

涡扇发动机先进装配工艺与装备

孙贵青, 王 彤, 吕玉红

(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

[摘要] 针对涡扇发动机装配技术的发展趋势和应用特点,对整机装配、智能拧紧、装配检测3方面先进工艺进行分析总结。涡扇发动机采用脉动装配线和多自由度装配平台进行整机装配,大幅度提高生产效率;智能拧紧设备能够实现发动机连接件的定力矩、定转角精确控制及监控,改善关键转子部件连接的均匀性、稳定性和可靠性;转子堆叠优化技术实现对装配位置的预测和同心度优化,电子塞尺可消除不同操作者带来的测量误差。发动机数字化装配将不断引入各种高效先进的自动化智能设备,自动化、智能化、数字化是未来涡扇发动机装配工艺与装备的发展方向。

关键词: 涡扇发动机; 整机装配; 智能拧紧; 装配检测

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.22.072



孙贵青

硕士、高级工程师,研究方向为航空发动机装配工艺。

装配作为制造的最终环节,对产品质量和成本等具有直接影响^[1-2]。随着现代工业技术的不断进步,轿

车、飞机等装配,始终在积极引进各行业的最新成果,创造了大量新模式、新技术、新装备,自动化、智能化、数字化、精益化等处于较高的水平,引领着装配技术发展。相比而言,航空发动机装配尚存在着一定差距^[3],但国外发达国家对其装配技术已经日益重视,从公开信息看,在整机装配、关键部件螺栓拧紧、装配检测上已应用了较多先进装配工艺与装备。

整机装配

1 脉动装配线

随着航空制造技术的快速发展,通过借鉴轿车及飞机等有益经验,先进民航大涵道比涡扇发动机已采用脉动装配线进行批生产^[4-8]。

与飞机装配特点相比,涡扇发动机外形和重量远远小于飞机,零部件刚性较强且有自己的定位与连接基准,装配中不需要制孔、铆接等机械

加工工作,而且需要进行多次重复装配。在技术和管理复杂程度上,与飞机脉动装配线及轿车连续装配线相比,涡扇发动机生产线设计及建设相对简单。但航空发动机零部件结构复杂,机件装配精度较高且装配路径可视性、可达性较差。因此,涡扇发动机脉动装配线主要针对主机组装配及外部附件、管路等安装工作。

法国的斯奈克玛(Snecma)公司改变了传统的继承自GE的在立式固定机架上“穿糖葫芦”式的总装过程(图1)^[9],在2011年建成CFM56发动机的脉动装配线(图2),完成一台发动机仅需10天,相比1999年需要29天,可减少装配周期65%。这条脉动装配线每年可生产850台发动机,并可用于LEAP发动机的装配。

美国Pratt & Whitney发动机公司为了满足“洁净动力”发动机激增的生产需求,于2010~2011年在加拿

大 Mirabel 建立了自动化水平脉动装配线(图 3),以适应不同推力等级的“洁净动力”发动机组(PW1100G-JM、PW1200G、PW1400G、PW1500G、PW1700G 和 PW1900G)。其最大产能为 500 台发动机/年。

此外,德国汉莎航空也于 2010 年建成了 CFM 发动机维修的分解和装配的脉动生产线^[10]。

世界各大涡扇发动机制造商纷纷建立脉动装配线,也催生了一批专业发动机生产线的制造厂商,如 Clemessy、Ba Assembly & Turnkey Systems GmbH 等。其中, Ba Assembly & Turnkey Systems GmbH 已将输送系统发展成模块化结构(图 4),可减少 30% 安装时间及 20% 成本投入,与厂方建筑无直接影响,可实现对不同型号增加产能时的“快速工厂”构建。

2 多自由度装配平台

对于先进小涵道比发动机整机装配,主要采用多自由度装配平台,如英国 Rolls-Royce 公司进行 EJ200 整机装配时,发动机固定在弧形夹持装置上,通过旋转盘与单柱提升机相连接,实现整机在装配中垂直升降和旋转的动作;德国 MTU 发动机公司使用如图 5 所示的设备,增加了发动机绕其轴心滚转运动方向的自由度,具备升降、旋转、翻转等多自由度运动功能^[11],与当前通用的装配车(图 6)相比,可有效降低操作高度,提高人机操作效能。

