

# 飞机装配生产线资源追踪及可视化研究

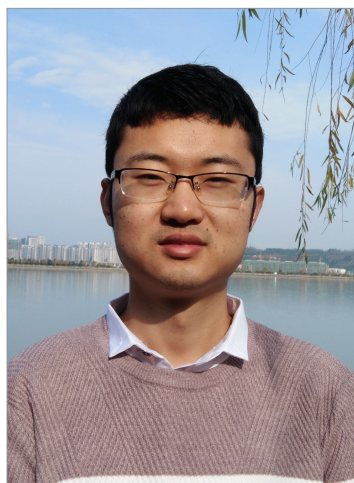
马 腾,贾晓亮,孙冰洋

(西北工业大学机电学院,西安 710072)

**[摘要]** 传统飞机装配资源管理在装配现场缺乏先进的装配资源追踪手段,各类装配资源的现场信息获取和管理主要依靠手工方式,难以实时获取资源的位置、数量等信息,容易导致获取的装配现场资源信息不准确、易出错、可视化程度低等问题。提出一种面向CPS基于3D模型的飞机装配生产线资源追踪及可视化方法。建立了包括时空数据和3D模型数据的飞机装配资源追踪及可视化数据模型;通过对飞机装配现场及资源的三维建模作为可视化的基础,结合CPS技术建立了飞机装配生产线资源追踪的系统框架;并在某型飞机中机身部件装配生产线进行了应用验证,验证了该方法的可行性与有效性。

**关键词:** 飞机装配生产线;信息物理融合系统(CPS);现场资源追踪;现场资源可视化

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.06.064



马 腾

硕士研究生,研究方向为飞机数字化装配、信息物理融合系统。

飞机装配涉及大量的零部件、工装、工具及人力等资源,具有过程复杂、工作量大、周期长等特点,是典型的复杂工作过程<sup>[1]</sup>。飞机装配生产线使用的资源种类繁多、数量庞大,对其有效管理和配套是保证生产周期和质量的关键环节之一。通过对飞机装配资源的有效追踪能够及时掌握飞机装配过程信息,发现飞机装配过程问题。传统的飞机装配资源管理在装配现场缺乏先进的装配资源追踪手段,各类装配资源的现场位置等信息的获取和现场管理主要依靠手工方式,难以实时获取资源的位置、数量等信息,容易导致装配现场资源不准确、易出错、可视化程度低等问题。因此,如何结合飞机装配资源的特点,准确、高效地获取并利用飞机装配过程中的资源现场位置等信息,保证各类装配资源在正确的时间出现在正确的

装配站位,减少装配工人工作量、降低错误使用装配资源、提高装配生产效率等现场问题,是提高飞机装配资源现场管理的关键环节之一。

随着信息化和智能制造技术的发展,国内外学者针对制造现场及资源管理进行了大量研究<sup>[2]</sup>。拜明星<sup>[3]</sup>提出了基于MBD技术的三维工艺设计,生成三维工艺指令并在生产现场实现可视化。王帅等<sup>[4]</sup>提出了一种基于移动终端的飞机装配现场工艺可视化及信息管理方法。郑志男等<sup>[5]</sup>研究了三维可视化在装配车间现场应用的关键技术,提出了基于轻量化三维模型的装配过程管理应用解决方案。李章锦等<sup>[6]</sup>针对复杂产品装配过程可视化程度低、信息传递效率低下的问题,提出并建立了面向复杂产品离散装配过程的电子看板系统。屈力刚等<sup>[7]</sup>针对二维工艺文件在装配现场应用的

局限性,提出并建立了三维模型的装配现场可视化系统。近年来,随着信息物理融合系统(Cyber Physical System, CPS)的技术在制造业中得到重视和应用,CPS正在成为飞机装配现场资源追踪及可视化的使能技术,可有效支持飞机装配现场对各类装配资源的实时追踪,提高飞机装配资源现场管理能力<sup>[8-9]</sup>。

本文针对飞机装配生产线资源追踪及可视化存在的问题和需求,提出面向CPS的飞机装配生产线资源追踪及可视化方法,基于获取的装配资源位置等信息,对装配资源进行有效追踪,并通过三维可视化的方式进行交互,在动态变化的装配车间环境下能够及时发现现场问题并做出决策,保证装配任务按时完成,实现对飞机装配现场资源的有效管理和控制,以提高飞机装配车间的响应能力和装配现场资源的精细化管理。

## 飞机装配生产线资源追踪及可视化建模

### 1 飞机装配生产线资源追踪及可视化分析

飞机装配现场管理是生产管理的重要环节,飞机装配现场管理要求及时准确地掌握飞机生产的动态,快速解决生产线问题<sup>[10]</sup>。飞机装配现场管理包括飞机装配过程追踪与信息反馈、装配质量信息管理,以及根据反馈信息生成制造过程记录<sup>[11]</sup>。其中,飞机装配过程追踪与信息反馈是指采集装配现场的数据,追踪飞机装配过程,及时发现装配现场问题并及时反馈。飞机装配过程追踪与信息反馈是提高飞机装配现场管理水平的前提和基础。

飞机装配是以装配大纲(Assembly Order, AO)为单元进行的,每一份AO包含多道装配指令,每步指令执行什么操作,安装什么零件等都做了详细说明,同时对每道指

令使用的工具、工装和物料的种类,以及数量做了具体的要求<sup>[11]</sup>。飞机装配生产作业计划是装配生产单位依据工位计划要求编制的内部各工位层面的生产作业计划,以装配工位为单位描述架次飞机的生产作业安排,确定了工位上各项作业的装配内容和顺序、开工时间和完工时间。

