

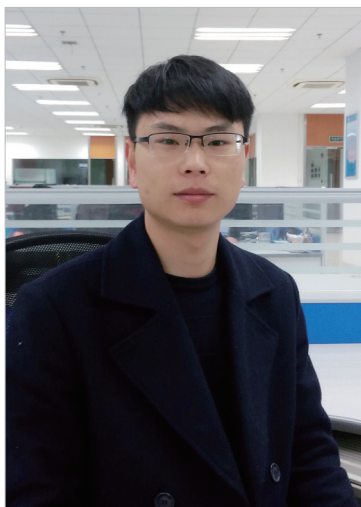
基于知识的飞机制造协调路线 交互设计技术*

吕政伟, 谭昌柏, 安鲁陵, 王志国
(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 飞机制造协调路线是一种重要的工艺文件,是联系互换协调方案制订和容差分配的纽带。飞机制造协调路线的数字化设计对于开展计算机辅助容差设计,以及实施飞机数字化工艺具有重要意义。首先,对飞机制造协调路线的设计知识进行分类,建立其知识表示模型,并运用知识推理技术实现知识的应用。其次,建立了制造协调单元的图符库,运用图符智能捕捉技术辅助制造协调路线的交互式创建。最后,建立了飞机制造协调路线信息模型,进而实现了面向容差分配的规范化尺寸协调工艺文件自动生成,为计算机辅助容差设计提供技术支持。

关键词: 协调路线; 知识推理; 图符库; 智能捕捉; 信息模型

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.04.060



吕政伟
南京航空航天大学机电学院硕士研究生,研究方向为 CAD/CAM。

工艺规划是连接飞机制造和设计的关键环节,为飞机生产提供工艺准备,并贯穿于飞机零件制造以及装配的全过程^[1]。实施飞机数字化工艺技术对于实现设计与制造的并行、工艺与工装的并行、工艺与制造及检验的并行,从而缩短生产准备周期、提升飞机制造质量意义重大^[2]。互换协调是飞机制造工艺的中心问题,互换协调性的好坏,取决于互换协调方法选择、互换协调路线设计及容差分配合理性等工艺因素。互换协调图表作为一种主要的互换协调工艺文件,规定了零部件、零件工艺装备、装配工艺装备、标准工艺装备之间的制造关系、从属关系及协调关系。然而,在实施飞机数字化工艺所要求的并行 workflow 中,互换协调图表不涉及零部件或工装的具体尺寸或形状的形成过程,造成目前工艺规划系统中互换协调方案制订与容差设计的相对孤立,无法满足它们互为校验的内在需求。飞机制造协调路线是根据

所采用的协调体系,通过各工艺装备间的协调关系,表达机体上某处配合或对接部位的一组或一个协调尺寸、形状在形成过程中的传递关系和传递流程图^[3]。它包含了零部件制造的尺寸、形状传递和协调关系,以及尺寸容差信息。飞机制造协调路线是表达其工艺尺寸链和结构尺寸链的核心要素,是制造协调准确度和容差分配的信息基础。互换协调方案和容差分配存在互为校验的内在需求,而制造协调路线则是联系它们的重要纽带。

在现行的工艺设计模式下,制造协调路线先由工艺员手工绘制(包含尺寸公差设定),再据此整理出工艺(或结构)尺寸链,然后进行制造协调准确度计算或容差分配。一方面,协调路线设计时需参照大量的标准、规范、经验数据等分散知识,如产品及工装图纸、工艺规程、公差配合标准、容差分配标准、设备加工精度、夹具定位精度等,存在对人员技术要求

* 基金项目: 国家自然科学基金(51275236)。

高、设计繁琐和效率低下等问题。另一方面,制造协调路线所包含的尺寸链和公差信息需要经过工艺员的整理和提取,才能用于准确度计算和容差分配,未实现工艺信息的数字量传递。传统的设计方法不符合飞机数字化工艺的要求,严重制约了飞机制造工艺水平的提升。张平生^[4]研究了基于实例和知识的互换协调图表生成,该方法通过启发式知识引导工艺人员进行互换协调图表的编制。王爽等^[5]构建了计算机辅助飞机装配协调工艺设计系统,实现了基于规则推理的互换协调图表创建。上述研究是针对互换协调图表的设计,与本文的研究内容不同,但其设计思想具有参考价值。姚澎涛等^[6]提出了一种基于尺寸协调关系定义的飞机制造协调路线图的自动生成方法,采用格式化文本定义尺寸协调工艺文件,缺乏直观性且编写复杂,对工艺人员要求高。黄巍等^[7]研究了计算机辅助飞机制造协调路线设计,实现了基于图符定义的协调路线图创建,该方法通过预定义的图符编号来确定协调关系和尺寸传递顺序,操作繁琐,灵活性差。总体上看,相关研究对飞机制造协调路线的智能化设计、面向容差分配的数据集成等方面关注较少,存在的不足也有待进一步研究。

