

国外高速直升机的现状与发展趋势分析



王爽¹,王开通¹,曹金华²,李恭楠¹,张琦¹,王国库¹

1.哈尔滨飞机工业集团有限责任公司,黑龙江 哈尔滨 150066

2.陆军装备部航空军事代表局驻哈尔滨地区航空军事代表室,黑龙江 哈尔滨 150066

摘 要:高速直升机不仅满足了现代军事战争在直升机技术方面提出的新要求,而且由于其具有高速、高载重等优点,在应急救援等民用领域具有可观的市场需求前景。本文围绕高速直升机中的复合式、倾转式和停转式三大类型,系统地介绍并分析当前国内外高速直升机发展现状,结合各构型高速直升机的性能优势与使用局限性对高速直升机未来智能、无人、环保、极区四大发展方向做了系统性分析与总结,结合未来发展趋势分析并指出了未来可行的研究方向。

关键词:高速;直升机;发展现状;发展趋势;研究方向

中图分类号:V275.1

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.12.001

直升机具有垂直起降高效、定点悬停、低空低速飞行和机动性能良好等优点,已被全球范围内的战争、监视、交通、急诊、抢险救援等多个领域所采纳^[1]。常规构型直升机高速前飞时,存在前行桨叶易形成激波阻力、后行桨叶处气流分离以及桨盘前倾,螺旋桨升力下降、阻力增大的问题,飞行速度难以突破350km/h^[2],这极大地限制了直升机的应用领域和发展空间。

早在20世纪50年代初期,美国等西方直升机强国就为了开发一种既具直升机的高效悬停性能,又具有固定翼飞机那样的高速巡航能力的高速直升机而开展了大量研究工作,试飞的机型达数十种^[3]。根据旋翼机气动力学的研究和分析,设计一种既考虑飞行速度、悬停效率,又考虑制造复杂性且成本合理的新型旋翼飞机,是非常具有挑战性的。随着航空技术的进步,美国陆军和空军推出了“未来垂直升力”“高速垂直起降”等改进计划,旨在提升直升机的性能,特别是飞行速度,以满足对直升机日益增长的需求。平飞速度超过400km/h的高速直升机,已经成为第五代直升机发展的主流方向。

根据各国多年在提升旋翼飞行器速度上的探索和创造实践,将高速直升机主要分为复合式、倾转式和停转式^[4]三

类。本文根据此分类方法,对国外高速直升机各构型的主要特点与发展情况进行总结,并对其未来的发展趋势进行分析预测,指出未来可行的研究方向及对我国发展高速直升机的启示。

1 高速直升机研究进展

1.1 复合式高速直升机

复合式高速直升机按旋翼的类型可以划分为常规旋翼式高速直升机和“ABC”旋翼复合式高速直升机。

1.1.1 常规旋翼式

常规旋翼式高速直升机在保留常规构型直升机旋翼系统的基础上,增加了辅助推力和升力系统。通过在机身两侧增加机翼给旋翼卸载,即在机身两侧或尾部安装辅助推力装置,提供向前飞行的推进力,实现高速飞行。常规旋翼式高速直升机保留了常规构型直升机大部分优异性能,在飞行速度、航程航时,机动性能方面均有提高,但由于存在各个系统之间相互产生气动干扰、飞行控制难度大等难题,飞行速度没有倾转旋翼机快,机动性能也不如“ABC”旋翼式好。我国针对常规旋翼式高速直升机的研究还停留在技术验证阶段,亟须开展大量的技术研究工作。

收稿日期: 2023-06-09; 退修日期: 2023-09-25; 录用日期: 2023-10-30

引用格式: Wang Shuang, Wang Kaitong, Cao Jinhua, et al. Current situation and development trend analysis of high-speed helicopter[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(12): 1-8. 王爽,王开通,曹金华,等. 国外高速直升机的现状与发展趋势分析[J]. 航空科学技术, 2023, 34(12): 1-8.

