

面向飞机制造的测量管理M-BOM构建*

梁青霄

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

[摘要] 智能制造是制造技术发展的必然趋势,国内外专家认为,智能制造具有“状态感知、实时分析、自主决策、精准执行、学习提升”的特征,其中“状态感知”是实现智能的重要途径,状态感知的实现方式就是“测量”,可以说,“测量”就是智能制造的基础。基于智能制造的特点和发展趋势,展望了飞机制造技术在智能化方面的发展趋势,分析了测量在飞机制造过程的重要地位,以及当前测量任务管理存在的问题,结合飞机制造BOM的思想,提出在飞机制造中建立测量BOM的概念,并对测量BOM的构建思路进行了分析,对测量BOM构建的意义进行了阐释。

关键词: 智能制造;飞机制造;测量;BOM架构;物料BOM;测量BOM

Construction of M-BOM for Aircraft Manufacturing Measurement Management

LIANG Qingxiao

(AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] Intelligent manufacturing is an inevitable trend in the development of manufacturing technology. Experts believe that intelligent manufacturing has the characteristics of “state perception, real-time analysis, autonomous decision-making, accurate execution and learning promotion”, among them, “state perception” is an important way to realize intelligence, and the realization way of state perception is “measurement”, it can be said that “measurement” is the basis of intelligent manufacturing. Based on the characteristics and development trend of intelligent manufacturing, the development trend of aircraft manufacturing technology in intelligent aspect is prospected, the important position of measurement in aircraft manufacturing process and the existing problems of current measurement task management are analyzed. Based on the idea of aircraft manufacturing BOM, the concept of building measuring BOM in aircraft assembly is proposed. And the construction idea of measuring BOM is analyzed, and the significance of the construction of measuring BOM is explained.

Keywords: Intelligent manufacturing; Aircraft manufacturing; Measurement; BOM structure; Material BOM; Measurement BOM

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.23/24.072

信息技术同制造业的融合与应用促进了制造业的变革,为应对这场变革,世界各国纷纷提出先进制造发展战略,以促进本国制造业的转型升级^[1-2]。自2011年以来,美国提出“工业互联网”战略规划,中国提出《中国制造2025规划》,德国提出工业4.0发展规划,日本提出“机器人新战略”,都把工业制造的发展方向定位到以工业互联网为基础的智能发展方向。智能制造技术是以一种高度柔性 with 高度集成的方式,通过计算机来模拟人类专家的制造智能活动,对制造问题进行分析、判断、推理、构思和决策,旨在取代或延伸制造环境中人的部

分脑力劳动,并对人类专家的制造智能进行收集、存贮、完善、共享、继承和发展^[3]。智能制造的基础是工业互联网,具有“状态感知、实时分析、自主决策、精准执行、学习提升”的特征。其中“状态感知”是实现智能的重要途径,其基础是“测量”,这不仅仅是狭义上“几何量”测量,而是包括几何量测量、物理量测量以及产品性能、功能等模态量测量的广义上的测量,其实现的方式除了传统的光学仪器(如激光跟踪仪、激光雷达、GPS等),更广泛的是基于各种传感器的工业设备。以智能手机为例,通过其内置的各种传感器来扩展其智能,其内置的传感器越多,手机的感知能力就越强,可以开发的应用就越多。

以飞机制造为代表的航空制造业是国家工业的尖

* 基金项目:国家重点研发计划专项(2019YFB1707500)。

端产业,具有技术密集度高、产业关联范围广、辐射带动效应大等特点,是国家工业发展、科技能力以及国防水平的重要标志和综合体现^[4]。所以,作为工业制造最复杂、技术集成度最高的行业,飞机制造行业也在紧随制造技术的发展,持续开展技术发展研究。当前,飞机数字化装配技术得到了广泛的应用和发展,其技术应用日趋成熟,为智能制造技术的研究和发展奠定了基础,智能装配技术必将成为飞机装配技术发展的趋势。波音、洛克希德·马丁等世界先进航空制造企业实施新的战略规划时,都高度重视智能制造技术的研究与应用,认为其代表了航空工业未来的发展方向^[5]。

在飞机等大型装备的生产制造过程中,装配过程耗时长,装配任务繁重,装配精度要求高,装配质量的好坏极大地影响着最终产品性能,如飞机气动外形和结构强度很大程度上都取决于装配精度,所以小至飞机零件的制造,大至飞机整体总装,使用高精度的测量方法保证高质量的装配显得尤为重要。而随着基于飞机MBD模型数字化制造的发展,以及能实现多种测量任务的测量设备性能的提升,对于飞机制造过程中测量任务管理包含从方案设计、测量实施再至测量数据处理变得更加复杂。目前飞机制造过程中测量任务管理所面临的困难有以下4点。

(1)测量任务的增多。随着民航客机以及军用战机的的发展,对于飞机安全性能和制造精度要求都有所提高,因此在飞机制造过程中的测量任务也逐渐增多。为了保证整个制造过程中已获取的测量数据在整机装配测量过程中规范性传递,需要实现多厂房多级多环节测量任务的整合与联通。

