



上海现代服务业联合会  
Shanghai Services Federation



荣续智库

# 智能制造行业ESG白皮书

## (航空航天)

### 摘要

航空航天装备制造作为国之重器的核心载体，既是智能制造技术的前沿应用阵地，也是ESG理念落地的关键领域。本白皮书立足行业发展实际，梳理航空航天装备制造行业ESG发展现状，解读核心政策与关键议题，分享标杆企业实践经验，以期为行业高质量、可持续发展提供借鉴，助力中国航空航天在智造升级与ESG践行中，迈向更广阔的空天征程。



# PREFACE

## 前言

全球新一轮科技革命与产业变革加速演进，智能制造成为重塑航空航天装备制造行业竞争格局的核心力量，ESG则成为衡量企业可持续发展能力的重要标尺。

航空航天装备制造行业具有技术密集、资本密集、产业链长、影响深远的特点，其发展不仅关乎国家科技实力与国防安全，更与生态环境保护、社会就业促进、产业协同升级紧密相关，践行ESG理念既是行业自身高质量发展的内在需求，也是响应国家战略、履行社会责任的必然选择。

随着“双碳”目标、制造强国、商业航天创新发展等一系列政策的深入推进，航空航天装备制造行业迎来了智能制造与ESG融合发展的新机遇，也面临着技术迭代、政策合规、供应链协同等多重挑战。

本白皮书以航空航天装备制造行业为核心，围绕智能制造与ESG融合发展主线，系统梳理行业发展概况、ESG相关政策与核心议题，详细介绍智能制造关键技术及其在行业中的应用，深入分析运载火箭、航天器、无人机、军用航空器等主要装备的发展与智能制造实践，总结中国商飞、中航高科、中航沈飞、洪都航空等标杆企业的ESG优秀实践，全面呈现行业ESG发展现状与未来趋势，助力推动航空航天装备制造行业在智能制造升级中实现ESG绩效提升。

# ANALYST

## 研究员

- |      |                                                          |
|------|----------------------------------------------------------|
| 刘 洁  | 碳管理师：CHINAETSCM20250010102                               |
| 沈 璿一 | 高级注册ESG分析师：24RZQLKC600609A                               |
| 石 鑫  |                                                          |
| 时丽劼  | 高级注册ESG分析师：25RZQLKC003855A<br>碳管理师：CHINAETSCM20250010234 |
| 王红艳  | CFA ESG证书：145794638<br>高级注册ESG分析师：24RZQLKC603165A        |
| 许晓佳  | CFA ESG证书：142400915                                      |
| 郁 昉  | 高级注册ESG分析师：23RZQLKC003122A                               |
| 张永涛  | 高级注册ESG分析师：24RZQLKC600918A<br>国际通用ESG策略师：SH153XFCA0435   |
| 赵大鑫  | CFA ESG证书：153004611<br>高级注册ESG分析师：25RZQLKC000512A        |
| 甄浩阳  | 高级注册ESG分析师：25RZQLKC002444A                               |

# CONTENTS

## 目录

### 第一章 航空航天装备制造行业概述

- 07 航空航天装备制造行业
- 10 行业发展沿革
- 13 行业价值链

### 第二章 行业的ESG发展

- 29 ESG相关政策
- 36 行业核心议题

### 第三章 主要的智能制造技术

- 41 物联网技术
- 50 自动化与机器人
- 56 数字孪生
- 57 区块链

### 第四章 航空航天装备的智能制造

- 61 大飞机
- 65 运载火箭、航天器
- 75 无人机
- 76 军用航空器

### 第五章 行业ESG优秀实践

- 91 中国商飞
- 94 中航高科
- 98 中航沈飞
- 99 洪都航空

# 第一章 航空航天装备制造行业概述

## 第一节 航空航天装备制造行业

全球航空航天装备制造行业已进入“实用价值期”与技术迭代加速期，呈现欧美主导高端市场、新兴经济体快速追赶的发展格局，商业航天爆发式增长、低空经济落地提速成为行业新增长点。国际层面，欧美企业凭借技术积累与全链条布局，在高端航空材料、航空发动机等核心领域形成垄断，美国依托 NASA 等国家级研发平台、欧洲凭借空客、罗罗等龙头企业，持续领跑技术创新与产业升级，同时推动绿色航空、智能材料等新兴赛道布局；中国作为全球航空航天装备制造的重要增长极，依托政策驱动与市场需求拉动，行业规模持续扩容，2024 年航空制造业营收超 5000 亿元，在民用飞机、军用航空、无人机等领域实现突破性发展，C919 大型客机进入商业运营阶段，歼-20 隐身战机批量生产，商业无人机占据全球 70% 以上市场份额，但在高端航空材料、大推力发动机等核心领域仍与国际先进水平存在差距，正通过加大研发投入、构建产业集群、推动技术攻关，逐步实现核心技术自主可控，推动行业从“跟跑”向“并跑”“领跑”转型，形成与全球产业协同发展、良性竞争的新格局。

### 一、航空装备的定义

航空装备是我国高端装备制造领域重点发展的领域，包括所有用于航空运输、军事航空或民航的飞机、直升机、无人机及其配套的设备和附件等。

航空装备行业的发展对我国现代化交通体系建设、国家主权的维护、国内制造业产业链的整体构建等方面具有重要意义。

航空装备的关键原材料有金属材料和复合材料两大类，包括钛合金、航空钢材、陶瓷基等特殊材料。中国航空材料行业的整体技术距离国际先进水平尚有一定的差距，部分高端产品仍需进口。但是近年来，中国部分航空材料企业加大了研发投入，技术创新能力不断增强，产品技术水平有所提高。中国部分航空材料技术已达到国际先进水平，其中部分产品开始出口海外市场，如 T1100 级碳纤维实现工业化突破，DD5 单晶合金应用于国产涡扇发动机涡轮叶片，逐步打破国际技术封锁与市场垄断。

航空装备制造是航空装备产业链的关键环节，主要为航空部件制造和航空装备整机。其中航空部件制造可分为机体、发动机及机载设备三大部分。机体是航空装备结构的主要构成，发动机是航空装备的动力来源，机载设备是指对航空装备飞行中的各种信息、指令和操纵进行测量、处理、传递、显示和控制的设备。当前，我国航空装备制造正依托 C919 等国产机型需求，推动机体、发动机及机载设备的国产化替代，逐步完善产业链布局，提升产业整体竞争力。

## 二、我国的航空制造产业

我国航空制造产业发展迅猛，近十年来，中国民用航空工业总产值规模年均增速超 17%。中国民用航空工业产值规模从 2012 年的 1527 亿元，跃升到 2022 年的 4489 亿元。其中，民用航空产品产值 2022 年约 900 亿元，民用飞机产值约 435 亿元。

随着航空运输和航空服务需求的不断增长，航空制造行业规模持续扩大。根据相关市场数据统计，2022 年中国航空装备市场规模达 1275 亿元，近五年年均复合增长率为 10.8%。中国商飞预测，未来 20 年，亚太地区（含中国）将是新机交付的最大市场，新机交付量约为 1.77 万架，占全球的 42%，其中，中国的新机交付量约占全球的 22%，需求庞大的国内市场为中国飞机制造产业提供了有力支撑。

目前，我国航空装备产业已形成较为完整的产业链体系，以中国商飞为代表的民机制造业处于快速发展阶段。2023 年 5 月，中国商飞 C919 顺利执飞上海—北京航班，实现首次商业飞行，结束了中国没有自主品牌商业大飞机的历史，推动中国航空市场向全球航空工业第三强迈进。截至当前，中国商飞已接到近 1110 架 C919 确认或意向订单，订单量超过波音、空客单年订单量总和，预计未来五年内产能规划将达到 150 架/年，进一步推动我国民机制造产业规模化发展。

### 三、航天装备的定义

与航空装备并列，航天装备是航空航天装备制造行业的另一核心组成，是国家战略性新兴产业核心领域，指用于探索、开发和利用太空，在空间环境中运行或为空间活动提供保障的各类装备及配套系统，是建设航天强国和制造强国的重要支撑。其活动范围聚焦于大气层外（以 100 公里卡门线为界），与航空装备形成互补，共同构成航空航天装备制造的完整产业体系。

航天装备行业的发展，对我国国家安全、科技进步、国民经济高质量发展具有不可替代的战略意义，不仅是维护国家空间主权、保障信息安全的核心支撑，更是推动卫星通信、导航定位、遥感监测等民生领域应用，带动高端材料、精密制造、电子信息等相关产业协同升级的重要引擎。

航天装备的关键原材料与航空装备高度协同，同样依赖钛合金、陶瓷基复合材料、高温合金等特殊材料，部分高端航天材料与航空材料技术可实现跨界复用、协同突破。目前，我国航天材料领域已实现多项技术突破，在航天器结构材料、发动机高温材料等方面达到国际先进水平，有力支撑了载人航天、月球探测、火星探测等重大航天工程的顺利推进，但在部分高端特种材料、核心元器件等领域仍需持续攻关，进一步完善产业链自主可控能力。

航天装备制造是航天装备产业链的核心环节，主要分为运载装备制造、航天器制造、地面保障装备制造三大板块。运载装备以运载火箭为核心，是进入太空的核心运输工具，负责将卫星、飞船、探测器等送入预定轨道；航天器制造涵盖卫星（通信、导航、遥感等类型）、载人飞船、空间站、深空探测器等，是太空活动的核心载体；地面保障装备制造包括航天发射场设备、测控通信系统、回收着陆设备等，为航天装备的发射、在轨运行、回收全过程提供保障。当前，我国航天装备制造正依托商业航天爆发式增长的市场需求，推动核心技术迭代与国产化替代，逐步构建全链条、高水平的产业体系，助力我国从航天大国向航天强国转型。

#### 四、我国的航天制造产业

与航空制造产业协同发展，我国航天制造产业依托国家重大航天工程牵引和商业航天市场驱动，实现跨越式发展，已形成完整的产业链体系，成为全球航天产业的重要增长极。近十年来，我国航天工业产值持续攀升，年均增速保持在 15% 以上，2022 年我国航天产业总产值突破 5000 亿元，其中航天制造产业产值占比超 60%，核心装备制造能力大幅提升。

在重大航天工程领域，我国已实现多项历史性突破。载人航天工程稳步推进，神舟系列飞船常态化执行载人飞行任务，天宫空间站全面建成并进入应用与发展阶段，已完成多次航天员出舱、舱外实验等任务；深空探测领域成果丰硕，嫦娥系列探测器实现月球探测“绕、落、回”三步走目标，天问一号探测器成功着陆火星，实现我国首次火星探测任务圆满成功；卫星应用领域快速拓展，北斗三号全球卫星导航系统全面建成并开通服务，覆盖全球，高分系列遥感卫星、通信卫星广泛应用于民生、农业、环保、国防等多个领域。

在产业格局方面，我国航天制造产业形成了以中国航天科技集团、中国航天科工集团为核心，众多民营企业、配套企业协同发展的产业生态，涵盖运载火箭、航天器、地面保障装备等全链条制造环节。其中，运载火箭制造实现迭代升级，长征系列运载火箭发射成功率稳居全球前列，可满足不同轨道、不同载荷的发射需求，长征五号、长征七号等新一代运载火箭已成为我国航天发射的主力；商业航天领域爆发式增长，民营航天企业在运载火箭、卫星制造、太空旅游等领域快速布局，多个民营运载火箭实现成功发射，推动航天制造产业市场化、多元化发展。

在核心技术与产业链自主化方面，我国航天制造产业已实现多项关键技术突破，在航天器结构材料、发动机高温合金、核心元器件等领域达到国际先进水平，钛合金、陶瓷基复合材料等关键原材料实现

自主供应，逐步打破国际技术封锁。但目前，在高端特种材料、精密制造工艺、部分核心元器件等领域仍存在短板，需持续加大研发投入，推动技术攻关，进一步提升产业链供应链自主可控能力。

#### 第二节 行业发展沿革

中国航空航天装备制造行业历经七十余年发展，从起步时的技术落后、依赖仿制，逐步成长为具备完整产业链、自主研发能力突出的航天航空大国。航空领域，实现了民用大飞机从“无”到“有”的跨越，军用航空装备跻身世界先进行列；航天领域，建立起完整的航天技术体系，在载人航天、深空探测、导弹武器等领域取得一系列标志性成果。当前，中国航空航天装备制造行业正朝着“自主可控、全球领先”的目标迈进，逐步实现从“航天航空大国”向“航天航空强国”的转型。

##### 一、航空装备的发展沿革

中国航空装备制造行业起步于建国后，历经七十余年的探索、攻关与突破，逐步实现从“引进仿制”到“自主研发”、从“支线配套”到“干线引领”的跨越式发展，大致可分为三个核心阶段，核心成果集中于军用航空、民用航空两大领域。

##### (一) 起步探索阶段（建国初期-20 世纪 90 年代）

这一阶段，中国航空装备制造以军用航空为核心，主要依靠引进国外技术进行仿制，逐步建立起基础的航空制造体系，重点突破“有无”问题。期间，成功仿制了歼-5、歼-6、歼-7 等战斗机，以及运-5 等小型运输机，初步具备了航空装备的生产制造能力；民用航空领域处于起步状态，主要依赖进口客机，自主研发能力薄弱，1980 年代运-10 大型客机项目下马后，民用大飞机研发陷入阶段性停滞，仅在支线航空领域有少量探索。

##### (二) 技术突破阶段（20 世纪 90 年代-2010 年）

随着国家对航空产业的重视程度提升，中国航空装备制造进入技术积累与突破期，军用、民用航空协同发展。军用航空领域，自主研发取得重大进展，歼-10 战斗机、直-10 直升机等先进装备相继问世，实现了从“仿制”到“自主设计”的转变，航空发动机、机载设备等核心部件的技术水平逐步提升；民用航空领域，2007 年大飞机专项正式立项，标志着中国民用大飞机研发重新启动，ARJ21 支线客机进入研制阶段，为后续大飞机产业发展奠定了基础。同时，航空材料、制造工艺等配套领域也逐步积累技术，为后续跨越式发展提供支撑。

### (三) 自主引领阶段 (2010 年至今)

这一阶段，中国航空装备制造实现全方位突破，跻身世界先进行列，形成了完整的航空装备产业链，民用大飞机、军用航空装备均取得历史性成就。

1. 军用航空：歼-20 隐身战斗机批量列装部队，运-20 “鲲鹏”大型运输机实现批量交付并投入实战化应用，直-20 通用直升机广泛列装，标志着中国军用航空装备达到世界先进水平，实现了从“跟跑”到“并跑”甚至“领跑”的跨越。

2. 民用航空：作为“大国重器”的大飞机产业实现历史性突破，2023 年 5 月 28 日，C919 大型客机完成上海—北京商业首飞，结束了中国没有自主品牌商业大飞机的历史；截至 2024 年底，C919 已累计交付 16 架，开通 15 条航线，运送旅客突破 100 万人次，累计获得国内外超过 30 家航空公司的 700 多架订单。目前，中国已形成完整的大飞机产品谱系：ARJ21 支线客机稳定运营，C919 窄体客机逐步扩大市场份额，宽体客机 C929 进入详细设计阶段，C939 项目启动预研。

此外，中国大飞机市场增长潜力巨大，中国商飞预测，未来 20 年中国将新增民用飞机超过 8700 架，占全球新增总量的 20%以上，市场价值约 1.5 万亿美元，庞大的市场需求为中国航空装备制造产业持续发展提供了强有力支撑。大飞机产业的发展还带动了航空材料、精密制造、电子信息等相关产业升级，其技术扩散效应达到 1:16，就业带动比高达 1:12，成为推动经济高质量发展的重要引擎。

## 二、航天装备的发展沿革

中国航天装备制造行业起步于 20 世纪 70 年代，依托国家重大航天工程牵引，历经“起步探索、重点突破、全面跨越”三个阶段，逐步建立起完整的航天技术体系，在人造卫星、载人航天、深空探测、导弹武器等领域取得一系列标志性成果，奠定了中国在全球航天领域的重要地位。

### (一) 起步探索阶段 (20 世纪 70 年代-20 世纪 90 年代)

这一阶段，中国航天装备制造以人造卫星和导弹武器为核心，重点突破“进入太空”和“战略威慑”两大核心目标，逐步建立起基础的航天制造体系。

1. 人造卫星：1970 年 4 月 24 日，“东方红一号”卫星成功发射，中国成为全球第五个独立发射卫星的国家，标志着中国航天事业正式起步；此后，中国逐步发展科学卫星、技术试验卫星和应用卫星三大类卫星，为后续航天技术发展积累了宝贵经验。

2. 导弹与核武器：1984 年国庆阅兵中，中国首次展示东风系列弹道导弹、巨浪一号潜射导弹等自主研发武器系统，标志着中国战略核打击能力迈入新阶段；1996 年东风五号战略导弹亮相，进一步强化了中国远程核威慑能力，为国家主权和安全提供了核心保障。

### (二) 重点突破阶段 (20 世纪 90 年代-2010 年)

这一阶段，中国航天装备制造聚焦载人航天、探月工程等重大项目，实现多项技术突破，逐步提升航天装备的自主化水平。

1. 载人航天：1992 年，中国政府制定载人航天工程“三步走”发展战略，建成空间站是核心目标；1999 年 11 月 20 日，神舟一号无人试验飞船发射成功，完成中国首次载人航天关键技术验证；2003 年 10 月 15 日，神舟五号搭载杨利伟升空，实现中国首次载人航天飞行；2005 年 10 月 12 日，神舟六号实现多人多天飞行；2008 年 9 月 25 日，神舟七号升空，翟志刚完成中国首次太空漫步，逐步突破载人航天核心技术。

2. 探月工程：2007 年 10 月 24 日，嫦娥一号发射升空，成为中国首颗探月卫星，成功进入月球轨道，标志着中国探月工程正式启动，迈出了深空探测的第一步。

### (三) 全面跨越阶段 (2010 年至今)

这一阶段，中国航天装备制造实现全方位跨越，在载人航天、深空探测、卫星应用、导弹武器等领域取得历史性成就，形成完整的航天产业链，成为全球航天产业的重要增长极。

1. 载人航天与空间站：2023 年 10 月 26 日，神舟十七号载人飞船发射成功，持续推进空间站驻留任务；2023 年 11 月 28 日，中国空间站全貌高清图像首次公布，标志着中国天宫空间站全面建成并进入应用与发展阶段；2024 年以来，天舟六号货运飞船撤离、神舟十八号载人飞船发射并完成国旗太空传递、神舟二十号载人飞船顺利进驻空间站等一系列任务圆满完成，实现载人航天常态化运营。

2. 深空探测：中国逐步推进深空探测工程，实现从月球探测到火星探测的跨越。嫦娥系列探测器完成月球探测“绕、落、回”三步走目标，天问一号探测器成功着陆火星，实现中国首次火星探测任务圆满成功，标志着中国深空探测技术达到国际先进水平。深空探测主要依赖无人航天器，核心目的是探索宇宙起源与演化、天体结构及生命存在可能性，为空间资源开发和技术创新提供理论基础。

3. 导弹与新型装备：近年来，中国导弹装备持续迭代升级，在阅兵中展示了鹰击-15、鹰击-19 等反舰导弹，东风-5C 洲际导弹、巨浪-3 潜射导弹等战略导弹，以及惊雷-1 机载导弹，其中东风-5C 打击能力覆盖全球，进一步强化了中国的战略威慑能力，体现中国在防空、反舰和战略打击领域的技术突破。

4. 卫星应用：北斗三号全球卫星导航系统全面建成并开通服务，覆盖全球；高分系列遥感卫星、通信卫星广泛应用于民生、农业、环保、国防等多个领域，实现航天技术与实体经济深度融合，彰显了航天装备的实用价值。

### 第三节 行业价值链

航空航天行业的价值链整体分为上游原材料供应、中游制造环节、下游应用服务三个核心部分。

#### 一、价值链概览

##### (一) 上游原材料供应

上游原材料是航空航天装备制造的基础，直接决定装备的性能、可靠性与轻量化水平，航空与航天领域共享部分核心原材料，同时根据自身应用场景有针对性需求，具体分类如下：

##### 1. 金属合金材料

航空领域：钛合金、铝合金是航空装备的核心结构材料，广泛应用于飞机机身、机翼、航空发动机叶片等部件，既能保障结构稳固性，又能有效减轻机身重量，提升飞机的飞行效率和航程，是实现航空装备轻量化与高强度平衡的关键材料。

航天领域：此类材料同样不可或缺，常用于火箭箭体、卫星框架、运载火箭发动机壳体等部件，核心需求的是抗高压、抗高温、轻量化特性，确保火箭发射和卫星在轨运行过程中的结构稳定性，同时降低推进负荷。

##### 2. 新型复合材料

航空领域：以碳纤维复合材料为代表的新型材料，广泛应用于飞机机翼、尾翼、机身蒙皮等部件，相比传统金属材料，其重量更轻、强度更高，可有效降低飞机油耗，提升飞行性能，是现代民用客机、军用战机实现轻量化升级的核心材料。

航天领域：该类材料主要应用于卫星太阳能电池板基板、火箭整流罩、航天器舱体等部件，核心作用是降低航天器整体重量，减少推进剂消耗，同时提升部件的抗太空辐射、抗极端温度能力，提高能源利用效率和装备使用寿命。

##### 3. 化学动力推进材料

航空领域：主要包括航空发动机所用的航空燃油、润滑油等，为飞机起飞、飞行提供持续动力，其燃烧效率、抗高温性能直接影响航空发动机的推力、油耗和使用寿命，是保障飞机稳定飞行的核心物资。

航天领域：核心是推进剂、燃料等，为火箭发射、航天器轨道调整和姿态控制提供动力，其性能直接决定火箭发射成败、航天器在轨运行能力及任务执行效果，是航天装备实现太空探索的核心支撑。

##### 4. 电子元器件

航空领域：集成电路、传感器、连接器等电子元器件，是飞机航电系统、控制系统的核心组成部分，集成电路承担飞行数据处理、指令传输等重任，传感器用于感知飞行速度、高度、姿态等物理参数，连接器确保各电气部件连接稳定，整体向小型化、高性能化、高可靠性方向发展，保障飞机飞行安全。

航天领域：此类元器件是航天器运行和控制的关键，应用于卫星、火箭的控制系统、通信系统等，要求具备抗太空辐射、抗极端温度、长寿命等特性，同样朝着小型化、高性能化升级，确保航天器在轨稳定运行和数据高效传输。

##### (二) 中游制造环节

中游制造环节是航空航天价值链的核心，涵盖零部件制造、整机制造、系统集成、测试验证四个关键步骤，航空与航天领域的制造工艺虽有差异，但核心逻辑一致，均以高精度、高可靠性为核心要求。

##### 1. 零部件制造

航空领域：零部件制造涉及众多关键技术，核心代表为航空发动机制造，其需在高温、高压、高转速的极端环境下长期稳定工作，叶片加工精度达微米级，涡轮盘需采用无瑕疵粉末冶金技术，同时机身结构部件制造需运用碳纤维自动化铺放、钛合金真空电子束焊接等高端工艺，实现轻量化与结构强度的完美平衡。此外，机载设备零部件、机翼、尾翼等关键部件的制造，也需严格遵循高精度标准。

航天领域：零部件制造同样对精度和可靠性要求极高，核心包括火箭发动机零部件、卫星结构零部件等，如火箭发动机喷嘴需耐受极高温度，采用特种材料和精密加工工艺；卫星零部件需具备轻量化、抗辐射特性，加工精度和装配精度直接影响航天器在轨运行稳定性，部分核心零部件的制造难度甚至高于航空领域。

## 2. 整机制造

航空领域：整机制造是将各类航空零部件组装成完整飞机的核心环节，工艺复杂，涉及精密加工、装配、调试等多个步骤，质量控制极为严格。无论是民用客机还是军用战机，均需将机身、航空发动机、航电系统、控制系统等多个复杂部件进行精密组装，确保各部件衔接顺畅、协同工作，最终保障飞机的飞行安全性、稳定性和舒适性。

航天领域：整机制造主要是将各种零部件组装成完整的航天器（卫星、飞船等）和运载火箭，需将结构系统、电气系统、推进系统、控制系统等多个复杂系统进行精密整合，遵循高精度、高可靠性、高安全性标准。制造工艺的优劣直接影响航天器的在轨性能、使用寿命和任务成功率，以及火箭的发射可靠性。

## 3. 系统集成

航空领域：此环节将飞机的航电系统、控制系统、动力系统、导航系统等各个分系统、单机设备有机整合，核心是确保各系统间的电气接口、机械接口、信息接口匹配与兼容，实现高效的数据交互与协同工作，确保飞机的各项功能正常发挥，满足飞行、导航、通信等核心需求。

航天领域：核心是将航天器的通信系统、遥感系统、控制系统、能源系统等集成到航天器平台，或把火箭的推进系统、控制系统、测控系统等进行整合，通过综合布线、系统调试、联调联试等步骤，使航天器或火箭的各部分协同运行，确保任务顺利执行。例如，将卫星的通信、遥感等功能系统集成，实现卫星的既定探测、通信任务。

## 4. 测试验证

航空领域：是确保航空装备质量与可靠性的关键关卡，涵盖环境测试、性能测试、可靠性测试等多个方面。通过模拟高空、高温、低温、强气流等极端飞行环境，检验飞机的结构强度、发动机性能、航

电系统稳定性等，同时对飞机的飞行性能、安全性进行全面检测，及时发现并解决潜在问题，降低飞行风险。

航天领域：测试验证的标准更为严苛，需模拟太空极端环境（高真空、强辐射、极端温差等），对航天器、火箭的各项性能进行全面检测，包括卫星通信系统信号传输质量、火箭发动机推力、航天器在轨姿态控制能力等，通过多轮测试验证，确保产品满足设计要求，最大限度降低航天任务失败风险。

## (三) 下游应用服务

下游应用服务是航空航天价值链的终端环节，聚焦航空装备、航天装备的落地应用与后续保障，航空与航天领域的应用场景差异较大。

### 1. 发射与运行

航空领域：核心是飞机的起降与日常飞行运行，涉及机场调度、飞行管控、机组保障等多个环节，需航空公司、机场、空管等各部门密切协同，确保飞机按照既定航线安全、高效飞行，同时对飞行过程中的各项参数进行实时监测，保障飞行安全。

航天领域：主要包括运载火箭发射和航天器在轨运行两部分。运载火箭将卫星、飞船、探测器等航天器送入预定轨道，涉及发射场调度、火箭点火控制、在轨入轨调整等复杂操作，需航天发射、测控等多个部门密切协同；航天器在轨运行则涉及轨道设计、姿态控制、数据传输等技术，确保其在预定轨道上正常工作，如通信卫星需保持特定轨道和姿态，实现全球稳定通信。

### 2. 维护与回收

航空领域：主要是飞机的日常维护、定期检修和故障排查，通过专业技术人员对飞机机身、发动机、航电系统等进行全面检查、维修和保养，及时更换老化部件，延长飞机使用寿命，确保每一次飞行的安全性。同时，对退役飞机进行拆解、回收再利用，实现资源循环。

航天领域：核心是航天器的在轨维护和回收利用。通过地面测控系统对航天器进行实时监测和远程维护，及时处理在轨故障，延长其使用寿命；对于返回式航天器（如载人飞船返回舱）和可回收火箭部件，进行回收、检测和再利用，有效降低航天任务成本；同时，对退役航天器进行精准处置，减少太空垃圾，保障太空环境安全。

## 二、制造环节的关键步骤

航空航天装备中游制造环节是连接上游原材料与下游应用服务的核心枢纽，其价值链围绕“精度、可靠性、安全性”三大核心目标展开，可细分为零部件制造、分系统集成、整机总装、测试验证四大关键环节。每个环节均包含技术密集型的细分步骤，且环环相扣，共同决定装备的最终性能与任务成功率。

### (一) 零部件制造：价值链的“基础单元生产层”

零部件是航空航天装备的最小功能单元，其制造精度（部分需达微米级甚至纳米级）、材料性能一致性直接影响后续集成效率与整机可靠性。该环节需针对不同类型零部件（结构件、动力件、电子件）采用差异化工艺，是中游制造中技术壁垒最高、质量控制最严格的环节之一。