在飞机装配过程中,装配现场资源种类繁多,主要包括装配工装、装配工具、装配物料、装配人员、配送设备和在装配件等。飞机装配资源的状态是指装配资源的现场位置、数量和使用情况等信息,反映装配资源的现场信息是否满足装配工艺执行的要求,如装配资源的位置正确或位置错误等。各类现场资源根据作业计划在飞机装配站位流转,现场调度人员需要及时准确地掌握装配现场资源的位置、数量等,保证装配资源在正确的站位进行装配操作,以高效、及时地完成装配生产任务。因此,在飞机装配过程中实时追踪装配现场资源并及时反馈装配资源位置等信息是飞机装配过程追踪与信息反馈的重要组成部分。

(1)装配工装:是保证飞机装配过程顺利进行的重要资源,如为满足飞机装配的准确度要求,在飞机装配过程中采用大量工装,保证飞机装配部件的装配定位精度。

(2)装配工具:是指在装配过程中工人操作需要使用的装配工具,如刀具、量具等。这些装配工具在不同的工位之间流转,用于装配生产。

(3)装配人员:是飞机装配过程的控制者和操作者,是装配现场工作的重要组成部分。装配人员在装配现场的不同站位上下载装配生产任务和对当前装配工序进行操作,完成装配生产任务。

(4)装配物料:是指在飞机装配过程中所需要的零部件、附件等对象,是飞机装配过程中的重要资源。在飞机装配过程中,装配物料通常根

据装配指令的要求打包,然后配送至各个装配站位进行装配使用。

(5)配送设备:是目前飞机装配车间广泛应用的物流运输装备,配送设备需要及时地将装配物料、装配工具、装配工装等资源运送到指定的站位以满足装配生产需求,同时还需要完成在装配件于不同工位之间运转等任务。

(6)在装配件:是指在各个装配站位上正在进行装配任务的装配对象。在飞机装配过程中,随着装配工艺的执行,由装配人员完成在装配件的装配工作,保证装配生产任务。

基于获取的飞机装配资源的实时动态信息,结合飞机装配车间三维环境,可实现基于飞机装配资源的三维模型可视化,以可视化的方式及时地展示飞机装配资源状态变化信息,可保证管理人员能够及时发现问题并做出决策。解决管理人员难以全面地把握装配车间内资源实际情况的问题,实现飞机装配资源的现场有效管理和控制,提高装配资源现场管理能力。

### 2 飞机装配生产线资源追踪及可视化数据模型

基于对飞机装配现场资源追踪及可视化的分析,本文建立了包含装配资源时空数据和装配资源几何模型数据的飞机装配现场资源追踪及可视化数据模型,如图1所示。其中,装配资源时空数据是各类装配资源的现场位置随着装配操作的执行不断移动而产生的数据,由时间数据、位置数据和属性数据3个要素组成。属性数据是装配资源的特有信息,如资源ID、资源名称等;时间数据表示装配资源执行装配操作时的时间数据;位置数据表示装配资源执行装配操作时的位置坐标。装配资源几何模型数据表达了装配资源的几何外形,包括几何数据和模型属性数据。模型几何数据包括组成模型的点、线、面以及它们之间的约束关系

等；模型属性数据是指模型的特有信息，如模型 ID、模型材料等。装配资源的属性数据和几何模型的属性数据是一一对应的关系，通过这种关系将装配资源和三维模型进行绑定，从而建立飞机装配现场资源追踪及可视化数据模型。

飞机装配资源时空数据是指具有时间元素并随着时间变化而变化的空间数据。在该数据模型中通过引入时间信息，不仅可以表示对象的位置信息，还能够表示对象的空间变化信息。在飞机装配过程中，通过时空数据去描述装配资源的位置、时间和属性之间的关系。如图 2 所示，以装配工具为例，表达了装配资源时空数据的内涵。

### 飞机装配生产线资源追踪及可视化系统框架

#### 1 飞机装配生产线资源追踪及可视化系统

飞机装配过程是一个复杂多变的过程，各类装配资源根据装配工艺执行的要求在装配车间内不断流转。飞机装配资源的追踪是指在飞机装配过程中，及时获取资源状态，对资源的位置及状态等做出判断并及时反馈，以最小的延迟对飞机装配过程中发生的现场问题做出决策。

面向 CPS 的飞机装配生产线资源追踪及可视化框架主要包括飞机装配资源实时信息获取层、装配资源实时信息处理层、装配资源时空数据模型建立层、装配资源可视化层，如图 3 所示。

(1) 装配生产线资源实时信息获取层：采集装配人员、装配物料、装配工装、装配工具、配送设备和在装配件等各类装配资源的现场信息。在飞机装配现场部署 RFID 读写器和用于定位对象的 RFID 参考标签，完成对装配车间各类装配资源的实时信息采集，为装配资源实时信息处理层提供有效信息集。

