

航空发动机水平脉动总装 生产线规划研究

Study on Horizontal Pulse Assembly Line Planning of Aeroengine

中航工业西安航空发动机(集团)有限公司 魏小红 谈军 方红文
西北工业大学 常智勇 曹浩 邓奇



魏小红

毕业于北京航空航天大学自动控制系,从事设备技术管理工作 20 余年,现在从事工艺设备规划工作。

以某型大涵道比涡扇发动机的装配线规划为对象展开研究,借鉴国外发动机总装配技术发展趋势,在深入分析现有装配工艺的基础上,研究水平脉动式总装配生产线设计技术,研制配套基础装备,最后通过系统集成实现水平脉动式发动机总装配生产线。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.19.008

垂直装配。其生产组织、生产流程、工装设备等各方面也以传统定位装配方式进行配套,这就使总装的工艺水平、生产组织模式和装配工装与发动机设计及零部件制造水平不协调,难以满足航空发动机军民混用、高质量、长寿命的装配质量需求,难以满足国家对航空发动机批量生产和维修的发展需求。

近年来,国际航空制造技术取得了突飞猛进的发展^[1],流水线装配已成为国际航空发动机总装技术的发展趋势。然而,由于国外在航空发动机制造方面对我国长期进行严密的技术封锁,引进国外先进的装配工艺方法、核心装备和生产线难以实现。在这种情况下,自主开发新型航空发动机总装工艺,突破发动机总装关键技术,研制满足航空发动机总装需求的基础制造装备,建设先进的总装生

产线,将从根本上改变我国传统的装配模式,整体提高发动机装配技术水平和生产效率。对于增强我国航空发动机研制能力,提升我国航空工业的国际竞争能力具有重要的战略意义。

本文以某型大涵道比涡扇发动机的装配线规划为对象展开研究,借鉴国外发动机总装配技术发展趋势,在深入分析现有装配工艺的基础上,研究水平脉动式总装配生产线设计技术,研制配套基础装备,最后通过系统集成实现水平脉动式发动机总装配生产线。项目研究成果可直接应用于该型号发动机总装,实现未来尺寸相当的大涵道比涡扇发动机的共线装配,其技术成果可直接推广应用用于其他类型发动机的生产装配。

生产线规划的总目标

针对发动机总装过程中的装配

总装是航空发动机制造过程中最为重要的环节之一,其装配技术水平和装配质量显著影响航空发动机的工况特性,直接决定发动机的可靠性、寿命及主要性能参数。近年来,我国在航空发动机新型材料研发应用、零件机械加工制造、特种工艺成型、先进检测技术等方面已经取得了一定的进步。但是,总装环节仍沿用早期固定站式装配模式,基于专用的固定刚性桁架支撑发动机进行

效率低,成本高,装配质量受限,数字化、自动化水平低等问题,首先确定该总装配生产线建设的总体目标。即研制集成式模块化发动机水平装配单元、单元体自动化安装关键工艺装备和高精度在线检测装备,建设一条大涵道比涡扇发动机数字化、自动化水平脉动式总装生产线。为此必须在规划中实现以下分解目标:

(1) 自主研发国内领先的发动机总装脉动生产线和装配站位,具有一定的灵活性和适应性,具备调整后适应其他机型总装的能力,实现发动机总装由离散模式向生产线模式的飞跃。

(2) 自主研发发动机水平总装的新工艺,研制专用的工装,克服水平状态下零部件应力、应变和装配精度控制等问题,进行工艺重组和优化,满足脉动生产线节拍的要求。

(3) 根据装配工艺技术要求,研制专用的工具,提高装配效率和精度,保证装配质量的一致性,降低工人的劳动强度。

(4) 采用数字化管控手段,实现装配操作的引导和控制,采集现场数据,及时反馈现场状态,建立无纸化装配生产模式,形成数字化、结构化的装配履历本。

(5) 通过协同环境及时协调配套厂家的制造、供应进度,并以此为依据组织生产,减少缺件等待时间和库存时间,提高发动机总装的效率和效益。

发动机总装生产线的“集成化、数字化、自动化、智能化”将通过以上分解目标实现。这其中目标(2)的实现主要由工艺工程师完成。由于发动机装配时的位姿与服役状态一致,采用水平装配模式,因此装配本身增加的应力与变形较少。重点在于对待装配零件进行有效夹持,使得其自由度合理控制。而目标(5)的实现主要通过跨企业的信息协同实现。因此对于装备部门而言,建设水平脉动生产线的重点任务是保证