目前,常规旋翼式比较成功的是欧直公司的X3构型。X3复合式高速直升机是一种双螺旋桨复合式高速直升机,如图1所示。其最大巡航速度达到430km/h^[5],与常规直升机相比,巡航速度和航程提升了50%。高速前飞时主要由两副短机翼提供大部分升力。短机翼两侧分别配置一个可变距螺旋桨,不仅提供前飞的推力,还可以通过两侧螺旋桨的差动桨距提供偏航操纵力矩,克服旋翼反扭力矩,因此在高速前飞状态下,仍可以保持良好的稳定性。



图1 X3复合直升机

Fig.1 X3 compound helicopter

法国空客直升机公司以X3构型为基础,推出了RACER“竞速者”民用高速直升机,如图2所示。作为欧盟委员会提出的“洁净天空计划2”科研规划的一部分,RACER不仅追求高速度、低成本,而且更加注重节能减排。RACER双层盒式机翼的设计,增加了结构强度和可靠性,降低了机身由于螺旋桨高速转动而引起的振动程度。螺旋桨后向安装,旨在提升机组和乘客人员的安全性和驾乘体验。据中国航空新闻网消息,RACER将装备混合电力系统,在载重轻或者低速时能够关闭一台发动机,在一定程度上节省燃料,减少二氧化碳排放和噪声污染等。RACER的巡航速度可以达到400km/h,其可以执行搜索救援、商业运输等任务^[6]。

在未来武装侦察直升机项目(FARA)竞标中,卡瑞姆公司推出了AR40复合直升机,如图3所示。AR40尾部安装了可侧转尾部推进螺旋桨。低速飞行时,摆动尾桨产生拉力来平衡旋翼产生的反扭矩,实现航向稳定;高速飞行时,摆动尾桨将作为推进螺旋桨使用。同时,应用优转速倾转旋翼(OSTR)技术,使每个桨叶的桨距均可独立微调,以降低飞行噪声并提高飞行效率^[7]。

俄罗斯米里设计局在2015年的莫斯科航展上推出了



图2 欧直RACER

Fig.2 Eurocopter RACER



图3 卡瑞姆AR40

Fig.3 Karem AR40

米-24 LL(PSV)验证样机,如图4所示。该机改装自米-24“雌鹿”武装直升机,重新设计了前机身和旋翼桨叶。

1.1.2 “ABC”旋翼复合式

西科斯基飞机公司为突破传统直升机旋翼工作机构的局限性,率先研究了一种前行桨叶概念(ABC)旋翼^[8],如图5所示。“ABC”旋翼系统的设计特点是采用了共轴反转刚性的无铰式旋翼。在高速状态下,两副旋翼的升力中心均



图4 米-24 PSV 直升机

Fig.4 Mi-24 PSV helicopter



(a) 西科斯基X2



(b) S-97“掠夺者”高速直升机



(c) SB-1“挑战者”直升机



(d) CCH复合共轴直升机



(e) “短尾隼”直升机

图5 “ABC”旋翼复合式高速直升机

Fig.5 Compound helicopter with “ABC” rotor

会偏向前行桨叶的一侧,后行桨叶处的载荷降低,防止后行桨叶处因迎角过大而产生气流分离,最大限度地提高了前行桨叶的升力。与常规桨叶相比,刚性桨叶挥舞量更小,上下旋翼间距更紧凑,桨毂处的废阻降低。

“ABC”旋翼复合式高速直升机与常规构型直升机相比,结构更紧凑,机动性能、高原性能更优异,能在更为复杂的地理环境下垂直起降和进行作业,适合用作军用武装型以及作业空间受限制的应急救援等民用领域。

2008年,“ABC”旋翼复合式高速直升机中的明星产品X2构型验证机完成技术首飞,达到463km/h的水平飞行速度^[9]。2015年,西科斯基公司利用X2的成功技术研制的4t级轻型战术S-97“掠夺者”高速直升机完成首飞,其最大飞行速度超过480km/h^[10]。

2019年,西科斯基公布了“袭击者X”方案,“袭击者X”延用了S-97的基本气动布局,进一步优化细节,引入雷达和红外隐身技术进一步增强其战场生存能力。低速时具备高敏捷性,满足在森林、城市建筑物等狭窄环境的作战要求,其最大起飞质量与S-97相比重了约20%,达6350kg。在FARA竞标中,与贝尔“360不屈”武装直升机进入最终的原型机对比竞标。同年,西科斯基与波音公司为了参与美国陆军未来远程突击飞机(FLRAA)项目竞标而共同研制的SB-1“挑战者”直升机完成首飞。据美国洛克希德-马丁公司官网消息,SB-1“挑战者”直升机试飞中创下时速457km/h的纪录。2022年4月,首次完成1300km远距离飞行,其间使用的燃料消耗远低于预期。

