

# 基于数字孪生的航空发动机低压涡轮单元体对接技术研究

王 岭

(中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

**摘要:** 提出一种基于数字孪生的航空发动机低压涡轮单元体对接技术, 以某型航空发动机总装装配的低压涡轮单元体对接安装关键过程为对象, 采用数字孪生技术, 通过对环境、工艺过程中的物理对象建模, 并使用多传感器进行模型与物理对象之间数据映射与互联, 实现航空发动机低压涡轮单元体对接工艺过程与3D虚拟对接仿真过程的物理融合、模型融合、数据融合; 通过数据在虚拟仿真环境中的可视化展示与分析, 实时预警及决策, 并借助物理终端控制实现低压涡轮单元体对接安装过程的实时位姿调整, 提高了真实对接过程的可视性、可达性、可操作性及可预测性; 基于数字孪生的低压涡轮单元体对接技术可保证在复杂装配条件、高精度要求下, 真实单元体装配过程的无磕碰对接, 减少操作人员劳动强度。

**关键词:** 航空发动机; 对接技术; 低压涡轮单元体; 数字孪生; 3D虚拟仿真

## Research on the Docking Technology of Final Installation for Aeroengine Low Pressure Turbine Unit Based On Digital Twin

Wang Ling

(AECC Commercial Aircraft Engine Co., LTD., Shanghai 200241, China)

**Abstract:** A Low Pressure Turbine (LPT) unit docking technology for aero-engine final installation based on digital twinning is proposed. The parallel process of both 3D virtual docking simulation and the real docking is given synchronously by digital twin technology. The 3D LPT unit docking simulation platform is realized by modeling the physical object of environment and process. The data between the 3D simulation platform and the physical object are mapping and interconnecting by multi-purpose sensors. Through visualization display and analysis of data in 3D simulation platform, real-time position adjustment decisions for LPT unit docking are made and done by the physical terminal control device. The 3D virtual docking simulation and real time data tracking shows better visibility and predictability of the docking process, which provide data for the onsite technical engineer to do the decision during the installation process, ensuring the precisely installation without collisions, and reducing the labor intensity of the operator.

**Keywords:** aero-engine; docking technology; low pressure turbine unit; digitalTwin; 3D virtual simulation

## 0 引言

航空发动机是典型的复杂结构产品, 其装配过程由数万个零件形成组件、部件、单元体和整机。其中, 总装装配是按照设计总图样和技术规程, 把主单元体及成、附件进行组合, 形成发动机整机的装配过程。总装装配是航空发动机制造过程中最为重要的环节之一, 其技术水平和装配质量直接影响航空发动机的工况特性, 决定着发动机运行过程的可靠性、寿命及主要性能参数<sup>[1-3]</sup>。目前, 国内航空发动机总装装配多年来依然采用传统装配方法, 以关键环节为例, 低压涡轮单元体对接过程主要使用手工方式装配, 通过人工目视检查对接装配质量, 装配质量不稳定, 装配效率偏低, 工人劳动强度大, 装配作业过程管理

困难, 与国际先进航空发动机总装装配技术差距巨大, 已成为制约我国航空发动机产业发展的瓶颈之一。为此, 针对商用航空发动机关键工艺环节, 发展数字化、自动化技术, 对于提高发动机装配过程质量一致性、稳定性及效率具有重要意义。

数字孪生 (Digital Twin) 通过数字化方式构建物理实体与其虚拟模型之间的关联, 在数字环境中借助数据模型与物理实体之间的数据交互, 并通过融合分析及决策迭代优化, 实现面向产品全生命周期过程的模型、数据、智能技术的集成<sup>[4]</sup>, 支持产品研发、生产及业务管理过程科学、可靠、有效的分析和决策, 达成更为准确的企业生产运营指标<sup>[5]</sup>。

本文选取商用航空发动机总装装配关键工艺低压涡轮单元体对接过程为研究对象, 通过数字孪生技术, 将真实装配工艺过程与3D虚拟仿真通过过程数据的实时采集和驱动, 达到物理融合、模型融合、数据融合和服务融合, 实现真实对接过程与虚拟仿真的交互与协同, 提高装配效率

