

# 飞机结构件机械加工柔性夹具系统

## Flexible Machining Fixture System of Aircraft Structural Part

南昌航空大学航空制造工程学院 王细洋



王细洋

南昌航空大学航空制造工程学院教授,工学博士,研究方向为数控加工及过程监控。

飞机结构件的数控加工,应有柔性夹具作为加工质量和加工效率的保证。成组夹具和拼装夹具是实现柔性夹具的重要手段。计算机辅助夹具拼装规划、夹具生产流程管理是柔性夹具系统中的重要功能模块,必须得到较好的解决。柔性夹具一般应具备气动或液压夹紧功能,并与数控机床在结构和控制上集成为一体。

算,一套专用机床夹具的平均设计制造周期约为 30~50 天。

飞机制造工艺装备的柔性化,一直是航空工业迫切希望解决的问题,因此得到了业界的广泛重视,并进行了大量的研究。柔性工装是基于产品数字量尺寸协调体系,采用可重组模块化结构的工装,自动化程度高。柔性工装系统目的是降低工装制造成本,缩短工装准备周期,同时大幅度提高生产率。目前,研究者较多地关注于飞机装配型架的柔性,而对于飞机零件(如飞机结构件)、机械加工夹具(或称机床夹具)的柔性化,重视程度不够、研究不多。机床夹具的

柔性是指夹具快速适应不同形状和尺寸工件装夹要求的能力。

飞机结构件是构成飞机机体骨架和气动外形的重要零件,其品种繁多、材料各异、功能重要。从结构上看,飞机结构件包括框、梁、肋、接头等类别。为了减轻重量,进行等强度设计,往往在零件上形成各种复杂的型腔、筋。飞机结构件不仅精度要求高,而且有严格的重量控制和使用寿命要求,其机械加工难度大、易变形、效率低。大飞机制造涉及大量种类的结构件,每类结构件的生产批量又较小,对每类结构件研制专用机床夹具,显然是不合适的。

飞机制造业中的工艺装备一般指机械加工夹具、装配型架、钣金模具、焊接夹具、测量检验夹具等。机械加工是获得飞机零件最终形状和精度的最主要方法,而机床夹具在保证飞机零件机械加工质量和工装加工效率方面起到重要作用。据估计,机床夹具数量约占飞机制造工装数量的 30% 左右,按设计、制造周期计

## 飞机结构件机械加工夹具现状

数控加工,尤其是数控铣削,是目前飞机结构件机械加工的主要方法。高速切削方法被普遍采用,如西飞大型复杂结构件均在西飞数控中心完成加工,结构件种类包括机翼大梁、壁板、梁间肋、框、大型支撑接头和对接接头等,这些结构件除具有槽腔多、壁厚薄、精度高等特点外,需要满足飞机变斜角理论曲面等飞机机翼结构件的通常特性以外,还具有零件轮廓尺寸大、槽腔深和基准平面轮廓度要求严等特性<sup>[1]</sup>,成飞结构件的加工分别在数控分厂和结构件分厂进行,大型结构件在数控分厂完成,小型结构件在结构分厂进行。目前,在国内整机厂中,结构件数控加工夹具存在如下普遍问题。

(1) 专用夹具数量多,夹具适用范围窄。

中航工业某公司结构件厂在转包项目及大飞机研制中需要加工大量以型材为原料的结构件。这类零件以铣边和钻孔加工为主。由于转包任务的不确定性,且国内大型飞机还处于研制过程中,零件数量少但种类多。为了保证加工质量,每种零件均研制了专用夹具,基座为比较笨重的铸件,且定位精度不高。车间工具库乃至车间地面上堆满了各类夹具。从生产一种零件转换为生产另一种零件时,夹具重新组合转换时间在2h左右,严重影响了生产效率。

