

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2022.101

直升机变旋翼转速技术研究现状

陈广艳¹, 贾清龙², 胡明辉², 曾利²

(1. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002; 2. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 直升机具有垂直起降、悬停和低空机动飞行的独特优势, 在军用和民用航空领域发挥着重要作用, 然而低速、高油耗、短续航和高噪声等不足制约了其应用市场拓展。根据飞行工况变化动态调整旋翼转速的变旋翼转速技术能较大程度上克服上述不足, 提升直升机的综合性能, 因而成为当前直升机领域重要的研究课题。目前, 在变旋翼转速对直升机具体性能的影响、变旋翼转速的优化与控制、因使用变旋翼转速技术衍生的控制和变旋翼转速的实现等问题的研究仍面临着诸多挑战。基于此, 文中综合了国内外变旋翼转速技术的研究成果, 着重从变旋翼转速对直升机性能的影响、变旋翼转速的优化与控制、变旋翼转速技术的实现 3 个方面阐述了变旋翼转速技术的发展现状, 并对其进行归纳和展望, 旨在为高性能直升机变旋翼转速技术的发展提供有价值的参考。

关键词: 变旋翼转速技术; 直升机性能分析; 变旋翼转速优化与控制; 变转速动力涡轮; 变速传动系统构型

中图分类号: D460

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)07-001-20

Research status of helicopter variable rotor speed technology

CHEN Guangyan¹, JIA Qinglong², HU Minghui², ZENG Li²

(1. AVIC Hunan Power Machinery Research Institute, Zhuzhou, Hunan 412002, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Helicopters possess unique advantages such as vertical takeoff and landing, hovering, and low altitude maneuvering flight, playing crucial roles in military and civil aviation. However, issues such as low speed, high fuel consumption, limited range, and high noise levels, have become constraints on expanding the application market of helicopters in both military and civil sectors. Variable rotor speed technology offers a solution by dynamically adjusting rotor speed according to flight conditions, effectively mitigating these shortcomings and improving helicopter performance. Consequently, it has emerged as an important research area in helicopter technology. Currently, variable rotor speed technology faces numerous challenges concerning its impact on helicopter performance, optimization and control, controls derived from variable rotor speed technology, and implementation. This paper provides a summary of research findings on variable rotor speed technology, focusing on three key aspects: the impact analysis of variable rotor speed on helicopter performance, optimization and control methods, and the realization of variable rotor speed technology. The aim is to provide a valuable insights into the development of variable rotor speed technology of high-performance helicopter.

收稿日期: 2022-05-24 网络出版日期: 2022-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52072053)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (52072053).

作者简介: 陈广艳(1984—), 男, 高级工程师, 研究方向为动力传动与控制, (E-mail) 1357043478@qq.com。

通信作者: 胡明辉, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) minghui_h@163.com。

Keywords: variable rotor speed technology; helicopter performance analysis; variable rotor speed optimization and control; variable speed power turbine; variable speed drivetrain configuration

直升机自20世纪40年代面世以来,因能实现垂直起降、空中悬停、近空低速平飞等独特功能,且相较于固定翼飞机具有起降方便灵活、低空机动性好等优点,被广泛应用于军用和民用航空领域。然而,受限于构型^[1-2]和旋翼转速^[3],固定旋翼转速常规构型直升机的平飞速度一般不超过300 km/h^[2],并且存在燃油消耗高、航行里程和航行时间短、飞行效率低、飞行升限有限、噪声和振动大等弊端,限制了进一步拓展直升机应用市场的潜力。因此,如何在保证原有技术优势的基础上突破这些功能限制,是当前直升机领域的重要研究方向。突破速度限制实现高速化是军用航空领域的研究重点,可以通过构型创新和变旋翼转速技术共同实现。构型创新着眼于提升飞行速度^[4],在降低燃油消耗、提升续航和飞行性能,以及改善声学特性等方面收效甚微,而这些性能指标却是直升机领域尤其是民用直升机领域的重点研究内容^[5]。变旋翼转速技术能够在直升机高速前飞时延缓前行桨叶激波失速进一步提升前飞速度^[6],并且能够根据不同飞行状态适时地调整旋翼转速改善综合性能,故而能兼顾高速性和经济性需求,因而成为高速直升机和民用倾转旋翼直升机的研究热点和趋势之一。

目前,针对变旋翼转速技术的研究已取得了长足的进步,但在对直升机性能影响的分析、变旋翼转速的优化与控制,以及变旋翼转速的设计实现等方面的研究仍存在诸多待解决的问题。对变旋翼转速研究进行系统综述的文献较少。韩东等^[5]综述了变旋翼转速技术对直升机性能提升方面的研究,但没有涉及变旋翼转速综合优化控制与结构实现方面的研究;王健康等^[7]对直升机/发动机综合控制的研究综述中虽有提及但未系统介绍变旋翼转速的优化与控制问题;Amri等^[8]探讨了转子技术、电传动技术、涡轮技术和齿轮箱技术4种可能的变旋翼转速实现技术及其优缺点;Welch^[9]、袁成^[10]、张绍文等^[11]和吴小芳等^[12]综述了变转速动力涡轮的发展、主要设计方案和设计难点;Stevens等^[13-14]、李昊等^[15]、李磊^[16]、李丰波^[17]、李政民卿等^[18]综述了变旋翼转速直升机变速传动系统构型方案设计。以上综述均存在全面性不足的问题,并且没有纳入最新的研究成果。针对以上不足,笔者较为全面地搜集整理了中外有限的研究文献,并将其归纳为以下3大模块:

- 1) 变旋翼转速对直升机性能方面的影响;
- 2) 变旋翼转速的优化与控制问题研究;
- 3) 变旋翼转速技术的具体实现方案。

文中介绍了变旋翼转速技术的定义及其特点,综述了旋翼变转速对直升机性能的影响研究,系统论述了变旋翼转速和变旋翼转速过程中的优化与控制问题的研究现状,并从发动机和传动系统的角度综述了变旋翼转速实现的代表性研究。最后,总结和展望了未来变旋翼转速技术的研究发展,以为后续发展提供有益参考。

1 变旋翼转速技术

考虑到涡轴发动机的最优转速区间较窄、旋翼转速变化会引起机身共振^[19]和变旋翼转速设计和控制复杂等问题,为保证操纵性和飞行安全性,传统直升机多采用固定旋翼转速的设计^[15]。但是,固定旋翼转速只能在固定飞行状态(载荷、飞行高度、飞行速度一定)下保证性能最优,不能合理地调整旋翼转速适应飞行状态的变化,这容易导致气动特性恶化、升阻比和悬停效率降低,很难适应直升机高速化、低油耗、长续航、小振动和低噪声等方面的发展需求。因此,变旋翼转速技术逐渐成为研究热点。从狭义上来讲,变旋翼转速技术仅指Karem等^[20]提出的以旋翼需用功率或发动机燃油消耗为优化目标的最优转速旋翼技术(optimum speed rotor, OSR),其典型应用为波音公司研制的侧重长续航的A160T“蜂鸟”无人直升机^[21];从广义上来讲,通过改变旋翼转速以增加前飞速度、降低需用功率、增加航程和航时,以及降低噪声等的技术均可以归为变旋翼转速技术,因此,其应用还包括侧重高速前飞的共轴刚性双旋翼直升机(X2技术验证机、S-97“侵袭者”)、兼顾高速前飞和长续航的倾转旋翼机(V-22“鱼鹰”),以及多种不同构型的重型运输直升机^[22]。

A160“蜂鸟”直升机(图1(a)^[21])能够在50%~100%转速范围内寻求最优旋翼转速^[23],实现低速长航时飞行,其续航里程超过4 000 km,续航时间在20 h以上,但是存在由转速变化引起的振动问题(可能导致坠机);共轴刚性双旋翼直升机(图1(b)^[24])采用了前行桨叶概念(ABC旋翼),在高速前飞时降低旋翼转速可以避免前行桨叶的激波失速,进一步提升最大前飞速度,同时降低了需用功率、振动和噪声水平,提高了载荷和操纵性能^[6]。倾转旋翼机(图1(c)^[25])在垂直起降和空中悬停时增加旋翼转速能提供足够的升力,在高速巡航时降低旋翼转速能减少前飞阻力、降低燃油消耗,从而增加续航时间和续航里程^[26]。其中,后两种直升机也是复合高速直升机的典型代表^[27]。

(a) A160“蜂鸟”^[21](b) 共轴刚性双旋翼直升机^[24](c) 倾转旋翼机^[25]

图1 典型变旋翼转速直升机

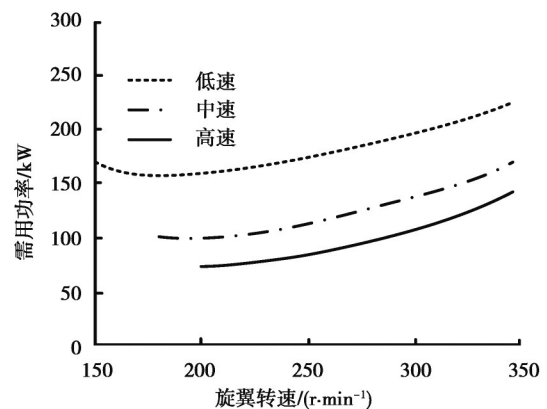
Fig. 1 Classic types of variable rotor speed helicopter

2 旋翼转速变化对直升机飞行性能和飞行品质的影响

开展旋翼变转速对直升机性能影响的分析研究来探明旋翼转速与直升机性能参数的关系是变旋翼转速技术走向工程应用的前提条件和首要任务。

2.1 旋翼转速变化对飞行性能的影响

直升机的飞行性能主要包括需用功率、悬停性能、巡航性能和机动性能等。Karem^[21]、Schrage^[28]、Bowen-Davies等^[29]、Berry等^[30-31]、徐明等^[32]、Amri等^[33]和查倩雯^[34]先后开展了旋翼变转速对需用功率影响的研究,发现降低旋翼的转速能降低旋翼需用功率。其中,Karem等^[21]最早提出以最低需用功率对应的转速作为最优旋翼转速,并探究了不同飞行质量、飞行高度和飞行速度下最优旋翼转速的差异;Bowen-Davies等^[29]和Berry等^[30-31]通过风洞实验验证了上述结论的可靠性;Amri等^[33]则基于不同传动系统变速方案来研究旋翼转速与需用功率的变化关系。Steiner等^[35]、韩东^[36]、刘士明等^[37]、杨悦^[38]、池骋等^[39]和Shan等^[40]还发现不同旋翼转速下需用功率随飞行速度的增加先降低后增加,整体呈“马鞍形”,而随飞行质量和飞行高度的增加而增加,近似呈线性关系。此外,韩东^[36]发现在低旋翼转速区间,需用功率与旋翼转速的函数曲线趋于平缓,继续降低旋翼转速并不能有效降低需用功率甚至在高速时还导致需用功率增加(图2);刘士明等^[37]发现在轻载荷、低空、中低速前飞的状态下降低旋翼转速能实现更高比例需用功率的减少;杨悦^[38]和徐明^[41]从气动特性的角度解释了上述现象的成因。由此可知,旋翼转速并非越低越好,只有在合理的区间内降低旋翼转速才能保证有效地降低需用功率。此外,上述研究均发现:相较于降低诱导功率和废阻功率,降低旋翼转速对降低型阻功率贡献率更高,因此可以认为最优旋翼转速是通过最小化型阻功率来优化需用功率的。

