

焊接式整体叶盘加工余量自适应优化方法^{*}

An Adaptive Approach to Machining Allowance Balancing for Linear Friction Welding Blisk

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 张莹 张定华 吴宝海

[摘要] 针对航空发动机焊接式整体叶盘毛坯变形严重、余量不均等问题,提出一种基于对称原则的整体叶盘加工余量自适应优化方法。通过分析整体叶盘的制造工艺特点与难点,给出了加工余量优化建模与求解算法;在此基础上,根据叶片周向对称分组原则,提出了整体叶盘变形叶片组逐层细分的余量分布优化方法。算例及分析表明,此方法能够较好地优化焊接式整体叶盘毛坯余量,从而降低线性摩擦焊接工艺引起的叶片位置偏差和余量分布不均对叶盘加工质量的影响。

关键词: 整体叶盘 线性摩擦焊 余量优化 对称原则

[ABSTRACT] Aiming at the issue of serious deformation and uneven allowance distribution for aero-engine blisk blank with linear friction welding process, an adaptive approach to allowance balancing based on symmetrical principle is proposed. Through analyzing the characteristics and the difficulty of blisk manufacturing process, a modeling and optimization algorithm of allowance balancing is given. Then an approach to allowance balancing with layered segmentation of blade groups is developed, following the circumferential symmetrical grouping principle. Examples show that the allowance distribution of blisk blank can be controlled effectively and the influence of machining quality caused by position deviation and uneven allowance in the welding process can be reduced significantly.

Keywords: Blisk Linear friction welding Allowance balancing Symmetrical principle

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.19.030

整体叶盘是新一代高推比航空发动机设计中采用的最新结构和气动布局形式。它将叶片和轮盘直接连接为一整体,大大简化了发动机的结构,进一步提高了发动机的推重比和可靠性。因此,整体叶盘在先进航空发动机中获得了广泛应用^[1]。

目前,整体叶盘的制造主要采用复合制造工艺方式,

^{*} 国家自然科学基金(51305353)和中国博士后科学基金(2012M512028)资助。

包括精锻制坯+精密数控加工,焊接制坯+精密数控加工以及高温合金整体精铸毛坯+热等静压处理^[1-3]。其中,线性摩擦焊接工艺由于具有节省大量贵重金属材料、减少加工时间、综合性能高等优点,成为了整体叶盘制造、维修的理想解决方案,现已成功应用于罗罗、普惠等国外先进航空发动机制造厂商的整体叶盘加工中^[2-3]。然而,线性摩擦焊接工艺的误差将使得整体叶盘中不同叶片的相对位置及变形程度存在差异,焊接结果的一致性差,从而导致数控加工过程的装夹定位困难和余量分布不均匀,影响整个叶盘的加工精度^[4]。

为此,本文首先分析了整体叶盘的结构特点和制造工艺,然后结合线性摩擦焊接工艺提出了适用于整体叶盘的加工余量自适应优化方法,最后以一算例的详细分析与讨论说明了所提方法的实用性和可靠性。

1 整体叶盘制造工艺分析

航空发动机整体叶盘结构复杂,型面一般为自由曲面且通道开敞性差,加工精度要求高,材料的可加工性差,其综合制造技术属世界级的技术难题,西方发达国家对其严密封锁^[3]。

目前,利用多轴数控加工中心实现整体叶盘加工是航空发动机风扇、压气机整体叶盘研制的主要方法之一,其关键技术包括通道可加工性分析、刀轴矢量控制及刀位轨迹规划等几何学优化问题,以及加工过程中的切削参数优化、颤振抑制、弱刚性系统变形控制等力学、物理问题^[1]。这种加工方法的显著优点是加工设备简单、精度高;缺点在于加工过程中需要切除大量金属,导致效率低、周期长、成本高,因此也不适于大型及超大型风扇整体叶盘的加工,同时也无法满足批量化生产的要求^[2]。