收稿日期: 2018-07-30; 修回日期: 2018-08-20。

**作者简介:** 王 岭 (1975-), 男, 贵阳人, 研究生, 高级工程师, 主要从事商用航空发动机研制过程管理体系建设、质量管理体系建设及智能工厂建设方向的研究。

及装配过程一致性。

## 1 数字孪生技术的发展应用

### 1.1 概念

“数字孪生”又称为“数字化双胞胎”，2003 年，由密歇根大学的 Michael Grieves 教授在其产品全生命周期管理课程上提出了概念雏形，将产品数字化双胞胎定义为“与物理产品等价的虚拟数字化表达”。2011 年之后，数字双胞胎概念由美国空军研究实验室提出并得到了进一步发展，并逐步在 2016 年之后由波音、罗罗、西门子、达索、洛克希德马丁等公司及组织开展应用<sup>[6]</sup>。数字孪生（数字化双胞胎）的基本概念是指，针对产品、生产或管理过程中的具体问题，通过仿真建模手段，实现对具体问题对象的数字化模型表达，并在数字化模型中模拟现实环境中的行为，进行数据交互，通过数据分析、预测等手段，解决具体问题的一种技术手段，其核心是模型和数据。

### 1.2 数字孪生的应用及准则要求

按照图 1 所示的产品研制生态系统基本原理，产品研制系统可分为由产品、生产和业务 3 个维度构成<sup>[7]</sup>，据此基于模型的数字孪生技术也包括“产品数字孪生”、“生产数字孪生”和“业务管理数字孪生”，通过三者的有机结合，改善传统产品研制过程主要依靠生产现场的试制、调试和整改过程，避免问题不能及时暴露、批量生产质量问题多及生产成本浪费等情况。数字孪生的具体应用场景如下：

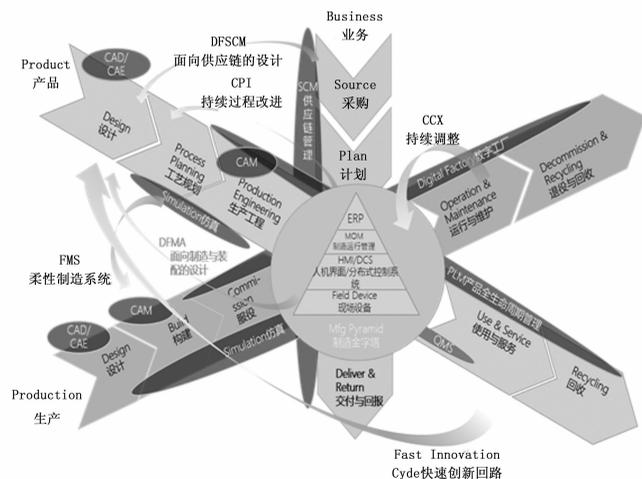


图 1 产品研制生态系统

1) 产品数字孪生：产品数字孪生指基于模型与数字样机的产品设计过程，按照航空产品研制过程分析，主要包括需求分析、概念设计、方案设计、虚拟验证等阶段，在设计阶段，通过模型、数字样机，实现对产品尺寸公差分析，评估对应零部件、工装是否满足既定设计目标，通过明确对产品质量有重要影响的产品特征（如孔、面、线等），来模拟分析和评估产品设计和未来制造过程中的关键特征，从而在设计研发阶段为产品质量改善提供改进建议；