飞机上的大型整体结构件,如整体蒙皮和壁板,目前仍部分采用大型模胎来进行铣削和切边。模胎设计制造成本高、专用性强。大量模胎占用厂房面积,库房积压严重。

(2) 缺乏计算机辅助夹具拼装系统和夹具生产流程管理系统。

目前,夹具设计或夹具拼装方案规划基本上还是采取手工方式进行。设计人员劳动量大、效率低下;设计

质量依赖个人经验和习惯,质量不稳定、规范性差,夹具元件的查找和夹具拼装费时费力。

夹具生产流程管理混乱,缺乏夹具及夹具元件的分类检索方法。对于新的结构件,可能存在合适的工装,但由于难以查找,或找到类似工装后,缺乏科学的方法指导拼装,设计者往往最终放弃利用已有夹具或夹具元件,而重新设计和制造,这导致了巨大的浪费。拼装夹具完成工件加工任务后,也不能及时有序地拆装归位。

(3) 夹具自动化程度低。

对于结构件的装夹,目前仍然采用人工方法,如螺钉压板方式,费时费力。在很多情况下,夹具组装时间和工件装夹时间远远多于工件切削时间,导致生产效率低下。

夹具与数控机床在结构及控制方面是独立的,难以通过数控指令,协调一致地对工件进行定位、装夹和进退刀加工。

(4) 夹具元件的标准化程度和模块化程度低,这导致了夹具元件的可重复使用率不高、夹具互换性不强、拼装困难。

(5) 不能支持采用 MBD 技术的飞机零部件设计,缺乏三维夹具及夹具元件数模,与飞机零部件设计的三维数字化协调程度不够。

## 夹具柔性策略

### 1 组合夹具和拼装夹具

组合夹具和拼装夹具仍然是实现飞机零部件夹具柔性化的主要方法。

组合夹具由一套预先制造好的不同形状、不同规格、不同尺寸的标准元件及合件组装而成。既可以把某一工件的某一工序组装成专用夹具,也可以组装成通用可调夹具或成组夹具。

拼装夹具主要用于数控加工,通常由基础件和其他模块化元件组成,

具有模块化结构。所谓模块化,是指将同一功能单元,设计成具有不同用途或性能的,且可以相互交换使用的模块,以满足不同的工件装夹需求。同一功能单元中的模块,是一组具有同一功能和相同连接要素的元件,也包括能增加夹具功能的小单元。

拼装夹具与组合夹具之间有许多共同点,它们都具有方形、矩形和圆形的基础件,在基础件表面有网络孔系或槽系。两种夹具的不同点是组合夹具的万能性好,标准化程度高;而拼装夹具则为非标准的,一般是为本企业产品工件的加工需要而设计的。产品品种不同或加工方式不同的企业,所使用的模块结构会有较大差别。

本文将这两种夹具统一称为柔性夹具。柔性夹具把专用夹具的设计、制造、使用、报废的单向过程变为组装、扩散、清洗入库、再组装的循环过程。具有应变能力强、设计和制造周期短、成本低等优点。还可减少夹具库房面积,有利于管理。组合夹具元件精度要求高、耐磨,能完全互换。与专用夹具相比,组合夹具往往体积较大,显得笨重。此外,为了组装各种夹具,需要一定数量的组合夹具元件储备,即一次投资较大。对于某些形状复杂或形状不规则的工件,无法通过组合夹具来获得合适的工装。定位精度、刚度、装卸性能等有时无法保证。飞机结构件由于精度高、形状复杂,专用夹具是必须的,而又由于品种多,一次性研制足够数量的夹具元件储备,在经济上是合算的。

柔性夹具包括槽系和孔系两类,槽系夹具元件间靠键和槽(键槽、T形槽)定位;孔系夹具则通过孔与销来实现元件间的定位。两类夹具的元件分类及其组装均有很大的相似性。夹具元件包括基础件、支承件、定位件、导向件、压紧件、紧固件、合件和其他件8类。孔系夹具没有导向元件,而是增加了辅助件。

与槽系夹具相比,孔系夹具精度高、刚性好、易于组装,特别是它可以方便地提供数控编程的基准,即编程原点,因此在数控机床上得到广泛应用。孔系夹具的缺点是调整性差,夹具应用范围小。夹具的调整性能对处于研制阶段的产品非常重要。飞机结构件的加工以数控加工为主,因此主要考虑孔系柔性夹具。

