

飞行汽车专利态势与技术创新演进研究

韩 博, 周冉冉

(国家知识产权局专利局专利审查协作河南中心, 郑州 450000)

摘 要: 飞行汽车作为构建未来立体化城市交通体系的关键载体,其技术正处于从爆发式创新向工程化落地与商业化攻坚转型的关键窗口期。研究基于多维专利数据,通过构建复合检索式获取经同族合并后的6499项发明专利申请,建立包含5个一级、12个二级、34个三级分支的技术分支体系,对专利申请数据进行系统标引与重点专利筛选,从申请态势、关键技术、演进脉络及未来趋势等方面进行系统分析。研究发现:①飞行汽车技术演进呈现奠基期(2015年之前)、爆发期(2015—2022年)和攻坚期(2023年至今)三个发展阶段,专利申请量逐步上升,技术路线持续收敛,技术成熟度显著提升。②全球技术创新主体呈现中美双主导格局,且中国创新主体数量优势明显,高校支撑体系完善,企业类主体在全球排名中位居前列。③技术重心已从早期整机构型与气动布局转向飞行控制与智能驾驶,后者以30%的申请占比成为专利布局最活跃的领域。④动力与能源系统、安全冗余与适航保障两大分支虽当前申请量占比相对靠后,但近年专利申请增速显著提升,反映出行业正聚焦攻克续航能力与运行安全这两大制约商业化的核心瓶颈。基于上述发现,研究指出未来专利竞争将聚焦于预测性健康管理、智能容错控制、高动态协同感知与决策规划算法、高能量密度航空动力电池三大方向。研究为产业创新主体构建知识产权壁垒、制定专利战略提供客观数据支撑与决策参考。

关键词: 飞行汽车; eVTOL; 低空经济; 专利分析

中图分类号: G306; V275; U469.79

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)04-0839-11

Patent Situation and Technological Innovation Evolution of Flying Cars

HAN Bo, ZHOU Ranran

(Patent Examination Cooperation (Henan) Center of the Patent Office, CNIPA, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Flying cars are a key carrier for future three-dimensional urban transportation systems. The technology is in a critical transition period from explosive innovation to engineering implementation and commercialization. Based on multi-dimensional patent data, this study obtains 6499 invention patent applications after simple family merging by constructing a composite retrieval formula. A three-level technical branch system is established, including 5 first-level, 12 second-level and 34 third-level branches. Patent application data are systematically tagged and key patents are screened. Systematic analysis is conducted from the aspects of application situations, key technologies, evolution trajectories, and future directions. Four findings are obtained. First, the technology evolution of flying cars shows three development stages: the foundation period (before 2015), the outbreak period (during 2015–2022) and the crucial period (from 2023 to the present). The number of patent applications is gradually increasing, the technical route continues to converge, and the technical maturity is significantly improved. Second, the global innovation landscape is dominated by China and the United States. Chinese innovators hold a clear

收稿日期: 2026-03-10

修回日期: 2026-04-10

接受日期: 2026-04-16

作者简介: 韩 博(1987–),男,助理研究员,硕士,主要从事自动控制、人工智能方向研究

通信作者: 周冉冉(1991–),女,中级知识产权师,硕士,主要从事光学检测、人工智能方向研究, E-mail: 1039059122@qq.com

引用格式: 韩博,周冉冉. 飞行汽车专利态势与技术创新演进研究[J]. 河南科学, 2026, 44(4): 839–849.

Han B, Zhou R R. Patent situation and technological innovation evolution of flying cars[J]. Henan Science, 2026, 44(4): 839–849.

numerical advantage, with a well-established university support system, and Chinese corporate entities rank high globally. Third, the technology focus has shifted from early airframe configuration and aerodynamic layout to flight control and intelligent driving, and the latter with 30% of applications has become the most active area of patenting layout. Fourth, although the two branches of power and energy system, safety redundancy and airworthiness guarantee account for a relatively low proportion of current applications, the growth rate of patent applications has increased significantly in recent years, which indicates that the industry is concentrating on overcoming the two core bottlenecks restricting commercialization, namely, endurance and operational safety. Based on these findings, this study identifies three major directions for future patent competition : predictive health management and intelligent fault-tolerant control, high-dynamic cooperative perception and decision-making planning algorithm, and high-energy-density aviation power battery. This research provides objective data support and decision-making references for industrial innovators to build intellectual property barriers and formulate patent strategies.

Key words: flying car; eVTOL; low-altitude economy; patent analysis

0 引言

城镇化进程加速导致城市交通压力持续增大，地面交通系统逐渐逼近容量极限。在此背景下，向低空拓展发展空间、构建三维立体化出行体系，成为突破地面交通瓶颈的战略路径。飞行汽车凭借其可绕开地面拥堵、实现点对点高效通达的核心优势，被广泛认为是构建未来立体化城市交通体系的关键载体^[1]。

国家层面高度重视包括飞行汽车在内的低空经济发展。2021年,《国家综合立体交通网规划纲要》首次将低空经济纳入国家级规划;2023年,中央经济工作会议正式将低空经济列为战略性新兴产业;2024—2025年,《政府工作报告》连续两年明确提出要积极打造并推动低空经济安全健康发展。

飞行汽车的兴起,得益于新能源、人工智能、先进航空等关键技术的交叉融合与工程化突破。目前,飞行汽车已从早期的实验性探索,逐步成为国家推动低空经济发展、构建未来立体智慧交通体系的重要抓手。尽管飞行汽车产业热度持续升温,技术迭代发展迅速,但现有研究尚缺乏从专利视角对全球技术竞争格局和演进脉络进行系统性、结构化的梳理与分析。专利信息作为技术创新的重要产出形式,能够深刻地揭示技术的发展脉络、竞争态势与未来趋势。因此,本研究基于全球飞行汽车专利数据,通过对专利申请态势、关键技术、演进脉络及未来趋势进行系统分析,旨在厘清全球飞行汽车技术发展的脉络及技术格局,揭示其技术演进的内在逻辑与阶段性特征,以期为我国飞行汽车产业的创新主体识别技术风口、优化专利布局、规避“技术出海”风险提供客观的数据支撑与决策参考。

