

面向航空产品的自动化喷涂 工艺研究*

宁 莉¹, 王国磊²

(1. 航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安 710089;

2. 清华大学机械工程系, 北京 100084)

[摘要] 鉴于航空产品尺寸庞大, 涂料特殊、工艺过程复杂、生产模式多变, 必须对航空产品的自动化喷涂工艺进行深入研究, 才能真正发挥喷涂机器人的效能。首先简述了空气喷涂的原理与自动化喷涂工艺装备, 进而概括提出了自动化喷涂工艺研究的核心内容和关键工艺参数, 最后在总结自身实践经验的基础上, 提出了一套包括基础工艺试验、样件喷涂试验、实机喷涂试验、喷涂过程标准化以及持续优化 5 个环节的喷涂工艺研究方法, 并给出了各个环节的关键要素和试验方法。

关键词: 航空产品; 自动化喷涂; 喷涂工艺; 参数优化; 标准化

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.12.059



宁 莉

航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司热表处理厂技术室主任、工程师。先后获得航空工业西北片区第七届管理创新成果三等奖, 第 21 届陕西省企业管理现代化创新成果奖项目二等奖等。

与一般工业机器人不同, 喷涂机器人因防爆、气路和运动要求, 在结构和控制上都进行了特殊的设计, 是一类极具特点的专用工业机器人。相比于人工喷涂, 机器人喷涂具有很多优势: 喷涂速度、位置等喷涂参数更容易控制, 能获得更好的涂层质量和更少的涂料消耗; 自动化程度和作业效率较高, 能大幅度节省人工、时间等成本; 避免工人直接接触漆雾, 保护工人健康等。喷涂机器人自推向市场后发展迅速, 目前几乎所有的汽车涂装都采用了机器人作业^[1], 空客、波音、洛克希德·马丁等很多国际上著名的飞机制造商也陆续引入了机器人喷涂技术。例如, 洛克希德·马丁公司研制的机器人化飞行器喷涂系

统已应用于 F-35 战斗机的表面喷涂^[2]。波音公司应用了一套自动喷涂系统(Automated Spray Method, ASM)用以喷涂客机机翼, Encore Automation 公司提出了一套客机整机喷涂系统的构想^[3]、美国西南研究所针对客机部件设计了移动机器人系统解决方案^[4]等。

由于航空产品大多尺寸庞大, 涂料种类特殊、工艺过程复杂、生产模式多变, 如果想在航空制造企业应用自动化喷涂技术, 不能简单地采购商品化喷涂机器人或照搬现成的解决方案, 而是必须在工艺设计、过程控制、生产管理和系统集成方面进行深入的研究和探讨, 在实践中探索出一套行之有效的方法, 才能真正发挥喷涂机器人的效能。

本文关注航空产品的机器人喷涂工艺方法问题, 通过对自身实践经验和现有研究成果的总结, 对机

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61403226); 摩擦学国家重点实验室项目(SKLT2015D04)。

机器人喷涂的原理、装备、工艺过程和工艺方法进行了梳理,供业内人士参考。

喷涂原理与装备

常见的喷涂方式有空气喷涂、无气喷涂、混气喷涂、静电喷涂、淋涂、辊涂、浸涂和电泳涂装等^[5],目前航空制造业应用最多的还是空气喷涂方式,因此本文主要针对空气喷涂工艺进行探讨。

空气喷涂是利用空气帽喷出的压缩空气将喷嘴喷出的液体涂料雾化成涂料颗粒,进而涂料颗粒黏着在工件表面形成薄膜的一种涂装工艺方法^[6]。

图1所示是GRACO公司生产的AirPro EFX型自动喷枪的内部结构。

喷枪底座上分别接有涂料入口、涂料出口、开关枪空气入口、雾化空气入口和扇形空气入口。不喷涂时,喷针在弹簧的作用下紧紧贴合在针阀开口上,针阀开口关闭;而喷涂时,开关枪空气导通,压缩空气驱动喷针上移,从而使得涂料可以在供料泵的压力推动下从针阀开口处喷出。调节流体调节旋钮可以调整针阀的开度。喷枪前端还有一个空气帽,如图2所示,是GRACO公司的24C184型空气帽。空气帽上开有雾化空气孔和扇形空气孔,中心雾化孔