AVX公司与L3技术公司联合研发了复合共轴直升机(CCH)。CCH也应用了类似的前行桨叶概念^[11],并且通过设计附加的前置鸭翼,平尾两端安装涵道螺旋桨,增加其高速敏捷性。AVX官方公布,CCH最大速度能达到426km/h,同时具有飞行过程中悬停能耗和巡航能耗低、维护培训费用低等优点,深得美国陆军支持。

2017年,我国推出了“短尾隼”概念高速无人机方案。“短尾隼”概念高速无人机同样利用了前行桨叶概念,采用横列式双旋翼布局,在左右两侧旋翼下方分别安装有后置推进螺旋桨,最大起飞重量(质量)为5.5t,最大巡航速度超过400km/h。

1.2 倾转式高速直升机

倾转式飞行器机身两侧的倾转系统组件可根据垂直起降和平飞过程状态的不同,在旋翼和螺旋桨之间进行来回切换。倾转式高速直升机主要包括倾转旋翼、倾转涵道和倾转机翼三种形式,是目前国内外军民高速飞行器的研究热点构型^[12]。

历经半个多世纪的探索研究,美国先后成功研制了第一代XV-15、第二代V-22“鱼鹰”、第三代V-280“勇士”,以及民用型AW-609倾转旋翼机。

美国贝尔和波音公司共同研制的V-22“鱼鹰”倾转旋翼机,于2006年开始服役,是全球第一款服役的军用倾转旋翼机,巡航速度达446km/h,如图6(a)所示。为了提高美国陆军快速机动性和可操纵性,在V-22的基础上,贝尔公司推出了第三代倾转旋翼机V-280“勇士”,如图6(b)所示。V-280“勇士”的巡航速度为520km/h,航程为3900km,最大作战航程可达1480km。与V-22不同的是,V-280“勇士”采用V形尾设计,发动机不随旋翼和传动装置的倾转而转动,并且桨盘载荷更低、机翼更长,具有更高的悬停效率和巡航能力。2022年12月,其击败了西科斯基的SB-1“挑战者”直升机,将取代现役UH-60“黑鹰”直升机。

世界首架多用途民用倾转旋翼机——莱昂纳多

AW609(BA609),巡航速度为509km/h,目前处于适航取证阶段,如图6(c)所示。欧直正在研发下一代民用倾转旋翼机NGCTR,如图6(d)所示。NGCTR以AW-609型机的机身为基础进行改装,采用平直机翼以及V形尾翼的布局,具有用于安装水平固定的发动机和可倾转减速器的先进发动机短舱,可倾转减速器可以和旋翼一起转动,并将动力传输给旋翼。同时,开发了一种集成倾转旋翼、倾转机翼以及全权限数字发动机控制(FADEC)的先进飞控系统。根据欧盟清洁航空网消息,NGCTR验证机预计在2023年首飞。

无人机方面,美国贝尔公司于2019年推出了V-247“警惕”倾转旋翼无人机方案,如图6(e)所示。该机发动机固定安装在机身内,携带空中加油管道,具有较高的全机续航性能,最大巡航速度可达556km/h。可以执行情报收集、监视侦察等多种作战任务。

我国于2013年首次推出了一款名为“蓝鲸”的倾转四



(a) V-22 “鱼鹰”



(b) V-280 “勇士”



(c) AW609



(d) NGCTR验证机



(e) V-247 “警惕”



(f) “蓝鲸”模型

图6 倾转旋翼式高速直升机

Fig.6 Tilt-rotor high speed helicopter

旋翼机模型,如图6(f)所示。“蓝鲸”倾转旋翼机载荷为20t,巡航速度达538km/h,作战半径大于815km,航程为3106km。该机未来可用于执行山区、海岛等复杂地理环境下的垂直起降和运输任务。