图2 需用功率随转速变化曲线^[36]Fig. 2 Rotor power vs rotor speed^[36]

Han等^[42]对比了各种变体旋翼技术对需用功率的影响,认为变旋翼转速和变旋翼直径均能降低需用功率^[43-45],变旋翼转速技术能实现全速度区间需用功率的降低,但在高速区间对需用功率的降低程度不如变旋翼直径技术,因此,可将二者结合实现最大需用功率降低的最大化^[46]。Han等^[47]还对比了3种尾桨调速方案(恒转速、随主旋翼转速同向变化、独立调速)对尾桨功率的影响(由于尾桨需用功率占比较小,此前研究均忽略不计),结果表明尾桨独立调速更能实现功率节省。

部分学者还研究了旋翼转速变化对悬停和续航性能的影响。尹崇等^[48]通过风洞模型实验研究了不同总重、不同外界环境下旋翼变转速对直升机有地效和无地效悬停性能的影响,发现悬停效率随转速增加先增加后降低并揭示了其机理。刘士明等^[37]和吴裕平等^[49]探究了最优旋翼转速和固定旋翼转速对续航性能影响的差异,发现最优旋翼转速在中等速度和较低重量下能显著提升航程和航时。此前研究较少考虑发动机最优转速区间限制,徐明^[41]则考虑了发动机的高效区间限制,以旋翼需用功率减少量与发动机功率损失量的差值作为直升机性能的提升量,研究表明最优旋翼转速不仅能提高悬停性能和续航能力,还能提高巡航载荷,更适合经常处于悬停和中速飞行状态的无人直升机和重型运输直升机。Prouty^[50]和 Diottavio等^[51]综合分析了变旋翼转速技术在提升悬停效率、最大飞行高度、最大前飞速度、最大航程和航时以及最小燃油消耗等方面性能指标上的优势和潜力;Goi等^[52]和Iwata等^[53]还发现通过增加旋翼转速能够提高旋翼需用功率,缩短爬升的时间,提高机动性。

2.2 旋翼转速变化对配平操稳性能的影响

旋翼转速变化对直升机的配平、操纵性能和稳定性能也有重要影响。文献[35-36,38-39,54-58]报道了旋翼变转速对直升机配平操纵性和稳定性影响的研究。Steiner等^[35]以UH-60“黑鹰”直升机为研究对象,研究了在 $\pm 15\%$ 全转速范围内变速对总距、纵/横/纵向周期变距和姿态角等配平参数的影响。韩东^[36]在配平分析中发现:旋翼转速与纵向周期变距近似正相关,而与总距、横向变距近似负相关(图3(a)^[36]),并且在低转速区更明显;纵向倾斜角随旋翼转速增加呈先减小后增加的趋势,而横向倾斜角与旋翼转速近似负相关(图3(b)^[36])。杨悦^[38]还发现降低旋翼转速可以增强旋翼的迎角稳定性。Datta等^[54]在风洞实验室对UH-60A直升机的操纵量进行测试,分析发现旋翼转速过低导致的后行桨叶动态失速可能引发配平问题,因此,旋翼转速不能降得过低。徐明等^[56]在操稳性研究中发现优化旋翼转速在改善迎角稳定性的同时会降低操纵性,而增加桨叶弹性刚度的作用正好相反,因此,可以将二者结合来保证较优的操稳性能。裴诗源等^[57]研究了悬停和前飞模式下旋翼转速变化对俯仰、滚转等方面性能的影响,发现降低旋翼转速会降低俯仰和滚转的操纵品质并加剧操纵耦合。

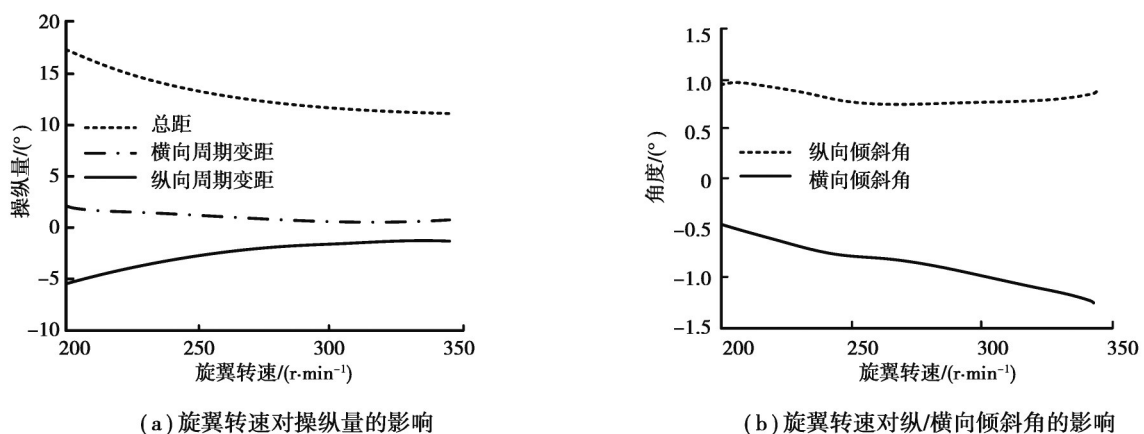


图3 配平操纵量随旋翼转速变化曲线^[36]

Fig. 3 Variation curve of operation variable with rotor speed^[36]

2.3 旋翼转速变化对振动和噪声的影响

旋翼转速变化对直升机的振动、噪声等方面性能的影响也很明显。旋翼转速的变化会使旋翼各阶载荷频率靠近甚至跨越机体的固有频率从而引发较严重的共振问题^[59]。Datta等^[54]通过风洞试验发现低转速高前

进比状态下的旋翼振动载荷与正常转速低前进比状态下相比更大,且随着旋翼转速的降低,后行侧小拉杆上存在瞬态冲击载荷现象,这主要是由后行桨叶反流区扩大、旋翼左右气流的不对称性加剧引起的。Bowen-Davies等^[29]和Berry等^[30-31]通过风洞实验研究了旋翼转速变化对旋翼系统振动特性的影响,分别测试了87%、78%和65%正常旋翼转速下 $0.29R$ (R 为桨叶半径)桨叶剖面处的振动载荷,结果表明,降低旋翼转速可有效减小桨毂4/rev(4片桨叶)的振动载荷(垂向和纵向);查倩雯^[34]则通过理论计算100%、90%和80%正常旋翼转速下 $0.5R$ 和 $0.8R$ 剖面处的挥舞弯矩和摆振弯矩,发现在不同飞行速度下随着旋翼转速降低其幅值均减小并产生更多的谐波分量,且在靠近桨尖位置的桨叶动载荷表现出更多高阶谐波载荷成分,吴凯华^[60]也得到类似结论。Han等^[61]对变转速旋翼通过共振区的摆振载荷问题进行理论研究,发现当1阶频率等于2倍旋翼转速时,桨根的摆振弯矩突然增加;韩东^[62]研究了变转速旋翼前3阶桨根载荷随旋翼转速变化的情况,发现挥舞和摆振载荷水平较高;黄东盛^[63]探讨了旋翼桨根挥舞和摆振方向的低阶载荷随旋翼转速的变化关系,发现降低旋翼转速有利于降低旋翼摆振载荷均值,在低转速时降低旋翼转速会导致挥舞和摆振载荷前3阶幅值较大,旋翼转速在摆振1阶共振转速附近时挥舞和摆振前2阶载荷明显突增。池骋等^[39]研究了旋翼转速与桨毂振动水平的相关性,发现在各前飞速度下桨毂振动水平均随旋翼转速降低而增加,在大前飞速度下不同旋翼转速对应的桨毂振动差异尤其明显。此外,孙宇^[64]发现提高旋翼桨叶的刚度可以降低低频状态下的振动频率幅值,从而明显降低旋翼在转速变化中的振动。目前,关于噪声与旋翼转速变化关系的研究较少。Iwata^[65]以采用变旋翼转速技术的民用直升机为对象研究转速与噪声的关系,结果表明当旋翼转速下降15%时,噪声减小约5db。池骋等^[39]研究发现气动噪声整体上随旋翼转速降低而降低,在高速区间较大和较小的旋翼转速都会增加载荷噪声,而厚度噪声在各速度段均随着旋翼转速降低而降低,对整体噪声贡献相对更明显。

3 变旋翼转速的优化与控制研究

变旋翼转速对直升机性能影响分析有力地推进了后续变旋翼转速相关技术,尤其是变旋翼转速优化与控制技术的研究与发展。本节从变旋翼转速的优化与控制及由变旋翼转速衍生的控制问题两方面切入,综述目前国内外的相关文献,以期厘清关键点和难点,为后续研究提供参考。

3.1 变旋翼转速的优化原理

图4为装有动力涡轮的涡轴发动机特性曲线图^[66],图中, P_e 为发动机相对输出功率, N_p 为动力涡轮相对转速, N_g 为燃气涡轮相对转速。可以发现: P_e 随着 N_p 增加先增加后降低,存在一个动力涡轮效率最高点(每条曲线上的凸点);随着 P_e 和 N_g 降低,动力涡轮效率最高点对应的动力涡轮相对转速也相应地降低(如图中虚线所示)。不同飞行状态下旋翼的需用功率不同,对应的发动机相对输出功率也不同,通过求解不同条件下的最优动力涡轮相对转速可以在保证发动机相对输出功率的前提下提升效率。

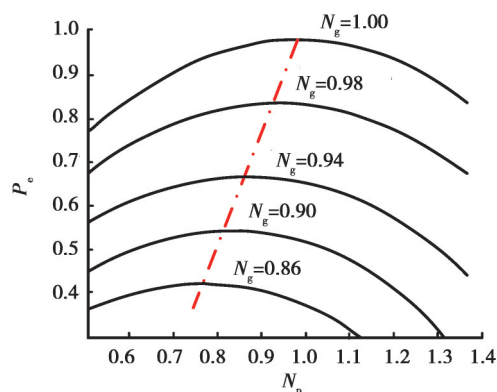


图4 涡轴发动机特性曲线图(自由转速)^[66]

Fig. 4 Characteristic curves of turboshaft engine (power turbine with variable speed)^[66]

3.2 变旋翼转速的优化与控制

早期的变旋翼转速优化与控制研究仅针对旋翼或发动机单独研究,忽略了两者之间的高度耦合性和非

线性时变性。仅针对旋翼端独立开展变旋翼转速研究,将需用功率最低等效为发动机燃油消耗最小,求解最优旋翼转速。由图4可知这很可能导致动力涡轮效率偏离其最大值点(曲线的凸点),增加燃油消耗率,此时的最优旋翼转速未必对应最佳燃油经济性,这很好地解释了最小需用功率对应的最优动力涡轮转速和最低发动机油耗对应的最优动力涡轮转速并不完全一致的现象^[50,67](在悬停状态,变化趋势相反)和基于最小需用功率的最优旋翼转速反而导致油耗增高的现象^[68-69]。仅针对发动机端独立开展变旋翼转速研究,以燃油消耗率最小为优化目标求得的最优动力涡轮转速只能在局部工况下(如悬停)实现直升机/发动机综合效率最优^[69]。因此,需要综合考虑直升机需用功率和发动机效率来优化旋翼转速。