随着计算机科学技术和人工智能技术的迅速发展,基于知识的智能系统已在工业、农业、军事和科教等国民经济领域得到了广泛应用。在工程设计领域,知识通常是指能用于工程设计与决策的各种信息和经验的总和。如何合理地存储、组织、管理、应用和共享知识是基于知识的智能系统所面临的一个十分关键的问题^[8-11]。基于知识工程和图形化设计思想,本文研究实现了基于知识的飞机制造协调路线设计系统。在知识分类表达基础上建立了设计知识库,同时建立了制造协调单元的图符

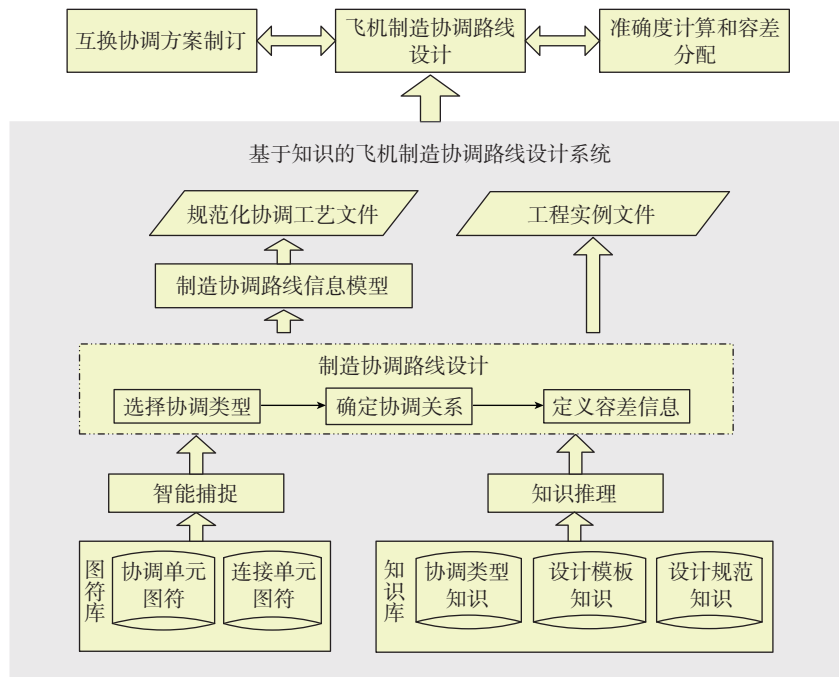


图1 基于知识的飞机制造协调路线设计系统架构

Fig.1 Knowledge-based aircraft manufacturing coordination route design system architecture

库,运用知识推理和图符智能捕捉技术实现了协调路线的启发式设计;建立了制造协调路线的信息模型,设计了面向容差设计的规范化尺寸协调工艺文件的自动生成算法,从而实现了与容差分配决策系统的应用集成。

制造协调路线设计系统框架

基于知识的飞机制造协调路线设计系统旨在充分利用各种设计知识,准确规范地定义飞机制造中尺寸形状的传递和协调关系,以及尺寸公差信息的传递和协调关系,作为容差分配的前端输入载体,搭建互换协调方案制订和容差分配间的信息桥梁。系统的总体框架如图1所示。

飞机制造协调路线设计系统中建立知识库和图符库辅助协调路线设计。知识库中包含了各种设计知识,通过知识推理方法,为协调路线设计提供知识支持。图符库中定义协调单元图符和连接单元图符,运用智能捕捉技术实现协调路线的交互设计。完成协调路线设计后,建立制

造协调路线信息模型,将协调路线转换成规范化协调工艺文件进行输出。同时,保存工程实例文件,方便协调路线的修改和重用。

制造协调路线的知识建模与重用

1 飞机制造协调路线的知识建模

知识建模是通过建立抽象的模型来对各类设计知识进行表达,进而基于该模型实现制造协调路线设计中知识重用,其中涉及到的知识可分为基本协调模型、快速设计模板、设计规范知识和图符4类。