线性摩擦焊接工艺的出现和应用为整体叶盘的近净成形制坯和批量化生产提供了理想的解决方案。但限于焊接工艺的特点和目前的精度水平,焊接完成的整体叶盘仍然需要多轴联动数控加工的方式实现其精加工。就其实现过程而言,无论是整体叶盘的加工还是修复,线性摩擦焊技术的功能相当于完成零件的粗加工,而更严格的加工精度、形状、位置要求需要最终的多轴数控加工手段保证。然而,受焊接变形的影响,叶片的

焊接结果一致性差,若直接进行加工,可能导致定位困难或余量分布不均匀,甚至影响整个叶片的加工精度。此外,在焊接工艺变形的基础上进行加工,过渡区域的设计模型可能不再适应于当前叶片形状的变化,无法实现精密的数控加工^[2,5-6]。因此,研究如何实现线性摩擦焊接式整体叶盘高效、精密、自适应的数控加工具有重要意义。

2 加工余量优化建模与求解

受线性摩擦焊接工艺的影响,整体叶盘毛坯中各个叶片的焊接变形程度均可能存在差异,具体体现在各个叶片在叶盘轴向、径向、周向这3个方位所产生的不同程度的焊接误差,从而导致叶盘的定位基准及几何形状均可能需要随之变化,如图1所示。

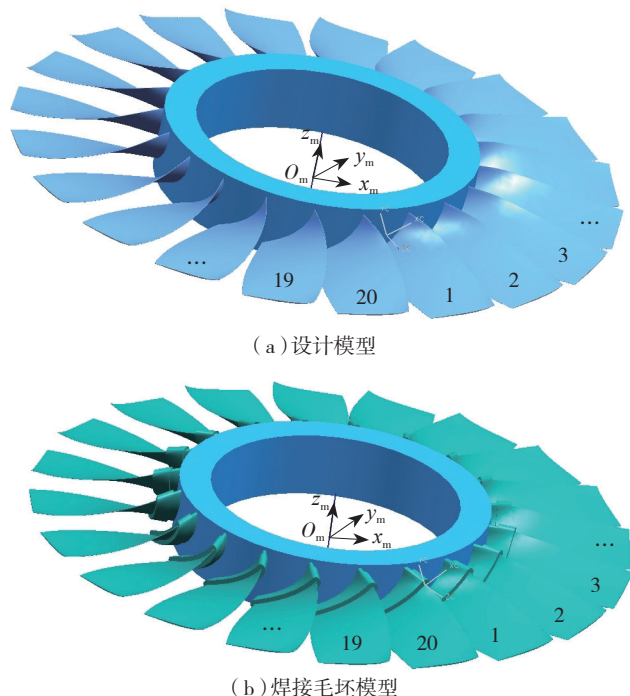


图1 整体叶盘余量优化仿真模型

Fig.1 Simulation model for allowance balancing of blisk

因此,本文首先介绍一种通用的加工余量优化建模与求解算法,以便应用于后续的整体叶盘加工余量优化^[4]。

设 $O_m-x_my_mz_m$ 为测量坐标系, $O_w-x_wy_wz_w$ 为工件坐标系,则定位变换定义为测量坐标系到工件坐标系的旋转变换和平移变换 (\mathbf{R}, \mathbf{t}) , 其变换参数为 $\mathbf{x} = (\alpha, \beta, \gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ 。其中, α, β, γ 分别为绕 x_w, y_w, z_w 坐标轴的旋转分量, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别为沿 x_w, y_w, z_w 坐标轴方向的平移分量。

设测量坐标系中的测量点集合为 $P=\{p_i | i=1, \dots, N\}$, 则对应工件坐标系内的测量点集合 $P'=\{p'_i | i=1, \dots, N\}$,

$p'_i=\mathbf{R}(\mathbf{x}) \cdot p_i+\mathbf{t}(\mathbf{x})$; 寻找 $P'=\{p'_i | i=1, \dots, N\}$ 的对应设计表面最近点集合 $Q=\{q_i | i=1, \dots, N\}$ 以及等距的设计表面点集合 $Q'=\{q'_i | i=1, \dots, N\}$, 其中, $q'_i=q_i+\delta \cdot n_i$, n_i 为 q_i 点在设计表面上的单位法矢, $\delta \geq 0$ 为加工余量。