部分学者以直升机/发动机综合系统为研究对象,开展了相关的转速优化与控制研究。在变旋翼转速条件下,旋翼需用功率是由旋翼转速和旋翼操纵量共同决定的。姚文荣等^[66,70]通过线性规划(linear programming, LP)算法求解动力涡轮转速与操纵量的匹配值来优化需用功率并使发动机处于最佳效率点,从而实现巡航条件下变旋翼转速的优化。但LP在性能寻优计算中存在精度不足的问题。为此,张海波等^[71]采用非线性最小二乘算法(Levenberg-Marquardt, L-M)和一维最优搜索算法对旋翼最小需用功率进行寻优,并进一步提出了先优化旋翼转速(或动力涡轮转速)再优化操纵量的串级优化策略。汪勇等^[72]考虑求解的实时性和最优桨叶载荷的边界限制,采用黄金分割法求解直升机/发动机系统的综合最优旋翼转速。宁景涛^[73]发现闭环发动机转速控制和无级变速传动系统转速控制2种模式下动力涡轮转速存在强不一致性,为保证旋翼转速优化的工况适应性提出了一种可调因子控制策略:设计变速系数 a_0 ,根据不同飞行条件动态调节动力涡轮变速系数 a_1 和无级变速系数 a_2 的值。

$$a_0 N_{mr} = n_f (a_1 n_{cvt}) n_i (a_2 N_p) \quad (1)$$

式中: N_{mr} 为最优旋翼转速; N_p 为动力涡轮转速; n_i 为第一级减速齿轮传动比; n_{cvt} 为无级变速装置传动比; n_f 为最后一级减速齿轮传动比。

汪勇等^[74]提出了类似的混合变转速控制策略,以动力涡轮转速相对于100%转速的变速比 n_{fit} 和无级变速传动系统的传动比 n_{cvt} 组成的变速分配因子为优化变量,并采用序列二次规划算法(sequential quadratic programming, SQP)求解,

$$N_{mr} = 100 n_{fit} n_{cvt} \quad (2)$$

宁景涛^[73]和汪勇等^[74]的研究均表明根据飞行工况合理地调整2种控制的权重能实现直升机各飞行条件下的综合性能优化。

3.3 变旋翼转速衍生的控制问题

变旋翼转速带来一系列的问题,如:转速跳变导致传动系统功率损失、变旋翼转速过程中的动力涡轮转速超调、下垂抑制和动态响应延迟等,这些问题亟待解决。本部分主要介绍变旋翼转速衍生的控制问题及其解决方法。

Litt等^[75]和陈国强等^[76-77]等基于双发动机配置和离散变速传动系统设计了扭矩序列转移控制方法,使在变旋翼转速过程中旋翼端始终与发动机输出端相连,避免了旋翼转速失控和由转速不同步造成的功率损失;陈名杨^[78]则研究了多发动机配置下的扭矩序列转移控制问题。图5以双发配置为例简述其控制策略:在恒转速阶段,2台发动机平分旋翼需求扭矩;在变转速阶段,发动机1增加扭矩,发动机2减小扭矩至特定阈值后系统控制离合器断开,此时发动机1独立提供需用功率并实现转速调节;发动机2调整转速至与发动机1处于同一转速重叠区时,再次与旋翼端接合,重新恢复双发模式。

图5中, T_{q1} 、 T_{q2} 和 T_{qmr} 分别表示发动机1、发动机2和主减速器的输出扭矩; W 为发动机的需求功率; N_{p1} 、 N_{p2} 分别表示发动机1和发动机2的转速。

以上控制策略与直接采用无级变速转速控制相比更繁琐。姚文荣等^[79]基于无级变速传动系统模型进行变旋翼转速控制研究,飞行控制系统根据求解的最优旋翼转速发送参考传动比至无级变速控制系统,从而在动力涡轮转速基本不变的条件下实现旋翼转速连续可调,但是该方案的落地还有赖于无级变速传动系统结构设计的实现。因此,目前较可行的方案就是基于发动机/直升机综合系统实现变旋翼转速控制。

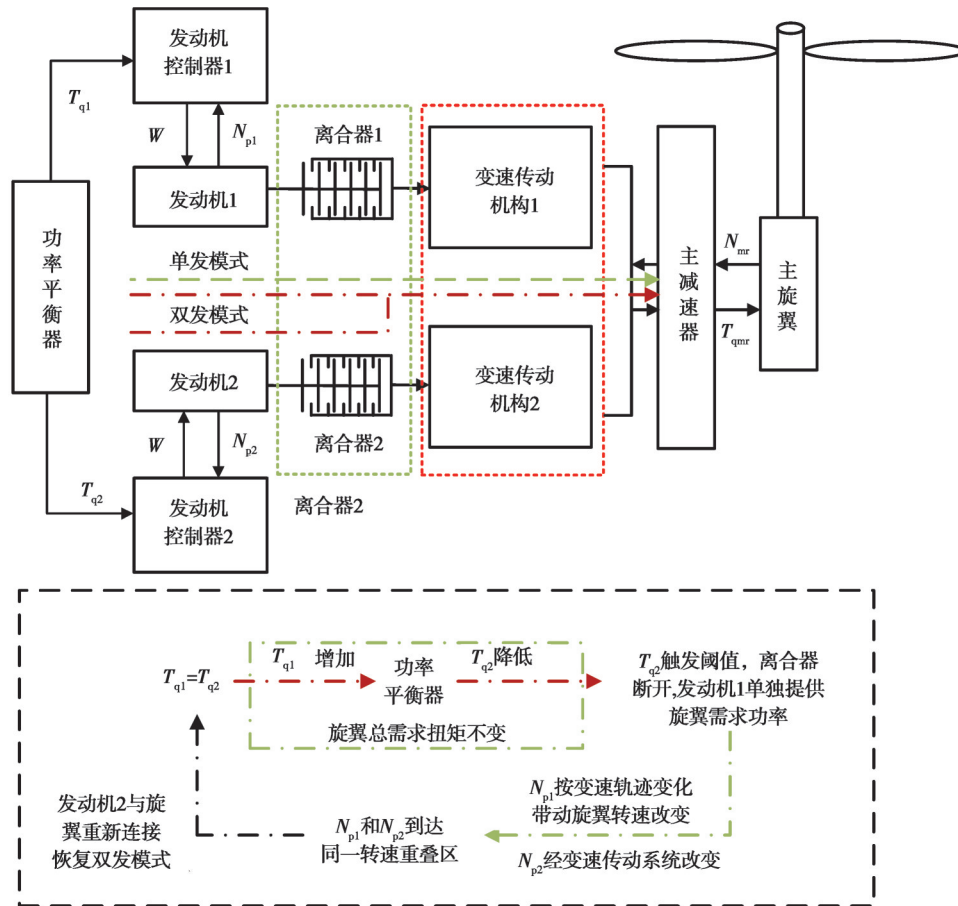


图 5 双发配置下的扭矩序列转移控制示意图

Fig. 5 Schematic diagram of torque sequence transfer control in dual engine configuration

当前基于发动机/直升机综合系统实现变旋翼转速控制还需要解决变转速带来的强扭矩扰动造成的转速超调/下垂、功率跟随迟缓和振动载荷增大等问题。恒转速控制过程中同样存在动力涡轮转速超调/下垂问题,为解决该问题先后产生了串级PID(proportional integral derivative)、总距/扭矩前馈控制、自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)和非线性模型预测控制(nonlinear model predictive control, NMPC)等方法。其中,ADRC最早由韩京清^[80]提出,能够通过在线估计并动态补偿未知干扰,控制效果好于PID;NMPC则能够预测旋翼扭矩和发动机动态响应,在处理有扰动、时滞和强非线性的复杂系统时具有优势。变旋翼转速条件下,需用功率由总距、周期变距、旋翼转速等共同表征,并且动力涡轮转速受扭矩扰动作用加剧,动力涡轮转速的超调和下垂问题比恒转速条件下更复杂。为此,扭矩前馈控制^[81]、多变量鲁棒控制结合ADRC方法^[82]、H2/H ∞ 鲁棒控制结合带扭矩前馈的ADRC方法^[76-77]、带扭矩前馈的串级ADRC控制^[73,83]等被引入到旋翼变转速控制中,数字仿真表明带扭矩前馈的串级ADRC控制能使转速变化更平稳,超调和下垂抑制更明显,负载响应更快速。此外,居新星^[84]、汪勇等^[85]和Wang等^[86]建立了适用于变旋翼转速控制过程的NMPC模型,同样能有效抑制变旋翼转速控制过程中的动力涡轮转速的超调和下垂,实现发动机的快速响应;颜秋英等^[87]通过设计增量式非线性动态逆飞行控制器,降低了爬升时速度和变动力涡轮转速的超调;Wang等^[88]设计了线性变参数/动态反演控制器,实现了涡轴发动机变转速的快速响应控制。变旋翼转速条件下振动载荷频率发生变化,针对固定旋翼转速直升机的振动控制应用在变旋翼转速直升机上的振动抑制效果降低甚至失效。马胜明^[89]采用加装变频液弹吸振器的方法,根据旋翼转速的变化来调节旋翼的调谐频率,从而抑制桨叶的摆振载荷。此外,旋翼转速变化引起的谐波基函数误差和作动器与测点的频响函数误差可能导致振动控制发散。郎凯等^[90]提出了一种基于滑膜输出反馈算法和归一化步长方法的混合控制方法用于振动主动控制,结果表明能实时跟踪旋翼载荷频率和自适应调节控制参数,从而有效抑制机体振动。

4 变旋翼转速技术的实现方案

优化与控制问题关乎变旋翼转速技术能否实现预期功能,而实现变旋翼转速的结构设计才是其能否走向工程应用的关键所在。随着直升机设计水平的提升,变旋翼转速已经具备技术上的可行性,表1为目前采用变旋翼转速设计的机型。由表1可知,目前变旋翼转速的实现方案主要有2种:发动机变速(+固定传动比传动)和传动系统变速(+发动机转速恒定)。本节主要综述这2种实现方案的相关研究。

表1 采用变旋翼转速技术的直升机及其变转速实现方法

类型	公司	机型	变旋翼转速方案
常规直升机	Sikosky	H-5(最早)	传动系统变速
	Eurocopter	EC135、EC145	发动机变速
复合直升机	Lockheed Martin	夏延 AH-56	发动机变速 ^[91]
	Eurocopter	X3	传动系统变速
复合直升机-共轴双旋翼直升机	Sikosky	XH-59、X2、S-97“侵袭者”	发动机变速+传动系统变速
	Sikosky-Boeing	SB>1“挑战者”	发动机变速+传动系统变速
复合直升机-最优旋翼转速直升机	Boeing	A160“蜂鸟”无人直升机	传动系统变速
倾转旋翼机	Bell	XV-15	传动系统变速
	Bell-Lockheed Martin	V-280	传动系统变速
	Bell-Boeing	V-22“鱼鹰”	发动机变速+传动系统变速
	Leonardo/Agusta Westland	AW609	发动机变速

