

文章编号: 1674-8190(2024)06-115-11

民用飞机机载设备技术发展趋势

赵永强¹, 马存宝²

(1. 北京飞机维修工程有限公司 工程部, 北京 100621)

(2. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: 民用飞机经过一代又一代的发展迭代, 在经历了 4~5 个发展阶段后, 进入了当前这个突破性的、颠覆性的时代, 机载设备的研发、制造都打破了传统的理念和格局。本文在回顾机载设备材料、工艺、功能、性能发展演变的基础上, 分析了机载设备对现代民用飞机系统可靠性、运行性能和特殊运行需求的影响, 总结了新兴技术在航空业的应用趋势, 指出电驱动、数字化、网络化、智能化将成为机载设备技术升级发展的信向标, 展望了民用飞机国产化发展战略和趋势: 机载设备只有顺应时代潮流, 抓住技术变革的机遇, 才能在愈加激烈的市场竞争中、在百年未有的大变局中, 取得突破和发展。

关键词: 机载设备; 民用飞机; 技术趋势; 多电驱动; 计算机中心化; 网络化

中图分类号: V241

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.06.10

The development trend of civil aircraft airborne equipment technology

ZHAO Yongqiang¹, MA Cunbao²

(1. Engineering Division, Aircraft Maintenance and Engineering Corporation, Beijing 100621, China)

(2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: After several generations of development iterations, following four to five ages of progress, civil aircraft has entered a breakthrough and subversive era, the complete aircraft, including the research and development of airborne equipment, manufacture have broken the traditional aviation concept and pattern. On the basis of reviewing the development and evolution of airborne equipment materials, processes, functions and performance, this paper analyzes the impact of airborne equipment on the reliability, operational performance and special operation requirements of modern civil aircraft systems, summarizes the application trend of emerging technologies in the aviation industry, and points out that electric drive, digitalization, networking and intelligence will become the beacon of the technological upgrading and development of airborne equipment. The development strategy and trend of civil aircraft made locally are discussed in the paper. It is concluded that only by conforming to the trend of contemporary era and seizing the opportunity of technological change, may the localization of civil aircraft equipment may make breakthroughs and advances in the increasingly fierce market competition and in the great transforming unseen in a century.

Key words: airborne equipment; civil aircraft; technology trends; multi-electric drives; computer centralization; networking

收稿日期: 2024-04-28; 修回日期: 2024-09-03

通信作者: 赵永强(1973-), 男, 硕士, 高级工程师。E-mail: zhaoyongqiang@ameco.com.cn

引用格式: 赵永强, 马存宝. 民用飞机机载设备技术发展趋势[J]. 航空工程进展, 2024, 15(6): 115-125.

ZHAO Yongqiang, MA Cunbao. The development trend of civil aircraft airborne equipment technology[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(6): 115-125. (in Chinese)

0 引言

国产大飞机 C919 成功投入商业运营, ARJ21-700 的量产和规模化, 给我国民用飞机的研制生产、发展壮大带来了极大鼓舞, 民用飞机市场的格局也就此发生了深刻变化。但来自国外 OEM (Original Equipment Manufacturer) 厂商的技术壁垒、知识产权垄断、贸易制裁等方面的竞争排挤, 使得民用飞机装备国产化向高精尖、更高层次纵深发展愈加困难。

本文以外部大环境宏观层面为出发点, 从政策、经济、社会、技术等方面, 对影响民用飞机发展的主要因素进行阐述, 分析现代先进民用飞机与新兴技术的融合应用趋势, 提出民用飞机国产化就是提高机载设备的国产化率, 先进机载装备的技术发展趋势就是民用飞机国产化的方向和指引, 以期为民用飞机国产化的更深层次推进提供参考。

1 民用飞机机载设备发展历史

1.1 机载设备谱系分类

机载设备是指飞机上能够给出各个类型参数的仪器、仪表或设备, 即航空机载设备。随着现代

飞机性能的不断提高, 各类技术手段的不断发展, 航空机载仪表与设备的功能也越来越复杂和多样, 并且实现了系统集成与技术综合。特别是信息技术、网络技术和计算机技术的飞速发展, 带动和促进了飞机机载设备技术的进步, 使机载设备的集成化、智能化和网络化的程度不断提高^[1]。

对于品类复杂、种类繁多的机载设备来说, 如何进行恰当的分类, 一直以来都是个行业难题, 不同国家、不同组织机构对于机载设备的分类各有异同。美国联邦航空管理局 (Federal Aviation Administration, 简称 FAA) 对于机载设备、部附件采用一种类似分级分类的划分方法, 叫作 Rating 和 Class, 往下再没有细分, 相对比较粗放; 欧洲航空安全局 (European Union Aviation Safety Agency, 简称 EASA) 也采用了分级 Rating 的方法, 但比美国 FAA 更加细化, 而且在每个 Rating 分级条目里面又细分了 ATA (Air Transport Association) 章节; 中国民用航空局 (Civil Aviation Administration of China, 简称 CAAC) 曾经沿用了传统的专业划分方法, 把机载设备分为起落装置、机械、电子、电器四大类, 在四大类项目底下再细分为 26 个子项目, 更加细化。不同国家局方对于机载设备的分类对比如图 1 所示。

