



装配制造数字化研究综述^{*}

Research on Digital Assembly Manufacturing

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 常智勇 赵杰 王社伟 孙惠斌 莫蓉



常智勇

博士、副教授。1997年毕业于西北工业大学航空宇航制造专业,同年留校任教。多年从事CAD、CAGD、PDM、飞机和航空发动机数字化制造等技术研究。主持和参与多项国家863高技术研究、国家自然科学基金等科研项目研究。发表论文40余篇。参编出版专著和教材3部。

装配制造是产品制造的最后一个环节,也是最为重要的环节之一。采用数字化技术对它进行支持和改造,可以大幅度提高产品质量,缩短上市周期,提升产品在生命周期中的服役水平。

装配是产品生命周期的重要组成部分,是实现产品功能的主要制造过程^[1]。相关研究表明,产品生产过程中大约三分之一的人力在从事与产品装配有关的活动,装配成本占到整个产品制造成本的40%~50%^[2]。在产品设计方案和既定的产品零件机械加工水平条件下,装配方案设计的优劣和装配操作执行的质量对产品质量有着重大影响。装配过程占用的手工劳动量大、费用高,因此,提高装配生产率带来的经济效益将会非常显著^[3]。在航空产品(例如飞机、发动机等)的装配制造中,装配成本

占总成本的40%,装配工作占到全机生产工作的一半以上^[4]。采用数字化手段来改造传统的制造方式,提高产品制造效率和质量,是先进制造技术的重要发展方向之一,也是目前的研究热点。

具体到装配环节的数字化,可以分为装配设计的数字化和装配制造执行的数字化两个方面;作者分别将其称之为数字化装配设计(Digital Assembly Design, DAD)和装配制造数字化(Assembly Manufacturing Digital, AMD)。

在数字化装配设计应用方面,

^{*} 国家863项目(2007AA04Z184)、航空基金(05H53080)、2008年陕西省科技攻关计划资助。

常见的技术研究包括:面向装配的设计(Design For Assembly, DFA)^[3]、计算机辅助装配顺序规划(Computer Aided Assembly Planning, CAAP)、柔性装配系统(Flexible Assembly System, FAS)和虚拟装配技术^[5]等。这些研究通过建立产品装配模型,采用各种智能的或基于知识的算法,以全自动方式或者部分人工干预的手段,规划出合适的装配顺序和装配路径,进行装配公差带的合理分配,并有效地预防装配干涉,同时提高装配执行的可操作性和人机功效。

与数字化装配设计不同,装配制造数字化的研究目的主要定位在如何采用数字化的手段和工具来改善和提高装配执行现场的生产组织控制能力、质量控制能力、生产组织效率等方面。近年来,国内外的众多学者对此进行了广泛的研究。本文将这些研究成果分为几大类型进行调研和综述,并对这些技术在航空产品装配制造中的应用进行了分析。

装配工艺的三维化和现场引导

传统的装配工艺,无论是否采用计算机辅助工艺规划(Computer Aided Process Planning, CAPP)系统进行工艺设计和管理,都主要以自然语言文字来描述装配工艺中的工序、工步和子工步等,同时辅之以二维装配工程简图进行图示化的说明。随着三维CAD系统在企业中应用的深入开展,在三维模式下进行装配工艺规划已经具备了基础条件。三维装配工艺的优点体现在可以更加直观地反映装配顺序和装配路径,能够大幅度减少装配环节中经常出现的错装和漏装现象,提高产品质量。产品设计方案给出的是产品整机和零部件的最终状态,而零部件从毛坯变化到最终状态需要经历一系列的中间状态。如果在机加环节中

应用三维工艺规划,则需要构造这一系列中间状态的几何模型,这些建模工作量非常巨大,以至于直接影响到了三维工艺规划的实际应用。而装配工艺规划中所涉及到的产品三维模型与产品设计模型是一致的,无需额外的建模工作。因此,在装配环节采用三维工艺规划更具可行性。