1 飞行汽车定义及专利数据检索

1.1 飞行汽车定义

目前,飞行汽车尚无统一定义,基于理论研究成果及产业实践,飞行汽车的定义有狭义和广义之分。狭义上是指一种兼具地面行驶与空中飞行能力,并在两种模式间切换的陆空两栖交通工具^[2-5]。广义上不仅包括陆空两栖的狭义飞行汽车,更涵盖仅具备飞行能力的电动垂直起降飞行器(Electric Vertical Take-off and Landing, eVTOL)^[6-9]。为全面分析飞行汽车技术发展脉络,本文采用其广义定义。

1.2 专利数据检索

采用系统化专利分析方法,依托商业专利数据库 HimmPat,聚焦发明专利申请。检索策略结合国际专利分类号(International Patent Classification, IPC)与多维度关键词构建复合检索式,核心分类号包括 B60F5/02(可转换为飞机的在不同介质上或介质中行驶的车辆)、B64C29/00(垂直起降的飞机,如 VTOL)、B64D27/30(以电动动力装置为特征的飞机)等;关键词涵盖“飞行汽车”、“垂直起降”、“陆空两栖”、“flying car”“eVTOL”、“urban air mobility”等。截至 2025 年 12 月 31 日,共检索获得经简单同族合并后的专利族 6499 项,经人工标引后作为分析基础。

1.3 技术分支划分

在系统梳理学术研究成果^[10-12]和产业技术路线^[6,13-15]的基础上,构建了飞行汽车技术的三级技术分支体系,具体参见表 1。

该体系以技术功能与工程实现逻辑为划分依据,5 个一级技术分支相互耦合,全面覆盖了飞行汽

表1 飞行汽车三级技术分支体系

Tab.1 Three-level technical branch system of flying cars

一级技术分支	二级技术分支	三级技术分支
整机构型与气动布局	升力提供方式	多旋翼、升力巡航复合、倾转动力
	推进与操纵方式	分布式电推进、推力矢量控制、常规气动舵面
陆空两栖与模块化系统	陆空一体化	机翼折叠收纳、底盘升降、驱动模式切换
	模块化分体	飞行模块与底盘对接、能源信息快速连接、多功能底盘
动力与能源系统	电推进系统	高功率密度电机、电机控制与驱动、电推进系统热管理
	能源存储与供给	高能量密度电池、混合动力、燃料电池、能源管理与分配
飞行控制与智能驾驶	飞行控制系统	多模态飞行控制算法、容错控制与重构、执行机构
	智能感知与决策	环境感知融合、空地一体路径规划、自主起降与巡航
	通信与导航	低空数据链与V2X、高精度融合导航
安全冗余与适航保障	安全与应急系统	冗余系统、主动防撞与避障、故障预测与健康管理
	适航性与验证	符合性设计方法、虚拟验证与试飞技术
	轻量化与材料	轻量化结构设计、先进复合材料应用

车从设计、研发到运营的全链条关键技术领域。在此基础上进一步细化出12个二级技术分支,并进一步拆解为34个三级技术分支,形成层次清晰、边界明确的技术图谱。

2 全球飞行汽车专利态势分析

2.1 全球专利申请趋势分析

自1917年“飞行汽车之父”Glenn Curtiss制造了第一架飞行汽车Autoplane以来,飞行汽车技术不断发展,相关专利申请趋势持续走高。全球近25年专利申请趋势如图1所示,由于发明专利申请存在一定的公布周期,2024—2025年的专利数据可能存在不完整情况。

基于全球近25年专利申请数据,参考技术发展、政策导向与市场需求等多维度证据,可将飞行汽

车技术划分为三个发展阶段。

第一阶段(2015年以前):奠基期(技术萌芽阶段)。此阶段专利申请量整体偏低且保持平稳,反映出行业仍处于概念验证阶段。技术路径较为发散,未形成明确的主流技术方向,同时相关政策支持存在空白,缺乏专门的适航审定框架,商业化发展逻辑尚未形成^[2,16]。

第二阶段(2015—2022年):爆发期(技术快速发展阶段)。专利申请量呈指数级增长,标志着飞行汽车从概念走向工程化落地。随着电池、电机技术的不断进步,飞行汽车的实用性显著提升^[2,17-19]。适航审定方面,全球三大民航局欧洲航空安全局(European Union Aviation Safety Agency, EASA)、美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)与中国民用航空局(Civil Aviation Administra-

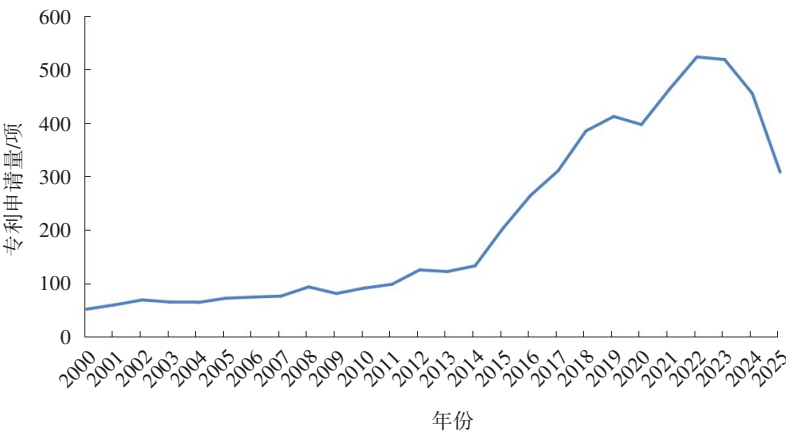


图1 2000—2025年全球飞行汽车专利申请趋势

Fig.1 Trends in global flying car patent applications from 2000 to 2025

tion of China, CAAC) 分别推出适配 eVTOL 的审定框架。2022 年, 亿航 EH216-S 获全球首张型号合格证 (Type Certificate, TC), 实现历史性突破^[20]。技术突破与适航审定完善相互促进, 推动技术加速发展。

第三阶段 (2023 年至今): 攻坚期 (技术整合与务实阶段)。专利申请增速放缓, 表明行业已从大规模技术研发逐步进入技术验证与商业化攻坚阶段, 重点转向适航取证、基础设施配套与运营模式构建等方面, 以推动飞行汽车从技术成熟向规模化应用转型^[6,21]。