目标(1)、(3)、(4)的实现。本文后续内容也将围绕对这3部分的实现进行阐述。

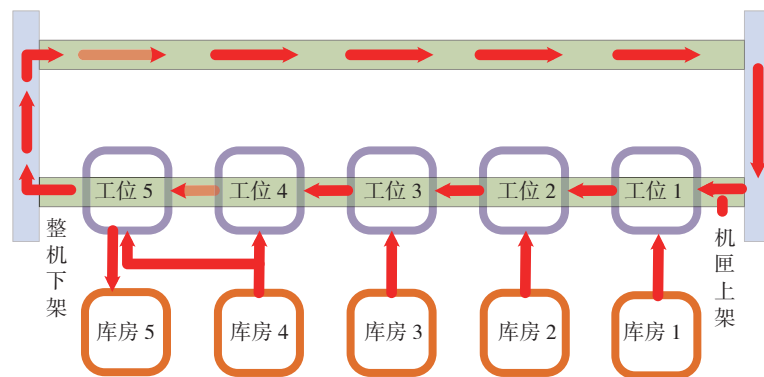
关键目标实现方案

1 具有灵活性的总体站位布局规划

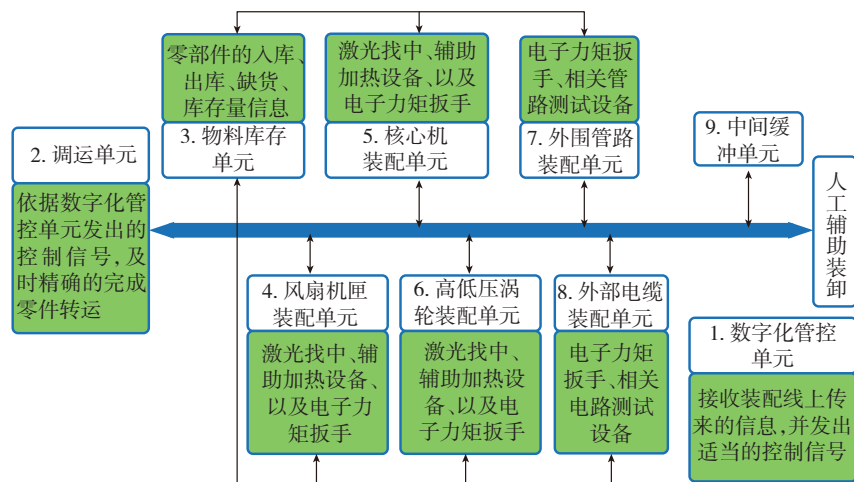
为了实现航发装配由定点离散装配到生产线装配的升级,首先要规划生产线的主体框架结构。传统发动机总装使用固定站式装配。发动机基体借助工装放置于地面,各分总成逐一调运至基体进行安装。这一装配方式生产效率较低,而且固定的装配位置使得装配操作不便,人员、工装堆积。脉动式生产线的采用能够有效地解决以上问题。基于航空发动机的构成,主体框架由5个工位组成,分别完成风扇机匣、核心机、低压涡轮、外部管路和外围电缆的装

配。同时考虑本生产线主要面向大涵道比航空发动机总装,按照发动机最大重量、最大长度及最大直径设计,并具备向其他机型推广的能力。

生产线总体结构既可以选择在地面直接进行的装配方案,也可以选择悬吊式装配。地面装配所需结构简单,设备投资费用少。但对装配体的控制能力也少。常需要人员使用地车与梯凳等工具,不利于降低人员劳动强度,而且发动机下部零件难以安装。而悬吊式装配方案结构相对复杂,设备投资费用较高。但便于在装配过程中调姿,减少了操作人员的工作强度。此外悬吊式方案便于拆装,有利于后续持续改进。综合以上考量,生产线主体结构选择悬吊式。装配模块采用钢结构,并具有高精度轨道。发动机装配时固定于可升降



