定物实际值点组 M 与相对理论值点组 F 的偏差点组 D ,偏差值 $d_i(x_i, y_i, z_i)$ ($i=1, 2, 3, 4$),如表1所示。

通过分析报表,可以快速判定组件状态,并快速

制定调整方案,具体分析过程如下:组件呈理想状态时,偏差值 $d_i(x_i, y_i, z_i)$ ($i=1, 2, 3, 4$)应全为0;由标定物分布方式可知,根据 dx_1, dx_3 数值之差可以分析出组件俯仰角偏差值,根据 dx_2, dx_4 数值之差可以分析出组件扭摆姿态角偏差值;根据4个点的各轴向偏差值(dx, dy 或 dz),可以分析出组件几何重心在各方向上的位置偏差情况,例如:如果 dy_1, dy_2, dy_3, dy_4 的数值分布在2.01~2.15 mm之间,即可确定组件相对舱体装配基准,存在偏向+Y方向的偏移,偏移量为2.01~2.15 mm。

对于组件安装基准面与装配基准Q坐标平面不重合的情况,也可以沿用前述分析思路,确定组件位姿评价基准P与装配基准Q的转换关系,然后解算评价基准P下,标定物理论值点组的数值。实际装配中,测量装配基准Q后,根据已知关系构建出评价基准P,在该坐标系下,以标定物理论值点组为参考,对数据采样进行目标引导、组件状态进行快速评价,后续操作完全相同。

表1 自动测量现场报表

IGES 导入点	名义值 X	名义值 Y	名义值 Z	实测值 X	实测值 Y	实测值 Z	偏差值 X	偏差值 Y	偏差值 Z	3D
P1	-1630.500	338.6507	1095.1619	-1630.498	338.6478	1095.1647	-0.0017	0.0029	-0.0028	0.0043
P2	-1630.500	351.6507	1062.8381	-1630.496	351.6534	1062.8369	-0.0035	-0.0027	0.0011	0.0046
P3	-1630.500	338.6507	1029.8381	-1630.498	338.6489	1029.8336	-0.0017	0.0018	0.0044	0.0051
P4	-1630.500	325.6507	1062.1619	-1630.497	325.6494	1062.1587	-0.0030	0.0013	0.0033	0.0046

3 结论

相较传统航天产品位姿测量方法——直接测量法,本文提出的基于产品数学模型的自动测量方法,具有以下优势:①测量效率高:常规数据处理工作在前期标定阶段完成,现场的数据处理工作量小。例如本文所举的实例中,一次完整的数据采样、处理、评价过程仅需耗时十余秒,使测量过程对研制主线的占比极大降低;②操作安全性高:无需现场对产品实施特征采样,仅需将测量球置于标定物上,不易产生人员疲劳、紧张现象,规避高空操作风险;③自动化程度高:采样环节利用了测量设备的自动搜索、识别功能,无需人工引导,降低了操作强度;调整环节的数据处理过程实现了软件直接自动评价功能,降低了数据差错率,提升了测量准确性。

参考文献

- [1] 黄鹏,王青,李江雄,等.激光跟踪仪三维坐标转换综合优化方法[J].计算机集成制造系统,2015,21(11):2912-2920.

- [2] 刘检华,宁汝新,姚珺,等.面向虚拟装配的零部件精确定位技术研究[J].计算机集成制造系统,2005,11(4):498-502.
- [3] 孙大双,张友阳,黄令勇,等.多元总体最小二乘在大旋转角三维坐标转换中的应用[J].测绘科学技术学报,2014(5):481-485.
- [4] 激光跟踪仪使用说明书[Z].2012.
- [5] 张皓琳,林嘉睿,郑继贵.三维坐标转换精度及其影响因素的研究[J].光电工程,2012,38(10):26-31.

收稿日期:2018-07-16

作者简介

王凯(1986-),男,主要从事航天器整星结构与太阳翼装配产品的精度测量及检验工作。曾获得授权专利1项,发表各类论文10余篇,并荣获“航天技术能手”荣誉称号。