柔性夹具的另外一种表现形式是结构可调整夹具<sup>[2]</sup>,即通过夹具的结构调整,而不是通过更换夹具元件的方法来满足工件装夹要求。它建立在工件加工特征相似性的基础上,不用更换夹具元件或重新进行夹具的设计与组建,只是调整某些夹具元件的空间位置便能适应不同类型零件的装夹要求。飞机结构件之间存在加工特征相似性,依照其相似性进行必要的分类成组,并按照对象继承关系,将零件类逐步细分。对相似零件类设计结构可调整的柔性夹具。

需要注意的是,夹具的柔性化只能针对有限种类的零件和制造工序,不能期望存在一种万能夹具,能满足所有结构件的加工需求。

空中客车公司与英国 Nottingham 大学联合研制的用于飞机翼肋钻孔的柔性组合钻模<sup>[3]</sup>是为空客“下代复合机翼(NGCM)”研制工程服务的。机翼零部件(蒙皮、翼肋等)在装配型架上进行钻孔和铰孔。钻模包括集成式复合基座、气囊式夹头、电磁夹头、蛛状夹头、箱形接头、轨道及手工断路器等零部件。这些零部件均为 DE-STA-CO 公司的组合元件,可以方便地拆卸与重组,以满足不同型号机翼的装配与钻孔要求。零件材料均为轻铝合金,刚度、强度和尺寸精度均能满足要求。

图 1 为本文作者为中航工业某公司设计的航空铝型材结构件柔性快装夹具,可适应多种截面和尺寸的型材结构件。夹具采用三面定位方案,工件各孔位及铣削位置由数控程

序和对刀过程保证,不设计单独的钻套和对刀块。将夹具元件分为可变元件和固定元件,以适应工件种类及不同表面加工的需要。固定元件包括定位块、支承板、气动夹头、气管、连接板、立柱、弹簧、导板、气动顶缸和加强板。可变元件有左定位板和右定位板,另外,定位块的位置在不同类零件及同一零件不同装夹时,将会发生变化。可变元件对于不同类型的零件,形状和尺寸均不同,数量尽可能少。

## 2 计算机辅助夹具拼装规划

柔性夹具及计算机辅助夹具拼装规划/管理系统称为柔性夹具系统。计算机辅助夹具拼装规划是柔性夹具系统中的重要功能模块,也比较难以解决。目前,夹具设计和组装仍然严重依赖设计者的经验和知识。通过对中航工业某公司夹具组装站的调查研究发现,熟练技工与非熟练

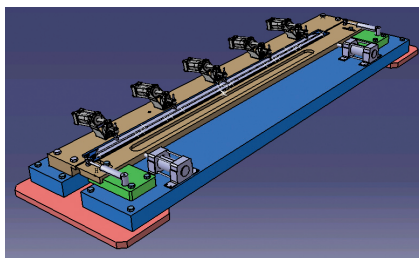


图1 航空铝型材结构件柔性快装夹具

技工在拼装时间和夹具结构的装夹精度、刚度及稳定性方面均有非常大的差距。

组合夹具拼装方案自动规划是计算机辅助夹具设计(CAFD)的重要研究范畴。CAFD始于20世纪70年代,在发展的过程中,新技术和新方法陆续被采用,如成组技术、特征建模、专家系统、虚拟现实技术、基于实例的推理(Case-based Reasoning, CBR)等<sup>[4-5]</sup>。CAFD的研究目标也逐渐细化,既有针对某类零件的夹具自动设计,又有具体针对夹具的某个设计阶段。

CAFD可以分为4个步骤<sup>[4]</sup>: 安装规划、夹具规划、结构设计、性能

评价。在安装规划阶段中,通过分析工件特征和加工信息,决定工件的安装次数、每次安装中工件的定位基准面。夹具规划主要用来决定工件上的定位支撑面和点、夹紧面和夹紧点,工件不能有欠定位或不恰当的过定位现象。结构设计的任务是选择夹具元件(定位件、夹紧件、夹具体等)并确定最终的夹具结构方案。性能评价的目的是对夹具相关性能需求进行评价和估算。夹具性能需求包括6个方面,如表1所示<sup>[4]</sup>。