#### 1. 结构类零部件制造（占比约 40%，如机身框架、卫星舱体、火箭箭体）

结构类零部件适配航空航天、高端装备等领域，其一般加工关键步骤，核心围绕“精准成型-精密加工-质量保障”三大核心，兼顾材料特性与装配要求，具体步骤具有通用性，同时结合航空、航天领域的应用差异，各有侧重。

首先是原材料预处理与坯料制备环节。无论是航空还是航天领域，都需先选择适配材料，再进行下料、热处理和表面清理。航空领域常用钛合金、铝合金、复合材料等，用于机身框架、机翼等部件；航天领域则侧重抗高压、抗高温的材料，用于卫星舱体、火箭箭体等。下料可采用激光切割、等离子切割等方式，确保坯料尺寸满足余量要求；针对钛合金等易变形材料，需进行去应力退火、调质等热处理，降低后续加工变形风险；表面清理则能保障加工过程中刀具与材料的适配性。

其次是粗加工与半精加工步骤，核心是快速去除余量、细化轮廓并校准基准。粗加工阶段，航空、航天领域均采用铣削、车削、磨削等方式，去除坯料大部分多余材料，初步成型零部件轮廓，并预留合理加工余量，避免精加工时因应力释放导致尺寸超差；关键工序会采用粗加工专用刀具，提升效率并减少刀具损耗。半精加工阶段，重点对零部件关键表面进行加工，优化表面粗糙度，建立精准加工基准，为精加工提供定位依据，复杂结构件还需再次进行去应力处理。

精加工是保障尺寸与精度的核心环节，航空航天领域对精度要求极高。该阶段需采用高精度加工设备，如五轴联动加工中心、精密磨削机床，加工关键尺寸、形位公差，其中航空航天类零件精度可达±

0.005mm。针对螺纹、槽、孔系等特殊结构，需采用专用刀具与工艺；同时要严格控制加工参数，避免材料过热变形或表面损伤。

表面处理环节旨在提升零部件性能与耐久性，航空、航天领域根据应用环境差异，采用不同的处理方式。通用的处理方式包括防腐、耐磨、密封等，如阳极氧化、镀锌、喷涂等；航空领域的零部件，如飞机起落架支柱，需进行特殊处理，提升抗疲劳性能；航天领域的零部件，如卫星太阳能电池板基板，需涂覆专用涂层，抵抗太空紫外辐射与高低温循环的老化影响。

质量检测与验收是结构类零部件制造的关键把关环节，航空航天领域均遵循严格标准。尺寸检测采用三坐标测量仪、卡尺等设备，核验关键尺寸与形位公差；表面质量检测通过目视检查、超声波检测等多种方式，排查表面及内部缺陷；同时需进行装配适配性验证，与关联零部件试装，确保安装精度与配合间隙符合要求；不合格品需返工或报废，避免流入下道工序。最后，零部件需标注编号、材质等信息，采用防锈包装入库，便于追溯与存储。

结合航空、航天领域的具体应用，结构类零部件制造还有针对性的关键工艺。航空领域，金属结构件采用“五轴联动数控铣削-电火花成型-激光打孔”组合工艺，复合材料结构件采用“自动化铺丝/铺带-热压罐成型”工艺，如民航客机机身壁板的加工，需严格控制铺层精度与固化度。航天领域，卫星太阳能电池板基板的纤维铺设角度误差需 $<1^\circ$ ，火箭发动机喷管喉部的铜合金内衬，需通过高精度加工实现复杂曲面与冷却通道的精准成型。

#### 2. 动力类零部件制造

动力类零部件的制造核心围绕“性能达标、可靠性优先、精度可控”原则，通用核心流程适用于航空、航天领域，同时因二者应用工况的差异，在具体工艺与标准上有所区别。

材料选型与坯料制备是基础，需依据工况需求选择合适材料，航空、航天领域均优先选用耐高温、抗疲劳、高强度的材料，如高温合金、钛合金等。坯料成型可采用锻造、铸造、3D 打印等方式，确保坯料致密度与组织均匀性，其中航空发动机叶片常用精密铸造工艺；预处理阶段需进行去应力退火、调质等处理，降低材料内应力，提升加工稳定性。

粗加工、半精加工与精加工环节，与结构类零部件加工逻辑一致，但针对动力类零部件的特性，精度要求与工艺选择更为严苛。粗加工快速去除余量，半精加工校准基准、细化结构，精加工采用高精度

设备,保障关键尺寸与形位公差,精度可达 $\pm 0.001-0.01\text{mm}$ 。针对轴类、齿轮、叶片等特殊结构,需采用滚齿、磨齿、电解加工等专用工艺,同时严控加工参数,避免材料过热导致性能衰减。

关键工艺强化是提升动力类零部件核心性能的关键,航空、航天领域均注重表面强化与热处理优化。表面强化可采用喷丸、渗碳、等离子喷涂等工艺,提升零部件抗疲劳、耐磨、耐高温能力;密封与润滑处理则保障动力传输过程中的密封性与润滑性。此外,需根据材料特性进行时效处理、淬火回火,进一步提升材料强度与韧性。

精密检测环节,需对动力类零部件进行全维度质量把控,航空、航天领域均需进行尺寸精度检测、性能与缺陷检测、装配适配性检测。尺寸精度检测采用专用设备,核验关键尺寸与形位公差;性能与缺陷检测通过无损检测排查内部缺陷,进行疲劳测试、硬度测试验证性能;装配适配性检测则通过与关联零部件试装,验证配合间隙与动力传输流畅性。最后,零部件需经过精密清洁、标识追溯、防锈封装后入库。

航空、航天领域的动力类零部件,因工作工况极端,制造工艺更为复杂。航空领域,航空发动机叶片需在 $1600^{\circ}\text{C}$ 、转速超 $15000\text{rpm}$ 的环境下长期工作,其制造需经过单晶合金熔炼、精密铸造、内部冷却通道加工、涂层制备等关键步骤,确保高温强度与抗烧蚀能力。航天领域,火箭涡轮盘采用“粉末冶金-等温锻造”工艺,确保晶粒均匀,避免疲劳裂纹,探伤检测需达到“零缺陷”标准。

### 3. 电子类零部件制造

电子类零部件涵盖电阻、电容、芯片封装件等,适配多个领域,其制造核心围绕“精密成型、电气性能保障、可靠性强化”,通用核心步骤适用于航空、航天领域,同时二者对电子零部件的环境适应性要求更为严苛。

材料选型与预处理环节,需依据电气特性与结构需求选择材料,导体采用铜、银等金属,绝缘采用陶瓷、环氧树脂等,封装采用塑料、金属外壳。航空、航天领域的电子零部件,需额外考虑耐高温、抗辐射、抗干扰等特性,材料预处理阶段,金属材料需进行退火去应力、表面清洁,绝缘材料切割成适配尺寸,确保加工一致性。

核心结构成型与制备环节,不同类型电子零部件采用差异化工艺。被动元件通过薄膜沉积、厚膜印刷、叠层、卷绕等工艺成型;连接器、结构件采用注塑、冲压、车削等工艺;芯片封装件需经过晶圆切割、

贴片等步骤,完成初步结构搭建。航空、航天领域的电子零部件,在结构成型过程中,需严格控制尺寸精度,确保适配后续集成需求。

电气连接与组装环节,需通过回流焊、波峰焊等方式,实现引脚、端子与芯片、基板的电气连接;同时将各部件装配整合,确保结构稳固与信号传输通畅。航空领域的飞控、导航系统电子件,航天领域的卫星通信、姿控系统电子件,对电气连接的稳定性要求极高,需避免信号传输中断或误码。

精密加工与尺寸校准、表面处理与性能强化,是提升电子零部件精度与可靠性的关键。高精度部件采用激光切割、电化学加工等工艺,控制关键尺寸,通过基准校准保障装配标准;表面处理包括导电、防腐、绝缘、防护等,航空航天级零部件还需进行三防处理,提升极端环境适应性。

电气性能与可靠性测试环节,航空、航天领域的标准远高于普通领域。需检测电阻值、电容容量、导通性等核心电气参数,进行高低温循环、振动冲击、盐雾测试等可靠性测试,验证环境适应性与长期稳定性;同时复检外观与尺寸,排查表面缺陷与尺寸超差。最后,零部件需进行标识追溯、最终封装,按要求分类入库,确保存储期间性能稳定。

针对航空、航天领域的特殊需求,电子零部件有专属关键工艺。航空领域的电子件,需适应高空高低温、振动等环境,确保信号传输稳定;航天领域的电子件,如卫星用芯片,需承受 $100\text{krad}$ 以上的总剂量辐射,采用抗辐射加固工艺与陶瓷封装,确保在极端太空环境下稳定工作;惯性导航用光纤陀螺,需严格控制绕制精度与封装工艺,满足航天器姿态控制精度需求。

### (二) 分系统集成: 价值链的“功能模块组装层”

分系统是由多个零部件组成的功能单元,如航空的飞控系统、航天的推进系统,集成环节需实现“零部件间接口匹配、功能协同、性能达标”,是从“单元”到“系统”的关键过渡。不同分系统集成逻辑差异较大,以下分别围绕航空、航天领域的核心分系统,详细阐述集成步骤。

#### 1. 航空发动机分系统集成

发动机是飞机的“心脏”,由压气机、燃烧室、涡轮、尾喷管等子模块组成,集成步骤需严格控制“气动匹配”与“热力平衡”,确保发动机稳定输出动力,满足飞机飞行需求。

首先是子模块预装环节,压气机转子与静子需进行同心度校准,同轴度误差 $<0.02\text{mm}$ ,确保气流顺畅;燃烧室需预装燃油喷嘴,喷嘴雾化角度误差 $<5^{\circ}$ ,并进行冷态流量测试,确保燃油分布均匀,为后续燃烧效率提供保障。

其次是发动机层面的整机总装，分为转子对接、静子装配、管路连接三个核心步骤。转子对接时，将压气机转子与涡轮转子通过联轴器连接，需进行动平衡测试，不平衡量 $<5g \cdot mm$ ，避免高速旋转时产生振动；静子装配时，将燃烧室、机匣等静子部件与转子对齐，控制径向间隙，间隙过大导致气流泄漏，过小则可能摩擦损坏；管路连接采用双卡套接头，拧紧力矩精准控制，连接后进行气密性测试，确保无泄漏。

分系统测试是验证发动机性能的关键，需进行台架试车，在地面试车台模拟怠速、起飞、巡航等不同工况，测试推力、燃油消耗率、排气温度等参数，同时监测振动、噪声等指标，确保发动机稳定运行，推力误差需 $<2\%$ 设计值，振动加速度 $<5g$ 。

## 2. 航天器推进分系统集成

推进系统负责航天器轨道调整与姿态控制，如卫星的远地点发动机、姿态控制推力器，集成核心是“推进剂密封”与“推力精准控制”，因推进剂多为有毒、腐蚀性介质，密封性能直接决定任务成败。推力器组装环节，将推力器本体、电磁阀、喷管通过激光焊接连接，焊接深度 2-3mm，焊缝探伤无气孔，避免推进剂泄漏；管路与贮箱集成时，推进剂管路采用钛合金管，弯曲半径需 $\geq 3$  倍管径，避免管路开裂，连接采用焊接+法兰密封，法兰密封垫选用耐推进剂腐蚀的氟橡胶材质，连接后进行液压强度测试与氦质谱检漏，确保无变形、无泄漏。

分系统测试需进行热试车，在真空环境模拟舱中，启动推力器，测试推力大小、工作时间等参数，姿态控制推力器推力误差 $<5\%$ ，响应时间 $<100ms$ ，同时监测推进剂流量稳定性，确保满足航天器轨道调整与姿态控制需求。

## 3. 飞控/导航分系统集成

飞控系统是飞机的“大脑”，导航系统是航天器的“眼睛”，二者集成核心均是“信息交互顺畅、控制精度达标”，但因应用场景不同，具体集成标准与工艺有所差异。

航空领域的飞控分系统集成，硬件集成时，将飞控计算机、传感器、执行机构通过 ARINC 429 总线连接，总线传输速率需 $\geq 1Mbps$ ，数据误码率 $<1 \times 10^{-9}$ ；软件加载与调试阶段，加载 PID 控制算法等飞控软件，进行联调测试，模拟飞机遭遇气流等工况，验证系统快速响应能力，响应时间 $<100ms$ ，控制误差在允许范围。

航天领域的导航分系统集成，硬件集成时，将导航计算机、传感器等通过 1553B 总线连接，保障信息传输稳定；软件加载与调试阶段，加载轨道计算算法等导航软件，进行联调测试，模拟卫星轨道摄动等工况，验证系统控制精度，轨道控制误差 $<100m$ 。

## (三) 整机总装：价值链的“系统整合层”

整机总装是将所有分系统集成整合为完整装备的环节，需严格遵循“模块化、高精度、高安全”原则，是中游制造中最复杂的“系统工程”。航空与航天领域的整机总装，因装备类型差异，具体流程与标准有所不同，分别以民航客机、卫星为例阐述。

### 1. 飞机整机总装（以民航客机为例）

飞机整机总装的核心的是机身对接与分系统安装，需严格控制精度，确保各部件协同工作，保障飞行安全。机身对接环节，将前机身、中机身、后机身通过激光定位对齐，定位精度 $\pm 0.05mm$ ，采用真空电子束焊接连接，焊缝强度需达到母材强度的 90%以上；随后安装机翼与机身的连接接头，采用螺栓连接+胶接双重固定，螺栓拧紧力矩通过力矩扳手校准，误差 $<\pm 3\%$ ，确保机翼能承受起飞、着陆时的大载荷。

分系统安装环节，重点是发动机吊装与飞控系统安装。发动机吊装时，通过专用吊具将发动机与机翼发动机挂架对接，采用衬套+螺栓连接，螺栓涂抹防松胶，安装后进行载荷测试，确保承受发动机推力时无位移；飞控系统安装时，将飞控计算机、舵机等部件安装到机身相应舱段，连接总线与控制线，安装后进行通电测试，验证舵面偏转角度与飞控指令的一致性，误差 $<0.5^\circ$ 。

线束与管路铺设是飞机整机总装的重要配套环节，飞机线束总长度可达数十公里，需按分区布线原则铺设，避免与高温部件距离过近，安全距离 $\geq 50mm$ ；燃油管路、液压管路需进行压力测试，液压管路测试压力 30MPa，保压 10min 无泄漏，同时标记管路走向，便于后续维护。

### 2. 航天器整机总装（以卫星为例）

卫星整机总装核心是平台舱与载荷舱对接、载荷集成，需严格控制精度，确保卫星在轨运行稳定。平台舱与载荷舱对接时，通过法兰连接，法兰面平整度误差 $<0.1mm$ ，连接螺栓采用钛合金螺栓，拧紧后进行精度测量，确保卫星整体坐标系偏差 $<0.5mm$ ，避免影响后续载荷指向精度。

载荷集成环节，根据卫星用途不同，集成工艺有所差异。如遥感卫星的相机载荷，需通过精密导轨安装到载荷舱，安装后进行指向精度测试，误差 $<0.1^\circ$ ，确保相机能精准拍摄目标区域；通信卫星的天线需进行展开测试，模拟太空失重环境，确保天线展开顺畅，无卡滞。

总装检测环节，需进行重量与重心测量，重心偏差需 $<5\text{mm}$ ，避免航天器在轨姿态控制困难；同时进行电气接口测试，验证各分系统间电气连接是否正常，数据传输是否顺畅，如姿控系统推进系统的指令传输延迟需 $<10\text{ms}$ 。

#### (四) 测试验证：价值链的“质量把关层”

测试验证是中游制造的最后环节，也是确保装备“可靠性、安全性”的关键，需模拟航空航天装备的全生命周期工况，发现潜在缺陷并优化。该环节可分为“单机测试、分系统测试、整机测试、环境测试”四类，航空与航天领域均需覆盖，同时结合自身工况特点，有针对性的测试重点。

##### 1. 单机测试（零部件级）

针对每个关键零部件，航空与航天领域均需进行性能测试与可靠性测试，确保零部件质量达标。性能测试方面，航空领域的发动机叶片需进行高温强度测试，在 $1600^\circ\text{C}$ 下施加载荷，变形量需 $<0.1\text{mm}$ ；航天领域的传感器需进行精度测试，如加速度计零偏误差需 $<10\mu\text{g}$ 。可靠性测试方面，航空、航天领域的电子元件需进行寿命测试，在 $125^\circ\text{C}$ 高温下连续工作 1000 小时无故障；航空领域的飞机起落架需承受 $10^4$ 次起降循环载荷无裂纹，航天领域的结构件需满足长期在轨运行的可靠性要求。

##### 2. 分系统测试（功能模块级）

分系统测试的核心是验证功能完整性与性能达标性，航空与航天领域的核心分系统测试重点不同。航空领域，飞控系统需进行半物理仿真测试，将飞控计算机与模拟的飞机动力学模型连接，模拟起飞、爬升等全流程，验证飞控指令的准确性，舵面偏转角度与指令偏差 $<0.5^\circ$ ；航空发动机分系统需进行台架试车测试，验证推力、流量等参数。航天领域，推进系统需进行热试车测试，验证推力、工作时间等参数，火箭发动机推力偏差需 $<2\%$ ；导航分系统需验证轨道控制精度，确保满足航天器在轨运行需求。

##### 3. 整机测试（装备级）

整机测试旨在验证整机的综合性能与系统协同性，航空与航天领域的测试流程差异较大。航空领域，飞机整机需进行地面滑行测试、低速/高速滑行测试、试飞测试，首飞验证基本飞行性能，后续试飞验证极限工况，如最大速度、最大高度、失速特性等，确保飞机满足飞行安全标准。航天领域，航天器整机需进行总装测试，验证各分系统协同工作能力，如姿控系统控制推进系统调整卫星姿态，姿态控制精度需 $<0.1^\circ$ ；同时进行真空热循环测试，模拟太空高低温循环，测试整机电气性能稳定性。

##### 4. 环境测试（极端工况验证）

环境测试的核心是模拟航空航天装备面临的极端环境，验证其环境适应性，航空与航天领域的测试场景各有侧重。通用的力学环境测试包括振动测试、冲击测试、离心测试，航空领域模拟飞机起飞、着陆时的振动与冲击，航天领域模拟火箭发射时的振动、返回式航天器着陆时的冲击。航天领域还有专属的空间环境测试，包括辐射测试、真空测试、太阳辐射测试，模拟太空辐射、真空、太阳辐射等环境，验证电子元件抗辐射能力、装备密封性能与材料老化情况。

#### 三、大型客机的价值链

大型客机产业链条绵长而复杂，涵盖上游原材料与零部件、中游整机制造、下游运营维护等多个层级，形成价值数万亿的庞大产业集群。以下将以大型客机的制造为例。

大型客机的上游环节作为整个产业链的基础，技术壁垒高、附加值大，是当前国产大型客机自主可控的关键战场。从成本结构看，机身、发动机及动力系统、航电系统分别占据大型客机总造价的 40%、40%和 15-20%，其余为起落架和内饰等。这种价值分布凸显了核心系统的重要性，也揭示了国产大型客机产业链升级的主要方向。

上游原材料供应是大型客机制造的基石，直接关系到飞机的性能、安全性和经济性。目前，C919 采用的关键材料主要包括铝合金、钛合金和复合材料三大类。铝合金以其优异的强度重量比和耐腐蚀性能，成为飞机结构的主要材料，中国铝加工企业已能生产大部分航空铝合金，但部分高端产品仍需进口；钛合金在发动机和关键承力部件中不可或缺，国内宝钛股份等企业虽已实现技术突破，但高端钛合金的产能和质量稳定性仍有提升空间；复合材料是未来航空材料的发展方向，C919 使用的碳纤维复合材

料主要由中航高科、光威复材等企业供应，但原材料碳纤维仍部分依赖进口。值得关注的是，随着 C919 国产化率的提升，航空钛材及航空锻造件的需求量大幅增加，相关企业如宝钛股份、中航重机等直接受益。据行业预测，到 2030 年，中国航空用钛材需求量将从 2024 年的约 1.5 万吨增长至 3 万吨以上，年复合增长率超过 12%。

中游制造环节是大型客机产业链的核心部分，包括设计研发、零部件制造、总装集成等关键步骤。在研发设计领域，中国已形成以中国商飞为龙头，中航工业旗下各大研究所为支撑的研发体系，采用全球协同研发模式，以上海为中心，整合西安、成都、沈阳等地的设计资源；在零部件制造方面，国内企业承担了 C919 约 60% 的机体结构工作包，中航西飞负责中机身和机翼，洪都航空承担前机身和后机身的制造，中航沈飞负责垂尾等部件，形成了较为完整的国内供应链。总装集成是飞机制造的最后也是最为复杂的环节，位于上海浦东的中国商飞总装制造中心已建成数字化装配生产线，采用自动钻铆、激光跟踪测量等先进工艺，装配精度和质量达到国际先进水平。随着 C919 批量交付的推进，总装效率持续提升，目前的生产节拍约为 2 个月/架，未来有望缩短至 1 个月/架，逐步接近波音 737 和空客 A320 的生产效率。

航空发动机被誉为“工业皇冠上的明珠”，是大型客机产业链中技术壁垒最高、价值最集中的部分。目前，C919 配备的是 CFM 国际公司研发的 LEAP-1C 发动机，其燃油效率比上一代产品提高 15%，噪声和排放显著降低。为打破国外垄断，中国航发集团正在全力推进长江 CJ-1000A 发动机的研制，这款对标 LEAP 的国产大涵道比涡扇发动机已完成核心机测试，计划 2025 年完成适航取证。从技术层面看，CJ-1000A 采用了许多先进设计，如宽弦空心风扇叶片、陶瓷基复合材料(CMC)燃烧室等，总体性能接近国际先进水平。然而，发动机的可靠性和耐久性需要长期验证，国产发动机要实现大规模商用还需攻克材料、工艺、测试等方面的诸多难题。据业内专家估计，中国航空发动机技术与国际领先水平仍有 10-15 年的差距，需要持续投入和耐心积累。为加速突破，中国正构建以上海临港、四川绵阳、天津空港等为核心的航空发动机产业集群，通过资源整合和协同创新提升研发效率。

航电系统和机电系统是大型客机的“神经”和“血管”，对飞行安全和乘客体验至关重要。在航电系统方面，C919 采用了“主制造商-供应商”模式，通过合资合作引进先进技术，如昂际航电(中航工业与 GE 合资)提供综合模块化航电系统(IMA)，霍尼韦尔提供飞行控制系统等。这种模式虽提升了系统先进性，但也导致国产化率偏低。目前，中航电子、中航机电等国内企业正加快技术攻关，在通信导航、飞行控制等子系统上寻求突破。机电系统包括电源、燃油、液压、环控等，技术难度相对较低，国产化进程较快，四川泛华、南京机电等企业已为 C919 配套多项产品。随着国产大型客机产量的提升，机载设备领域将迎来快速发展期，预计到 2030 年，中国航空机载设备市场规模将从 2024 年的约 200 亿元增长至 500 亿元，本土企业的市场份额有望从目前的 30% 提升至 50% 以上。

下游应用环节直接连接最终用户。在民航运输领域，C919 主要执飞国内干线航线，目前已入驻东航、国航、南航等主要航空公司，累计开通 15 条航线，日均航班量超过 50 班次。在航空租赁市场，工银租赁、交银租赁等国内租赁公司已订购数百架 C919，构建了“租赁公司+制造商+航空公司”的共赢模式。与此同时，大型客机在货运、医疗救援、森林防火等特殊领域的应用也在拓展，如 AG600 大型水陆两栖飞机已多次参与应急救援任务。

## 第二章 行业的 ESG 发展

## 第一节 ESG 相关政策

近年来，智能制造作为推动产业升级和高质量发展的核心引擎，已成为全球主要国家的战略竞争焦点。在中国，航空航天产业作为技术密集、战略性强、安全性要求极高的高端制造业代表，其智能化转型更是被赋予了引领工业现代化建设的重任。通过对近几年国家及地方层面出台的一系列政策文件进行梳理分析，可以清晰地看到，一个以顶层设计为引导、以标准体系为基础、以地方实践为支撑的航空航天领域智能制造政策体系已经形成，正系统性地推动产业向智能化、绿色化、协同化方向加速迈进。

### 一、国家层面战略：高瞻远瞩，构建“智能+绿色”融合的顶层设计

国家层面的政策为航空航天产业的智能化转型绘制了清晰的蓝图，并特别强调与绿色可持续发展理念的深度融合。

#### (一) 绿色化与智能化双轮驱动

工业和信息化部等四部局联合发布的《绿色航空制造业发展纲要（2023-2035 年）》是这一趋势的集中体现，该政策将“绿色”与“智能”紧密捆绑，视为一体两面，核心路径是通过智能化手段实现绿色目标。在智能工艺与流程优化方面，政策推动民机企业利用大数据和人工智能算法对生产工艺和流程进行深度优化，减少材料浪费和能源消耗；在全生命周期碳足迹智能管理方面，借助工业互联网和物联网技术，构建从原材料、设计、制造到运营、报废回收的全产业链碳排放足迹评估与追踪系统，实现精准碳管理；在智能再制造与循环利用方面，发展基于激光增材制造（3D 打印）、数字孪生等智能技术的航空再制造模式，并开发智能化的金属、复合材料回收利用方法，拓展循环经济新业态。

#### (二) 核心技术攻关与创新平台建设

工业和信息化部等四部局联合发布的《通用航空装备创新应用实施方案（2024-2030 年）》聚焦于未来产业竞争力，直指“无人化”和“智能化”的核心，政策要求攻克精准定位、感知避障、自主飞行、智能集群作业等关键技术，并支持建立未来空中交通装备创新研究中心和绿色智能安全技术创新联合体，以此打破产学研壁垒，实现协同攻关，为低空经济、通用航空等新兴领域的智能装备发展奠定基础。

### (三) 标准体系先行，夯实发展根基

标准化是规模化推广智能制造的前提，《国家智能制造标准体系建设指南（2024 版）》构建了覆盖智能工厂、智能生产、智能供应链、智能服务等全方位的标准体系。对于航空航天这类强调安全性和可靠性的行业而言，统一的标准意味着互联互通有据可依，能够确保不同系统、设备之间的数据顺畅交互；意味着评估衡量有尺可度，为智能工厂、数字化车间的建设水平提供统一的评估准则；更意味着安全规范得以保障，尤其在信息安全、功能安全等方面设立了明确门槛。

### 二、地方层面实践：精准施策，打造各具特色的产业集群

各地政府结合自身产业基础和区位优势，出台了极具针对性的政策和行动计划，形成了与国家战略上下联动、错位发展的良好局面。

#### (一) 聚焦区域优势产业，明确智能化主攻方向

作为制造业大省的江苏，其《航空航天产业发展三年行动计划》强调将 5G、工业互联网、人工智能等新一代信息技术深度融入先进制造技术，重点突出“提质增效”，充分体现了其扎实的产业根基；北京依托强大的科研和人才资源，在《北京市加快商业航天创新发展行动方案（2024-2028 年）》中提出了前瞻性目标，重点突破火箭再入智能控制、健康监测与再利用技术，力争在全国率先实现火箭入轨回收复飞，同时着力提升卫星的批量化、柔性化、智能化脉动生产水平，助力降低发射成本、支撑巨型星座建设；江西南昌则充分发挥其航空制造历史优势，在产业链现代化方案中，重点发展航空维修、客改货等领域的智能化应用，例如利用 AR/VR 技术进行维修指导、通过数据分析预测部件寿命等，推动相关领域智能化水平提升。

#### (二) “真金白银”提供支持，激励企业主动转型

北京市顺义区、浙江省平湖市、黑龙江省等地均出台了专项财政扶持办法，这些政策不再局限于宏观指导，而是提供了具体可操作的激励路径，包括对企业的关键工艺环节应用智能制造装备和软件给予资金补贴，对获评市级、省级、国家级智能工厂的企业给予一次性奖励，同时围绕国家大飞机、航空发动机等重大专项，对来当地投资或合作的关键项目给予土地、税收等综合支持，全方位激励企业主动开展智能化转型。

