

机器人喷涂在F-35的应用

Robotic Approach for F-35 Stealth Coatings

刘亚威 / 中国航空工业发展研究中心

摘要: 介绍了机器人飞机精整系统 (RAFS) 的硬件设计, 阐述了优化喷涂参数和机器人程序以实现涂层厚度控制的过程, 给出了使用RAFS在生产型飞机上实施喷涂的结果。

关键词: 隐身涂层; 机器人; 厚度控制

Keywords: stealth coatings; robotic approach; thickness control

0 引言

F-35战斗机是美国洛克希德·马丁公司(简称洛·马)研制的隐形战斗机, 为了满足飞机雷达反射截面和涂层重量的严格要求, 隐身涂层的厚度必须控制在极小的公差范围内。洛·马制造技术部为此开发了一套机器人飞机精整系统(RAFS), 其良好的硬件设计和喷涂工艺开发实现了F-35涂层厚度的精确控制, 满足了飞机的公差要求。

1 系统硬件设计

洛·马开发的F-35雷达吸波材料喷涂系统RAFS用于喷涂整个F-35机体, 平尾、垂尾和众多小零件则用另一套机器人部件精整系统(RCFS)喷涂。RAFS由3个安装在辅助导轨上的6轴机器人组成(图1)。所有的机器人都有X向和Y向导轨, 位于后方的机器人的Z向导轨用来将其升到飞机上表面, 这个系统于2008年6月安装完成。

1.1 机器人定位精度

RAFS的定位精度要求很高。在满负载时, RAFS的工具中心点(TCP)的设计定位精度为2.032mm(0.08in), 重复定位精度为1.524mm(0.06in)。通过使用氦红外摄像头跟踪安装在TCP上的LED的动作和速度, 系统的重复定

位精度得到了验证。RAFS使用Fanuc R2000iA 125L材料操作机器人, 该机器人具备很高的精度和负载能力, 可以支持很长的末端操纵装置。为进一步减少TCP的偏差和振动, 目前的末端操纵装置使用轻质、刚性的复合材料管制造。

RAFS的6轴机器人及其2条或3条导轨都由唯一的一个Fanuc R-J3iB控制器控制, 从而在喷涂大表面时, 可以无缝化地协调导轨和机器人的动作。而在2003年之前, 喷涂F-22的CASPER系统最主要的问题就是协调6轴机器人和SCARA操作臂的动作, 因为它们都分别安在独立的控制器上^[1]。

1.2 飞机定位精度

飞机的定位精度与机器人的定位精度同样重要, F-35喷涂单元平台

(PCD)的设计地面定位精度(X向和Y向)达到了3.175mm(0.125in), 垂直方向的重复定位精度(Z向)为0.254mm(0.01in)。与之相比, B-2、F-117A和F-22的喷涂系统都存在定位困难、需要针对每架飞机进行复杂调整的问题^[2-3]。

1.3 涂层输送系统

由涂层输送系统(CDS)控制把涂料输送到低压喷枪的整个过程, 喷枪安装在末端操纵装置上。首先, CDS使用往复式主动活塞泵输送聚氨酯涂料, 不论其密度和黏性如何都可以保持在一定的速度。其次, RAFS上使用了一种先进的流量计测量材料的密度和流速, 给泵的闭环比例、积分、微分(PID)控制器提供反馈, 使得流速的体积精度维持在 $\pm 3\%$ 的水平。最后, 在喷涂操作中, 喷



图1 F-35机器人飞机精整系统(RAFS)

枪首先在离零件一定距离的位置开启,直到达到“流动稳定”条件再移动到零件上;系统持续监控流速、流体密度、通风气压和雾化气压,如果任何参数与操作员设置的允许范围有偏差,机器人将暂停并移开;当问题解决后,可以从之前暂停的位置继续操作。上述优点提升了涂层厚度的控制效果。

2 喷涂工艺开发

除了需要精心设计RAFS的硬件外,实现精确的厚度控制还需要开发相应的喷涂工艺。开发过程主要包括喷雾截面与试验板研究、离线机器人编程、涂层厚度测量、结果显示与分析、实施改进等几项工作。