关键部件螺栓拧紧

涡扇发动机零部件间连接工艺主要为螺纹连接,发动机转子部件工作状态为高速、高温、高压、高负荷,且始终处于振动之中。如果关键连接螺栓(或螺母、螺钉)出现松动、断裂等问题,或是螺栓连接所产生的夹紧力分布不均匀,都会直接影响到整机的性能和可靠性^[12]。

为了改善关键转子部件连接的



图1 法国斯奈克玛公司采用立式固定框架总装
Fig.1 Final assembly by using vertical mounted frame in Snecma



图2 CFM56发动机的脉动装配生产线
Fig.2 Pulsating production line for CFM56 engine



图3 Pratt & Whitney发动机公司建立的发动机装配脉动生产线
Fig.3 Pulse production line for engine, built by Pratt & Whitney engine company

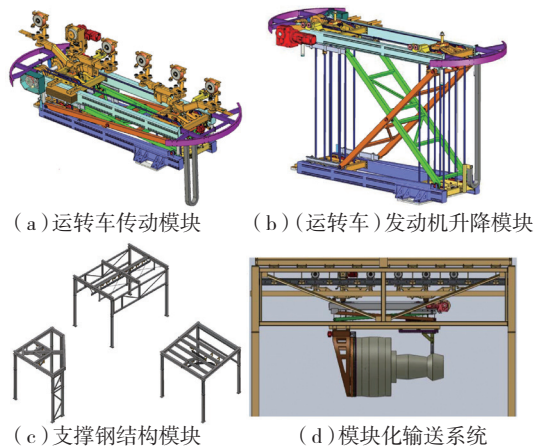


图4 生产线模块化输送系统

Fig.4 Production line of modular conveyor system



图5 德国MTU发动机公司总装设备

Fig.5 German MTU assembly equipment



图6 斯贝发动机总装现场图

Fig.6 Final assembly of SPEY engine

均匀性、稳定性和可靠性,国外很多发动机厂商已从以往的手动工具向智能拧紧设备转变。利用设备中计算机控制的直流电动拧紧扳手,实现对连接件的定力矩、定转角精确控制及监控,避免漏拧等质量事故发生,并实现装配后的可追溯性,从而使得装配过程的控制和质量保证变得简单易行。如在 V2500 涡扇发动机中,高压压气机 3-8 级转子鼓筒与 9-12 级转子鼓筒间的螺栓连接,采用的是如图 7 所示的拧紧设备; GE90 涡扇发动机中,低压涡轮轴与低压涡轮转静子间的螺栓连接,采用的是如图 8 所示的拧紧设备。

装配检测

随着计算机、精密仪器、数字化测试系统等技术的日益发展,在应用三坐标测量机、转子叶尖高速磨床等设备基础上,为了提高装配质量和效率,近年来涡扇发动机装配也在积极定制或引入先进装配检测设备,用于装配数据采集和指导精准装配。

1 转子堆叠优化设备

涡扇发动机转子通常由多级盘轴组成,跨度大、同心度要求高。对于高压压气机转子组装,传统工艺采用的是各级盘轴任意相位连接,同心度超差则分解重装,在组装前没有明确各级盘轴的周向相对位置,装配的效率和质量都受到严重制约,带来整机振动超限隐患。针对此状况,CFM56 等涡扇发动机引入了 Precitech 公司开发的转子堆叠优化设备 SPS-1000L (图 9),可实现装配位置的预测和同心度优化,首次装配成功率提高到 98%,且组装后同心度最优,从而提高了转子装配的效率和质量。