(1) 基本协调模型。飞机制造中的协调问题,按协调部位的结构特点可以分为外形协调、交点协调和外形与交点的综合协调3类。不同类型的协调问题,所要处理的协调关系和容差信息不同。为了方便知识表示和重用,对典型协调问题进行分类并建立其基本协调模型,主要包括通用外形协调、副翼对机翼的吻合性、双曲面蒙皮零件和型架内型板协调、型架卡板工作外形上相同百分点连

线的直线度、叉耳中心距、孔轴孔配合孔中心距、孔轴孔与叉耳综合配合、孔轴孔配合同轴度等。

(2) 快速设计模板。快速设计模板是制造协调路线设计的知识模板,可快速生成协调路线的原型,提高设计效率。飞机制造协调路线的设计要综合考虑协调类型、原始移形依据、移形或协调环节数目、结构单元协调部位等因素。协调路线可能包含多组工艺装备或结构单元的移形协调关系,其关系错综复杂,不便于协调路线原型的快速生成。如某型飞机机身与机翼结合交点的协调路线,就包含机翼与前机身、机翼用交点检验量规与机身用交点检验量规、机翼标准样件与前机身标准样件等多处协调要求。为了便于协调路线原型的生成,将协调路径定义为从原始协调依据到最终有装配协调要求的工艺装备或结构单元的整个尺寸、形状传递过程。其中,规定了协调路线中只包含一对装配协调关系,即只有两条协调路径。协调路线中不产生协调误差的移形环节忽略不计,即两条协调路径共有的移形环节忽略不计。对于该规定在表达同时

具有多个装配协调关系时的不足,可基于图符库进行交互式的设计修正。

(3) 设计规范知识。设计规范知识是协调路线设计过程中需参照的各种设计规范和标准,包含公差配合标准、工艺容差标准、加工准确度、定位准确度及各种实用计算公式等知识。

(4) 图符。图符是协调路线中表示各结构单元和移形协调过程的图形化符号,是构成协调路线的基本元素,分为协调单元图符和连接单元图符两类。协调单元图符表示各种制造协调单元,连接单元图符表示单元间的移形协调关系。

利用面向对象的方法对飞机制造协调路线进行知识建模,如图2所示。其中各对象的含义如表1所示。

2 飞机制造协调路线的知识推理

知识推理实际是一个由已知的知识推导出结论,或对结论进行求证的过程,即知识的使用。从推理方法上分类,推理可分为基于规则的推理(Rule-based Reasoning, RBR)、基于模型的推理(Model-based Reasoning, MBR)和基于实例的推理(Case-based Reasoning, CBR)。在

基于知识的飞机制造协调路线设计系统中,使用基于规则的推理方法来实现知识运用,推理规则由 if - then 形式的规则语言记录,通过这些规则推理出设计知识。

例如,在快速设计知识模板生成协调路线原型的推理过程中,用 A 代表协调类型, B 代表协调路径 1 上的协调单元数目, C 代表协调路径 2 上的协调单元数目, M 代表原型模板,则推理规则为: if A and B and C then M。

基于图符库的协调路线图形化设计

1 图符和图符库

飞机制造协调路线的图形化设计,即使用预定义的可视化图符库,通过图符选择、拖放式定位、协调单元参数交互编辑等工具手段实现飞机制造协调过程中制造协调单元的移形过程的完整定义。采用图形化技术设计制造协调路线具有直观性好、灵活性强的优点。为了满足图形设计的需求,对图符的操作应该满足以下 5 点要求。