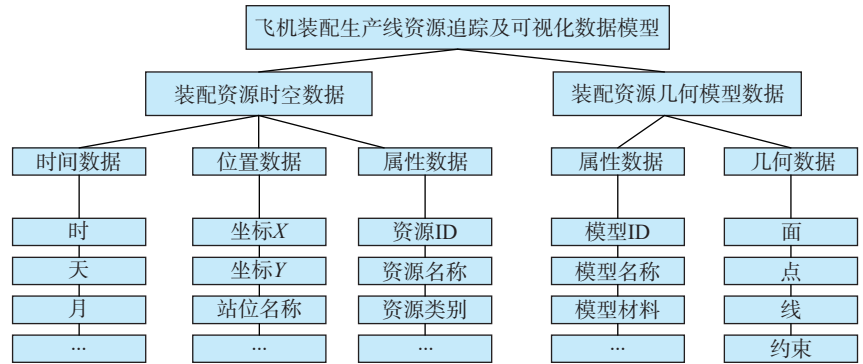


Fig.1 Resource tracking and visualization data model of aircraft assembly line

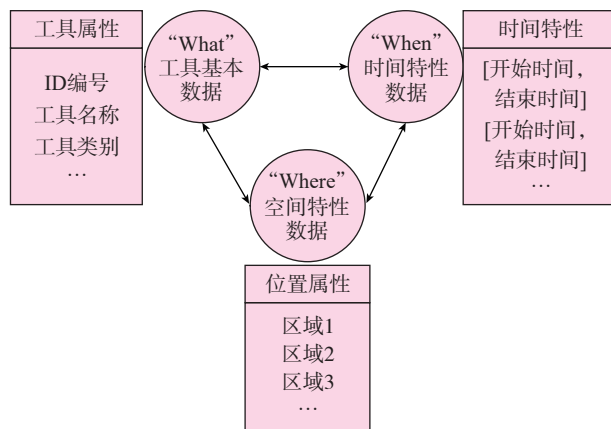


图2 飞机装配生产线资源的时空数据模型

Fig.2 Spatio-temporal data model of aircraft assembly line resources

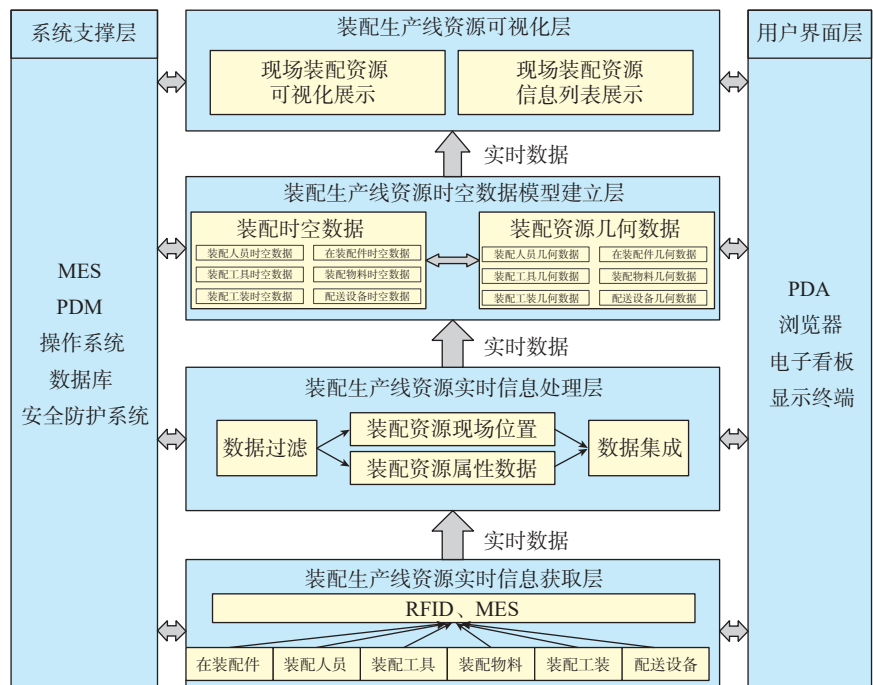


Fig.3 Resource tracking and visualization system for aircraft assembly line

(2) 装配生产线资源实时信息处理层: 对获取的装配资源的实时信息进行过滤和处理。本层的核心内容是通过分析实时信息, 获得装配资源的实时位置信息和状态信息。文中首先对装配资源进行定位以获取装配资源实时位置, 然后通过建立的资源状态追踪模型对位置信息进行条件判断, 以获得装配资源的状态信息, 最后将获得的装配资源位置信息和状态信息进行数据集成, 为装配资源时空数据模型的建立提供数据支持。

(3) 装配生产线资源时空数据模型建立层: 对上层处理后的装配资源数据统一管理, 建立飞机装配资源时空数据模型。本文采用的时空数据模型是基于装配资源静态数据和装配资源动态数据两方面对每一类资源进行描述, 最终形成装配资源时空数据模型, 为功能应用层提供基础数据。

(4) 装配生产线资源可视化层: 以飞机三维模型可视化的方式展示飞机装配过程中资源位置和状态追踪信息。其中资源状态追踪是本层的核心内容, 目的是实现自主地对装配资源位置正确进行判断和反馈。基于提供的装配资源时空数据, 实现飞机装配过程资源位置追踪和资源状态追踪两种功能, 然后基于可视化技术, 实时展示装配资源位置与状态变化, 保证车间管理人员全面掌握装配车间运转情况, 及时发现资源位置异常并做出调整, 提高车间可视化管理水平和装配资源现场管理能力。

## 2 飞机装配生产线资源追踪及可视化流程

面向 CPS 的飞机装配生产线资源追踪涉及不同的功能模块和装配过程信息, 各个功能模块之间包含数据交换以及信息传递的过程, 其运行中主要包含以下信息:

(1) 产品数模及装配工艺信

息: 从企业信息管理系统, 如 PDM (Product Data Management, PDM) 系统中获得。

(2) 装配车间作业计划信息: 从车间执行层的管理系统, 如 MES (Manufacturing Execution System) 系统中获得。

(3) 装配过程资源实时信息: 从装配车间实时获得, 主要包括各类资源的属性信息、位置信息、状态信息等。

基于飞机装配过程的进展, 现场装配资源在车间的位置等信息不断发生变化, 面向 CPS 的飞机装配生产线资源追踪及可视化流程如图 4 所示, 首先基于装配资源的时空数据模型, 对飞机装配车间 AGV、装配工具、装配工装、装配物料、装配人员和在装配件等现场资源的位置、数量等信息进行采集, 对采集数据进行数据处理后, 获得装配资源的实时位置等信息, 再通过装配资源追踪模型分析各类资源的状态变化, 获得装配资源状态信息, 最后根据获得的所有装配资源信息进行基于三维模型的位置和状态更新, 实现以三维模型的方式展示装配过程资源可视化。随着装配资源位置的不断变化, 装配资源的状态也会不断转移, 一旦装配资源的现场位置不正确, 则立即作出反馈。

装配车间班组长和调度员根据可视化界面提供的信息及时掌握装配资源动态, 快速解决装配资源位置不正确的现场问题, 提高装配资源现场管理能力。

## 应用验证

### 1 验证背景

本文以某型飞机中机身装配生产线为应用验证背景, 该装配车间为了提高装配生产现场的管控能力, 需要对中机身装配过程实现从生产准备、生产计划安排到生产过程控制的全过程控制和管理。其中, 及时获取装配现场问题是实现该过程管控的重要组成部分。中机身装配车间资源位置的实时获取与状态追踪, 旨在改进传统装配现场资源追踪模式, 为装配现场管理提供决策支持, 提高装配生产线现场可视化水平和装配生产线管控能力。

飞机中机身装配工艺流程如图 5 所示, 根据飞机中机身装配工艺流程该飞机中机身装配生产线布局如图 6 所示, 主要包括地板总装站位、气密地板装配站位、左右侧底壁板装配站位、左右侧壁板装配站位、顶壁板装配站位、气密地板装配站位、应急门框装配站位、机身框装配站位、龙骨梁盒体装配站位、龙骨梁壁板装

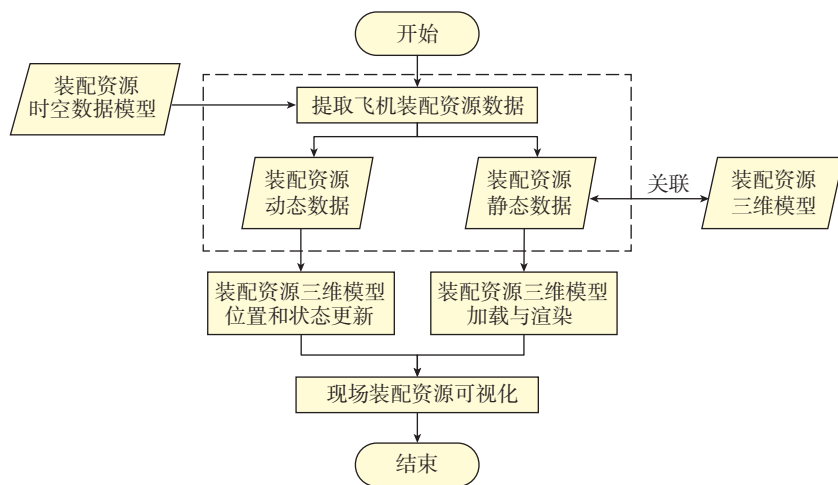


图4 飞机装配生产线资源追踪及可视化流程

Fig.4 Resource tracking and visualization flow of aircraft assembly line

配站位、龙骨梁总装站位、中机身总装站位等。每一个装配站位内都规划了装配资源的定制区域,用于存放装配资源。每一个装配站位区域设置有装配操作准备区域(SA)、装配操作执行区域(SB)、资源等待送回区域(SC)。装配操作准备区域用于存放即将开始中机身装配任务的各类装配资源;装配操作执行区域用于执行中机身装配任务;资源等待送回区域用于存放已经使用且在等待被送回库房的装配资源。各类装配资源按照要求位于装配站位不同的区域内进行装配生产,同时随着装配任务的进行,不断地变换位置。根据车间布局的 RFID 环境部署如图 7 所示。

## 2 飞机中机身装配生产线资源

该飞机中机身装配生产线资源主要包括装配工具、装配工装、装配物料、装配人员、在装配件和配送设备等,如表 1 所示。装配工装主要包括壁板类装配型架、地板类装配型架、组合夹具、钻孔样板等。装配工具主要包括风动工具、铆枪、刀

具、量具等。装配人员主要包括装配工人与车间班组长,装配工人负责在装配站位执行装配操作;班组长负责装配现场的管理,包括生产派工、解决现场问题等。装配物料主要包括执行装配工艺所需的组部件、标准件和辅助材料,其中组部件是指装配工艺执行所需的半成品件;标准件是指装配过程所需的标

准零件,如螺栓、螺母、铆钉等;辅助材料包括漆、胶和清理工具,如丙酮、揩布、硬毛刷等。配送设备主要包括 AGV 运输车、叉车等。在装配件是指位于装配操作执行区域内正在执行装配任务的组部件,主要包括壁板、龙骨梁、地板和中机身总装部件等。