2.2 技术来源国和技术目标国

统计相关专利申请人所在国家或地区可知, 主要技术来源国为中国、美国、日本、德国等 (图 2)。

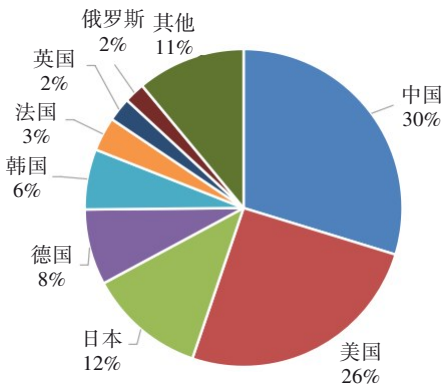


图2 飞行汽车技术来源国及其专利申请数量占比
Fig.2 Source countries of flying car technology and the proportion of their patent applications

从技术来源看, 中美两国专利申请数量共占全球专利申请数量的 56%, 在飞行汽车技术研发领域构成绝对主导。德、日、韩等传统汽车和航空强国专利申请量占比合计不足 30%。这一格局的形成, 核心驱动力在于国家战略引导下的产业发展路径差异。中国依托新能源汽车全产业链优势, 将“车规级”三电系统迁移应用至 eVTOL 领域, 实现“航空标准+汽车产业链”的融合创新^[22]; 美国则以 Uber、Joby 等科技企业为牵引, 聚焦城市空中交通商业化场景, 优先推动适航审定标准完善与运营模式创新, 依托其航空工业基础保持技术领先。

从申请趋势看, 中国专利申请量在 2015 年后加速攀升, 并于 2020 年反超美国, 2021—2022 年达峰值, 这一时间节点与《交通领域科技创新中长期发展规划纲要 (2021—2035 年)》将“飞行汽车”纳入国家战略规划高度契合, 显示出政策引导对技术创新的强劲驱动。美国专利申请量在 2022 年后增速趋缓,

反映早期资本密集投入阶段边际效益递减。综上, 飞行汽车技术地域布局的转移, 本质上是产业发展逻辑的重构。

为深入分析飞行汽车主要目标市场, 对相关同族专利按照单件进行梳理, 统计每件专利的申请目标国家或组织, 图 3 为飞行汽车主要技术目标国分析。

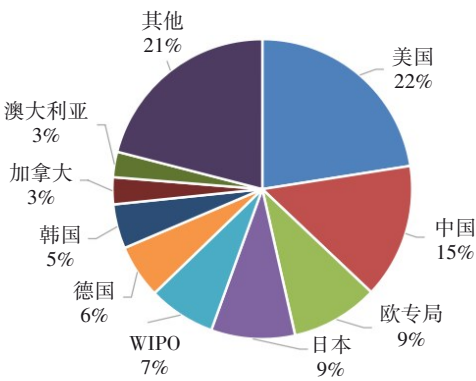


图3 飞行汽车技术主要目标国及专利数量占比
Fig.3 Main target countries of flying car technology and the proportion of patent numbers

飞行汽车专利申请目标主要集中在美国、中国、欧洲和日本四大核心区域。美国是全球唯一一个已建立载人 eVTOL 商业运营许可的国家, FAA 通过《先进空中交通国家战略 (2026—2036)》系统推进发展。中国则是全球首个将“飞行汽车”写入国家级规划, 并完成首张 TC 证颁发的国家。企业仍以聚焦核心市场为主, 优先确保在美、中、欧三大支柱市场获得专利法律保护, 并未进行泛化的全球布局, 这也符合当前飞行汽车行业仍处于商业化攻坚阶段的发展现状。

2.3 全球主要创新主体

进一步围绕全球飞行汽车技术的主要创新主体展开深入分析。具体参见图 4。

在全球飞行汽车技术发明专利申请量排名前 20 的创新主体中, 中国创新主体占据 8 个席位, 其中广东汇天航空航天科技有限公司的专利申请量稳居榜首, 远超排名第二的丰田汽车公司。

依据创新主体的背景属性, 可将排名前 20 的创新主体划分为四类。第一类是专业飞行汽车创新公司, 以广东汇天、佛山市神风航空、深圳仰望智能为代表, 其聚焦核心技术研发, 商业化导向明确。第二类是传统跨国车企, 包括丰田、大众、现代、日产、马自达等, 他们依托自身在汽车制造领域的技术积累与供应链优势, 逐步向飞行汽车领域延伸布局, 实现

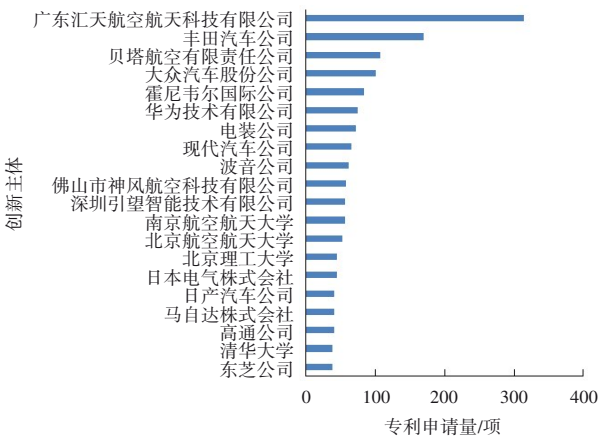


图4 全球飞行汽车创新主体前20名

Fig.4 Top 20 Global Flying Cars Innovation Entities

技术跨界融合。第三类是传统飞机制造企业,以波音公司为代表,凭借其航空技术积淀参与研发。第四类是高校与科研院所,包括南京航空航天大学、北京航空航天大学、北京理工大学、清华大学,其在航空航天、智能控制等领域具备深厚的理论积累,为基础研究提供重要支撑。

整体格局显示,中国创新主体在飞行汽车技术领域已形成显著领先优势,呈现“企业主导、高校支撑”的鲜明特征。企业类创新主体在全球排名中位居前列,高校及科研院所排序相对靠后,表明飞行汽车技术具有典型的市场驱动创新特征,技术布局紧密围绕商业化应用展开,聚焦工程化落地和产品迭代,而高校和科研院所侧重理论研究与人才培养,为产业创新提供基础技术支撑与人才保障。