2) 生产数字孪生：生产数字孪生主要通过生产过程虚实模型的对应，实现对工艺及生产过程的优化分析与评估。以装配过程为例，数字孪生环境下，首先需要对装配工艺规程进行基于模型的验证与评价，确保装配制造过程和装配制造方法的有效性。具体实施过程中，通过把产品、资源和工艺操作结合起来分析产品装配的顺序和工序的流程，并在装配制造模型下进行装配工装的验证、仿真夹具的动作、仿真产品的装配流程、验证产品装配的工艺性，达到尽早发现问题，解决问题的目的。同时，考虑典型航空产品生产环境中人机协同的重要性，进行人机工程分析，分析人体的可视、可达及操作姿态、疲劳等方面，了解装配的可行性和局限性，从而确定最佳操作顺序。在实际生产过程中，通过实时获取现场的装配过程人机料法环测相关数据，确保与模型要求的一致性，可确认航空产品的装配状态，同步展示，在异常情况下及时报警提示，纠正过程错误，从而保障生产过程的一致性要求；

3) 业务管理数字孪生：业务管理数字孪生主要通过构建当前或未来工厂的虚拟模型，结合订单、产品、物流供应啦那、布局、人员、资源等的具体数据，对工厂及供应链全局的业务运行过程进行分析及优化的过程，目前的基于模型的工厂规划，即属于业务管理领域的数字孪生模型。

通过对产品研制生态系统的数字孪生业务场景进行分析，三个维度通过相互影响形成产品的全生命周期数字孪生过程，以发动机产品为例，其涵盖产品设计、制造、使用、维护和退役全生命周期。数字孪生得以有效发挥作用，其基本应用准则应包括：实现数字化模型与物理实体的有效信息融合，并以业务过程模型为基础，基于数据驱动业务过程模型运行分析，通过多重数据的交互与过程优化，最终实现服务更加高效、优质的业务过程的目标。这一过程中，实时性越高，优化分析迭代的频率越高，具体需要根据产品的特点及业务运行的要求来进行设定。

## 2 航空发动机低压涡轮单元体对接安装需求

以某型商用航空发动机为对象，其低压涡轮单元体对接安装的典型特点及难点在于：

- 1) 安装过程行程长，低压涡轮轴长约 2 m，装配行程至少 2.2 m；
- 2) 装配重量大，低压涡轮单元体总重超过 800 kg；
- 3) 装配精度高，低压涡轮轴与与风扇单元体为过渡配合，配合精度要求 0~0.057 mm；
- 4) 装配环境可视性差，不易直接观察，对接安装过程属于盲装过程。

由于低压涡轮单元体对接过程属于典型的盲装过程，可视性差，导致安装过程极易出现磕碰的质量问题。为此，迫切需要通过数字孪生技术，对低压涡轮单元体对接过程中产生的各种数据进行实时采集，并通过建立 3D 虚拟仿真平台实现实时数据与 3D 虚拟仿真平台模型交互，实现真实

单元体的对接过程在 3D 环境下的实时监控和预测,可提高对接效率及装配过程一致性<sup>[8-9]</sup>。

### 3 航空发动机低压涡轮单元体数字孪生体技术

#### 3.1 航空发动机低压涡轮单元体数字孪生体内涵

为了构建航空发动机低压涡轮单元体自动对接过程的生产数字孪生,需要建立与某型低压涡轮单元体等价的虚拟数字化模型表达,通过对接相关特征的有效定义,以此为基础进行真实条件或模拟条件下的测试。

首先,需要构建航空发动机低压涡轮单元体的数字孪生体,该数字孪生体概念模型包括下面三个部分:

- 1) 物理空间的航空发动机低压涡轮单元体实体;
- 2) 虚拟空间的虚拟航空发动机低压涡轮单元体;
- 3) 物理空间和虚拟空间之间的数据和信息交互接口;

航空发动机低压涡轮单元体数字孪生体是在整个产品生命周期的一致性模型和计算模型,它的参数设置过程中与未来装配和维护产品所用的材料、制造规范及流程相关联。所以航空发动机低压涡轮单元体数字孪生体应具有多种特性,具体来说,对于数字模型,应具有多尺度、可继承、可计算特性;对于实物模型,具有可连接性、唯一性、可控制特性。

综上所述,构建航空发动机低压涡轮单元体数字孪生体的基本内涵包括以下几个方面:

- 1) 针对低压涡轮单元体的物理实体与数据模型,要具备可连接性和集成性特征;
- 2) 针对低压涡轮单元体,要具备写实性,包括单元体集合模型、数据获取过程的多敏感信息融合和多处理模型、对接过程的运动机构及物料传输系统物理模型等;
- 3) 数字孪生体要具备广泛性,适应包括整个单元体对接装配全过程,并从设计阶段延伸至后续的维修服务阶段;
- 4) 数字孪生体要具备可计算性,确保低压涡轮单元体可以通过虚拟仿真和分析来实时反映对应实体的真实状态。

#### 3.2 航空发动机低压涡轮单元体数字孪生体数据组成

航空发动机低压涡轮单元体数字孪生体除了表达低压涡轮单元体的几何特征信息和材质等参数信息外,还包括了装配工艺过程的参数数据描述,因此,低压涡轮单元体对接装配生产数字孪生体是一个过程模型和动态模型,会随着低压涡轮单元体对接过程的实施而实现数据的产生、增加和不断的演化。组成航空发动机低压涡轮单元体的数字孪生体的数据主要包括:设计数据、工艺过程数据、制造过程数据和装配过程数据,如图 2 所示。

1) 设计数据:包括某型航空发动机低压涡轮单元体三维模型数据(表达几何形状信息几何数据)、属性数据(表达低压涡轮单元体相关的材料、规范、分析数据、测试需求的数据)、三维标注数据(表达低压涡轮对接尺寸与公差),包含装配对接关系的设计 BOM,以及设计文档。

2) 工艺设计数据:包括低压涡轮单元体对接装配工艺

装备模型信息(包括对接设备、设施、工装工具的工序模型)、工序设计要求数据(资源特征信息、对接方法、对接工艺控制参数等)、质量控制要求数据(对接检验/测量要求、关键/重要工序质量控制要求信息)、仿真评估数据(几何仿真、物理仿真、对接过程仿真),工装工具设计要求数据、控制过程要求数据。

3) 制造过程中数据:包括低压涡轮单元体、风扇单元体制造 BOM 信息、检测过程实测数据、技术状态实测数据、生产环境实测数据、工艺装备实测数据等。

4) 装配过程中数据:包括低压涡轮轴与风扇单元体的选配数据、对接过程操作动作数据、过程状态监控数据、预测数据、多传感器采集和分析数据等。此部分为动态模型数据。

#### 3.3 基于数字孪生的航空发动机低压涡轮单元体自动对接

基于数字孪生的航空发动机低压涡轮单元体自动对接,分为真实实体对接过程和虚拟仿真对接过程,两个过程并行进行,实时进行信息交互,通过虚拟对接过程,可对真实对接过程进行过程监控、预测和指导,保证对接过程的顺利进行<sup>[10]</sup>。

基于数字孪生的航空发动机低压涡轮单元体自动对接过程如图 3 所示。为了提高低压涡轮单元体装配过程的可视化程度,在此基础上,对重要的过程数据进行监控、预测并随时对过程进行调整,提高生产过程效率及质量水平。数字孪生通过如下过程提高自动对接过程的效率及质量水平。

1) 自动运输及上下料过程数字孪生。此过程通过大负载自动运输 AGV 小车将低压涡轮单元体自低压涡轮区运输至对接安装区域,使用丝杠机构的自动上下料装置将低压涡轮单元体自动放置于智能装配平台上。运输 AGV 小车运载低压涡轮单元体时,需对低压涡轮轴与风扇单元体数据进行选配。为了准确获取低压涡轮轴选配信息、单元体运输及放置信息,建立仿真环境,包含低压涡轮单元体、风扇核心机单元体、AGV 运输小车、自动上下料装置等实体模型,并通过数据采集实现模型数据与实体数据实时映射。此过程完成低压涡轮单元体与风扇单元体选配、低压涡轮单元体运输过程及低压涡轮单元体上料过程准确跟踪。