RATING	EASA	ATA CHAPTERS	FAA limited ratings	CAAC项目、子项目
C1	Air Cond & Press	21	(1) Instruments	LGR01 起落架修理
C2	Auto Flight	22	Class 1 – Mechanical instruments	LGR02 机轮修理
C3	Comms and Nav	23 - 34	Class 2 – Electrical instruments	LGR03 刹车装置更换与修理
C4	Doors - Hatches	52	Class 3 – Gyroscopic instruments	LGR04 轮胎翻新
C5	Electrical Power & Lights	24 – 33 – 85	Class 4 – Electronic instruments	MEC01 气动附件修理
C6	Equipment	25 - 38 - 44 - 45 - 50	(2) Radio	MEC02 液压附件修理
C7	Engine – APU	49 - 71 - 72 - 73 - 74 - 75 - 76 - 77 - 78 - 79 - 80 - 81 - 82 - 83	Class 1 – Communications equip.	MEC03 燃油附件修理
C8	Flight Controls	27 - 55 - 57.40 - 57.50 - 57.60 - 57.70	Class 2 – Navigational equipment	MEC04 滑油附件修理
C9	Fuel	28 - 47	Class 3 – Radar Equipment	MEC05 管路修理
C10	Helicopters - Rotors	62 - 64 - 66 - 67	(3) Accessories	MEC06 瓶体修理
C11	Helicopter - Trans	63 - 65	Class 1 – Mechanical accessory	MEC07 应急设备修理
C12	Hydraulic Power	29	Class 2 – Electrical accessory	MEC08 客舱/货舱设备修理
C13	Indicating/Recording Systems	31 - 42 - 46	Class 3 – Electronic assessor	MEC09 操纵系统机械部件修理
C14	Landing Gear	32	(4) Landing gear components	MEC10 水系统附件修理
C15	Oxygen	35	(5) Emergency	AVC01 无线电设备修理
C16	Propellers	61	(6) Nondestructive inspection, testing, and processing.	AVC02 雷达设备修理
C17	Pneumatic & Vacuum	36 - 37		AVC03 控制组件修理
C18	Protection ice/rain/fire	26 - 30		AVC04 电子显示器修理
C19	Windows	56		AVC05 仪表修理
C20	Structural	53 - 54 - 57.10 - 57.20 - 57.30		AVC06 机载计算机修理
C21	Water Ballast	41		AVC07 记录器修理
C22	Propulsion Augmentation	84		AVC08 娱乐系统修理
				ELC01 飞机电源系统设备修理
				ELC02 电动机修理
				ELC03 蓄电池修理
				ELC04 机上电器设备与附件修理

图 1 机载设备谱系分类对比

Fig. 1 Classification and comparison of airborne equipment

无论如何演变和分类, 目的都是为了更好地区分、定义、管理复杂繁多的机载设备。另外, 从上述分类方法也可以看出, 不同国家、地域在技术层面的文化差异, 有言简意赅的“粗线条”, 也有严

谨精细的“格子控”。

1.2 机载设备研制材料的变迁

“材料新一代, 飞机高一代”, 这是航空发展历

程的真实写照。航空工业发展一百多年以来,材料研制与飞机设计制造相辅相成、彼此推动发展。百年中,飞机机体结构的材料经历了木、布结构,铝、钢结构,铝、钛、钢结构,铝、钛、钢、复合材料结构四个阶段的发展^[2],目前正在跨入第五阶段的复合材料、钛、铝、钢结构,新阶段的特点是高分子、复合材料占绝对优势、钛合金用量屡创新高、铝合金和钢材料逐步减少,但仍不可或缺。在现役民用飞机最先进的两个宽体机型波音787和空客350上,复合材料均得到了大规模应用,空客350的复合材料用量达到53%,甚至超过了波音787复合材料50%用量的水平^[3]。钛合金材料的用量排在第二位,在结构方面应用较多,这两款机型的起落架大部分零件都由钛合金制成,波音787起落架的阻力支柱改成了复合材料,这在业内极其罕见。

机体材料、性能的变化影响了机载设备材料的未来发展方向,轻质、高强度、高模量、高韧性、耐高温、耐低温,抗氧化、耐腐蚀等高性能是机载

设备材料的必备特性^[4];合金化、复合化是提升机载设备材料性能的重要途径,不同材料有机融合激发出不同的特质;增材制造工艺和材料逐步应用推广^[5];感知化是航空航天材料近几年的重要发展趋势之一,把材料本体与现代传感器件、信息处理手段、功能驱动单元集成于一体,不但能获得材料的内部状态信息,而且可以按照外部需求进行调整。比如米其林厂家的机载轮胎橡胶材料内部就预埋了传感器,可以实时获取轮胎的压力、温度等信息;Goodrich厂家的刹车拉杆材料表面贴合了应变片,可以实时监控刹车力矩导致的材料应力变化;系统、环境、生态相容性是机载设备材料的生存空间,一种与飞机系统不匹配、与飞机运行环境不适应、与生态环保不同步的材料,必然会被行业和规则淘汰。空客飞机机载整体厨房尺寸质量数据如表1所示,可以看出:整体厨房随着件号的演进升级,质量呈明显减小趋势。

表1 整体厨房尺寸质量数据
Table 1 Dimensions and weight data for integrated kitchens

Part Number	Keywords	尺寸/mm			质量/kg
		长(L)	宽(W)	高(H)	
X00200-0-023-00	Galley	2 615	1 534	2 480	207.40
X00200-0-025-00	Galley	2 615	1 532	2 480	203.00
X00200-0-027-00	Galley	2 615	1 295	2 480	203.70
X00200-0-029-00	Galley	2 615	1 534	2 480	205.60
X00200-0-034-00	Galley	2 614	1 534	2 480	196.80
X00200-0-036-00	Galley	2 615	1 534	2 480	197.40
X00200-0-039-00	Galley	2 615	1 534	2 480	196.60
X00200-0-039-51	Galley	2 615	1 534	2 480	196.70
X00200-0-039-52	Galley	2 615	1 534	2 480	196.90
X00200-0-040-00	Galley	2 614	1 533	2 480	194.50
X00200-0-040-01	Galley	2 615	1 534	2 480	194.40
X00200-0-044-00	Galley	2 615	1 534	2 480	189.80

1.3 机载设备功能与性能的演进

受限于当时的技术、认知、感知等,航空发展历史上机载设备从结构简单、功能单一,逐步向单体化、集成化、多功能方向发展,能单个一体化的零部件,绝不拆分成多个零部件进行组装连接,以减少设计、制造、取证、拆解、组装、腐蚀修复维护等方面的人力、流程、成本;无法避免的多个零件、组件则通过组合、集成的思路使其大件化、系统

化,以缩小其空间重复占用率,发挥其功能集约多样化。机载设备在性能方面也得到了显著提升,装机可靠程度、失效安全程度、技术参数精度等均发生了质的飞跃。

伴随机载设备物理实体的发展,机载设备软件在民用飞机电控时代也得以长足开发和应用,典型的代表要数空客320系列全电控操作飞机的诞生,美国航空无线电技术委员会(RTCA)甚至为

