激光跟踪仪在飞机数字化对接的应用

黄元龙　朱永国　黄晓宇
沈阳飞机工业（集团）有限公司　辽宁 沈阳　110034

摘　要　激光跟踪仪是高精度的三维测量设备，在飞机数字化对接中有重要的应用价值。文章阐述了飞机装配工艺向数字化发展的趋势，也彰显了数字化对接的关键意义，重点剖析了激光跟踪仪的基本原理、形成结构以及精度和稳定性的特性，并结合数字化对接的流程，探寻了激光跟踪仪在对接过程中的任务职能和测量控制方法，论述了提升对接效率和精度的主要技术，还给出了部分改进措施。研究表明，激光跟踪仪凭借自身高精度的测量能力与动态追踪功能，保障了飞机装配时的定位精度与质量，促使航空制造朝着智能化方向发展。

关键词　激光跟踪仪；飞机数字化对接；高精度测量；装配技术

Application of Laser Tracker in Aircraft Digital Assembly

Huang Yuan-long, Zhu Yong-guo, Huang Xiao-yu
AVIC Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110034, Liaoning Province, China

Abstract　The laser tracker is a high-precision three-dimensional measurement device with significant application value in aircraft digital assembly. This paper elaborates on the trend of aircraft assembly processes towards digitalization and highlights the critical importance of digital assembly. It focuses on analyzing the fundamental principles, structural composition, and characteristics of accuracy and stability of the laser tracker. Integrating the digital assembly process, it explores the functional roles and measurement control aspects of the laser tracker during assembly, discusses key technologies for improving assembly efficiency and accuracy, and proposes some improvement measures. Research indicates that by virtue of its high-precision measurement capability and dynamic tracking function, the laser tracker ensures positioning accuracy and quality during aircraft assembly, promoting the development of aviation manufacturing towards intelligence.

Key words　Laser Tracker; Aircraft Digital Assembly; High-Precision Measurement; Assembly Technology

随着我国科技与经济的持续发展，航空制造业迅速进步，对于飞机装配的精度和效率要求变得更高，传统的手工对接方式无法符合现代大型复杂结构装配的需求，于是数字化制造技术应运而生，渐渐替代传统方法，成了改善装配质量和效率的主要途径[1]。实现数字化对接需要依靠高精度测量技术，激光跟踪仪凭借高精度、远距离以及全空间三维测量等长处，在航空航天领域被普遍采纳，是飞机数字化对接的重要工具，如图1所示。



图1　激光跟踪仪在航空机翼装配中的应用

激光跟踪仪可有效定位大型部件并调整其姿态，还可向装配过程提供及时观测及反馈，明显提升对接精度与作业效率[2]。本文针对激光跟踪仪在飞机数字化对接中的应用展开分析，探寻其在装配流程中的重要意义与技术优势，进而为航空制造业的数字化转型提供理论参考与技术支撑。

1　飞机数字化对接技术概述

1.1　飞机装配工艺的数字化发展趋势

现代航空制造朝着高精度、高复杂性的方向发展，传统装配工艺已无法满足需求，数字化转型升级变得十分必要。利用三维建模、虚拟仿真、数字化测量等手段，装配过程完成了从手工操作到自动化、智能化的转变[3]，数字化技术可以在虚拟环境里执行设计和验证工作，从而缩减研发时间，削减试错成本。而且，数字化装配能够做到全程观察并给予数据反馈，保证零部件准确定位以及装配质量。数字化对接技术经由精确测量和动态调整，改良了复杂结构部件的配合精度，促使装配工艺朝着智能化、网络化方向发展。日后，伴随大数据、人工智能等技术的融合，飞机装配数字化将会达成更高效率的协同和

柔性制造，从而优化制造水平和产业竞争力。

1.2 数字化对接在飞机制造中的关键作用

飞机结构精密，装配需确保各部件精确对接以保障整机性能与安全性。数字化对接依托高精度测量与控制手段，可实时监控装配过程并动态调整，显著提升装配的准确性与可靠性[4]。与传统手工对接相比，数字化方法减少人为失误，降低返工率，提高生产效率。同时，它支持复杂几何形状部件的空间定位与姿态调节，为大型飞机装配提供技术支撑。此外，数字化手段可实时采集、存储并分析装配数据，有助于优化工艺流程与设备布局，推动制造过程向智能化发展。

2 激光跟踪仪技术原理与性能分析

2.1 激光跟踪仪的基本工作原理

激光跟踪仪的测量原理是激光跟踪仪发出的激光经过目标位置上的靶镜反射回来与另一路激光发生干涉，根据干涉的原理可以得到激光跟踪头到靶镜的距离；根据激光跟踪头两个轴上的角度编码器，可以得到目标位置相对于激光跟踪头的俯仰角与方法角[5]，如图2所示；根据激光跟踪仪测头与目标位置的距离以及角度，可以计算出目标位置在激光跟踪仪坐标系下的直角坐标。激光跟踪仪还具备快速响应和动态跟踪能力，能够连续跟踪移动目标，实现实时定位，测量范围广、精度高（通常可达微米级），且不受复杂环境限制，适用于大型设备和构件的空间测量。随着技术的不断发展，激光跟踪仪已经可以与三角测量原理和激光测距技术进行结合，成为数字化对接过程中的关键工具。