(2)测量要求的提高。由于装配质量要求的提高,对于测量的要求也朝着高精度、自动化、集成化趋势发展。高精度不要求从硬件层面提高仪器的测量精度,还要求从测量场的布局、算法处理方面降低测量的不确定度。自动化指减少人工操作量,将实施测量方案进行系统规划提高测量效率。测量的集成化指在飞机整个制造过程中各个部门产生的测量结果需要有充分的信息交流,保证测量信息的统一集成。

(3)测量手段增加。目前三维激光扫描仪、激光跟踪仪、数字化拍摄测量等多种数字化测量手段已经逐步取代传统的模板样条的测量方法,而且测量已经不仅限于几何量的测量,还包括物理量(如变形测量、损伤探测等)以及性能功能测试(如管路系统密封性检测、综合航电系统集成测试等),需要对测量信息进行统一,规范化的测量结果便于工艺人员读取和评估。

(4)在线实时测量。除了测量硬件的发展,对于测量结果数据处理的软件系统也在飞速发展。目前提出

的基于MBD模型的飞机数字化装配流程中将需要实施的测量任务和获得的测量结果全部挂载至飞机设计阶段已有的MBD模型上,因此需要及时回传获得的测量数据并及时进行更新,实现测量过程的快速响应的实时性和高效性。

针对以上飞机装配测量过程中面临的困难,国内外目前都没有提出较为系统的测量任务与数据管理解决方案,随着飞机性能的提升,对于制造和检测的要求越来越高,造成针对飞机制造过程中测量任务管理愈加困难,本文借鉴飞机制造物料管理BOM(Bill of Material)的思路,提出面向飞机制造测量管理的M-BOM(Measure-Bill of Material)设计与管理方案,实现整机制造过程中每个环节测量任务的执行以及测量数据的有序分配与整合,在M-MBOM阶段生成测量大纲,使管理测量任务更加清晰,测量流程更加清楚,测量方法更加具体,提高测量过程的可靠性,确保测量结果的真实可靠,测量数据具有可追溯性,使测量数据沿着建立的BOM层级树进行回溯,实现装配过程与测量过程的统一。

1 M-BOM 架构设计

本文提出的M-BOM概念与上述BOM在本质上存在不同,但二者有一定的关联关系。主要表现在以下4个方面。

(1)M-BOM借鉴了BOM管理的思路,在产品的全生命周期中开展M-BOM管理,实现测量任务(物流)与测量信息(信息流)的集成、传递和统一,作为产品全生命周期管理的一个重要支撑。

(2)M-BOM和BOM的传递路径是一致的,均以工程设计为输入,沿着工艺(P)一制造(M)一生产(O)一交付(D)一客服(S)的路径进行传递,在不同的环节被赋予不同的属性,对飞机全生命周期不同环节的物料和品质进行管理。

(3)M-BOM挂载节点从属于BOM,M-BOM表征的是产品的品质,产品是由物料组成的。所以,从本质上来讲,M-BOM表征物料的品质。可以将M-BOM作为BOM在材料、名称、版次、文件信息(子件信息)等属性之外的一种特殊属性。所以,可以将M-BOM挂载在相应的BOM节点上进行管理。

(4)M-BOM和BOM实现的方式是一致的。均需要通过工艺设计,规划一定的流程和方法,在生产制造环节中予以实现。所以,最终生成的装配大纲(AO)和测量大纲(MO)从本质上是相同的,都是规定做什么、怎么做的内容。所以,可以认为MO是AO的一部分,可以在同一阶段、同一工艺设计系统中进行工艺设计,

在产品制造过程中予以实现。

可以说, BOM 管理的是物料, 是有形的资源, M-BOM 管理的是任务, 是无形的资源, M-BOM 是 BOM 的属性之一, 二者共同存在于产品全寿命周期之中, 具有相似管理流程和管理架构, 其相互关联关系如图 1 所示。

1.1 制造物料BOM

BOM 数据既用来描述产品的物料组成及其产成品的物料之间关系, 也用来表示产品的说明书、产品包装、零部件的相关文档、质量标准等其他信息。在制造业中, BOM 是核心的基础数据, 是产品数字化定义的重要内容, 是连接产品工程设计和生产经营管理的桥梁。

制造物料 BOM 管理从本质上是对产品制造物料数据的管理。产品制造物料数据是指产品在研发、制造、售后服务等全生命周期不同阶段产生及应用的所有数据, 是制造企业生产组织和管理的核心资源。BOM 在产品数字化设计和制造过程中已经成为一项基础性的数据管理和组织技术, 最早应用于产品的设计数据管理, 之后扩展到制造领域^[6]。BOM 主要包含设计 BOM (Engineering BOM, EBOM)、工艺 BOM (Process BOM, PBOM)、制造 BOM (Manufacturing BOM, MBOM)、生产 BOM (Order BOM, OBOM)、交付 BOM (Delivery BOM, DBOM)、客服服务 BOM (Service BOM, SBOM) 等, 各层次 BOM 依赖于上一层次的 BOM, 互相参照, 独立地存在于企业的 PLM 信息系统中。数据发生变更时, BOM 均通过串行的方式实现变更。飞机制造过程中, BOM 是工厂重要的产品信息载体, 完成各部门