机载软件的开发和应用颁布了行业标准 DO-178B, 以确保安全并规范机载软件。到了当前自动化程度极高的现代民用飞机, 机载软件更是非常繁杂, 机载设备软件化、计算机化已经成为行业至关重要的发展趋势, 近三十余年来, 飞机设计正明显从以硬件为基础的解决方案向以软件为基础的解决方案转变。航空电子综合系统在现代飞机中所占比重不断上升, 已由电子机械密集型向软件密集型过渡, 软件规模大幅增长^[6]。

2 现役民用飞机机载设备使用状况

2.1 关键设备对机队运行的影响

在飞机几十个功能系统、数千个机载设备里面, 有一些设备的故障或失效对整个飞机的飞行、性能、安全会产生致命的影响或事故征候, 比如发动机空中停车、重力放起落架、中断起飞、返航备降等, 与这些不正常事件紧密相关的系统或机载设备被定义为关键系统和关键设备。波音公司在其飞机维护手册中, 至少定义了电源、引气、液压、燃油、飞行控制、着陆、导航、自动驾驶、防火、发动机等十个章节为关键系统(Critical System), 涉及这些系统的飞机放行、MEL最低设备保留都有特殊要求。

对于飞机的心脏——发动机装置来讲, 其关联设备和部附件更是重中之重。发动机除基本组件外, 还配有各种附件工作系统, 从而保证发动机安全、可靠地工作, 飞行员对发动机的操纵是通过附件工作系统完成的, 操纵是否正确得当, 决定着发动机能否正常工作以及发动机的性能能否充分发挥^[7]。

由此可见, 机载关键设备直接关系到飞机的安全运行和飞行性能, 需要重点关注和控制, 目前航空公司主流的做法是建立发动机和飞机系统的关键设备、部附件清单, 进行重点监测和提级管控。

2.2 现代民用飞机特殊运行、性能的提升

不同地域、区域乘客出行需求、航空运输布局规划等对现代民用飞机的飞行性能、适应能力提出了更多、更高的要求, 以促使民用飞机能够满足特殊机场、特殊航线、特殊系统、特殊飞机、特殊构型等的运行需要。比如电子飞行包(Electronic

Flight Bag, 简称 EFB)、广播式自动相关监视(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, 简称 ADS-B)、基于性能的导航(Performance Based Navigation, 简称 PBN)、所需导航性能(Required Navigation Performance, 简称 RNP)、区域导航(Regional Area Navigation, 简称 RNAV)、数据链通信系统、基于性能的通信和监视(Performance Based Communication and Surveillance, 简称 PBCS)、缩小垂直间隙(Reduced Vertical Separation Minimum, 简称 RVSM)、双发延程飞行(Extended-range Twin-engine Operational Performance Standards, 简称 ETOPS)、全天候(All Weather Ops)、高高原(High Altitude Ops)、跨水、极地(Polar Ops)、跨境跨欧盟(EASA TCO)、跨境跨美国(FAA PART 129)、II类/III类运行、平视(Head-up Display, 简称 HUD)运行等, 这些都是现代民用飞机常见的特殊运行性能。上述飞机特殊运行性能对相关系统机载设备、附件的功能、性能、特征等提出了更高的要求。早年间, FAA就对下一代航空运输系统进行了规划和要求, 发布了NextGen发展愿景, NextGen旨在增加空域系统容量、提高飞行效率、提高系统可预测性、增加访问和提高系统弹性, 同时保持或提高航空运输的安全性。虽然该计划有许多功能, 但其关键方面是基于卫星的监视和导航、数字通信、信息交换、ATM决策支持助手(如基于时间的管理工具)和新的尾流分离标准^[8]。

2.3 现役民用飞机设备故障率、可靠性

随着民用飞机的更新迭代, 技术工艺的改进、航空公司维护保障手段的提升, 现代民用飞机的机载设备总体可靠性普遍较高, 逐代呈上升趋势, 航空公司的机队可用率、日利用率、故障千次率、事件万次率、0小时低小时件等, 可靠性指标均得到了显著提高。

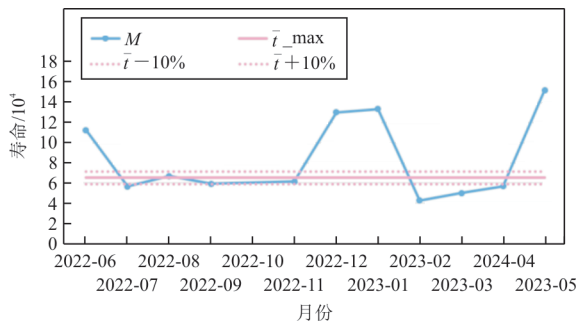
现役飞机的主机厂、发动机和主流机载设备的OEM厂家都对其产品建立了可靠性管理系统, 设置了可靠性参数、指标, 收集汇总全球机队运行故障数据, 定期发布可靠性报告, 以期在市场上衡量、定位他们产品的可靠性水平。比如, 空客公司会定期发布机载设备的可靠性热力图(Heatmap), 借此展示空客全球机队的机载设备、附件装机使用状况。空客公司对于可靠性指标“平均非计划

拆换时间”的参数计算公式如下:

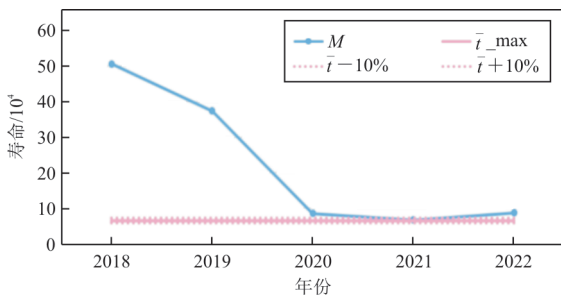
$$M(F) = \frac{\sum Q \cdot t}{\sum N} \quad (1)$$

式中: $M(F)$ 为平均非计划拆换时间, F 为机型; Q 为机队全部装机数量; t 为飞行小时; N 为非计划拆换数量。

相关热力图展示如图2所示, \bar{t} 为全球机队平均非计划拆换时间。



(a) Last 12 Months



(b) Last 5 Years

图2 空客公司机载设备热力图展示的可靠性变化曲线
Fig. 2 Reliability curve shown on Airbus
airborne equipment heat map