同时,基于上述三维的装配工艺规划,在轻量化显示工具的支持下,可以将三维装配工艺发布到装配执行现场,从而大幅度提高装配工艺的可理解性和指导性。也可以作为新装配工培训有力的辅助手段。

文献[6]以HOOPS作为轻量化显示工具,进行三维装配顺序和装配

导装配现场。文献[9]采用半沉浸式虚拟装配手段,进行线缆和管路动态布局、公差带建模和装配精度预分析;并采用包含了工艺内容、产品模型、配套信息、零件质量和检测参数等信息的集成化装配工艺,来指导装配现场的实际生产和检验。文献[10]采用交互式规划方法进行序列规划,并通过对关键帧进行线性插值的方式构造完整装配过程动画。文献[11]则研究了如何组织和显示极大数据量的装配模型,通过构造一个层次化动态数据仓库以及构建模型装配运动的变换矩阵,可以在常规的计算机硬件环境下实现可以接受的装配过程显示。



路径制作,将三维动态化模型关联到装配工艺的工步一级,实现了装配工步级别的动态仿真和现场展示。文献[7]提出了基于CAD系统中的“装配设计”功能进行飞机装配工序设计的方法,其特点在于从交互式预装配模型中提取装配工序信息,并将工序的三维仿真动态信息关联到工序信息模型中。文献[8]在Pro/E平台下,针对软件现有功能只关心装配位置结果而没有中间运动过程的缺点,采用位姿矩阵变换和Toolkit二次开发,实现了装配中间位姿信息的制定,并将其以动画帧的形式输出,可以验证装配工艺的合理性,用来指

在我国航空企业中,信息化建设基础比较好的企业大都已经应用了CAPP系统进行工艺的编制和管理。但这些应用主要集中在机加、钣金和热表处理等制造部门,而三维装配工艺,在电子产品、汽车等行业已经进行了初步研究和应用,但在航空制造领域鲜有报道^[12-13]。笔者认为,在航空制造部门开展装配工艺研究,应针对航空产品装配零件复杂、数量庞大、柔性件多、精确定位困难的特点,充分发挥三维技术的优势,在三维可视化装配工艺引导、具有现场沉浸感的装配虚拟现实、三维空间定位技术等方面进行研究,以改变我国航

空装配技术手段落后的现状。

装配质量控制

装配制造是产品交付前的最后,也是最为重要的制造环节。装配的质量直接影响着产品最终的质量。除了装配制造环节本身的质量问题之外,在装配制造环节上游(如机加)等过程中出现的各种问题(如超差等)也需要在装配制造环节进行解决。

由于装配制造过程的复杂性,错装、漏装等失误经常发生。为提高装配质量水平,需要对装配质量缺陷进行预测。可以通过对现场装配失误的分析,建立与工艺复杂性、设计复杂性的关联关系,从而实现装配质量事故的统计预测^[14],也可以基于粗糙集理论实现装配故障的诊断、学习,提高装配质量^[15]。另一种方法是基于装配过程中的数据,进行主分量分析和聚类分析,对装配质量进行评估,改善生产和装配过程的监控手段,提高生产效率。

在装配制造现场经常出现的一个质量问题是配合件之间的配合误差不能满足设计要求。其主要原因在于:

(1) 为了降低产品制造成本,设计部门给出了较低的公差要求;

(2) 公差设计时没有考虑形位公差;

(3) 机加部门为了降低损失风险,采用“最大实体原则”进行加工。解决此问题的有效方法是进行关键重要零件的优选配合。文献[16]对于结构复杂、装配尺寸精度要求高的产品装配,研究最优选配,基于封闭环对装配尺寸的影响程度,提出行法、主次法和底层优先法等3种有利于复杂装配优化选配的方法。文献[17-19]研究采用遗传模拟退火优化算法求解基于多装配尺寸链的计算机辅助选择装配问题,以产品装配尽量靠近“中差”为原则,提高批产产