4.1 发动机变速

发动机变速(动力涡轮变转速),即通过调节发动机输出轴转速来改变主旋翼输出转速,能够避免传动系统质量增加,同时实现主旋翼转速的连续可调,是变旋翼转速的理想实现方案。然而,常规的动力涡轮设计通常只能在较窄范围内保证发动机的高效运行^[92],限制了转速调节范围,因此效能提升有限。涡轴发动机的燃气涡轮和动力涡轮之间仅有气动联系,可以通过调整动力涡轮转速实现宽范围连续变转速(50%~100%)。自20世纪90年代以来,美国在军用和民用领域分别开展了变转速动力涡轮(variable speed power turbine, VSPT)的研究。其中,美国军方的V-22“鱼鹰”倾转旋翼机搭载了具有两级变转速动力涡轮的AE1107C发动机,但是只能实现81%(巡航)和100%(起飞)2个转速调节^[93]。在民用领域,GE公司在NASA Lewis Research Center的资助下设计了包括固定几何动力涡轮和变几何动力涡轮在内的8种变转速动力涡轮;NASA Glenn Research Center在大型民用倾转旋翼机项目(large civil tilt rotor aircraft project, LCTR)中设计了6种变转速动力涡轮^[94-95]。先进变转速动力涡轮计划(advanced variable speed power turbine, AVSPT)中针对倾转旋翼机设计的发动机能实现55%~105%的转速调节,技术成熟度达到TRL4^[96](technology readiness level, TRL)。然而目前的变转速动力涡轮设计方案均不同程度地面临结构复杂、质量大、可靠性低、成本偏高等问题,还处于概念设计阶段。

目前变转速动力涡轮的研究难点仍然是涡轮效率问题,要求在实现变转速的同时还要保证涡轮高效稳定的功率输出,而涡轮效率主要与涡轮载荷、叶型攻角、雷诺数有关,因此在以下方面还面临关键技术难题。

1) 涡轮载荷较大问题:涡轮转速降低造成的级载荷增加是巡航工况下涡轮效率降低的主因。增加涡轮级数可以有效降低级载荷,但会造成叶型攻角变化过大而导致气动损失^[12]。因此,通过合理地选择级数和其他叶型攻角变化抑制技术来保证高载荷下的涡轮效率对变转速动力涡轮至关重要。

2) 叶型攻角变化较大问题:随涡轮转速降低叶型攻角会偏离设计值,导致气动性能恶化,涡轮效率降低。

宽攻角适应性叶型设计和可变导叶与动叶设计能有效解决叶型攻角损失,但是会造成间隙泄漏、增加重量和控制复杂度等问题^[66]。

3)低雷诺数问题:低雷诺数问题使得前2个问题造成的气动问题更加突出。将动力涡轮设计点设置在巡航速度附近能够弥补部分效率损失,但是并没有从根本上解决低雷诺数环境下高负荷大叶型攻角造成的效率降低问题^[10,97-98]。

4.2 传动系统变速

传动系统变速技术既可以实现50%~100%宽范围的转速调节,又具有较高的技术成熟度,因此成为发动机变速的理想替代方案。目前变速传动系统构型主要有两级变速传动构型和无级变速传动构型2种。本节整理归纳了在传动系统变速构型方面的研究,以期为未来研究提供参考。

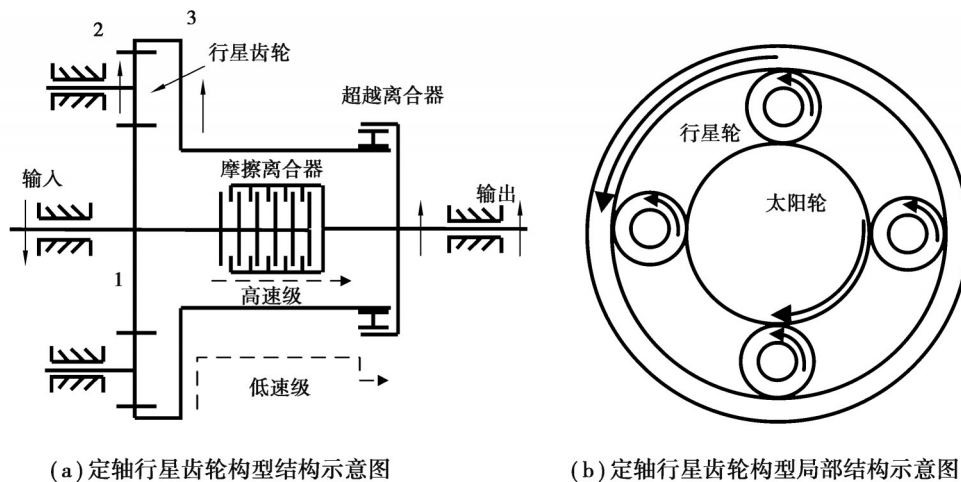
4.2.1 两级变速方案

吴裕平等^[49]对有限级变速展开了研究,发现多级变速并不能比两级变速更高效地降低需要功率,反倒会使结构设计更复杂和成本剧增。目前,两级变速传动是最多的有限级变速方案,基本都是离合器和齿轮的组合传动模式^[99],且部分构型设计已经应用于部分机型(表1)。目前主要有如下几种两级变速传动构型。

1) 离合器-行星齿轮构型

行星轮系因为传动效率高、传动比范围大、负载能力强、结构紧凑等优点在变速传动系统中应用广泛^[16]。目前含有行星轮系的两级变速传动构型如下。

a)定轴行星齿轮构型^[100]。该构型(图6)最早由NASA Glenn Research Center提出。摩擦离合器接合时,动力经过太阳轮1直接由输出端高速输出;摩擦离合器断开时,动力从太阳轮1到行星齿轮2再到齿圈3,超越离合器接合,由输出端低速输出。该构型存在低速级输入和输出方向相反的缺点。



(a) 定轴行星齿轮构型结构示意图

(b) 定轴行星齿轮构型局部结构示意图

图6 定轴行星齿轮构型

Fig. 6 Two-speed transmission configuration with fixed-axis planetary gear

b)改进型定轴行星齿轮构型^[4]。为克服原设计的缺点,NASA Glenn Research Center分别设计了3种不同的方案保证高、低速时动力的同向输出。

定轴双星惰轮构型(图7)在低速路径上增加一个行星轮充当惰轮,在不改变传动比的情况下改变旋转方向。该方案结构紧凑,技术成熟,但是行星轮间的均载设计较困难。

反向定轴双星构型(图8)在低速路径的输出侧增加了行星齿轮4和齿圈5,实现动力反向输出。该构型一定程度上解决了均载问题,但结构复杂。

定轴行星齿轮-面齿轮构型(图9)在低速路径上增设面齿轮4、面齿轮6和直齿轮5。面齿轮4设计为惰轮,实现高、低速输出转向相同;此外,面齿轮还能保证均载。该构型利用了面齿轮均载特性好、传动更平稳的特点^[101-104],但是需要解决面齿轮的加工问题。

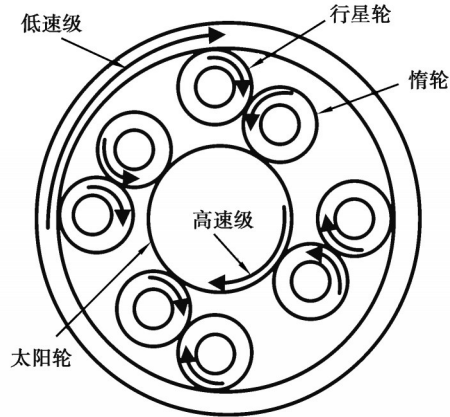


图 7 定轴双星惰轮构型

Fig. 7 Two-speed configuration with fixed-axis planetary and idler gear

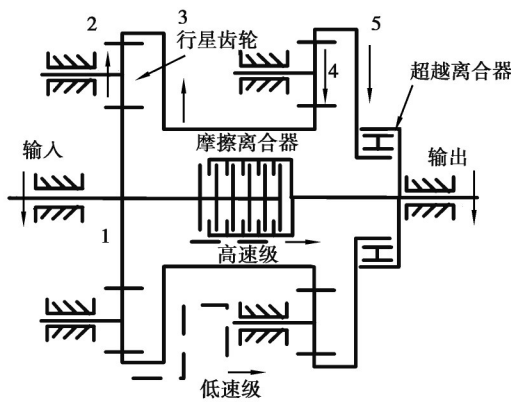


图 8 反向定轴双星构型^[18]

Fig. 8 Two-speed configuration with reversing and fixed-axis double planetary gear^[18]

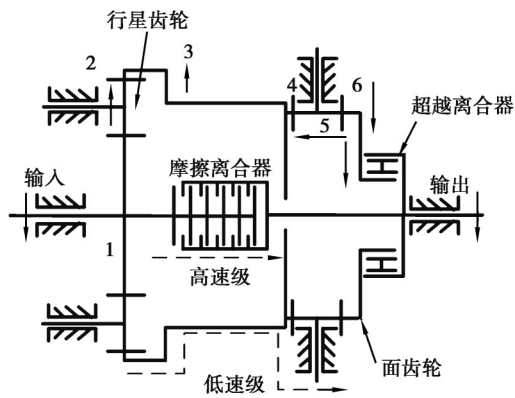


图 9 定轴行星齿轮-面齿轮构型^[18]

Fig. 9 Two-speed transmission configuration with fixed axis planetary gear-face gear^[18]

2) 偏置复合齿轮构型^[13,105]

该构型(图 10)中偏置复合齿轮输入端的内齿轮和输出端的外齿轮使用了相同的中径,可以串联啮合实现减速传动。离合器接合时,动力直接经过太阳轮和离合器由输出端高速输出;离合器分离时,动力经过偏置复合齿轮由输出轴低速输出。该构型结构简单、技术成熟,但轴向尺寸较大^[18]。

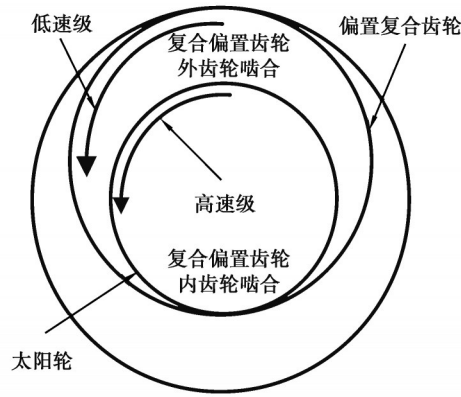


图 10 偏置复合齿轮构型

Fig. 10 Two-speed transmission configuration with offset compound gear

3) 离合器-超越齿轮构型^[106-108]

西科斯基公司和贝尔公司的专利中都包含此种构型(图 11)。摩擦离合器接合时,动力直接经摩擦离合器传递至输出端高速输出,此时齿轮 3 的转速高于齿轮 2 而处于自由状态;离合器分离时,动力需要经过齿轮 1、齿轮 2、超越离合器、超越齿轮 3 传递至输出端,通过 2 次减速实现低速输出,并保证高、低速输出转向相同。该构型简单易行,但传动链路较长。

