

3D 打印技术在航空发动机维修中的应用

Application of 3D Printing Technology in Aeroengine Maintainance

成都航利(集团)实业有限公司 郭双全 罗奎林 刘瑞 向巧 何勇

[摘要] 简述了 3D 打印技术在解决航空发动维修的零备件采购、提升再制造能力、战场应急抢修中发挥的重要作用,具体分析了航空发动机零部件 3D 打印技术体系及其在高压涡轮叶片维修中的应用。

关键词: 3D 打印 航空发动机 再制造

[ABSTRACT] 3D printing technology has an important effect on buying parts, improving remanufacturing capability, and battlefield damage assessment and repair in aeroengine maintainance. 3D printing technology system of component of aeroengine and its application in turbine repair are reported.

Keywords: 3D printing Aeroengine Remanufacturing

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S1.018

1 3D 打印技术在航空发动机维修中的作用

1.1 3D 打印技术解决航空发动机维修中零备件采购难题

3D 打印技术已经得到了国外航空公司的广泛关注,3D 打印的航空发动机零部件不断涌现(见表 1)。据报道,西门子公司已于 2014 年成为全球工业制造业第 1 个在金属零部件实际生产中应用 3D 打印制造技术的公司。

在发动机使用维护过程中,特别是进口发动机,到寿件、易损件、必换件等零部件是航空发动机维修企业最棘手的难题。3D 打印发动机零部件的出现解决了发

表1 3D打印的发动机零部件

公司名称	零部件名称	备注
罗·罗公司 (英国)	喷气发动机的金属零部件	2013 年起试制
西门子公司 (德国)	燃气轮机的金属零部件	2014 年起应用
霍尼韦尔公司 (美国)	热交换器和金属支架	2013 年起试制
MTU 公司 (德国)	形状复杂的高压导向器叶片组件	2018 年起应用
GE 公司 (美国)	波音 747 和空客 320 发动机的燃油喷嘴	2016 年起应用

动机维修所需备件的采购难题。通过掌握 3D 打印技术,制造出所需要的零备件,使原本采用传统方法短时间内无法满足设备、工艺等基础条件的航空发动机维修企业也具备了零部件制造能力。对于小批量需求的航空发动机维修企业来说,3D 打印既节约了制造成本,又缩短了维修周期。

1.2 3D 打印技术提升航空发动机维修中零部件再制造能力

航空发动机关键核心部件在工作中损伤报废严重、报废量大、损伤模式复杂,成为制约发动机维修周期和成本的主要因素,如烧蚀、裂纹、异物打伤等^[1],因此,压气机叶片、涡轮叶片等航空发动机关键核心部件的再制造技术是欧美发达国家严密封锁的关键核心技术。3D 打印为再制造提供了个性化、高效率的实现手段,是欧美发达国家首选的航空发动机零部件再制造技术^[2]。3D 打印技术作为航空发动机零部件再制造的重要技术手段,是目前国内外前沿研究技术和应用领域之一。

1.3 3D 打印技术给战场装备应急抢修带来变革

3D 打印技术特别适用于发动机战场装备应急维修保障,将给装备保障带来革命性的变化。主要体现在 2 个方面:一是通过 3D 打印技术可以在战场及时制造毁损部件。在未来信息化高技术战争中,战场上如果需要更换毁损部件,采用 3D 打印设备直接在战场把所需要的部件制造出来,装配后重新投入战场,避免出现装备某个零部件出现故障却无法维修的窘境,从而使遭到毁伤的武器装备得到再生。可以预见,代表制造业发展新趋势的 3D 打印技术,是未来颠覆传统的装备技术维修保障手段。二是 3D 打印技术可以减轻后勤保障压力。与装备生产的传统工艺模式不同,3D 打印技术集概念设计、技术验证与生产制造于一体,将极大地缩小装备从“概念”到“定形”的时间差,从而加快装备的更新周期,实现随时、随地、按需生产。