飞机中机身装配车间的装配工

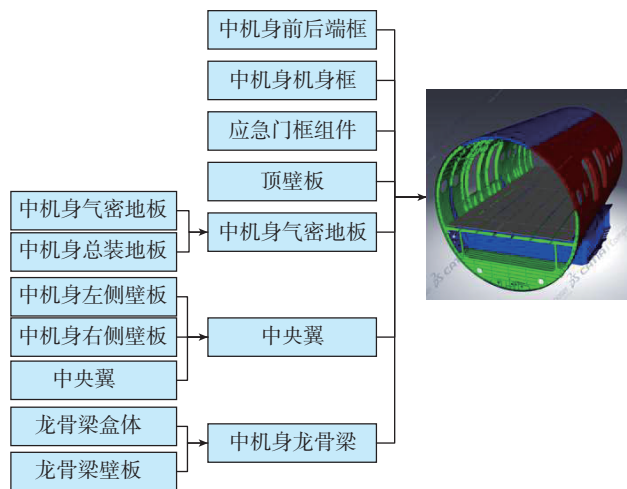


图5 飞机中机身装配工艺流程

Fig.5 Aircraft fuselage assembly process flow

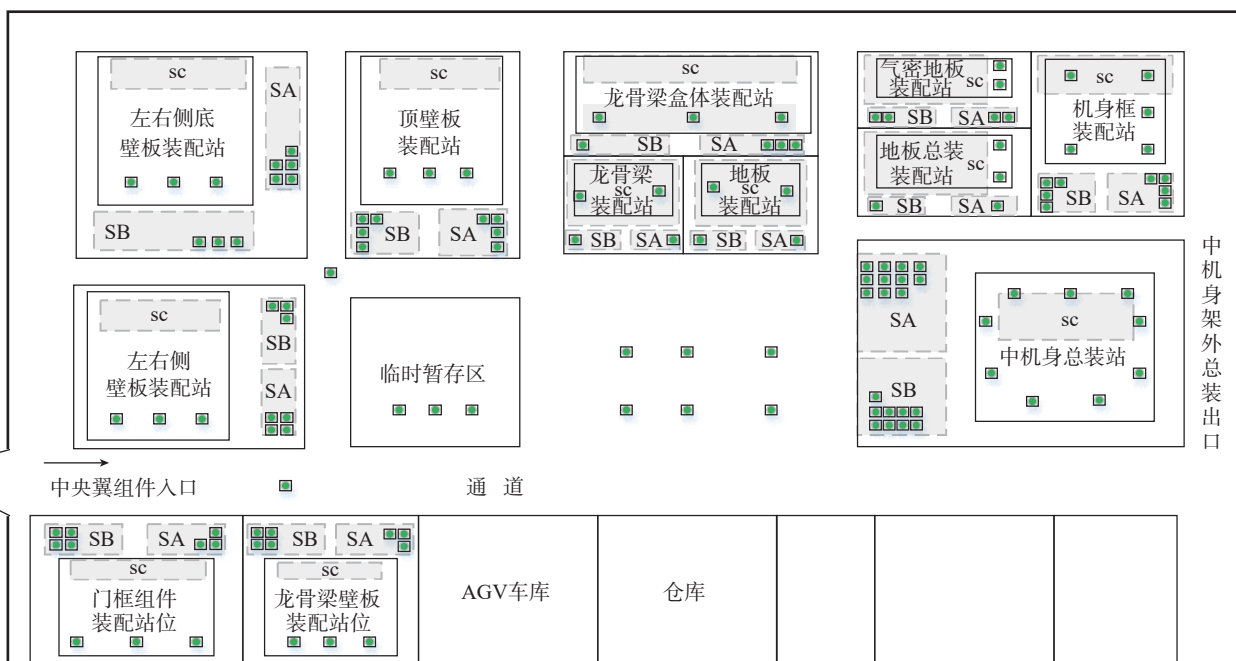


图6 飞机中机身装配生产线布局

Fig.6 Layout of aircraft fuselage assembly line

装、装配工具分类存放在仓库内,在装配作业计划下达后,管理人员根据装配生产作业计划对工装、装配工具需求进行配套,然后由装配工人领取到指定的装配站位。在装配过程中,要求装配工人负责各自领取的装配工装、装配工具,保证不出现丢失、乱放等问题,同时在装配作业完成后,将装配工装、工具送回工装、工具管理处。装配物料是装配所需的必需品,主要包括标准件、零部件和半成品。根据飞机装配作业计划,物料仓库的保管人员按照配套表进行物料配套出库,由配送设备配送到现场。在装配过程中,需要装配人员核对装配物料或装在物料的托盘上标明的物料名称、物料数量和特殊标识等信息,来保证装配物料在正确的装配站位上使用。装配人员是装配作业能够执行的保证。目前的飞机装配实行单架次派工管理,每架飞机的装配开始之前,车间管理员将装配生产作业计划下发给工段,工段派发给班组,班组再分配装配人员,由此实现装配人员的派工管理。

### 3 飞机中机身装配生产线资源追踪及可视化应用

针对上述对飞机中机身装配资源追踪及可视化应用的分析,本文

基于 Teamcenter 和 MES 应用系统,并以 Unity 3D 作为开发工具,开发了飞机中机身装配资源追踪及可视化应用系统,如图 8 所示。Unity

表1 飞机中机身装配生产线资源

Table 1 Resources of aircraft fuselage assembly line

资源类别	资源名称
装配工装	地板类型架、壁板类型架、组合夹具、钻孔样板等
装配工具	风动工具、铆枪、刀具、量具等
装配人员	装配工人、车间班组长等
装配物料	标准零件、辅助材料、组部件等
配送设备	AGV 运输车、叉车等
在装配件	壁板、龙骨梁、气密地板、中机身总装部件等