夹具自动化设计实际上需要解决两个核心问题:一是如何表达夹具设计知识,无论是采用专家系统技术还是基于实例的推理技术;二是如何完成夹具设计过程<sup>[5]</sup>。虽然国内外的研究者在CAFD系统方面提出并采用了多项创新技术,取得了一些进展,但成熟的商品化CAFD系统还很少,CAFD仍然是制造系统的瓶颈因素。目前商品化的夹具设计系统都是基于几何参数定义的,如一些CAD系统(Unigraphics, Pro/Engineer)中的夹具设计模块、Bluco和Jergens公司开发的夹具设计软件<sup>[5]</sup>,这些夹具设计软件只是为设计者提供夹具元件库或简单的夹具参考模块。对于组合夹具拼装方案自动设计,研究者提出了诸如基于实例的方法<sup>[6]</sup>、基于连接理论的方法<sup>[7]</sup>、基于特征的方法<sup>[8]</sup>、基于零件STEP/AP203定义文件和接触树的方法<sup>[9]</sup>以及三维设计方法<sup>[10]</sup>等,这些方法的实用性仍需得到验证。

MBD三维技术在飞机制造业中应用广泛,在结构件设计、工艺编制和数控编程过程中,应同步考虑夹具的三维模型问题。建立能够准确表征夹具装配特征和装配过程的模型,是三维组合夹具拼装方案自动规划的重要内容。

虚拟装配是夹具拼装方案规划和夹具性能评价的重要手段。虚拟装配是指在计算机上完成产品零部

表1 夹具性能需求

| 性能需求 | 需求内容及举例  |
|------|--|
| 实体   | 夹具必须能容纳工件尺寸和承受工件重量；<br>夹具必须使待加工表面能够被加工                                       |
| 精度   | 夹具定位精度能保证工件尺寸和形状公差   |
| 约束   | 应使工件装夹稳固；<br>应使夹具 / 工件受力变形在允许范围内，防止工件产生过大的受力变形误差                             |
| 成本   | 夹具成本不超过预算；<br>夹具装卸寿命次数足够；<br>夹具承受工件加工的寿命时间足够                                 |
| 防碰撞  | 刀具路径不与夹具发生干涉；<br>除了指定定位点和夹紧点外，工件不能与夹具接触；<br>除了指定连接点外，夹具元件之间也不能发生干涉           |
| 可用性  | 夹具不能过重；<br>不能损伤工件与夹具接触的表面；<br>需为刀具提供导向功能；<br>应有防错装置即自动防止工件不正确地装入夹具中；<br>方便排屑 |

件的实体造型,并且进行计算机装配、干涉分析等多次协调的设计过程,实现产品的三维设计过程与零部件装配过程的高度统一。利用虚拟装配,可以验证夹具设计和工件装卸过程的正确与否、工件与刀具是否发生干涉等,以便及早问题,并对夹具方案进行修改。在虚拟装配时,可以动态显示工件装卸和刀具进/退过程。

从飞机制造过程的全局来看,CAFD 应作为整个制造自动化系统的一个功能模块。

作者初步设计了型材结构件柔性快装夹具管理与自动拼装系统,系统的实现流程如图 2 所示。依据型材截面特点(Z 字型材, T 字型材、工字型材, C 字型材等)、加工部位和规格尺寸,对型材零件进行编码分类。建立夹具元件库和实例库,元件库包括型材夹具常用的标准件、通用件和专用件的三维数模、技术要求。采用基于成功实例的设计策略,实例可以随时扩充。由于 CATIA V5 系统在飞机设计和制造中应用广泛,故利用其 CAA 二次开发工具开发,实现基于 CATIA V5 的三维模块化夹具自动设计和拼装。

### 3 气动和液压夹紧

由于结构件尺寸比较大,柔性夹具一般应能够实现机动快速夹紧。气动夹紧和液压夹紧比较平稳,易于控制,是实现工件快速装夹的有效手段。可以采用 PLC 实现工件装夹动作和机