的信息传递与共享, 贯穿于产品设计、工艺设计和产品制造、产品交付和售后服务的全过程。设计部门产生的 EBOM 是反映产品功能的设计结构, 不能直接指导飞机生产制造, 因此 EBOM 必须经过转换, 才能指导飞机实际生产^[7], 这就是 BOM 传递与转换的源动力。相较于传统的信息交互模式, 使用 BOM 这一单一主线来对生产各环节进行管理, 通过 BOM 这一数据源实现生产各环节之间的信息及时交互, 提高了信息交互的时效性和效率^[8]。

以 BOM 为核心, 实现对工程数据集、工艺数据集、检验数据集、工艺规程、零件供应状态表、指令性交接状态表等各类制造数据按架次有效性集成化、结构化发布、管理, 保证了生产现场单一数据源有效共享, 生产现场利用集成化的数据包和可视化的轻量化模型技术进行零件的制造、检验和装配, BOM 的进化路径如图 2 所示。

1.2 测量M-BOM

本文参考飞机装配 BOM 的结构建立了测量 BOM (M-BOM), 所不同的是, BOM 是对制造物料的管理, M-BOM 是对测量任务的管理。M-BOM 是一种定义测量任务结构的技术文件, 同时也是一种管理文件, 成为联系飞机模型设计到各车间实现装配大纲之间所有必须测量信息数据的载体。M-BOM 将测量任务的分配挂载在装配 BOM 下, 其结构进化路径与装配 BOM 一样, 形成 M-EBOM → M-PBOM → M-MBOM 的测量任务管理模式, 如图 3 所示。