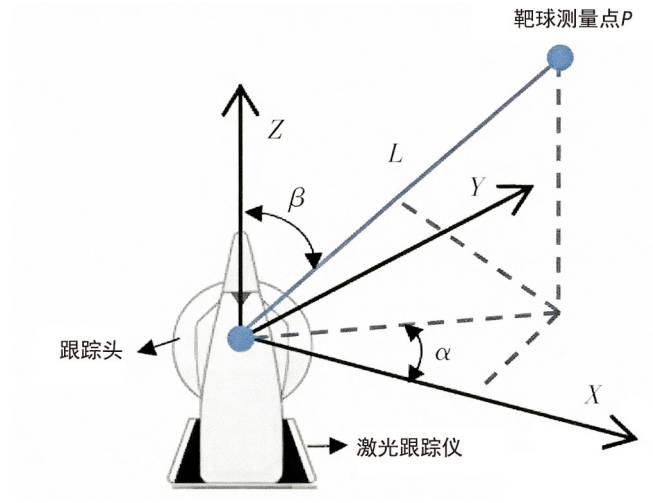


图2 激光跟踪仪工作原理

2.2 主要组成结构与功能模块

激光跟踪仪由激光跟踪头、控制器、用户计算机、反射器及环境传感器等组成，如图3所示。激光跟踪仪利用激光干涉原理测量靶镜与跟踪头之间的距离，跟踪头的俯仰轴和偏航轴上的测角传感器测量两者间的角度，经测量软件运算得出靶镜在跟踪仪坐标系下的三维坐标。激光跟踪头采用稳定的半导体或气体激光器发出高质量激光束，确保光束强度高、直线性好。控制器作为中枢部件，统筹激光发射、信号采集、数据传送，保证测量过程稳定连贯。用户计算机安装测量软件，接收并处理控制器传来的数据，计算出反射器的三维空间位置并以可视化形式呈现。反射器多采用高精度球形反射镜，安装于待测物体上，将激光准确反射回跟踪仪，提升测量精度。环境传感器监测温度、湿度、气压等参数，对测量结果进行环境修正，优化精度与系统稳定性。各功能模块共同构成高效精准的三维动态测量系统，为激光跟踪仪在复杂装配任务中的应用提供支持。

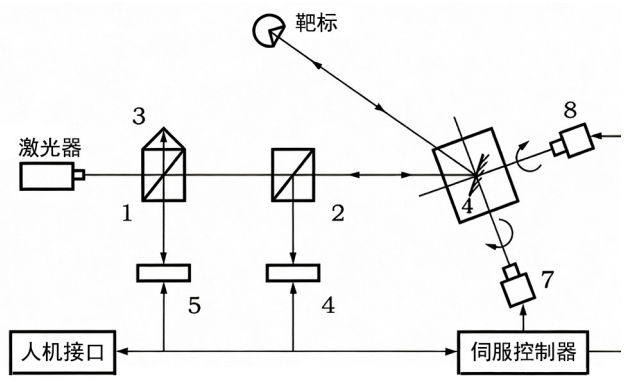


图3 激光跟踪仪结构原理示意图

1、2—分束镜；3—角锥反射棱镜；4—光束导向平面镜；5—光电计数器；6—二维位置敏感探测器；7、8—装有高精度光电码盘的电动机

2.3 激光跟踪仪的精度与稳定性分析

激光跟踪仪的精度主要由激光测距系统的分辨率、角度测量精度和环境因素决定，高性能设备可达成微米级测距精度并控制低角度误差，从而保障三维坐标的准确性。测距系统大多按照相位差或者飞行时间原理，经由精确计算激光传播时间来得到距离信息；角度测量依靠高分辨率编码器，精准捕捉激光发射器的水平和垂直角度变化；系统误差的控制依赖于精密的机械结构设计和高质量的光学元件，可以有效地减小系统自身的误差。

激光跟踪仪在稳定性方面具备一定的环境适应能力，不过温度、湿度、气压等因素仍然会左右激光的传播速度及方向，并造成测量误差。因此，该设备往往会装配温度补偿机制以及环境传感器，借助及时调节相关参数以减小环境带来的影响，而且自动校准功能加上软件误差修正算法，明显改善了系统长

时间持续测量时的数据连贯性与可靠性，进而满足飞机数字化对接所提出的高度精准和稳定的高标准要求。

3 激光跟踪仪在飞机数字化对接中的应用分析

3.1 激光跟踪仪在对接过程中的任务

激光跟踪仪在飞机数字化对接中用于精确定位与动态跟踪。它实时监测部件位置与姿态，提供数据支持，确保三维空间精准对接。发现微小误差即及时报警，避免误差累积。在大型复杂结构对接中，其高精度显著提升装配效率与质量。