### 三、政策详解

#### 1. 《制造业企业数字化转型实施指南》(2024 年 12 月)

该指南明确了企业数字化转型的全流程要求，核心内容涵盖四个方面，企业需利用相关参考标准开展评估诊断，摸清数字化发展现状，识别痛点需求，结合系统工程 (MBSE) 方法论编制体系化规划方案；在组织落地实施阶段，要加强组织保障，设置 CIO、CDO 等岗位，组建专门的转型队伍，整合外部服务商，强化项目实施与质量管控，推动数字化与业务深度融合；在成效评估环节，要以经营目标改善和业务流程优化为导向，聚焦核心指标开展转型绩效和数字化能力评价，可采用自评或第三方评价等方式；最后根据评估结果补齐短板，迭代解决方案，制定下一阶段目标，推动数字化转型实现螺旋式提升。

#### 2. 《绿色航空制造业发展纲要(2023—2035 年)》(2023 年 10 月)

该纲要由工信部、科技部、财政部、民航局四部门联合发布，明确了 2025 年和 2035 年的发展目标及核心任务。2025 年的目标包括国产民用飞机节能、减排、降噪性能进一步提高，航空绿色制造水平全面提升且产业发展取得阶段性成果，同时建成安全有效的保障体系；2035 年的远景目标则是建成具有完整性、先进性、安全性的绿色航空制造体系，让新能源航空器成为发展主流，使国产民用大飞机各项性能达到世界一流水平，实现新型通用航空装备的商业化、规模化应用。为实现上述目标，纲要部署了四项主要任务，即构建协同高效的绿色技术创新体系、开放融合的绿色航空产业体系、市场导向的绿色示范应用体系和安全有效的服务保障体系。

#### 3. 《扩大内需战略规划纲要(2022-2035 年)》(2022 年 12 月)

该纲要旨在通过实施扩大内需战略，促进经济高质量发展，构建以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局，其规划背景是坚定实施扩大内需战略、培育完整内需体系，这是加快构建新发展格局的必然选择，也是促进我国长远发展和长治久安的战略决策。其中与航空航天相关的内容重点强调促进重大装备工程应用和产业化发展，明确提出加快大飞机、航空发动机和机载设备等的研发，推进卫星及应用基础设施建设，同时完善航空应急救援体系，推进新型智能装备、航空消防大飞机、特种救援装备、特殊工程机械设备等的研发配备，着力提升我国航空装备制造的自主研发和创新能力。

#### 4. 《关于巩固回升向好趋势加力振作工业经济的通知》(2022 年 11 月)

该通知的核心目标是巩固工业经济的回升向好趋势，促进经济稳定增长，主要措施包括强化责任形成合力，要求各地有关部门充分发挥工业稳增长协调机制作用，鼓励地方安排中小企业纾困专项资金，对符合条件的企业给予支持；加大政策扶持力度，在需求侧着力拉消费、促投资、稳出口，畅通经济循环，在供给侧推进补链强链，加快培育新动能；完善监测调度和督导激励机制，通过监测和调度确保各项政策措施落到实处，激励各方积极参与；推动重大项目建设，加快形成实物工作量，支持企业设备更新改造投资。其中特别强调打好关键核心技术攻坚战，提出提高大飞机、航空发动机及燃气轮机、船舶与海洋工程装备、高端数控机床等重大技术装备的自主设计和系统集成能力，为我国工业经济稳定增长和航空航天装备产业发展提供支持。

#### 5. 《计量发展规划(2021-2035 年)》(2021 年)

该规划旨在贯彻落实《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》，进一步夯实计量基础，提升计量能力和水平，全面开启计量事业发展新征程，推动经济社会高质量发展，规划内容涵盖编制背景、总体要求、计量基础研究、计量应用、能力建设、监督管理和保障措施七个部分。其中第四部分计量应用与航空航天智能制造密切相关，重点包括支撑先进制造与质量提升，实施制造业计量能力提升工程，建立一批先进制造业发展急需的高准确度、高稳定性计量基准、标准，在战略性新兴产业等领域建设国家产业计量测试中心和联盟，搭建计量公共服务平台，解决制造业测不了、测不全、测不准难题；服务高端仪器发展和精密制造，加强高端仪器设备核心器件、算法和溯源技术研究，推动关键计量测试设备国产化，加快智能制造领域专用计量仪器仪表的研制和推广使用；提升航空、航天领域计量保障能力，建立完善相关领域计量保证与监督体系，推动航空装备计量数字化、体系化发展，健全全产业链、全生命周期计量评价体系，提升空间领域计量保障能力和航天装备质量控制水平；服务人工智能与智能制造发展，加强人工智能计量基础理论、评估方法和技术研究，建立各领域通用的人工智能计量体系框架和智能水平评价标准、计量测试平台；服务数字中国建设，加强计量与现代数字技术、网络技术联动，提升数字终端、智能终端产品计量溯源能力，开展智能传感器等关键参数计量测试技术研究；支撑碳达峰碳中和目标实现，完善温室气体排放计量监测体系，建立碳排放计量审查制度，推进能源资源和环境计量系统建设；服务大众健康与安全，加强医疗健康、安全生产、公共安全等领域计量技术研究和应用；提升交通运输计量保障能力，开展交通领域计量测试技术研究，服务智慧交通建设。

#### 6. 《2021-2030 年支持民用航空维修用航空器材进口税收政策的通知》

该政策明确，对民用飞机整机设计制造企业、国内航空公司、维修单位以及航空器材分销商，进口国内不能生产或性能不能满足需求的维修用航空器材，实行免征进口关税的政策，通过税收优惠为我国民用航空维修行业的发展提供有力支持。

#### 7. 《“十四五”民用航空发展规划》(2022 年 1 月)

该规划设定了到 2025 年的六大发展目标，分别是航空安全水平再上新台阶、综合保障能力实现新提升、航空服务能力达到新水平、创新驱动发展取得新突破、绿色民航建设呈现新局面、行业治理能力取得新成效。为实现这些目标，规划还提出着力构建民航安全、基础设施、航空服务、绿色发展、战略支撑和现代化民航治理六大体系，同时围绕行业发展的堵点、痛点和难点，确立实施容量挖潜提升、航空运输便捷、民航绿色低碳、科技创新引领、人才强业和产业协同示范六大重点工程，为民用航空事业的发展提供具体的规划指导。

#### 8. 《“十四五”智能制造发展规划》

该规划面向汽车、工程机械、轨道交通装备、航空航天装备、船舶与海洋工程装备等行业，支持智能制造应用水平高、核心竞争优势突出、资源配置能力强的龙头企业建设供应链协同平台，打造数据互联互通、信息可信交互、生产深度协同、资源柔性配置的供应链，助力推动我国智能制造的发展和应用。作为制造强国建设的主攻方向，该规划由工业和信息化部等八个部门联合发布，其发展水平直接关系到中国未来制造业的全球地位，规划强调智能制造在加快现代产业体系发展、巩固实体经济基础、建设数字中国等方面的重要性。规划明确了 2025 年和 2035 年的发展目标，2025 年要实现 70% 的规模以上制造业企业基本数字化网络化，建成 500 个以上智能制造示范工厂，智能制造装备和工业软件的市场满足率分别超过 70% 和 50%；2035 年要全面普及数字化网络化，重点行业骨干企业基本实现智能化，推动生产方式的根本变革。实施路径上，规划强调以新一代信息技术与先进制造技术深度融合为主线，实施智能制造工程，提升创新能力、供给能力、支撑能力和应用水平，具体包括智能制造技术攻关行动、智能制造示范工厂建设行动、智能制造标准领航行动等，其中标准领航行动要建立健全适应智能制造发展的标准体系，完成 200 项以上国家、行业标准的制修订，为中国制造业的转型升级提供清晰的方向和具体的实施路径。

#### 9. 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》

该纲要根据《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》编制，主要阐明国家战略意图，明确政府工作重点，引导规范市场主体行为，是我国开启全面建设社会主义现代化国家新征程的宏伟蓝图，也是全国各族人民共同的行动纲领。纲要强调了深入实施智能制造和绿色制造工程的重要性，提出发展服务型制造新模式和推动制造业高端化、智能化、绿色化的目标，同时明确培育先进制造业集群，推动集成电路、航空航天、船舶与海洋工程装备等产业的创新发展，为我国制造业及航空航天领域的发展提供了重要的指导和支持。

#### 10. 《工业通信业职业技能提升行动计划实施方案》(2020 年 6 月)

该实施方案的重点任务涵盖多个方面，包括强化企业培训主体作用，要求企业适应高质量发展要求，制定并实施职工培训规划和年度计划，开展各类针对性培训，人力资源社会保障部门按规定给予相关补贴，同时鼓励行业龙头骨干企业建设培训载体，支持重点扶持企业纳入补贴培训范围，推动大中小企业协同复工复产；创新培训内容和形式，大力弘扬劳模精神、工匠精神，强化职业素质培养，加强健康知识、创新实践能力、信息技术应用能力、全员质量素质和知识产权培训，全面推行企业新型学徒制，支持项目制培训、互联网+职业技能培训等方式，开展以工代训并给予补贴；大力扶持培训服务机构和网络培训平台发展，紧扣工业通信业高质量发展需求，培育一批特色鲜明、竞争力强的培训服务机构和网络培训平台，深化产教融合、校企合作，加强线上线下融合，发挥各类优质服务机构作用，帮助中小企业开展职工培训；强化技能提升培训基础能力建设，按照“三对接”要求培育建设先进制造业实训基地，加强各类重点培训项目建设，遴选推广急需培训项目，开发精品教材，加快师资库、精品课程库建设；加强产业技能人才需求预测，建设运营产业人才大数据平台，开展重点行业技能人才需求预测，定期发布需求报告和紧缺人才目录，强化需求预测成果的运用；推动技能培训与使用评价激励有机衔接，深化技能人才评价制度改革，支持行业协会和重点企业开展职业技能等级认定，畅通技能人才职业发展通道，鼓励建立首席技师制度，举办各类技能竞赛活动，营造技能成才、技能报国的浓厚社会氛围。

#### 11. 《国家创新驱动发展战略纲要》(2019 年 11 月)

新时代以来，党中央把科技创新摆在国家发展全局的核心位置，把科技自立自强作为国家发展的战略支撑，实施《国家创新驱动发展战略纲要》《国家中长期科学和技术发展规划（2021—2035 年）》等，

明确科技强国建设时间表、路线图、任务书，大力推进实施科教兴国战略和创新驱动发展战略，聚力在基础研究、原始创新、战略高技术等领域攻关，着力打好关键核心技术攻坚战，推动我国在众多关键领域由“跟跑”向“并跑”乃至“领跑”转变。该纲要强调了发展智能绿色制造技术的重要性，提出推动制造业向价值链高端攀升的目标，同时明确加强自主创新，推进民用航空产品产业化、系列化发展，提高产品的安全性、环保性、经济性和舒适性，全面构建航空产业体系，为我国航空制造业的创新发展提供了重要指导。

### 12. 《关于民用航空发动机、新支线飞机和大型客机税收政策的公告》(2019年10月)

该公告对民用航空发动机（包括大型民用客机发动机和中大功率民用涡轴涡桨发动机）、新支线飞机和大型客机实行有关增值税、房产税和城镇土地使用税的优惠政策，通过减轻相关企业的税负，为企业发展注入动力，促进民用航空发动机、新支线飞机和大型客机产业的健康发展。

### 13. 《国务院办公厅关于深化产教融合的若干意见》(2018年1月)

该意见指出，深化产教融合，促进教育链、人才链与产业链、创新链有机衔接，是当前推进人力资源供给侧结构性改革的迫切要求，对新形势下全面提高教育质量、扩大就业创业、推进经济转型升级、培育经济发展新动能具有重要意义。意见特别强调了支持事关国家战略、国家安全等学科专业建设的重要性，包括集成电路、航空发动机及燃气轮机、网络安全和人工智能等领域，为相关学科专业的发展提供了有力的政策支持，也为航空航天智能制造领域培养专业人才奠定了基础。

综合梳理上述政策，当前推动航空航天领域智能制造的政策呈现出鲜明特征并明确了未来趋势。在技术融合方面，政策普遍强调 5G、AI、数字孪生等技术与航空航天专业技术的深度耦合，追求的不再是单纯的自动化，而是实现自感知、自决策、自执行的智能化飞跃；在产业发展方面，政策覆盖了从设计研发、原材料供应、零部件制造到总装集成、测试验证、运营维护乃至再制造的全生命周期，致力于构建一个高效协同、数据驱动的产业生态网络；在发展理念方面，“绿色智能制造”已成为政策制定的基本逻辑，通过智能化手段实现节能降耗、资源循环，使高质量发展与可持续发展合二为一；在治理体系方面，通过“标准体系构建”和“梯度培育行动”等方案，政策层面正在建立一个有章可循、有标可依、有序推进的治理模式，确保航空航天领域智能制造产业健康、稳健发展。

## 第二节 行业核心议题

### 一、气候变化与碳减排

航空航天装备制造行业具有技术密集、产业链长、资源消耗大的特性，研发周期长、试验次数多、生产流程繁复，温室气体减排压力突出，构建完备的碳管理体系已成为行业可持续发展的必然选择。当前，国内航空航天企业在气候管理与碳减排方面与全球先进水平仍有差距，截至 2024 年，中国航空行业加入 SBTi（科学碳目标倡议）的企业仅 24 家，占行业规模以上企业比例较低。但头部企业已率先实践，中国商飞打造“绿色商飞”，发布绿色工艺评价标准，推进零碳车间建设，建成浦东基地光伏发电项目，强化环境监控，2023 年度获得中央企业控股上市公司 ESG 评级四星级；中国东航、南航联动上下游推动产业链低碳转型，自主开发航班碳排放数据监测报告系统，为行业树立标杆。

### 二、供应链管理

有效的供应链管理直接影响产品质量和交付周期，当前行业供应链管理正从传统模式向数字化、智能化、韧性化方向转变，通过建立严格的供应商准入和评估体系、实施分阶段质量管控与可追溯系统、运用大数据优化库存管理等方式，提升供应链效率与韧性。中航成飞作为行业标杆，建立健全供应链体系文件，对供应商进行“选、评、控、育”全生命周期管理，推进“供应商 A+B 管理模式”，强化供应链安全与应急管控，规范招投标流程，先后获得多项荣誉，彰显了供应链管理的显著成效。

### 三、研发创新

航空航天装备制造是技术壁垒极高的复杂产业体系，产品需在极端环境下实现高性能、高可靠性要求，当前行业在研发创新方面面临产业链协同不足、核心技术“卡脖子”、成果转化效率不高、国际化合作受限等共性问题。国际航空航天巨头研发投入占销售额比重普遍在 10%-20%之间，国内主要企业平均在 5%-8%之间，部分重点企业已超过 10%，呈现持续提升态势。

数字孪生与区块链作为变革性技术，正深度融入航空航天装备制造全价值链环节，形成强大协同效应。数字孪生通过集成物理建模、多物理场仿真、实时传感网络及人工智能模型，构建物理实体的动态数字映射，实现设计验证革命、智能制造升级、预测性维护保障、碳足迹可视化，中国商飞在 C919 机翼设计中利用数字孪生缩短研发周期近 40%，空客利用数字孪生提升总装线产能 15%。区块链基于分布式账本、密码学等技术，实现数据不可篡改、全程可追溯，推动供应链端到端可信溯源、智能合约驱动自动化合规、质量认证与审计效率跃升、供应链金融创新，北斗三号卫星关键部件溯源系统将溯源时间从数天压缩至分钟级，罗尔斯·罗伊斯利用区块链缩短合规核查时间，大幅降低成本。

#### 四、材料循环利用

聚焦航空航天特种材料（钛合金、碳纤维复合材料、高温合金等）的全生命周期循环管理，披露回收体系建设、处理技术应用及成效量化。参考空客“10R 路径”（拒绝不可回收材料、减少浪费、回收资源、再利用、再制造等）及天津航空航天产业园区、成都天府国际生物城等循环经济园区实践，搭建“研发设计-生产制造-报废回收-再生利用-再制造”全链条材料闭环管理体系，明确各环节管理责任部门、管控流程及考核标准，例如研发设计阶段优先选用可回收、低环境影响材料，生产阶段建立材料消耗定额管理机制，减少生产废料产生；重点披露钛合金返回料、碳纤维复合材料残料、高温合金残料的回收利用细节，钛合金返回料采用“分拣-清洗-真空重熔”处理技术，再生后用于飞机结构件毛坯生产；碳纤维复合材料残料采用“机械粉碎+化学解聚”组合回收技术，再生后用于民用航空内饰件、通用航空配件生产，减少原生碳纤维材料消耗 300 余吨；高温合金残料采用“分类收集-真空感应熔炼”回收技术，再生后用于发动机叶片毛坯制造。

#### 五、环境风险应急

聚焦航空航天行业特色环境风险场景，建立全流程风险管控与应急处置体系。参考航天科技环境风险管控经验，梳理识别试飞燃料泄漏、航天危废泄漏、生产废水超标、VOCs 泄漏等 4 类重大环境风险场景，制定针对性的环境应急预案，明确应急组织架构（成立应急指挥部，下设现场处置组、监测组、后勤保障组等）、应急处置流程（预警-响应-处置-善后）、应急物资储备（如应急吸油毡、危废收集桶、废水应急处理设备、VOCs 吸附装置等）及应急响应时限；建立环境风险分级管控机制，年度开展环境风险识别与评估，形成风险清单，对重大风险实施“一风险一管控方案”，明确管控责任人、管控措施及管控频次；年度开展专项应急演练，包括试飞场地燃料泄漏处置演练、生产车间危废泄漏应急演练、废水处理系统故障应急演练等；建立环境应急监测机制，应急事件发生时，第一时间启动现场监测，明确监测指标、监测频次及数据上报流程，确保应急处置科学有效。

## 第三章 主要的智能制造技术

## 第一节 物联网技术

物联网在航空航天装备制造技术中的应用主要体现在提升生产效率、优化资源管理上。

在**提升生产效率**上，中国商飞在 C919 大飞机制造过程中，应用工业互联网技术实现了生产效率的显著提升。通过构建基于 5G+工业互联网的智能制造系统，将 200 多万个零部件实现与人、机、车间和各控制系统的广泛互联，运营成本降低 20%以上，生产周期缩短约 30%。上海联通与上飞合作将 5G 技术带入车间工厂，建立了数字化孪生建模与仿真体系，使复杂的大飞机系统工程化繁为简，大幅提升了制造精度和效率。

在**优化资源管理**上，中航成飞通过应用物联网技术和工业互联网平台，实现了对生产资源的智能化管理和调度。公司依托工业互联网数据服务和远程健康管理服务，构建了覆盖全生产流程的实时监控系统，使设备利用率提升 25%，能源消耗降低 15%，材料利用率提高 18%。通过智能化资源管理，企业有效减少了闲置资源浪费，实现了生产要素的优化配置，显著提升了资源使用效率。

物联网在航空航天装备制造中的应用已产生显著效益。《中国工业互联网发展成效评估报告》显示，装备制造行业运用数据和算法提升产品研发智能化水平，依托智能装备构建新型制造服务体系，使生产效率平均提升 20%-30%。

目前应用于航空航天装备制造技术的物联网具体类型包括以下三种。

- **工业物联网 (IIoT)**: 专注于制造环境的实时监控和自动化控制，例如在飞机发动机组装中使用 IIoT 平台整合传感器数据，实现设备间协作。中国商飞在探索基于 5G 的大飞机智能制造系统中，建设了基于 5G 的大飞机示范工厂，广泛应用工业物联网技术。该系统使 200 多万个零部件实现广泛互联，生产数据实时采集和分析，生产效率提升 30%以上，产品合格率提升至 99.8%，大幅增强了企业核心竞争力。
- **无线传感器网络 (WSN)**: 通过无线方式连接多个传感器，用于监测制造车间内的温度、振动和压力，确保装备生产环境的稳定。必创科技针对航天、航空领域开发的无线传感器网络系列产品，通过部署大量传感器节点，构成了自组织的多跳无线网络。该技术使航天器故障预警时间提前 72

小时，监测数据准确率达 99.9%，大幅提升了航天飞行的安全性和可靠性。

- **边缘计算物联网**: 将数据处理置于设备边缘端，适用于航空航天的高精度制造场景，如实时分析卫星部件的组装数据，减少延迟。哈尔滨工业大学在面向穿戴应用的边缘计算平台研究中，通过移动边缘计算环境，微服务组合与调度效率得到提升，使卫星部件组装数据能够实时处理和反馈。该技术使组装线数据传输延迟降低 80%，组装效率提升 40%，不良率降低 30%，大幅提高了卫星部件的生产质量和效率。
- **RFID 和条码物联网**: 用于零部件追踪和管理库存，在航空航天供应链中广泛应用，帮助快速定位和验证组件来源。空客公司在供应链中广泛推行 RFID 条码技术，使供应商效率和供应链透明度大幅提升。该技术使供应商数据准确率提升至 99.2%，物料配送及时率提高至 98.5%，库存水平降低 25%，供应链整体运营效率提升 30%以上。

### 一、工业物联网

工业物联网是构建智能制造体系的基础平台，重点在于实现高效连接、数据集成和数字孪生。

#### 1. 设备互联 (Equipment Interconnection)

设备互联技术依托工业协议转换与边缘计算节点部署，结合物联网、5G 等通信手段，实现对数控机床、机器人、自动化产线、AGV 及各类传感器等车间生产资源的全面连接与数据集成。该技术不仅支持设备数据的实时采集与指令下发，更通过生产状态实时监控、远程诊断与柔性制造支持，显著提升了设备综合效率 (OEE) 与整体生产效率。在航空航天制造领域，其核心价值在于打破“数据孤岛”，构建覆盖设计、加工、装配、检测全流程的数字化协同网络，为智能制造奠定数据基础。

#### 案例：航天科工集团的“航天云网”

航天科工集团打造了中国首个国家级工业互联网平台-航天云网，构建了覆盖“区域云、行业云、园区云、企业云”的工业互联网体系。该平台覆盖了航空航天等多个高精尖行业，通过深度融合 5G 技术，实现了车间生产数据的实时采集与分析，成功打通企业内外部数据流，促进跨地域、跨行业的协同制造，为航空航天配套供应链提供了高效、可靠的数字化基础。

航天云网作为国家工业互联网平台，核心围绕工业企业全产业链需求打造多元功能，还形成了多个跨

行业的典型应用场景案例。

表 2: 航天云网的核心功能

功能类别	具体内容
系统级核心应用	以“一脑一舱两室两站一淘金”为核心，涵盖企业大脑（决策支持）、企业驾驶舱（经营管理）、云端业务 / 应用工作室（交易与制造流程支持）、中小企业服务站（基础管理外包）、企业上云服务站（智能化改造支撑）、数据淘金软件（数据价值挖掘），覆盖企业决策、经营、生产等核心环节。
研发生产协同	提供云设计、云仿真、云协同等研发相关服务，搭配产线仿真建模、虚拟工厂等功能；生产端可实现数据采集、智能控制、云排产，同时通过数字孪生技术实现生产全流程的监控与优化，适配多品种小批量的柔性生产模式。
供应链与资源管理	包含供应链协作配套、供应商管理、招投标管理等采购功能，以及云集采、智慧物流等服务，能实现货源智能匹配与社会物流协同；还搭建了资源共享体系，开放物业空间、技术咨询、营销推广等资源，助力企业降低采购与物流成本。
设备与运维服务	支持设备接入、远程监控、故障诊断及预测，推出电机健康诊断、电梯智能监控、风电云服务细分服务，可提前识别设备故障，降低企业运维成本，典型如对风电企业风机的精准管控和机器人装备的快速维修。
生态与配套服务	拥有工业 APP 应用商店，提供选、试、买、用全流程服务，也为开发者提供一站式开发交易资源；同时涵盖金融信贷、融资租赁、发票云服务，以及标准检索、质量评价等知识与认证服务，还对接支付渠道提供在线收付款、对账等功能。
安全与数据服务	依托“航天天域”系列产品，构建自主可控的超融合系统，包含超级服务器、数据库等，保障数据与系统安全；具备工业大数据采集、存储、分析挖掘能力，可实现数据全生命周期管理，为企业创新与决策提供数据支撑。

航天云网典型应用场景案例包括以下几个方面。

- **航天复杂产品全生命周期管理：**该方案在航天科工集团 500 多家三级单位落地，搭建了协同共享制造平台，支撑产品研发、生产、试验、售后全生命周期业务在线开展。累计协作需求发布金额超 8000 亿元，在线成交近 3800 亿元，共享 83.1TB 知识资源和 80 余款软件，跨单位协同效率提 15%，协作半径拓展至 2000 公里。
- **数字孪生黑灯工厂：**该应用融合数字孪生、边缘云等技术，打造无人化生产加工平台。在智能排产、质量管控、设备管理、协同制造四大场景发力，适配应急批产等生产模式，帮助企业实现产

能产值提升、运营成本降低，是行业领先的无人化生产示范案例。

- **大型发电装备全产业链协同：**以 INDICS 平台为底座，开发了涵盖协同设计、协同制造、全生命周期项目管理等模块的系统。通过打通行业上下游“研发、设计、使用”核心环节，培育企业协同合作能力，形成集群式经济效益，推动发电装备行业的供应链数字化升级。
- **制糖行业特色产业集群数字化：**为广州华糖食品等企业打造平台，构建“一基五核”服务体系，包含生产管控、质量溯源、设备运维等 12 款应用系统。实现了“一图看全厂，一码查质量”的管理模式，覆盖供应链、生产、销售等多领域，为制糖企业提供一体化智能管理工具，同时挖掘业务数据价值，助力行业高质量发展。

2017 年，航天科工面向全球发布航天云网核心工业互联网平台——INDICS，这也是中国首个工业互联网平台。通过工业设备联网，INDICS 平台进行信息和数据采集，汇聚海量的工业大数据，从而形成了以“平台总体架构、工业大数据、平台与产品服务、智能制造和网络信息安全”五大板块为核心的“1+4”发展体系。2018 年，航天云网公司又发布了云制造支持系统（Cloud Manufacturing Support System，简称“CMSS”）等航天云网的核心架构，开发了更多的云服务产品，夯实了航天云网建立工业互联网体系和走向全球的基础。

在完善技术的同时，依靠航天云网提供平台与技术等全面支撑的航天科工“数字航天”战略也在稳步推进中，并取得了一系列显著成效：基于 INDICS+CMSS 平台架构，发挥“一脑一舱两室两站一淘金”的系统优势，使研发设计周期 30%~45%，生产效率提高 25%~60%，成本降低 10%~30%，用工减少 30%~60%，助力航天科工位列世界物联网 500 强企业第 20 位。

#### 案例：安徽一六八航空航天精密器件有限公司 5G+工业互联网平台

安徽一六八航空航天精密器件有限公司通过“5G+工业互联网”项目，构建了覆盖全业务流程和车间工艺流程的数字化生产制造体系。该体系通过 5G 技术链接企业人、机、物和系统，实现企业数字化管理、网络化协同和智能化制造。企业利用 5G 和云技术，构建企业级的工业互联网平台，实现数据跨应用采集、多系统数据全面采集，并通过数据分析，实现企业全局情况的实时在线管理。同时，利用 5G+云的技术，构建企业 MES 系统，从而提高生产效率，减少人工干预，保证产品安全。通过打通 ERP 系统、MES 系统、WMS 系统等系统之间的数据，消除信息孤岛，实现生产数据的集成和实时监