(a) 生产线布局



(b) 配置信息

图1 航发总装生产线硬件布局规划

的吊运系统,具有垂直升降功能。可通过手持终端控制运送单元的垂直与水平移动。

总体规划方案如图1所示,其中图1(a)为生产线布局,该脉动生产线同时具备缓冲功能,缓冲区内最多可容纳1台发动机,便于缺件的发动机,以及条件具备后重新上线。图1(b)为配置信息。图2展示了在图1(a)上运行的发动机吊架的具体方案:在生产线中布置的轨道系统可使发动机吊架在各单元间运动,并由光栅对准系统控制吊架的停止位置。同时,重要单元配给高精度丝杠及平衡油缸,使得发动机在该单元可以实现自主升降,以便装配实施,降低人员操作难度。此外并设计了相应的可快速更换式吊装接口,根据不同的装配程度,变换使用对应的吊装点。为了增加生产线的适用性与灵活性,在吊架中与具体发动机型号相关的部分被设计为尽可能少占用资源,并可从总体吊架上拆卸。如此即可在后续以相对低廉的代价实现与其他型号发动机装配的兼容。

2 保证装配质量的关键容差控制

为实现目标(3),对发动机总装过程而言,最重要的装配精度控制对象就是各维修单元总成之间存在的转子间过盈连接。这一连接工艺是总装过程中最重要的装配环节之一^[2-3]。对于大涵道比产品而言,由于各总成尺寸、重量偏大,导致操作难度加大。

而各总成中均存在着定子和转子两大部分,两个部分互相犬牙交错,为保证性能,各总成定、转子之间间隙很小,稍有不慎就有损坏叶片的可能。这些因素都使得装配过程更加困难。此外,由于过盈连接在装配时需要进行加热,使得装配过程还有时间条件的限制。如何在建立脉动生产线,提高生产率的前提下保障乃至提高此类装配的质量,是该生产线规划中的重要内容。而对这一过程进行控制的关键因素,就在于对装配过程进行容差控制。

总体而言,过盈连接过程的容差控制分为离线测量、过程工艺与数据管控、在线测量3个部分。在离线测量阶段主要是通过精密测量仪器对装配结合面进行精测,以获得待装配零件的精确信息。这是因为即使结合面尺寸公差符合设计要求,对于每一个具体的总成而言,其尺寸间的实际偏差仍然对过盈装配过程有着重要的影响。此外,在排产饱满的情况下还可按实际尺寸偏差执行分组互换式装配法^[4]。各总成在装配前相对易于测量,因此测量过程较易实现。重要的是为各总成建立装配档案,储存这一测量信息。

为了保证此类配合的实现,还需要在装配时对配合孔进行预热处理后进行装配。传统装配过程中,装配人员按照工艺规程将加热棒置于配合孔中至特定温度后取出,然后立即

将轴类零件置于待装配位置,使用扭矩放大器进行手工安装。在这一过程中存在着若干人因使得装配质量有出现浮动的可能。如加热至温度由人在机器边监测,再如压入轴类零件的过程是手动操作等。此外,原温度信息只考虑了零件加热的绝对温度,没有考虑这一温度与环境温度的相对差异,更忽略了各具体待装总成的实际尺寸偏差信息。为了排除人为因素,并精确控制零件加热效果,将加热器进行了智能化改进。改进后的加热器根据环境温度与待装总成的实际偏差状况实时调整加热温度限值,并在合适进行装配时自动切断热源并蜂鸣提示可以进行安装。此外在切断热源后对被加热件也进行了温度监控,在温度下降到不宜安装限值后会立即发出警示,从而可以避免在零件加热完成后轴类零件未能及时安装的人为错误。此外,为了避免手工安装造成损伤,引入大扭矩自动压入设备与压力监测器以实现可控半自动装配,如图3所示。其中压入设备的输出扭矩与压力检测器的阈值控制依照待装总成的装配结合面实际尺寸偏差给出。

对于装配过程的在线测量,由于发动机的主体部分在装配过程中会在各个工位间运动,因此会有相比于传统定点装配过程要多的对正与调平工作。为了减少装配人员的操作,同时提高装配精度,在装配线规划