定义有向距离函数:

$$d_i(\mathbf{x})=(p'_i-q'_i) \cdot n_i=((\mathbf{R}(\mathbf{x}) \cdot p_i+\mathbf{t}(\mathbf{x}))-q_i) \cdot n_i-\delta,$$

并建立加工余量自适应优化数学模型:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N (((\mathbf{R}(\mathbf{x}) \cdot p_i + \mathbf{t}(\mathbf{x})) - q_i) \cdot n_i - \delta)^2 \\ s.t. \mathbf{x} \in D = \{\mathbf{x} | -\mu \leq g(d_i(\mathbf{x})) \leq \varepsilon, i = 1, 2, \dots, N\} \end{cases}$$

其中, D 为参数 \mathbf{x} 的可行域, 由加工余量所定义的等距面距离分布控制函数 $g(d_i(\mathbf{x}))$ 及其上、下偏差 ε 和 μ 所定义 ($\varepsilon \geq 0, \mu \geq 0$)。当目标函数达到最小值时, 得到的定位变换 $(\mathbf{R}^*, \mathbf{t}^*)$ 称为最优定位变换, 对应的参数 \mathbf{x}^* 则称为最优变换参数。

加工余量优化模型一般采用层次定位优化策略进行求解, 具体可参考文献 [4]。与数字化检测配准原理类似, 优化后的定位变换 $(\mathbf{R}^*, \mathbf{t}^*)$ 刻画了测量坐标系相对于工件坐标系的位置关系; 反之, 逆变换 $((\mathbf{R}^*)^{-1}, -(\mathbf{t}^*)^{-1} \cdot \mathbf{t}^*)$ 则刻画了工件坐标系相对于测量坐标系的位置关系, 由此能够确定单个叶片或者整体叶盘的定位基准, 并以约束条件同时保证加工余量的自适应优化分布。

3 基于对称原则的加工余量自适应优化

不同于单一叶片, 整体叶盘的加工余量优化具有自身的特点。除了考虑叶盘的整体余量分布, 单个叶片的位置及形状变化对其统一定位基准也会产生影响。因此, 针对焊接式整体叶盘的工艺特性, 本文从动平衡角度出发, 提出基于对称原则的叶盘加工余量自适应优化方法^[2], 精确度量当前焊接叶盘毛坯的方位及形状变化, 实现充分改善整体叶盘运行性能的分组定位加工方式。

3.1 总体思想

叶盘加工余量自适应优化的总体思想是根据焊接毛坯的三坐标测量结果, 首先判定能否采用统一的定位基准进行数控加工; 若不能, 按照对称的定位原则, 逐层分解确定合适的叶片加工相对定位基准, 即分组定位加工方式, 从而在保证叶片型面误差要求的前提下尽可能地保持整体叶盘加工的一致性。

3.2 具体过程

假定叶盘的单个叶片按照上节方法能够获得优化的定位基准, 并保证余量的优化分布。这里单个叶片的定位基准是指叶片相对于整体叶盘轮毂基准的位置。若无法满足此前提条件, 不需做任何处理, 直接判定焊

接叶盘无法加工,需要采用补焊或修复的方式重新修整毛坯。

设焊接式整体叶盘毛坯的测量点集为 P , 设计模型为 S , 其中包含了 M 个叶片, 则叶盘加工余量自适应优化的具体过程如下:

步骤 1: 以测量点集 P 与设计模型 S 进行余量优化建模与求解, 若存在最优解, 返回最优的定位变换 (R^*, t^*) , 并建立自适应工艺几何模型 S^{*1} , 退出; 若否, 转到下一步;

步骤 2: 按照对称原则提取整体叶盘的部分设计模型 S_1^2, S_2^2 , 并同时划分测量点集 P 为两个子集 P_1, P_2 , 分别进行余量优化建模与求解, 并判断是否存在最优解。若存在, 返回最优的定位变换 (R_1^{*2}, t_1^{*2}) 和 (R_2^{*2}, t_2^{*2}) , 并建立自适应工艺几何模型 S^{*2} , 退出; 若否, 转到下一步;