控，以实现降本增效，打造智慧工厂。

该平台依托 5G 特性及云技术覆盖多核心环节，功能如下。

- **多系统互联与数据打通：**平台实现 ERP、MES、WMS、电子图纸系统、能耗监管系统、视频监控系统等多系统的数据互通，搭建企业级数据中心，对工厂运营数据实时采集分析以支撑决策。此前各系统信息孤岛问题突出，该功能彻底解决了这一痛点。
- **生产全流程数字化管控：**支持订单信息实时传递处理，实现生产计划数字化排产、移动报工及工序转移、在制品管理等全流程数字化；同时覆盖原材料入厂检验到产成品出货质检的全链条数字化质量管控。
- **设备与仓储智能管理：**通过 5G 技术实时采集设备运行、加工等数据，实现设备状态实时监控与故障预警；仓储端借助平台实现仓储信息实时更新共享，还搭建线边仓管理系统细化现场物料管理，涵盖库区库位、出入库及报表统计等功能。
- **辅助管理高效化功能：**可在线下发查阅生产图纸，保障设计与生产无缝对接；依托智慧验收平台，结合生产、质检等全过程数据智能化生成验收文档，效率提升 85% 以上；定制车间看板和数据监控中心，实现生产进度、能耗等数据可视化展示。
- **生产环境智能监测：**整合视频监控系统，实现安全帽识别、火焰识别等场景的自动预警，实时监测生产环境参数，为生产安全稳定提供保障。

#### 案例：中国商飞/金航数码 面向数字孪生的建模与仿真体系

金航数码是中国航空工业集团的信息技术专业支撑机构，也是中国商飞 C919、CRJ929 等项目的数字化解决方案服务商。金航数码与中国商飞上海飞机设计研究院合作，运用工业互联网技术构建了面向数字孪生 (Digital Twin) 的建模与仿真体系。该体系将飞机设计数据和生产数据进行高效协同，通过建立飞机的数字孪生体，在设计和制造环节进行复杂的正向设计论证与仿真，从而有力保障飞机制造和运行的安全可靠，推动航空工业实现更低成本、更高质量的生产交付。

该合作构建的数字孪生建模与仿真体系，核心功能聚焦航空产品设计与制造的协同优化，具体功能如下。

- **数据协同与虚实映射：**打通飞机设计环节与生产环节的数据壁垒，实现 ERP、MES、CAD 等多系统数据的高效协同，构建与物理飞机实时对应的数字孪生体，让虚拟模型精准映射真实产品的设计参数和生产状态。这一功能解决了传统模式下设计与生产数据脱节的痛点，为后续仿真和管控提供数据支撑。
- **正向设计论证仿真：**针对大飞机这类复杂航空装备，在零部件未实际加工前，依托数字孪生体开展虚拟测试与论证。可提前排查设计缺陷，避免实体研发阶段反复修改带来的高成本和长周期问题，弥补了传统建模与仿真技术难以应对复杂装备快速创新的短板。
- **全流程过程管控支撑：**该功能可延伸至生产装配环节，通过数字孪生体跟踪部件加工状态，还能对装配动作、物料移动等进行复现与管控，同时支持资源配置的仿真优化，为减少生产线停机时间、提升生产流程稳定性提供技术支持。

#### 案例：波音/空客的设备互联实践

波音智能工厂采用了物联网 (IoT) 网络、蓝牙 (Bluetooth)、无线射频识别 (RFID) 等多元化技术架构，部署了智能标记工具和制程管理系统，实现了对工具及存货存放位置的快速清点和定位。波音还开发了标准化内容创建流程，建立了专门的 AR 内容工作室，将数千页技术文档转换为交互式 3D 指令，这些内容通过云平台同步到所有工厂和供应商处，确保全球标准统一。在 787 项目中，波音全面引入 PLM (产品生命周期管理) 系统，实现了全球 1500 家供应商的协同设计与数据共享。

空客与 National Instruments 合作开发的“未来工厂”项目，部署了智能工具系统，包括钻孔、测量、质量数据记录和拧紧四大类智能工具。这些智能工具通过视觉算法处理环境，能够自动识别当前任务并调整到适当的设置，完成操作后还能监控和记录操作结果，显著提高了生产过程的效率。空客建立的物联网平台基于 PTC 的 ThingWorx 构建，集成了 PLM/ERP/MES 软件、工人和工具，实现了数据在虚拟与现实之间的双向流动。

#### 2. 数据中台 (Data Middle Platform)

数据中台作为工业互联网的核心组件，是集成数据采集、存储、计算、治理与服务能力的统一平台，承担着多源异构数据的汇聚、治理与服务化输出功能。在航空航天制造场景中，其技术架构通常包含数据湖底座、元数据管理、数据质量监控与 API 服务网关等模块，共同构成从原始数据到业务价值的转化链条。该平台将分散的企业数据转化为可复用的数据资产，并通过统一接口提供服务。其核心作

用在于整合设计、工艺、生产、质量等全流程数据，构建统一的数据标准与资产模型，为上层的智能应用与管理决策提供高价值数据支撑，尤其在质量追溯与生产计划优化方面发挥着关键作用。

### 案例：中国商飞的两大实践

中国商飞在 C919 大型客机项目中，为破解复杂的供应链协同难题，构建了贯通上下游的数据中台体系。该体系成功对接了 200 余家核心供应商的 ERP 系统，实现了对原材料库存、生产进度与物流信息的实时汇聚与智能匹配，最终使库存周转率提升 22%，订单交付准时率高达 98.7%。

与此同时，在飞机研发的关键环节——试飞阶段，商飞同样依托数据中台理念，打造了专业化的试飞数据平台。该平台采用先进的“湖仓一体”技术架构，融合 Spark 与 Flink 实现流批一体处理，具备 PB 级试飞数据的压缩存储与秒级检索能力。通过设计多层数据模型与集成自定义函数，该平台极大地强化了数据的探查与分析能力，为试飞工程师提供了从宏观概览到微观钻取的全方位数据支撑，显著提升了研发效率。

### 案例：中国国际航空股份有限公司 (国航) 智慧民航实践

国航在智慧民航建设中引入数据中台理念，通过整合全流程运营数据，一方面实现客票、行李等服务的数字化升级及数据资产转化，另一方面打造了飞机空中监控核心功能。该功能能够对飞机的实时状态进行监控、预警，并基于数据分析提供智能化应对方案。这种将分散的运营数据集中并用于辅助经营决策的模式，为航空装备制造中实现全业务链数据资产化提供了可借鉴的模式。

航天科工集团的数据中台已应用于卫星、试车台等场景。例如，航天科技集团六院的火箭发动机试车台数据中台，通过全流程数字模型的协同设计，实现了试验数据的实时采集与分析，为发动机性能优化提供了数据支撑。同时，航天科工集团的数据中台还支持供应链协同，通过整合供应商数据，实现了从原材料采购到总装的全流程数据贯通与质量控制。

## 二、传感器技术

用于航空领域的传感器称之为航空传感器，主要用于感测和监测航空器周围的环境变化，确保航空器在飞行过程中的稳定性和安全性。

航空航天装备制造领域，传感器技术作为物联网的核心组成部分，通过实时感知、测量和传输数据，实现了制造过程的智能化转型。其主要作用体现在以下方面。

- 传感器应用于装备生产设施实现预测性维护。ST-Microelectronics 公司应用 MEMS 加速度计传感器实时监测刀具磨损情况，从原先的被动定期检查转变为主动实时监测，实现了预测性维护。该技术使得刀具突发失效事件减少 90%以上，使得刀具使用寿命延长 15-25%；设备停机时间减少 70%，降低了维护成本和工件报废率；整体生产效率提升 20%，增强了在高端制造领域的市场竞争力。
- 传感器通过密集信息采集，优化工艺参数。GE 航空采用光纤应变传感网络构建发动机叶片应力分布云图，实现了从静态、离散的应力测量到动态、连续的应力场监测的转变。该项技术使得 GE 航空实现了发动机叶片轻量化设计使叶片生产材料成本降低 12%，叶片结构重量减轻 10-15%，同时保持了叶片结构完整性并提高了叶片强度；叶片应力识别精度相较往常提高了 40%，使得发动机运行效率有效提升，有效预防疲劳失效且燃油消耗率下降约 2%。
- 传感器应用于生产过程，提升生产精度与质量。Airbus (空客) 工厂部署 3000+个无线温振复合传感器建立数字孪生体，实现了动态、实时的制造过程控制，有效提升了装备制造质量。该技术应用后，实时发现并纠正制造偏差，使得结构件一次交验合格率提升至 99.5%，远高于行业平均水平；对制造过程参数的精确控制让材料浪费减少 18%，制造缺陷率降低 35%，使得返工和报废成本大幅下降。质量问题追溯时间从原来的数小时缩短至几分钟，问题定位效率大幅提高，装备生产效率得到显著提升。

### 案例：中国商飞 C919 总装工厂

在中国商飞 C919 总装工厂，超高精度 MEMS 倾角传感器和液压式静力水准仪的应用，实现了装配平台沉降与倾斜的实时监测，将型架校准时间从 1-2 天大幅缩短至数小时，使装配精度达到波音同级水平，为大飞机制造的高效精准提供了保障。航天科技集团八院 802 所在柔性调测生产线部署 298 台设备物联网节点，集成温度、压力、位移等 20 类传感器，达成单板、组合件全链路测试数据的毫秒级采集，为生产线的精准调控奠定了数据基础。

### 三、柔性计算

柔性计算技术是指一种高度适应性和可扩展的计算模式，该技术对航空航天装备生产起到了积极的作用。柔性计算中较为典型的三种计算方式，也在装备生产的领域中持续发光发热。

- 边缘计算 (Edge Computing) -实时监控与优化。空客公司在生产 A350 飞机复合材料结构时，采用了边缘计算技术对部件固化过程进行实时监控和优化。通过在生产线上部署边缘计算节点，系统实现了对温度、压力和固化度等关键参数的毫秒级监测和分析，使复合材料固化缺陷率降低 35%，生产周期缩短 20%。同时，边缘计算节点与自动化制造系统无缝集成，实现了生产过程的自适应调整，大幅提升了飞机结构的质量一致性和生产效率，实现了航空航天装备制造的高精度和高质量生产。
- 雾计算 (Fog Computing) -流程优化、同步处理。波音公司在 787 梦想飞机的线束安装工序中应用雾计算技术进行生产流程优化。通过在工厂车间部署雾计算层，系统实现了对生产线海量传感数据的实时处理和分析，使线束安装效率提升 25%，错误率降低 50%。雾计算架构将数据分析算法前置到现场"智能网关"设备，实时完成生产数据的清洗和分析，只将关键结果传送到云端，大幅降低了网络带宽需求。同时，该技术实现了对不同工序数据的同步处理，使得整个装配线的资源利用率提升 30%，实现了航空航天装备制造的高效协同和智能化生产。
- 云边端协同计算 (Cloud-Edge-End Collaboration) -多领域协同。中国商飞公司在 C919 大型客机的生产制造中应用云边端协同计算技术进行供应链管理和生产协同。通过构建覆盖云、边、端多层次的智能云制造系统，实现了从供应商到生产全流程的数据互通和实时协同。边缘侧负责现场数据采集和实时处理，云端进行大数据分析和决策优化，端侧执行智能控制指令。该技术使飞机零部件管理效率提升 30%，供应链响应时间缩短 40%，生产数据实时共享率提升至 95%。特别是在关键部件装配过程中，云边端协同计算实现了跨车间的智能调度和动态优化，大幅提升了生产效率和产品质量，实现了航空航天装备制造的数字化、网络化和智能化转型。

柔性计算在航空航天装备制造领域的应用，主要体现在如下两个方面。

- 智能动态超分：精细化管理的“加速引擎”。中航工业集团在飞机制造过程中应用智能动态超分

技术之后，其生产资源需求的预测精度相比之前提高 35%。通过 AI 算法实时预测生产资源需求，动态调整 CPU 超分比，使服务器性能提升 25%，整体资源利用率相较以往提升 40%。该技术实现了对生产资源的精细化管理，使得相应资源采购成本比以往降低 28%。特别是在复杂的航空零部件加工过程中，智能动态超分技术确保了计算资源的合理分配，避免了资源瓶颈，大幅提升了生产效率和设备利用率，为航空航天装备制造提供了强有力的技术支撑。

- 柔性内存管理：航天科工集团在航天器部件生产中应用柔性内存管理技术之后，原有内存中的回收困难和占用率高问题，通过该技术生成了内存精细化画像，并借此部署了智能回收机制，实现了安全的内存超分且内存回收效率提升 45%，避免了内存成为资源利用率的瓶颈。在航天器复杂部件的计算和分析过程中，柔性内存管理技术确保了系统的稳定性和高效性，资源利用率相较内存未能有效回收情形下提高 50%，进而使得整个装备生产环节的计算效率显著提升，缩短了产品研发周期，提高了航天器的生产质量和可靠性。

#### 案例：中国航天科技集团五院高分专项卫星地面站

在中国航天科技集团五院高分专项卫星地面站，边缘计算集群的部署对光学遥感图像进行在轨预处理，压缩比达 1:20，将单景 2GB 图像的传输时间从 15 分钟缩短至 40 秒，极大提升了灾害应急响应效率，为灾害监测与救援提供了快速精准的数据支持。海南商业航天发射场采用边缘计算节点，对长八甲火箭发射塔架的温湿度、振动、应力等参数进行实时分析，并结合数字孪生模型预测设备疲劳寿命，使发射前检测时间减少 40%，为火箭发射的安全高效推进提供了有力保障。

### 第二节 自动化与机器人

#### 一、工业机器人

工业机器人是一种自动控制的、可重复编程的多用途操作机，用于工业自动化领域。它能够通过编程实现精确的动作控制，适用于装配、焊接、搬运等场景。

工业机器人技术在航空航天装备制造中发挥关键作用，能够处理高精度、大型部件的加工和装配任务，给该行业的生产带来了显著的影响和改变。

- 生产转向自动化，提升制造精度和效率。在航空航天领域，机器人通过实时采集生产数据，如温

度、振动和位置信息，通过云平台分析优化路径，避免误差。这意味着机器人可以精确执行飞机翼梁的钻孔或卫星部件的焊接，减少人为干预。

空客公司在生产 A350 XWB 宽体客机的机翼时，运用六轴工业机器人技术对机翼长桁自动钻铆工序进行自动化改造，采用了基于柔性导轨的制孔系统，替代了传统的人工钻孔和铆接工艺。这一改进使得机翼长桁的装配精度显著提升，铆接位置偏差控制在±0.1mm 范围内，相比未采用机器人技术时，装备制造效率提升了约 35%，产品精度改善情况明显，长桁装配一次合格率从 92% 提升至 99.5%；波音公司在 787 梦想客机的机身段装配中，应用工业机器人技术对机身蒙皮对接缝进行自动化打磨和喷涂处理。通过采用高精度工业机器人和柔性工装系统，取代了传统的人工打磨和喷涂工艺，使得机身段的生产周期缩短了 40%，材料利用率提高了 25%；同时表面处理质量的一致性显著提高，减少了返工和报废发生的情况，综合来看，生产效率相比之前提升了约 30%。

- 推动柔性生产，打造智能工厂。机器人技术的应用，使得航空航天装备制造的生产实现从传统刚性生产线向智能工厂转型。中航成飞民机公司应用机器人技术，将歼-10 战斗机关键零部件的生产线从原有的刚性生产逐步转型成为由机器人主导的智能工厂。通过引入工业机器人、数控机床和自动引导车(AGV)等设备，构建了柔性制造系统，使得生产线能够快速适应不同型号和规格的零部件加工需求。相比于刚性生产的传统生产线，实现了多品种、小批量的柔性生产转变，使得生产线调度响应速度提升了 60%，在制品库存降低了 35%，生产周期缩短了 25%，同时生产线安全事故率降低了 40%。

中国商飞在 C919 大飞机的批生产过程中，通过应用工业机器人和数字化制造技术，将机翼、机身等大型部件的生产线改造为智能化、柔性化的生产线。新的生产线采用工业机器人、自动钻铆机和数字化测量系统，实现了从单一产品刚性生产向多品种柔性生产的转变，使得生产线能够同时适应 C919、ARJ21 等多种机型零部件的生产需求，生产管理效率提升了 50%，生产指令下达到执行的时间缩短了 70%，生产线协调性显著提高。

目前工业机器人的领军企业可以分为欧美系、日韩系和国产品牌“三足鼎立”的格局，其中各个不同企业的技术都有相应的差异，如中国的拓斯达、新松等品牌已经率先在垂直坐标机器人领域开辟了新的方向；而欧美系企业则是突出生产范围较为全面的总综合竞争力优势。

工业机器人领军企业包括欧美系的库卡 (Kuka)、ABB、史陶比尔 (STAUBLI)、优傲 (UR，协作机器人优势)；日韩系的发那科 (Fanuc)、安川 (Yaskawa)、爱普生 (Epson，SCARA 优势)、雅马哈 (Yamaha)、川崎、那智不二越 (Nachi)；我国的头部企业埃斯顿 (ESTUN)、汇川技术 (Inovance)、拓斯达 (Topstar)、埃夫特 (EFORT)、新时达 (Step)、节卡 (Jaka)、新松 (Siasun) 等。

## 二、柔性生产线

柔性生产线通过软件编程实现生产流程的动态调整，支持小批量、多品种生产。柔性生产线核心在于通过模块化设计、自动化设备和智能控制系统，使生产线具备高度的适应性和效率。涉及到柔性生产线的典型技术及具体应用如下。

- 数字化柔性铆接装配技术。结合机器人臂和视觉系统，实现火箭或飞机部件的自动铆接，提高装配效率和质量。上海飞机制造有限公司在 C919 大型客机机身段装配过程中，运用数字化柔性铆接装配技术，实现了自动化铆接效率提升 50%，产品精度提高 30%，故障反应时间减少 40%。该技术结合机器人臂和视觉系统，完成了机身段万余个铆接点的自动化作业，显著提升了装配效率和质量稳定性，使 C919 机身装配周期缩短了 25%。
- 镜像铣技术。使用双五轴镜像铣机床加工大型柔性曲面零件，适用于航空航天高端装备的精密制造。中航沈飞在歼-20 战斗机机翼蒙皮加工中采用五轴联动加工中心结合镜像铣削技术，针对钛合金和铝锂合金材料的复杂曲面加工。通过优化加工参数和刀具路径，实现了曲面拟合精度±0.15mm 的高精度加工，使装配周期缩短 30%，零件一致性提升 40%。  
航天科技集团在长征火箭发动机箱体制造中，采用镜像铣削与充液拉深、热处理等工艺相结合连续工艺链，优化了不同工艺参数下的残余应力分布规律，使疲劳寿命提升 25%。
- 增材制造 (3D 打印) 技术。作为柔性生产的基础，支持分布式协同研制，快速生产航空航天高端产品。中国商飞在 C919 飞机设计中运用增材制造技术，首次应用 SLM (激光选区熔化) 工艺制备中央翼缘条这一关键承力部件，实现了复杂结构件的一体化生产，使零件数量减少 80%，重量降低 30%，生产周期缩短 40%。

国外柔性生产线技术起步较早，已高度成熟，主要应用于汽车、电子和航空航天等领域。该技术在航空航天装备制造领域的应用中体现了下述两个特征。

- 柔性生产线+柔性制造系统共同应用。中航成飞作为歼-20 唯一制造商，亟需扩大柔性产能、加快智能化产线建设、推进第六代空天平台关键技术攻关。公司通过构建柔性可重构信息管理与执行系统，整合了设计、制造、装配全流程数据，实现了生产任务规划优化和资源调度效率提升 35%，设备利用率提高 28%，生产线转换时间减少 45%。该系统集成的数据分析功能，使企业能够快速响应型号研制需求变化，显著提升了生产柔性和响应速度。
- 聚焦于全数字化孪生验证和模块化设备。航天科技集团在火箭发动机箱体薄壁件制造中，采用数字孪生技术驱动镜像铣削工艺，建立了数字孪生驱动的制造模型。通过实时监测和调整加工参数，实现了设备数据精度提高 40%，并在零件制造阶段发现并解决了潜在的设计问题，使后期变更成本减少 20%，生产效率提升 25%。航天科技一院完成 5 米级直径整体镜像铣削产品生产，从 3.35 米到 5 米，实现了大直径贮箱产品制造工艺从高污染低精度化铣拼焊到高精度高效绿色镜像铣生产的全新超越，整体镜像铣削加工技术优势更加凸显。

通过采用数字孪生验证和模块化设备，航天科技集团在火箭发动机箱体制造中实现了从设计到制造的全流程数字化管理，显著提升了生产柔性和响应速度，为我国航天装备制造能力的提升提供了有力支撑。

### 三、人工智能

AI 技术通过深度学习和机器学习等算法，正推动航空航天制造从自动化迈向真正的智能化，解决高复杂度、高精度和高可靠性的核心挑战。

#### 机器视觉与高精度检测

机器视觉通过计算机对图像或视频数据进行处理、分析与理解，实现对物体或环境的检测、测量与识别。在航空航天制造这一对质量与精度要求极高的领域，该技术已成为实现高精度质量控制和自动化装配的关键支撑，其应用已从早期的二维有无检测，升级至三维尺寸测量与复杂曲面缺陷识别。通过大幅降低人工检测误差，提升缺陷识别与尺寸检测的效率与精度，机器视觉有力保障了航空产品的固有可靠性。

在中国商飞 C919 项目中，通过激光扫描实现每秒 500 万点的三维点云采集，并结合深度学习算法，

达到亚毫米级 (0.02mm/m) 检测精度，将传统需 3 天的部件检测周期大幅缩短至 4 小时。其技术优势集中体现于三个方面：非接触测量避免零部件损伤；全视野扫描摆脱抽样局限；数字化检测结果可直接反馈至加工系统，实现参数自动补偿，形成质量闭环。

厦门大学航空航天学院空天智能控制研究中心开发的 AI 模型“天工眼”，能够自主识别结构关键重要部位、自主发现典型损伤、自主追踪损伤扩展，具备与资深工程师同等的检测能力，且具有更优异的持续监测可靠性。该模型在五类场景进行验证（含复杂叶片、服役/拆解的航空发动机部件、工业材料表面），针对航发孔探测试，利用两阶段自适应知识蒸馏使置信度中位数提升，在 BoreAero 验证集对关键缺陷实现近完美检测，误报率保持低位。

GE 航空与 Waygate Technologies 的合作代表了机器视觉技术的最新进展。双方专注于使用 AI 增强基于机器视觉的辅助缺陷识别 (ADR) 系统，特别针对高压压气机 (HPC) 检查，这是最重要和最耗时的维护、维修和大修 (MRO) 任务之一。GE 航空部署的 AI 驱动检测工具能够指导技术人员选择要审查的图像，提供更高的一致性以更快发现问题，同时将检查时间缩短一半。

#### 预测性维护 (Predictive Maintenance, PdM)

预测性维护技术通过物联网传感器持续采集设备运行数据（如振动、温度等），并利用机器学习算法构建设备健康预测模型，精准预警故障并预测剩余寿命，从根本上改变了航空航天领域的传统运维模式。该技术主要针对数控机床、复合材料铺层机等关键且昂贵设备，通过提前识别潜在故障点，有效避免计划外停机、优化维修资源配置，成为保障生产连续性与产品质量稳定的关键手段。

在具体应用中，该技术已覆盖从制造装备到航空发动机的全链条健康管理。例如，中国商飞在其“5G 全连接工厂”中部署了基于 5G 低时延网络（端到端 < 10ms）的预测性维护系统，通过分析主轴电流谐波特征，可提前 48 小时预警轴承磨损，使设备综合效率 (OEE) 提升至 89%，较传统模式提高 24 个百分点。而在航空发动机这一核心装备上，中国航发等企业则构建了专业的故障预测与健康管理系统，对叶片、轴承等关键部件在试车与服役过程中的运行数据进行分析，建立故障预测模型，提前识别潜在磨损或性能衰退趋势，从而指导预防性维修，有力保障飞行安全。

在飞机整机制造领域，波音公司通过机器学习算法对飞机发动机进行预测性维护，利用传感器数据预测发动机何时需要维护，减少了不必要的维修和停机时间，提升了飞机的运营效率和安全性。波音开

发的 AI 驱动预测性维护系统，能够监控传感器数据，检测异常模式并预测潜在故障。

在航空发动机制造领域，现代预测性维护系统通过多维度传感网络 and 智能分析算法，实现了实时健康状况评估、早期故障预警、剩余寿命预测。基于深度学习的 EGTM 基线预测模型，通过引入迁移学习理论，成功实现对水洗或大修后 EGTM 的精准预测，在跨机型 EGTM 预测验证中，精度达 90% 以上。

普惠公司的 FAST™（飞行数据分析系统）代表了预测性维护技术的先进水平。FAST™ 解决方案能够捕获全飞行发动机和飞机数据，在发动机关闭后 15 分钟内将分析结果发送到航空公司的飞行运营中心。普惠的数字发动机服务团队每天审查通过 FAST™ 解决方案捕获和分析的任何维护事件，对于任何被认为紧急的事件，普惠会通过电话提醒客户下一步需要采取的措施，并提供完全准备好的物流计划。

### 智能决策 (Intelligent Decision-Making)

智能决策技术通过将领域专家经验编码为算法模型，并运用 AI 与优化理论，在多目标、多约束的复杂制造环境中自动生成全局最优的生产方案。它主要应用于解决生产排程、资源调度、机器人路径规划等核心业务问题。在航空航天制造领域，该技术通过优化复杂总装的排产与资源分配、实现供应链高效协同，并指导机器人系统完成高精度、柔性化的自主装配，已成为提升整体运营效率的核心抓手。据 Wind 数据预测，至 2025 年，该技术在航空航天领域的系统渗透率将达 45%，标志着其从试点应用步入规模化部署的新阶段。

中国商飞构建了完整的智能决策支持体系。航空器制造智能决策系统基于大数据分析技术，实现制造过程参数的动态监测与异常检测，通过机器学习模型预测潜在缺陷，提升决策精准度。系统引入知识图谱技术整合多领域知识，形成制造知识库，为复杂决策提供逻辑推理支撑，降低不确定性风险。同时集成边缘计算技术，在制造单元本地执行实时决策，减少云端延迟，适应高速生产场景。

新兴科技公司在智能决策领域也做出了重要贡献。Avathon 公司推出的航空航天运营自主化平台，是一套统一的 AI 与知识平台，通过贯通制造、供应链及维护数据，推动航空航天全生命周期的协同决策。该平台通过整合生产质量、物料清单 (BOM)、供应商寻源、零部件可用性及劳动力产能等关键信息，实现制造与物流决策与在役维护及维修操作的同步，减少飞机停场 (AOG) 事件，提高吞吐量与质量，并强化机队就绪能力。

### 第三节 数字孪生

数字孪生技术通过物理机理建模、数据驱动优化与实时动态同步，构建“物理实体-虚拟镜像-数据链路”的闭环体系，其核心应用集中于虚拟仿真与全生命周期建模两大维度。

#### 虚拟仿真：优化制造工艺与质量控制

虚拟仿真技术基于多物理场耦合建模与并行计算架构，在装备研发试制阶段实现工艺预演、误差预判与参数优化，大幅降低试错成本、缩短研发周期。

核心技术逻辑是整合几何模型、材料属性、加工参数等多源数据，通过有限元分析 (FEA)、计算流体力学 (CFD) 等混合建模方法，结合自适应数据清洗算法降低传感器噪声，实现制造过程的高精度仿真。

空客 A350 机匣制造中，采用并行计算架构将 CPU 核心数扩展至 128 核，使仿真时间从 72 小时压缩至 4.8 小时，计算效率提升 17 倍；波音 787 机翼制造通过数字孪生虚拟仿真，开发基于应变能优化的铺层算法，将材料利用率从 78% 提升至 93%，试错成本从 2.3 亿美元降至 480 万美元。在歼-20 航电箱体制造中，部署包含 3200 个传感器的物联网系统，通过虚拟仿真实现加工误差 0.3 秒预警，误报率从传统方法的 12% 降至 0.8%，关键尺寸 CPK 值达到六西格玛标准。

#### 全生命周期建模：实现装备全流程数字化管理

全生命周期建模覆盖装备设计、制造、运维、升级的完整流程，通过构建动态更新的虚拟孪生体，实现全流程数据贯通与健康状态实时监控。

核心技术逻辑是基于物理机理方程构建部件级高精度模型，结合岭回归、LSTM 神经网络等算法进行数据驱动偏差学习，通过边缘计算与云计算协同架构，平衡模型精度与实时性需求。