喷出的空气负责将涂料雾化为高速飞向工件表面的微小液滴,形成一个气液混合流场;而两侧的扇面压力调节孔中喷出空气的作用是控制流场的形状,使流场呈类似圆锥状。

此时,如果喷枪与工件表面垂直且保持静止,则在工件表面形成一个椭圆形的喷幅。通过调节雾化空气压力,可以使涂料良好雾化,获得良好的涂层表面质量,通过调节扇形空气压力,则可以调整喷幅的长度和宽度。

由于喷枪安装在机器人末端,需要配备专用的涂料输送系统,并保证涂料流量的稳定性。图3所示是一种典型的压送式供料系统的原理图。系统可以分为流体系统和空气系统两部分,流体系统的功能是搅拌涂料,并将涂料压送到喷枪,并不断往复循环;空气系统的功能是给喷枪提供压缩空气,并用压缩空气驱动流体系统的气动元件。

涂料系统由涂料管将容器(24)、搅拌器(15)、涂料泵(17)、过滤器(19)、稳压器(21)、调压器(22)、喷枪(23)串接起来。容器中的涂料经涂料泵加压后过滤,然后经稳压器和调压器送到喷枪雾化喷涂,多余的涂料循环回流到涂料桶。涂料调压器用于设定喷枪的涂料压力。

气路系统由气源(1)、过滤器(4)、开关阀(5~9)、调压阀(10~14)等组成。可以看出,气源的压缩空气经总阀和空气过滤器后分为若干路,分别用于驱动搅拌器马达、驱动涂料泵马达、为稳压器提供气源、用于开关自动喷枪,以及涂料的雾化和扇幅的调节。