(1) 动态定位。根据协调路线

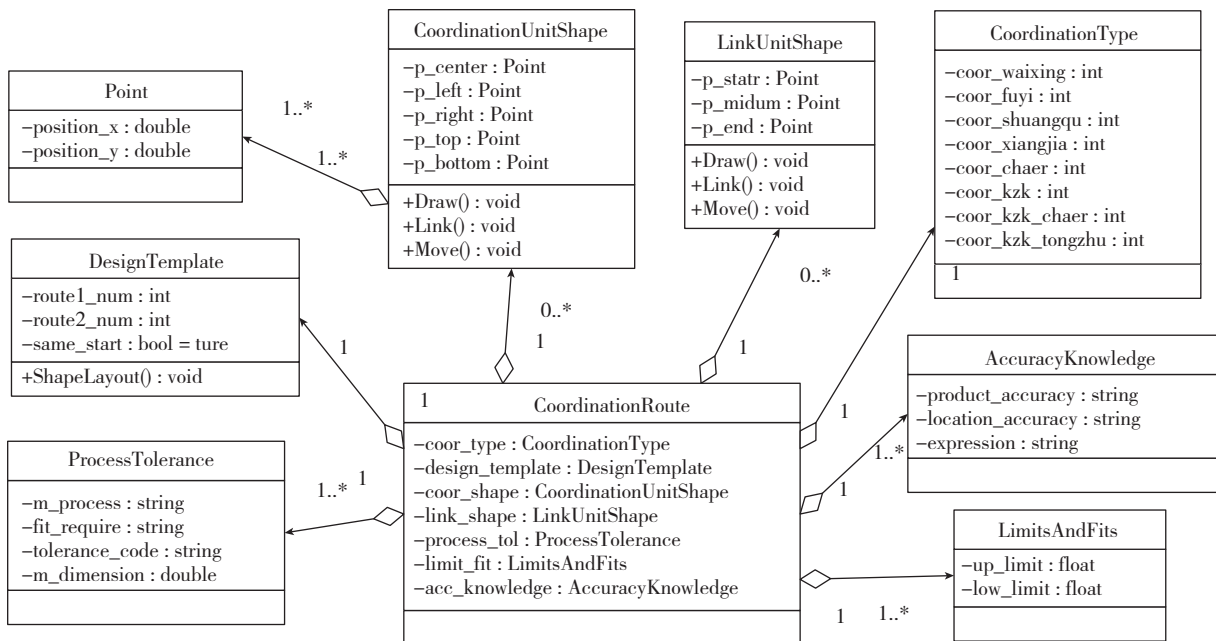


图2 飞机制造协调路线的知识模型

Fig.2 Aircraft manufacturing coordination route knowledge model

表1 飞机制造协调路线知识模型的对象含义

对象	含义
CoordinationRoute	协调路线对象,由协调类型、设计模板、设计规范知识、图符组成
CoordinationType	协调类型对象,定义了协调单元间的协调关系和容差信息的类型
DesignTemplate	设计模板对象,定义多种飞机制造协调路线的原型
ProcessTolerance	工艺容差对象,定义飞机制造过程的工艺容差
LimitsAndFits	公差配合对象,定义孔、轴公差带及其极限偏差
AccuracyKnowledge	准确度知识对象,定义了加工准确度、定位准确度和各种实用计算公式等知识
CoordinationUnitShape	协调单元图符对象,定义了协调单元的位置信息和绘图、连接、移动等操作
LinkUnitShape	连接单元图符对象,定义了连接单元的位置信息和绘图、连接、移动等操作
Point	点对象,定义坐标点

的设计需求,创建图符时有鼠标输入动态定位。

(2)“热点”定位。协调路线布局要清晰整洁,图符的中心点排布在一条直线上。因此,在设计主视图中设置了多纵横交错的标尺线,并将标尺线的交点称为“热点”,图符按距离鼠标输入的最近“热点”进行动态定位。

(3)自由移动。图符生成后要便于交互修改,可采用鼠标拖放进行自由移动并定位。

(4)连接智能捕捉。在给定的范围内,创建连接图符时,连接单元图符可以智能捕捉到协调单元图符的边界点,自动连接。

(5)集成尺寸容差信息。在图形化协调路线设计中,图符充当着尺寸链的信息输入接口,并将其承载的几何尺寸、公差和移形误差等信息集成到协调路线模型中。

图符库是各种图符的集合,图3为图符库的层次结构模型。整个图符库由抽象基类 ShapeBase 衍生而来,ShapeBase 中定义了 Draw()、Move()、Link()、GetData()、GetPosition() 等具有多态性的图符基本操作,便于派生类对象根据自身特性进行相应的操作。从 ShapeBase 基类派生出了 CoordinationUnitShape

类和 LinkUnitShape 类,分别代表协调单元图符和连接单元图符两种类别。为了更清楚地表达不同协调单元和连接单元对象的特性,从 CoordinationUnitShape 类派生出了 ProcessEquip1、ProcessEquip2、ProcessEquip3、ProcessEquip4、ProcessEquip5 等 5 个图符类代表不同的装配协调单元,从 LinkUnitShape 类派生出 LinkUnitOne、LinkUnitTwo、FitUnit 3 个图符类代表不同的连接单元。新派生的子类中都有表示位置信息和容差信息的 Position 对象和 Data 对象,通过自身定义的操作可实现图符的生成、移动、连接、定位等功能。