3 飞行汽车关键技术分析

3.1 技术分支占比及申请趋势

针对飞行汽车三级技术分支体系,进一步深入分析各一级技术分支的专利申请占比情况,具体如图5所示。

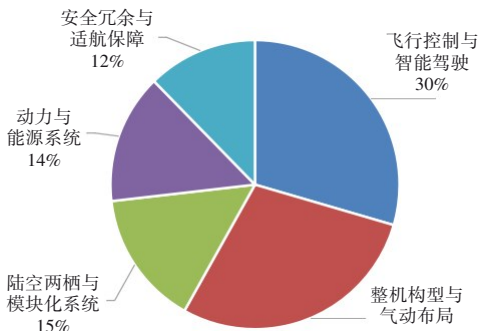


图5 一级技术分支专利申请数量占比

Fig.5 Proportion of patent applications for first-level technical branch

飞行汽车各技术分支申请量占比深刻反映当前产业发展的核心逻辑与技术演进阶段。飞行控制与智能驾驶以30%的占比高居首位,这源于智能化已成为驱动本轮技术革命的核心引擎,作为飞行汽车的“大脑”,其控制精度与安全冗余是适航认证的关键门槛,叠加政策对智能驾驶技术的强力引导,使其成为专利布局的最激烈战场。整机构型与气动布局技术申请体量同样较大,其作为决定飞行性能与产品形态的物理载体,行业仍在围绕多旋翼、倾转动力等主流构型进行密集研发。陆空两栖与模块化系统技术申请量占比15%,处于居中位,其主流技术主要包括“一体式”与“分体式”两个方向,该领域技术创新直接决定飞行汽车能否融入现有城市交通基础设施。值得注意的是,动力与能源系统(申请量占比14%)和安全冗余与适航保障(申请量占比12%)这两项技术的申请量占比相对靠后,但这并不代表其重要性不足,相反,这两大分支恰恰是当前制约飞行汽车商业化的核心瓶颈,前者受制于电池能量密度的物理突破难度,后者涉及贯穿全生命周期的系统工程,均因技术门槛高、研发周期长而导致专利产出速度较慢。但近年来这两大技术分支的专利申请增速明显提升,这正是行业开始集中力量针对性研发的有力信号。

3.2 关键技术及重点专利

为深入分析各技术分支重点专利技术,本文主要针对专利有效性、维持年限、同族数量、引证与被引证情况、权利要求、转让许可等指标,采用层次分析法实现专利价值评估^[23-24],并依此筛选各技术分支的重点专利。

3.2.1 整机构型与气动布局

该分支是飞行汽车研发核心,决定了升力产生、推进方式及飞行稳定性。主流构型分为多旋翼、升力巡航复合、倾转动力三大技术路径,分布式电推进技术则是上述构型的共性技术基底。

多旋翼构型通过多个旋翼的协同工作实现垂直起降与姿态控制,具有结构简单、悬停效率高的特点。如专利US5141173A^[25]通过在地面轮边设置压力喷射装置,并结合垂直安装的多旋翼系统,使车辆具备地面驱动和空中升力功能,实现了飞行姿态精准控制;专利US3184183A^[26]采用前后对称布置的双旋翼结构,通过反向旋转平衡扭矩,同时在导流罩入口设计凸弧形唇缘,优化空气流动路径,提升升力与推力效率。

升力巡航复合构型,垂直起降阶段由专用升力旋翼/涵道提供升力,巡航阶段由独立机翼与水平推进系统承担升力与推力,兼顾悬停与巡航效率。如专利CN113071275A^[27]设计多组旋翼分工协作,倾斜旋翼用于升降和巡航,上升旋翼专门用于垂直起降,搭配主翼与尾翼实现巡航,解决了传统单旋翼构型悬停与巡航效率难以兼顾的问题;专利US20070034739A1^[28]通过在机身两侧设置升力风扇、后部配置推力风扇,实现多用途转换。

倾转动力构型,同一套推进系统通过机械倾转实现推力方向改变,兼顾垂直起降与高效巡航;技术难度最高但潜力最大。如专利US12043378B2^[29]设置多个带偏转轴的推进组件,飞控系统可根据其他推进器状态实时调节旋翼轴角度,动态改变推力矢量方向,有效解决了多旋翼飞行器单发失效后的稳定性问题,提升系统容错能力;专利US7874513B1^[30]通过两个双端传动轴发动机驱动四个外部倾斜涵道风扇,提升气动效率并降低噪声。

分布式电推进技术通过将多个小型电机-旋翼单元分散布置于机体,不仅可提升系统冗余度与安全性,还可实现推进与气动一体化的深度耦合。如专利US20050230524A1^[31]为早期开创性基础专利,通过机头机尾的推力发生器布局形成低重心对称结构,奠定分布式推进系统的布局设计逻辑;专利US20240208644A1^[32]进一步优化,采用固定前倾旋翼设计,使旋翼同时承担垂直起降与水平推进功能,实现合成翼面的高展弦效率。

3.2.2 陆空两栖与模块化系统

该分支是飞行汽车衔接地面与空中交通的关键技术,直接决定了飞行汽车能否融入现有城市基础设施。该技术分支主要围绕陆空两栖一体化和模块化分体式两大核心路径展开创新。

陆空两栖一体化通过单一机体集成车轮与旋翼/机翼,通过机械变形切换模态,其核心创新技术聚焦于旋翼/机翼折叠收纳技术。如专利US3065938A^[33]是机翼折叠技术的早期经典开创性专利,采用多段中空翼节的伸缩式设计,通过液压千斤顶和绞盘实现翼节的展开与收回;专利CN113320685A^[34]通过滑轨支架与机翼安装梁的联动设计,实现了机翼折叠与位置调节的一体化,提升了折叠操作的便捷性与结构稳定性。

模块化分体式则主要采用“平台+载荷”的思维,将功能物理分离,通过自主对接实现按需组合,极大

降低各模块的复杂度与重量,提升能效和航程。其核心创新技术聚焦于飞行模块与底盘自动对接技术。如专利US8646720B2^[35]可以连接至各种车辆,通过多个可倾斜的螺旋桨实现垂直升力与水平推进切换,实现多场景适应性;CN119472789A^[36]针对对接精度不足的行业痛点,通过智能底盘的角度修正与对接平台的实时微调,实现了飞行模块与底盘的高精度对齐;专利CN119872389B^[37]通过托盘组件与伸缩装置的配合,实现了飞行器的侧向承接与精准移动,解决狭小空间内的对接难题。

3.2.3 动力与能源系统

该分支是飞行汽车能量来源与动力输出核心,直接决定了飞行汽车续航与载荷等关键性能,是当前制约飞行汽车商业化进程的关键瓶颈。专利技术主要聚焦于能源管理与分配、高能量密度电池、电机控制器与驱动器等方面。