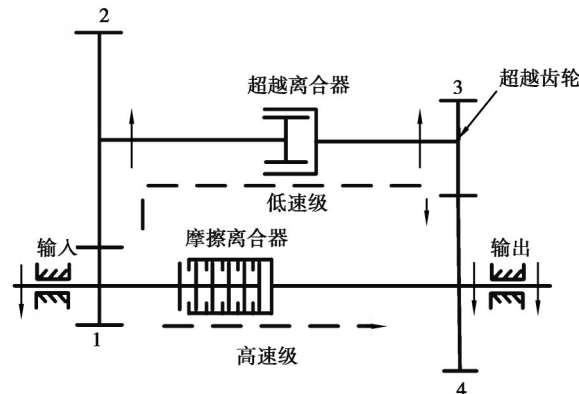


图 11 离合器-超越齿轮构型^[17]

Fig. 11 Two-speed configuration with clutch-free gear^[17]

4) 离合器-差动轮系构型

差动轮系能够实现大传动比范围的平稳传动,且具有体积小、承载能力强的特点,常用于变速机构的设计中^[109-110]。目前有单离合器-差动轮系构型^[103](图 12(a))和双离合器-差动轮系构型^[111](图 12(b))2 种两级变速构型。

对于单离合器-差动轮系构型,摩擦离合器分离时,自由轮锁死,动力直接从输出轴到太阳轮 6,然后经行星齿轮 5、齿圈 4 和行星架高速输出;摩擦离合器接合时,自由轮放松,动力分 2 路传递,一路经齿轮 1、齿轮 2、摩擦离合器、齿轮 3 和齿圈 4 传递,一路直接到太阳轮 6,2 路动力汇总后由行星架低速输出。该构型结构简单、可行性高,但是传动受配齿精度影响明显。双离合器-差动轮系构型实质上就是用超越离合器替换自由轮,然后再对称布置一个摩擦离合器,动力传递过程类似。配齿困难、制造精度要求高、安装困难是两者的共性问题,而后者还存在控制复杂、对称部位均载难以保证的问题。

此外,还存在一种双离合两级变速传动构型^[100](图 13),2 个离合器分别布置在同一轴向的 2 根轴上。高速离合器(左侧)接合时,低速离合器断开,动力经过机械机构直接驱动轴 2 高速输出;低速离合器(右侧)接合时,高速离合器断开,动力经过液力机构驱动实现减速驱动轴 2 低速输出。

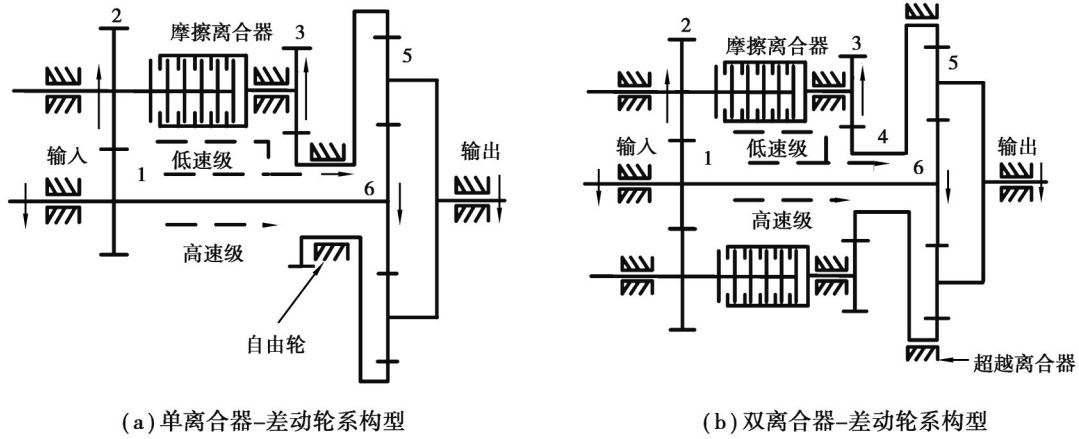


图12 离合器-差动轮系构型^[17]

Fig. 12 Two-speed configuration with clutch-differential gear-train^[17]

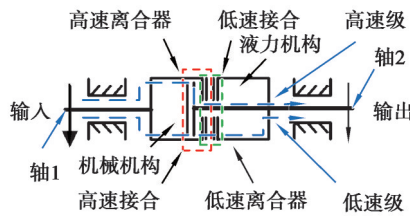


图13 双离合两级变速传动构型

Fig. 13 Double clutch two-stage variable speed transmission configuration

5) 外装变速机构构型^[112]

西科斯基公司的专利中还通过外装变速机构实现输出转速的改变:方案1(图14(a))在第三级减速齿轮上加装变速装置30A、30B(图中红色方框部分);方案二(图14(b))在主减速器输出轴加装变速装置110(图中红色方框部分)。专利中缺乏变速机构具体结构的描述,推测应该也是离合器和齿轮传动的组合结构。

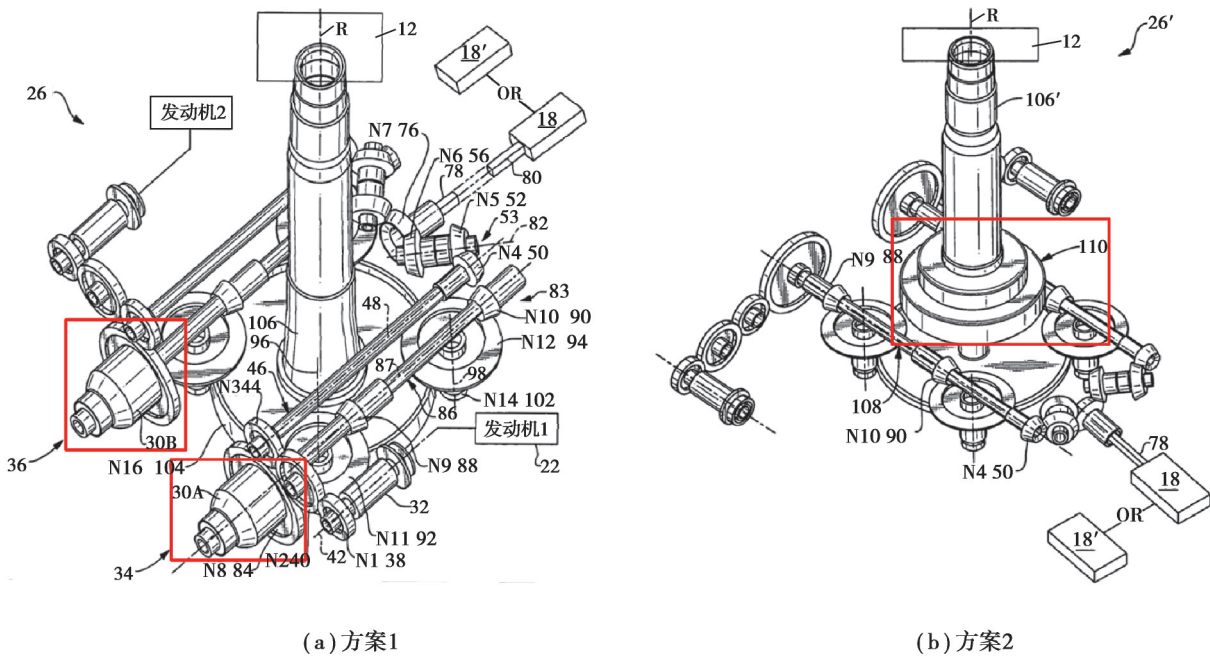


图14 外装变速机构的两级变速传动构型^[112]

Fig. 14 Two-speed transmission configuration with external variable speed mechanism^[112]

4.2.2 无级变速方案

两级变速主要针对直升机悬停和巡航工况,在高、低速切换过程中会发生转速跳变和不同步现象,导致振动冲击和功率损失,而无级变速传动则能够轻易实现连续、平稳的转速调整,因而更适合最优旋翼转速直升机,但由于设计复杂度较高,目前整体上仍处于概念研究阶段。

无级变速来源于Torotrak公司的专利,2003年SAE年会正式提出无级变速的概念。目前,无级变速传动主要应用于风机领域和汽车传动领域。NASA Glenn Research Center在其专利中最早提出双输入差动轮系无级变速传动构型^[100](图15(a)):发动机2与控制轮相连间接改变行星齿轮的转速从而实现差动输出。当发动机1和发动机2转速相同、转向相反时,可实现高速输出;当发动机1全转速旋转,而发动机2减速旋转时,可实现输出转速在指定范围内的连续变化。实际上,发动机2也可以由电机、速度控制器、超环面机械变速机构(toroidal driver)等代替^[13]。此外,可以在行星轮系和控制轮之间加装惰轮(图15(b))保证输入与输出同向。此外,Lemanski等^[113]提出了一种差动无级变速传动(pericyclic continuously variable transmission)的创新构型,由滚轮和凸轮正啮合实现变速传动,与行星齿轮设计相比能大幅降低传动系统重量^[114-117]。

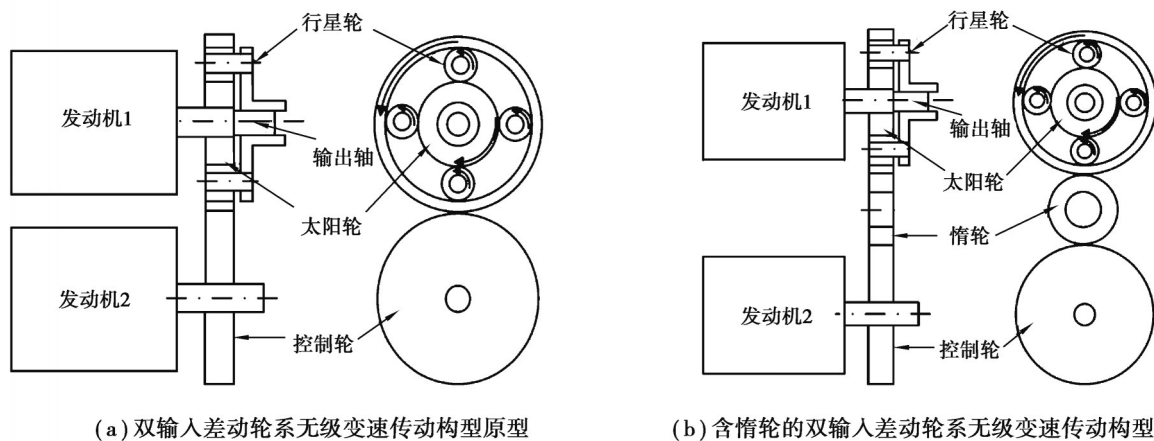


图15 双输入差动轮系无级变速传动构型^[100]

Fig. 15 Continuously variable transmission configuration with dual input differential gear train^[100]

综上,两级变速传动构型和无极变速传动构型均能满足基本的变旋翼转速需求,但两者在结构设计、功能实现、适用性等多方面存在差别,同时也存在一些共性问题,归结如下。

1) 结构设计:两级变速只需针对悬停和巡航状态在两个速度设计点进行切换,结构相对简单,而无级变速需要连续调节转速,因而其结构设计更加复杂。

2) 功能实现:两级变速只能在高低2个设计速度点实现效率最优,在高、低转速切换过程中还存在转速跳变和功率损失问题,离合器长时间接合还会导致摩擦发热^[118]。无级变速能有效避免上述问题,同时拓宽了不同飞行状态下实现最优旋翼转速的可能性。