步骤 3: 按照对称原则进一步分解, …… , 直到以整体叶盘的单个叶片毛坯作为余量优化对象, 优化计算得各个叶片的相对定位基准, 返回最优的定位变换 $(R_1^{*M}, t_1^{*M}), (R_2^{*M}, t_2^{*M}), \dots, (R_M^{*M}, t_M^{*M})$, 并建立自适应工艺几何模型 S^{*M} , 退出。

其中, 余量优化建模与求解采用上节方法; 而所建立的自适应工艺几何模型, 将作为数控加工的参考模型, 用以估计整体叶盘的焊接变形误差。

事实上, 由于焊接式整体叶盘的单个叶片变形差异较大, 所以多数情况下余量自适应优化的最终结果都可能是单个叶片的独立加工。然而, 在一定的公差允许条件下, 寻找保持叶盘加工一致性的分组定位加工方式还是有意义的。

可以看出, 叶盘加工余量的自适应优化过程充分考虑了焊接毛坯的实际误差分布特点, 按照统一到逐层分解的定位方式确定了合适的叶片加工相对基准。这一过程不但满足了实际加工工艺需求, 也最大程度地保证了整体叶盘运行的动平衡特性, 符合实际工程背景需要。

4 算例分析

以某焊接式整体叶盘加工为例, 分析并计算其余量优化的详细过程, 如图 1 所示: 该整体叶盘包含了 20 组叶片, 图 1(a) 为设计模型, 图 1(b) 为毛坯模型。为了模拟焊接变形, 从其中某一叶片开始, 按逆时针方向进行叶片编号, 并随机施加沿叶片相对坐标系 z_c 轴方向的旋转变换, 建立焊接毛坯模型。具体的旋转角度参见表 1, 满足正态分布 $N(0, 0.1^2)$ 。

将毛坯模型进行等参数离散, 并添加随机噪声 $(N(0, 0.1, 0.01^2))$ 生成测量仿真数据, 如图 2 所示。其中, 每组叶片包含了 60 个测量点(叶尖:40, 过渡:10, 叶根:

表1 焊接变形定位变换参数设置

编号	旋转角度 / (°)	编号	旋转角度 / (°)	编号	旋转角度 / (°)
1	0.119084	8	0.141514	15	-0.101063
2	-0.120246	9	-0.080509	16	0.061446
3	-0.001979	10	0.052874	17	0.050774
4	-0.015672	11	0.021932	18	0.169243
5	-0.160409	12	-0.092190	19	0.059128
6	0.025730	13	-0.217067	20	-0.064360
7	-0.105647	14	-0.005919		

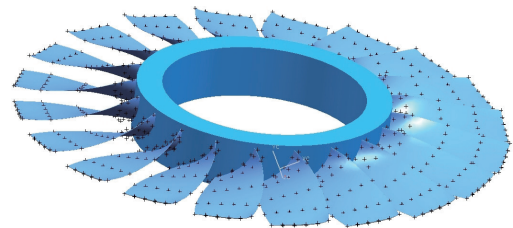
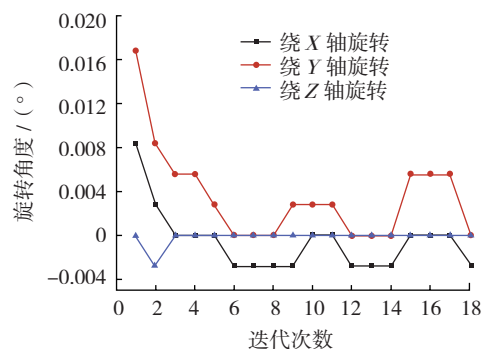