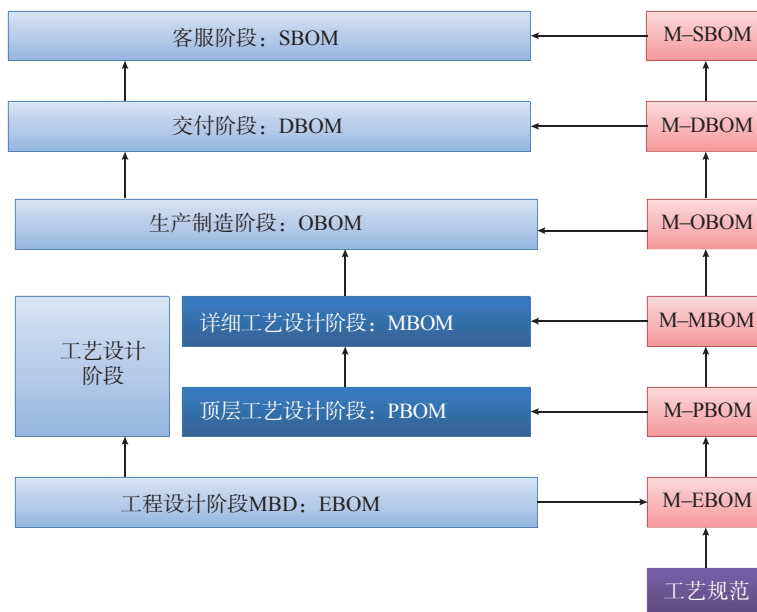


图1 M-BOM与BOM的关联关系

Fig.1 Relationship between M-BOM and BOM

1.3 M-BOM架构

综上所述,可以参考 BOM 建立的思路,构建相应各层级的 M-BOM。M-BOM 可以划分多个层级和阶

段,每个层级之间具有关联性,每个阶段被赋予不同的属性,且如同 BOM 一样,基于唯一数据源,其数据属性如表 1 所示。

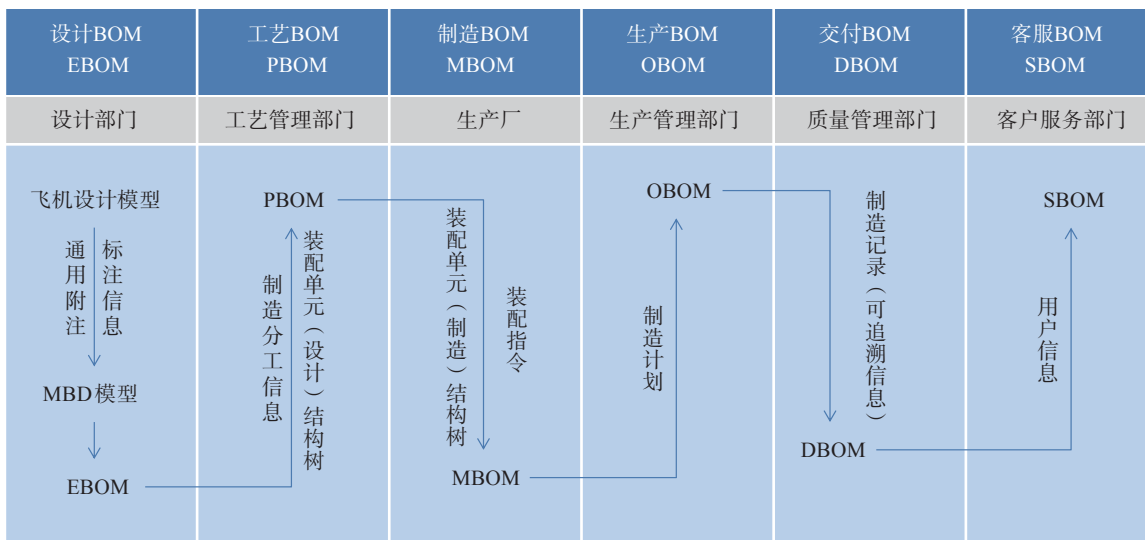


图2 BOM的进化路径

Fig.2 Evolution path of BOM

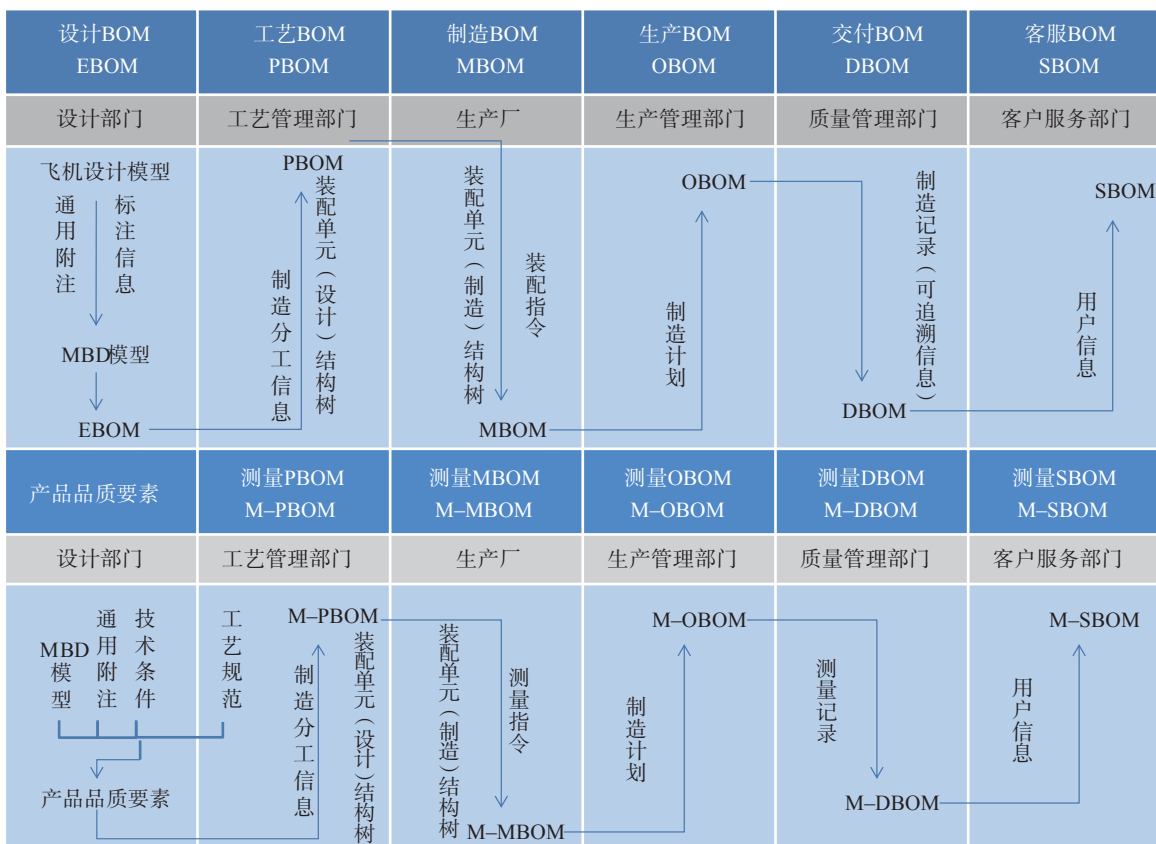


图3 M-BOM进化路径

Fig.3 Evolution path of M-BOM

综上, M-BOM 的架构可参考 BOM 的架构,采用树式结构设计,如图 2 和图 3 所示,根据飞机装配过程中工艺分离面的划分产生不同的节点,再根据装配零部件的组成作进一步的节点细化,每个节点下都关联当前所需的测量任务信息,实现装配任务与所需测量任务对应的关系,并最终生成装配大纲(AO)和测量大纲