3 新兴技术在航空业的创新应用

新材料、新工艺、电驱动对民用飞机的格局再造,以碳纤维增强橡胶为代表的新型高分子、复合材料,新型钛合金材料^[2],在机体结构方面,可以说是对民用飞机整体格局的再造,给民用飞机整个行业、产业生态带来颠覆性的影响,传统高强度钢、不锈钢、铝合金等金属材料等被大规模替代。

低碳排放,多电驱动,超高函道比发动机对民用飞机的推进系统带来深刻变革,GE公司的LEAP发动机、普惠公司的GTF齿轮风扇发动机、罗罗公司的Trent XWB等新型号发动机逐一问世。

信息化、电子化、数字化、智能化技术为机载系统物联、互联提供了基础,大数据、云计算、工业

互联网、空地互联通信技术、实时监控与预测性预警技术等带来飞机系统在役、在线监控手段的提升,基于大数据的预测性维护维修,提高了飞机性能并节省了成本。民航机载电子设备门类繁多,涉及较广的专门技术领域,新技术的迅速发展使机载设备产品更新换代频繁,数字化、集成化、智能化已成为机载电子设备与系统发展的方向^[8]。

支持组件安装的AR技术、基于RFID的定位和追踪零件解决方案、自动化机器人等在航空生产和飞机维护过程中应用,使得劳动效率大幅提高。

BTB电子商务、区块链使MRO,航空公司和OEM能够无缝共享交易和流程,互联网背景下航空产业、行业、商业模式发生了新的突破。比如,市场上新兴的航空电子商务平台“ePlane”,平均每月的服务和零件交易额已经超过了5 000万美元,约有4 000多家航空航天企业在使用ePlane进行商务活动。

4 民用飞机机载设备与新技术的契合

4.1 新技术提升长在役时间、长寿命

无论航司出于经济效益的追求,还是监管局方、社会公众处于对飞行安全的关注,以及飞机主机厂出于市场竞争力提升的需要,机载设备的长寿命,甚至超长寿命,长在翼时间,长维护间隔等,已经是机载附件、设备供应厂商生存的关键,低装机时间、频拆设备的厂商在航司飞机购买选型阶段就会被排除在外而淘汰。寿命也是衡量机载设备运行状况的重要指标,从广义上讲,根据可靠性工程理论,寿命是产品的可靠性关键参数之一,它涉及安全、可靠、经济和其他因素^[9]。比如近几年上市的空客A320neo、A350、波音B787等机型的飞机起落架,大修间隔就由早期的10年提高到了12年,下一个延长目标是15年,飞机主机厂和起落架供应商提出的市场推广理念就是飞机在终生服役期限中,起落架只需要大修一次,这一理念就为航司的起落架维护节约了数亿的维修费用。这些机载设备的在翼时间延长,则依托于在设计制造端的复合材料、增材制造、自动化等新材料、新工艺、新技术的开发、成熟和应用^[10],强度和性能提高后的新型复合材料、钛合金材料使得在翼机载设备耐受腐蚀的时间大幅延长,以高速氧火焰喷涂HVOF为代表的喷涂工艺和技术,使得机载设

备的耐受磨损的时间也显著变长。以空客 A320 和 A350 机型的引气系统管理计算机 BMC 为例,过去五年的平均装机使用时间 MTBUR,新机型 A350 明显高于老机型 A320,这就得益于机载设备技术的升级换代,如表 2~表 3 所示。

表 2 A320 引气管理计算机装机使用情况
Table 2 A320 bleed air management
computer utilization on wing

年份	$Q \cdot t$	N	M	\bar{t}_{\max}	$\bar{t}-10\%$	$\bar{t}+10\%$
2019	4 479 970	183	24 480	32 000	28 800	35 200
2020	3 748 004	162	23 135	32 000	28 800	35 200
2021	6 192 406	230	26 923	32 000	28 800	35 200
2022	8 523 524	271	31 452	32 000	28 800	35 200
2023	11 754 236	307	38 287	32 000	28 800	35 200

表 3 A350 引气管理计算机装机使用情况
Table 3 A350 bleed air management
computer utilization on wing

年份	$Q \cdot t$	N	M	\bar{t}_{\max}	$\bar{t}-10\%$	$\bar{t}+10\%$
2019	2 171 744	28	77 562	32 000	28 800	35 200
2020	1 400 110	56	25 001	32 000	28 800	35 200
2021	1 948 836	42	46 400	32 000	28 800	35 200
2022	2 382 916	30	79 430	32 000	28 800	35 200
2023	2 981 236	24	124 218	32 000	28 800	35 200

4.2 远程监控、远程诊断技术嵌入

早先年代的传统机械操控飞机,在空中飞行

阶段发生故障只能由机上人员机组、乘务、甚至乘客获得或识别,地面人员只有在飞机落地后通过语言交流或飞行记录本、技术记录本、客舱记录本等规定载体才能了解飞机的具体故障信息。这一老旧的信息、数据传递模式已经无法适应现代航空运输的复杂、多变形势,远程监控、远程诊断等新型监控技术便应运而生,基于故障模型的预测性飞机健康监测技术和逻辑触发机制得到了研究应用和实践,对故障定位的准确性和维护决策起到了至关重要的作用^[11],飞机在空中飞行过程中出现的突发故障,不到几秒就会通过自带的 ACMS(飞机状态监控系统)和 ACARS(飞机通信寻址与报告系统)链路下载到地面基站,被地面人员及时获知和监测,紧急情况更可以通过 STACOM 卫星通信系统与飞行机组取得直接联系,协同指导排除飞机故障,或者预先在地面目的地机场提前作好排故、维修准备,飞机一旦落地停靠,即可开工修复故障或缺陷。强大的 ACMS(Aircraft Condition Monitoring System)和 ACARS(Aircraft Communications Addressing and Reporting System)后面是大量各系统机载设备传感技术与数据传输技术与其完美的组合和对接,不仅如此,领先的机载设备 OEM 厂家,甚至可以在全球范围内监控自身产品的在翼运行情况,不时地向航司运营人发送预警、告警等机载设备紧急故障信息。比如,空客 A350 和波音 B787 飞控系统(如图 3 所示)的头号厂家 MOOG,就能通过机载飞控作动器上面的 FCRM(Flight Control Remote Module)模块对其进行远程监控和预警。