美国空军将数字孪生技术纳入 F-35 战机维护体系，通过全生命周期建模提前数百小时预测潜在故障，使非计划停机时间减少 35% 以上，装备可用性提升 15-20%；中国航空工业集团在珠海航展展示的战机健康管理系统，基于全生命周期数字孪生实现故障预警准确率超 90%，维修成本降低 20-30%。商飞 C919 起落架制造中，数字孪生全生命周期模型将试制次数从 47 次压缩至 9 次，验证周期缩短 68%，避免了 3 次重大试车事故。

### 案例：空客的数据中台建设

空客于 2019 年开始使用数字孪生技术，与达索系统签署了五年期协议，使用其 3DEXperience 平台创建飞机、维护系统和生产流程的虚拟副本。空客将飞机设计、生产、运营和维护信息上传到云数据库，创建“动态、活的虚拟副本”，提供对真实世界对应物的连续实时反映。空客还使用 SAP 的数字孪生平台，将数字孪生技术部署到从商用飞机到直升机再到国防和航天的所有部门。在 A320 系列飞机生产中，空客收集“主”模型的 3D 数据以发现质量问题，并使用建模和模拟产品流程将前 A380 装配厂改造为最终装配线。

### 第四节 区块链

区块链技术通过分布式账本、非对称加密、智能合约等核心机制，解决航空航天供应链多主体协同中的信任问题，其核心应用体现为供应链溯源与数据可信共享。

#### 供应链溯源：保障零部件质量可追溯

航空航天装备供应链涉及全球数千家供应商，零部件种类达十万级，区块链的不可篡改特性实现从原材料到整机的全链路追溯，大幅提升质量管控效率。

核心技术逻辑是为原材料、零部件分配唯一数字标识，构建三级追溯链，通过区块链节点记录采购、加工、检测、运输等全流程数据，结合 RFID 标签与星间链路技术实现物资实时定位。

某国际航天制造企业通过区块链供应链平台，对钛合金、特种陶瓷等 2000 余种原材料建立追溯档案，使航空发动机故障定位时间从 72 小时缩短至 8 分钟；某卫星制造企业为零部件生成包含 200 余项行业检测标准的数字护照，自动触发检验报告与纠正措施，产品一次交检合格率提升至 99.3%。该技术在火箭推进剂供应链中的应用，实现物资米级定位精度，定位响应时间小于 500ms。

#### 数据可信共享：提升跨主体协同效率

航空航天装备制造涉及设计单位、制造商、供应商、运维机构等多主体，区块链打破信息孤岛，实现跨部门、跨企业的安全可信数据共享。

核心技术逻辑是采用去中心化架构与访问控制机制，通过智能合约预设数据共享规则，确保数据在采集、传输、存储过程中的安全性与可追溯性，降低数据传递错误率。

某航天科技集团通过区块链数据共享平台，整合设计、制造、运维等跨部门数据，使数据传递错误率降低 78%；数商云为某商业航天企业打造的 S2B2B 区块链协同平台，整合全球 2000 余家供应商资源，通过可信数据共享优化订单履约流程，使火箭总装周期从 18 个月缩短至 10 个月，库存周转率提升 40%。在国际合作的卫星制造项目中，区块链技术实现不同国家企业间的设计数据安全共享，避免了传统模式下的数据泄露风险与信任壁垒。

## 第四章 航空航天装备的智能制造

## 第一节 大型客机

大型客机制造作为高端装备制造业的核心领域，其技术复杂度、安全标准与产业链长度均居工业制造之首。智能制造技术通过融合数字孪生、人工智能、机器人自动化等前沿技术，正在重构大型客机从设计、生产到装配的全流程模式。

传统制造模式面临研发周期长、生产精度要求高、供应链协同难度大等痛点，例如某传统机型的机翼装配需依赖人工反复校准，单架机装配周期超过 6 个月，缺陷率高达 8%-10%。随着新一代信息技术与制造业的深度融合，智能制造成为破解上述难题的核心路径。国际航空运输协会 (IATA) 数据显示，采用智能制造技术的客机机型，其生产效率平均提升 35%，全生命周期运维成本降低 20%以上。中国商飞 C919、波音 787、空客 A350 等新一代客机均将智能制造作为核心战略，通过数字化、智能化技术实现了制造模式的革命性突破。

### 一、数字化设计：智能制造的源头支撑

数字化设计是大型客机智能制造的起点，通过构建虚拟数字化模型，实现从概念设计到工艺规划的全流程仿真优化，核心技术包括数字孪生建模、协同设计平台与 AI 辅助优化。

#### 数字孪生驱动的虚拟建模与仿真

数字孪生技术通过构建“物理实体-虚拟模型-数据链路”的闭环系统，实现客机设计的可视化、可仿真、可预测。

空客 A350 的机翼设计采用数字孪生技术，在虚拟模型中集成了碳纤维复合材料的疲劳特性、气动载荷分布等 10 万+参数，通过多物理场仿真模拟机翼在极端气候下的变形量。相比传统物理样机测试，虚拟仿真将机翼设计迭代周期从 18 个月缩短至 8 个月，测试成本降低 60%<sup>[1]</sup>。波音 787 则通过数字孪生系统提前识别出机身蒙皮与桁条的装配干涉问题，避免了后续生产阶段的重大返工。

#### 跨地域协同设计平台

大型客机研发涉及全球数百个供应商，协同设计平台通过统一的数据标准与云架构，实现跨企业、跨地域的实时协作。其典型架构包括 PLM (产品生命周期管理) 核心模块、云存储与计算节点、权限管理系统及多终端接入接口。

中国商飞 C919 项目构建了基于 3D Experience 平台的协同设计系统，连接上海、西安、成都等 10 余个研发基地及 200 余家供应商。设计团队通过平台实现三维模型的实时批注、版本管理与工艺协同，取消了传统的纸质图纸传递环节，使设计变更响应时间从 72 小时缩短至 4 小时，EBOM 数据准确率提升至 99.8%。波音 787 项目则通过全球协同环境 (GCE) 实现了 135 个工作地点的同步设计，大幅降低了跨地域协作的沟通成本。

#### AI 辅助设计优化

人工智能技术通过深度学习算法，实现客机关键结构的自动化优化设计。以机翼拓扑优化为例，AI 系统可基于气动性能要求 (如升阻比、燃油效率)，在给定材料约束下生成最优结构方案。

空客公司采用 AI 设计系统对 A320neo 的机翼结构进行优化，系统在 72 小时内生成 2000 种候选拓扑结构，通过气动仿真筛选出 3 种最优方案。最终优化后的机翼重量减轻 5%，燃油效率提升 3.2%。PhysicsX 公司开发的 Ai.rplane 系统可自动预测机翼的升力、阻力及结构应力，将传统设计流程从 3 个月缩短至 1 周。

### 二、智能生产制造：精度与效率的双重突破

智能生产制造阶段聚焦零部件加工与质量控制，通过 AI 质检、机器人自动化、智能供应链等技术，实现“高精度加工、零缺陷生产、全流程协同”，核心环节包括精密加工自动化、AI 视觉质检与智能物流调度。

#### 机器人自动化精密加工

大型客机零部件 (如发动机叶片、机身蒙皮) 对加工精度要求极高 (公差±0.005mm)，机器人自动化系统通过多轴联动控制与视觉引导技术，实现复杂零部件的高效加工。典型的机器人加工工作站包括六轴工业机器人、高精度主轴单元、3D 视觉定位模块、力反馈传感器及安全防护系统。

波音 787 的发动机叶片采用机器人自动化加工，通过 KR 1000 titan 机器人搭载力反馈传感器，实时调整铣削力度，避免叶片材料 (钛合金) 产生应力变形。相比人工加工，机器人加工效率提升 3 倍，尺寸精度合格率从 92%提升至 99.7%。中国商飞 C919 的机身蒙皮钻孔采用四台机器人协同作业，完成 6 万余个紧固件的钻孔与安装，缺陷率控制在 0.5%以下。

### AI 视觉质检系统

航空零部件的缺陷检测（如裂纹、气孔、腐蚀）对安全性至关重要，AI 视觉质检系统通过深度学习算法分析工业影像，实现缺陷的精准识别与分类。其工作流程包括图像采集（高分辨率相机+光源系统）、预处理（去噪、增强）、特征提取（CNN 卷积神经网络）、缺陷判定与标注。

通用电气（GE）航空航天采用 AI 质检系统检测发动机涡轮叶片，通过分析 X 射线影像识别微小裂纹（最小可检测 0.1mm 裂纹）。该系统检测速度达 120 片/小时，准确率 99.2%，相比人工检测效率提升 10 倍，漏检率从 3%降至 0.1%。中国航空工业集团的 AI 质检系统通过文本-图像生成技术扩充缺陷样本库，解决了稀有缺陷检测难题，使机身复材部件的缺陷识别率提升至 99.5%。

### 智能供应链与物流调度

大型客机生产涉及百万级零部件，智能供应链系统通过物联网与大数据分析，实现零部件的精准配送与库存优化。其核心架构包括供应商管理模块、库存监控系统、AGV 调度平台、MES（制造执行系统）接口及风险预警模块。

成飞公司构建基于大数据的供应链协同系统，通过物联网传感器实时监控零部件库存状态，AI 算法预测物料需求并自动触发采购订单。该系统使库存周转效率提升 60%，零部件缺料停机时间减少 40%。洪都公司采用“集中仓储+AGV 配送”模式，通过 MES 系统调度 AGV 机器人将零部件精准输送至装配工位，出库时间压缩为原来的 1/2。

## 三、精准装配：人机协同与虚实融合的创新应用

客机装配是最复杂的制造环节，涉及数千个零部件的精准对接，核心技术包括自动化装配线、协作机器人与人机协同、AR/VR 辅助装配，目标是提升装配精度、缩短周期并降低人工劳动强度。

### 自动化装配线与柔性工装

自动化装配线通过模块化设计与柔性工装，实现不同机型的快速切换与高精度装配。以机身段装配为例，典型的自动化装配线包括柔性定位平台、机器人铆接系统、激光跟踪测量仪及 MES 数据交互模块。空客汉堡工厂的 A320 机身装配线采用自动化铆接系统，三台 KUKA 机器人协同完成机身蒙皮与桁条的铆接，激光跟踪仪实时校准位置精度（±0.01mm）。该装配线使单架机装配周期从 14 天缩短至 7 天，铆接缺陷率从 2.3%降至 0.8%[13]。中国商飞 C919 的机翼装配线采用柔性工装，可兼容不同规格的机翼部件，换型时间从 8 小时缩短至 1.5 小时。

### 协作机器人与人机协同装配

协作机器人（Cobots）通过力控与安全监控技术，实现与人的近距离协同作业，适用于精密零部件装配（如发动机叶片、航空电子设备）。典型的人机协同装配场景（Fig.8）中，协作机器人负责重复性定位与紧固，人类工人负责复杂决策与质量检查。

中国商飞 C929 发动机装配线采用艾利特 CS815 协作机器人，通过 9 轴联动控制实现涡轮叶片的精准装配，力控灵敏度达 0.1N，避免叶片损伤。该协作系统使高压压气机装配效率提升 320%，装配精度达 ±0.005mm。波音 777 的航空电子设备装配采用人机协同模式，协作机器人负责线缆整理与固定，工人专注于模块调试，装配时间缩短 40%。

### AR/VR 辅助装配技术

增强现实（AR）与虚拟现实（VR）技术通过虚实融合，为装配工人提供直观的操作指引与培训支持。AR 辅助装配系统由智能眼镜、定位模块、云端数据库组成，可将三维装配指引、零部件位置信息叠加在真实环境中。

洛克希德·马丁公司在 F-35 战机装配中采用 AR 技术，工人通过智能眼镜查看机身管线的装配路径，使管线装配错误率降低 75%，周期缩短 30%。中国直升机工业集团的副油箱装配采用 AR+AI 引导技术，200 余个精密零件的装配效率提升 40%，实现零返工。VR 技术则用于装配工人培训，通过虚拟仿真环境模拟复杂装配流程，培训成本降低 50%，培训周期缩短 60%。

## 四、全生命周期管控：智能制造的闭环延伸

大型客机的智能制造不仅覆盖生产阶段，更延伸至运维服务环节，通过数字孪生与预测性维护技术，实现“制造-运维-升级”的全生命周期闭环管控。其核心架构包括：生产数据采集模块、运维数据监控平台、预测性维护算法模型及升级方案生成模块。

空客公司为 A350 构建全生命周期数字孪生系统，每架飞机配备 2PB 的虚拟模型，实时同步飞行中的发动机参数、结构应力、油耗等数据。AI 算法通过分析历史数据预测零部件寿命，例如提前 30 天预警发动机涡轮叶片的磨损风险，使非计划维修次数减少 40%[20]。波音 787 的预测性维护系统通过分析飞行数据，优化发动机维护周期，降低运维成本 25%[21]。中国商飞 C919 的运维平台集成了生产阶段的装配数据与飞行阶段的传感器数据，实现机身结构健康状态的实时监控。

## 五、波音、空客与中国商飞的智能制造对比

表 1: 大型客机的智能制造对比

企业	核心技术特色	应用成效	代表机型	核心技术特色	应用成效
波音公司	数字孪生+全球协同设计+机器人自动化	研发周期缩短 40%，装配效率提升 50%	波音 787	数字孪生+全球协同设计+机器人自动化	研发周期缩短 40%，装配效率提升 50%
空客公司	AI 设计优化+自动化装配线+全生命周期管控	缺陷率降低 60%，运维成本降低 25%	空客 A350	AI 设计优化+自动化装配线+全生命周期管控	缺陷率降低 60%，运维成本降低 25%
中国商飞	5G+工业互联网+人机协同装配	设计变更响应时间缩短 94%，产能提升 3 倍	C919	5G+工业互联网+人机协同装配	设计变更响应时间缩短 94%，产能提升 3 倍

波音 787 通过“机身自动正立建造”工艺，四台机器人协同完成钻孔与铆接，中机身装配缺陷率从 7% 降至 2%；空客 A350 利用 AI 材料基因组平台优化碳纤维蒙皮配方，疲劳寿命突破 23 万次循环；中国商飞 C919 的智能工厂通过 5G+时间敏感网络，实现感知、传输、控制的一体化协同，生产效率提升 3 倍。

大型客机智能制造的关键环节呈现“设计数字化、生产自动化、装配精准化、运维智能化”的核心特征，数字孪生、AI 质检、协作机器人、AR/VR 等技术的融合应用，从根本上解决了传统制造模式的效率低、精度差、周期长等痛点。通过波音 787、空客 A350、C919 等案例可见，智能制造技术不仅能显著提升生产效率与产品质量，更能增强企业的核心竞争力。

### 第二节 运载火箭、航天器

#### 一、运载火箭的发展历史

运载火箭 (rocket launcher) 指的是将人们制造的各种将航天器推向太空的载具。运载火箭一般为 2—4 级，用于把人造地球卫星、载人飞船、航天站或行星际探测器等送入预定轨道。末级有仪器舱，内装制导与控制系统、遥测系统和发射场安全系统。有效载荷装在仪器舱的上面，外面套有整流罩。它每一级都包括箭体结构、推进系统和飞行控制系统。级与级之间靠级间段连接。

14 世纪明朝“万户”是世界航天第一人，将 47 只火箭绑在椅子上，利用火箭产生的推力飞向天空，并利用两只大风筝完成飞行，顺利降落。运载火箭是第二次世界大战后在导弹的基础上开始发展的。第一枚成功发射卫星的运载火箭是苏联洲际导弹改装的卫星号运载火箭（见“人造地球卫星”1 号工程）。苏联“东方号”系列是世界上第一个航天运载火箭系列，包括“卫星号”“月球号”“东方号”“上升号”“闪电号”“联盟号”“进步号”等型号，后四种火箭又构成“联盟号”子系列火箭。运载火箭是由多级火箭组成的航天运载工具。通常，运载火箭将人造地球卫星、载人飞船、空间站、空间探测器等有效载荷送入预定轨道。任务完成后，运载火箭被抛弃。自 1957 年苏联首次利用运载火箭发射第一颗人造卫星，至 20 世纪 80 年代，世界各国已研制成功 20 多种大、中、小型运载火箭。比较著名的有苏联的“东方号”系列运载火箭、美国的“大力神”系列运载火箭、日本的“H”系列运载火箭等。中国则在液体弹道式导弹基础上研制出了“长征”系列火箭。

中国共研制了 14 种不同类型的长征系列火箭以及快舟系列，捷龙一号运载火箭，以及民间公司研制的双曲线一号运载火箭，谷神星一号，能发射近地轨道、地球静止轨道和太阳同步轨道，其他轨道（奔月，奔火，深空探测）的卫星。1970 年到 2000 年的 30 年间，我国发射长征系列火箭共计 67 次，成功 61 次，6 次失败或部分失败，发射成功率为 91%。1958 年开始，我国陆续研制出包括生物、气象、地球物理、空间科学试验等多种类型的探空火箭。

全球运载火箭制造商主要包括美国的 SpaceX、联合发射联盟 (ULA)、蓝色起源、火箭实验室等；中国的中国航天科技集团（长征系列）、中国航天科工集团，民企蓝箭航天、天兵科技、星际荣耀、星河动力等；欧洲的阿丽亚娜太空公司（法国）、Orbex（英国，Prime 火箭）、Isar Aerospace（德国，Spectrum 火箭）等；俄罗斯的 Roscosmos 等。

#### 二、航天器的发展历史

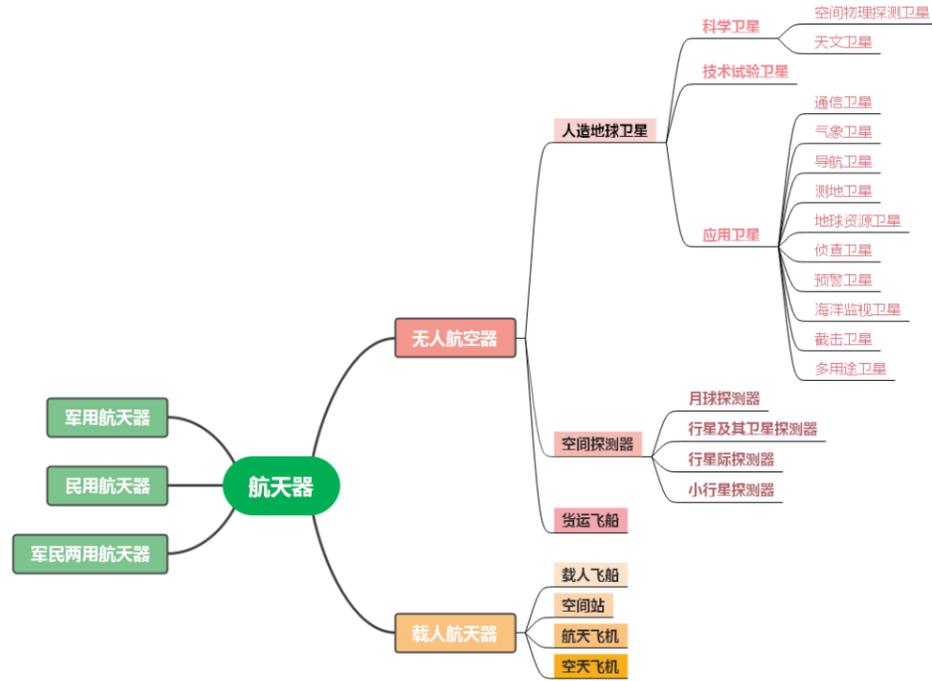
航天器 (spacecraft) 又称空间飞行器、太空飞行器。按照天体力学的规律在太空运行，执行探索、开发、利用太空和天体等特定任务各类飞行器。航天器基本上都在太阳系内运行。

1957 年 10 月 4 日，世界上第一个航天器是苏联发射的“人造地球卫星 1 号”，第一个载人航天器是苏联航天员 H.O.A.加加林乘坐的东方号飞船，第一个把人送到月球上的航天器是美国“阿波罗 11 号”飞船，第一个兼有运载火箭、航天器和飞机特征的飞行器是美国“哥伦比亚号”航天飞机。航天器为了完成航天任务，必须与航天运载器、航天器发射场和回收设施、航天测控和数据采集网与用户台站（网）等互相配合，协调工作，共同组成航天系统。航天器是执行航天任务的主体，是航天系统的主要组成部分。

1970年4月24日，中国首枚运载火箭长征一号搭载着中国首颗人造地球卫星东方红一号成功发射，中国航天史迎来又一个里程碑，而这也是中国航天日的由来。

航天器分为军用航天器、民用航天器和军民两用航天器，这三种航天器都可以分为无人航天器和载人航天器。无人航天器分为人造地球卫星、空间探测器和货运飞船。载人航天器分为载人飞船、空间站和航天飞机、空天飞机。人造地球卫星分为科学卫星、技术试验卫星和应用卫星。科学卫星分为空间物理探测卫星和天文卫星。应用卫星分为通信卫星、气象卫星、导航卫星、测地卫星、地球资源卫星、侦察卫星、预警卫星、海洋监视卫星、截击卫星和多用途卫星等。空间探测器分为月球探测器、行星及其卫星探测器、行星际探测器和小行星探测器。

图 1：航天器的分类



全球航天器制造商主要包括美国的 SpaceX、波音、洛克希德·马丁、诺斯罗普·格鲁曼、通用动力、雷神、湾流、必锐股份、豪梅特航空航天；中国的中航科技、中航科工、中国卫星、航天电子、航天电器、国博电子、铖昌科技；欧洲的空客（法国 / 欧洲）、赛峰（法国）、泰雷兹（法国）、莱昂纳多（意大利）、萨博（瑞典）、MTU（德国）、贝宜系统（英国）、罗尔斯·罗伊斯（英国）；韩国的韩华宇航；俄罗斯本次 25 强排名内暂无对应主要制造商。

### 三、中国运载火箭、航天器的发展

#### (一) 当前发展规模及面临的瓶颈

当前我国运载火箭、航天器发展规模主要呈现三大特征。

**在轨卫星数量与全球领先水平存在差距。**全球商业航天市场空间基础设施建设已形成“一超多强”格局。截至 2025 年 3 月，美国拥有 190 颗高轨卫星和 7675 颗中低轨在轨卫星，而我国对应数量为 82 颗高轨卫星和 908 颗中低轨卫星，差距较为明显。

**可复用火箭技术瓶颈亟待突破。**缺乏可复用火箭导致运力不足，是我国卫星互联网组网阶段面临的最大瓶颈。据北京航天长征科技信息研究所统计，2024 年美国 158 次航天发射中，有 134 次由 SpaceX 猎鹰系列火箭完成，其中猎鹰 9 号火箭一级复用次数最高已接近 30 次。近年来，我国民商火箭企业持续推进可重复使用火箭研发试验。截至 2026 年初，朱雀三号已完成首飞，设计一级可重复使用次数不少于 20 次。

**低轨资源竞争白热化，工程化规模化能力待提升。**得益于“星链”计划的快速推进，美国在太空低轨资源竞争中占据全球领先地位。我国虽具备雄厚的航天技术实力，但在商业航天行业的工程化、规模化发展能力上仍有提升空间，难以充分满足低轨资源竞争的发展需求。

#### (二) 中国商业航天发展前景

我国商业航天产业已逐步突破关键节点，全产业链布局日趋完善，万亿级市场潜力持续释放。

2024 年 11 月 30 日，海南商业航天发射场完成首秀，标志着我国实现星箭制造、商业发射场测试发射及卫星数据应用服务的商业航天全产业链闭环；山东海阳东方航天港作为我国唯一的海上发射母港，已具备常态化发射能力。与此同时，“朱雀”“谷神星”“天龙”等系列运载火箭发射任务接连取得突破，卫星互联网领域 3 个“万星座”组网计划已正式启动，为产业发展奠定坚实基础。

从行业格局来看，我国已形成“京津冀、长三角、珠三角”三大商业航天产业集群；截至 2024 年 10 月底，我国商业航天企业数量达 537 家。赛迪研究院报告显示，我国商业航天产业链生态已步入成长期，预计将在“十五五”时期末或“十六五”时期迈入产业成熟期。届时，我国商业航天法规制度与政策标准体系将更加健全，商业模式日趋成熟，有望在全球航天领域占据领先地位。

#### 四、运载火箭、航天器智能制造的关键环节

##### (一) 数字化设计与仿真

数字化设计与仿真技术彻底改变了火箭与航天器传统研发模式，实现从经验驱动的“手工作业”向数据与模型驱动的智能范式转变，核心应用集中在三大方面。

一是**基于模型的系统工程 (MBSE) 与 AI 融合**。通过构建覆盖总体、分系统、多专业的智能模型库，结合 AI 技术实现知识图谱自动化构建与演化，支撑多学科协同设计，某型火箭研制中实现气动-结构-控制三专业并行优化，关键参数迭代速度提升 10 倍。洛克希德·马丁将 AI 深度嵌入 MBSE workflow，在 OSIRIS-REx 样本返回任务中，机器学习模型可自动识别轨道偏差并生成最优修正方案，任务验证效率提升 7 倍；上海安托公司研发的 AI 与 MBSE 智能管理平台，通过五大核心功能赋能产品全生命周期，解决行业设计痛点，获得广泛认可。

二是**全流程自动化设计平台**。针对火箭姿态控制系统等子系统，自动化设计平台可自动生成模型、处理数据并生成报告，大幅简化设计流程。中国航天科技集团在长征四号丙运载火箭研制中，引入全流程自控设计平台，将原本 4 人两周完成的姿态控制系统参数设计工作，优化为 1 人一周即可完成，同时通过型号试验数字化管理系统，实现试验数据实时传输、判读报告一键生成，节约人力成本并优化测试流程。

三是**数字孪生驱动的多学科仿真**。在制造实物前构建 1:1 虚拟火箭（数字孪生体），集成多物理场模型模拟极端工况下的系统行为，提前暴露设计缺陷，某新一代中型运载火箭研制中仿真置信度提升至 92% 以上。中国航天科技集团将数字化转型融入科研生产全链条，一院发布多款工业软件实现数字化协同研制，六院通过数字孪生体对火箭发动机进行全流程仿真优化，八院以长十二火箭为试点构建一体化研制协同环境，设计效率较传统模式提升 30%；上海航天设备制造总厂开展数字孪生技术应用，实现运载火箭贮箱加工、航天器总装等多环节的仿真与管控。

##### (二) 智能加工与装配

面对航天产品大型化、复杂化及高密度发射需求，智能加工与装配技术大幅提升制造环节的柔性、效率和精度，核心技术及应用如下：

一是**移动机器人原位加工技术**。针对大型航天器产品尺寸超大、超出现有设备行程的难题，中国航天科技集团五院 529 厂采用“啄木鸟”式制造模式，实现“小设备加工大产品”。通过研发自主知识产权的移动机器人装备，覆盖铣削、检测、打磨等任务需求，解决了一批“卡脖子”加工难题。

二是**柔性生产单元/生产线**。为适配卫星“多品种、小批量”生产特点，中国航天科技集团五院 529 厂建立 29 个柔性生产单元/生产线，构建多套机器人自动上下料的柔性自动化加工单元，实现生产模式从“一人操作一台机床”向“一人管理一套单元”转变，提升产能并降低人工成本。航天科工空间工程有限公司智能工厂，实现卫星单颗小批量研制与规模化定制生产兼顾，单星生产周期缩短 80% 以上，已完成数十颗卫星下线。

三是**虚拟快组生产线**。中国航天科技集团五院 529 厂建立虚拟快组制造模式，在有限资源约束下快速重组生产线，解决型号任务增长与资源供给不足的矛盾，结合数字孪生技术提升智能制造水平。

四是**制造装备智能化**。上海航天设备制造总厂通过系统集成、智能改装及自主研发，形成贮箱焊接、镜像铣削、智能喷涂等系列智能装备和生产线，采用智能在线检测、先进过程控制等技术，有效提升生产效率和产品质量；“一站式”柔性装配生产线，重塑火箭子级总装流程，实现全流程数字化管控。