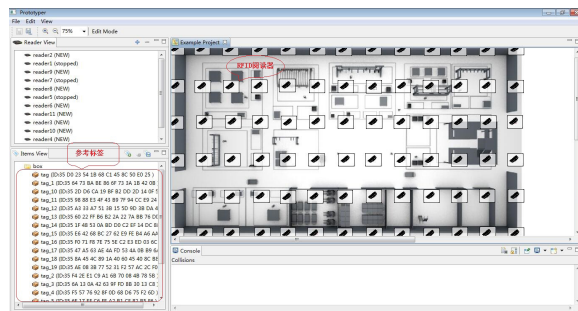


图7 RFID环境部署

Fig.7 RFID environment deployment

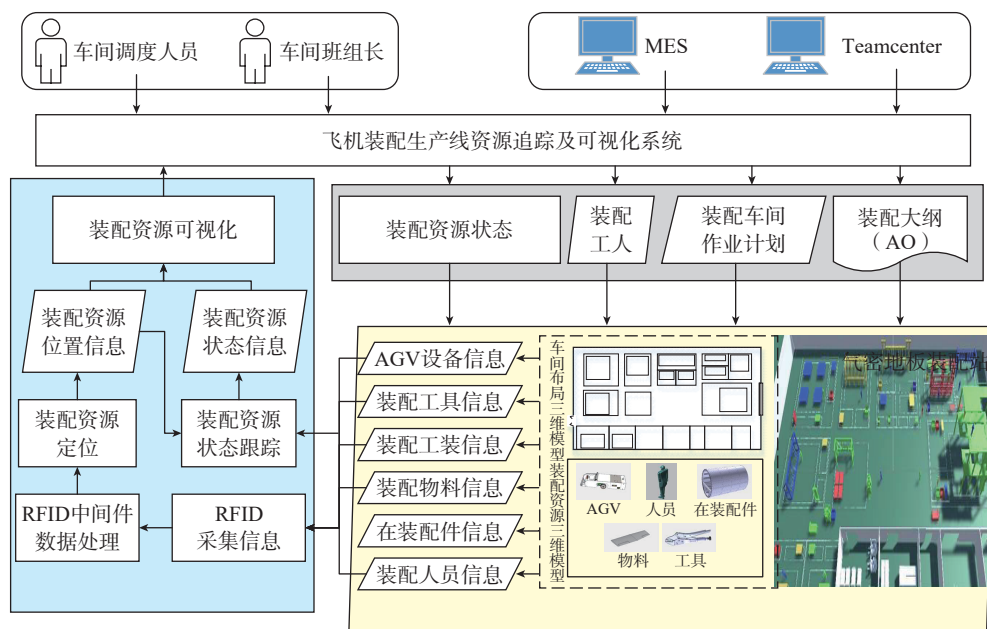


图8 飞机中机身装配生产线资源追踪及可视化应用系统

Fig.8 Aircraft fuselage assembly line resource tracking and visualization application system

3D 主要完成基于 3D 模型的现场资源可视化交互开发,对场景中的模型、图片等资源进行可视化处理。

飞机中机身装配资源追踪及可视化应用的过程主要包括:首先,对飞机中机身装配车间及其内部资源进行三维建模,构建中机身部件装配车间三维环境,在飞机装配车间三维模型环境中,完成各类资源三维模型的布置;其次,建立飞机装配资源时空数据模型,如图 9 所示;最后,基于实时获得的现场装配资源的位置等信息和 MES 系统

提供的现场资源的使用状态信息,如使用、空闲等,在 Unity3D 开发的飞机中机身装配资源可视化界面中以中机身装配车间三维模型的可视化方式展示飞机装配资源的状态信息,实现对现场资源的追踪及可视化展示。

图 10 所示是飞机中机身装配生产线资源信息列表,主要包含某一时刻中机身装配车间内所有的装配资源属性信息、位置信息、状态信息,以及装配资源所对应的装配指令基本信息。车间管理人员

能够获得中机身装配车间中装配资源的名称、种类等信息,以及装配资源在中机身车间的具体位置信息和装配资源在某一时刻的状态信息等。图 11 所示是飞机中机身装配生产线资源属性界面,包含详细记录单个装配资源的基本属性、资源来源信息和使用记录。基于资源属性信息车间管理员可以详细了解当前资源的名称、编号、规格和三维模型等信息,以及该资源在某一时间段内的使用次数。图 12 所示是飞机中机身装配生产