图 3 带有远程监控模块的 B787 飞控系统机载设备

Fig. 3 On-board equipment of the B787 flight control system with a remote monitoring module

4.3 机载设备网络化、去中心化态势明显

新一代机载设备的电子化、数字化升级实现了其自身的状态和故障信息的快速传输和获得,但随着这一趋势的流行和普及,一架飞机上的成百上千个机载设备状态数据、信息,已经无法由机上人员或地面人员来全部掌控,航空公司数百架规模机队的海量数据,更不可能由人员来及时、快速处理和应对;另一方面,未来的机载网络将受到在动态通信环境中保持无线连接的弹性以及适应不同流量负载、射频干扰和频繁网络故障的阻碍^[12]。这些矛盾就促使飞机系统、机载设备朝着网络化、信息化和计算机中心化方向发展,以波音

B787和空客A350飞机为代表的新一代电控飞机,均配置了机上网络系统和计算机中央处理系统,与其配套的多达近百万行的软件代码在代替人员对飞机各系统的机载设备进行监控、调节和处理。大幅减轻了人的工作负荷,也降低了人为差错、人为因素的发生概率。同时,通过信息化飞机管理系统来管理和处理大量的数据,也将提高航空设计、制造、使用和维修的管理水平和效率,提高综合保障能力^[13]。波音B787全电飞机的机载无线网络设备配置如图4所示,采用非常方便的802.11通用网络传输协议,不但减少了大量传统的有线电视使用,而且取消了传统纸质的数据记录和传递媒介。

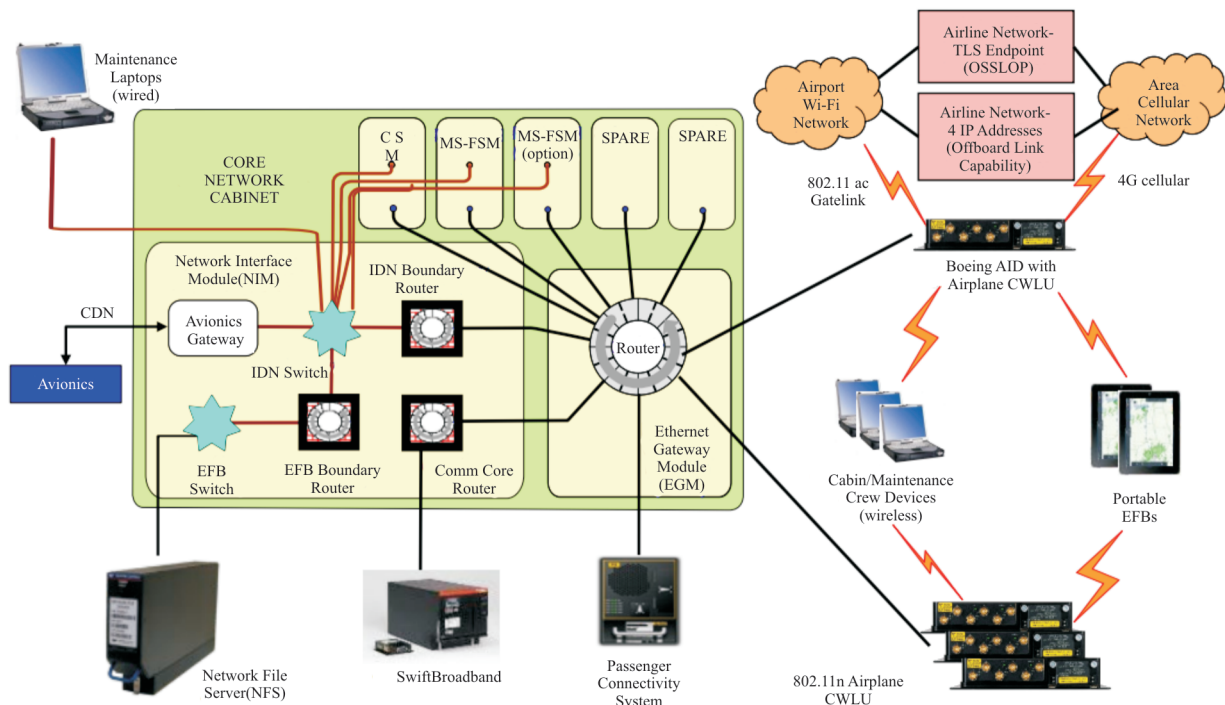


图4 波音B787飞机的机载无线Wi-Fi网络设备

Fig. 4 On-board wireless Wi-Fi network equipment on Boeing B787

5 宏观政策环境挑战机载设备的性能与技术

5.1 碳排放、碳中和概念制约老旧技术与工艺

航空活动会直接排放温室气体(主要是 CO_2);另一方面,排放物中的一部分其他物质(主要为氮氧化物- NO_x)影响诸如臭氧和甲烷等辐射活性气

体。大气的辐射平衡被上述排放物扰乱之后,气候系统则会在新的温度上达到平衡,由此,航空排放物便成为气候变化的推手^[14]。中国承诺2030年达到碳达峰,2060年实现碳中和,民众健康环保、生态保护意识,政府碳排放国际公约限制等,使新型号、更省油、更安静的喷气飞机需求呼之欲出、期望增加,在未来十年,预计新飞机需要减少4亿多立方吨的二氧化碳(CO_2)和其他温室气体排放量,才能减缓后期碳排放指标的压力。

新冠疫情冲击、全球经济增长放缓、航空公司营收不佳、债务风险升高,航空公司对飞机维护、机载设备的维修预算也在缩减。随着现有飞行员和训练有素的航空维修技术人员数量与机队扩张需求之间的差距扩大,劳动力成本上升压力也使航司的负担增加,作为最大的两个运营成本劳动力和燃料几乎占了航司运营总成本的一半,而燃油效率与空气动力学效率直接相关,因此,空气动力学性能好的飞机,燃油效率将相应提高,从而实现低排放并降低运营成本^[15];航司不但对燃油消耗严格控制,而且更加钟情、期待更节油的飞机和机载设备^[16]。