喷涂工艺核心内容

喷涂工艺研究的目的是获得良好的喷涂质量,保证生产稳定运行,具体而言,核心研究内容就是基于现有喷涂装置和外部环境,选择最优的喷涂参数和最佳的喷涂轨迹。

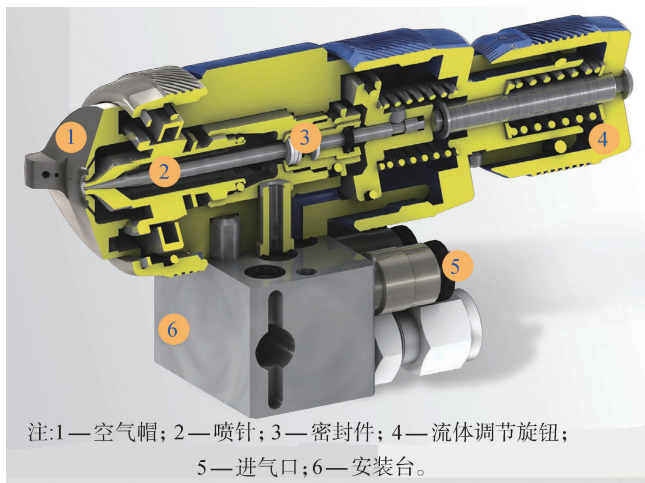


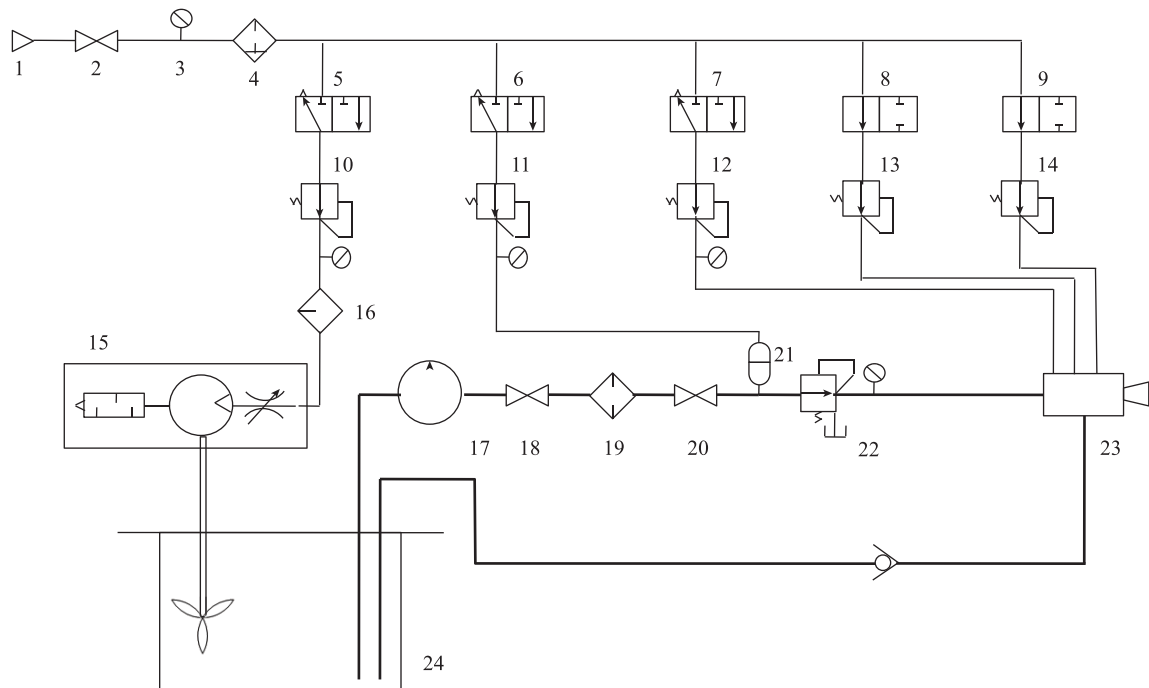
图1 自动空气喷枪内部结构

Fig.1 Internal structure of automatic spray gun



图2 空气帽

Fig.2 Air cap



注：1—气源；2—球阀；3—压力表；4—过滤器；5~9—开关阀；10~14—调压阀；15—搅拌器；16—油雾器；17—涂料泵；18—涂料球阀；19—过滤器；20—涂料球阀；21—稳压器；22—调压器；23—喷枪；24—容器。

图3 压送式供料系统

Fig.3 Pressure paint supplying system

1 喷涂路径

为了获得良好的涂层质量,并且完整覆盖工件表面,通常需要机器人夹持自动喷枪与工件表面保持一定的角度和距离并匀速移动,喷枪末端沿着工件表面的运动轨迹就是喷涂路径,如图4所示。为了保证涂层均匀性,喷涂路径需要对工件形状进行仿形。喷涂路径可以比较方便地通过机器人运动加以调整,因此是涂层质量控制的最主要手段。

喷涂路径的获取有人工示教和离线规划两种方法。前者先在工件表面用划线、粘贴等方式标记出喷涂路径,然后通过示教器、机械模拟装置等引导、操作机器人末端沿着标记点移动,将到达每个标记点后的机器人末端位姿记录下来保存在程序中,喷涂时令机器人按示教顺序依次到达标记点的位置,形成喷涂动作^[7]。该方法在批量生产的中小型工件喷涂中有大量应用,优点是操作简单、

入门容易,缺点是效率低、耗时久、喷涂轨迹的优劣很大程度上依赖技师的经验、程序调整难度大。

对航空产品来说,由于喷涂面积大、产量低,更适合采用的离线规划方法^[8]。这种方法立足于待喷涂工件外形数模,借助于计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)技术获得喷涂路径。路径生成算法从原理上可分为两种:截平面法和种子路径法。截平面法采用平行平面截取待喷涂曲面,所得截交线即为喷涂轨迹^[9];种子路径法选取曲面上某条曲线作为种子路径,而后根据一定的法则生成其相邻路径,并将该路径作为新的种子路径,采用同样的规则生成它的相邻路径,以此类推,直到完成整个曲面的遍历^[10]。这两种方法中,平行平面法规则简单、操作方便,在现有3D造型软件如SolidWorks、Catia等即可进行,但考虑曲面形貌和涂层生长模型较少,