能源管理与分配技术作为动力系统的“智能中枢”,根据飞行阶段和车辆状态,实时、动态分配能量与功率。如专利CN117236200B^[38]基于数据驱动的降阶模型实现电池寿命快速精准预测,配合智能优化算法控制充电边界,有效避免析锂风险,显著延长电池寿命;专利US11745882B2^[39]通过飞行状态自适应的电池放电策略,实现异常电池的主动隔离与可控能量释放,显著抑制热失控扩散,从系统层面提升电池包安全性能。

高能量密度电池技术是提升飞行汽车续航能力与功率响应的核心,通过先进的电池系统设计与能量管理策略实现高功率与高能量的协同供给。如专利US20180339781A1^[40]采用双电池系统,高能量密度电池用于巡航,通过电阻差异实现负载自动分配,提升系统响应能力与安全性;专利US11655024B1^[41]采用功率优化能源与储能优化能源并联组合,高功率事件由功率源主导,低功率事件由储能源主导,提升了能量利用效率与系统冗余能力。

电机控制器与驱动器技术通过多模式切换与智能调控,保障飞行汽车动力系统的高效稳定运行。如专利JP7201010B2^[42]通过增设扩展功能模块,结合电机驱动器状态判断机制,实现精准动态调控,提升整体系统稳定性和安全性;专利CN114248590B^[43]通过发动机、电动发电机共用动力传动机构,实现动力路径选择,电动发电机可驱动旋翼或车轮,也可为电池充电,形成多模式运行逻辑。

3.2.4 飞行控制与智能驾驶

该分支是飞行汽车自主安全运行的核心,技术复杂度最高、创新最活跃、专利申请量占比最大。飞行汽车面临三维动态空域与二维结构化道路的混合环境,其控制系统必须无缝处理多模态动力学特性剧烈变化,满足航空级安全性与实时性要求。该分支主要聚焦多模态飞行控制算法、环境感知融合、空地一体化路径规划三大重点技术。

多模态飞行控制算法可实现飞行器在垂直起降、过渡转换、巡航飞行等多种飞行模式间平滑切换并保持稳定。如专利CN119356355A^[44]基于多维传感数据构建比例-积分-微分(Proportional-Integral-Differential, PID)闭环控制,使连接装置能自适应调整姿态,有效抑制因载荷偏移或外界扰动引发的抖动,提升起降阶段的稳定性;专利US20240327013A1^[45]通过实时检测飞行状态并精确控制螺旋桨偏转角度,显著降低气流扰动引起的结构振动与飞行偏差;专利KR102010424B1^[46]通过将飞行器的俯仰角变化信号与主旋翼倾斜角联动控制,实现自动补偿风扰影响的稳定飞行控制。

环境感知融合通过多种传感器采集环境信息,并通过数据融合算法将信息整合为对飞行环境的全面认知。如专利JP2022085623A^[47]融合自定位、图像采集与外部地图数据,实现停车位的精准识别与降落控制,解决城市低空狭小空间的起降定位难题;专利CN113804183B^[48]通过高频位姿与低频位置信息的融合,增量更新地图并生成含安全边界的高程地图,实现对飞行环境的三维精准感知。

空地一体化路径规划综合考虑地面交通和空中交通约束,为飞行器规划最优飞行路径。其主要技术聚焦于统一状态空间建模、多维度路径优化及空地协同调度。如专利JP7601719B2^[49]通过航空器分层悬停与专属路径规划,避免了机场上空航线交叉,提升空域利用率;专利CN114545981A^[50]采用博弈学习与模态预测的双层架构,实现了模态切换与路径规划的协同优化。

3.2.5 安全冗余与适航保障

该分支是飞行汽车商业化运营的生命线,通过主动冗余设计和被动安全措施将系统失效风险降低到航空级可接受水平,并满足适航审定要求。该分支核心技术聚焦于冗余系统设计、故障预测与健康管理等。

冗余系统设计重点在于对飞控、能源、通信三大

核心系统配置两套以上的独立功能单元,确保任一单元失效时系统仍可维持安全飞行。如专利US20210253263A1^[51]通过多个飞行控制器对电机的独立控制,在某一电机失效时能快速分配最优推力值,确保飞行器维持稳定飞行和可控着陆,实现动力系统的冗余容错;专利CN114475252A^[52]构建多电池管理系统(Battery Management System, BMS)间的信息互备机制,在任意单个BMS失效时仍能维持电池状态感知能力。

故障预测与健康管理的传感器数据与机器学习算法,实时监测关键部件健康状态,预测潜在故障并触发预防性维护。如专利US12051923B2^[53]集成故障监测电路,在充电过程中动态识别异常并采取缓解措施,提升了充电过程的安全性与可靠性;专利CN115453580A^[54]基于历史估计结果递推预测与融合机制,结合虚警率动态调整故障阈值,实现了传感器故障的实时精准诊断。

4 技术演进脉络及未来趋势

4.1 飞行汽车技术演进脉络

为清晰展现各技术分支的发展脉络,本文进一步分析了各一级技术分支的专利申请趋势,具体情况如图6所示。

在飞行汽车技术发展初期,各项技术研发均较为缓慢,未形成明显的发展重点。20世纪90年代,安全冗余与适航保障率先得到关注和发展,体现行业对安全保障技术的高度关切。随后,整机构型与气动布局逐步进入快速发展阶段,技术路径逐步收敛为三类主流构型。2015年之后,飞行控制与智能驾驶技术进入快速发展阶段,增长曲线最为陡峭,这充分说明智能化、自主化已成为驱动本轮飞行汽车技术革命的核心动力。要实现安全高效的空中交通,高度智能决策能力的“飞行大脑”是必不可少的先决条件。安全冗余与适航保障、动力与能源系统这两大分支近年的专利申请数量增速明显,反映出在主流技术路径确立后,行业已将创新重心转向工程化落地的核心瓶颈。

如图7所示,按时间顺序梳理各发展阶段飞行汽车的重点专利技术,以进一步分析其技术发展脉络。可以看出,飞行汽车重点专利技术发展具有清晰的阶段性:2015年前以构型设计为核心,聚焦垂直起降与巡航的构型难题,先后出现折叠机翼、倾转动力等技术;2015年后重心转向智能控