5.2 噪声限制对民用飞机出口管制的约束

长期以来,噪声问题一直是困扰民航客机和航空运输的一个大难题,也是限制民航产业向环保人文方向发展的一个瓶颈,无论是机上乘客、机组人员,还是地面普通民众,对飞机降噪的呼吁和期求从未间断,但社会公众的呼声和期望并不一定能在一定期限内获得噪声改善效果。因此,各国政府监管机构、局方的行政约束就成了缓解矛盾的有效措施,早在 20 世纪 60—70 年代,美国联邦航空管理局(FAA)就发布了噪声认证与资质的联邦航空条例 FAR36,国际民航组织(ICAO)也制定了相似要求 ICAO 附录 16 等^[17],在此机制下的航空器噪声认证要求和机场规定^[18]、排放适航审定条款、噪声出口限制条款等等,就对整机和机载设备的负面性能提出了新要求和新规范。机载设备、部附件厂家不得不在设计、取证、制造等各个环节认真考虑这些新变化和新挑战,同时,也必须思考应对设备装机运行后出现的噪声问题。比如空客 A350 飞机,在飞行降落阶段,就被乘客反映来自客舱底板区域的类似“狗叫声”的疑虑和困扰,经过系统分析和判断,这一噪声的来源应该是飞机液压系统的动力传输组件 PTU 作动时发出的声音。

5.3 经济效益收窄催生经济型机载设备畅行

航空燃料油价上涨、“新冠”疫情冲击、机票价

格竞争加剧等,导致航空公司运营的利润空间越来越窄,迫使航司对整机购买、设备选型等的议价考量更加挑剔^[19],整机、包括机载设备的采购成本、后期持续性的维护费用等^[20],都是航司采购评标的关键影响因素。其次,航司机队规模的快速扩张,也使边际效应、边际成本增加明显,最终导致全面成本的上涨^[21]。价格低、轻维护,甚至免维护的机载设备顺应了行业市场需求,也催生了机载设备销售、维修等新商业模式的诞生,比如,按小时收费维修的 PBH,被 OEM 原厂家捆绑的售卖维护一体化的包修,寄售等。

6 新一代民用飞机机载设备技术趋势

6.1 电驱动、电嵌入、机电一体化技术加速应用

从前述宏观外部环境分析结果来看,无论是绿色发展、环保的政策导向,还是经济发展竞争的必然结果,或是社会活动、民众需求的呼应,再加上技术创新的突破,都对机载设备的技术发展和进步起到了良好的促进作用,机载设备的动力、作动由传统的油气媒介转变为电驱动、电作动趋势明显,广义上的电驱动,还包括机载设备的信息传输和自动控制机理的实现,设备信息参数的反馈和作动指令的下达也都是靠电子化来驱动的^[22];电驱动的需求拉动了机载设备朝着机电一体化方向迈进,集成设计、集成优化的各种方法和技术也再一次在航空领域发挥了关键作用^[23];大型飞机的设计衍生了更复杂的系统,或系统系统,随着系统和接口数量的不断增加,对机载设备的应变挑战也更大^[24];在应对复杂系统的需求和挑战方面,数字孪生和数字主线为缓解问题提供了可能^[25];网络化、数字化、计算机化促使机电一体化又上升了一个台阶,那就是芯片与软件程序的电嵌入,把机载设备的信息化、智能化推向了更高的层次^[26]。在动力装置方面,电推进技术的研究与应用也日趋活跃,分布式电推进被广泛认为是一项航空领域的颠覆性技术,强调不同学科间的交互作用给飞机气动、推进、结构以及控制等性能带来实质性提升^[27],对关联机载设备的电驱动趋势起到了推

动作用。去掉发动机引气系统的波音 B787 飞机空调舱如图 5 所示,采用两部电驱动的空气压缩机 CAC 为空调系统供气,与 ACM 空气循环机、热交换器等设备高度集成在一起。波音 B787 无引气、

全电飞机的设计,颠覆了传统飞机的引气构架,去掉了大量金属管路和设备,防冰系统取代引气的是电加热。

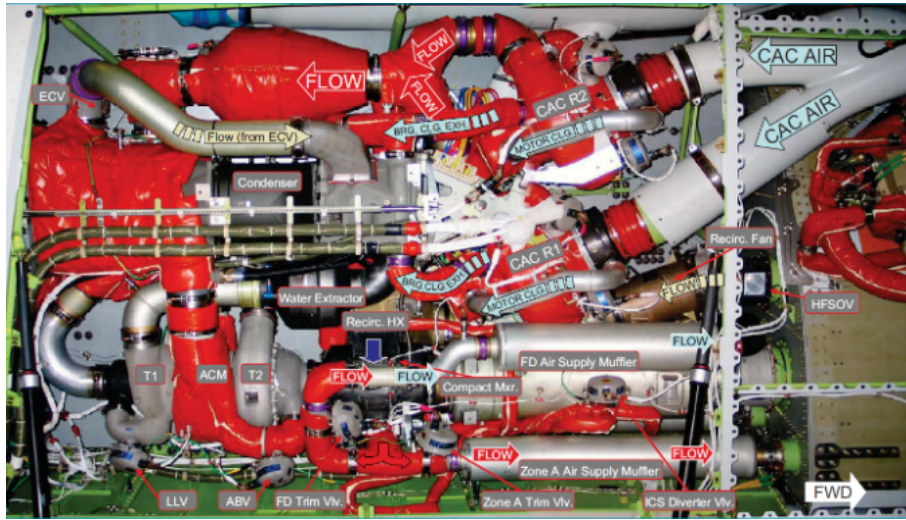


图 5 波音 B787 飞机空调舱高度集成的设备

Fig. 5 Boeing B787 aircraft air-conditioning cabin highly integrated equipment

6.2 BITE 自检、程序绑定、软件嵌入技术扩展

传统机械式的机载设备自身状态、故障等信息,只能靠外观目视检查、功能测试、或者拆解深度检查等才能发现和定位,而新一代智能机载设备,依靠自带程序、软件即可完成自我检测和诊断^[28],在机载网络支持下,对自适应控制也起到良好的协同作用^[29],甚至不用拆解,便可获知设备内部的状态,这些新技术的嵌入就为机载设备的数字化、智能化奠定了基础。电子归零校准广泛应用于民用飞机 BIT 设计,通过更换后的校准程序,减少了控制环节的整体误差;故障隔离技术已经是民用飞机 BIT 的重要组成部分^[30]。针对柔性机翼和智能蒙皮的需要,智能蒙皮微机电系统,面向 IMA 的机载综合处理与网络的综合模块化航电系统(IMA)等,重点产品与共性关键技术已纳入中国制造 2025 的规划体系里面^[1]。