(MO),方便工艺人员按照计划流程进行实际测量任务操作,同时对测量数据进行装配标准核实,如图 4 所示。

1.4 M-BOM管理

M-BOM 管理是基于其流程和架构的管理。M-BOM 同 BOM 一样,都是基于唯一统一的数据源的数据结构,其管理的核心是数据管理。在产品的全生

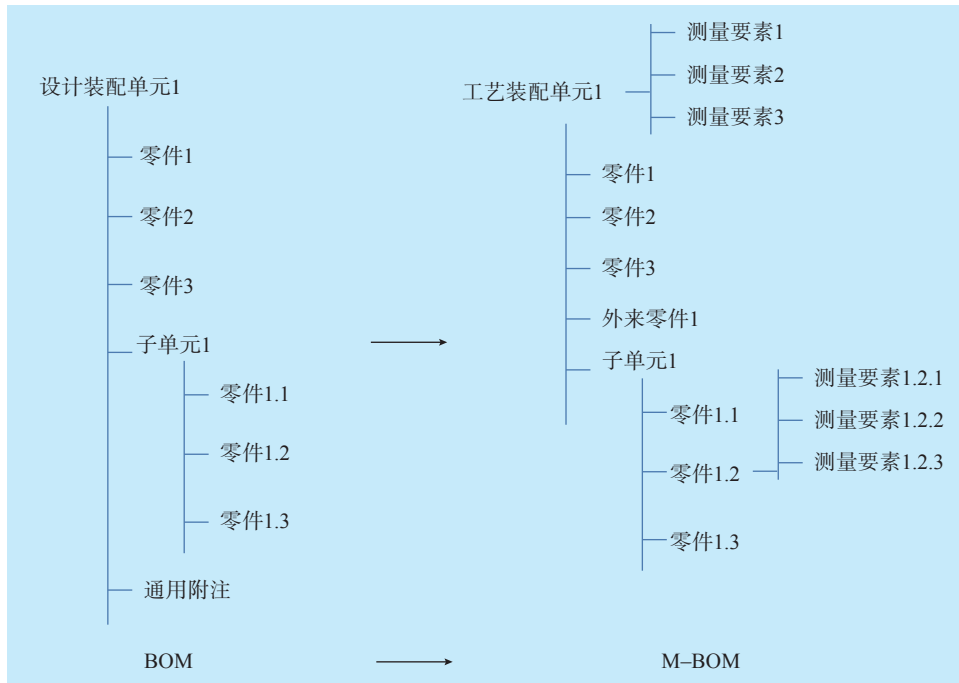


图4 M-BOM树形结构
Fig.4 Tree structure of M-BOM

表1 M-BOM数据属性
Table 1 Data properties of M-BOM

产品品质要素	测量 PBOM M-PBOM	测量 MBOM M-MBOM	测量 OBOM M-OBOM	测量 DBOM M-DBOM	测量 SBOM M-SBOM
品质要素 1	品质要素 1+ 制造分工信息	M-PBOM+ 单元结构树 (工艺)+ 测量指令	M-MBOM+ 制造计划	M-OBOM+ 测量记录	M-DBOM+ 用户信息
品质要素 2	品质要素 2+ 制造分工信息	M-PBOM+ 单元结构树 (工艺)+ 测量指令	M-MBOM+ 制造计划	M-OBOM+ 测量记录	M-DBOM+ 用户信息
品质要素 3	品质要素 3+ 制造分工信息	M-PBOM+ 单元结构树 (工艺)+ 测量指令	M-MBOM+ 制造计划	M-OBOM+ 测量记录	M-DBOM+ 用户信息
品质要素 4	品质要素 4+ 制造分工信息	M-PBOM+ 单元结构树 (工艺)+ 测量指令	M-MBOM+ 制造计划	M-OBOM+ 测量记录	M-DBOM+ 用户信息
品质要素 5	品质要素 5+ 制造分工信息	M-PBOM+ 单元结构树 (工艺)+ 测量指令	M-MBOM+ 制造计划	M-OBOM+ 测量记录	M-DBOM+ 用户信息
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
品质要素 n	品质要素 n+ 制造分工信息	M-PBOM+ 单元结构树 (工艺)+ 测量指令	M-MBOM+ 制造计划	M-OBOM+ 测量记录	M-DBOM+ 用户信息

命周期内, M-BOM管理伴随数据的产生、使用、流转、消亡全过程, 本文从以下几方面对 M-BOM 的管理进行论述。

1.4.1 测量任务建立

根据装配任务的划分, 创建测量 BOM 结构层级树, 测量设计人员根据产品设计师提供的三维模型, 分析产品的检测要求, 结合企业测量场地、设备条件及相应的工艺规范, 进行结构层级树的建立。在测量任务层级树节点中都关联了相关测量任务信息包括: 任务名称、任务类型、任务说明、算法选择、相关元素等, 形成一套完整的测量方案后, 进行方案测量的不确定度的评估, 然后将方案以测量大纲的形式传递给相应测量人员, 最终到产品的装配质量与评估报告, 并及时更新测量结果的节点数据, 测量流程如图 5 所示。