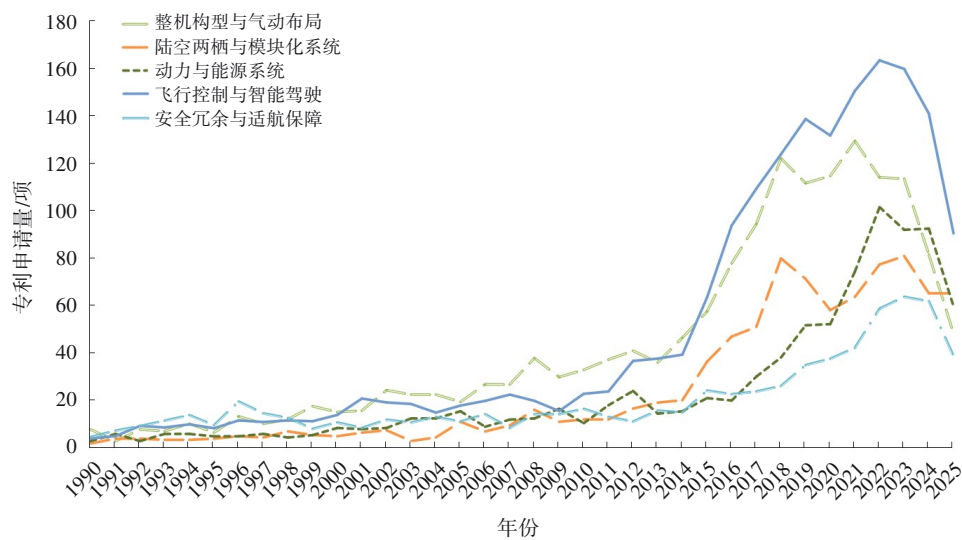


图6 一级技术分支的专利申请趋势

Fig.6 Patent application trend of the first-level technical branch

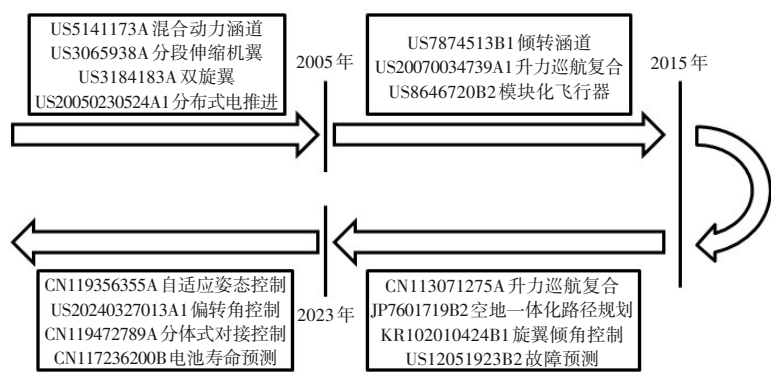


图7 各发展阶段的飞行汽车重点专利技术

Fig.7 Key patent technologies of flying cars in each development stage

制,2015—2022年聚焦飞行控制、路径规划、构型优化等,2023年后进一步聚焦分布式飞行控制、飞行姿态控制和飞行路径规划等技术。技术发展遵循从物理集成到性能优化再到智能协同的客观规律。目前,飞行汽车技术正进入以智能控制与系统决策为核心驱动力的深度创新与工程化落地时期。

4.2 飞行汽车技术发展趋势

通过专利技术分析,结合技术成熟度、商业化落地压力以及专利布局特点,本研究认为未来飞行汽车专利申请量会呈爆发式增长的关键技术领域主要有三个。

一是预测性健康管理 with 智能容错控制系统。当前仅靠硬件冗余已无法满足航规级安全要求。相较于相对成熟的硬件冗余设计,基于人工智能、数字孪生和大数据的故障预测与健康管

理(Health Management , PHM)和容错控制尚处于早期,尚未形成技术壁垒。该技术将实现从被动容错向主动预警的转变,能有效降低运营成本、提升系统安全性,为算法、模型和系统架构的创新留下了巨大空间,是未来安全技术领域专利布局的新蓝海。

二是低空复杂环境下的高动态协同感知与决策规划算法。当前飞行控制专利主要解决单一飞行器的稳定控制问题,针对单车智能的算法专利已形成一定布局,但面向城市复杂空域的规模化运营,必须突破单车智能,实现多飞行器间的协同感知与决策。城市低空环境存在建筑遮挡、气流复杂、空域资源有限等问题,对多飞行器的协同感知、路径规划、冲突规避提出了极高要求,在此背景下,相关群体智能算法、空域协同调度算法有望成为新的专利布局热点。

三是高功率密度、高放电倍率的特种航空动力电池及智能热管理集成系统。动力系统是飞行汽车商业化的瓶颈,其核心在于航空级电池在能量密度、功率密度、安全性上的严苛要求远超车规级,当前车规级三电系统的技术迁移已接近天花板,材料科学的突破成为核心关键。未来该领域将呈现材料、结构、管理三位一体技术增长趋势,新型电极材料、电解质配方、轻量化结构设计、低内阻连接工艺、复合热管理技术、超快充智能管理策略都具有较好的发展前景。专利布局将从单一的材料或结构专利,转向系统性集成式的专利组合,形成覆盖电池材料、电芯设计、电池包集成、热管理系统的全链条专利壁垒。

5 结语

对飞行汽车专利分析表明,该领域呈现出“基础专利布局完善、核心专利价值凸显、应用专利加速增长”的特征。其技术演进历程可划分为三个阶段,各阶段呈鲜明的技术特征与创新重点:奠基期(2015年以前)以构型创新为核心,专利申请集中于整机构型与气动布局技术,技术路径发散,行业尚处于概念验证与可行性探索阶段;爆发期(2015—2022年)以智能化技术为引领,飞行控制与智能驾驶技术的专利申请占比跃居首位,标志着智能化已成为驱动本轮技术发展的核心引擎;攻坚期(2023年至今)聚焦商业化瓶颈突破,专利申请量的增速虽有所放缓,但安全冗余与适航保障、动力与能源系统等关键技术的专利申请量增速显著,反映了飞行汽车行业正将创新重心转向攻克安全可靠与续航能力这两大制约飞行汽车商业化的核心工程瓶颈。

展望未来,飞行汽车专利竞争核心已从造出能飞的车向实现规模化安全经济飞行转变。行业向安全化、经济化、规模化演进,企业需将专利战略从单点突破转向生态构建,通过专利联盟、交叉许可可降低创新风险,同时加强欧美等核心市场的国际专利布局,规避“技术出海、专利缺位”风险。