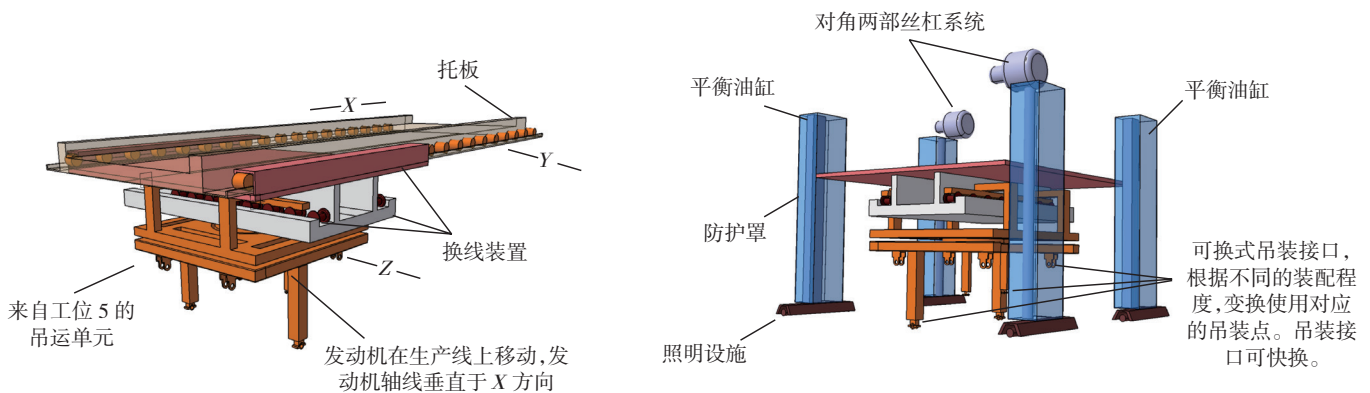


图2 发动机吊装方案示意

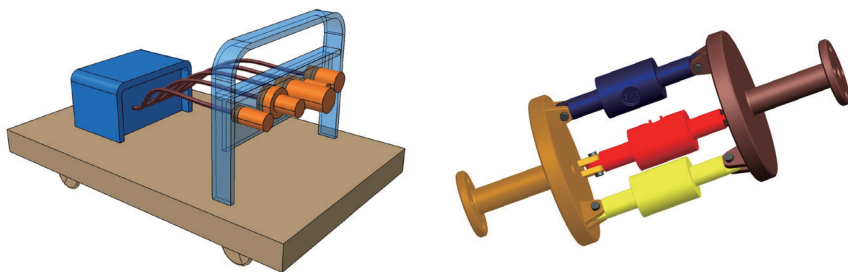


图3 孔轴过盈配合用智能加热设备及压力监测器

中,我们引入了激光对中系统协助操作人员对发动机位姿进行调整。如图4所示,首先将无源标靶通过高精度间隙配合或者定心机构安装在被测的孔中。标靶端面中心反射镜用于反射来自激光自准直测量系统发出的激光,端面漫反射圆环反射来自高精度摄影测量系统发出的平行光。然后激光自准直测量系统根据标靶中心反射镜反射回的激光点,计算测量对象偏转量。同时高精度摄影测量系统对标靶端面的漫反射圆环进行拍照,计算测量对象中心位置。图中测量系统调节平台用于调节测量系统位姿,主要实现测量成像平面与标靶端面的平行。而测量系统隔振平台用于保证测量系统工作的稳定性。这一测量数据结合压力检测数据,就是这一装配结果的量化表现形式。

最后,该装配的质量还将通过试车乃至后续的实测与实操得到进一步的反映。而这些回馈信息将成为后续装配互换性分组与工艺规程这两部分内容的调整依据。从而使得这一容差过程控制成为一个闭环系统。图5给出了这一闭环系统的总体流程。

3 数字化管控技术

发动机的装配信息流包括装配工艺设计、工装设计、装配过程管理、质量状态控制等,业务流程复杂,质量要求严格。为了提高航发装配质量和效率、降低装配出错概率、缩短装配周期,在架构航发总装生产线的硬件设施时必须同步引入装配数

字化管控系统,从而实现对现场操作的有效实施指导与管控,并最终从整体上提高航发的装配质量。

由于为航发总装配备的装配现场综合管控系统本身非常复杂,包括安全性、稳定性、子系统交互设定、兼容性设置等诸多方面,由于篇幅限制无法详述。本节仅就该系统信息流传递进行说明。图6所示为该管控系统的总体信息流架构。如图所示,