1.4.2 测量任务的消耗

因为飞机零件数量庞大, 装配任务繁重, 所需的测量要求进一步提高, 为满足飞机装配过程中所有测量需求, 避免测量人员的少测或多测, 且由于 M-BOM 是挂载在 BOM 的节点之下的, 表征了 BOM 的一种属性, 所以, 在 BOM 的消耗过程中, 也就实现了 M-BOM 的消耗, 每份测量大纲对应测量 M-BOM 结构树的每个测量任务, 最终所有的测量大纲实现所有测量任务的消耗。

1.4.3 测量任务的查询

传统的飞机制造过程中的测量方案以二维示意图与文档相结合的方式指导测量人员实施操作, 采用了基于

整机 MBD 模型, 使三维测量信息在 M-BOM 结构树表达形式更加清晰, 有关测量数据都挂载至相应测量任务节点下, 查询时只需读取该节点下所有测量任务即可, 并且该数据格式能被计算机和人识别, 测量数据能够实现自动保存。由于以 BOM 结构树的形式呈现相关测量信息, 对于父节点到子节点的测量流程也变得更加清晰, 可以实现整个测量任务和测量数据的查询。

1.4.4 统计汇总管理

基于数据库的测量任务管理系统可以实现对于测量任务的统计和汇总。这些信息主要包括测量大纲索引、测量设备管理、测量方案库索引、测量结果数据管理等。这些信息可以按车间、按机型、按用户进行统计汇总, 而统计汇总数据都是 ERP 进行测量准备和成本核算的基础数据。

2 测量 M-BOM 的应用

未来产品, 质量致胜。智能制造的根本目的也是通过过程控制实现产品质量的可防可控。这个防控的过程就是通过“测量”实现制造过程的在线和再现。在引入 M-BOM 的概念后, 对测量任务进行结构化管理, 涵盖测量数据采集、测量业务管理、测量数据分析, 以及测量数据应用等各方面, 贯穿从设计、制造、检测、分析控制的产品全生命周期, 覆盖从供应商质量、来料检验、制造过程、产品验收、售后服务的全业务过程的质量管理。其主要任务是通过质量数据的提取、整理、展示与分析,