3) 适用性:无级变速更适合飞行状态变化频繁的最优转速旋翼直升机,而两级变速与长期处于悬停和巡航2种工况的倾转旋翼机更适配。

4) 共性问题:与固定传动比传动构型相比,均不同程度地增加了传动系统的重量和结构复杂性,降低了机械传动效率,这一定程度上抵消了变旋翼转速带来的能耗减少。此外,两级变速主要通过离合器进行高、低转速的切换,无级变速通过转速控制装置实现连续变速,均存在可靠性降低的问题。

5 总结与展望

变旋翼转速直升机在提高飞行速度、减少燃油消耗、延长续航里程和续航时间及改善噪声等方面优势明显,同时也存在着共振风险增高、自转安全性下降,以及结构设计和控制复杂等问题。当前,变旋翼转速对直升机性能的影响研究较多且较成熟,这为变旋翼转速技术的深入研究和工程应用提供了理论基础;基于发动机/直升机综合系统对变旋翼转速进行优化与控制有利于提升发动机/直升机这一高耦合系统的整体效率;针

对变旋翼转速过程中的转速超调、跳变、动态响应品质变差和系统鲁棒性降低等问题的研究进一步提升了直升机的综合性能;变旋翼转速的结构实现(变转速动力涡轮技术和变速传动系统构型设计)问题的研究,极大地加快了变旋翼转速技术工程应用的步伐。然而,以上方面的研究仍存在诸多不足,面临较多的理论和技术难题。文中从4个方面对变旋翼转速技术进行总结并展望其未来发展,内容如下。

1)更普适、全面、详尽和准确的直升机性能参数采集、计算和分析。目前大部分关于变旋翼转速直升机性能分析的研究是基于模型计算分析或将风洞测试数据经性能分析软件处理得出主要性能参数的变化规律,模型精度、实验室测试与真实飞行工况的符合程度均会影响结论的准确可靠性。此外,大部分研究仅针对特定机型和定常稳定飞行场景,并未验证结论在其他机型和极端非正常场景(高速、大载荷、高海拔等)的适用性。基于以上研究得出的理论性成果用于指导实际变旋翼转速设计可能存在一定偏差。因此,未来还需要通过更精确的计算模型、贴近真实工况的测试、更丰富的机型和更完备的性能参数评价指标进一步展开变旋翼转速对直升机性能的影响研究。

2)变旋翼转速综合建模、优化与控制的研究有待加强。限于研究条件,当前多数研究采用近似简化模型,如采用简化旋翼模型代替直升机模型、采用的模型缺乏飞行控制模块、采用理想变速传动模型等,忽略了模型精度和各子系统间耦合性的影响。当前的研究更多地专注于挖掘发动机/直升机系统的功率/能耗性能来优化和控制旋翼转速,而较少考虑最大飞行速度、最大航程和航时、机动性、稳定性和声学特性等性能指标实现更综合的优化与控制。此外,如何解决变旋翼转速过程中的衍生问题,提升直升机的综合性能和控制品质,同样值得深入研究。因此,未来有必要建立更精确、更完整和更综合的变旋翼转速优化控制模型,实现直升机性能的综合优化和改善控制品质。

3)变转速动力涡轮和变速传动系统构型的设计问题有待深入研究。变转速动力涡轮需要在保证宽转速调节范围的同时保证高效率,如何通过结构设计和优化有效解决高载荷、低雷诺数、叶型攻角变化较大等影响动力涡轮效率的问题亟待继续深入研究。两级变速传动是目前成熟度较高的方案,但难以实现连续调速,如何通过设计和控制实现准连续调速值得深入研究;无级变速传动能实现宽范围连续转速调节,工况适应性更好,是较为理想的方案,但目前技术可行性较低,结构设计研究亟待加强。此外,质量增加、结构复杂、可靠性降低、传动效率下降和齿轮加工困难等是变速传动系统设计的共同难题,也是未来变速传动研究的重点。

4)真实飞行工况下的测试验证和工程应用有待落实。目前多数研究仅从理论研究和数字仿真试验或半物理仿真试验来展开变旋翼转速的研究,理论的准确性和方法的可靠性亟待实物测试验证。虽然部分变转速动力涡轮和变速传动系统构型设计已经应用于少量机型,但多数方案仍停留在专利或文献中,亟待工程化。因此,有必要进一步完善设计和解决工程中的应用难题。

参考文献

- [1] 黄明其,徐栋霞,何龙,等. 常规旋翼构型复合式高速直升机发展概况及关键技术[J]. 航空动力学报, 2021, 36(6): 1156-1168.
Huang M Q, Xu D X, He L, et al. Development overview and key technologies of high speed hybrid helicopter with single main rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(6): 1156-1168.(in Chinese)
- [2] 包明敏,苏兵兵,吴令华,等. 新构型高速旋翼飞行器的现状和发展趋势[J]. 飞行力学, 2019, 37(3): 1-8.
Bao M M, Su B B, Wu L H, et al. Status and development trends of new configuration high-speed rotorcraft[J]. Flight Dynamics, 2019, 37(3): 1-8. (in Chinese)
- [3] 吕春雷,朱璟,黄利. 突破直升机速度极限[J]. 航空制造技术, 2014, 57(19): 34-37.
Lv C L, Zhu J, Huang L. Break limit of helicopter speed[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(19): 34-37. (in Chinese)
- [4] 邓景辉. 直升机技术发展展望[J]. 航空科学技术, 2021, 32(1): 10-16.
Deng J H. Development and prospect of helicopter technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(1): 10-16. (in Chinese)
- [5] 韩东,董晨,魏武雷,等. 自适应旋翼性能研究进展[J]. 航空学报, 2018, 39(4): 021603.
Han D, Dong C, Wei W L, et al. Research progress in performance of adaptive rotor[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(4): 021603. (in Chinese)

- [6] 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 C H, Fan F, Xu M. The development overview of coaxial rigid rotor helicopter[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2021, 32(1): 47-52. (in Chinese)
- [7] 王健康,顾计刚,姚文荣,等. 直升机/发动机综合控制的发展及技术特点[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(4): 1066-1076.
Wang J K, Gu J G, Yao W R, et al. Development and technical feature of integrated helicopter/engine control[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2014, 34(4): 1066-1076. (in Chinese)
- [8] Amri H, Paschinger P, Weigand M. Possible technologies for a variable rotor speed rotorcraft drive train[C/OL]//42nd European Rotorcraft Forum 2016. 2016[2022-03-05]. <http://hdl.handle.net/20.500.12708/67734>.
- [9] Welch G E. Overview of variable-speed power-turbine research[C/OL]//2011 NASA Fundamental Aeronautics Conference, Cleveland, OH, USA. NASA Glenn Research Center, 2011[2022-05-24]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20110011378>.
- [10] 袁成. 新概念变速动力涡轮[C]//第十五届中国科协年会第13分会场: 航空发动机设计、制造与应用技术研讨会论文集, 贵阳. 北京: 中国科学技术协会, 2013: 289-293.
Yuan C. New concept of variable speed power turbine[C]//13th Branch Venue of the 15th Annual Conference of China Association for Science and Technology: Proceedings of Symposium on Aeroengine Design, manufacturing and Application Technology, Guiyang. Beijing: China Association for Science and Technology, 2013: 289-293. (in Chinese)
- [11] 张绍文,潘尚能,罗建桥,等. 高速旋翼机变转速动力涡轮的发展[J]. 国际航空, 2015 (11): 65-67.
Zhang S W, Pan S N, Luo J Q, et al. Variable speed power turbine for high speed rotorcraft[J]. *International Aviation*, 2015 (11): 65-67. (in Chinese)
- [12] 吴小芳,刘长青,熊清勇. 高速直升机变转速动力涡轮发展及气动设计特点[J]. 中国科技纵横, 2020(8): 102-103.
Wu X F, Liu C Q, Xiong Q Y. Development and aerodynamic design characteristics of variable speed power turbine for high speed helicopter[J]. *China Science & Technology Overview*, 2020(8): 102-103. (in Chinese)
- [13] Stevens M A, Handschuh R F, Lewicki D G. Concepts for variable/multi-speed rotorcraft drive system[C/OL]//64th Annual Forum and Technology Display, Montreal, Canada. American Helicopter Society, 2008[2022-05-24]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20080045530>.
- [14] Stevens M A, Lewicki D G, Handschuh R F. Concepts for multi-speed rotorcraft drive system-status of design and testing at NASA GRC[C/OL]//American Helicopter Society (AHS) Annual Forum, Virginia Beach, VA, USA. American Helicopter Society, 2015[2022-05-24]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20150010716>.
- [15] 李昊,陈晖. 直升机变转速传动技术的发展需求和现状[J]. 航空制造技术, 2016, 59(8): 46-50.
Li H, Chen H. Development need and status of variable speed transmission for helicopter[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(8): 46-50. (in Chinese)
- [16] 李磊. 变转速直升机主传动系统试验台的设计及分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
Li L. Design and analysis of variable-speed helicopter main transmission test stand[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [17] 李丰波. 直升机变速传动摩擦离合器及传动系统动态特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
Li F B. Research on dynamic characteristics of helicopter variable speed drive friction clutch and transmission system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [18] 李政民卿,李英明,王浩,等. 无人直升机主减中两级变速齿轮传动构型方案概述[J]. 机械传动, 2018, 42(1): 167-170.
Li Z M Q, Li Y M, Wang H, et al. Sketch of the configuration scheme of two-stage variable speed gear transmission in unmanned helicopter main gearbox[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2018, 42(1): 167-170. (in Chinese)
- [19] Dibble R, Ondra V, Titurus B. Resonance avoidance for variable speed rotor blades using an applied compressive load[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 88: 222-232.
- [20] Karem A E. Optimum speed rotor: US6007298[P]. 1999-12-28.
- [21] Karem A. Hummingbird A160 and optimum speed rotor (OSR)[C]//AHS International Specialists' Meeting on Unmanned Rotorcraft: Design, Control and Testing, Proceedings. 2005: 335-356.
- [22] Johnson W, Yamauchi G K, Watts M E. NASA heavy lift rotorcraft systems investigation[J]. *SAE transactions*, 2005: 688-716.
- [23] 徐明,李黔,李建波. 最优转速旋翼直升机关键技术分析[J]. 航空科学技术, 2017, 28(11): 38-41.
Xu M, Li Q, Li J B. Analysis of helicopter key technologies with optimum speed rotor[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2017, 28(11): 38-41. (in Chinese)
- [24] 丁乙. 一键飞行——西科斯基首席试飞员眼中的X2系列直升机[EB/OL]. 2019-03-07 [2022-05-24]. <https://zhuanlan.zhihu>.