2 3D 打印技术分类及特点

适用于航空发动机金属零部件的 3D 打印技术主要有 5 类(见表 2),可分别应用于航空发动机维修过程中零部件的制造和再制造,其中用于再制造的主要有激光净成形、电子束熔丝沉积、等离子束熔丝沉积和等离子

表2 3D打印技术分类

技术名称	热源	原材料类型	典型设备	适用范围
激光净成形(LENS: Laser Engineering Net Shaping) ^[3]	激光束	粉末	LENS 750	制造、再制造
选区激光熔化(SLM: Selective Laser Melting) ^[4]	激光束	粉末	EOSINT M 270	制造
选区电子束熔化(EBSM: Electron Beam Selective Melting) ^[5]	电子束	粉末	ARCAM A2	制造
电子束熔丝沉积(EBF: Electron Beam Fusion) ^[6]	电子束	丝材	ZD60-10A 型	制造、再制造
等离子束熔丝沉积(PBF: Plasma Beam Fusion)	等离子束	丝材	LAWS 1000	制造、再制造
等离子束粉末沉积(PBD: Plasma Beam Deposition) ^[7]	等离子束	粉末	LAWS 800	制造、再制造

束粉末沉积。这些技术对应着专用的设备、原材料和工艺。

航空发动机维修中的零部件 3D 打印再制造融合了 3D 打印技术和再制造技术,成都航利(集团)实业有限公司率先提出了 3D 打印再制造的概念,航空发动机零部件 3D 打印再制造是指将 3D 打印技术作为重要手段的再制造。由于 3D 打印再制造在前处理过程中主要包括了再制造的前处理技术,比如涂层去除技术、清洗技术等(如图 1),因此整个过程比 3D 打印制造更为复杂。

航空发动机零部件 3D 打印制造技术除了不包括再制造前处理技术以外,其余都是和 3D 打印再制造是相同的技术。从图 1 中可以看出,航空发动机零部件 3D

打印技术与一般普通金属产品相比,性能考核技术复杂、考核周期长,这些都增加了 3D 打印技术在航空发动机维修中的应用难度。

3 3D 打印再制造技术在高压涡轮叶片维修中的应用

某型航空发动高压涡轮工作叶片采用定向凝固镍基高温合金精密铸造而成。1 个大修周期后高压涡轮工作叶片在工作中叶尖磨损严重,部分叶尖已磨损至凸台,平均磨损量为 0.6~0.7mm,43% 的叶片已磨损至凸台。高压涡轮工作叶片在工作中与之配合的是外环上采用等离子喷涂制备的具有 3 层结构的 NiCrAlY 封严涂层。由于在 NiCrAlY 封严涂层的底层和中间层添加高温抗氧化钎料进行真空热处理,同时在面层中添加提高孔隙率的聚苯脂,具有较好的可磨耗性,但是该涂层硬度高(HR45Y=55~75),因此,在工作中涡轮叶片叶尖易被封严涂层磨损。分析表明,高压涡轮工作叶片叶尖主要是由于氧化和燃气腐蚀加剧了磨损。

叶片为定向凝固组织,常规的氩弧焊、钎焊等技术难以实现定向组织修复。针对叶尖磨损故障和复杂型面的特点,采用激光净成形技术(LENS)对高压涡轮叶片进行 3D 打印再制造,再制造后的叶片接长组织呈定向晶,经过长期试车考核后满足航空发动机一个大修周期要求。

4 结束语

随着金属产品 3D 打印技术的不断成熟和航空发动机零部件 3D 打印技术体系的不断发展,3D 打印技术将在解决航空发动机维修中的零备件采购难题、提升航空发动机零部件再制造能力、战场应急抢修等方面发挥着不可替代的作用。

参考文献

[1] 向巧. 航空发动机维修工程管理. 北京:机械工业出版社, (下转第 27 页)