综上,飞行汽车技术已进入发展关键期,专利布局质量直接决定企业竞争地位。唯有将专利战略与技术创新、市场拓展、标准制定深度融合,才能推动我国从飞行汽车专利大国向专利强国转变,为构建“路空一体”未来交通新生态提供坚实知识产权支撑。

参考文献:

- [1] 张扬军,赵露,郑华. 飞行汽车:开启路空一体新纪元[J]. 交通建设与管理,2025(5):28-31.
Zhang Y J, Zhao L, Zheng H. Flying cars: Opening in a new era of integrated road-air transportation [J]. Transport Construction and Management, 2025(5):28-31.
- [2] 张扬军,钱煜平,诸葛伟林,等. 飞行汽车的研究发展与关键技术[J]. 汽车安全与节能学报,2020,11(1):1-16.
Zhang Y J, Qian Y P, Zhuge W L, et al. Progress and key technologies of flying cars [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2020, 11(1):1-16.
- [3] Hu L J, Yan X F, Yuan Y. Development and challenges of autonomous electric vertical take-off and landing aircraft[J]. Heliyon, 2025, 11(1):e41055.
- [4] 劳永春. 飞行汽车的发展现状与展望[J]. 内燃机与配件,2020(15):210-211.
LAO Y C. Development status and prospect of flying cars[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020(15):210-211.
- [5] 刘博文,郑泽兴,方伟豪,等. 飞行汽车的研究现状及发展方向[J]. 高科技与产业化,2020,26(1):70-73.
Liu B W, Zheng Z X, Fang W H, et al. Research status and development direction of flying cars [J]. High-Technology & Commercialization, 2020, 26(1):70-73.
- [6] 中国汽车工程学会,清华大学,北京理工大学,等. 飞行汽车发展报告 2.0:迈向空地一体交通新时代[R/OL]. 2026-01-19. <https://www.sae-china.org/news/society/202601/7211.html>.
China Society of Automotive Engineers, Tsinghua University, Beijing Institute of Technology, et al. Flying cars development report 2.0: Towards a new era of integrated ground-air transportation [R/OL]. 2026-01-19. <https://www.sae-china.org/news/society/202601/7211.html>.
- [7] 方海峰,丁振森,朱一方,等. 飞行汽车发展现状、挑战及对策[J]. 前瞻科技,2025,4(4):103-110.
Fang H F, Ding Z S, Zhu Y F, et al. Current situation, challenges, and development countermeasures of flying cars [J]. Science and Technology Foresight, 2025, 4(4):103-110.
- [8] Li Y M, Guo T, Chen J, et al. Urban air mobility: A review and challenges [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2025, 17(3):67-87.
- [9] 王治山. 从梦想到现实的“飞行汽车”[J]. 商业观察, 2026, 12(1):1-4.
Wang Z S. “Flying cars” in dream are turning into a reality [J]. Business Observation, 2026, 12(1):1-4.

- [10] Bacchini A, Cestino E. Electric VTOL configurations comparison[J]. Aerospace, 2019, 6(3): 26.
- [11] 张洪. eVTOL 飞行器的发展态势与应用场景综述[J]. 空运商务, 2022(12): 22-28.
Zhang H. Overview of development trend and application scenarios of eVTOL aircraft [J]. Air Transport & Business, 2022(12): 22-28.
- [12] Rajashekara K, Wang Q C, Matsuse K. Flying cars: Challenges and propulsion strategies[J]. IEEE Electrification Magazine, 2016, 4(1): 46-57.
- [13] 张新钰, 荣松松, 李骏, 等. 智能飞行汽车关键技术及发展趋势[J]. 中国科学(技术科学), 2024, 54(4): 601-624.
Zhang X Y, Rong S S, Li J, et al. State-of-the-art and technical trends of intelligent flying cars [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2024, 54(4): 601-624.
- [14] 何忱远, 郭铁龙, 朱冠宇, 等. 飞行汽车运行核心支撑技术综述[J]. 汽车工程, 2025, 47(12): 2277-2288.
He C Y, Guo Y L, Zhu G Y, et al. A review of core support technologies for flying car system operation [J]. Automotive Engineering, 2025, 47(12): 2277-2288.
- [15] 徐世南, 赵善举, 喻春明. 飞行汽车研究现状与关键技术[J]. 机械研究与应用, 2023, 36(5): 181-186.
Xu S N, Zhao S J, Yu C M. Research status and key technologies of flying vehicles [J]. Mechanical Research & Application, 2023, 36(5): 181-186.
- [16] 曹锋, 么鸣涛, 雷雪媛, 等. 飞行汽车的发展现状与展望[J]. 现代机械, 2015(2): 89-94.
Cao F, Yao M T, Lei X Y, et al. Present situation and prospects of flying cars [J]. Modern Machinery, 2015(2): 89-94.
- [17] 邵一凡. 电动垂直起降飞行汽车总体方案设计与动力系统匹配[D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
Shao Y F. Overall scheme design and power system matching of electric vertical take off and landing flight vehicle [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2023.
- [18] Ugwueze O, Statheros T, Bromfield M A, et al. Trends in eVTOL aircraft development: The concepts, enablers and challenges[C]//Proceedings of the AIAA SCITECH 2023 Forum, 2023.
- [19] 杨晓琳, 张乐, 陈红英. 国内外eVTOL发展现状及应用场景[J]. 中国科技信息, 2024(22): 59-61.
Yang X L, Zhang L, Chen H Y. Development status and application scenarios of eVTOL at home and abroad [J]. China Science and Technology Information, 2024 (22): 59-61.
- [20] 邓景辉. 电动垂直起降飞行器的技术现状与发展[J]. 航空学报, 2024, 45(5): 529937.
Deng J H. Technical status and development of electric vertical take-off and landing aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(5): 529937.
- [21] 王翔宇, 张平平. eVTOL 飞行器与飞行汽车发展思考[J]. 航空动力, 2024(3): 24-28.
Wang X Y, Zhang P P. Thoughts on the development of eVTOL and flying cars [J]. Aerospace Power, 2024 (3): 24-28.
- [22] 马嘉欣, 汪志鸿, 刘卓, 等. 飞行汽车关键技术及应用研究综述[J]. 汽车工程, 2025, 47(11): 2049-2069.
Ma J X, Wang Z H, Liu Z, et al. A review of key technologies and application of flying cars [J]. Automotive Engineering, 2025, 47(11): 2049-2069.
- [23] GB/T 42748—2023 专利评估指引[S].
GB/T 42748—2023 Guidelines for patent evaluation[S].
- [24] 张洋, 王乙竹, 李丹阳. 从价值评估到创新赋能: 专利评价的方法、场景与挑战[J]. 情报理论与实践, 2026, 49(4): 29-38, 57.
Zhang Y, Wang Y Z, Li D Y. From value assessment to innovation empowerment: Methods, scenarios, and challenges in patent evaluation [J]. Information Studies: Theory & Application, 2026, 49(4): 29-38, 57.
- [25] Lay J E, Mich E L. Pressure-jet and ducted fan hybrid electric car: US5141173A [P]. 1992-08-25.
- [26] Piasecki Aircraft Corp. Flying platform: US3184183A [P]. 1965-05-18.
- [27] 现代自动车株式会社. 垂直起降的空中移动概念车: CN113071275A [P]. 2021-07-06.
Hyundai Motor Company. Vertical takeoff and landing air mobility: CN113071275A [P]. 2021-07-06.
- [28] Urban Aeronautics Ltd. Ducted fan VTOL vehicles: US20070034739A1 [P]. 2007-02-15.
- [29] Bell Textron Inc. Controllable vectored thrust in propulsion assemblies: US12043378B2 [P]. 2024-07-23.
- [30] Smith F A. Apparatus and method for vertical take-off and landing aircraft : US7874513B1 [P]. 2011-01-25.
- [31] Toyota Motor Co. Ltd. Vertical take-off and landing aircraft : US20050230524A1 [P]. 2005-10-20.
- [32] Joby Aero Inc. Method for flying VTOL aircraft with forward canted rotors : US20240208644A1 [P]. 2024-06-27.
- [33] Calkins E M. Telescoping sectional airplane wing : US3065938A [P]. 1962-11-27.
- [34] 广东汇天航空航天科技有限公司. 飞行汽车机翼折叠结构: CN113320685A [P]. 2021-08-31.
Guangdong Huitian Aerospace Technology Co. Ltd. Folding structure of flying cars wing: CN113320685A [P].