- com/p/58499193.
- Ding Y. One click flight——X2 series helicopter in the eyes of Sikorsky's chief test pilot [EB/OL]. 2019-03-07 [2022-05-24]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/58499193>. (in Chinese)
- [25] 丁乙. V-22 鱼鹰倾转旋翼机系统特点浅谈[EB/OL]. 2019-01-15. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/54863905>.
- Ding Y. Characteristics of V-22 Osprey tilt rotor aircraft system [EB/OL]. 2019-01-15 [2022-05-24]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/54863905>. (in Chinese)
- [26] 王伟, 段卓毅, 周林. 倾转旋翼机设计特点及难点浅析[J]. 航空科学技术, 2015, 26(3): 1-4.
- Wang W, Duan Z Y, Zhou L. Brief analysis on the design features and difficulties of tiltrotor[J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26(3): 1-4. (in Chinese)
- [27] 吴希明, 牟晓伟. 直升机关键技术及未来发展与设想[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(3): 1-10.
- Wu X M, Mu X W. A perspective of the future development of key helicopter technologies[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(3): 1-10. (in Chinese)
- [28] Schrage D P. Inclusion of the rotor speed degree of freedom for substantial increases in advanced rotorcraft performance and safety[J/OL]. SAE Technical Papers, 2005: 2005-01-3168 [2022-05-24]. <https://doi.org/10.4271/2005-01-3168>.
- [29] Bowen-Davies G M, Chopra I. Aeromechanics of a variable-speed rotor[C]//Proceedings of the American Helicopter Society 67th Annual Forum. Virginia Beach, Virginia, USA: American Helicopter Society Forum, 2011: 1058-1073.
- [30] Berry B, Chopra I. Wind tunnel testing for performance and vibratory loads of a variable-speed mach-scale rotor[C]//Proceedings of the American Helicopter Society 67th Annual Forum. Virginia Beach, Virginia, USA: American Helicopter Society Forum, 2011: 1227-1240.
- [31] Berry B, Chopra I. Wind tunnel testing of an instrumented rotor at high advance ratio[C/OL]//56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Kissimmee, Florida, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2015[2022-05-24]. <https://doi.org/10.2514/6.2015-0950>.
- [32] 徐明, 韩东, 李建波. 变转速旋翼气动特性分析及试验研究[J]. 航空学报, 2013, 34(9): 2047-2056.
- Xu M, Han D, Li J B. Analysis and experimental investigation on the aerodynamic characteristics of variable speed rotor[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(9): 2047-2056. (in Chinese)
- [33] Amri H, Feil R, Hajek M, et al. Possibilities and difficulties for rotorcraft using variable transmission drive trains[J]. CEAS Aeronautical Journal, 2016, 7(2): 333-344.
- [34] 查倩雯. 变转速旋翼直升机动力学建模及仿真分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- Zha Q W. Dynamic modeling and simulation analysis of helicopter with variable speed rotor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [35] Steiner J, Gandhi F, Yoshizaki Y. An investigation of variable rotor RPM on performance and trim[C]//64th Annual Forum Proceedings of the American Helicopter Society, Montreal, Canada. American Helicopter Society, 2008: 697-705.
- [36] 韩东. 变转速旋翼直升机性能及配平研究[J]. 航空学报, 2013, 34(6): 1241-1248.
- Han D. Study on the performance and trim of helicopters with variable speed rotors[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(6): 1241-1248. (in Chinese)
- [37] 刘士明, 杨卫东, 董凌华, 等. 优化转速旋翼性能分析与应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(6): 888-894.
- Liu S M, Yang W D, Dong L H, et al. Performance investigation and applications of optimum speed rotors[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(6): 888-894. (in Chinese)
- [38] 杨悦. 变旋翼转速直升机飞行特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- Yang Y. Research on helicopter flight characteristics of variable speed rotor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [39] 池骋, 陈仁良. 旋翼转速变化对直升机需用功率、配平、振动及噪声的影响分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(5): 629-639.
- Chi C, Chen R L. Influence of rotor speed variation on required power, trim, vibration and noise of helicopter[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(5): 629-639. (in Chinese)
- [40] Shah S, Han D, Yang K. Performance analysis of slowed rotor compound helicopter[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 37(S): 9-17.
- [41] 徐明. 最优转速旋翼直升机总体气动技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- Xu M. Research on aerodynamic and preliminary design of helicopter with OSR[D]. Nanjing: Nanjing University of

- Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [42] Han D, Pastrikakis V, Barakos G N. Helicopter performance improvement by variable rotor speed and variable blade twist[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 54: 164-173.
- [43] Mistry M, Gandhi F. Helicopter performance improvement with variable rotor radius and RPM[J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 2014, 59(4): 17-35.
- [44] Germanowski P J, Stille B L, Strauss M P. Technology assessment for large vertical-lift transport tiltrotors: NASA/CR-2010-216384[R]. Ames Research Center, 2010.
- [45] Kang H, Saberi H, Gandhi F. Dynamic blade shape for improved helicopter rotor performance[J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 2010, 55(3): 32008.
- [46] 韩东, 林长亮, 李建波. 旋翼变体技术对直升机性能的提升[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(9): 2017-2023.
Han D, Lin C L, Li J B. Helicopter performance improvement by rotor morphing technologies[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(9): 2017-2023. (in Chinese)
- [47] Han D, Barakos G N. Variable-speed tail rotors for helicopters with variable-speed main rotors[J]. *The Aeronautical Journal*, 2017, 121(1238): 433-448.
- [48] 尹崇, 高郭池, 全敬泽, 等. 直升机可变旋翼转速模式对适航审定中性能的影响[J]. *直升机技术*, 2021(1): 24-27.
Yin C, Gao G C, Quan J Z, et al. Effect of variable rotor speed mode on airworthiness performance of helicopter[J]. *Helicopter Technique*, 2021(1): 24-27. (in Chinese)
- [49] 吴裕平, 董凌华, 解望. 变转速旋翼直升机的续航性能与变速策略[J]. *南京航空航天大学学报*, 2018, 50(2): 193-199.
Wu Y P, Dong L H, Xie W. Endurance performance and rotational speed change of variable speed rotor helicopter[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2018, 50(2): 193-199. (in Chinese)
- [50] Prouty R W. Should we consider variable rotor speeds[J]. *Vertiflite*, 2004, 50(4): 24-27.
- [51] DiOttavio J, Friedmann D. Operational benefits of an optimal, widely variable speed rotor[C]//American Helicopter Society 66th Annual Forum Proceedings. The American Helicopter Society Inc., 2010: 11-13.
- [52] Goi T, Kawakami K, Yamakawa E, et al. Variable rotor speed transmission with high speed traction drive[C]//The American Helicopter Society 55th Annual Forum, May 25-27, 1999, Montreal, Quebec. The American Helicopter Society Inc., 1999: 183-194.
- [53] Iwata T, Rock S. Benefits of variable rotor speed in integrated helicopter/engine control[C]//Guidance, Navigation and Control Conference, August 9-11, 1993, Monterey, CA. Reston, Virginia: AIAA, 1993: 1342-1348.
- [54] Datta A, Yeo H, Norman T R. Experimental investigation and fundamental understanding of a full-scale slowed rotor at high advance ratios[J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 2013, 58(2): 1-17.
- [55] Guo W, Horn J. Rotor state feedback control for rotorcraft with variable rotor speed[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, August 10-13, 2009, Chicago, Illinois. Reston, Virginia: AIAA, 2009: 5797.
- [56] 徐明, 李建波, 韩东. 旋翼转速优化直升机的纵向操纵性与稳定性分析[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(6): 1374-1381.
Xu M, Li J B, Han D. Analyze on longitudinal controllability and stability of OSR helicopter[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(6): 1374-1381. (in Chinese)
- [57] 裴诗源, 陈仁良, 王洛烽. 旋翼转速变化对直升机操纵品质影响分析[J]. *飞行力学*, 2022, 40(1): 48-53.
Pei S Y, Chen R L, Wang L F. Influence of rotor speed variation on helicopter handling quality[J]. *Flight Dynamics*, 2022, 40(1): 48-53. (in Chinese)
- [58] Yuan Y, Thomson D, Chen R. Variable rotor speed strategy for coaxial compound helicopters with lift-offset rotors[J]. *The Aeronautical Journal*, 2020, 124(1271): 96-120.
- [59] Chen R T N. An exploratory investigation of the flight dynamics effects of rotor rpm variations and rotor state feedback in hover: A-92173 [R]. NASA Ames Research Center Moffett Field, 1992.
- [60] 吴凯华. 变转速刚性旋翼振动载荷分析与实验台设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
Wu K H. Vibratory loads analysis and preliminary experiment of a variable speed rigid rotor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [61] Han D, Wang J, Smith E C, et al. Transient loads control of a variable speed rotor during lagwise resonance crossing[J]. *AIAA Journal*, 2012, 51(1): 20-29.
- [62] 韩东. 变转速旋翼桨叶载荷研究[C]//2013年首届中国航空科学技术大会论文集. 北京:中国航空学会, 2013: 1-8.
Han D. Blade loads analysis of a variable speed rotor[C]//Symposium of the First China Aviation Science and Technology

- Conference. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2013:1-8. (in Chinese)
- [63] 黄东盛. 变转速模型旋翼设计及载荷试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
Huang D S. Design and loads test of a variable speed model rotor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [64] 孙宇. 变转速刚性旋翼载荷分析与试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
Sun Y. Loads analysis of variable speed rigid rotor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [65] Iwata T. Integrated flight/propulsion control with variable rotor speed command for rotorcraft[M]. Stanford University ProQuest Dissertations Publishing, 1996.
- [66] 姚文荣. 涡轴发动机/旋翼综合建模、控制及优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
Yao W R. Research on integrated modeling, control and optimization of turboshaft engine/rotor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [67] 汪勇, 刘明磊, 宋劫, 等. 一种直升机/发动机系统最经济旋翼转速综合优化方法[J]. 推进技术, 2022, 43(1): 70-77.
Wang Y, Liu M L, Song J, et al. Integrated optimization method of the most economical rotor speed for helicopter/engine system[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(1): 70-77. (in Chinese)
- [68] Garavello A, Benini E. Preliminary study on a wide-speed-range helicopter rotor/turboshaft system[J]. Journal of Aircraft, 2012, 49(4): 1032-1038.
- [69] Misté G A, Benini E, Garavello A, et al. A methodology for determining the optimal rotational speed of a variable RPM main rotor/turboshaft engine system[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2015, 60(3): 1-11.
- [70] 姚文荣, 孙健国. 基于变旋翼转速的涡轴发动机优化控制[J]. 航空动力学报, 2007, 22(9): 1573-1577.
Yao W R, Sun J G. Optimizing control of turboshaft engines based on variable rotor speed[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(9): 1573-1577. (in Chinese)
- [71] 张海波, 姚文荣, 王日先, 等. 直升机/发动机系统变旋翼转速串行优化方案[J]. 航空动力学报, 2010, 25(10): 2363-2371.
Zhang H B, Yao W R, Wang R X, et al. Rotor speed changeable cascaded optimization method for helicopter/engine system[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(10): 2363-2371. (in Chinese)
- [72] 汪勇, 钟文城, 郭浩然, 等. 直升机动力系统旋翼转速优化控制方法及装置: CN113428353B[P]. 2022-03-22.
Wang Y, Zhong W C, Guo H R, et al. Helicopter power system rotor rotating speed optimization control method and device: CN113428353B[P]. 2022-03-22. (in Chinese)
- [73] 宁景涛. 变转速直升机/传动系统/发动机综合建模与控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
Ning J T. Study on simulation and control of integrated helicopter/transmission/engine system with variable rotor speed[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [74] 汪勇, 彭晔榕, 宋劫, 等. 一种变旋翼转速直升机的控制方法及控制装置: CN111731471B[P]. 2021-07-16.
Wang Y, Peng Y R, Song J, et al. Control method and control device for variable rotor rotating speed helicopter: CN111731471B[P]. 2021-07-16. (in Chinese)
- [75] Litt J S, Edwards J M, DeCastro J A. A sequential shifting algorithm for variable rotor speed control: NASA/TM-2007-214842[R]. Glenn Research Center, 2007.
- [76] 陈国强. 直升机/发动机实时优化控制规律与硬件平台研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
Chen G Q. Study for real-time optimization control and hardware platform based on integrated helicopter/turboshaft engine system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [77] 陈国强, 杨娟. 基于直升机/发动机综合模型的变旋翼转速控制研究[J]. 航空发动机, 2016, 42(5): 14-20.
Chen G Q, Yang J. Research on variable rotor speed control based on integrated helicopter/engine model[J]. Aeroengine, 2016, 42(5): 14-20. (in Chinese)
- [78] 陈名杨. 多发配置下变转速直/发综合控制方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
Chen M Y. Research on the integrated control method of variable speed helicopter/engine under multiple configurations[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [79] 姚文荣, 宁景涛, 张海波. 基于无级变速的直升机变旋翼转速控制模拟方法研究[J]. 推进技术, 2017, 38(2): 434-441.
Yao W R, Ning J T, Zhang H B. Study on simulation and control of helicopter with variable rotor speed based on a continuously variable transmission[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(2): 434-441. (in Chinese)
- [80] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007, 1(1): 24-31.