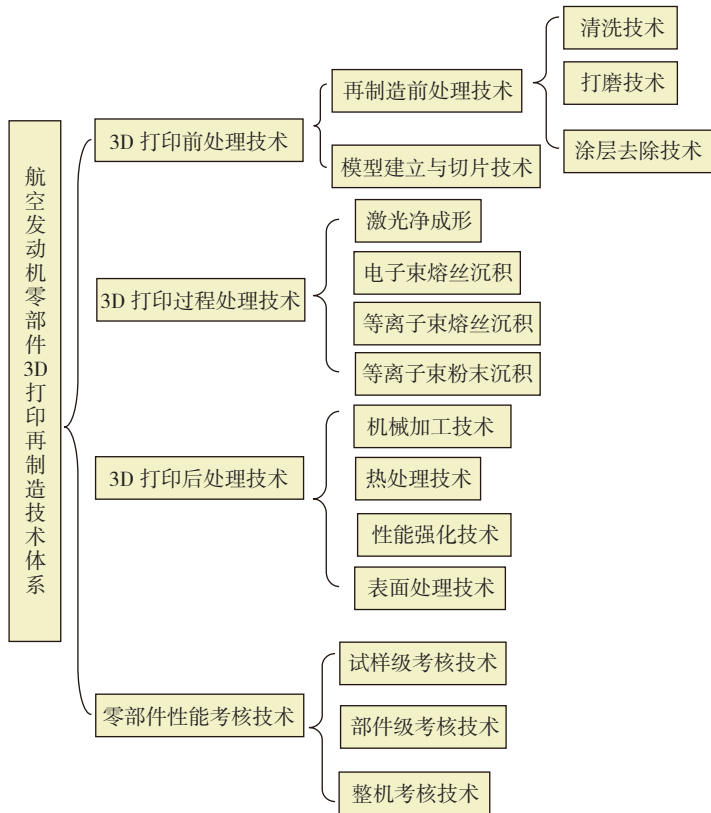


图1 航空发动机零部件3D打印再制造技术体系

Fig.1 Diagram of 3D printing remanufacturing technology of aeroengine

$D_3 = \begin{pmatrix} d_{14} \\ d_{24} \\ d_{34} \end{pmatrix}$ 与投影变换相关; 矩阵 $D_4 = (d_{44})$ 与整体比

例变换相关。因为在 CATIA 环境下, 标准件的初定位仅仅进行平移和旋转 2 种运动, 所以标准件的位姿矩阵可由数组 A 表示:

$$A = \begin{pmatrix} A_0 & A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 & A_5 \\ A_6 & A_7 & A_8 \\ A_9 & A_{10} & A_{11} \end{pmatrix},$$

其中, $\begin{pmatrix} A_0 & A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 & A_5 \\ A_6 & A_7 & A_8 \end{pmatrix}$ 组成一个 3×3 的矩阵, 用来描述

物体的姿态信息, 这 9 个数值之间有相互联系, 若 9 个数值不能满足直角坐标系, 则进行标准件姿态调整时标准件会发生变形; 标准件的位置信息则由 (A_9, A_{10}, A_{11}) 来描述。

通过 CAA 的 Agent 机制, 获取标准件初定位时定位位置的相关信息后, 动态重组所需的位姿矩阵, 通过 CATIA/API 中的 CATIMovable 接口, 调用该接口下的 SetPosition() 等函数来实现该功能。

3.4 标准件库系统的应用

标准件库系统的应用包括参数过滤、快速建模、查看电子设计手册和三维预览等子功能, 如图 5 所示, 设计人员根据实际需要选取标准件类型和相关参数(若对选取参数不明确, 可查看电子设计手册。若该标准件参数过多, 可使用参数过滤功能, 筛选出指定的标准件参数类), 图 5 右侧的三维预览图可根据所选定的标准件信息动态生成, 用户可对其进行旋转和缩放。