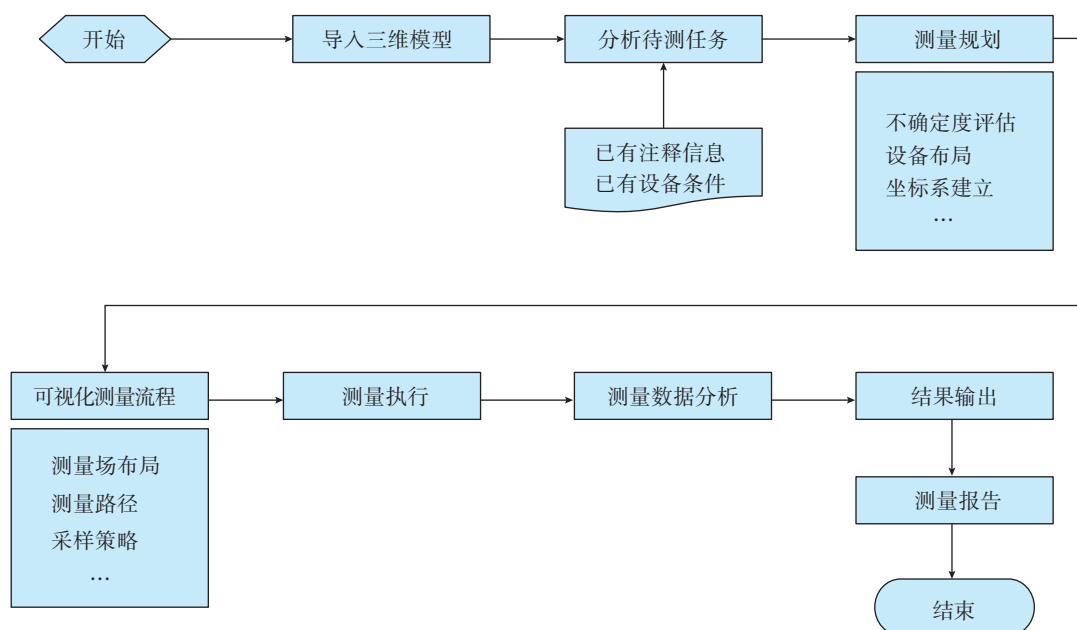


图5 测量流程

Fig.5 Measurement process

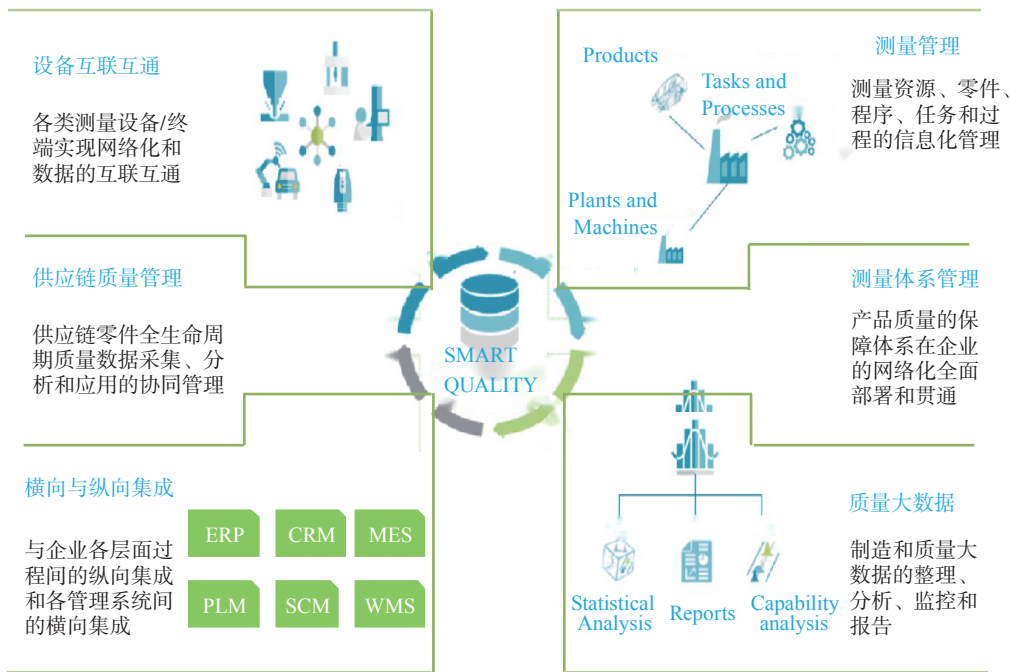


图6 海克斯康智能质量管理体系
Fig.6 HEXAGON intelligent quality management system

将质量的质量数据转化为真正的知识,从而为客户提供高效、准确的行动与决策,以实现质量驱动生产力。海克斯康智能质量管理体系(QMS)就是基于M-BOM的思想进行构建,它立足于质量,主旨是实现以质量为核心的智能制造,是智能工厂建设中的重要一环,如图6所示。

本文就M-BOM在产品制造过程和质量中的应用进行分析论述。

2.1 测量任务管理

M-BOM构建的主要目的就是要实现测量任务的管理。测量任务管理的内容包括测量规划、测量实施和测量数据管理3个阶段,可采用信息化的手段,构建MMS(测量管理系统)进行管理。

(1)测量规划。基于型号工程设计和工艺规范,承接基于MBD的检测信息,实现设计基准、尺寸公差等质量控制指标的无缝传递。质量策划阶段,是M-BOM构建的起始阶段,依据EBOM结构,构建M-BOM结构,通过信息化的手段,实现MMS(测量管理系统)与PLM(产品生命周期管理系统)的集成,可以进行数据的交互与共享。

(2)测量实施。基于M-PBOM建立测量任务树,与MES系统对接,实现任务的分配与跟踪,形成M-

MBOM,是测量任务细化到不同的工艺环节,在生产制造阶段的计划分解,形成计划执行的M-OBOM,在生产执行后,将执行结果反馈到MES系统,即形成M-DBOM,继而形成客服M-SBOM。在这一系列过程中,MMS系统与MES系统交互,MMS系统可作为MES系统的一个模块执行测量任务。

(3)测量数据管理。在不同测量方案的实施过程中获得测量过程中最原始的过程数据,如点云数据或摄影测量拍摄的图片,将这些数据以特定文件格式保存,并将文件添加到测量BOM节点中,在进行装配质量检测时,审核人员可以读取这些测量过程数据,确保测量数据的真实可靠性。

将测量获得的过程数据进行数据处理和算法调用拟合,即可得到测量结果数据和测量不确定度统计,然后快速生成测量报告,将该测量报告并入测量大纲中进行提交反馈,工艺审查人员通过直接审阅测量大纲节点下的测量报告可对当前装配任务质量做分析与评估。

测量BOM层级树的建立实现了测量数据在构建的层级树间、装配任务间、装配车间的流通。测量数据的流通方式主要分为传递和继承。测量数据的传递指将测量BOM中子节点的测量结果直接用于父节点中

的装配与测量,在子节点中已获得的测量结果基础上,确保在一定容差范围内进行父节点的装配任务。测量数据的继承是指在基于子节点的测量结果上完成父节点的装配任务后对形成的组装件进行复测,若复测结果满足审核要求或者满足工艺变更的预判则继续进行测量数据的继承,若结果超出要求,进行组合件的装配调整,使其最终复测信息满足装配要求。