五是**增材制造 (3D 打印) 技术**。一方面，航天工程装备 (苏州) 有限公司的 AFSD (增材搅拌摩擦沉积) 技术，可制备无气孔、裂纹等缺陷的高性能金属构件，碳排放较传统熔焊减少 40% 以上，已成功应用于卫星适配器、火箭贮箱箱底等产品制造，制造周期缩短 60%、成本降低 30% 以上，该公司已掌握国内首台连续送棒 AFSD 技术。另一方面，空间在轨增材制造技术取得突破，2025 年中国空间站成功完成钛合金、钕合金等材料微重力 3D 打印实验，成形精度达 0.1mm，打印件强度较地面同类产品提升 15%，成功打印卫星支架等关键部件并实现减重 40%；嫦娥八号任务计划实现月壤原位 3D 打印建筑构件，为月球基地建设提供技术储备。

表 3：空间在轨增材制造材料性能对比

材料类型	抗拉强度 (MPa)	成型精度 (mm)	特殊性能	应用领域
钛合金 TC4	950	0.1	高强韧	结构件
钕合金	870	0.15	耐高温	发动机部件
月壤模拟物	120	0.3	辐射防护	月面结构
聚合物复合材料	350	0.08	轻量化	功能零件

### (三) 智能检测与质量控制

质量是航天产品的生命线，智能技术推动质量控制从事后检验向全过程、智能化转型，核心应用包括两大方向。

一是基于多模态深度学习的智能检测。该技术融合视觉、振动等多源数据，通过算法协同分析实现航天产品“表里兼顾”的质量检测，解决传统检测精度与效率不足的问题。中国航天科技集团八院 808 所研发的相关技术，形成 8 项成果并推广应用，孵化的“沪航智检”等系统有效提升科研效率，相关成果获得多项奖项。

二是自动化测试与智能判读。中国航天科技集团八院控制所自研流程控制和数据判读软件，整合各试验系统打造全流程自动测试场景，人员测试工作量降低 90%；基于镜像仿真技术的自动判读平台，实现测试数据自动分析、报告自动生成，结合机器学习的智能判读技术，实现从“事后分析”到“智能实时判读”的跨越，已在长征六号改运载火箭等型号中成功应用。。

### (四) 数字孪生与智能运维

数字孪生技术贯穿火箭与航天器设计、制造、测试及在轨运维全生命周期，是实现智能运维的核心，主要应用体现在两个方面。

一是数字孪生体构建与故障预测。通过构建控制系统五维数字孪生体，融合故障知识图谱与深度学习算法，关键系统故障预测准确率超 95%。我国在神舟十六号载人飞行任务中，利用数字孪生三维实时可视化技术，精准呈现飞船运行状态，为径向交会对接任务提供高效数据支撑；美国阿波罗 13 号任务中，地面仿真模型（早期数字孪生）为故障处置提供了关键支持，推动了数字孪生概念的正式提出。

二是虚实联动仿真与健康的管理。数字孪生验证场构建 1:1 虚拟火箭，模拟极端工况以提前暴露设计缺陷。中国航天科技集团五院“数字空间站”通过数字孪生技术，对天地通话、机械臂巡检等关键任务进行全流程仿真监控；国内某航天云网搭建的智能监测系统，实现火箭从总装测试到轨道控制的全程数字映射，与 SpaceX 星舰试飞中数字孪生技术的应用逻辑一致，通过虚拟推演提升现实任务成功率。

### (五) 供应链协同与柔性制造

面对高密度发射和成本控制压力，供应链协同与柔性制造成为航天产业高质量发展的关键支撑。

在产业链协同与供应链数字化转型方面，商业航天企业通过“聚链成群”布局关键供应链，降低行业整体成本。航天时代电子技术股份有限公司推进供应商多元化、本地化布局，实施战略采购与集中采购双轮驱动，开展关键零部件联合技术攻关，推动供应链数字化转型，建立完善的供应商准入、评估及风险管控机制；上海航天设备制造总厂建立以项目 BOM 为基础的供应链管理新模式，实现生产、备料、采购全流程监控，管理效率提升 30%。

在虚拟快组与柔性制造方面，天津航天科技集团五院建成卫星柔性总装智能现场，大中型卫星实现脉动式总装，商业小卫星实现批量化总装，500 公斤级卫星平均每 20 天可具备出厂状态；其研制的柔性太阳翼实现规模化生产，已与多家商业航天公司建立长期合作。

### (六) 智能仓储与物流

智能仓储与物流是保障火箭等高价值、复杂产品装配效率的重要环节，我国已建成多个智能化仓储物流系统并投入使用。中国航天科技集团八院控制所元器件智能仓储物流系统，集成智能料仓、自动化立体库等设备，与 ERP、WMS 系统全线融合，实现仓储物流全流程智能化、可视化；一院万源科技公司智能仓储系统及物资驾驶舱、电子器件智能配送系统，实现“收—存—发—装”自动化，节省人工成本 43%、提升库容量 40%；一院航天拓扑公司研制的自动化立体库，实现物料 40 秒快速调取，通过堆垛机、AGV 机器人等设备实现全流程自动转运，适配不同规格物料存储需求，配套洁净房、恒温恒湿系统保障存储环境。。

### (七) 网络安全与数据安全

随着智能制造系统互联程度加深，网络安全与数据安全成为航天领域重点关注方向，核心防护措施包括网络安全防护和数据加密与隐私保护两方面。

在网络安全防护方面，中国卫通成立网络安全领导小组，建立完善的防御体系和制度规范，通过 ISO 认证，开展全方位网络安全培训，2024 年网络数据安全培训覆盖率达 100%；航天信息严格落实“三化六防”理念，建立完善的网络安全管理体系，获得 ISO 27001 认证，制定应急预案并定期开展演练，2024 年未发生数据安全及隐私泄露事件；航天发展修订网络安全相关制度，子公司航天壹进制荣获工信部网络安全技术应用典型示范案例，参与修订灾备国标，通过专项演练提升整体防护水平。

在数据加密与隐私保护方面，航天信息建立数据全生命周期管理机制，2024 年数据安全投入 142 万元，开展 70 次相关培训，覆盖 3153 人次，对客户信息进行分级分类管理，严防信息泄露；中国卫通采取

数据加密、访问控制等多项措施，明确数据收集使用范围，保障用户权益，2024 年未发生失泄密及客户隐私泄露事件。

#### (八) 案例解读——中国运载火箭技术研究院北京精密机电控制设备研究所

中国运载火箭技术研究院北京精密机电控制设备研究所近年以智能制造为突破口，通过示范产线建设、模式复制推广，实现产能倍增与质量提升，推动研发、制造、管理协同优化，逐步从传统制造“追赶者”转型为智能制造“领跑者”。其发展轨迹呈现清晰的三阶跨越：2023 年摘得工信部“2023 年度智能制造优秀场景”，2024 年入选北京市“数字化车间”，2025 年跻身国家级卓越级智能工厂行列，实现从关键场景“点”的突破、数字产线“面”的升级，到各环节全要素“体”的贯通。

##### 从“示范验证”到“全面开花”

2021 年，该所改造 4 条示范线，实现产能倍增且部分产线当年收回成本，其“小投入、快产出、速验证”的可复制模式，为后续规模化推广奠定基础。随后 10 条数字化产线全面铺开，覆盖从关键元件到系统总装全环节，产能实现 1.5 至 6 倍非线性增长，有力支撑交付量向万台级跨越。

##### 数据的华丽蜕变

10 条数字化生产线实时采集设备状态、质量信息等源头数据，通过工控网互联互通并整合分析，为生产决策提供支撑。智能算法取代传统人工排产，实现生产节点实时监控与异常预警，将问题处置在萌芽阶段；以设计物料清单（BOM）为单一数据源头，构建完善的研发体系，通过“大量选用、少量自制”策略提升产品化率与研发效率，该模式已在试点型号应用，实现设计、工艺、制造高效协同。

##### 能力重塑与组织新生

随着智能制造升级，员工能力要求全面提升，设计师关注制造可行性、工艺师掌握数据建模、管理者依托数据决策，在人力资源稳定的前提下，圆满完成两次大规模批生产任务，质量一致性显著提升，组织韧性与活力增强。同时，该所构建“五层架构智能制造体系”，形成一系列标准、专利和关键软件，成为航天智能制造领域的示范标杆。

#### 案例解读——中国航天科工三院 31 所苏州公司

中国航天科工三院 31 所苏州公司打造的空天动力装置智能工厂，集成领域内先进智能制造技术，构建完整的数字化、智能化制造体系，以四大核心特色引领航天制造升级，树立行业标杆。

##### 异地协同，打破时空界限

依托 31 所 ERP-PDM-MES 一体化系统和系统级数字化产线核心技术，构建“北京-苏州”双中心布局，实现空天动力装置关键零部件异地协同设计与生产。通过专用网络架构实现两地数据互联互通，借助双向网闸保障数据安全传递，不仅提升生产效率，更在行业内起到良好示范作用。

##### 智能装备，铸就制造基石

工厂配备 135 台套高端制造装备，涵盖机加、焊接等 9 大专业方向，建成 8 条数字化柔性产线，可高效生产冲压发动机、涡轮发动机典型关键零组件，实现从原材料到成品的无缝对接智能化生产。柔性产线采用标准化桁架结构，配套线内测量、自动化物流等设备，可实现物料自动配送、零件快速换装，支持多产品自动化混线生产，保障产品质量稳定性与一致性。

##### 数据驱动，构建智能体系

采用 APS 智能排产系统和 CPS 协同生产系统，实现生产计划优化与智能调度；MES 系统延伸至产品全生命周期，形成从订单管理到售后服务的闭环管理。利用数字孪生技术实现设备数据实时、远程采集，通过数据分析平台深度挖掘运行数据，实现故障预警与生产过程智能化管控，推动各环节高度智能化。

##### 绿色智能，引领可持续发展

构建能源安环智能管控体系，通过传感器等设备采集分析能源消耗、安环数据，自主建设数字化空压站，实现远程监控、故障诊断与能效分析，节能效果达 20%~30%；建立污染在线管控系统，通过 AGV 小车实现金属废屑自动收集、输送及压块处理，提升资源利用率，实现经济效益与环保效益双赢。

### 第三节 无人机

#### 一、行业发展概述

我国早在 2010 年就认识到发展低空经济的重要意义，此后陆续出台多项支持政策与法规。2021 年 2 月，中共中央、国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》，首次将“低空经济”写入国家规划，在顶层设计上为低空经济发展奠定重要基础，标志着我国低空经济迎来重大发展机遇。

《绿色航空制造业发展纲要（2023—2035 年）》明确提出，2025 年 eVTOL 实现试点运行，2035 年新型通用航空装备实现商业化、规模化应用。2023 年 12 月，中央经济工作会议提出“打造生物制造、商业航天、低空经济等若干战略性新兴产业”，低空经济的战略地位进一步提升。

2023 年 5 月，国务院、中央军委公布《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》，自 2024 年 1 月 1 日起施行，标志着我国无人机产业进入有法可依、规范发展的新阶段。2023 年 12 月召开的中央经济工作会议，再次将低空经济列为重点发展的战略性新兴产业。预计到 2025 年，低空经济对我国国民经济的综合贡献规模将达到 3 万亿—5 万亿元。

2024 年 3 月 27 日，工信部、科技部、财政部、民航局联合印发《通用航空装备创新应用实施方案（2024—2030 年）》，提出到 2030 年新型通用航空装备形成万亿级市场规模，并围绕增强产业技术创新、提升产业链供应链竞争力、深化重点领域示范应用、完善基础支撑体系、构建高效融合产业生态五大方向，部署 20 项重点任务。

#### 二、涵盖范围

低空经济是以科技创新为引领，以有人驾驶、无人驾驶航空器的低空飞行活动为牵引，集航空器研发、制造、销售，以及低空基础设施建设、飞行服务、行业应用、技术创新、安全监管等于一体的综合性经济形态。低空经济由技术突破、要素创新配置与产业深度升级共同催生，具有高科技、高效能、高质量特征，是体现新质生产力的重要赛道，也是空天时代国家竞争力的关键组成部分。

低空经济既涵盖通航、警用、军用等传统领域，也包括以电动垂直起降飞行器（eVTOL）为核心的城市空中交通（UAM）等新兴场景。其中，通用航空是低空经济的主体产业，无人机是未来低空经济的主导产业，二者融合形成的城市空中交通（UAM）是当前发展热点，eVTOL 则是 UAM 的主流装备载体。

低空经济交通工具主要包括直升机、无人机、飞行汽车三大类。其中飞行汽车又分为电动垂直起降飞行器（eVTOL），仅具备飞行功能，以纯电驱动为主要特征，以载人为主要用途，与传统直升机、无人机形成明显技术与功能区分；以及陆空两栖飞行汽车，兼顾空中飞行与陆地行驶，从结构上可分为一体式和分体式两类。一体式技术难度高，中短期内难以大规模落地；分体式已有小鹏、广汽等企业推出相关产品。

#### 三、产业链分析

低空经济产业链主要由低空基础设施、低空航空器制造、低空运营服务、低空飞行保障四大板块构成。低空基建是发展低空经济的重要基础，包括监管、通信、导航等设施，其中 ADS-B 系统已成为新一代航空监视与管理的重要装备。低空航空器的技术创新与产品迭代，主要集中在无人机与 eVTOL 两大方向。

低空经济产业链长、辐射面广，上游主要为原材料与核心零部件，包括金属材料、特种橡胶、高分子材料，以及电池、电机、飞控系统、机体结构件等；中游主要为低空飞行器制造、低空飞行作业、低空保障及综合服务；下游主要为各类场景运营与应用，包括旅游观光、物流配送、文化体验、电力巡检、应急救援等。

#### 四、全球航空制造产业市场概况

全球航空制造产业市场规模持续扩大，目前已突破万亿美元，过去几年年均复合增长率约 5%，其中亚太地区增速领先。Fortune Business Insights（财富商业洞察）预测，未来五年全球商用航空装备市场增速将达到 3.7%，到 2027 年，全球航空装备市场规模将达到 11769 亿美元。

### 第四节 军用航空器

#### 一、行业发展概述

军用航空指用于军事目的的航空活动，通过固定翼飞机、旋翼机、飞艇、滑翔机等航空器执行空战、侦察、运输、警戒、训练及联络救生等任务，核心功能包括夺取制空权、空袭及防御空中袭击，涉及预警等多种形式。其装备分类涵盖战斗机、轰炸机、直升机及无人机，复合材料在歼-20、Z-10 等机型中的使用比例分别达 27%和 35%。

军用航空始于 1794 年法军组建气球观察分队执行军事任务。1911 年意大利首次使用飞机执行侦察，1913 年 2 月俄国人设计了世界上第一台轰炸机叫“伊里亚·穆梅茨”，1914 年第一次世界大战期间飞机投入空战与轰炸。第二次世界大战期间，许多重要海上战役都有飞机参加，许多战列舰和航空母舰也是被飞机击沉或击伤。1910 年 11 月，美国飞行员尤金·伊利将驾驶一架寇蒂斯双翼飞机从停泊的伯明翰巡洋舰起飞；1917 年 6 月英国皇家海军建造了人类历史上第一艘航空母舰——“竞技神”号。20 世纪 40 年代德军率先使用直升机进行海上侦察，60 年代武装直升机在复杂地形展现作战能力。早期飞机因多使用木质和帆布蒙皮材料制造，因此多采用双翼三翼设计和开放式飞行员座舱，如英国骆驼式、德国信天翁式经典式飞机。现代军用航空向智能化、无人化发展，中国 2024 年航空装备市场规模增至 1535 亿元，形成覆盖战斗机、运输机的全谱系制造能力。

全球十大军用航空器制造商主要为洛克希德·马丁公司 (Lockheed Martin)、波音公司 (Boeing)、雷神技术公司 (Raytheon Technologies)、诺斯罗普·格鲁曼公司 (Northrop Grumman)、BAE 系统公司 (BAE Systems)、达索航空 (Dassault Aviation)、中国航空工业集团 (AVIC)、巴西航空工业公司 (Embraer)、罗尔斯·罗伊斯控股公司 (Rolls-Royce Holdings)、赛峰集团 (Safran)。其中中国仅一家中国航空工业集团位于第七位左右。

2022 年全球战斗机产能排行榜，产量前五的战机中，第一名美国 F-35 战斗机。第二名中国歼-10C 战斗机，是中国自主研发的第三代改进型超音速多用途战斗机。第三名中国歼-20 战斗机，是一款具备高隐身性、高态势感知、高机动性等能力的隐形第五代制空战斗机，解放军研制的最新一代双发重型隐形战斗机，用于接替歼 10、歼 11 等第三代空中优势/多用途歼击机的未来重型歼击机型号，该机将担负中国空军未来对空、对海的主权维护任务。

## 二、中国军用航空制造规模及发展前景

当前，我国军用航空装备在总体规模、装备结构与隐身战机列装数量上，与美国及盟友仍存在较为显著的差距。从公开数据看，我国军机与世界先进水平的差距主要体现在三方面。

- 总量差距明显。根据 Flightglobal《World Air Forces 2024》数据，截至 2023 年末，我国军用飞机数量为 3304 架，位居全球第三，与美国 13209 架的规模相比仍有较大差距。
- 装备代际结构偏弱。我国战机仍有一定比例的老旧机型，三代、四代、五代机结构与美国存在代际差异；美军已无三代机，四代机为主体，五代机占比显著更高，体系化优势突出。

- 隐身战机数量差距突出。按公开结构测算，我国隐身战机列装数量与美国存在量级差距，加快新一代隐身战机列装与批产，是缩短差距的关键方向。

未来十年，我国军用航空装备将进入高速换装、批量列装、体系升级的关键阶段，行业有望成长为万亿级赛道。

**数量与质量同步跃升。**中长期目标指向军机规模与作战能力大幅提升，预计未来十年军机规模保持 15%—20% 的年化增长，逐步实现总量与结构的跨越式发展。

为实现装备体系现代化，军机批产速度将持续提升，年度交付量稳步扩大，老旧机型加速退役，四代机、五代机占比持续提高，推动整体战力迈上新台阶。

**市场规模迈向万亿级支柱产业。**从产业规模看，军用航空有望成为我国高端装备制造的重要支柱。

美国洛克希德·马丁、诺斯罗普·格鲁曼、波音三大军工企业，2024 年军机相关营收已超万亿人民币，积压订单规模庞大，带动形成十万亿级产业链。对标来看，我国中航沈飞、中航成飞、中航西飞等主机厂商，当前军机营收体量仍有巨大提升空间。

随着军机放量列装、同代机型价格与国际主流水平接轨，叠加批产规模持续扩大，未来十年国内军机主机厂营收有望向万亿级迈进。按照产业链带动比例测算，上下游整体产业规模将突破数万亿量级，成为支撑新质生产力的重要战略产业。

## 三、军用航空智能制造的关键环节

### 1. 数字化设计与仿真

#### 数字化设计

利用计算机辅助设计 (CAD) 和产品生命周期管理 (PLM) 系统，实现产品的数字化定义 (MBD)，确保设计数据的精确性和一致性。在设计环节，借助先进的计算机辅助设计 (CAD) 软件，可实现三维模型的高效构建与虚拟装配，进一步提高设计的精准度与效率。借助 CAD 软件，设计人员能够快速模拟不同工况下的产品性能，大幅缩短设计周期。

中国航空工业集团西飞充分运用数字化、信息化，通过上线联动，全力保障各型号科研生产。匹配中国商用飞机有限责任公司产品研制模式要求，实现 MBD 模式下产品技术状态的有效管控。

## 仿真技术

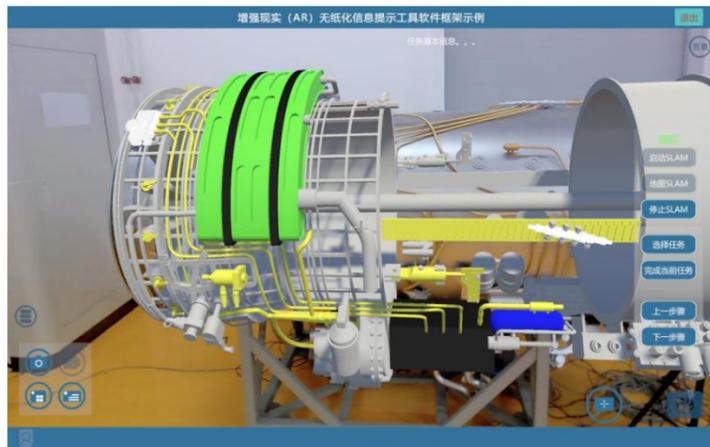
通过高性能仿真软件对制造过程进行模拟，优化工艺参数，预测潜在问题，降低实物试验成本。

例如增强现实 (AR)，洛克希德·马丁正在将增强现实技术用于其战斗机制造过程中。工程师们将这种技术在制造 F35 战斗机的生产过程中进行测试。利用 AR 眼镜和与之配套的学习软件，能够在生产过程中提供一个实时的，增强现实的效果，从而确保战斗机上的零部件能够正确装配。

再如增强现实 (AR)、扩展现实 (XR) 等新一代信息技术，正深度融入航空制造全流程。中航工业研究院围绕数字航空发展需求，持续强化数字化能力建设；航空制造院依托航空智能制造创新工场，积极布局 XR 辅助装配作业、智能人工操作、AI 机器视觉、区块链技术验证等前沿方向，系统开展智能制造顶层战略研究，全力攻克关键核心技术，为航空装备高质量发展提供坚实支撑。

增强现实 (AR) 辅助作业技术，通过光学投影、平板电脑、AR 眼镜等多平台，将虚拟的作业信息直接叠加到作业环境，为作业人员提供直观、精准的，可视化引导。

图 2：增强现实 (AR) 无纸化信息提示软件框架示例



来源：航空工业研究院《走进航空智能制造创新工场》

## 2. 智能加工与装配技术

全球领先军工企业正广泛应用新一代信息技术，支撑高端军工装备的研发与制造升级。基于信息物理系统 (CPS)、数字孪生等核心框架，国外已形成较为完善的军工智能制造关键技术体系，并在实际生产中深度落地。

以雷神公司飞行器与导弹制造部门为例，其建立了融合创新实验室 (FIL, Fusion Innovation Lab.)，所有新技术在进入量产车间前，均需在此完成适配验证，确保通用技术能够满足航空航天高可靠、高精度、高安全的制造要求。

FIL 实验室部署了多款工业机器人，外形虽与汽车行业设备相近，但在导弹等精密产品制造中，可完成更高精度、更复杂的装配作业。例如实验室中的机器人系统，可通过机器视觉自主识别导弹探测器镜头，利用真空吸盘精准取放并完成姿态校正与安装；随后自动切换工具，换装精密粘合剂注射器实施涂胶作业。机器人具备 360° 全向运动能力，可实现传统人工操作无法企及的姿态与角度，大幅提升装配一致性与可靠性。

3D 打印技术的普及，也极大推动了产品原型快速迭代。航空航天产品大量存在结构复杂、传统工艺难以加工的构件，而 3D 打印可实现 24 小时连续制造，显著降低试验周期与成本，为新材料、新结构、新工艺的快速验证提供了条件。

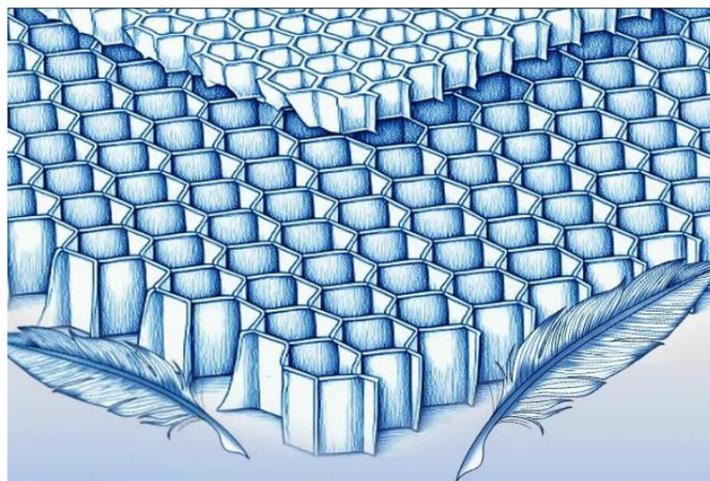
此外，雷神公司积极推进沉浸式设计技术，将 VR 虚拟现实、动作捕捉等技术应用于产品设计与工厂规划。技术人员可借助 VR 头显与动作捕捉设备，在虚拟空间中完成产品建模、产线布局、工位设计，部分场景与好莱坞特效制作流程高度相似。相关系统可实时生成三维虚拟镜像，用于优化作业流程、制定精益制造方案、快速推演现场维护与维修策略，实现从设计到制造的全流程数字化协同。

## 数控加工

采用高精度数控机床和多轴联动技术，可实现复杂零部件的精密加工，典型应用为航空发动机叶片制造。在制造工艺环节，智能数控加工技术投入应用后，机床可依据预设程序，自动调整刀具路径、切削参数等关键指标，确保复杂零部件加工精度符合设计要求。

在航空工业昌飞的复合材料加工现场，国产五轴超声设备完成自动换刀后，对劳纶复合材料构件进行精密加工，逐步成型蜂窝状结构轮廓。航空工业昌飞蜂窝超声数控加工技术研究性与性能提升团队，经过 548 天的技术攻关，完成软件开发与工艺优化，不仅实现国产五轴超声设备的性能升级，还显著提升蜂窝加工的数控效率，为航空复合材料加工提供了新的技术路径。

图 3: 国产五轴超声设备“复活”记



图片来源: 中国航空工业集团《蜂窝超声数控加工团队的破局之路》

为解决蜂窝加工中的技术难题, 团队成员经过反复试验, 研发出“双刀流”加工工艺: 采用三角刀在蜂窝表面加工隐形网格, 再通过圆片刀沿预设轨迹进行切割, 分步完成蜂窝构件加工。该工艺可显著提升蜂窝格完好率, 有效减少表面发白、压溃等加工缺陷, 可满足双曲面、腔体等复杂结构蜂窝构件的加工需求。

依托该新工艺、新方法, 团队完成 22 项 C919 蜂窝壁板零件的加工验证, 超额达成“蜂窝格完好率 95%、零件合格率 98%、表面缺陷下降 20%”的既定目标。相关技术成果已推广应用于多个航空装备型号, 打破了进口设备在超声加工领域的垄断, 推动国产五轴超声设备从实验性装备升级为量产主力设备, 为航空蜂窝零件国产化提供了关键技术支撑。

### 工业机器人

工业机器人可在装配、焊接、检测等环节实现规模化应用, 提升作业精度与生产效率, 降低人工依赖与操作风险。

在汽车与航空器制造领域, 工业机器人已在装配线上实现成熟应用。但在卫星、雷达等产品制造中, 小批量、多品种的生产模式限制了机器人效率发挥, 同时卫星装配对专用软件、适配工艺要求较高, 常规工业机器人难以直接适用, 仍以人工装配为主。近年来, 这一格局逐步改变, 工业机器人开始在装配环节承担辅助乃至替代人工的作业任务。

雷神公司在亚利桑那州图森 TUSCON 工厂开展航天器、导弹等产品制造, 并在生产流程中规模化应用工业机器人。机器人配备多功能末端执行器, 可完成抓取、转运、测试等一系列操作。机器人系统可稳定、重复执行装配线作业。大型机械臂可完成弹体零部件的转运、高温环境测试等流程, 实现与试验设备的自动对接与流程联动。

国防装备领域普遍面临项目周期长、成本偏高、技术迭代快等问题, 大型军工企业普遍通过提升制造精度与流程可控性应对上述挑战。图森工厂集中应用虚拟现实、3D 打印、工业机器人、生产过程监控等先进技术, 推动国防制造模式升级。

图 4: 雷神公司亚利桑那州图森 TUSCON 工厂



来源: 机械智能实验《国外军工智能制造系统及关键支撑技术》

雷神公司还构建了 CAVE 自动虚拟环境系统, 可实现三维立体与增强现实画面的沉浸式显示。操作人员通过专用设备与系统交互, 可完成产线规划、设备布局、运动协同等验证工作。工程师可在虚拟环境中对导弹等产品进行结构检视与空间干涉检查, 提前识别线缆布局、传感器安装、电子器件空间排布等潜在问题, 优化结构与系统集成方案。依托沉浸式设计环境, 设计人员可在早期阶段发现机械干涉、空间约束等问题, 结合 3D 打印快速验证, 提升研发效率。