该设备采用了精密气浮转台、重载调倾调心工作台,并同时使用 4 个高精度微位移传感器,可以准确测量出每一个工件的圆度、同心度、垂直

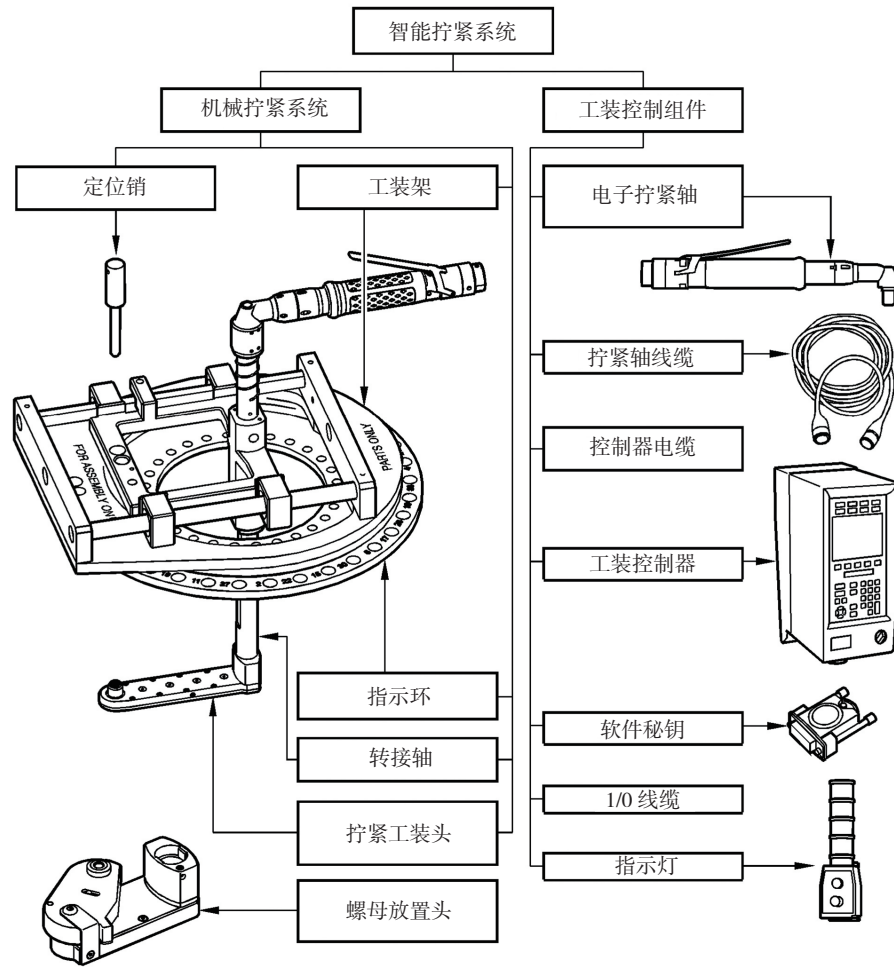


图7 V2500发动机使用的智能拧紧设备
Fig.7 Intelligent tightening device used by V2500 engine

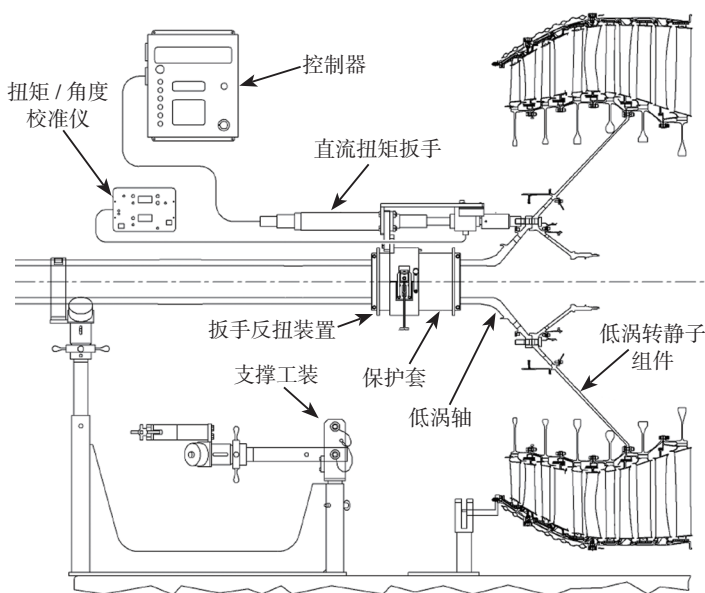


图8 GE90发动机使用的智能拧紧设备
Fig.8 Intelligent tightening device used by GE90 engine

度、跳动值,测量得到的数据都会存储在计算机内,当所有工件完成测量后,计算机将测量的数据从内存中调出,对各工件间相对组装相位进行计算后呈现在显示器上,帮助消除由不正确组装造成的“曲轴”和“弧形”类型错误。图 10 对比了不同装配下的惯性轴状态。