2 图符智能捕捉算法

图符智能捕捉是指图符在绘制、移动、连接的过程中,对一些特殊定位点的识别和定位的过程,例如协调单元图符对“热点”的智能捕捉和连接单元图符对协调单元图符连接点的智能捕捉等。图4为协调单元图符“热点”的捕捉定位过程,具体步骤如下:

(1)从鼠标处获取图形的目标定位点,存入图符的 Position 对象中的 p_center 点中。

(2)在绘图窗口中绘制定位“热点”。

(3)以 p_center 点为中心,以“热点”水平间距的两倍为边长,画出一个矩形区域,并找出矩形区域内包含的所有“热点”。矩形区内的“热点”数目很少,不会超过 4 个,可以大大减小带搜索“热点”的数量。

(4)计算矩形区内的每个“热点”与 p_center 点的距离,找到最近的“热点”。

(5)将距离最近的“热点”的值赋值给 p_center 点,调用图符的 Draw() 函数绘制图形。

(6)重画窗口,清除以前的图形。

连接单元图符对协调单元图符的智能捕捉过程与上述过程类似,这里不做描述。

面向容差分配的制造协调路线信息模型

在知识引导和图形化工具的支持下,设计完成的飞机制造协调路线清楚地体现飞机零部件配合尺寸的形成过程和协调关系,同时也集成了协调准确度计算所需的完备容差信息。但这些信息还需要整理并转化为尺寸链,才能为容差分析计算所用。制造协调路线的信息模型是一种数据结构,包含了协调路线中的所有协调关系和数据信息。利用该模型可以实现规范化尺寸协调工艺文件的自动生成,为下一步的容差分析计算提供信息载体。协调路线信息模型的建立过程分为协调环提取和模型构建两个部分。

1 协调环提取

在工艺尺寸链中,将两个制造协调单元间的尺寸移形关系称为组成环,将两个制造协调单元间的尺寸配合关系称为封闭环,并将组成环和封闭环统称为协调环。在系统中设计了协调环的数据存储结构,该结构由两部分内容组成:一部分记录制造协调单元间的移形过程和协调关系;另一部分记录制造协调单元的容差和移形误差等信息。图5展示了协