品的质量一致性和单件产品的性能。

对于复杂重要产品,一般都会在装配环节记录其质量信息(以履历本或质控卡的形式)。文献[20]研究了采用通用的建模方式,将信息表格分为模板、页面、网格、列等4种基本元素,为用户提供能够描述各种履历信息表格的工具,从而实现履历信息的结构化建模和存储,为装配现场质量控制和后续的产品服役、维修提供参考。同时也建立结构化工序信息与检验信息的关联关系,从而实现严格的装配质量检验,也为装配质量检验信息的统计、分析和质量趋势预测提供依据。

以航空发动机为例分析。发动机进入总装现场之后,质保部门会制作一个履历本,将装配之前各采购和制造环节所产生的各零部件的质量合格证、重要加工纪录的信息归入履历本。同时,在装配操作过程中记录的各项检验信息、试验信息等也归入履历本管理。在进行试车后分解排故时,这些增加了试车记录的履历信息作为重要的参考来支持排故,在排故过程中产生的补充加工卡、零部件调换清单等也要记录在履历本中。同样,在发动机外厂服役过程中产生的质量相关信息也要合并到履历本中。履历本作为发动机生命周期中的重要信息载体,一直伴随到发动机的服役中止。文献[21]提出了一个装配数字化系统(Assembly Digital System, ADS)解决方案,可以在装配现场进行三维工艺的可视化引导,将检验信息结构化存储并与操作工序进行关联,以实现实时质量控制,将履历本信息进行电子化存储以支持快速检索和质量分析。

装配调度和混线生产平衡控制

装配生产线规划是大批量生产的保证,其生产效率至关重要。对于航空产品的装配制造,在装配现场会

出现多个型号并行生产,批生产与预研并行生产,并且共享同一套制造资源(如装配班组、大型型架、高速动平衡机等)的现象,是典型的多产品的混流装配线。

采用基于遗传算法^[22]、基于贪婪算法^[23]、基于多目标的混合蛙跳算法^[24]、基于蚂蚁算法^[25]等优化方法,设计装配顺序,使得生产最优化,保证生产线能力平衡,来指导装配车间调度。文献[26]采用启发式调度算法,解决了基于团队协作工作的或面向需求变化的混流装配线优化问题。文献[27]提出以减少未完成工作为目标,采用基于分支和跳跃的局部搜索算法,对传送带物料配送的装配生产线规划进行了优化。文献[28]采用隐性知识获取方法,支持在装配生产线上进行缺陷管理决策。”针对多产品的混装流水线,构建基于最小工作量、最小生产率变化、最小费用的多目标优化方案,设计分散搜索算法,求出局部帕累托最优解^[29]。对于以工作台为中心的批量产品装配规划问题,可以根据装配树确定的装配关系、工作空间的容量、装配时间等约束,建立赋时Petri网,优化装配任务规划和装配完成时间^[30]。

由于产品装配模型的复杂性,混线装配生产线的平衡问题是装配线规划中的重要问题,文献[31]研究在工作站固定的情况下,平衡装配线,通过软件进行仿真;对于装配任务,采用基于延时Petri网(TTPN)的装配过程仿真与基于遗传算法(GA)的优化相结合的任务分配方法是可行的。文献[32]针对复杂的装配任务,特别是子装配体零件数目过多的情况,定义关键零件和分解规则,然后根据工作量进行分配。文献[33]提出一种基于贝叶斯进化算法的优化方法,解决复杂混流装配线调度的问题。文献[34]将层次时间着色Petri网(Hybrid Timed Colored Petri Net, HTCPN)用于

装配过程的建模与分析。

基于 RFID 的装配调度和物料管理

近年来,无线射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术在制造工程中的应用成为研究热点^[35-37]。而在装配制造环节,由于物料种类庞杂,标示和跟踪困难,RFID技术的应用是一个很好的解决方案,可提升生产过程管理与控制水平,有效地跟踪、管理和控制生产所需的、包括物料、设备、人员在内的所有工厂资源;可以解决传统条码标示所引起的漏、误扫描,介质易损