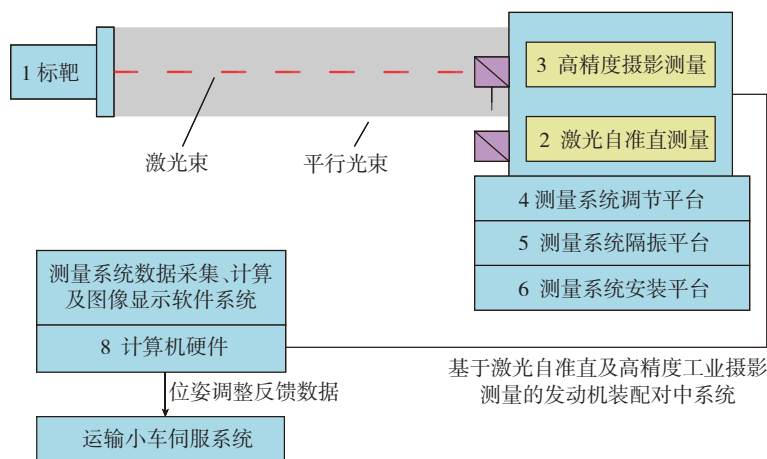


图4 激光对中系统

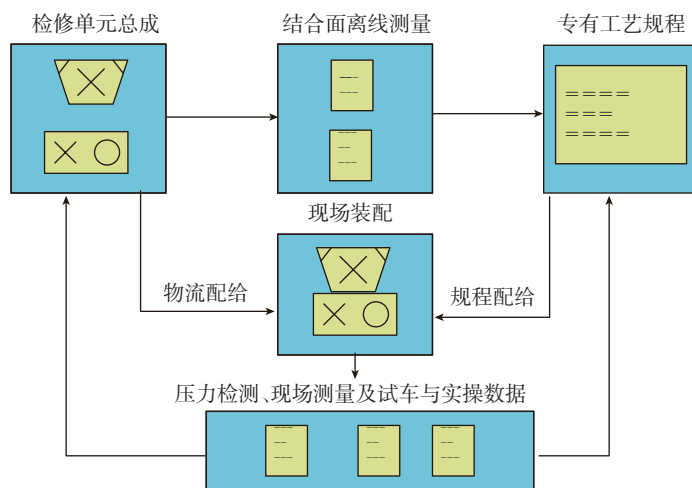


图5 容差控制流程

系统涉及人员包括负责生产调度人员、工艺工程师、操作工人、质检员以及各级管理人员和用户等。所有操作均需通过发动机总装生产线管理门户进行,其流程如下:首先由调度人员基于各厂协调计划生成总装厂的各级昨夜计划,然后由生产车间组织基于电子看板式的生产管理,以进行装配。其中装配的过程由工艺工程师编制的电子工艺指令进行指导,装配质量按照质量工程师编制的质量计划书进行相应检验,同时使用集成于系统中的各类传感器对装配过程与装配结果进行数据采集。采集数据包括了被装配的物料状态,工艺状态以及装配超差状态等。每台机的数据状态在此系统下将生成重要的结构化电子履历,存储入发动机装配数据库,以供该机服役周期使

用。同时,这一电子履历中所蕴含的数据也被用于对总体装配工作进行数据统计与分析。通过数据挖掘与知识发现技术,可以找出影响质量与成本的关键因素,从而进一步提高装配技术水平。

在实现了装配现场信息流数字化的基础上,就可以实现并提高对装配现场的管控能力。这里以风扇机匣装配为例,说明现场具体装配中管控的实现。如图7所示,首先由调度人员向数字化管控系统提交生产需求,基于这一需求,管控系统向吊运单元发出装配要求,以将风扇机匣装配位置预留。同时,系统向库房单元发出物料要求。库房在有库存的情况下,由AGV小车将物料配送至风扇机匣装配单元。在该单元,工人将按照系统给出的装配规程实施装配,并且其装配进度实时回馈至系统。待装配完成,检验人员检测装配无误后,该装配结果即被送入下一个装配单元。