2 电子塞尺

叶尖间隙是航空发动机装配中重点关注的结构参数。以往只能采用薄片式机械塞尺或阶梯塞规测量,而 Capacitec 公司开发了 Gapman_{GEN3} 便携式电子塞尺,主要由双电容传感器合成的位置补偿测量单元与软件驱动的微控制器集成(图 11)。此工具可消除不同操作者带来的测量误



图9 转子堆叠优化设备
Fig.9 Rotor stack optimization equipment

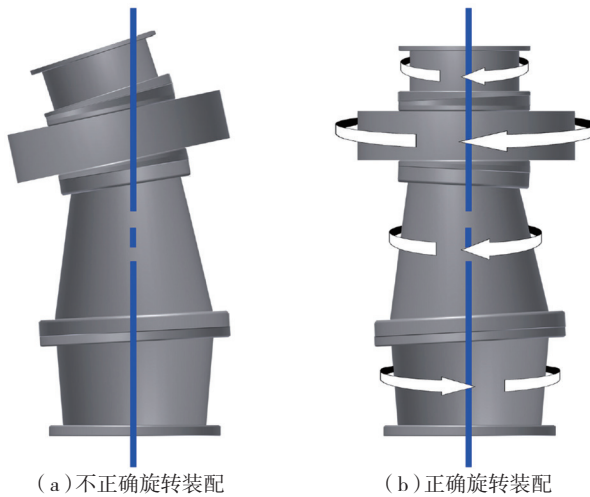


图10 不同装配方式下的惯性轴对比
Fig.10 Comparison of the inertial axis under different assembling modes



图11 电子塞尺
Fig.11 Gapman portable electronic feeler gage

差,效率提高4倍以上。

塞尺分辨率达到0.0001mm,精度为全量程 $\pm 0.5\%$,重复性为全量程 $\pm 0.05\%$,可存储10000多条数据,并具有数据统计分析功能,数据输出可支持USB模式或无线模式。图12为电子塞尺在发动机组装中的应用实例。

结论

目前,对于CFM56、V2500等广泛应用的涡扇发动机,自动化技术已扩展至零部件生产、维修等领域。如新加坡航空发动机私人有限公司(SAESL)利用ABB公司的技术,建立了全球第一家压气机单元自动化维修中心。

随着数字化制造技术、人工智能技术、机器人技术的不断发展,装配作为涡扇发动机数字化制造的重要一环,会不断引入各种高效先进的数字化设备,如双相机移动式三坐标测量系统、机器视觉系统等,在计算机的控制下对装配中关键参数进行自动、快速、精密测量,并对测量数据进行处理。可以预见,涡扇发动机智能化、数字化、精益化装配将很快迎来发展的新阶段。

参考文献

[1] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册: 发动机装配与试车[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995.
Aeronautical Manufacturing Engineering Handbook Chief Editorial Board. Aeronautical manufacturing engineering handbook: engine assembly and test[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1995.

[2] 石宏. 航空发动机装配工艺技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
SHI Hong. Aero-engine assembly technology[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2015.

[3] 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[J]. 航空制造技术, 2014(5): 92-96.
ZHOU Shuo, WANG Junxi, LIU Yisheng, et al. Brief review on assembly process of

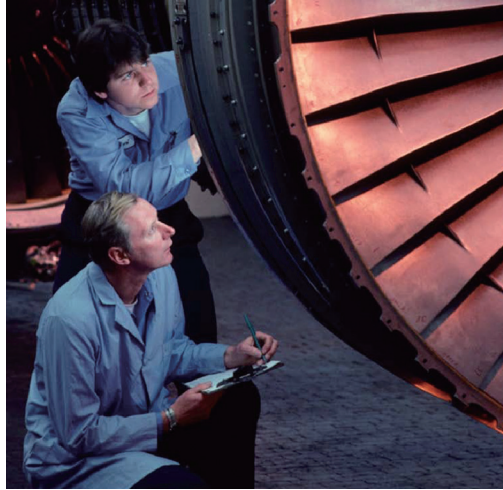


图12 电子塞尺在发动机组装中的应用

Fig.12 Application of electronic feeler gage in the engine assembly

large commercial aero-engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(5): 92-96.