坏,使用周期短和成本高等问题。主要包括构建具有动态调度功能的零部件跟踪和配送系统,解决混线装配的物料标示和配送^[38-39];进行自动化装配信息采集、WIP跟踪、流程信息记录^[40];RFID标签的回收和闭环使用,射频标签与条码技术的兼容使用等问题^[41]。

在应用RFID的基础上,可将装配操作所涉及到的零部件视为具有计算能力、可以参与企业运行业务信息流的“智能物料”^[42],从而为精确掌握企业瞬时运行状况,实现“实时企业”(Real Time Enterprise, RTE)^[43]奠定基础。

当然,对于航空产品装配制造而言,虽然RFID具有上述优势,但由于产品零部件数量庞大、不可能在所

有的零部件上都应用RFID标签,比较好的解决方法是在关键、重要的零件上进行部分应用,实现关重件的服役全生命周期跟踪;而且,由于军工企业的保密制度要求,发射无线射频信号的标签和读写器存在信息泄露的风险,在真正应用到航空制造企业之前还需要加强防电磁泄露和无线信息加密传输等技术的研究。

基于装配的 MRO 技术

MRO (Maintenance, Repair and Overhaul) 是伴随着飞机的诞生而产生的。目的是为了保证航空器的持续适航所进行的全部技术措施和管理活动^[44]。如何利用先进的信息化手段来提高管理水平、保证维修质量、降低维修成本,一直都是MRO维修企业乃至整个航空制造业越来越关注的问题。随着MRO理念和技术的应用发展,在不同于航空产品的其他复杂重要产品中(例如大型军事装备、船舶等)应用MRO技术^[45],已经成为一个重要的研究热点。作为产品制造的最后一个环节,装配制造是MRO技术的主要应用场所,大部分的MRO措施发生在装配制造部门,或者在装配部门检查后转工到其他制造单位。

目前,成熟的商用MRO产品包括SIEMENS的Teamcenter MRO解决方案、SAP公司的mySAP解决方案。它们各有特点,或者偏重MBOM组织管理和更改管理,或者偏重物料的配套和生产计划等。我国也有软件企业进行MRO产品的定制开发,例如金航数码为航空某发动机制造厂开发的AMRO信息管理软件,以实现航空发动机在装配和维护生命周期中的信息管理、物料管理、寿命管理等信息化。

目前,大部分MRO产品都只能针对某种特定类型的产品类型进行应用,因此在MRO的研究和应用中,还存在如下问题值得关注:

(1) MRO数据建模,包括MRO系统与其他信息系统(PDM、ERP等)的接口;

(2) 维修信息的有效性组织;

(3) 制造信息与服役信息的统一表达和数据同步;

(4) 产品服役故障信息的搜集、建模和重用;

(5) 产品零部件寿命组织管理和维修计划制定;

(6) 零部件的串换件管理;

(7) 装配执行现场的技术状态控制。

结束语

装配制造是产品制造的最后一个环节,也是最为重要的环节之一。采用数字化技术对它进行支持和改造,可以大幅度提高产品质量,缩短上市周期,提升产品在生命周期中的服役水平。由于装配制造特有的生产组织方法在产品制造环节中的特殊地位,常规的MES系统很难有效地对装配制造环节进行有效的数字化管理。研究和开发面向复杂、重要产品的装配制造过程管理系统是先进制造技术在装配制造环节应用的一个新的热点内容。

其技术研究的特点和趋势包括:装配制造过程三维动态化仿真和引导;装配制造过程质量控制的统计、分析、预测和优化;基于智能算法和多目标优化的装配生产线调度和平衡;基于RFID技术的装配物料跟踪和物流优化;基于MRO理念的装配制造全生命周期支持。

本文有参考文献45篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要请向本刊编辑部索取。

(责编 金卯)