所得涂层质量低,仅适合平面、圆柱面等简单、规则的曲面;种子路径法则相反,是一种完全基于曲面形貌和涂层生长模型的喷涂路径生成方法,适合复杂曲面的高精度喷涂路径生成,但规则复杂,需要单独开发专用工具,且容易出现路径交叉。

应用离线规划方法的基础是三维模型与物理实物的偏差很小。故一般情况下,离线规划完成的喷涂轨迹建议首先在三维环境下进行仿真验证,以检查机器人动作是否超出极限位置、机器人与工件的相对位置是否合理等;验证完毕后,再将喷涂程序加载到控制系统,通过慢速试走验证所有机器人喷涂轨迹,确认机器人喷涂轨迹是否与实际工件存在较大偏差、机器人动作是否连贯协调等。

2 喷涂重叠率

由于单道喷涂轨迹在工件表面形成一个中间厚,两边薄的涂层,因此为了获得均匀的涂层,相邻轨迹的

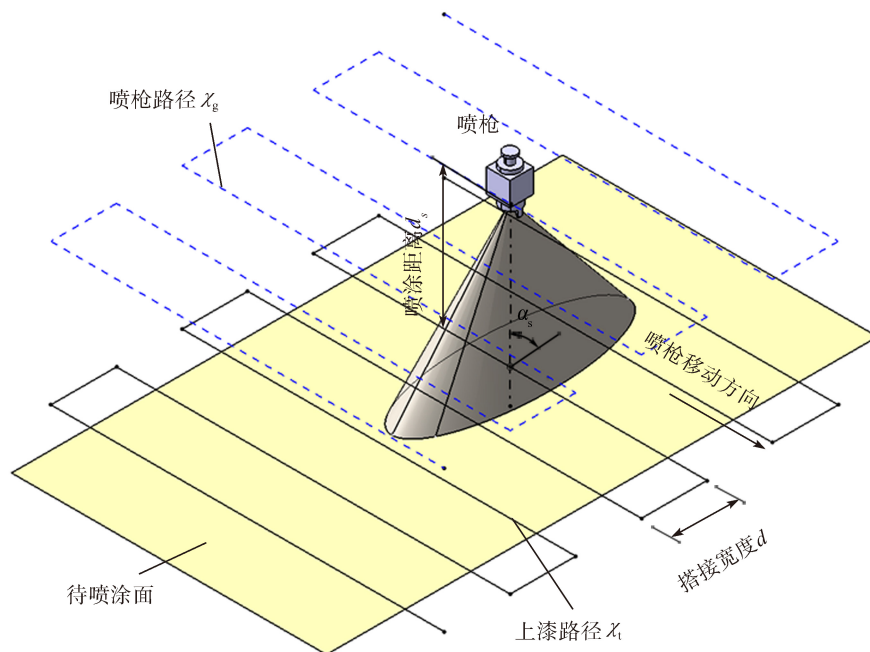


图4 喷涂轨迹

Fig.4 Painting trajectory

喷幅之间要有一定的重叠。重叠率 C 为:

$$C = 1 - \frac{d}{W} \quad (1)$$

式中, W 为喷幅的长度, d 为相邻轨迹之间的搭接宽度。涂装手册上推荐重叠率在 1/4~1/2 之间选择, 实际操作中可能达到 3/4, 不同喷枪及涂料的最佳喷涂喷幅不同, 需要根据喷涂效果进行调整。