2.1 喷雾截面与试验板研究

进行研究的目的是合理地设定CDS参数(如流速、通风气压、雾化气压),并验证机器人的编程方案(如末端操纵装置的TCP到喷涂表面的偏移距离、相邻机器人运动行程的间隔距离、机器人运动速度)。首先,在试验板上以同一形状的喷雾截面反复喷涂同一个行程,然后测量涂层的厚度,得到其厚度包线。把沿喷雾截面主轴方向(与行程方向垂直)上的厚度包线叠加起来,可以预估每一轮喷涂所形成的单个涂层的平滑度和大致厚度。如果喷雾截面形状和间隔距离配合不好,会导致有深有浅的“虎斑”。

2.2 离线机器人编程

机器人通过达索系统公司的DELMIA V5和FASTSURF软件进行离线编程^[4]。数控程序员可以依据F-35外形的三维CAD模型,快速生成机器人运动行程上的路径点。理想情况下,在每个路径点,喷雾截面都在标称的偏移距离上与飞机表面大体垂直,不过在进气道这样的狭小区域内,就可能无法垂直。相邻行程上的路径点的间距由喷雾截面的间隔距离确定,而同一行程上的路径点之间的间距对于单个表面来说可以减少。研究表明同一行程上的两点间距过小会使机器人运动速度降低,而间距过大会造成在大曲率表面上喷涂时,喷雾截面偏离标称的偏移距离^[5]。

FASTSURF软件有涂层厚度沉积的建模功能,可以基于喷雾截面、机器人运动路径和飞机表面形状预估涂层厚度^[6]。有时预估无法精确到满足公差要求,尤其是飞机外形导致喷雾截面与表面不垂直时,但通过在沉积建模上的进一步改进可以显著减少工艺开发的工作量。

2.3 涂层厚度测量

测量之前,必须在涂层表面标出测量点。洛·马制造技术部开发的最新方法是一个空气致动的点标记设备,可方便地安装在喷枪上,连接已有的空气管线。使用该设备时需要先关闭CDS,然后执行机器人运动程序。当达到测量点时,点标记设备的气筒缓慢伸出一个墨水标记头接触涂层表面。该设备能根据机器人程序中插入的宏命令自动操作,

在特定的测量点启动。

在标记完成后,使用一种先进的定制探针测量涂层厚度,探针利用非破坏性涡电流和磁感应试验方法来感知涂层厚度。为了在实际生产中收集涂层厚度数据,靠近RAFS的位置安装了一台智能激光投影系统^[7],于2010年完全投入使用。该系统利用室内GPS与飞机匹配,顺序地以 $\pm 1.524\text{mm}$ (0.06in)的精度投影测量点,测量结果储存在手持数据记录单元中,之后导入Excel进行分析。

2.4 结果显示与分析

为了更有效地展现涂层厚度结果,洛·马制造技术部开发了一种新的厚度数据显示方法。使用编制的VB软件从机器人程序中提取测量点坐标,然后在离线编程时使用的三维CAD模型中的相同坐标处标注厚度测量结果。该软件还可以用来显示机器人路径中各个位置的计划速度。

2.5 实施改进

在大量的喷雾界面和试验板研究后,还需要少量调整使涂层厚度完全控制在F-35严格的公差范围内。如果厚度测量结果的范围和标准差满足公差范围要求,但是平均值与标称厚度有偏差时,调整材料流速是最简单的方法。对小的调整而言,平均或全局涂层厚度的变化与流速的变化近似成正比例。而大的流速调整可能会影响喷雾截面形状,需要修正通风气压和雾化气压。如果厚度测量结果的平均值与标称值相近但是一些孤立区域超出了公差范围,那么调整机器人的运动速度是最佳的方法。涂层厚度的变化与运动速度的变化成反比例。

在任何特定测量点,只有一部分的涂层厚度是主行程通过该点时沉积的。因此,还必须调整与目标测量点相邻的行程上的机器人运动速度。一般来说应该在外形凹陷区域增加速度以减少厚