2.2 飞机产品质量分析

武器装备的寿命一般是指影响使用期、库存或放置期的疲劳特性、耐久性、耐腐蚀性或耐环境适应的特性。航空武器装备自身的特殊性以及对国防事业的重要性决定了要对武器装备进行全面管理,特别是质量管理。

通过获得的测量过程数据与测量结果数据可以实现飞机装配过程的监测,从以下两点进行装配质量分析。

(1) 质量问题回溯。测量 BOM 结构树清晰地呈现测量流程的路径,实现了测量过程层级树的递归执行。首先测量操作流程有先后顺序,通常情况下不会颠倒测量顺序;其次测量操作步骤与拟合计算步骤之间具有父子联系,兄弟联系;测量步骤包含详细的文字描述信息,包含有算法信息、几何元素构造信息、测量过程数据、测量结果数据等。测量 BOM 层级树对测量过程清晰地划分,以及文字补充描述信息,方便进行飞机制造装配过程中质量问题回溯。当测量结果全部完成并生成测量报告后,传输给质保部门进行审核校对,如发现不符合要求的测量结果,对测量 BOM 层级树回溯,并映射至装配 BOM,很快锁定装配误差处。

(2) 工艺变更预判。由于装配过程中无法保证所有装配工序都一步到位达到指标,测量 BOM 的提出可以实现工艺变更的预判断,同时提高了装配效率,减少了装配过程中物料的浪费。审核人员通过测量 BOM 生成的数据实现装配过程的预判断,如在子节点的测量环节中出现了测量结果超出了设计要求,此时子节点隶属的父节点根据该子节点的测量过程数据以及测量结果数据进行预判断该误差值是否满足父节点下的装配要求,如果误差造成的装配影响在一定范围内可以考虑,继续进行装配,否则进行该误差子节点的装配调整,直到预判合格为止。

3 结论

本文论述了飞机制造过程中所需要的测量任务的特点,建立了 M-BOM 层级树,实现飞机整个制造装配过程测量任务的有效管理,最终生成包含测量结果数据的测量大纲可有效实现飞机装配质量的分析,使企业实

现测量任务系统管理,提高了工作效率、工艺设计的质量,为企业带来可观的效益。同时应当明确,随着测量设备性能的提高,测量手段的丰富,针对测量任务如何有序高效地进行规划仍需进一步的探索。

参考文献

- [1] 隋少春,牟文平,龚清洪,等. 数字化车间及航空智能制造实践[J]. 航空制造技术, 2017, 60(7): 46-50.
SUI Shaochun, MOU Wenping, GONG Qinghong, et al. Digital workshop and intelligent manufacturing practices[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(7): 46-50.
- [2] TAO F, QI Q L. New IT driven service-oriented smart manufacturing: framework and characteristics[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(1): 81-91.
- [3] 符刚,肖庆东,荆道艳,等. 智能制造技术在飞机部件数字化装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2014, 57(S1): 5-8, 15.
FU Gang, XIAO Qingdong, JING Daoyan, et al. Application of intelligent manufacturing technology in aircraft part digital assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(S1): 5-8, 15.
- [4] 宋利康,郑堂介,黄少华,等. 飞机装配智能制造体系构建及关键技术[J]. 航空制造技术, 2015, 58(13): 40-45, 50.
SONG Likang, ZHENG Tangjie, HUANG Shaohua, et al. Aircraft intelligent assembly manufacture system construction and its key technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(13): 40-45, 50.
- [5] 李西宁,蒋博,支劭伟,等. 飞机智能装配单元构建技术研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(1): 62-67.
LI Xining, JIANG Bo, ZHI Shaowei, et al. Construction technology of intelligent assembly unit for aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(1): 62-67.
- [6] 常智勇,赵杰,莫蓉. 复杂产品装配执行过程数字化技术研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(5): 564-569.
CHANG Zhiyong, ZHAO Jie, MO Rong. Research on digital technology of complex product assembly execution process[J]. Journal of Nanjing university of Aeronautics and Astronautics, 2009, 41(5): 564-569.
- [7] 张尚安. 基于 MBD 的飞机三维装配工艺设计与仿真技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
ZHANG Shang'an. Research on aircraft 3D assembly process design and simulation technology based on MBD[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [8] 张耀光,宫宇,刑利君. PDM 集成技术在航空制造企业中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2017(4): 5-6.
ZHANG Yaoguang, GONG Yu, XING Lijun. Application of PDM integrated technology in aviation manufacturing enterprises[J]. China New Technology and New Products, 2017(4): 5-6.

通讯作者: 梁青霄,研究员级高工,主要研究方向为飞机部件装配工艺规划和工艺设计、飞机部件数字装配技术、飞机装配生产线规划、智能制造、工业工程、精益六西格玛等, E-mail: lqxia@163.com。

(责编 古京)