倾转涵道式直升机与倾转旋翼式技术特点类似,不同之处在于动力部件与机体融合度更高,涵道风扇可以安装在机身或机翼上提供直接的升力。

美国穆勒国际公司推出的Skycar M400民用运载工具,如图7(a)所示。Skycar M400通过4个涵道风扇提供升力和推动力,飞行最高时速可达563km/h。XTI飞机公司研发的TriFan 600垂直起降商用飞行器,如图7(b)所示。该机采用混合电力系统,为三台可倾转涵道提供升力。高速飞行时,机翼涵道风扇会转至垂直方向,后机身涵道风扇的盖板关闭,减少阻力。其兼具速度快、航程长以及安全舒适的优点。



(a) Skycar M400



(b) TriFan 600

图7 倾转涵道式飞行器

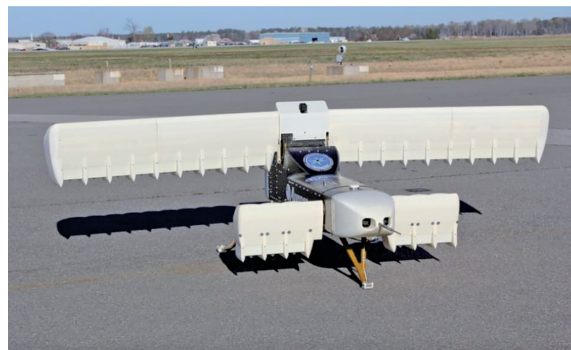
Fig.7 Tilt-ducted fan aircraft

倾转式机翼式高速直升机的动力部件与机翼具有很高的融合度。发动机舱固定在机翼上,与机翼一同倾转来实现推力转向,且机翼一直同螺旋桨的拉力方向一致。但是,

由于操作灵敏度差、安全性差、性价比低等,相对倾转旋翼和倾转涵道式,其发展较慢。

美国极光飞行科学公司研制的XV-24“雷击”无人机于2017年完成20%的缩比验证机试飞,如图8(a)所示。该机采用分布式混合电驱动系统,驱动机翼位置(18个)和鸭翼位置(6个),共计24个变距涵道风扇。虽然目前XV-24“雷击”项目由于在研究高性能1MW级发电机时遇到困难而被取消,但XV-24“雷击”项目的创新方案为未来新型高速垂直起降飞行器的发展提供了参考。

美国超越航空公司(Transcend Air)推出的Vy400倾转机翼式高速飞行器,如图8(b)所示。Vy400由普惠加拿大PT6A-67F涡轮螺旋桨发动机提供动力,通过机翼倾转实现垂直起降和高速平飞双模式的转换。该机旨在提供快速和经济高效的城际运输,最大总起飞重量为3170kg、巡航速度可达651km/h,与类似大小的直升机相比,价格便宜50%。



(a) XV-24 “雷击”无人机



(b) Vy400倾转机翼式

图8 倾转机翼式高速直升机

Fig.8 Tilt-wing high speed helicopter

1.3 停转式高速直升机

停转旋翼机主要有旋翼锁定式和盘翼式两种类型。旋翼锁定式主要的特征是主旋翼一般为宽弦刚性且桨毂可锁定,既可以在低速悬停状态下高速旋转作为旋翼,又可以在高速前飞时锁定作为固定翼。

美国先后提出了“X翼”和X-50A“蜻蜓”概念验证机的

研究方案,分别如图9(a)和图9(b)所示。“X翼”S-72X采用特有的“环流控制技术”,向桨叶后缘开缝襟翼喷出压缩空气,根据桨叶的不同位置,控制桨叶的升力增减和振动。然而,因其存在很多难以解决的技术问题,美国停止了研究。带鸭翼的旋翼—机翼(CRW)布局的X-50A“蜻蜓”,为S-72X的后继机型。该机通过一台涡扇发动机提供动力,在低速状态下,通过桨尖喷气驱动一字形旋翼—机翼高速旋转产生升力,高速平飞后旋翼完全卸载并锁定,鸭翼和平尾提供升力,从而转换到固定翼飞行状态,旋翼不再限制飞行速度。但由于飞行控制难度大,在试飞过程中,X-50A“蜻蜓”两架验证机均出现坠毁情况,美国国防预研局(DARPA)认为X-50A“蜻蜓”的设计存在本质性缺陷,因此该研究项目被中止。