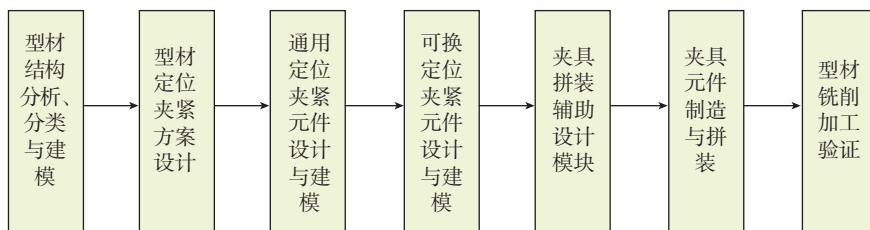


图2 型材结构件夹具管理与拼装系统流程

床进退刀动作的顺序控制。吴灿云等<sup>[11]</sup>针对飞机长行梁、肋的数控加工,实现了一种气动柔性夹具,采用 PLC 控制。门延武等<sup>[12]</sup>介绍了一种利用无线通信与有线网络相结合的控制薄壁件加工的智能柔性工装。

柔性夹具中,气动 / 液压控制系统的功能应包括 3 个方面:(1) 辅助数控系统对刀,以获得夹具体在机床坐标系中的正确位置,从而建立工件坐标系和机床坐标系的对应关系;(2) 夹紧和松开动作的顺序控制;(3) 避免刀具干涉:由于同一套夹具需要满足多种零件的加工,难以单纯依靠气动夹头位置来保证不与刀具路径发生干涉。在加工过程中,通过实

时控制气动夹头的夹紧和松开,来避免刀具与夹头的碰撞或过切现象,并在刀具完成干涉区域加工后又能重新回持夹紧零件状态。

柔性夹具工作过程包括机床数控系统对刀、工件吊装、手动预定位、自动定位、工件夹紧、机床的准备工作、加工等多个步骤。只有机床与夹具在结构、控制上集成为一体,才能有效地完成这一过程。这不仅对夹具提出了要求,机床的结构、电气控制和数控软件上也必须发生变革。有人将“工装 - 机床”一体化称为机床结构的又一次革命。

### 4 夹具管理

柔性夹具系统中,由于夹具种类和数量较多,必须借助计算机对夹具设计、生产计划、质量控制、元件出入库等流程进行有序管理。目前各航空制造企业仍然依靠人工进行各流程信息的传递和管理,易造成信息阻

塞,引起生产混乱,如组装夹具时找不到配套的元件;不能及时反馈生产线上的夹具需求信息,造成停工等待;夹具完成任务后,无法有效地拆装归位。图 3 列出了夹具组管理流程。

为了实现夹具组管理的信息化,计算机辅助夹具流程管理系统应具有如下特征:(1) 基于企业局域网,能输出夹具元件 BOM 表;(2) 与企业其他信息系统(CAD/CAM、PDM、ERP、MES 等)实现集成,支持三维 MBD 技术;(3) 夹具元件应按规格、摆放架位等实行条码式管理,用扫描仪采集条码信息;(4) 支持 CAFD,夹具拼装实例能及时纳入知识库中。

## 飞机整体结构件夹具

整体结构件在飞机结构件中的比例越来越大。整体式结构件不是由零件简单组合而成,而是利用整块毛坯加工而成。飞机机体采用整体结构后,传统的钣金成形和铆接装配

的进展<sup>[4,13-18]</sup>,如飞机壁板柔性装配工装、翼梁柔性装配工装、水平安定面升降舵柔性装配工装、机身柔性装配工装和总装用的柔性对接工装系统等。

壁板蒙皮类零件的柔性工装十分重要,须兼顾机械加工和装配。机

集成一体。

## 参考文献

[1] 周文东. 高效切削利器助推飞机结构件加工技术发展. 航空制造技术, 2008(23):60-62.

[4] Boyle I, Rong Y M, Brown D C. A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011(27): 1-12.

[2] 唐东,成晔,蔡复之. 柔性夹具及其设计方法研究. 制造技术与机床, 1999(2): 23-25.

[3] Jayaweera N, Bakker O J, Smith T, et al. Flexible tooling for wing box rib clamping and drilling. SAE Int J of Aerosp, 2011,4(2):1048-1056.

[5] Wang H, Rong Y M, Li H, et al. Computer aided fixture design: Recent research and trends. Computer-Aided Design, 2010(42):1085-1094.