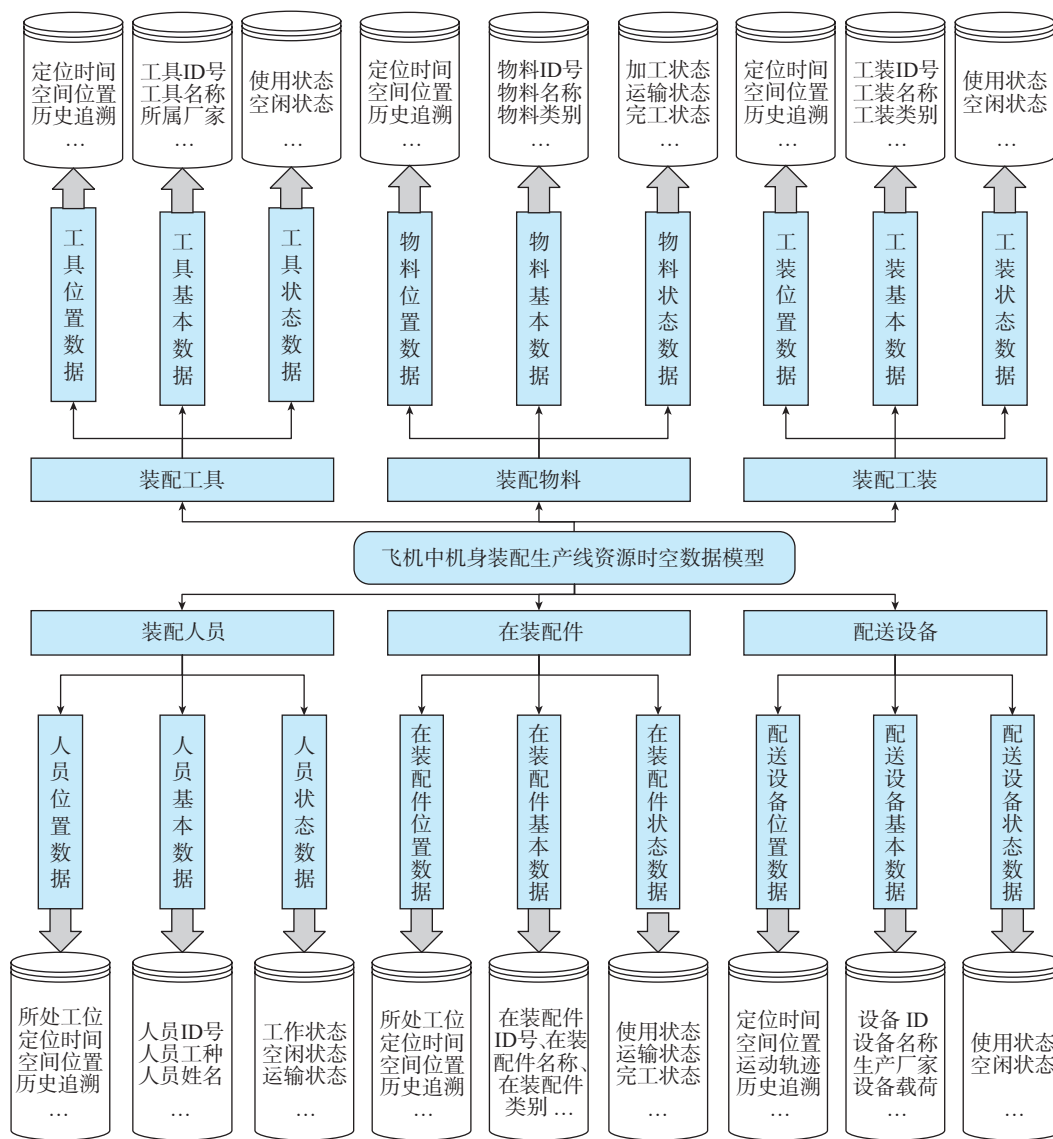


图9 飞机中机身装配生产线资源时空数据模型

Fig.9 Spatial-temporal data model of aircraft fuselage assembly line resources

线资源追踪界面,它基于飞机中机身装配车间的三维布局模型可以直观、有效地描述所有装配资源在车间的位置,并且通过装配资源三维模型的颜色和注释的显示、更新可以反映装配资源的当前状态。如果装配资源的现场位置与装配工艺执行要求出现矛盾时,车间管理人员可以在装配资源状态可视化界面上及时发现并迅速解决,管理人员也能够及时发现装配现场问题并做出调度,提高装配车间资源的现场管理能力。

在图 12 所示,飞机中机身装配生产线资源追踪的可视化界面中,系统以不同颜色和注释的标识方式及时反馈装配资源的状态信息,保证车间管理人员能够及时地获取资源状态信息。飞机装配资源生产线资源可视化系统中定义的三维模型颜色含义如表 2 所示。

### 结论

针对飞机装配生产线现场资源不准确、易出错、可视化程度低等问题,本文结合 CPS 和三维可视化建模技术,提出了一种面向 CPS 的飞机装配生产线资源追踪及可视化方法和系统框架,可以基于实时获取的飞机装配现场资源的位置等信息,为飞机装配资源精细化管理提供支持。建立了包括时空数据和 3D 模型数据的飞机装配现场资源追踪及可视化数据模型,能够实现飞机装配现场资源从物理环境到三维可视化环境的全面映射;结合 CPS 技术建立了飞机装配生产线资源现场追踪的系统;以某飞机中机身装配车间为应用背景,结合飞机中机身装配生产线现场的实际环境进行了系统和方法的应用验证,可实现对飞机装配生产线现场资源的有效管理和控制,提高飞机装配生产线的响应能力和装配现场资源的精细化管理。

资源名称	资源类别	位置坐标 (x, y, z)	资源状态	装配命令 (AO)	装配命令 (AO)	装配命令 (AO)
光身装配空具	装配工具	6001 (40, 20)	准备状态	无	无	无
自由吊钩空具	装配工具	6002 (10, 20)	准备状态	无	无	无
后机身装配空具	装配工具	6003 (10, 17)	使用状态	无	无	无
翼前空具	装配工具	6004 (18, 30)	使用状态	无	无	无
张三	装配人员	6005 (15, 27)	准备错误状态	无	无	无
李四	装配人员	6006 (20, 12)	使用错误状态	无	无	无
铆钉	装配材料	6007 (28, 24)	准备状态	无	无	无
后机身力矩控制	装配材料	6008 (25, 23)	使用错误状态	无	无	无
AGV运输车	配送设备	6009 (25, 24)	使用状态	无	无	无
运输车	配送设备	6010 (18, 30)	使用状态	无	无	无
光身空具	在装配中	6011 (40, 20)	准备状态	无	无	无
翼前	在装配中	6012 (18, 30)	使用状态	无	无	无
气定地线	在装配中	6013 (40, 20)	使用状态	无	无	无
光身空具	在装配中	6014 (20, 2)	使用状态	无	无	无
中机身前后端	在装配中	6015 (40, 30)	使用状态	无	无	无