图2 焊接式整体叶盘毛坯测量点集分布

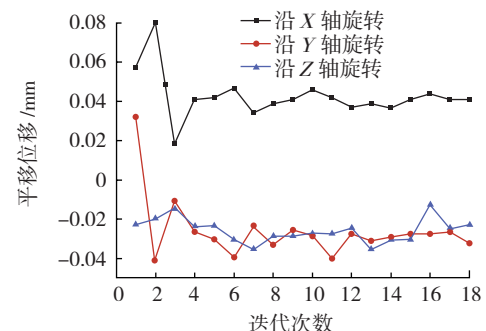
Fig.2 Measurement points for linear friction blisk blank

10)。

利用本文所提方法进行叶盘加工余量的自适应优化。针对叶盘整体余量优化求解时, 迭代呈发散状态, 判断不存在优化解。进而按单双编号将叶片分为两组, 分别进行定位及优化, 具体的迭代过程如图 3、4 所示。



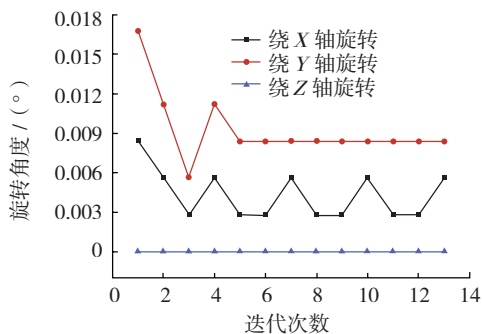
(a) 旋转量变化



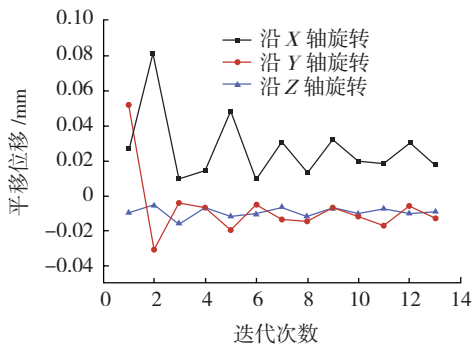
(b) 平移量变化

图3 单号组叶片加工余量优化的迭代过程

Fig.3 Allowance Balancing Iteration for odd group



(a) 旋转量变化



(b) 平移量变化

图4 双号组叶片加工余量优化的迭代过程

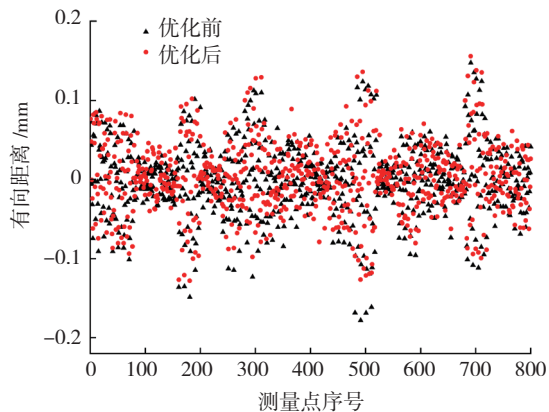
Fig.4 Allowance balancing iteration for even group

按照两个定位基准进行焊接式整体叶盘加工,其余量的分布能够获得优化,结果如表 2、图 5、6 所示。

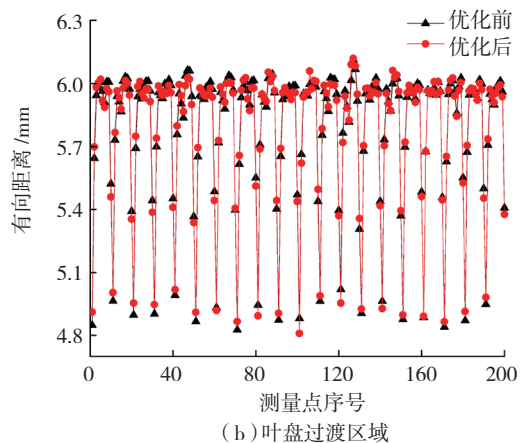
可以看出,优化后的叶盘叶片相对定位基准发生了变化,叶片不同区域的有向距离误差也获得了不同程度的降低。这一结果保证减少焊接工艺引起的叶片位置偏差和余量分布不均对叶盘加工质量的影响。