6.3 主题、情景可变式机载客舱设备顺应新潮流

以空客为代表的欧洲乘客机上空间、乘机体验引领了新一代民航客机的发展趋势和潮流,也

助长了空客对波音在民用飞机市场上的赶超,空客的机上体验概念充分释放了科技以人为本的新发展理念,也顺应了新生代乘客对于飞行体验的追求,大空间、可社交、个性化、场景式等乘机体验在购票阶段便会得到悉心挑选^[31],这些新消费观念和需求倒逼机载客舱设备向着高端化、娱乐化、社交化方向发展,机上 Wi-Fi,空地互联等服务和机载设备已经必不可少,乘机不仅仅是一段旅行,更是一场娱乐和社交活动,客舱也不再是一个封闭的静态空间,而是一个动态的工作、社交活动场所。在国际航站楼全球化趋势的支持下,整个飞行体验正在发生变化,并将继续发生变化,航空公司需要考虑的不仅仅是座位^[32]。飞机客舱作为一个人流相对密集的场所,在电子商务 C 端,自然大有文章可作,比如,民用飞机娱乐系统的重要供应商泰雷兹 THALES 公司开发的 AVANT 系统、Inflyt360 平台等功能已经与上述乘机体验、消费需求等高度契合。航空公司需要继续在座位和机上产品方面进行创新,以保持忠诚度并占领市场份额,并赢得利润丰厚的企业客户支出^[33]。IT 行业新兴技术 VR、人工智能等在未来智慧客舱设想中的跨界应用^[34],也将使机上管理、机上服务更加精准和周到。

7 结束语

宏观层面分析结果显示外部环境在政策、经济、社会等三个宏观维度均对民用飞机整机和机载设备的性能和研制产生了宏观深远的影响,而技术维度的发展进步则在微观层面为响应这些影响和实现新生需求,提供了可能性和途径。当代先进飞机的飞行控制技术通过提高安全性、减少飞行机组工作量、提高燃油效率、提升乘客舒适度等手段,彻底改变了航空业的面貌和业态^[35]。这也为技术依存度极高的航空企业提供了突破发展的契机,民用飞机国产化是国内机载设备厂家冲出重围的良好突破口。

机载设备的电驱化、数字化、网络化、智能化将在未来很长一段时期主导行业发展方向和产业格局^[36], Open-fan, Hybrid-electric 混合动力装置^[37-38]的出现,以及电动垂直起降 eVTOL(Electric Vertical Takeoff and Landing)技术^[39]的开发应用,也将使整机系统向全电化模式发展。自主研发、应用新技术是机载设备厂家提升竞争力的核心,在这一推陈出新、产业迭代的时代背景下,机载设备开发、应用的生命周期也在加速变化,规划和管理机载设备高效开发过程的便捷方法要与整合适航法规要求和认证相关的所有活动,进行系统性的、完整性的考量^[40]。民用飞机装备国产化既有机遇,也面临挑战,任重而道远,隐藏在技术背后的厂商强强联手、兼并、重组、整合等是实现技术突破的捷径。

参考文献

- [1] 王吉星. 航空航天装备[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2018.
WANG Jixing. Aerospace equipment [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2018. (in Chinese)
- [2] 原梅妮. 航空工程材料与失效分析[M]. 北京: 中国石化出版社, 2014.
YUAN Meini. Aeronautical engineering materials and failure analysis [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2014. (in Chinese)
- [3] 刘国春, 郭荣辉, 秦文峰. 民用飞机复合材料结构制造与维修[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.
LIU Guochun, GUO Ronghui, QIN Wenfeng. Manufacturing and maintenance of composite structures for civil aircraft [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020. (in Chinese)
- [4] BHAT B N. Aerospace materials and applications [M/OL]. (2018-08-21) [2024-04-28]. https://www.researchgate.net/publication/325303474_Aerospace_Materials_and_Applications.
- [5] GRADL P R, MIRELES O R, PROTZ C S, et al. Metal additive manufacturing for propulsion applications[M]. US: George C. Marshall Space Flight Center, 2022.
- [6] 蔡喁, 郑征, 蔡开元, 等. 机载软件适航标准 DO-178B/C 研究[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013.
CAI Yong, ZHENG Zheng, CAI Kaiyuan, et al. Research on airborne software airworthiness standard DO-178B/C [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2013. (in Chinese)
- [7] 吕鸿雁, 郝建平. 航空动力装置[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
LYU Hongyan, HAO Jianping. Aviation power plant [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017. (in Chinese)
- [8] POST J. The next generation air transportation system of the United States: vision, accomplishments, and future directions[J]. Engineering, 2021, 7(4): 427-430.
- [9] QIAN W G, MA H Y, XIAO C. An airborne electronic equipment life prediction method based on normal distribution fitting[J]. International Journal of Computer and Electrical Engineering, 2013, 135: 222-225.
- [10] WANG F. Advancements in aerospace manufacturing: the path to efficiency, innovation, and growth [J]. Aeronaut Aerospace Engineering, 2023, 12: 315.
- [11] LI W Q, HOU N, SUN X K. Method for predicting failure rate of airborne equipment based on optimal combination model [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021: 5199982.
- [12] SKLIVANITIS G, GANNON A, TOUNTAS K, et al. Airborne cognitive networking: design, development, and deployment[J]. IEEE Access, 2018, 6: 47217-47239.
- [13] 马银才, 张兴媛. 航空机载电子设备[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
MA Yincui, ZHANG Xingyuan. Aviation airborne electronic equipment [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (in Chinese)
- [14] 魏建, 陈振坤. 飞机系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
WEI Jian, CHEN Zhenkun. Aircraft systems [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese)
- [15] BANAKAR P. Analysis of wing (NACA 0012 aero foil) with and without winglets to enhance aerodynamic efficiency [J]. Aeronaut Aerospace Engineering, 2022, 11: 286.
- [16] MEREDITH C, JOSHUA H. Fuel effects on operability of aircraft gas turbine combustor [EB/OL]. [2024-04-28]. https://fanyi.baidu.com/mtpe-individual/multimodal?query=%E8%88%AA%E7%A9%BA%E8%88%AA%E5%A4%A9%E8%A3%85%E5%A4%87&lang=zh2en&ext_channel=Aldtype.
- [17] 拉米什·阿加瓦尔. 绿色航空[M]. 刘莉, 译. 北京: 北京理工大学出版社, 2019.