3 喷涂流量

喷涂流量是决定喷涂效率的重要工艺参数, 通常可以在工艺设计阶段采用式(2)进行估算:

$$Q = S \times \tau / (\eta \times \rho) / (n \times T \times K) \quad (2)$$

式中, S 为喷涂面积, τ 是干燥后的漆膜厚度, η 是上漆率, ρ 是涂料的固体份含量, n 为喷涂遍数, T 是喷涂时间, K 是修正系数。

经式(2)计算出的理论喷涂流量值需要进行实喷验证和优化。喷涂流量的取值与涂料黏度、工件表面的粗糙度等有较大关系, 为了避免流挂, 不宜一味考虑提高喷涂效率将流量设置得过大。

4 喷涂速度

喷涂速度即喷枪 TCP 点的移动速度, 用 V 表示, 在工艺设计时可以根据式(3)进行估算。

$$V = S / (W \times C \times T \times K) \quad (3)$$

喷涂速度的设置受到机器人性能的约束, 过大的喷涂速度会带来较大的加速度和振动, 而给喷涂质量和机器人寿命带来不良影响。对于空气喷涂而言, 喷涂速度一般不宜超过 900 mm/s。

5 喷涂距离

喷涂距离是在喷枪轴线方向上喷枪喷嘴与喷幅中心之间的距离。一般情况下, 自动喷枪喷涂时采用的喷涂距离为 200~300mm。喷涂规则表面时, 喷涂距离恒定是保证涂层厚度均匀性的重要条件之一。此外, 喷涂距离还将影响涂层厚度与涂着效率。相同条件下, 喷涂距离短则涂层厚, 涂着效率高; 喷涂距离长则涂层薄, 涂着效率低。喷涂距离过短, 形成的涂层过厚, 易产生流挂; 喷涂距离过远, 则涂料飞散多, 且喷雾粒子在空气中运动时间长, 稀释剂和其

他溶剂挥发过多, 会造成涂层表面粗糙, 涂料浪费大。

6 雾化和扇形空气压力

雾化空气压力是决定涂料雾化质量, 进而决定涂层表面质量的重要工艺参数。该参数的选择与喷枪空气帽的结构形式、涂料的物理特性关系很大, 需要通过实际喷涂试验反复优化, 找到最佳的参数。扇形空气则决定了喷幅的长度, 不同喷枪的最佳喷幅长度不同, 以 GRACO 的自动喷枪为例, 其产品手册推荐喷幅长度推荐为 300~400mm 左右。实践中, 虽然自动喷枪的雾化空气和扇形空气压力可以分开设置, 但二者存在较强的耦合作用, 通常需要一起调整, 以获得满意的雾化效果和喷幅长度。

喷涂工艺研究方法

喷涂工艺研究是实践性很强的研究, 必须系统地开展喷涂试验研究, 在此基础上, 通过观测和理论分析进行工艺方法与过程的优化。本文在长期实践的基础上, 提出了一套

行之有效的喷涂工艺研究方法,可以概括为基础工艺试验、样件喷涂试验、实机喷涂试验、喷涂过程标准化以及持续优化5个环节。

1 基础工艺试验

基础工艺试验的内容是在现有设备和厂房环境下,有针对性地对喷涂涂料展开喷涂工艺参数优化研究,确定喷涂装置的设置、喷涂环境的温湿度、工件表面处理措施,以及喷涂重叠率、喷涂流量、喷涂速度、喷涂距离、雾化空气压力和扇形空气压力等核心工艺参数的取值。使用多组分涂料的,还应该确定涂料的配比等。

本阶段研究以平板喷涂试验为主,试验设备与材料方面,需要准备喷涂机器人、平板试件、涂层测厚仪、量杯、电子称重计、试验漆料、稀释剂等。试验设计上,可以开展如下3种试验:(1)喷幅试验,调整喷枪使之垂直于平面试件且相对于工件保持不动进行喷涂,此试验可在试件上获得喷幅形状,可确定喷涂装置是否正确设置、动作可靠,以及雾化和扇形空气压力设置是否合理;(2)直行试验,即喷枪在试件平板上沿直线行程进行喷涂,此试验可用于测量、观测、调节喷幅宽度、喷涂距离、涂层表面质量等;(3)平板喷涂试验,即完成一整块试件平板的完整喷涂,并完成测厚,以优化喷涂重叠率、喷涂流量、喷涂速率等参数。