[4] 魏小红, 谈军, 方红文, 等. 航空发动机水平脉动总装生产线规划研究[J]. 航空制造技术, 2015(19): 8-12.

WEI Xiaohong, TAN Jun, FANG Hongwen, et al. Study on horizontal pulse assembly line planning of aero-engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(19): 8-12.

[5] 魏小红, 陈贵林, 田小京, 等. 航空发动机数字化脉动总装线规划技术研究[J]. 航空制造技术, 2015(21): 8-12.

WEI Xiaohong, CHEN Guilin, TIAN Xiaojing, et al. Study on aero-engine digital pulsation final assembly line planning

technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(21): 8-12.

[6] 范玉青. 波音787飞机总装配线及其特点[J]. 航空制造技术, 2011(23/24): 38-42.

FAN Yuqing. Boeing 787 final assembly line and its characteristics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(23/24): 38-42.

[7] 李金龙, 杜宝瑞, 王碧玲, 等. 脉动装配生产线的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2013(17): 58-60.

LI Jinlong, DU Baorui, WANG Biling, et al. Application and development of pulse assembly line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(17): 58-60.

[8] 辛彦秋, 吴斌, 苏丹, 等. 民用航空发动机脉动装配线[J]. 航空制造技术, 2013(20): 118-120.

XIN Yanqiu, WU Bin, SU Dan, et al. Introduction of pulse line for commercial aero-engine assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(20): 118-120.

[9] 皮埃尔·斯帕克·斯奈克玛: 蓝天引擎[M]. 方昌德, 朱守信, 译. 北京: 航空工业出版社, 2008: 66-103.

SPARK P. Snecma engines in the sky[M]. FANG Changde, ZHU Shouxin, trans. Beijing: Aviation Industry Press, 2008: 66-103.

[10] 陈绍文. 精益制造和飞机移动式装配线[J]. 航空制造技术, 2011(16): 34-37.

CHEN Shaowen. Lean manufacturing and aircraft mobile assembly line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(16): 34-37.

[11] 黄松. 航空发动机多自由度装配平台设计与分析[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2015.

HUANG Song. Design and analysis for Multi-DOF assembly device of aero-engine[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2015.

[12] 张雷. 力矩拧紧机的应用及拧紧方式、参数的选择[D]. 长春: 吉林大学, 2011.

ZHANG Lei. Application, tightening mode and parameter selection of torque tightening machine[D]. Changchun: Jilin University, 2011.

通讯作者: 孙贵青, E-mail: joy1980103@163.com。

Advanced Process and Equipment for Turbofan Engine Assembling

SUN Guiqing, WANG Tong, LÜ Yuhong

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

[ABSTRACT] According to the development trend and application characteristics of turbofan engine assembly technology, the three advanced processes of overall assembly, intelligent tightening and assembly detection are analyzed and summarized. turbofan engine applies pulsating assembly line and multi-degree of freedom assembly platform for overall assembly to highly increase production efficiency; Intelligent tightening equipment can precisely control and monitor the fixed torque and angle of engine connecting parts to improve the connected uniformity, stability and reliability of critical rotor parts; Rotor stack optimization technology can optimize assembly position prediction and concentricity, electronic stopper can eliminate measurement error caused by different operators. The engine digital assembly is constantly introducing a variety of efficient and advanced automated intelligent equipments, and automation, intelligence, digitizing will be the future development direction of turbofan engine assembly process and equipment.

Keywords: Turbofan engine; Machine assembly; Intelligent tightening; Assembly measurement

(责编 逸飞)