结束语

航空发动机是一个复杂系统,其装配生产牵涉到技术、物料、人力、以及质量、周期、成本等诸多因素。因

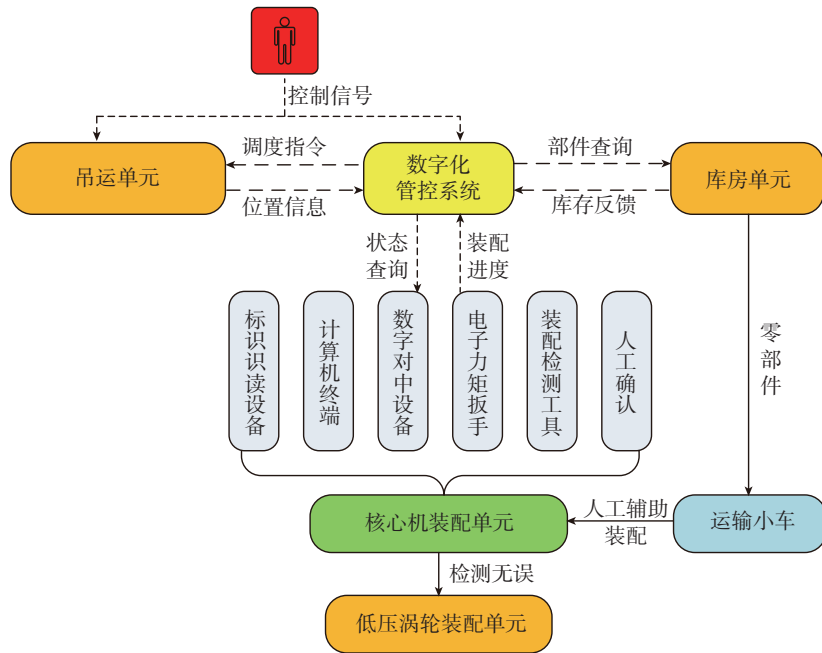


图7 装配单元信息流示意

此其总装生产线的构建需要综合考虑各个目标,权衡各部门的业务内容与需求,以期最大化满足航发装配各项要求。我们在规划该总装生产线的过程中,与诸相关部门多次研讨,以获得该生产线的关键技术点与重要需求。在此基础上,并与部分承建单位反复论证,对每一个工艺、生产技术难点与需求的实现都进行了详尽的讨论与过程仿真。并在讨论中

引入了风险预防机制,给出了在任何工作点出现问题后的解决预案。由此确定出水平脉动式航发总装生产线建设的总体目标,并将该总体目标分解为五个重要的子目标。在获得子目标后,对涉及到装备工作的3个重要目标进行了分析,找到了每一个目标的关键影响因此。然后围绕关键影响因素,给出了这些目标的具体实现方案,软硬件规划与流程图。并对其中的难点给出了原理分析以及实体仿真。最终完成的结果能切实提高目前发动机装配质量,缩短生产周期并减少人员劳动消耗。因此受到了各方的认可。

参考文献

- [1] 辛彦秋,吴斌,黄丹,等.民用航空发动机脉动装配浅析.航空制造技术,2013,20:118-120.
- [2] 周烁,汪俊熙,刘宜胜,等.大型商用航空发动机整机装配工艺浅析.航空制造技术,2014,5:92-96.
- [3] 许国康,高明辉,侯志霞,等.飞机大部件数字化对接关键问题及应用分析.航空制造技术,2011(22):26-29.
- [4] 朱彬,于乃江,孟祥海,等.航空发动机装配尺寸链公差设计方法研究.测试技术学报,2015,29(2):177-180. (责编 叶枫)

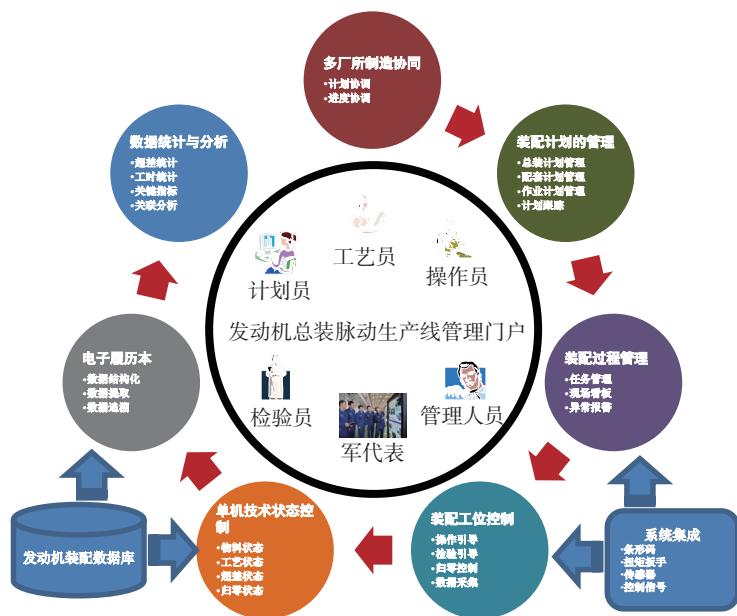


图6 航发装配现场综合管控系统