5 结束语

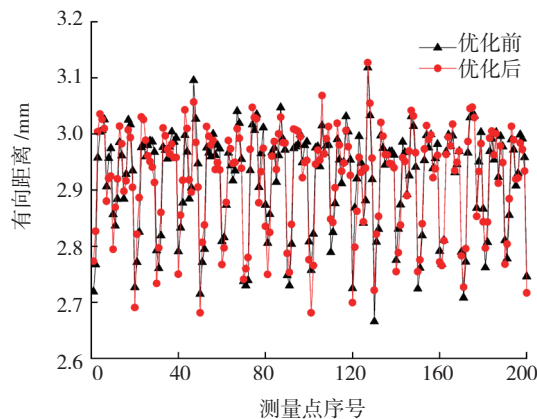
针对焊接式整体叶盘毛坯可能存在变形、余量不均的问题,本文从动平衡角度出发,提出了一种基于对称原则的叶盘加工余量自适应优化方法。算例及分析表明:本文方法能够有效地控制焊接叶盘毛坯余量分布,



(a) 叶盘叶尖区域



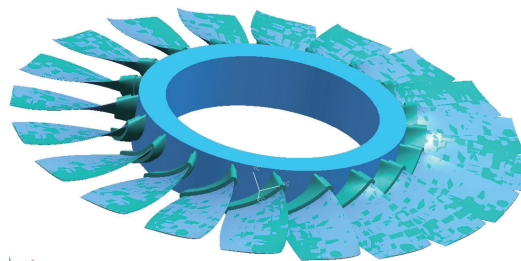
(b) 叶盘过渡区域



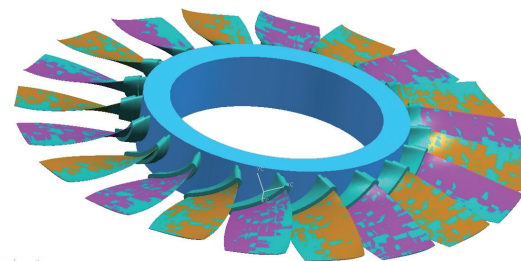
(c) 叶盘叶根区域

图5 余量优化前后的有向距离误差对比

Fig.5 Error comparison of allowance balancing



(a) 余量优化前



(b) 余量优化后

图6 余量优化前后的模型对比

Fig.6 Model comparison of allowance balancing

确定合适的定位基准,从而降低焊接变形误差对数控加工效率、精度的影响。

(下转第 55 页)

人机交互设备的采用为线缆的虚拟装配工作提供了很大的便利。人机交互 (Human-Computer Interaction, HCI) 是研究人、计算机以及它们间相互影响的技术。人机交互技术是当前信息产业竞争的一个焦点,世界各国都将人机交互技术作为重点研究的一项关键技术。美国总统信息技术顾问委员会的“21 世纪的信息技术报告”中将“人机交互和信息管理”列为新世纪 4 项重点发展的信息技术 (还包括软件、可伸缩信息基础设施、高端计算) 之一,它的目标是研制“能听、能说、能理解人类语言的计算机”^[3]。

将人机交互技术应用到飞机线缆虚拟装配中不仅考虑到装配过程的可行性,而且十分关注工人在装配过程中的方便性,以利于提高工作效率和产品装配质量,如图 6 所示。人机交互技术的应用使装配技术人员可以利用特制的头盔和数据手套等辅助设备,进入数字化的虚拟装配环境,进行真正装配过程的虚拟仿真,该方法可以优化装配工艺路径,进一步提高工作效率和产品装配质量。国内对于人机交互技术的应用尚处于起步阶段,人机交互设备大多应用于机器人领域,很少应用于飞机装配等大型复杂产品的生产研制。