2) 多自由度自动对接过程数字孪生。由多自由度位移与姿态调整平台组成,包括 X、Y、Z 方向的移动和转动以及装配过程中所需的 2 个局部自由度,同时建立多自由度位移与姿态调整平台的数字模型。物理实体与数字模型通过多传感器建立数据融合关系,实现对接过程可视化及实时位姿调整。多传感器数据采集包括相对位姿通过定制的激光跟踪与引导测量系统、高精度激光测距系统、高精度超声测距系统和力传感系统等。通过将测量数据反馈至控制系统,进行位姿调整,实现无磕碰、平滑对接。通过实时数据采集,将单元体的位置、距离等信息实时传输到虚

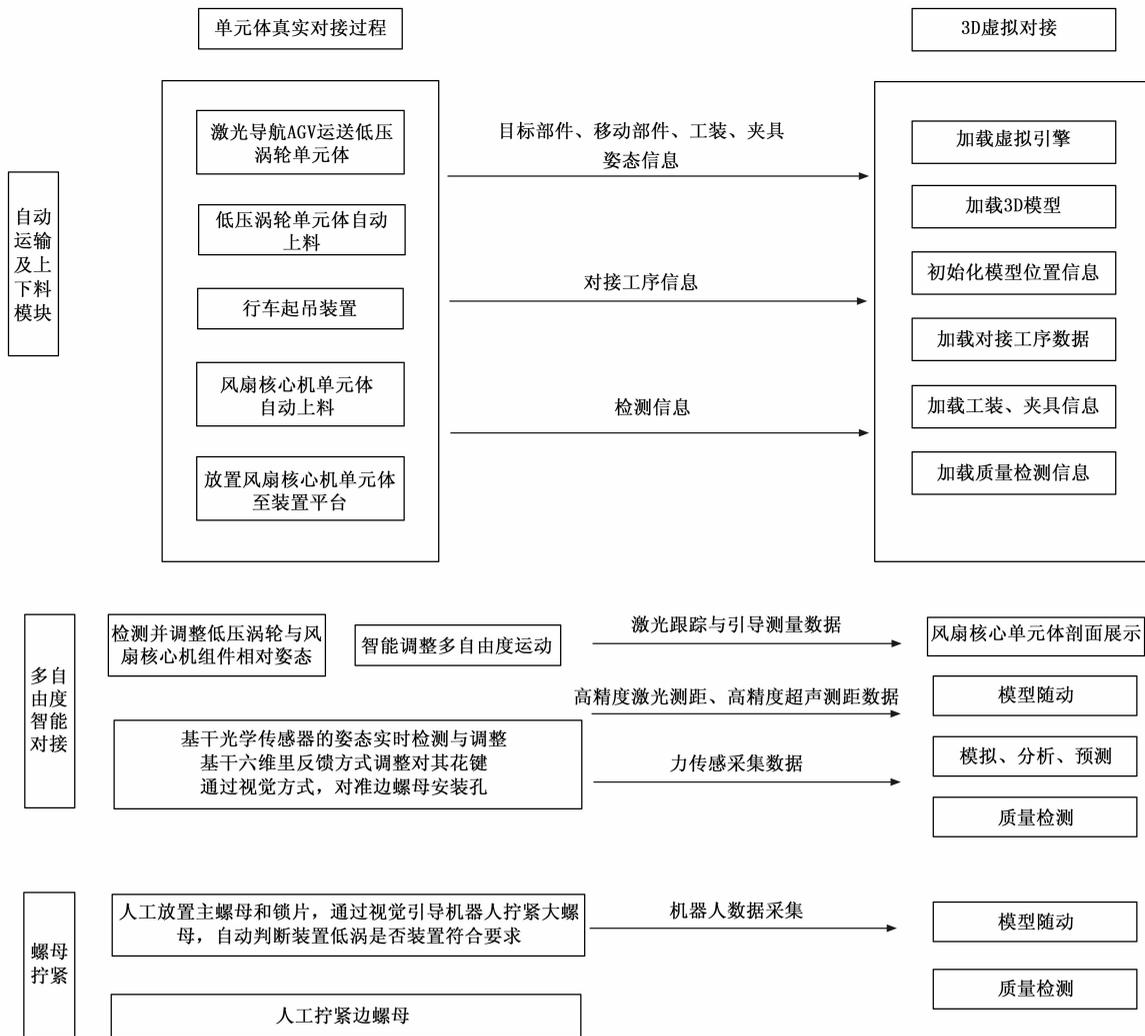


图 2 航空发动机低压涡轮单元体数字孪生技术对接装配流程图

拟仿真平台，平台中模型根据输入信息进行随动，根据采集的实时数据，可对对接过程进行预测，操作人员可根据预测信息，进行随时的分析、调整和单机模拟，保障对接成功。

3) 螺母拧紧过程数字孪生。分为主螺母和边螺母拧紧两部分。对主螺母拧紧过程采用自动方式拧紧，建立其数字化模型，通过激光测距、视觉检测、电动扳手等设备及检测装置获取数据。将视觉引导机器人采集的数据实时传送的虚拟仿真平台，进行实时模拟和检测。边螺母通过视觉引导方式进行对中，由于空间限制，采用人工方式进行拧紧。

## 4 关键技术

### 4.1 3D 虚拟仿真平台构建技术

低压涡轮单元体对接生产数字孪生的主要展示方式为三维虚拟展示，基于数字孪生的虚拟对接平台需要满足下面 4 个技术要求：



图 3 基于数字孪生的航空发动机低压涡轮单元体真实、虚拟对接并行过程展示

1) 低压涡轮单元体模型数据基础处理。要求对虚拟场景中的低压涡轮单元体三维模型关联数据模型，具体包括低压涡轮单元体对接装配的空间数据：如位置、形状、尺寸、比例等；环境属性数据：对对接空间中不同角度的环境属性通过材质设定或图片形式进行模拟。