[6] Babu B S, Valli P M, Kumar A V V A, et al. Automatic modular fixture generation in computer-aided process planning systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2005(219): 1147-1152.

[7] Wua Y G, Gao S M, Chen Z C. Automated modular fixture planning based on linkage mechanism theory. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2008, 24: 38-49.

[8] Hou Y B, Li Y G, Wang W. A feature-based fixture design methodology for the manufacturing of aircraft structural parts. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011(27):986-993.

[9] Yamada T, Funahashi Y, Yamamoto H. An algorithm for the automatic generation of an assembly process for modular fixture parts. Artif Life Robotics, 2009,14:199-202.

[10] Zheng Y, Qian W H. A 3-D modular fixture with enhanced localization accuracy and immobilization capability. Int J of Machine Tools & Manufacture, 2008(24): 677 - 687.

[11] 吴灿云,王新乡,胡国清. 飞机柔性夹具的应用与研究. 机械设计与制造, 2010, 8: 227-229.

本文共有参考文献 18 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 深蓝)

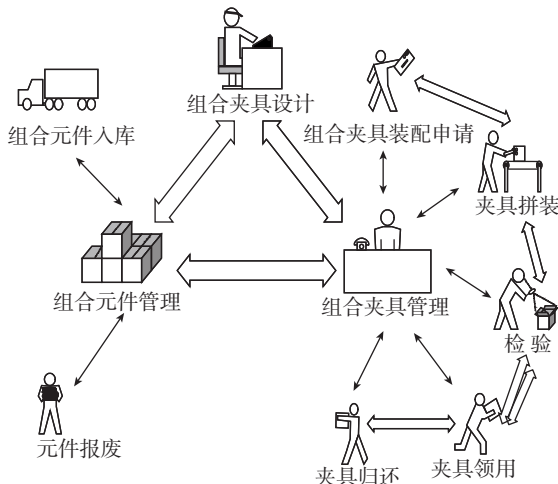


图3 柔性夹具组装管理流程

等工作显著地减少。图 4 为飞机整体结构件的分类。

整体结构件的外形多数与飞机外形有关,有复杂的装配协调关系,精度要求较高。多数整体结构件尺寸大、形状复杂、加工技术难度大。其中梁类结构件的纵向刚度较差。

整体结构件的有些机械加工直接在装配型架上进行,在装配前或装配后进行铣边、钻铰孔等。有关柔性装配工装的研制已获得了较大

机械加工包括数控切边和钻铰孔,其工装由“实体模胎+切边样板式”工装、真空吸附卡板支撑式工装,发展为目前的可重构柔性工装<sup>[13]</sup>。波音、空客等公司自 20 世纪 90 年代初就应用了可重构柔性工装,如西班牙 TORRES 公司为波音公司及空客公司生产的 TORRESMILL 和 TORRESTOOL 多点柔性夹具系统,提高了加工效率和加工质量。国内也有壁板蒙皮类零件可重构柔性夹持工艺装备及配套工艺支撑软件系统的报道<sup>[16-18]</sup>。

## 结束语

飞机结构件的数控加工,应有柔性夹具作为加工质量和加工效率的保证。成组夹具和拼装夹具是实现柔性夹具的重要手段。计算机辅助夹具拼装规划、夹具生产流程管理是柔性夹具系统中的重要功能模块,必须得到较好的解决。柔性夹具一般应具备气动或液压夹紧功能,并与数控机床在结构和控制上

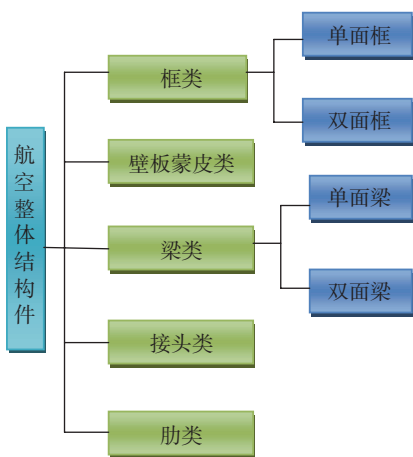


图4 飞机整体结构件分类