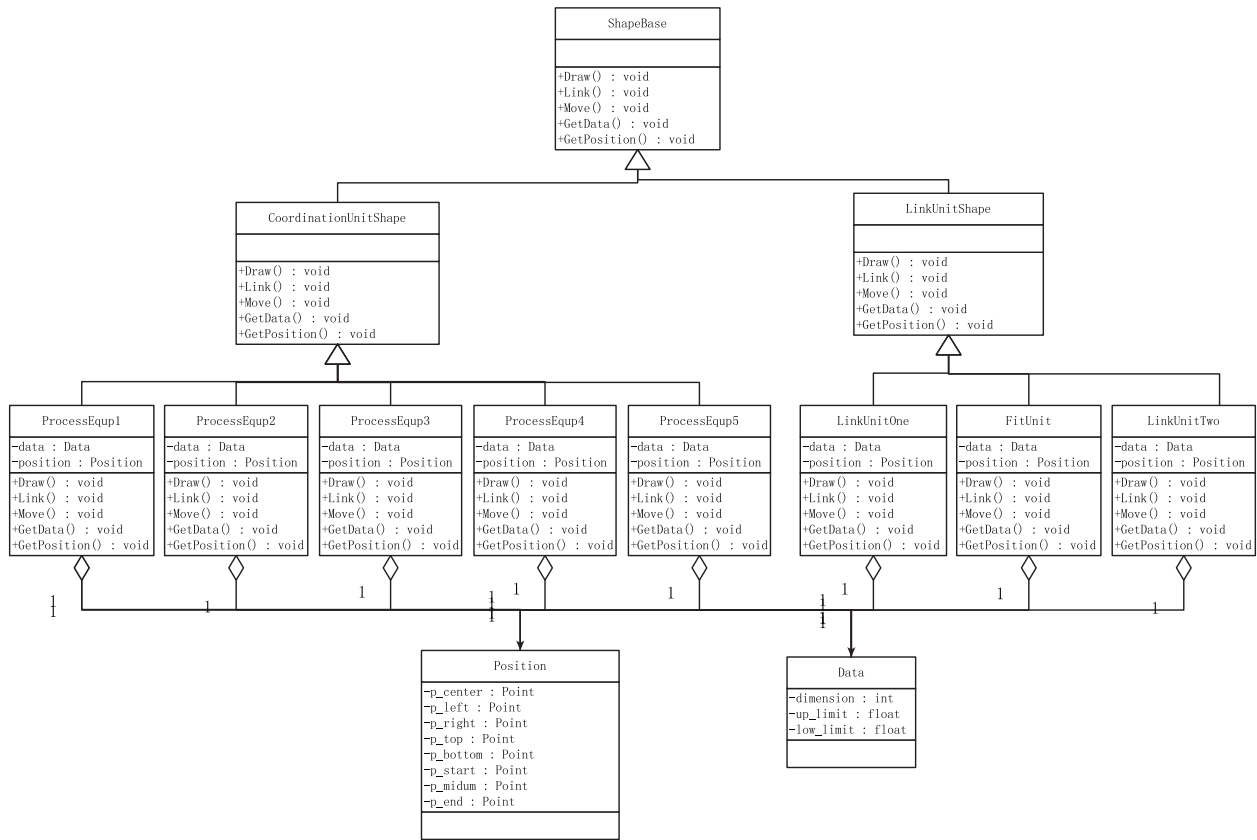


图3 图符库层次结构模型

Fig.3 Figure library architecture model

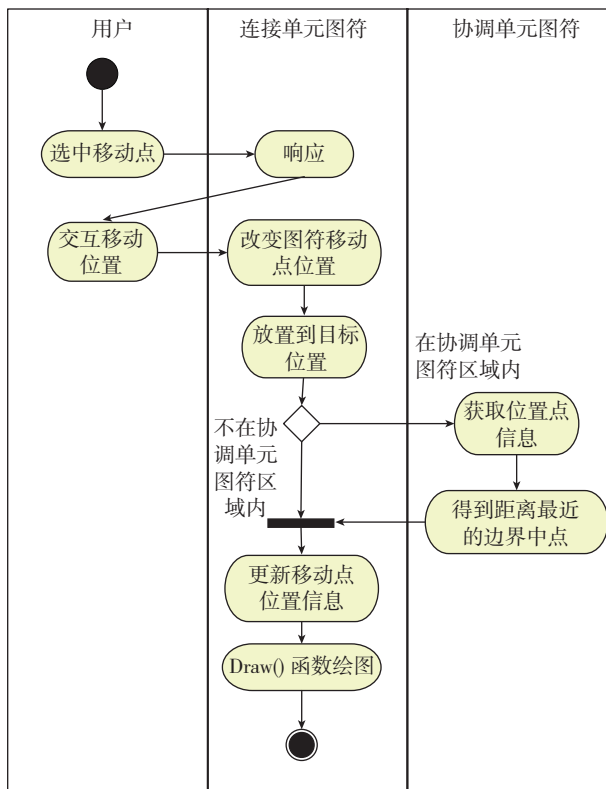


图4 “热点”定位过程

Fig.4 Getting “Hot Point”

调环的提取过程,根据图符智能捕捉功能可知,连接单元图符的首尾端点必然为协调单元图符的边界点;利用连接单元图符和协调单元图符的位置关系,可得到协调单元的协调关系和制造容差信息,提取这些信息并存储到协调环的数据结构中。

2 构建信息模型

构建协调路线信息模型的过程如图6所示。首先遍历连接单元图符,提取出飞机制造协调路线中的所有组成环和封闭环。这些协调环包含了飞机制造协调路线中的所有协调关系和容差信息,这些信息还需要结构化处理,才能作为工艺尺寸链输出,为此建立了制造协调路线的统一信息模型来规范协调工艺文件的输出。分析协调路线的移形特点可知,协调路线具有单向传递和多分支的特点,可采用回溯溯源的方法将孤立的协调环串联起来构建协调路线信息模型,具体步骤如下。