- Han J Q. Auto disturbances rejection control technique[J]. *Frontier Science*, 2007, 1(1): 24-31. (in Chinese)
- [81] Wang Y, Zheng Q G, Zhang H B, et al. Research on integrated control method for helicopter/turboshaft engine with variable rotor speed based on the error between engine required and real output torque[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, 45(8): 6529-6540.
- [82] 张海波, 姚文荣, 陈国强. 涡轴发动机/直升机综合控制仿真平台设计[J]. *推进技术*, 2011, 32(3): 383-390.
Zhang H B, Yao W R, Chen G Q. Design of a numeric simulation platform for integrated turbo-shaft engine/helicopter control system[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(3): 383-390. (in Chinese)
- [83] Belmonte L M, Morales R, Fernández-Caballero A, et al. A tandem active disturbance rejection control for a laboratory helicopter with variable-speed rotors[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(10): 6395-6406.
- [84] 居新星. 变旋翼转速飞行器与发动机系统建模与控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
Ju X X. Research on modeling and control of variable rotor speed aircraft and engine system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [85] 汪勇, 张海波, 杜紫岩, 等. 一种变旋翼转速直升机/涡轴发动机非线性模型预测控制方法研究[J]. *推进技术*, 2019, 40(10): 2334-2342.
Wang Y, Zhang H B, Du Z Y, et al. A novel nonlinear model predictive control method for helicopter/turboshaft engine with variable rotor speed[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(10): 2334-2342. (in Chinese)
- [86] Wang Y, Zheng Q, Zhang H, et al. A study on nonlinear model predictive control for helicopter/engine with variable rotor speed based on linear Kalman filter[J]. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 2022, 39(3): 357-366.
- [87] 颜秋英, 杜紫岩, 周秀清, 等. 变旋翼转速飞行控制对涡轴发动机输出响应的影响[J]. *推进技术*, 2021, 42(3): 683-691.
Yan Q Y, Du Z Y, Zhou X Q, et al. Effects of variable rotor speed flight control on output response of turboshaft engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(3): 683-691. (in Chinese)
- [88] Wang Y, Zheng Q, Zhang H, et al. Study on inversion control for integrated helicopter/engine system with variable rotor speed based on state variable model[J]. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 2023, 40(1): 21-29.
- [89] 马胜明. 变转速旋翼摆振载荷抑制及实验设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
Ma S M. Lagwise loads control of variable speed rotors and the related experimental design[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [90] 郎凯, 夏品奇. 旋翼变转速直升机振动主动控制的混合控制方法: CN112859589B[P]. 2022-04-15.
Lang K, Xia P Q. Hybrid control method for active vibration control of rotor variable-speed helicopter: CN112859589B[P]. 2022-04-15. (in Chinese)
- [91] 余亦曦, 康丽霞, 唐朋. 直升机传动系统的现状与发展研究[J]. *航空科学技术*, 2021, 32(1): 78-82.
She Y X, Kang L X, Tang P. Development status and future trend of helicopter transmission system[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2021, 32(1): 78-82. (in Chinese)
- [92] Goulos I, Bonesso M. Variable rotor speed and active blade twist for civil rotorcraft: optimum scheduling, mission analysis, and environmental impact[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 88: 444-456.
- [93] Wilkerson J B, Smith R L. Aircraft system analysis of technology benefits to civil transport rotorcraft: NASA/CR-2009-214594[R]. Ames Research Center, 2008.
- [94] Snyder C A, Acree Jr C W. Preliminary assessment of variable speed power turbine technology on civil tiltrotor size and performance[C/OL]//American Helicopter Society 68th Annual Forum, May 1-3, 2012, Fort Worth, TX, USA. American Helicopter Society, 2012[2022-05-24]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20120014256>.
- [95] Acree J C, Yeo H, Sinsay J D. Performance optimization of the NASA large civil tiltrotor[C]//The International Powered Lift Conference, July 22, 2008, London. National Aeronautics and Space Administration, 2008: 22-24.
- [96] Krantz T L, Handschuh R F, Roberts G D. Results of NASA technical challenge to demonstrate two-speed drive for vertical lift vehicle[C/OL]//AHS International Annual Forum & Technology Display, May 14-17, 2018, Phoenix, AZ, USA. American Helicopter Society International, 2018[2022-05-24]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20180003086>.
- [97] 付少林. 变转速动力涡轮数值分析及优化设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
Fu S L. Numerical research of variable-speed power turbine and optimization design[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [98] Welch G E. Assessment of aerodynamic challenges of a variable-speed power turbine for large civil tilt-rotor application: GRC-E-DAA-TN54203 [R]. Glenn Research Center, 2010.

- [99] 餘震, 王永紅. 复合式高速直升机传动系统关键技术分析[J]. 航空动力, 2018(3): 66-68.
Yu Z, Wang Y H. Key technologies of transmission system of high speed helicopters[J]. Aerospace Power, 2018(3): 66-68. (in Chinese)
- [100] Stevens M A, Handschuh R F, Lewicki D G. Variable/multispeed rotorcraft drive system concepts: NASA/TM-2009-215456 [R]. Glenn Research Center, 2009.
- [101] 丁文强. 先进的直升机传动系统技术应用研究[J]. 航空科学技术, 2013, 24(2): 7-10.
Ding W Q. Research on application of advanced helicopter transmission system technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2013, 24(2): 7-10. (in Chinese)
- [102] 王俊, 潘文斌. 直升机传动系统面齿轮传动技术的发展[J]. 航空动力, 2018(5): 44-46.
Wang J, Pan W B. The development of face gear transmission technology of helicopter transmission system[J]. Aerospace Power, 2018(5): 44-46. (in Chinese)
- [103] Saribay Z B. Analytical investigation of the pericyclic variable-speed transmission system for helicopter main-gearbox[D]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 2009.
- [104] Peng M. Parametric instability investigation and stability based design for transmission systems containing face-gear drives[D]. Tennessee: University of Tennessee, 2012.
- [105] Stevens M A, Handschuh R F, Lewicki D G. Offset compound gear inline two-speed drive: US8668613[P]. 2014-03-11.
- [106] Palcic P X, Garcia T, Gmirya Y. Variable speed transmission for a rotary wing aircraft: US7942365[P]. 2011-05-17.
- [107] 鲍和云, 李丰波, 陆凤霞, 等. 某型变转速直升机传动系统动力学特性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(10): 2403-2416.
Bao H Y, Li F B, Lu F X, et al. Analysis of dynamic characteristics of a variable speed helicopter transmission system[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(10): 2403-2416. (in Chinese)
- [108] Ehinger R T, Fenny C A, Kilmain C J, et al. Multi-ratio rotorcraft drive system and a method of changing gear ratios thereof: US8449432[P]. 2013-05-28.
- [109] 倪德, 李苗苗, 胡志安, 等. 共轴反转直升机传动系统构型现状[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(2): 226-235.
Ni D, Li M M, Hu Z A, et al. Research status of transmission system configuration of coaxial reversal helicopter[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(2): 226-235. (in Chinese)
- [110] 嚴岳勝, 鄭青春, 張志龍, 等. 共轴对转双旋翼直升机主减速器构型分析[J]. 航空动力, 2019(5): 37-40.
Yan Y S, Zheng Q C, Zhang Z L, et al. Configuration analysis of main reducer of coaxial counter rotating twin-rotor helicopter[J]. Aerospace Power, 2019(5): 37-40. (in Chinese)
- [111] DeSmidt H A, Smith E C, Bill R C, et al. Comprehensive modeling and analysis of rotorcraft variable speed propulsion system with coupled engine/transmission/rotor dynamics: NASA/CR-2013-216502 [R]. Glenn Research Center, 2013.
- [112] Lappos N D, Karedes E, Vinayak H, et al. Variable speed gearbox with an independently variable speed tail rotor system for a rotary wing aircraft: US7434764[P]. 2008-10-14.
- [113] Lemanski A J, Saribay Z B, Elmoznino M J. Conceptual design of pericyclic non-traction continuously variable speed transmissions: rotorcraft applications[C]//The American Helicopter Society 62nd Annual Forum, Phoenix, AZ, USA. American Helicopter Society, Inc., 2006: 688-704.
- [114] Elmoznino M, Kazerounian K, Lemanski A. An electro-mechanical pericyclic CVT (P-CVT) [C]//12th IFToMM World Congress, Besancon, France. International Federation of Theory of Machines & Mechanisms, 2007: 18-21.
- [115] Misté G A, Benini E. Variable-speed rotor helicopters: performance comparison between continuously variable and fixed-ratio transmissions[J]. Journal of Aircraft, 2016, 53(5): 1189-1200.
- [116] Saribay Z B, Smith E C, Lemanski A J, et al. Compact pericyclic continuously variable speed transmission systems: Design features and high-reduction variable speed case studies[C]//63rd American Helicopter Society International Annual Forum, Virginia Beach, VA, USA. American Helicopter Society, Inc., 2007: 2312-2322.
- [117] Hameer S. A comparative study and application of continuously variable transmission to a single main rotor heavy lift helicopter[D]. Atlanta, GA: Georgia Institute of Technology, 2009.
- [118] 譚武中, 王祁波. 航空用变转速传动的摩擦离合器研究现状分析[J]. 科学技术创新, 2019(23): 150-152.
Tan W Z, Wang Q B. Analysis on research status of friction clutch for variable speed transmission in aviation[J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(23): 150-152. (in Chinese)