喷涂工艺试验及参数优化的评价标准应参照国军标的喷涂质量评

价标准及检验方法,以及涂料的生产工艺要求而定,一般包括外观检查、膜厚检测、附着力检测等项目,有的涂料还需要进行表面硬度、耐磨性和耐溶性等检测。

2 样件喷涂试验

此阶段,可以试制一些与实际喷涂工件接近的,或者与实际工件某个关键部位相似的模拟样件进行进一步喷涂调试和试验,可在工件表面包裹铝箔纸贴板,以多次重复利用,降低试验成本。

该阶段试验中,对底漆、功能性漆进行膜厚检测,面漆进行外观等指标检测。通过调整机器人喷涂参数、轨迹等手段,确保涂层膜厚和外观质量满足生产要求。此阶段试验的要点包括:

(1)如漆膜厚度偏小,可通过增加喷涂流量、减少喷涂距离等方式来增加膜厚;反之,则通过降低喷涂流量、增加喷涂距离等方式来降低膜厚。

(2)将喷涂区域划块,并建立测量点与喷涂路径的对应关系,以便有针对性地调整喷涂参数和喷涂路径。

3 实机喷涂试验

样件测试完成后进行实机喷涂验证,本阶段是机器人进行正式生产前的最后环节,充分地调试和优化是决定最终机器人喷涂生产效能和质量的关键。试验方法上,与前阶段试验方法基本相同:漆膜厚度缺陷通过调整机器人喷涂速度、喷涂距离、喷涂流量等参数的办法解决;漆膜外观缺陷通过调整机器人雾化空气、

扇形空气、喷涂轨迹等参数的办法解决。为了满足工艺要求,需反复进行实机喷涂验证。对于航空产品来说,由于产品尺寸大、结构复杂、死角和难喷区域多,这一过程可能持续相当长的时间。

4 喷涂过程标准化

要将机器人喷涂技术真正应用起来,必须保证两点:第一,生产质量的稳定性;第二,工艺过程的规范化。

漆膜的形成机理非常复杂,影响因素也很多,可以从过程控制的角度分为4类^[6],如表1所示。对于自动化喷涂而言,要保证生产质量的稳定,必须保证表1中全部4类因素的稳定性。

而要实现工艺过程规范化,必须尽可能剥离不确定因素,确保喷涂过程中所有操作、处理的规范性和一致性。

因此,喷涂过程标准化的举措包括:

(1)在前述研究的基础上,形成作业规范和标准,固化工艺参数、机器人程序、操作流程和步骤。

(2)严格把控厂房温湿度、送排风、气流、洁净度等环境、工件预处理措施、涂料的配比与使用等影响喷涂过程一致性的喷涂装置和外部环境因素。

(3)定期对机器人、涂料系统、供气系统等装置进行维护和检查。

(4)定期对喷涂流量、空气压力等机器人工艺参数进行测试和校正。

5 持续优化

由于航空产品制造具有单件小批生产、工艺流程和工艺要求多变等特点,相比较批量生产类型的制造企业对工艺过程持续改进和优化的要求更高。

要在航空制造中充分发挥喷涂机器人的优势,必须不断在生产实践过程中对喷涂轨迹、工艺参数、生产管控措施等环节不断地进行监控和优化。

表1 影响涂层厚度分布的因素

序号	类别	因素
1	喷涂装置	喷枪类型、针阀开度、空气帽类型、供料装置等
2	外部环境	涂料特性、涂料温度、工件特性、工件温度、风速等
3	喷涂参数	雾化压力、喷幅压力、喷枪流量等
4	路径参数	喷涂距离、喷涂速度、喷涂角度等