自2008年起,DARPA斥资300万美元投资波音公司,加速推进融合“圆盘旋翼—机翼—推进发动机”的高速圆盘旋翼飞机项目,用于执行作战和营救任务。高速圆盘旋翼机(见图9(c))通过圆盘周围分布的桨叶的高速旋转提供升力,高速平飞时,桨叶收缩、圆盘锁定成为圆盘机翼,以固定翼模式飞行,由涵道风扇发动机提供推进力。波音高速圆盘直升机,兼具了涡扇飞机和直升机的特点,在垂直起降、飞行速度和续航里程等方面既具有直升机的高机动性,又具有固定翼飞机的高速度。但高速圆盘直升机过渡模式下情况复杂,垂直起降和旋停时桨盘载荷较高、旋翼驱动系统重量大、飞行阻力大、操纵性和稳定性差,目前盘翼式飞行器的可行性尚存在较大的争论。

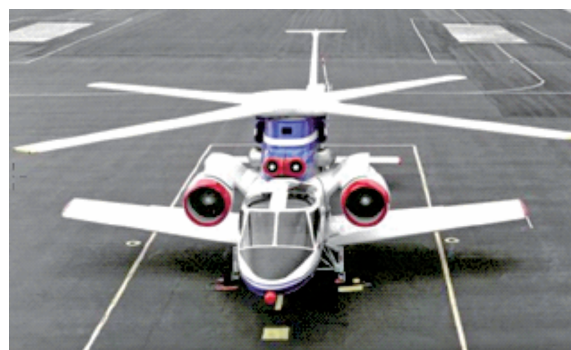
2 高速直升机未来发展趋势

(1) 智能化

当今,各大航空强国正在努力开发智能航空电子系统,以提高直升机的性能,满足不断变化的战争需求,实现更高的作战能力。通过加强智能操控技术、智能飞行技术以及智能辅助系统,降低飞行员飞行压力,提高执行任务准确度,是现阶段高速直升机智能化发展的重点方向。随着未来智能化控制系统的发展,我国高速直升机需从开展桨叶外形智能变形的控制方法和控制系统研究,搭建智能旋翼数据库,提升桨叶在复杂振动环境和狭小空间的智能桨叶适应性等方面大幅度提升高速直升机性能。

(2) 无人化

高速直升机的无人化发展与智能化发展高度契合,高速直升机的无人化发展既能保证直升机特有的飞行和使用特点,又兼具无人机的优势。无人直升机可以极大地减少



(a) “X翼”



(b) X-50A “蜻蜓” 概念验证机



(c) 波音高速圆盘直升机

图9 停转式飞行器

Fig.9 Stoppable rotor aircraft

人员损失,从而确保士兵们的生命安全,同时它可以成为一种重要的、先进的、可持续发展的武器系统,不仅可用于防御敌对势力,还可以搭建复杂多变的空间信息网络,在信息化作战环境中作用突出。随着技术的不断进步,无人高速直升机的研发受到全球各国的高度重视,其军用发展前景十分光明,发展潜力巨大。

(3) 环保化

绿色低碳是现阶段全球倡导的主题。欧盟启动了洁净

天空计划,美国空军提出了“Agility Prime”电动垂直起降飞行器项目,我国航空工业编发的《新能源飞行器发展展望》也以零碳排放为需求导向。当前,直升机减排的技术中心主要通过噪声抑制、振动抑制、机身/桨毂减阻,达到减小发动机功率,从而实现减排的目的。电动飞行器是全球各国未来发展的主要方向,是实现绿色航空的主要途径,但目前电动直升机所涉及的关键技术的彻底解决还需要一段很长的时间。

(4) 极区化

目前,国内外由于受硬件设备、动力系统以及材料等多重因素影响,极区环境中暂未能实现高速直升机的普及运用。极区中蕴含巨大的经济与科研价值,发展极区环境、舱内加温保温、复杂环境飞行、冰雪地起降、防冰防雨等关键技术,适应极端低温环境、无人区自主保障、极区复杂地理气象环境是未来高速直升机发展的方向之一。

3 结束语

高速直升机不仅满足了现代军事战争对直升机技术方面提出的新要求,而且由于其具有高速、高载重等优点,在应急救援等民用领域具有可观的市场需求前景。世界各强国正在大力推进高速直升机的研究工作,随着科学技术的发展和进步,新材料和智能材料的应用、智能化控制系统的开发,必将推动未来的高速直升机向无人、节能、环保、降噪、高速、机动性好和生存能力强的方向发展。