表1 F-35B手工喷涂与机器人喷涂的涂层厚度结果对比

	手工喷涂	机器人喷涂	机器人喷涂涂层厚度变化范围的减少率
第1次喷涂操作			
检测点在公差范围内的比例	9%	75%	减少90%
第2次喷涂操作			
检测点在公差范围内的比例	0%	100%	减少75%
第3次喷涂操作			
检测点在公差范围内的比例	3%	85%	减少89%
第4次喷涂操作			
检测点在公差范围内的比例	42%	95%	减少70%

VAATE计划下的革新性发动机

Revolutionized Engine of VAATE Program

孙明霞 梁春华 / 中航工业沈阳发动机设计研究所

摘要: 通用的经济可承受的先进涡轮发动机 (VAATE) 研究计划是继综合高性能涡轮发动机技术研究计划之后, 由美国国防部、国家航空航天局、能源部和工业界联合制定、于2003年开始部分实施、2005年开始全面实施的一项技术研究计划。综述了由美官产学研机构正在联合开发和验证的一些革新性发动机概念, 如高速涡轮发动机、高马赫数涡轮发动机和自适应循环发动机等。

关键词: 先进涡轮发动机研究计划; 革新发动机

Keywords: advanced turbine engines program; revolutionized engine

0 引言

美国武装部队21世纪的航空愿景是: 在费用更低的情况下, 作战飞机在任何时间、任何地点, 都能够预测、发现、跟踪、锁定、瞄准任何目标, 并进行作战和评估。这就要求其航空武器系统具有持久且快速反应的情报/监视/侦察(ISR)、极长时间续航、快速打击、持久攻击、全球到达、多任务机动和快速响应进入太空等能力。同时, 这些未来武器系统要求涡轮发动机必须既要具有高性能, 又要

降低费用。前者包括增大推力、降低耗油率、减轻质量、提高耐久性、降低噪声与排放等, 后者即降低研制、采办、使用和保障等费用。为此, 美国实施了通用的经济可承受的先进涡轮发动机(VAATE)研究计划。自2003年开始实施以来, 以VAATE研究计划为框架, 美国官产学研机构瞄准了一些革新的发动机概念, 并且正在按照其确定的研究目标开展工作, 目前已经取得一定的进展。

1 革新发动机验证机的研制目标和进展

1999年, 在综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET)研究计划取得的部分重要成果和成功经验的基础上, 美国国防部、国家航空航天局(NASA)、能源部和工业界联合制定了IHPTET研究计划的后续计划即VAATE研究计划。该研究计划于2003年开始部分实施, 于2005年开始全面实施, 计划分3个阶段到2017年结束。其目标是为未来轰炸机、无人作

度, 在凸出区域减少速度以增加厚度。

3 实际生产结果

表1总结了两架F-35B飞机分别进行手工喷涂和使用RAFS喷涂的结果, 后者是RAFS首次用于F-35飞机涂层的实际生产的测量结果。4次喷涂操作的材料类型、位置、目标厚度和公差范围都不同。数据显示RAFS喷涂的涂层效果极好, 厚度变化范围远小于手工喷涂的结果。

AST

参考文献

[1] O'Keefe M. Robotic coatings

automation[J]. Technology Review Journal, Northrop Grumman, 2004.

[2] Drotning W. Robotic aircraft maintenance activities[R]. Intelligent Systems and Robotics Center, Sandia National Laboratories, Joint Technology Exchange Group, 2001.

[3] Warwick G. The F-22 story, painting by numbers[J]. A Flight International Supplement, 1997.

[4] Thornton J. Simulations speed & smooth automated coatings on F-35 aircraft[J]. Robotics World, 2006(1).

[5] Thornton J. DELMIA Simu

lations help Lockheed Martin Ft. Worth put final coatings on F-35 aircraft—with precision[J]. DELMIA, 2007(6).

[6] Ponticel P. Lockheed goes with common interface for F-35 painting [J]. Aerospace Engineering and Manufacturing, 2011(4).

[7] Seegmiller N A. Precision robotic coating application and thickness control optimization for F-35 final finishes[J]. SAE Journal, 2010 (3).