在动态对接环节，仪器可追踪移动目标，实时反馈位置变化，为自动控制系统提供关键输入。它与数字化装配系统深度融合，实现数据即时传输与分析，增强装配流程的透明度与可追溯性，在飞机构件安装中发挥重要作用。

3.2 数字化对接流程中的测量控制环节

激光跟踪仪处于数字化对接流程的核心地位，是高精度装配的根基。它测量关键部位的空间坐标，获取实时三维数据，确保各部件位置关系符合设计要求。测量范围涵盖对接前的基准校准、装配中的动态监测及完成后的最终评定，形成闭环控制，为定位与校正提供精准参照，有助于发现偏差并引导调整，维持各阶段质量稳定。

激光跟踪仪具备高频数据采集能力，将测量与控制联动，实时获取空间坐标，随时掌握部件位移情况，便于装配中即时修正偏差。测量结果与数字化装配平台实时共享，形成数据闭环，辅助自动化控制系统精准调节，加快装配速度，减少人工误差，使飞机数字化对接更加科学、规范。

3.3 提升对接效率与精度的关键技术点

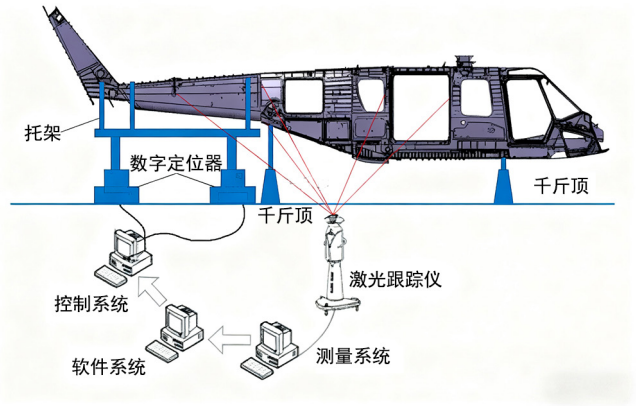


图4 某型直升机尾梁数字化对接系统

提升激光跟踪仪的对接效率与精度，关键在于高精度测量设备与智能控制系统的紧密协同，如图4所示。设备可快速执行空间测量，提供准确的三维坐标数据，大幅减少人工误差，帮助装配人员即时定位与调整，加快对接进程。测量数据通过数字化装配平台实时传输与分析，有助于优化装配计划，减少重复校验的时间与资源消耗。

技术改良方面，采用高稳定性激光源和高分辨率编码器，确保测量准确性与重复性。针对复杂装配环境，系统集成温度补偿与误差校正算法，降低环境变化对测量的影响。利用多点测量与动态追踪技术，及时发现部件的微小位移，实现复杂工况下的精确定位。通过软硬件协同优化，系统可靠性与稳定性持续提升，为飞机数字化对接奠定坚实的技术基础。

3.4 激光跟踪仪应用中的技术优化策略

提升激光跟踪仪在飞机数字化对接中的应用效果，需从测量精度和系统适应能力两方面改进。硬件上，采用高精度光学元件与先进激光发射技术，减小光束散射与信号损耗，优化机械结构增强抗振抗干扰能力，引入多传感器融合技术降低单一传感器误差。软件方面，开发误差修正算法与自动校准机制，减少系统漂移和环境变化的影响。激光跟踪仪与数字化装配平台深度融合，实现数据实时共享与智能分析，优化路径规划与动态追踪策略，缩小测量盲区，完善交互界面，强化环境监测与反馈机制，提升系统的便捷性、准确性与稳定性。

4 结束语

激光跟踪仪作为高精度三维测量工具，在飞机数字化对接中具有重要地位。其精准测量与动态追踪能力为装配提供可靠数据支撑，显著提升对接精度与效率。通过持续改进硬件性能与软件算法，激光跟踪仪的系统稳定性与环境适应性不断增强，满足复杂装配环境的测量需求。未来，随着与人工智能、大数据等技术的深度融合，数字化对接的精度与效率将进一步提升，为航空制造的质量与效益提供坚实的技术保障。

参考文献

[1]肖冬.现代飞机数字化制造技术之研究[J].科学技术创新,2020(15):183-184.

[2]李浩,焦彦超,张玉彦,等.基于数字孪生的飞机装配激光跟踪仪站位优化研究[J].中国机械工程,2024,35(11):1986-1994.

[3]宋建生.飞机装配工艺中数字化测量与误差控制技术分析[J].中国机械,2024(36):4-7.

[4]郁唯杰.基于数字化测量的飞机大部件自动对接关键技术研究[D].太原:中北大学,2024.

[5]王珊,张滋黎,董登峰,等.激光跟踪仪几何结构误差标定及修正[J].光学精密工程,2024,32(11):1639-1652.

（本文编辑 曹 阳）