- AGARWAL R. Green aviation [M]. Translated by LIU Li. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2019. (in Chinese)
- [18] SADEGHIAN M, MOFIDGORJI B. Technologies for aircraft noise reduction: a review [J]. *Journal of Aeronautics and Aerospace Engineering*, 2020, 9: 1-10.
- [19] GUZHVA V S, RAGHAVAN S, D' AGOSTINO D J. Aircraft leasing and financing: tools for success in international aircraft acquisition and management [M]. Amsterdam: Elsevier, 2019.
- [20] GONCHARENKO A. Development of a theoretical approach to the conditional optimization of aircraft maintenance preference uncertainty [J]. *Aviation*, 2018, 22(2): 40-44.
- [21] 理查德·布洛克利, 史维. 环境影响与制造 [M]. 熊克, 译. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.
- BLOCKLEY R, SHYY W. Environmental impact and manufacturing [M]. Translated by XIONG Ke. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016. (in Chinese)
- [22] ZHAO Yongsing. Aircraft systems unraveling the complex blend of technology and engineering harmony [J]. *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering*, 2023, 12(1): 326-335.
- [23] 理查德·布洛克利, 史维. 系统工程 [M]. 唐胜景, 译. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.
- BLOCKLEY R, SHYY W. Systems engineering [M]. Translated by TANG Shengjing. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016. (in Chinese)
- [24] SARAN V H, MISRA R K. Advances in systems engineering select proceedings of NSC 2019 [EB/OL]. [2024-04-28]. https://www.researchgate.net/publication/3487-13157_Advances_in_Systems_Engineering_Select_Proceedings_of_NSC_2019_Select_Proceedings_of_NSC_2019.
- [25] FLUMERFELT S, SCHWARTZ K G, MAVRIS D. Complex systems engineering: theory and practice [EB/OL]. [2024-04-28]. <https://arc.aiaa.org/doi/book/10.2514/4.105654>.
- [26] 曹全新. 机载信息系统的应用研究及发展趋势初探 [J]. *民用飞机设计与研究*, 2014(1): 72-76.
- CAO Quanxin. Application research and trend preliminary prediction about on-board information system [J]. *Civil Aircraft Design & Research*, 2014(1): 72-76. (in Chinese)
- [27] 黄俊. 分布式电推进飞机设计技术综述 [J]. *航空学报*, 2021, 42(3): 624037.
- HUANG Jun. Survey on design technology of distributed electric propulsion aircraft [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(3): 624037. (in Chinese)
- [28] 理查德·布洛克利, 史维. 飞行器设计 [M]. 刘莉, 译. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.
- BLOCKLEY R, SHYY W. Aircraft design [M]. Translated by LIU Li. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016. (in Chinese)
- [29] YUCELEN T, CALISE A J. Derivative-free adaptive control [EB/OL]. [2024-04-28]. <https://arc.aiaa.org/doi/book/10.2514/4.107023>.
- [30] SHEN S L, MA L L. Research on the built-in test design of civil aircraft flight control system [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 252(1): 012010.
- [31] RAYMER D. Aircraft design: a conceptual approach, sixth edition [M]. Washington, DC: AIAA, Inc., 2018.
- [32] Skift Report. The future of the aircraft cabin-tracking trends and debunking myths [R/OL]. [2024-04-28]. <https://skift.com/wp-content/uploads/2014/09/23-SkiftReport-The-Future-of-the-Aircraft-Cabin.pdf>.
- [33] PAUL S, DAVID S. Aircraft cabin configuration trends [EB/OL]. [2024-04-28]. <https://vallair.aero/wp-content/uploads/2022/02/Aircraft-Cabin-Configuration-Trends-Aviation-Week.pdf>.
- [34] 李静. 智慧客舱, 科技向善—计算机网络技术在现代客舱管理中的前景及应用 [EB/OL]. (2021-10-29) [2024-04-28]. http://att.caacnews.com.cn/zsfw/kjrs/202110/t20211029_59524.html.
- LI Jing. Smart cabin, science and technology for kindness: prospects and applications of computer network technology in modern cabin management [EB/OL]. (2021-10-29) [2024-04-28]. http://att.caacnews.com.cn/zsfw/kjrs/202110/t20211029_59524.html. (in Chinese)
- [35] WANG H J. Revolutionizing aviation industry: exploring advanced aircraft flight control systems [J]. *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering*, 2023, 12(1): 302-313.
- [36] 任宝平, 李创. 机载系统的智能架构及功能分析 [J]. *航空工程进展*, 2023, 14(4): 149-157.
- REN Baoping, LI Chuang. Analysis on intelligent architecture and function of airborne system [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2023, 14(4): 149-157. (in Chinese)
- [37] SINGH N. Another concept for a hybrid-electric plane [J]. *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering*, 2021, 10(1): 1-2.
- [38] CANDERATZ M. Aeronautics and aerospace development: shaping the future of travel, communication, and exploration [J]. *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering*, 2020, 12(2): 1000312.
- [39] JEON J N. Aerodynamic performance and the future of electric vertical takeoff and landing (eVTOL) technology [J]. *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering*, 2011, 11(2): 290-301.
- [40] VILJOEN D, HOLM J. A life cycle model for the development of airborne electronic equipment [J]. *South African Journal of Industrial Engineering*, 2017, 28(3): 1-14.

(编辑: 马文静)