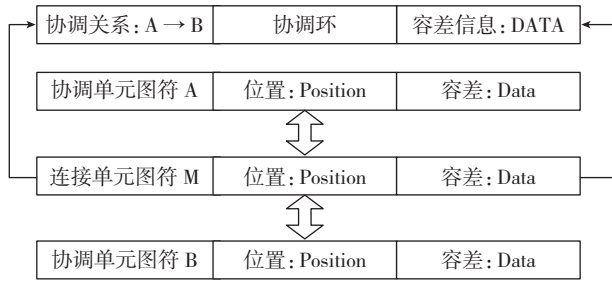


图5 协调环提取示意图
Fig.5 Coordination link collection sketch map

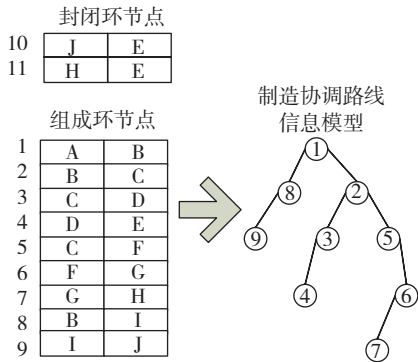


图6 协调路线信息模型创建示意图
Fig.6 Coordination route information model creating sketch map

(1) 获取协调路径。

· 从封闭环 10 的协调单元 J 开始,在组成环链表中寻找以 J 为移形结束状态的组成环,从而找到组成环 9。根据 9 中的协调关系,在组成环链表中寻找以 I 为移形结束状态的组成环,从而找到组成环 8。根据 8 中的协调关系,在组成环链表中寻找以 B 为移形结束状态的组成环,从而找到组成环 1。根据 1 中的协调关系,在组成环链表中寻找以 A 为移形结束状态的组成环,无法找到,结束寻找。得到协调路径“1-8-9”。

· 从封闭环 10 的协调单元 E 开始,重复上述过程得到协调路径“1-2-3-4”。

· 同理,从封闭环 11 中得到协调路径“1-2-5-6-7”和协调路径“1-2-3-4”。

(2) 对协调路径进行整理,得到 3 条协调路径“1-8-9”、“1-2-3-4”和“1-2-5-6-7”。

(3) 将协调路径按树形结构排列,合并相同组成环,形成制造协调

路线信息模型。

(4) 对该结构进行遍历,输出封闭节点信息,即可得到规范化尺寸协调工艺文件,即工艺尺寸链文件。

系统实现

根据上述方法,采用 Visual Studio C++ 开发了基于知识的飞机制造协调路线设计系统。以叉耳配合交点中心距的典型协调路线为例,说明系统的工作流程。首先,确定协调路线的类型,利用快速设计模板,设置各协调路径上的工装数目和起始工装情况,生成协调路线原型,同时可利用图符库提供的图符工具对协调路线原型进行修改,如图 7 所

示。然后,利用公差分配标准和公差配合尺寸等知识,通过公差代号搜索出极限偏差值,完成工装制造信息的定义,最终生成规范化协调工艺文件,如图 8 所示。最后,将工程文件保存。

结束语

基于知识工程的思想,建立了飞机制造协调路线设计中基本协调模型、快速设计模板、设计规范知识和图符 4 类知识模型,进而提出了基于知识的飞机制造协调路线设计方法。开发了飞机制造协调路线数字化设计系统,以制造协调单元和连接单元的图符库为基础,采用图形智能捕捉算法实现了制造协调路线的快速创建。建立了制造协调路线的信息模型,在此基础上设计了规范化尺寸协调工艺文件的自动生成算法,从而实现了面向制造准确度计算和公差分配的数据集成。本文的研究打通了飞机制造工艺设计中互换协调方案制订和公差分配的数字化桥梁,为飞机数字化工艺的深入开展提供了技



图7 系统界面和协调路线原型的生成
Fig.7 System interface and coordination route prototype creating

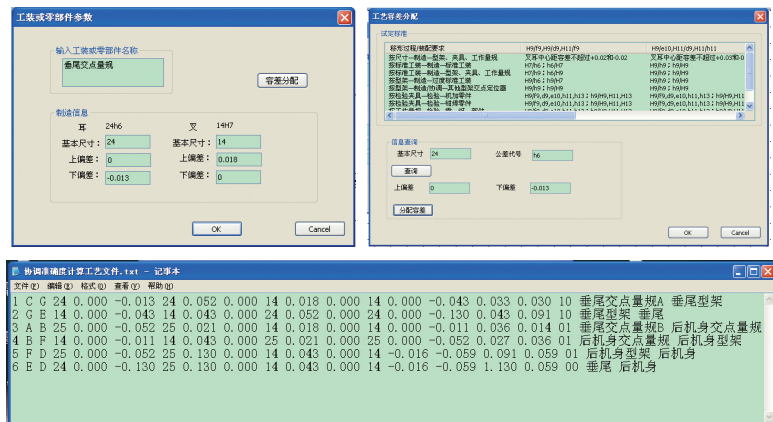


图8 规范化尺寸协调工艺文件的生成
Fig.8 Generation of standardized size coordination process documents