2) 低压涡轮单元体模型虚拟场景三维建模，在虚拟场景中，低压涡轮轴、风扇单元体、对接设备、物料配送设备的虚拟对象是主体，这些主体通过建模来实现数据复现的。对象建模过程中，首先要对基本的几何建模及配合公差进行检查，确保一致性。

3) 低压涡轮单元体对接装配过程三维优化, 对于对接模型模拟拟仿真过程中, 需要严格考虑硬件设备的制约情况, 设定虚拟场景环境下的交互过程涉及的关键参数数据, 通过在数据环节中连接实测数据, 实现虚实模型的融合互联。

4) 数据驱动的低压涡轮单元体仿真, 通过设计对接参数变量, 可从传感器实时采集的数据或模拟器发送的数据进行变量赋值, 平台通过模型绑定的变量与预设的动作进行关联, 进行互动仿真操作。

3D 虚拟仿真平台通过构建低压涡轮单元体物理实体的数字模型, 通过在数字化方式下实时展示对接装配过程的进展状态数据, 可以大大改善传统装配方式中装配过程可视化程度差的问题, 预防磕碰质量问题产生。

#### 4.2 基于多线程的数据采集技术

在低压涡轮单元体对接生产数字孪生过程中, 数据的连接与绑定是达成孪生及过程可视化展示与提前预警的基础, 在建立的低压涡轮单元体数字孪生平台中, 需要对真实环境中所应用的位置、距离、力传感数据进行变量关联, 通过独立的线程进行单独接收、存储和计算, 驱动场景中的三维模型进行映射调资, 从而实现将实时数据的读取与处理数据的界面操作交给不同的线程并发执行, 解决实时性的问题。

低压涡轮单元体对接装配仿真平台中, 每个控制程序以线程为最小的独立运行单位进行控制。在协同并行工作中, 每一个线程都有自己的堆栈, 并独立于应用程序内的其他线程而运行, 多个线程可以同时运行。利用多线程机制可以实现进程内的各个子任务并行执行, 从而提高系统的实时响应性能, 提高生产过程问题处理效率。

#### 4.3 基于激光导航与传感的物料自动运输技术

为了实现低压涡轮单元体自动运输及运输过程数据自动采集, 采用激光反射原理, 在自动运输小车 AGV 行走路径周围安装位置精确的激光反射板, AGV 通过发射激光束, 来确定其当前的位置和方向, 计算相对位置, 通过几何运算实现路径导航。