### 自动化装配线

自动化装配线通过构建智能化装配系统, 实现零部件自动识别、精确定位与高效组装, 提升装配一致性与生产效率。

中航西安飞机工业集团建成国内首套云边端协同机身大部件对接数字化装配系统，完成蒙皮拉伸机自动化改造，实现柔性保障云平台云上部署，持续提升数字化设计、关键零件精密制造、复合材料构件研发、部件数字化装配、线缆智能化制造、系统程序化测试等核心能力。

运-20 采用脉动式装配生产线，实现机身自动化铆接、零部件自动化转运与集成装配。产线集成无线远程控制、低功率激光辅助定位等技术，显著提升装配效率与制造精度，有效降低装配误差。歼-20 飞机同样采用脉动生产线模式，支撑装备快速批量交付。

增材制造技术可实现传统工艺难以加工的复杂结构件一体化成形，在节约材料的同时提升结构性能与产品可靠性，是航空航天制造领域发展速度快、应用潜力突出的先进工艺方向。目前，增材制造已从结构件制造逐步拓展至功能器件制造，在民用消费电子、健康监测、医疗诊断及国防装备等领域应用不断扩展，在飞机、导弹、雷达等装备零部件制造中已形成规模化应用。

雷神公司与相关机构开展多学科联合攻关，优化产品设计流程，支持工程技术人员利用 3D 打印技术快速开发定制化产品。依托 3D 打印与机器人技术结合，在轨制造平台可在空间环境直接制造超出火箭运载包络的大型卫星及航天器结构。SSL、Made In Space、轨道 ATK 等企业均在推进空间增材制造系统研发与验证。

### 3. 智能检测与质量控制

**在线检测。**采用机器视觉、激光扫描等技术，实现加工与装配过程实时监测，保证军工产品质量稳定可控。雷神公司在飞行器制造环节通过机器人视觉系统完成导弹探测器镜头识别、精准取放与姿态校正装配。

**无损检测。**采用 X 射线、超声波等智能无损检测手段，结合智能算法对航空航天关键零部件内部缺陷进行自动识别与分析，保障装备结构安全与可靠性。

**大数据分析。**通过生产数据采集与分析，实现军工产品全流程质量追溯与工艺迭代优化。航空工业西飞构建数字化外协生产管理体系，打通 ERP、MES 等系统数据，实现军工型号外协项目全流程数字化管控；开展工序参数化与工艺知识管理，优化生产计划运算能力，提升军机制造效率与质量稳定性。

### 4. 数字孪生与智能运维

**数字孪生。**通过建立物理实体的虚拟映射模型，实现设备状态实时监控、预测性维护与故障诊断。航空工业成飞建成数字孪生中央监控平台，集成柔性加工单元、轨道机器人、立体仓库、AGV 物流、自动化表面处理生产线等装备，实现军机零件生产全流程可视化、实时化、数字化管理，大幅提升产线运行效能。

**智能运维。**依托物联网与人工智能技术，实现制造装备远程监控与健康管理。中航工业研究院推出 E-Mate 边缘控制器，集控制、采集、边缘计算、网关功能于一体，为航空军工智能制造现场提供全面数据感知与智能控制能力，支撑工业软件与智能装备自主可控。航空工业太原仪表围绕军工产品推进研发、工艺、生产、管理全流程数字化，提升防务装备研制效率与质量保障能力。

图 5：中航工业实验室



来源：航空工业研究院《走进航空智能制造创新工场》

### 5. 供应链协同与柔性制造

**供应链管理。**中航沈飞围绕军机研制需求，构建规范化、数字化供应链体系，完善供应商准入、评价、审核与风险防控机制，推进供应商多元化与属地化布局，提升航空军工供应链稳定性、快速响应能力与抗风险水平。

**柔性制造系统。**航空工业多条柔性加工单元建成投用，脉动装配线、智能零件库、自动化热表生产线等相继投入运行，显著提升多品种、小批量军工装备的均衡生产与快速交付能力。

## 6. 智能仓储与物流

**自动化仓储。**中航沈飞建设军工零部件智能立体仓库，依托全景物流系统实现物料集中管理、自动存储与精准配送。

**智能调度系统。**通过 AGV、无线网络与智能调度软件，实现零部件自动化物流配送，有效释放机加与装配产能。

## 7. 网络安全与数据安全

**网络安全防护。**中国航空科技工业股份有限公司严格落实网络安全、数据安全相关法律法规，构建覆盖边界防护、入侵检测、漏洞扫描、终端审计、保密管控的信息安全体系，对涉密信息实施分级分类管理与全程行为审计，保障军工科研生产安全。

**数据加密与隐私保护。**中航沈飞、中国航空科技工业股份有限公司建立数据分类分级与全生命周期安全管理制度，完善网络安全应急响应与攻防演练机制，强化军品秘密、商业秘密与客户信息保护，通过权限管控、保密协议、专项培训等措施，严防信息泄露。

## 8. 人才培养与技术创新

**人才培养。**中航成飞构建航空防务领域人才梯队，开展型号研制、智能制造、工程技术等系统化培训，深化校企合作，引进高层次人才，为军机研发与智能制造提供人才支撑。中国航空制造技术研究院面向军工单位开展智能制造关键技术实训，围绕先进装配、5G 工厂、边缘智能等内容推动技术交流与能力提升。

**技术创新。**中航西飞在军机研制中突破高效精密制造、复合材料构件、增材制造、高精度装配、线缆智能制配、系统集成测试等关键核心技术，建成国内首套云边端协同机身大部件对接数字化装配系统，成果广泛应用于重点型号。

中航成飞持续完善军工研发体系，加大研发投入，建设电子共性技术研究所与综合仿真平台，形成航空防务产品与数字化平台核心能力，有力支撑军机型号快速研制与技术迭代升级。

## 四、案例解读

中国航空工业集团成飞建成的“黑灯工厂”，实现了全流程自动化、数字化、智能化运行，可在无人干预条件下连续组织生产。车间内 AGV 自动配送物料，数控机床、工业机器人协同作业，形成高度自主的航空装备精密制造体系。

“黑灯工厂”以自动化、数字化、智能化为核心，围绕工厂建设、研发设计、生产作业、生产管理、运营管理五大业务场景构建整体方案。2022 年全面建成后，实现车间物流自动配送、线内物料自动流转、产品工序自动化加工，先后获评 2024 年度工信部卓越级智能工厂、2024 年度中国智能制造最佳实践奖。

图 6：“黑灯工厂”车间



来源：中国航空工业集团成飞 850 厂《“黑灯工厂”——高端航空装备从“制造”迈向“智造”》

## 海量异构数据采集与控制

针对数控机床、工业机器人等高端装备运行数据多源异构问题，工厂构建“端—边—云”统一数据采集与控制平台。平台兼容多类工业通信协议，实现多源设备数据统一接入、标准化转换与实时汇聚，解决航空结构件制造过程中数据分散、关联性弱、一致性不足等问题。

图 7: 海量异构数据采集与控制平台



来源: 中国航空工业集团成飞 850 厂《“黑灯工厂”——高端航空装备从“制造”迈向“智造”》

### 数字孪生车间集成管控

通过数字孪生技术构建物理车间全要素虚拟映射模型, 实现生产状态、资源状态、订单进度实时同步。当生产计划或订单发生变更时, 管控系统自动生成最优调度方案。自动化立体仓库、堆垛机、AGV 系统按照指令完成物料存取、转运与配送, 实现全流程物流精准高效运行。

图 8: 数字孪生车间沿着智慧物流系统规划路径的 AGV 小车



来源: 中国航空工业集团成飞 850 厂《“黑灯工厂”——高端航空装备从“制造”迈向“智造”》

### 设备运行状态智能监控

建立设备在线状态监测系统, 对主轴运行、负载状态、刀具健康度等关键参数进行实时采集与智能诊断。系统可自动识别异常工况并触发预警与停机保护, 提升生产线运行稳定性, 降低产品不良率, 保障航空关键零部件制造质量。

依托智能工厂建设, 成飞形成成套数字化制造技术体系与“智改数转”工具包, 推出成熟货架产品 16 项, 已为 50 余家制造企业提供数字化转型服务, 构建起稳定高效的航空结构件批量生产与供应链保障能力, 为建设世界一流航空企业、支撑航空强国战略提供了重要保障。

图 9: 设备运行状态智能监控系统



来源: 中国航空工业集团成飞 850 厂《“黑灯工厂”——高端航空装备从“制造”迈向“智造”》

## 第五章 行业 ESG 优秀实践

## 第一节 中国商飞

中国商飞作为国产大飞机研制核心企业，始终以“构筑共同体”为社会责任核心理念，立足“梦想共同体（产业发展）、生命共同体（环境安全）、事业共同体（员工与伙伴）”三大维度，将智能制造贯穿研发、生产、供应链全链条，构建“技术创新驱动社会责任落地，社会责任反哺技术迭代方向”的双向赋能体系，推动大飞机事业从“技术验证”向“商业成功”跨越，同步践行环境、质量、产业链、员工发展等多元社会责任，为航空航天行业 ESG 实践提供标杆参考。

### 一、核心关联逻辑

智能制造是中国商飞社会责任落地的核心技术支撑。作为贯穿研发、生产、供应链的核心技术体系，智能制造不仅是实现大飞机“规模化、系列化发展”的关键抓手，更是履行环境责任（绿色制造）、质量安全责任（精准管控）、产业链责任（协同赋能）的核心路径，实现技术创新与社会责任的深度融合、协同发展。

### 二、智能制造赋能社会责任落地实践

#### （一）赋能“梦想共同体”：以技术突破推动大飞机产业化，践行产业责任

2024 年，中国商飞实现新增订单 330 架、签约国航为 C929 全球首家用户、14 架 C909 入疆运营的三重突破，标志着国产大飞机迈入商业规模化发展新阶段。面对多型号并行生产、区域市场适配的核心需求，智能制造技术提供了全方位支撑，推动产业责任落地。

#### 全生命周期数字化平台支撑型号研制与市场突破

依托“C 大脑”工业互联网平台，推进智能设计、智能制造、智能运维、智能供应链、智能管理五大领域建设，整合 PLM（产品生命周期管理）、ERP（企业资源计划）、MES（制造执行系统）三大核心系统，构建覆盖 38 个专业、11 个研制阶段的“大飞机研制地图”，实现全流程数据贯通，有效解决型号研制中数据异构、构型管理混乱等瓶颈，较传统模式缩短研制周期 20%。针对 C929 宽体客机研制需求，信息化平台强化项目全生命周期策划功能，进一步提升研制效率与质量。

#### 智能调度技术提升产能响应与区域适配能力

采用基于 VRP（车辆路径问题）的智能物流调度算法，通过“问题拆解与标准化建模、算法赋能高效求解、数字化管控动态适配”三层解决方案，优化六大中心 1157 个工序配送点的运输路径。通过聚类分解降低问题复杂度，依托联合研发的 VRPH 启发式算法库实现高效求解，结合实时数据动态调整路径，最终实现单趟运输路径平均缩短 20%以上、车辆利用率从 65%提升至 88%、特急件时效达标率 100%的成效。在 C909 入疆运营项目中，通过“边疆快线”专项调度方案，将零部件运输时间从 3 天缩短至 1-2 天，保障新疆区域“四个飞起来”目标落地，同时推动“支支通”网络在内蒙古、黑龙江快速复制，填补边疆地区支线航空空白，践行“航空报国”的产业使命。

#### 自动化产线与智能装备保障规模化生产

为实现“年产 100 架批产能力”目标，总装制造中心建成 5 条 C919 自动化装配生产线，引入爬壁式机器人、并联式机器人等智能装备，实现机身自动钻铆、机翼对接激光定位（精度±0.05mm）等关键工序自动化，替代 70%的人工重复操作；复材车间通过自动化铺丝机、热压罐智能温控系统，完成 C919 机身壁板等复材部件制造，材料利用率提升 15%。通过智能制造技术，2024 年实现“两型飞机材料优化单机降本达标”，支撑“4+4+2”降本方案落地，为大飞机普惠化运营奠定基础。

#### （二）赋能“生命共同体”：以技术创新筑牢环境与安全底线，践行环境与安全责任

中国商飞将“绿色商飞”作为核心环境目标，同时坚守航空安全底线，通过智能制造技术创新，实现环境价值与安全价值的双重提升，践行“生命至上、绿色发展”的责任理念。

#### 绿色制造技术践行“双碳”责任

2024 年，中国商飞提出“单位产值能耗同比下降 6.62%”的目标并超额完成，首次发布《绿色发展报告》。在智能制造技术支撑下，建立 15 项典型工艺的碳排放核算模型，发布《绿色工艺评价方法》，在酸洗钝化产线应用数字孪生技术，实现能耗降低 30%，年减少二氧化碳排放 3780 吨；6 月完成 C919 与 C909 首次 SAF（可持续航空燃料）加注演示飞行，通过智能燃油系统适配技术实现 SAF 与传统燃油灵活切换，可降低全生命周期碳排放 80%以上，计划 2025 年实现商用航班常态化运营；将绿色要求纳入供应商选择标准，与 30 余家核心供应商共建“绿色工艺清单”，推动产业链挥发性有机物（VOCs）排放减少。凭借上述实践，上飞公司获“上海市节能减排先进集体”，为航空业低碳转型提供“中国方案”。

### 智能检测与监控保障质量安全

坚守“全年无责任试飞机征候及以上事件”的目标，通过智能制造技术防范航空制造中的安全风险。基于 5G+工业互联网构建“零件-工序-人员”三维质量追溯体系，采用机器视觉检测（识别精度达微米级）替代人工检查，在 C919 长桁接头加工中实现 100%关键尺寸检测，缺陷率降至 0.1%以下；建成“安全监控与预处理中心”，完成 10 个一级危险点监测预警系统建设，在试飞环节引入气象、风沙等数据，通过 AI 算法预测极端天气影响，2024 年开展飞行安全督查 20 次，保障 C909 在疆安全运行；制定“挂黄牌督办”程序，通过 MES 系统抓取生产异常数据，联动 PLM 系统追溯设计源头，推动“双五归零”，2024 年客户投诉率下降 40%。C919 商用运营以来保持安全零事故，以“零缺陷”制造筑牢质量安全防线。

### (三) 赋能“事业共同体”：以技术普惠带动产业链与员工发展，践行协同与人文责任

中国商飞立足“事业共同体”理念，通过智能制造技术赋能产业链伙伴升级、优化员工体验，实现产业链协同发展与员工价值提升的双向共赢。

#### 产业链协同赋能伙伴升级

围绕“推动产业链合规共建，强化供应链绿色管控”目标，带动上下游 1000 余家配套企业实现技术升级。向供应链企业开放“智能调度软件”“绿色工艺评价体系”等工具，为成飞民机提供 VRP 调度算法模块，帮助其降低零部件运输成本 15%；与上海交大共建国际民航研究院，开展智能制造人才联合培养，2024 年培训产业链技术人员 2500 人次；依托“大飞机创新谷”“大飞机产业园”，新增入谷项目 56 个、入园项目 12 个，为中小供应商提供“C 大脑”平台接入服务，助力某复材供应商将产品合格率从 85%提升至 98%。形成“主制造商-供应商”协同创新生态，带动产业链产值超千亿元，助力航空制造中小企业“专精特新”发展。

#### 智能工具与数字平台提升员工体验

将员工关怀与智能制造深度融合，推出“COMAC i 智享”平台，实现招聘、入职、培训全流程线上化，开发“智能制造虚拟实训系统”，通过 VR 模拟复杂工序，将新员工培训周期缩短 50%；在生产现场部署“流动健康驿站”“直饮水机”“充电桩”，通过 AGV 小车替代人工物料转运，减轻一线员工体力劳动；EAP 心理关爱项目接入智能调度系统，对连续加班员工自动触发心理疏导提醒。2024 年，员工满意度提升 12 个百分点，人才总量突破 1.85 万人，核心技术人才流失率降至 3%以下，实现“技术创新与员工关怀融合”。

### 三、案例启示与未来展望

**技术方向锚定社会责任重点：**中国商飞的智能制造技术迭代始终围绕“产业化、绿色化、安全化”三大责任目标，SAF 技术对应“双碳”责任、全生命周期追溯对应质量责任，彰显“技术为责任服务”的底层逻辑，为行业 ESG 实践提供“技术+责任”的融合范式。

**责任成果反哺技术迭代：**社会责任落地过程中发现的“边疆运营需求”“供应链绿色诉求”，推动智能调度算法向“区域适配”升级、绿色工艺向“产业链延伸”，形成“责任引领技术、技术支撑责任”的正向循环。

**量化指标彰显技术实效：**通过“单位产值能耗下降 6.62%”“缺陷率降至 0.1%”“产业链培训 2500 人次”等量化数据，将智能制造的社会责任价值具象化，避免“技术空转”与“责任口号”脱节，提升 ESG 实践的可信度与可复制性。

未来，中国商飞将持续聚焦“5G+AI 赋能全生命周期”“零碳工厂建设”等核心领域，进一步深化智能制造与社会责任的融合，推动大飞机事业从“中国产品”向“中国标准”跨越，持续发挥标杆引领作用，带动航空航天产业链实现更高质量、更可持续、更具韧性的发展，为我国“双碳”目标实现与航空强国建设贡献力量。

### 第二节 中航高科

中航高科前身为 1956 年成立的南通机床厂，2015 年完成重大资产重组后转型聚焦航空新材料与高端智能装备主业，是中国航空工业集团旗下核心上市公司，总部位于江苏南通。公司拥有国家级企业技术中心、博士后科研工作站及 CNAS&DILAC 国家级实验室资质认证的“复合材料检测技术中心”，技术实力稳居行业领先地位。

作为航空新材料核心供应商与先进制造技术产业化领军企业，公司锚定“成果转化载体、产业控制实体、资源配置主体”三体定位，核心业务覆盖高性能树脂及预浸料、蜂窝芯材等航空复合材料研发生产，以及数控机床、航空专用装备等高端智能装备制造，产品广泛应用于军民飞机、航天装备、轨道交通、低空经济等领域，其中 T800 级碳纤维预浸料性能达到国际先进水平，国产化率超 90%，为 C919 民机等国家重点装备提供关键材料支撑。2024 年，公司实现营收 50.72 亿元，在国内航空复合材料市场占有率稳居第一，先进制造技术产业化板块营收同比增幅达 44.87%，智能制造转型成效显著。

## 一、核心关联逻辑

中航高科以“培育新质生产力、推动产业数字化转型”为核心，构建“战略引领-平台支撑-场景落地”的智能制造顶层架构，将智能制造与 ESG 实践深度融合。智能制造既是破解航空制造“卡脖子”工艺、响应市场交付需求、实现产业升级与成本优化的核心路径，也是践行环境责任（绿色低碳）、社会价值（安全保障、产业链赋能）、治理责任（合规运营）的重要支撑，形成“技术创新驱动 ESG 落地，ESG 目标引领技术迭代”的良性循环，引领航空复合材料产业向高端化、智能化、绿色化转型。

## 二、智能制造核心实践与效能优势

### (一) 智能制造顶层设计与关键技术应用

公司将智能制造纳入核心发展规划，明确“2025 年核心生产工序自动化率≥95%、生产数据互联互通率 100%”的目标，统筹推进 MES、ERP、LIMS 等系统建设，构建一体化数字化管理体系，聚焦核心环节实现智能化落地。

### 数字化管理平台

MES 系统与 ERP、LIMS 系统深度集成，实现订单接收、任务拆解、参数监控、数据追溯的全流程闭环管理，在 C919 民机专用预浸料生产中，实时管控关键工艺参数，实现“一物一码”全生命周期追溯，生产计划响应速度提升 50%；数字化协同平台实现与上下游的数据互联互通，供应链整体协同效率提升 40%，试产周期缩短 30%。

### 智能化生产装备

完成先进航空预浸料自动化生产线建设，可批量生产 T800 级高性能碳纤维预浸料，年产能提升至 800 万平方米，产品孔隙率≤0.8%，纤维质量分数偏差≤±1%；优化改进多款航空专用智能装备，具备成型模具自主设计制造能力，加工精度达 0.02mm，智能装备制造成本同比下降 12%。

### 质量管控智能化

部署先进无损检测（NDT）系统，结合 LIMS 实验室信息管理系统，对产品内部缺陷进行全覆盖检测，检测数据与产品追溯码关联，产品出厂检测合格率保持 99.5%以上，客户投诉率降至 0.2%以下。

## 特色管理模式

机加分厂构建“一个使命、四个维度、五大提升”的“145”智能制造工作模式，通过师徒制人才培养、工艺文件七级审核、创新工作室攻关等机制，结合数字孪生、工业互联网等技术，破解模具寿命预测、薄壁件加工等工艺瓶颈，核心加工效率平均提升 40%以上。

### (二) 可量化的效能优势

表 4：可量化的效能优势

效能维度	2024 年表现	2023 年表现	提升幅度
生产效率与产能	预浸料年产能 800 万 m <sup>2</sup> ，核心产品生产周期 18 小时/批次，订单交付周期 6 天	预浸料年产能 650 万 m <sup>2</sup> ，核心产品生产周期 24 小时/批次，订单交付周期 8 天	产能提升 23.1%，生产周期缩短 25%，交付周期缩短 25%
成本与资源优化	智能装备制造成本下降 12%，原材料利用率 90%，单位产品能耗下降 8%	原材料利用率 88%	原材料利用率提升 2.3%，单位产品能耗下降 8%
产品质量与稳定性	批产产品合格率 99.5%以上，客户满意度 96%，产品性能波动范围 ±1.2%	批产产品合格率 98.7%，客户满意度 94%，产品性能波动范围 ±1.5%	合格率提升 0.8 个百分点，客户满意度提升 2.1%，性能稳定性提升 20%

## 三、智能制造赋能 ESG 落地

### (一) 环境（E）维度：绿色制造与低碳发展，践行生态责任

1. **能耗与排放管控**：通过能源管理系统对生产能耗进行实时监测与分项计量，2024 年单位产品耗电量同比下降 8%、耗水量下降 10%；南通生产基地优化固化炉加热工艺，年节约标准煤 1200 吨，减少二氧化碳排放 3200 吨；引入智能加药与水质在线监测系统，废水处理效率提升 25%，中水回用率提升至 80%，年节约新鲜水约 3 万立方米。

2. **资源循环利用**：建立航空复合材料废料分类回收体系，2024 年可再加工废料回收率达 93%，回收利用废料 720 吨，节约原材料成本约 1800 万元；通过数字化平台建立供应商环境绩效评价体系，2024 年绿色供应商占比提升至 90%，带动产业链碳减排。

## (二) 社会 (S) 维度：安全保障与价值共享，践行社会责任

- 安全生产强化：**在南通智能生产基地部署智能监控系统及设备异常预警装置，2024 年累计避免安全隐患 150 余次，实现全年生产安全“零事故、零伤亡”；开展智能制造设备安全操作专项培训，覆盖员工 1200 余人次，核心岗位安全培训达标率 100%。
- 员工发展与权益保障：**2024 年投入培训费用 500 万元，培训员工 1500 余人次，建立“技能认证-岗位晋升”通道，80 名一线员工晋升至技术岗位，核心技术人员薪酬高于行业平均水平 28%；完善员工福利保障，建设智能健身房、心理咨询室，员工满意度达 94%，荣获江苏省总工会“五一劳动奖状”。
- 社会价值贡献：**向 15 家中小企业输出智能制造技术经验，与高校共建实训基地，年培养专业技术人才 200 余名；积极投身公益与乡村振兴，全年公益投入超 200 万元，践行企业公民责任。

## (三) 治理 (G) 维度：合规运营与体系优化，践行治理责任

- 治理架构完善：**搭建自上而下的 ESG 管理架构，董事会下设 ESG 委员会，将智能制造相关 ESG 目标纳入公司战略规划；完成董监事会换届，完善内控、风控、合规多体系融合协同机制，入选中上协“董事会优秀实践案例”。
- 合规与信息披露：**在智能制造系统中嵌入军工质量、环保、安全等合规要求，2024 年合规检查合格率 100%，无重大合规风险；全年完成各类公告 39 项，实现零质询、零处罚，连续 6 年获上交所信息披露 A 级评价，荣获中证报“金信披奖”，切实保护投资者权益。2024 年披露第二份 ESG 专项报告，荣获中证报 ESG 金牛奖“科技引领二十强”。

## 四、案例启示与未来展望

**技术创新锚定产业痛点：**中航高科智能制造转型紧扣航空制造“精度、效率、交付”核心痛点，聚焦预浸料生产、模具寿命预测等关键环节，避免技术堆砌，实现“技术解决实际问题、创新驱动价值提升”。

**管理与技术双轮驱动：**以“145”管理模式为组织保障，配套人才培养、质量文化、创新机制，最大化技术投入价值，构建“管理+技术”协同的智能制造体系，为高端装备制造企业转型提供可复制经验。

**ESG 与产业发展深度融合：**将绿色低碳、安全合规、产业链赋能等 ESG 目标融入智能制造全流程，通过量化指标彰显实践成效，实现经济效益、环境效益与社会效益的协同共赢。

未来，中航高科将持续聚焦 T1100 级碳纤维、可回收热塑性复合材料等前沿领域，深化长三角基地智能化升级，推进成渝地区零碳航空复材示范工厂建设；推动产品通过国际标准认证，扩大国际市场份额；通过工业互联网平台深化产业链协同，向中小企业输出技术经验，2025 年核心供应链国产化率有望突破 85%，2030 年实现主承力结构件自主保障全覆盖、可回收材料占比提升至 80%以上，持续以智能制造赋能新质生产力，引领航空复合材料产业高质量、可持续发展。

## 第三节 中航沈飞

中航沈飞股份有限公司成立于 1996 年，同年在上海证券交易所主板上市，是集科研、生产、试验、试飞、维修与服务保障为一体的大型现代化飞机制造企业。作为中国航空防务装备的主要研制基地，中航沈飞被誉为“中国战机第一股”，其以航空产品制造为核心主业，素有“中国歼击机摇篮”的美誉，承担着海军、空军半数以上舰载机的研制任务。

中航沈飞在 ESG 治理与荣誉方面表现突出，2024 年斩获多项权威奖项，包括国新杯·ESG 金牛奖 央企 50 强、致远奖“ESG 先锋奖”、2025WIND ESG 100 等，同时获评国家智能制造标杆企业、第一批卓越级智能工厂，连续六年保持中航工业经营业绩考核 A 级水平，彰显了其在行业内的标杆地位。

在智能制造领域，中航沈飞有着清晰的战略定位与顶层规划。公司坚持科技创新与产业创新深度融合，加快传统产业优化升级，推动装备集成、试验试飞等核心能力跨越提升，纵深推进业务数字化转型和产线智能化改造，着力打造世界一流军机集成交付基地。同时，公司在智能制造等 11 个领域启动原创技术策源地建设，支撑“数智能力体系”构建，加速企业改革与产业结构升级，全力建成“数字沈飞”“精益沈飞”。

在智能制造的实施路径上，中航沈飞全面推进全流程“信息化、数字化、智能化”转型升级，基于流程构建数字化体系，采用“项目咨询+自主动作”协同推进模式，实现数字化转型多域破冰、全面落地。具体而言，公司系统擘画数字化发展蓝图，着力培养数字化转型人才队伍，打造航空武器装备制造企业数字化转型高阶示范。在人才培养方面，开展“金种子”人才培养活动，通过“变革与我”主题分享、专业讲师赋能培训等形式，覆盖超 200 名“金种子”人才，并以项目为牵引建立资料库，持续提升人才专业能力。

中航沈飞的智能制造体系呈现战略引领、系统推进的鲜明特征，将数字化转型与产线智能化改造深度融合产业布局核心。该体系实现了全域覆盖与多域突破，从生产制造、供应链物流延伸至能源环保管