- 2021-08-31.
- [35] Shaw D O. Modular flight vehicle with wings: US8646720B2[P]. 2014-02-11.
- [36] 中汽创智科技有限公司. 分体式飞行汽车对接方法、装置、存储介质和电子设备: CN119472789A[P]. 2025-02-18.
China Automotive Chuangzhi Technology Co. Ltd. Split type flying cars docking method, device, storage medium and electronic equipment: CN119472789A[P]. 2025-02-18.
- [37] 广东汇天航空航天科技有限公司. 路行车辆的转移机构、路行车辆及交通工具: CN119872389B[P]. 2025-11-28.
Guangdong Huitian Aerospace Technology Co. Ltd. Transfer mechanism of road vehicle, road vehicle and vehicle: CN119872389B[P]. 2025-11-28.
- [38] 北京航空航天大学. 基于数据驱动降阶模型的飞行汽车电池快充策略优化方法: CN117236200B[P]. 2024-02-02.
Beijing University of Aeronautics and Astronautics. Method for optimizing quick charge strategy of flying cars battery based on data-driven reduced-order model: CN117236200B[P]. 2024-02-02.
- [39] Hyundai Motor Company. Power management system for air mobility vehicle and operation method thereof: US11745882 B2[P]. 2023-09-05.
- [40] Kitty Hawk Corporation. Electric vehicle hybrid battery system: US20180339781A1[P]. 2018-11-29.
- [41] Kitty Hawk Corporation. Battery systems with power optimized energy source and energy storage optimized source: US11655024B1[P]. 2023-05-23.
- [42] NEC Corporation. Electric actuator device and driving method for aircraft: JP7201010B2[P]. 2022-12-26.
- [43] 广东汇天航空航天科技有限公司. 驱动系统和飞行汽车: CN114248590B[P]. 2023-12-22.
Guangdong Huitian Aerospace Technology Co. Ltd. Driving system and flying cars: CN114248590B [P]. 2023-12-22.
- [44] 中国第一汽车股份有限公司. 飞行汽车、对接控制方法、装置、设备和可读存储介质: CN119356355A[P]. 2025-01-24.
China FAW Group Co. Ltd. Flying cars, docking control method, device, equipment and readable storage medium: CN119356355A[P]. 2025-01-24.
- [45] Beta Aviation Co. Ltd. System for controlling a propulsor assembly of an electric aircraft: US20240327013A1 [P]. 2024-10-03.
- [46] Korea Aerospace Research Institute. Method and computer program for controlling tilt angle of main rotor on basis of pitch attitude control signal low-speed flight state, and vertical take-off and landing aircraft: KR102010424B1 [P]. 2019-08-14.
- [47] Hitachi. Mobile vehicle landing control system and mobile vehicle landing control method: JP2022085623A[P]. 2022-06-08.
- [48] 广东汇天航空航天科技有限公司. 一种实时地形测绘方法和系统: CN113804183B[P]. 2023-12-22.
Guangdong Huitian Aerospace Technology Co. Ltd. Real-time terrain mapping method and system: CN113804183B[P]. 2023-12-22.
- [49] Hitachi. Control equipment: JP7601719B2[P]. 2024-12-17.
- [50] 北京理工大学. 一种基于模态预测的飞行车辆路径规划方法: CN114545981A[P]. 2022-05-27.
Beijing Institute of Technology. A flight vehicle path planning method based on modal prediction: CN114545981A [P]. 2022-05-27.
- [51] Kitty Hawk Corporation. Thrust allocation using optimization in a distributed flight control system: US20210253263 A1[P]. 2021-08-19.
- [52] 广东汇天航空航天科技有限公司. 车辆电池的数据处理系统、方法、车辆以及存储介质: CN114475252A[P]. 2022-05-13.
Guangdong Huitian Aerospace Technology Co. Ltd. Data processing system, method, vehicle and storage medium for vehicle battery: CN114475252A[P]. 2022-05-13.
- [53] Beta Aviation Co. Ltd. Charger for an electric aircraft with failure monitoring and a method for its use: US12051923B 2[P]. 2024-07-30.
- [54] 广东汇天航空航天科技有限公司. GNSS传感器的故障诊断方法、装置、导航系统及交通工具: CN115453580A[P]. 2022-12-09.
Guangdong Huitian Aerospace Technology Co. Ltd. Fault diagnosis method, device, navigation system and transportation vehicle of GNSS sensors: CN115453580A [P]. 2022-12-09.

(编辑 杨晓燕)