结论

本文以空气喷涂工艺为研究背景,对机器人喷涂的原理、装备、工艺过程和核心工艺要素进行了梳理,进而在自身实践经验和现有研究成果的基础上,提出了一套基于试验的5阶段喷涂工艺研究方法,并给出了各个阶段的试验要点和细节,这套方法是在笔者进行机器人自动化喷涂课题应用的实践中摸索出来的,具有较强的操作性和一定的实践指导意义,希望可以对业内人士探索机器人喷涂技术在航空制造企业的应用方面提供一些有益的参考。

参考文献

[1] 赵江英,石雨磊,季燕雄,等. 机器人喷涂在汽车涂装中的应用[J]. 现代涂装, 2014(1): 48-50.

ZHAO Jiangying, SHI Yulei, JI Yanxiong, et al. Application of robot spray in automobile painting[J]. Modern Coating, 2014(1): 48-50.

[2] SEEGMILLER N A, BAILIFF J A, FRANKS R K. Precision robotic coating application and thickness control optimization for F-35 final finishes[J]. SAE International

Journal of Aerospace, 2010, 3(1): 284-290.

[3] BECROFT S A. Automated painting for aerospace, challenges, newer technologies and lessons learned[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2012, 5(1): 22-30.

[4] DAN H W, WIEDMANN S L, SOLOMON D P. A large-scale robotic system for depainting advanced fighter aircraft[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2011, 4(2): 1125-1132.

[5] 陈雁, 邵君奕, 张传清, 等. 复杂管道喷涂系统研制[J]. 机械设计与制造, 2009(11): 1-3.

CHEN Yan, SHAO Junyi, ZHANG Chuanqing, et al. Development of spraying system for complex duct[J]. Machinery Design & Manufacturing, 2009(11): 1-3.

[6] 王国磊, 伊强, 缪东晶, 等. 面向机器人喷涂的多变量涂层厚度分布模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(3): 324-330.

WANG Guolei, YI Qiang, MIAO Dongjing, et al. Multivariable coating thickness distribution model for robotic spray painting[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2017, 57(3): 324-330.

[7] 王海平. 机器人喷涂仿形技术及喷涂工艺的优化[J]. 上海涂料, 2015, 53(4): 32-35.

WANG Haiping. Spraying profile technology and spraying process optimization of robot[J]. Shanghai Coating, 2015, 53(4): 32-35.

[8] 缪东晶, 王国磊, 吴聊, 等. 自由曲面均匀喷涂的机器人轨迹规划方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(10): 1418-1423.

MIAO Dongjing, WANG guolei, WU Liao, et al. Trajectory planning for freeform surface uniform spraying[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2013, 53(10): 1418-1423.

[9] YU Q, WANG G, CHEN K. A robotic spraying path generation algorithm for free-form surface based on constant coating overlapping width[C]// IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. Shenyang, 2015.

[10] ATKAR P N, GREENFIELD A, CONNER D C, et al. Hierarchical segmentation of surfaces embedded in R3 for auto-body painting[C]// International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, 2005.

通讯作者: 王国磊, 副教授, 研究方向为特种机器人与航空制造装备研制技术、机器人技术在喷涂/制孔/装配/测量/检测等航空制造环节的应用, E-mail: wangguolei@tsinghua.edu.cn.

Research on Automatic Spraying Process of Aviation Products

NING Li¹, WANG Guolei²

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

2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[ABSTRACT] Due to the large size, special coating material, complicated process, and varied production modes of aviation products, it is necessary to conduct in-depth research on the automatic spraying process of aviation products in order to truly exert the effectiveness of the painting robot. First of all, the principle of air spraying and automatic spraying process equipment is described. Then, the core content and key process parameters of automatic spraying process research are outlined. Finally, based our own practical experiences, a five step research method, including basic process experiments, sample spraying experiments, real work-piece spraying experiments, spraying process standardization and continuous optimization was put forward, and the key elements and experimental methods of each step are given.

Keywords: Aviation product; Automatic spraying; Spraying process; Parameter optimization standardization

(责编 大漠)