术条件。

参考文献

- [1] 田锡天, 耿俊浩, 唐健均, 等. 飞机三维数字化装配工艺设计与管理技术[J]. 航空制造技术, 2015(4): 51-54.
- TIAN Xitian, GENG Junhao, TANG Jianjun, et al. Design and management technology for digital three-dimensional assembly process for aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(4): 51-54.
- [2] 许建新. 飞机数字化工艺技术发展趋势初探[J]. 航空制造技术, 2010(3): 44-47.
- XU Jianxin. Trend in digital manufacturing process planning technology for aircraft industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(3): 44-47.
- [3] 应维云, 周儒荣, 程宝隼. 计算机辅助飞机制造协调问题求解机制的研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1997, 20(1): 57-62.
- YING Weiyun, ZHOU Rurong, CHENG Baoqu. Research on computer aided coordination problem-solving mechanism in aircraft manufacture[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1997, 20(1): 57-62.
- [4] 张平生. 计算机辅助飞机协调图表设计技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- ZHANG Pingsheng. Computer-aided aircraft coordinate chart design technology research[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [5] 王爽, 张振明, 田锡天, 等. 计算机辅助飞机装配协调工艺设计系统研究[J]. 机械设计与制造, 2006(10): 43-44.
- WANG Shuang, ZHANG Zhenming, TIAN Xitian, et al. Computer-aided aircraft assembly coordination process planning system[J]. Machinery Design and Manufacture, 2006(10): 43-44.
- [6] 姚澎涛, 谭昌柏, 周来水. 基于尺寸协调关系定义的飞机制造协调路线图的自动生成[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 16-22.
- YAO Pengtao, TAN Changbo, ZHOU Laishui. Automatic diagram building of coordination route for aircraft manufacture based on definition of dimension coordination relation[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(1): 16-22.
- [7] 黄巍, 李泷泉, 黄翔. 计算机辅助飞机制造协调路线图设计研究[J]. 机械制造与自动化, 2014, 43(2): 121-125.
- HUANG Wei, LI Shuangqiao, HUANG Xiang. Research on computer aided design of aircraft manufacturing coordination route diagram[J]. Machine Building and Automation, 2014, 43(2): 121-125.
- [8] 宋文娟, 宋承志, 李迎光. 基于知识的飞机机架靶标智能设计技术[J]. 中国制造业信息化, 2007, 36(23): 59-65.
- SONG Wenjuan, SONG Chengzhi, LI Yingguang. The knowledge-based intelligent design technology of aircraft jig target[J]. Manufacturing Information Engineering of China, 2007, 36(23): 59-65.
- [9] Suppapitnarm Apichart. Capturing mechanical design knowledge and experience for catalogue-based bearing design[J]. WSEAS Transactions on Information Science and Application, 2006, 9(3): 1739-1746.
- [10] 伍奎, 李润方, 刘景浩. 智能化系统的知识表达与推理机制[J]. 机械工程学报, 2005, 41(5): 98-103.
- WU Kui, LI Runfang, LIU Jinghao. Knowledge express and integrated reasoning mechanism in intelligent system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(5): 98-103.
- [11] 袁磊, 张浩, 陈静, 等. 基于本体化知识模型的知识库构建模式研究[J]. 计算机工程与应用, 2006(30): 65-68.
- YUAN Lei, ZHANG Hao, CHEN Jing, et al. Design pattern of knowledge base based on ontology knowledge model[J]. Computer Engineering and Applications, 2006(30): 65-68.

通讯作者: 谭昌柏, 副教授, 主要研究方向为装配系统尺寸管理、计算机辅助公差设计、逆向工程、工艺装备数字化设计、CAD/CAM等。
E-mail: tcbnuaa@nuaa.edu.cn

Interaction Design Technology of Knowledge-Based Aircraft Manufacturing Coordination Route

LÜ Zhengwei, TAN Changbo, AN Luling, WANG Zhiguo

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Aircraft manufacturing coordination route is an important process file, which connects the interchangeable coordination scheme designing with tolerance distribution. The digital design of aircraft manufacturing coordination route has important significance for computer aided tolerance design and the implementation of aircraft digital process. First, we classify the design knowledge of aircraft manufacturing coordination route and build the knowledge representation model and use the knowledge by reasoning technology. Then, we create figures library of manufacturing coordination units and design manufacturing coordination route interactively using intelligence capturing technology. Finally, the information model of aircraft manufacturing coordination route is designed and coordination process files for the standardization of the tolerance allocation are generated automatically, which provide support for the computer aided tolerance design.

Keywords: Coordination route; Knowledge reasoning; Figures library; Intelligence capturing; Information model

(责编 谷雨)