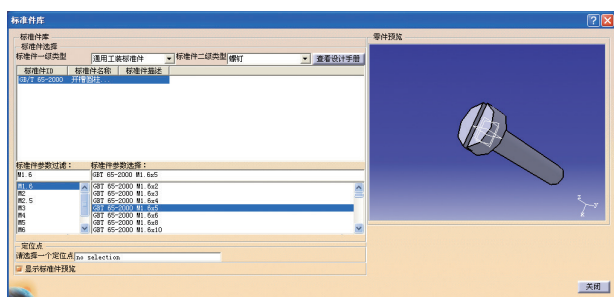


图5 标准件库应用界面

Fig.5 Application interface of standard part library

针对标准件库系统应用过程中设计手册的查看功能, 由于电子设计手册的存储机制采用将电子设计手册与数据库分开存储, 数据库存储设计手册文件路径的方式。用户点击查看设计手册按钮后, CATIA 应用程序从 Oracle 数据库中获取相应设计手册的存储路径, 并传递给基于 MFC 开发的设计手册查看器。此二者属于 2 个应用层面, 所以传递过程属于程序间的消息传

递。在 Windows 编程中, 有 3 种方法可以实现应用程序间的消息传递^[6]: 一是内存传递; 二是通过消息响应传递; 三是通过剪贴板传递。因为 CATIA 系统内存动态定义无法确定, 而且 CATIA 的消息响应定义方式与 MFC 不完全一致, 所以采用剪贴板实现二者之间的消息传递。

4 结束语

本文研究了基于 CATIA 的飞机工装标准件库的开发与应用, 提出了飞机工装标准件库系统设计总体框架, 分析标准件的模板建模技术和 Oracle 数据库信息存储技术, 实现了标准件用户权限管理功能、标准件库维护功能、标准件初定位功能和标准件库系统的应用, 大大提高了设计效率和设计标准化程度。该标准件库在开发的复合材料工装数字化设计系统中应用, 取得了满意的效果。

参考文献

- [1] 李原, 彭培林, 邵毅. 基于 CATIA 的标准件库设计与实现. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(8): 1873-1877.
- [2] 邓冬梅, 周末水, 陈功, 等. 基于 CATIA 的组件库建库工具的设计与实现. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2007, 35(1): 138-142.
- [3] Ye X F, Li J J. Realizing knowledge reuse in standard parts library management system. Computer Aided Drafting, Design and Manufacturing, 2008 (1): 32-38.
- [4] 黄翔, 万久团. 全息智能夹具三维标准件库建立的研究. 机械科学与技术, 2003, 22(2): 332-334.
- [5] 何朝良. 基于 CATIA/CAA 平台的虚拟装配路径规划的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学机电学院, 2005.
- [6] 叶鹏. 基于 CATIA V5 的汽车制动器零件库研究与开发 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.

(责编 叶枫)

(上接第 19 页)

2013: 40-45.

[2] Sexton L, Lavin S, Byrne G, et al. Laser cladding of aerospace materials. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 122: 63-68.

[3] Manvatkar V D, Gokhale A A, Jaganreddy G, et al. Estimation of melt pool dimensions, thermal cycle, and hardness distribution in the laser-engineered net shaping process of austenitic stain-less steel. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42A: 4080-4087.

[4] Amato K N, Gaytan S M, Murr L E, et al. Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting. Acta Materialia, 2012, 60(5): 2229-2239.

[5] 张靖. 电子束选区熔化数字化扫描控制系统研究 [D]. 北京: 清华大学, 2011.

[6] 陈哲源, 锁红波, 李晋炜. 电子束熔丝沉积快速制造成型技术与组织特征. 制造技术研究, 2010(1): 36-39.

[7] 向永华, 徐滨士, 吕耀辉, 等. 微束等离子粉末熔覆金属零件直接快速成形研究. 中国表面工程, 2009, 22(4): 44-48.

(责编 亿霖)