低压涡轮单元体运输 AGV 小车负载运行过程中, 负荷大, 运动速度控制小于 20 m/min, 考虑装配车间人员行驶路径与 AGV 行驶路径, 为保证人员安全, 设置激光防撞仪及急停装置, 安全控制结构如图 4 所示。在数字孪生体中, 数字模型获取实时现场数据, 通过安全防护装置实现自动运输过程可视化自动防护, 逐步形成自动运输过程的现场管理规范及规则。

#### 4.4 对接过程激光跟踪与位姿测量技术

考虑商用航空发动机自动对接过程安装精度要求高, 考虑数据采集及控制过程中, 为了准确获取数据并实现自动对接过程的有效控制, 采用激光跟踪与引导系统、高精度激光测量传感器、高精度超声测量传感器等有效测量及

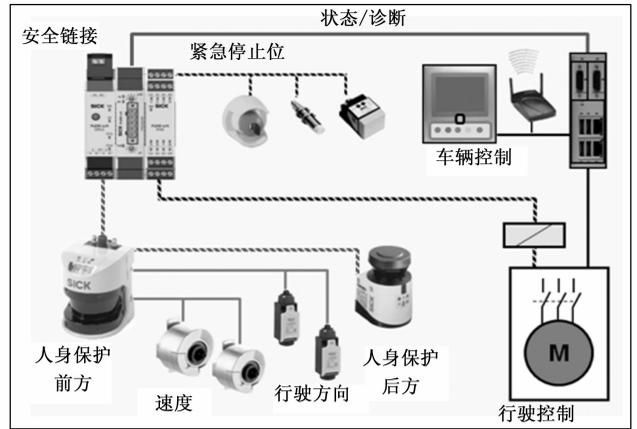


图 4 物料自动运输安全防护

控制低压涡轮和风扇核心机单元体的相对姿态<sup>[1]</sup>。

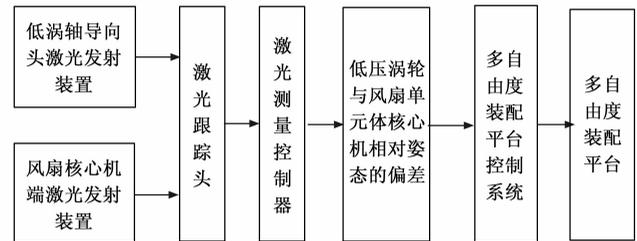


图 5 定制的激光跟踪与引导测量工作原理

通过图 5 所示的定制的激光跟踪及引导测量装置, 并与 3D 虚拟仿真平台中的数字化模型进行数据融合, 在虚拟平台中显示低压涡轮与风扇单元体核心机相对姿态, 当目标移动时, 激光跟踪头保证跟踪两组激光, 同时准确测量低压涡轮与风扇单元体核心机后端的相对姿态, 从而得出低压涡轮和风扇核心机单元体前端之间的相对偏差。为多自由度装配平台提供控制输入, 形成虚实融合控制。提高控制精度及可视化程度。

### 5 结束语

基于数字孪生的低压涡轮单元体对接技术研究通过建立低压涡轮单元体对接过程数字孪生体, 形成低压涡轮单元体、对接过程、对接环境的数字化虚拟仿真平台, 并通过多传感器建立数字化虚拟模型与实物模型之间的映射关系, 采用多线程数据采集技术, 实现对接过程中虚拟仿真平台与实物的准确映射, 对对接过程实时进行监视与控制, 从而有效提高航空发动机对接装配的精度和效率, 是未来满足快速研制生产和批产的必由之路。为了将该技术成功应用于我国的商用航空发动机批生产过程中, 需要更进一步纳入整个企业信息管理, 如逐步分层建立部件级数字孪生模型, 完善 3D 虚拟仿真平台, 提高数据采集手段, 为后续建立柔性装配生产线奠定基础, 从根本上提升我国航空发动机研制水平。

(下转第 303 页)