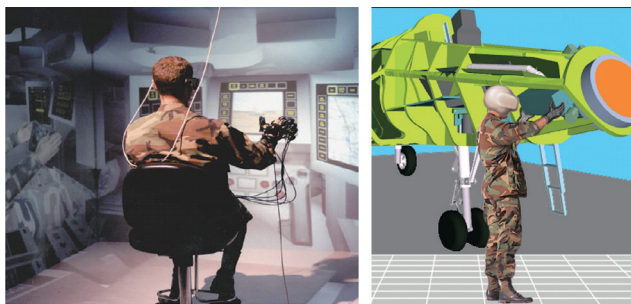


图6 基于虚拟现实的数字化虚拟仿真模拟
Fig.6 Digital virtual simulation based on virtual reality

据有关数据显示,虚拟装配技术的应用使波音、空客取得了显著的效益如空客典型部件装配周期缩短了 60%,装配工艺设计周期缩短了 30%~50%,装配成本减少了 20%~30%。波音公司在研制 X-32 机时,随着 X-32 装配工作的进展,工人们开始佩带一种挂在腰间的微型计算机,该机通过单目镜片,能把装配顺序和装配好的部件状态投射到正在装配部件的上方,让工人方便直观地进行装配工作,无需再细读图纸,翻阅工艺文件,使装配周期缩短 50%,成本降低 30%~40%。

3 结论

虚拟装配技术的出现和发展为复杂产品的优质、高效和可靠性装配提供了一条新的研究途径。该项技术已经成为数字化制造技术在制造业中研究和应用的典范,为飞机线缆装配研制提供了一种全新的实施途径。

针对虚拟现实技术未来的发展方向,目前需要发展的关键技术有以下 3 个方面:

(1) 虚拟环境模型构建技术: 通过研究解决模型数据接口问题、模型轻量化问题以及装配环境模型优化问题等,从而合理进行线缆虚拟装配环境的构建工作,使装配工艺顺序和路径得到有序的规划,进而缩短工作周期。

(2) 虚拟装配工艺规划技术: 虚拟装配工艺规划技术充分基于人的经验和感知,通过模拟真实装配过程,实现产品的装配顺序和路径规划,从而提高装配精度和装配可靠性,是一种提高装配现场现代化管理水平的有效手段。

(3) 现场可视化装配技术: 现场可视化装配是通过将装配过程仿真结果进行可视化处理,再将处理后的结果在车间/工作地输出;同时还将有关的工作内容以文字(超链接)的形式输出。利用可视化技术对仿真结果进行处理,可以脱离原来的仿真平台也可以看到有关的仿真结果,并且加入必要的文字技术使得仿真结果更容易理解和接受。

通过将以上技术应用于飞机线缆虚拟装配工作中,有助于飞机装配生产线建设,保证了调试效率及装配质量,从而缩短飞机装配周期,提高生产力,使我国飞机装配技术水平得到进一步的提升。

参考文献

- [1] 夏平均,姚英学. 虚拟装配的研究综述与分析 I. 哈尔滨工业大学学报, 2008(5):740-744.
- [2] 刘检华,姚璐,宁汝新. 虚拟装配工艺规划实现技术研究. 机械工程学报, 2004, 40(6):138-143.
- [3] 董士海. 人机交互的进展及面临的挑战. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004(1):1-13.

(责编 早春)

(上接第 33 页)

参考文献

- [1] 任军学,张定华,王增强,等. 整体叶盘数控加工技术研究. 航空学报, 2004, 25(2):205-208.
- [2] 张定华,张莹,吴宝海,等. 自适应加工技术在整体叶盘制造中的应用. 航空制造技术, 2008(13):51-55.
- [3] 史耀耀,段继豪,张军锋,等. 整体叶盘制造工艺技术综述. 航空制造技术, 2012(3):26-31.
- [4] 张莹. 叶片类零件自适应数控加工关键技术研究[D]. 西安:西北工业大学, 2011.
- [5] 王文理,袁士平. 自适应加工技术在数控加工领域的分类与应用. 航空制造技术, 2013(6):26-29.
- [6] GAO J, CHEN X, YILMAZ O, et al. An integrated adaptive repair solution for complex aerospace components through geometry reconstruction. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(11-12):1170-1179.

(责编 宇军)