AST

参考文献

- [1] 王焕瑾,高正.高速直升机方案研究[J].飞行力学,2005(1):38-42.
Wang Huanjin, Gao Zheng. Research on high speed helicopter scheme[J]. Flight Mechanics, 2005(1):38-42. (in Chinese)
- [2] Hyeonsoo Y. Design and aeromechanics investigation of compound helicopters[J]. Aerospace Science and Technology, 2019,88:158-173.
- [3] Robb R L. Hybrid helicopters: Compounding the quest for speed[J]. Vertiflite, 2006,52(2):1-17.
- [4] 吴希明.高速直升机发展现状、趋势与对策[J].南京航空航天大学学报,2015,47(2):173-179.
Wu Ximing. Development status, trend and countermeasures of high speed helicopter[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015,47(2):173-179.(in Chinese)
- [5] 笕丙合,何森,朱建勇.高速直升机尾推螺旋桨气动设计研究[J].排灌机械工程学报,2022,40(3):282-286+301.
Zan Binghe, He Miao, Zhu Jianyong. Aerodynamic design of tail-thrust propeller for high speed helicopter [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(3): 282-286+301.(in Chinese)
- [6] Tom S, Mark V, Leo V. Aerodynamic installation effects of lateral rotors on a novel compound helicopter configuration[C]. 74th American Helicopter Society International Annual Forum and Technology Display, 2018.
- [7] 曹喜金.国外新构型高速旋翼机的发展[J].航空动力,2020(4):21-24.
Cao Xijin. Development of new configuration high speed rotorcraft abroad [J]. Aerospace Power, 2020(4): 21-24. (in Chinese)
- [8] Lyu Weiliang, Xu Guohua. New-trim-method-based investigation on the cyclic-pitch-effected advancing-blade-concept helicopter aerodynamics [J]. Journal of Aircraft, 2015,52(4):1365-1371.
- [9] 李春华,樊枫,徐明.共轴刚性旋翼构型高速直升机发展研究[J].航空科学技术,2021,32(1):47-52.
Li Chunhua, Fan Feng, Xu Ming. Development of high speed helicopter with coaxial rigid rotor configuration[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021,32(1):47-52. (in Chinese)
- [10] 孙薇,李治权,李昊.高速旋翼机典型构型发展与对比分析研究[J].军民两用技术与产品,2021(4):34-38.
Sun Wei, Li Zhiquan, Li Hao. Development and comparative analysis of typical configuration of high-speed rotorcraft [J]. Dual Use Technology and Products, 2021(4):34-38. (in Chinese)
- [11] Ferguson K, Thomson D. A performance analysis of compound helicopter configurations[C]. AHS 70th Annual Forum, 2014.
- [12] 王豪,杨昌发,江维.倾转类飞行器发展历程浅析[J].教练机,2020(1):53-57.
Wang Hao, Yang Changfa, Jiang Wei. Brief analysis on the development history of tilting aircraft [J]. Trainer Aircraft, 2020 (1):53-57. (in Chinese)

Current Situation and Development Trend Analysis of High-speed Helicopter

Wang Shuang¹, Wang Kaitong¹, Cao Jinhua², Li Gongnan¹, Zhang Qi¹, Wang Guoku¹

1. Harbin Aircraft Industry Group Co., Ltd., Harbin 150066, China

2. Aviation Military Representative Office of the Aviation Military Representative Bureau of the Army Armaments Department in Harbin, Harbin 150066, China

Abstract: High-speed helicopter not only meets the new requirements of modern military war in helicopter technology, but also has considerable market demand prospects in civil fields such as emergency rescue because of its advantages of high speed and high load. This paper focuses on three types of high-speed helicopter: compound, dip transformation and stop transformation, and the current development status of high-speed helicopter at home and abroad is systematically introduced and analyzed. Combined with the performance advantages and limitations of high-speed helicopter configurations, the four development directions of high-speed helicopter in the future intelligent, unmanned, environmental protection and polar area are systematically analyzed and summarized. Combined with the future development trend, this paper points out the feasible research direction.

Key Words: high speed; helicopter; development status; development trend; research direction