图10 飞机中机身装配生产线资源信息列表

Fig.10 Resource information of aircraft fuselage assembly line

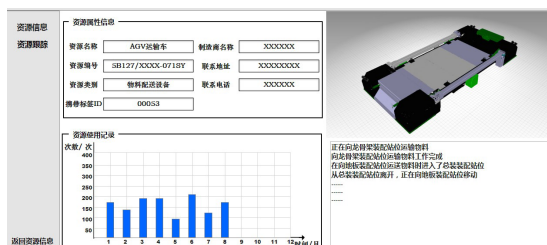


图11 飞机中机身装配生产线资源属性

Fig.11 Resource attributes of aircraft fuselage assembly line



图12 飞机中机身装配生产线资源追踪可视化

Fig.12 Visualization of resource tracking in aircraft fuselage assembly line

表2 飞机装配生产线资源可视化系统中定义的三维模型颜色含义

Table 2 Three-dimensional model color definition in aircraft assembly line resource visualization system

装配资源状态	模型颜色	装配资源状态描述
准备状态	蓝	无
准备错误状态	红	该资源配送到错误的站位,请立即调度该资源
即将使用状态	蓝	无
即将使用错误状态	红	该资源没有按时送至站位,请立即调整计划开工时间
使用状态	绿	无
使用错误状态	红	该资源正在使用中移动到了工作区域之外,请立即回到工作区域
送回状态	黄	无
送回错误状态	红	该资源在送回中进入了其他站位,请立即调度该资源并及时送回

参 考 文 献

- [1] 董会波, 许建新, 董思洋. 面向飞机装配的MES系统研究[J]. 航空制造技术, 2010, 53(18): 46-50.
- [2] 段国齐, 田锡天, 黄利江. 飞机装配进度三维可视化技术研究[J]. 航空制造技术, 2016, 59(9): 70-78.
- [3] 拜明星. 基于MBD技术的三维工艺设计与现场可视化生产[J]. 航空制造技术, 2013, 56(8): 40-43.
- [4] 王帅, 孙占磊, 张承阳, 等. 基于移动终端的飞机装配现场工艺可视化系统[J]. 航空制造技术, 2016, 59(10): 58-62.
- [5] 郑志男, 杨建军. 三维可视化在装配车间现场中的应用[J]. 航空精密制造技术, 2013, 49(1): 47-50.
- [6] 李章锦, 刘检华, 唐承统, 等. 面向复杂产品离散装配过程的电子看板系统实现与应用[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(2): 313-325.
- [7] 屈力刚. 基于三维工艺模型的装配现场可视化[J]. 制造自动化, 2013, 35(10): 83-87.
- [8] BAHETI R, GILL H. Cyber-physical systems[J]. Computer, 2017, 50(4): 14-16.
- [9] LACHENMAIER J F, LASI H, KEMPER H G. Simulation of production processes involving Cyber-physical systems[J]. Procedia CIRP, 2017, 62: 577-582.
- [10] 戴勇. 生产制造过程数字化管理[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 8-18.
- [11] 冯子明. 飞机数字化装配技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2015: 247-266.
- WANG Shuai, SUN Zhanlei, ZHANG Chengyang, et al. Systems of aircraft assembly process visualization based on mobile terminals[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(10): 58-62.
- DONG Huibo, XU Jianxin, DONG Siyang. Research on MES system for aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(18): 46-50.
- DUAN Guoqi, TIAN Xitian, HUANG Lijiang. Research on 3D visualization technology of aircraft assembly progress[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(9): 70-78.
- LI Zhangjin, LIU Jianhua, TANG Chengtong, et al. Implementation and application of electronic kanban system for discrete assembly process of complex products[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(2): 313-325.
- QU Ligang. Visualization of assembly site based on 3D process model[J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(10): 83-87.
- ZHENG Zhinan, YANG Jianjun. Application of 3D visualization in the assembly shop site[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2013, 49(1): 47-50.
- DAI Yong. Digital management of manufacturing process[M]. Beijing: Science Press, 2004: 8-18.
- FENG Ziming. Digital aircraft assembly technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2015: 247-266.

通讯作者: 贾晓亮, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为数字化制造 /MRO、CPS、数字孪生和智能制造等, E-mail: jiaxl@nwpu.edu.cn。

## Aircraft Assembly Shop-Floor Resources Tracing and Visualization

MA Teng, JIA Xiaoliang, SUN Bingyang

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**[ABSTRACT]** In the process of aircraft assembly, in order to visually tracing the on-site aircraft assembly resources, this paper proposes an aircraft assembly on-site resources tracing and visualization method oriented CPS and 3D model. Aircraft assembly on-site resources data model is founded that includes spatio-temporal data and 3D data. Based on three-dimensional modeling of shop-floor and assembly resources, aircraft assembly on-site resources tracing and visualization framework is established. The feasibility and effectiveness of the proposed method and framework is verified in an aircraft fuselage component assembly shop-floor.

**Keywords:** Aircraft assembly production line; Cyber physical system (CPS); On-site resources tracing; On-site resources visualization

(责编 大漠)