理，完成全流程智能化升级，尤其在危险废物信息化管理领域成为行业首家实现全生命周期信息化管理的单位。其发展路径凸显技术驱动，以数字化技术为主导的先进制造体系，不仅推动核心能力跨越提升，更实现飞机制造跨代发展，同时为绿色发展赋能，构建起经济效益与环境责任并重的现代化制造模式。

#### 第四节 洪都航空

江西洪都航空工业股份有限公司是国内航空工业的标杆企业，核心业务聚焦两大板块，形成了独具特色的产业格局。一方面，公司深耕教练机全产业链运营，涵盖 CJ6 初级、K8 基础、L15 高级教练机的研发、生产、销售及服务保障，是国内唯一具备初、中、高级教练机全谱系研制能力的企业；另一方面，公司布局防务产品研制，构建“飞机+导弹”多元化产品体系，旗下 YJ-9E 反舰导弹、TL-20 制导炸弹等可通过 L15 高教机挂载投发，形成“机弹合一”的核心竞争力。

在国际市场上，洪都航空凭借六十余年在教练机领域的技术积淀，形成了显著的差异化竞争优势，成为全球教练机市场的重要中国力量。其中，K8 基础教练机曾占据全球同级别市场 70% 的份额，L15 高级教练机则以“低成本复现先进战斗机性能”的特点，成为国际市场替代轻型战斗机的优选方案。相较于俄罗斯联合航空制造集团、意大利阿莱尼亚马基等竞争对手，公司实现设计与制造深度融合，能够更快速响应市场需求，目前已建立覆盖全球的客户网络，为后续市场拓展奠定了坚实基础。

在产业链布局上，洪都航空处于飞行培训产业链中游核心环节，发挥着集成牵引作用。公司向上游牵引电子、材料、机载系统等领域的技术突破，与科研院所形成紧密协同；向下游延伸至航校培训、维修保障、航空教育等服务领域，构建“全价值链、全生命周期”的运营模式。同时，依托江西航空城建设，公司推动上下游产业集聚，借力国产大飞机产业化机遇，在 C919 项目中实现单机价值量近 4000 万元，成为商飞供应链的重要力量。

在智能制造方面，洪都航空以数智化转型为抓手，推进航空工业数字化实践，首先在顶层设计上构建了完善的数字化运营体系。2024 年，公司以 AOS 数字化管理体系为核心，重点打造“1+5+N”运营管控中心，构建组织运营与工程研制“一体化穿透式”的数字化生态，通过信息化手段精准下达生产计划指令，打通各环节数据壁垒，使型号生产交付、验收转场的协同效率提升 30% 以上，助力年度交付任务全面完成，为智能制造提供了系统性支撑。

在关键技术层面，洪都航空实现了从生产端到产品端的全面智能升级。在数字化装配技术上，公司采用虚拟装配工艺仿真、数字化投影定位、机器人自动制孔/钻铆等技术，实现飞机部件高精度对接，L15 高教机总装采用脉动生产线模式，确保工序有序推进，同时应用数字化外形检测技术，将装配误差控制在毫米级，成功解决 C919 大型双曲度蒙皮零件拉伸成形关键技术问题。

在柔性制造系统方面，洪都航空具备五轴加工、车铣复合加工能力，支持高速切削和柔性制造，可快速切换不同机型零件生产，例如通过热压下陷技术改进，将 C919 前机身铝锂合金长桁报废率从 20.8% 降至 3.81%。公司还通过物联网和人工智能技术实现产线自感知、自优化，L15 生产线采用脉动节拍控制，各站位功能模块化设计，可快速重组，使生产周期较传统模式缩短 25%，同时掌握热压罐成型、自动下料等技术，实现复合材料部件批量制造，应用喷丸校形技术消除 C919 厚蒙皮加工变形。

此外，洪都航空构建了覆盖“设计—生产—维护”的全生命周期数字孪生体系，建立教练机研制全流程数字孪生模型，在虚拟环境中完成 120 余项测试，将物理样机迭代次数从 3 轮缩减至 1 轮，研发成本降低 18%，L15 发动机改装项目通过数字仿真提前预判 23 项潜在问题，实现试飞成功率 100%。智能制造的深化实施，直接驱动公司经营质量持续改善，进一步提升了市场竞争力。

在 ESG 实践方面，洪都航空持续推进可持续发展，成效显著。公司在华证指数的 ESG 评级从 2024 年的 BB 提升至 2025 年的 BBB，尤其在环境维度表现突出，排名行业前列，同时在国内 ESG 实践中获得媒体与机构认可，重点在绿色低碳和供应链管理方面展现出良好的实践成果。

在公司治理上，洪都航空形成了股东大会、董事会、监事会、经营管理层“权责透明、有效制衡”的治理架构，董事会下设战略委员会统筹 ESG 议题，确保 ESG 工作有序推进。2024 年，公司信息披露工作考核连续第四年获沪市主板 A 级评价，通过三次业绩说明会、上交所 E 互动等渠道，回应中小股东提问 200 余条，充分保障股东权益。

同时，公司建立了覆盖研发、生产、销售全流程的合规管理体系，开展反腐败、反不正当竞争培训 30 场次，强化合规经营意识；搭建信息安全防护平台，实现核心技术数据加密存储与访问权限分级管控，全年未发生信息安全事件，为企业可持续发展筑牢保障。

## 参考文件

- 2024 江西洪都航空工业股份有限公司可持续发展(ESG)报告,  
<https://stock.stockstar.com/RB2025030800061665.shtml>
- 中国商用飞机有限责任公司 2023 社会责任报告,2024,  
[http://www.comac.cc/fujian/2023\\_zerenbaogao.pdf](http://www.comac.cc/fujian/2023_zerenbaogao.pdf)
- 中航成飞股份有限公司.2024 环境、社会及治理 (ESG) 报告.2025-03-28.  
<https://www.cninfo.com.cn/new/disclosure/detail?orgId=9900013408&announcementId=1222929239&announcementTime=2025-03-28>
- 中航光电 2023 环境、社会责任和公司治理报告,  
[https://pdf.dfcfw.com/pdf/H2\\_AN202403151626860954\\_1.pdf](https://pdf.dfcfw.com/pdf/H2_AN202403151626860954_1.pdf)
- 中航光电科技股份有限公司.2024 年年度报告.2025-03-29.  
<http://static.cninfo.com.cn/finalpage/2025-03-29/1222943981.PDF>
- 中国航空科技工业股份有限公司 2024 环境、社会和管制报告,2025-04-24.  
[https://www1.hkexnews.hk/listedco/listconews/sehk/2025/0424/2025042400347\\_c.pdf](https://www1.hkexnews.hk/listedco/listconews/sehk/2025/0424/2025042400347_c.pdf)
- 航天信息股份有限公司.2024 年度环境、社会和公司治理 (ESG) 报告.2025-04-16.  
<https://www.cninfo.com.cn/new/disclosure/detail?orgId=gssh0600271&announcementId=1223103346&announcementTime=2025-04-16>
- 北京必创科技股份有限公司.2024 年年度报告.2025-04-28.  
[http://money.finance.sina.com.cn/corp/view/vCB\\_AllBulletinDetail.php?stockid=300667&id=11016604](http://money.finance.sina.com.cn/corp/view/vCB_AllBulletinDetail.php?stockid=300667&id=11016604)
- 中航西安飞机工业集团股份有限公司.2023 环境、社会和公司治理 (ESG) 报告.2024-04-02.  
<https://www.cninfo.com.cn/new/disclosure/detail?orgId=gssz0000768&announcementId=1219493812&announcementTime=2024-04-02>
- 中航沈飞股份有限公司.2024 环境、社会和公司治理报告.2024-04-01.  
<https://www.cninfo.com.cn/new/disclosure/detail?orgId=gssh0600760&announcementId=1222973320&announcementTime=2025-04-01>
- 中国航空科技工业股份有限公司.2024 环境、社会及管制 (ESG) 报告.2025-04-24.  
<https://www.cninfo.com.cn/new/fulltextSearch?notautosubmit=&keyWord=%E4%B8%AD%E8%88%AA%E7%A7%91%E5%B7%A5>
- 航天时代电子技术股份有限公司.2024 年度环境、社会和公司治理报告.2025-03-27.  
<https://www.cninfo.com.cn/new/disclosure/detail?orgId=gssh0600879&announcementId=1222911583&announcementTime=2025-03-27>
- 中国卫通集团股份有限公司.2024 环境、社会和公司治理报告.2025-04-30.  
<https://www.cninfo.com.cn/new/disclosure/detail?orgId=9900036546&announcementId=1223415573&announcementTime=2025-04-30>
- 航天工业发展股份有限公司.2024 环境、社会和公司治理 (ESG) 报告.2025-04-19.  
<https://www.cninfo.com.cn/new/disclosure/detail?orgId=gssz0000547&announcementId=1223156598&announcementTime=2025-04-19>
- 中航高科 2024 年度 ESG 报告
- 中国商飞 2024 年社会责任报告
- 曹涵语, 严芷晗, 林丽芳等, 航空公司低碳运营管理策略与路径探析[J]. 社会科学前沿, 2025
- 《全球碳市场进展—2025 年度报告》, 国际碳行动伙伴关系, 2025-09-19.  
[https://icapcarbonaction.com/system/files/document/250919\\_icap\\_sr25\\_chi\\_lc\\_final.pdf](https://icapcarbonaction.com/system/files/document/250919_icap_sr25_chi_lc_final.pdf)
- 2024 年中国航天装备行业研究报告,2024-09-05.  
<https://www.21jingji.com/article/20240905/herald/3961f5db3df2d5493f60091d7ae1afdd.html>
- 2025 年我国航空装备产业链图谱分析,CSDN,2025-07-25.  
<https://blog.csdn.net/garyond/article/details/149606008>
- 2025 年装备制造行业发展现状研究及市场前景深度分析.

- <https://www.chinairn.com/scfx/20250630/113009204.shtml>
22. 毕马威,新质生产力引擎驱动下的智能制造行业革新.  
<https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/cn/pdf/zh/2024/09/empowering-the-future-new-engines-revolutionising-the-smart-manufacturing-industry.pdf>
  23. 国际航空运输协会. 2030 年航空智能制造技术展望[R]. 2023.
  24. 前瞻产业研究院《2025 至 2030 中国航空复合材料行业市场深度调研及发展前景报告》
  25. 刘焱,夏雨虹,赵海涛等.面向 6G 工业物联网的联邦学习:从需求、愿景到挑战、机遇[J].电子与信息学报, 2024
  26. 王航宇,吕飞,程裕亮,等.工业物联网零信任安全研究综述[J].计算机研究与发展, 2025
  27. 杨卫平.新一代飞行器导航制导与控制技术发展趋势 [J].航空学报, 2024
  28. 孙见忠,王卓健,闫洪胜,等.航空预测性维修研究进展 [J].航空学报, 2025
  29. 刘彬,张云勇.基于数字孪生模型的工业互联网应用,工业和信息化部民用飞机专项科研项目, 2019
  30. 孙璞,袁维佳,孙凤丽等,航天产业数字化转型发展战略研究,中国工程科学, 2025
  31. 张宏,刘辉.C919 机身蒙皮自动化加工技术研究[J].航空学报, 2022, 43(7): 189-198.
  32. 李明,张华.波音 787 自动化装配工艺创新分析[J].航空制造技术, 2020, 63(9): 38-44.
  33. 陈立,王强.航空智能装备核心零部件自主化进展[J].中国机械工程, 2022, 33(8): 950-958.
  34. 张敏,刘伟.中小航空零部件企业智能化转型路径[J].中国中小企业, 2022, (7): 145-147.
  35. 郭强,黄威,杨冬健,等.一种基于有限元模拟的模锻模具寿命预测方法[P].中国专利: CN109918704B, 2024-01-23.
  36. 姚玉保,赵剑波.航空制造智能化技术与装备的探讨.高端装备制造.2025-05-30.  
<https://mp.weixin.qq.com/s/2jXbhZkUJMklfdzjtGPTg>
  37. 张亚歌,肖遥,李同礼等.航家里手|蜂窝超声数控加工团队的破局之路.中国航空工业集团-航工昌  
飞.2025-09-24.<https://mp.weixin.qq.com/s/CJvSfMGdzi9ZcbpaNWWNcg>
  38. 航空航天传感器创新材料应用再获重大进展, 2025-10-15.  
<https://www.weifengheng.com/show-3593.html>
  39. 传感器专家网.倾角传感器在国产大飞机制造过程自动监测中的应用.传感器专家网. 2019-09-10.  
<https://m.sensorexpert.com.cn/article/2818.html>
  40. 航空行业智能装配生产线,2023-05-19,<http://mkc.cmes.org/article-detail/51932/464474>
  41. 新华每日电讯,先进战机从这里飞向蓝天 探访航空工业成飞柔性敏捷智能生产体系,2025-12-02.  
<http://www.news.cn/20251202/0f7029c953fb474cab358e87fe5e571/c.html>
  42. 中国航天科技集团有限公司,航天科技五院 529 厂高精度移动式铣削机器人研制侧记,2023-12-14.  
<https://www.spacechina.com/n25/n2014789/n2014809/c3999344/content.html>
  43. 机器人视觉感知与控制技术国家工程研究中心,王耀南院士团队:智能制造工业机器人技术应用及发展趋势,2025-07-08. <https://robot.hnu.edu.cn/info/1031/1907.htm>
  44. 安徽一六八航空航天“5G+工业互联网”平台赋能企业智慧生产, <https://www.aii-alliance.org/resource/c334/n5282.html>
  45. 六安市金安区:数字赋能激活产业发展“新基因”, [https://m.cnfin.com/cmjj-lb//zixun/20250527/4240684\\_1.html](https://m.cnfin.com/cmjj-lb//zixun/20250527/4240684_1.html)
  46. 新基建案例|飞机生产中的痛点如何用工业互联网解决?  
<https://m.eeo.com.cn/2020/1203/441341.shtml>
  47. 深访|金航数码曾文:航空工业协同建模仿真的工业互联网价值,  
<https://news.qq.com/rain/a/20201218A08EEP00>
  48. 面向数字化装配与集成测试产线的孪生系统助力企业制造管控升级,  
<https://finance.sina.com.cn/jjxw/2023-10-10/doc-imzqqwnk8262584.shtml>
  49. 思看科技,向“新”发力,航空强国|思看科技 3D 扫描仪助力国产大飞机翱翔蓝天,  
<https://www.3d-scantech.com.cn/si-kan-ke-ji-3d-sao-miao-yi-zhu-li-guo-chan-da-fei-ji-ao->

- xiang-lan-tian/
50. 中国商飞. 通用航空装备智能化发展规划[R]. 2023.
  51. 成飞公司. 智能供应链协同管理系统实践报告[R]. 2022.
  52. 洪都航空. 数字化仓储与物流配送优化方案[J]. 航空制造技术, 2021, 64(8): 67-73.
  53. 中国航空工业集团. 航空零部件 AI 质检技术白皮书[R]. 2023.
  54. 工业和信息化部. 航空制造业智能制造标准体系建设指南[R]. 2022.
  55. 工业互联网产业联盟. 航空产业链工业互联网应用白皮书[R]. 2022.
  56. 上海交通大学. C919 智能工厂 5G 工业网络技术研究[J]. 通信学报, 2023, 44(3): 120-135.
  57. 中国航空工业集团. 以“145”模式跑出数智制造加速度[EB/OL].  
[http://m.toutiao.com/group/7538365059257385506/?upstream\\_biz=doubao](http://m.toutiao.com/group/7538365059257385506/?upstream_biz=doubao), 2025-08-14.
  58. 上海经信委. 模型+数据双轮驱动 打造航天器复杂构件智能制造新模式——上海航天设备制造总厂航天器复杂构件智能工厂 | 领航工厂. 上海经信委. 2025-04-25.  
<https://mp.weixin.qq.com/s/Inp0yhDyFymnSdqKGN3A0g>
  59. 季千越, 刘佳凝, 王姝书等. “打印”未来 | 航天“智造”亮相亚洲 3D 打印盛会. 上海航天. 2025-03-18. <https://mp.weixin.qq.com/s/-7iGQoDXogGzZXfKEOy7wg>
  60. 张世君. 航天科普: 2025 年航天制造十大前沿技术的研究//2025 年航天制造十大前沿技术研究// 高清课件展播//视频展播. 金刚圈. 2025-09-13.  
<https://mp.weixin.qq.com/s/bQsgXhx8MFdWFvJu7eaGg>
  61. 鲁工邦. 多模态融合深度学习在智能制造质量检测中的实践: 视觉与振动数据的协同分析. 控制工程. 2025-10-26. [https://mp.weixin.qq.com/s/5IUJtDDiplyhBN\\_bRtcpA](https://mp.weixin.qq.com/s/5IUJtDDiplyhBN_bRtcpA)
  62. 李骋昊. 航天科技八院 808 所人工智能项目通过上海市经信委评审验收. 中国航天科技集团有限公司. 2025-08-18.  
<https://www.spacechina.com/n25/n2014789/n2014809/c4404181/content.html>
  63. 黄佳丽, 程遵堃. 航天科技八院控制所运载火箭控制系统研制新范式侧记. 中国航天科技集团有限公司. 2025-07-10.  
<https://www.spacechina.com/n25/n2014789/n2014809/c4375981/content.html>
  64. 李心韵, 郭伟, 王海露等. 【新时代新征程新伟业】数智转型为引擎 向卓越智能工厂迈进. 中国运载火箭技术研究院. 2025-10-11. <https://mp.weixin.qq.com/s/WLmayJo0GL7yNRCcvRrjvA>
  65. 曹琛, 徐宏宇, 王晚琳. 从“制造”到“智造”, 智能工厂引领行业发展新范式. 中国航天科工三院 31 所. 2025-06-19. <https://mp.weixin.qq.com/s/djQr4MMsfPwO6lqEYmfDw>
  66. 易舒, 刘朝博, 李源益等. “黑灯工厂”——高端航空装备从“制造”迈向“智造”. 中国航空工业集团成飞 850 厂. 2025-04-21. [https://mp.weixin.qq.com/s/9TXF4JY-12rByse5j\\_8CiQ?scene=1](https://mp.weixin.qq.com/s/9TXF4JY-12rByse5j_8CiQ?scene=1)
  67. 中航工业. 集团资讯 | 打造数字化生产线, 赋能绿色低碳高质量发展. 中国航空工业集团成飞.  
[https://mp.weixin.qq.com/s/sfDus5YRu2-cCGB\\_8QyEsw](https://mp.weixin.qq.com/s/sfDus5YRu2-cCGB_8QyEsw)
  68. 空客公司. 数字孪生技术在 A350 设计中的应用白皮书[R]. 2022.
  69. Boeing. Digital Twin for 787 Dreamliner Production Optimization[J]. Aerospace Manufacturing and Design, 2021, 13(4): 28-33.
  70. 翁陈熠, 蒋明星, 刘庭煜. 《光明日报》——数字孪生: 虚拟的? 真实的!. 机器智能实验室. 2025-09-11. <https://mp.weixin.qq.com/s/CJyP3G9U8XKsBHU9GNznug>
  71. 刘庭煜, 翁陈熠. 数字孪生: 真实的虚拟世界. 机器智能实验室. 2025-09-08.  
[https://mp.weixin.qq.com/s/wCz5\\_LrgAY7sL3nlArAj1w](https://mp.weixin.qq.com/s/wCz5_LrgAY7sL3nlArAj1w)
  72. 数字孪生在航空航天零部件制造过程质量控制与工艺优化中的应用实践  
[https://blog.csdn.net/2501\\_92431671/article/details/148667509](https://blog.csdn.net/2501_92431671/article/details/148667509)
  73. 数字孪生技术构建战机全生命周期健康管理新体系  
<https://segmentfault.com/a/1190000047354681>
  74. 刘庭煜. 国外军工智能制造系统及关键支撑技术. 机械智能实验室. 2025-09-15.  
<https://mp.weixin.qq.com/s/ZHLC288XtWRbKvxVBdPKgw?scene=1>

75. 袁博, 罗京华.走进航空智能制造创新工场.航空工业制造院.  
[https://mp.weixin.qq.com/s/Q2mYvLi7CzCV1\\_s6tHhNQA?scene=1](https://mp.weixin.qq.com/s/Q2mYvLi7CzCV1_s6tHhNQA?scene=1)
76. 工信部《高端新材料产业发展行动计划(2022-2025年)》
77. 工信部《十四五新材料产业发展规划》(工信部联规〔2021〕28号)
78. 发改委《商业航天创新发展实施意见》(发改高技〔2024〕1567号)
79. 中国航空工业集团《航空复合材料产业发展白皮书(2024)》
80. 肖勇波、林群庚、张继红, 面向供应链韧性的共享制造模式, 2024-11-11.  
<https://www.sem.tsinghua.edu.cn/info/1171/36703.htm>
81. 案例 | 数商云赋能航天航空产业: S2B2B 平台重构供应链协同生态的标杆实践  
<https://www.shushangyun.com/article-23117.html>
82. 常理.商业航天驶向新高度.中国经济网-《经济日报》.2025-06-12.  
[http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202506/t20250612\\_2324329.shtml](http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202506/t20250612_2324329.shtml)
83. 李淑姮, 李庆勤, 高一鸣等.这五年: 商业航天加速前行 | “十四五”期间航天科技集团加快推动商业航天发展综述.中国航天科技集团.2025-11-02.  
<https://mp.weixin.qq.com/s/x3qTXFw16rGYrwK5xXFv4w>
84. 刘准宇, 胡潇潇, 高一鸣等.这五年: 数字赋能智慧航天 | “十四五”期间航天科技集团加快推动数字化转型综述.中国航天科技集团.2025-10-14.  
[https://mp.weixin.qq.com/s/\\_MytvMgs4kmxHDS9\\_Glf4Q](https://mp.weixin.qq.com/s/_MytvMgs4kmxHDS9_Glf4Q)
85. 庄瑜.【装备内刊】“学校+企业”命运共同体助力构建航天人才梯队——智能制造(航天领域)产教融合实训基地人才培养路径的探索与创新.上海教育技术装备.2022-12-07.  
[https://mp.weixin.qq.com/s/tYLYdFEX3UQx25P-\\_nwtXg](https://mp.weixin.qq.com/s/tYLYdFEX3UQx25P-_nwtXg)
86. 张议芳, 纪世民.研究院举办中国航天科工十院智能制造专题培训班.哈尔滨工业大学重庆研究院.2025-04-03.<https://mp.weixin.qq.com/s/CGOX1YPEj8uCJqxjHTm5Rg>
87. 李淑姮, 刘畅, 高一鸣等.“由点到线”体系推进“聚焦主业”重点突破 | 航天科技集团2023年度国家绿色工厂生产现场扫描.中国航天科技集团.2024-03-18.  
<https://mp.weixin.qq.com/s/vpIClj-yH0Lu7Ge1C15oqw>
88. 中航高科《先进航空预浸料生产能力提升项目可行性研究报告》

# INTRODUCTION



## 关于上海现代服务业联合会

上海现代服务业联合会，是由本市主要从事服务业的行业协会、学会、商会等社会组织及企事业单位自愿组成的跨行业、跨领域的综合性枢纽型非营利社团组织。拥有会员单位1500余家，其中200余家为行业协会、学会、商会等社会组织，覆盖了金融、信息、科技、商务、生产、公共、专业服务等多个领域，基本囊括上海市服务业的所有行业。

以联合会为主发起设立了上海现代服务业企业促进中心、上海经贸商事调解中心、上海现代服务业发展研究院、上海现代服务业发展基金会、上海现代服务业标准创新发展中心等五个民非实体机构，并牵头成立长三角现代服务业联盟，具有全面服务社会、助推经济发展的综合实力和核心竞争力。

2024年3月，上海市商务委关于印发《加快提升本市涉外企业环境、社会和治理（ESG）能力三年行动方案（2024-2026年）》，明确上海现代服务业联合会承担着“加大对ESG理念的宣传力度”的主要任务。



## 关于荣续ESG智库研究中心

荣续ESG智库研究中心，致力于推动“绿色共赢”的可持续发展理念，成为企业ESG发展的长期伙伴。我们通过ESG行业研究、优秀案例研究、政策和标准研究、热点和趋势分析等，解决气候变化、环境、社会、公司治理等领域的信息缺乏或信息不对称的问题，为企业提供可落地、可复制、可持续的ESG解决方案，帮助企业践行ESG理念，创造长期价值。

荣续智库研究中心汇聚了各行业的ESG专家和研究员，他们在各自领域拥有丰富经验和卓越能力。这些专家大部分是来自品职教育的ESG持证学员。品职教育拥有超过百万的活跃ESG学习社群，以及超过3万名ESG人才组成的人才库，是荣续智库坚实的人才资源。

荣续智库将继续发挥行业经验，秉持深刻洞察力和强大执行力，帮助企业将ESG有效整合到核心战略中，助力企业在ESG领域实现突破，创造社会和经济双重价值。

## ESG白皮书系列

- |                   |                    |                    |                  |                                          |
|-------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------------------------------|
| 01 纺织服装行业ESG白皮书   | 13 包装印刷行业ESG案例白皮书  | 25 银行绿色金融行业ESG白皮书  | 37 酒旅行业ESG白皮书    | 49 基建行业ESG白皮书                            |
| 02 食品饮料行业ESG白皮书   | 14 家电行业ESG白皮书      | 26 跨境电商行业ESG白皮书    | 38 零碳产城融合项目发展白皮书 | 50 气候金融ESG白皮书（基础篇）                       |
| 03 汽车行业ESG白皮书     | 15 美妆行业ESG白皮书      | 27 光储充行业ESG白皮书     | 39 零碳产城融合项目案例白皮书 | 51 气候金融ESG白皮书（实务篇）                       |
| 04 化工行业ESG白皮书     | 16 钢铁行业ESG白皮书      | 28 电子元器件分销行业ESG白皮书 | 40 白酒行业ESG白皮书    | 52 新能源汽车行业ESG白皮书（电池类）                    |
| 05 环保行业ESG白皮书     | 17 物流及航运物流行业ESG白皮书 | 29 建筑材料行业ESG白皮书    | 41 电力行业ESG白皮书    | 53 新能源汽车行业案例白皮书（电池类）                     |
| 06 新能源行业ESG白皮书    | 18 航空物流行业ESG白皮书    | 30 通信服务行业ESG白皮书    | 42 物业行业ESG白皮书    | 54 新能源汽车行业ESG白皮书（氢能·<br>甲醇·生物质·天然气·太阳能类） |
| 07 半导体行业ESG白皮书    | 19 建筑行业ESG白皮书      | 31 通信设备行业ESG白皮书    | 43 有色金属行业ESG白皮书  | 55 医养康行业ESG白皮书                           |
| 08 医药行业ESG白皮书     | 20 储能行业ESG白皮书      | 32 家居装饰行业ESG白皮书    | 44 零碳物流园区发展白皮书   | 56 公共建筑行业ESG白皮书                          |
| 09 财会行业ESG白皮书     | 21 机械储能行业ESG白皮书    | 33 互联网教育行业ESG白皮书   | 45 零碳园区发展白皮书     | 57 智能制造行业ESG白皮书（航空航天）                    |
| 10 金融“一带一路”ESG白皮书 | 22 电化学储能行业ESG白皮书   | 34 医疗器械行业ESG白皮书    | 46 传媒行业ESG白皮书    | 58 微电网与虚拟电厂行业ESG白皮书                      |
| 11 包装行业ESG白皮书     | 23 化学储能行业ESG白皮书    | 35 医疗卫生行业ESG白皮书    | 47 造纸行业ESG白皮书    | 59 中国企业出海ESG白皮书（更新版）                     |
| 12 印刷行业ESG白皮书     | 24 出海欧盟 行业ESG白皮书   | 36 康复辅具行业ESG白皮书    | 48 煤炭行业ESG白皮书    | 60 零碳园区案例白皮书（系列）                         |

合作咨询请联系  
(扫码添加联系人)



欢迎关注荣续ESG智库研究中心  
为您提供最新的ESG资讯  
共同探索可持续发展的未来

