

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.02.009

## 共轴反转直升机传动系统构型现状

倪 德<sup>1</sup>, 李苗苗<sup>2</sup>, 胡志安<sup>1</sup>, 张栋林<sup>2</sup>, 张根苗<sup>1</sup>, 朱如鹏<sup>2</sup>

(1. 中国航发湖南动力机械研究所, 株洲 412002;

2. 南京航空航天大学直升机传动技术国家级重点实验室, 南京 210016)

**摘要:** 共轴刚性旋翼高速直升机由共轴反转的两幅旋翼实现悬停和爬升, 由尾推进桨实现高速前飞, 旋翼不需要倾转, 相对倾转式旋翼机可靠性更高, 具有较好的发展前景。共轴反转传动系统是共轴刚性旋翼高速直升机的关键传动部件。本文分析了共轴反转传动系统构型原理; 针对共轴反转输出功能需求, 将共轴反转传动系统分为以圆柱齿轮为基础、以锥齿轮为基础、以面齿轮为基础和以差动轮系为基础实现共轴反转输出的 4 类传动系统构型。分别论述了 4 类共轴反转传动系统构型的国内外发展现状、主要特点和型号应用情况, 为不同需求共轴式直升机的传动系统构型选型设计提供参考。

**关键词:** 直升机; 共轴反转; 双旋翼; 传动系统; 构型

**中图分类号:** TH132.46      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2021)02-0226-10

## Research Status of Transmission System Configuration of Coaxial Reversal Helicopter

NI De<sup>1</sup>, LI Miaomiao<sup>2</sup>, HU Zhian<sup>1</sup>, ZHANG Donglin<sup>2</sup>, ZHANG Genmiao<sup>1</sup>, ZHU Rupeng<sup>2</sup>

(1. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Coaxial rigid rotor high-speed helicopter hovers and climbs by two rotors with coaxial reversal, and flies forward at high speed by tail propulsion propeller. The rotor does not need to tilt, so it has higher reliability than tilt rotor aircraft and has good development prospect. The coaxial reverse drive system is the key moving part of the coaxial rigid rotor high-speed helicopter. The configuration principle of coaxial transmission system is analyzed, and the contrarotating drive system is classified into four types for the requirements of contrarotating output function: cylindrical gear, bevel gear, face gear and differential gear system. The development status at home and abroad, main characteristics and application of the four types of contrarotating drive system configurations are discussed, which provides the basis for the selection and design of the drive system configurations of the coaxial helicopter with different requirements.

**Key words:** helicopter; coaxial reversal; dual rotor; drive system; configuration

直升机以其出色的超低空快速机动能力、战场后勤保障能力、低空纵深突防能力, 奠定了它在现代战争中的重要地位与作用, 受到世界各国军事部门的高度重视。

受构型的限制(前行桨叶激波), 常规构型直升机平飞速度一般不超过 300 km/h<sup>[1]</sup>。由于飞行速

度慢、飞行高度低、机动性差等问题, 常规构型直升机面临严重的生存挑战。

共轴式直升机采用上、下共轴对转的两组旋翼用来平衡旋翼扭矩, 不需要尾桨。常规共轴式直升机的主要代表机型有俄罗斯卡莫夫设计局研制的卡-28、卡-32、卡-52 等, 其传动系统采用共轴反转

**收稿日期:** 2020-08-09; **修订日期:** 2020-10-12

**通信作者:** 倪德, 男, 博士, 高级工程师, E-mail: 532958264@qq.com。

**引用格式:** 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 De, LI Miaomiao, HU Zhian, 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.

传动系统。20世纪70年代以来,在常规共轴式直升机基础上,美国西科斯基公司发展了一种复合推进式高速直升机,采用共轴反转刚性双旋翼带尾推进桨构型,主要代表机型有X2、S-97等。共轴刚性旋翼高速直升机(以下简称“高速直升机”)能突破常规构型直升机的速度限制,实现400 km/h以上的高速平飞,已经成为当前直升机技术领域发展的制高点<sup>[2]</sup>。

高速直升机传动系统包括共轴反转主传动系统(主减速器)和尾推传动轴系两部分(见图1)<sup>[3]</sup>,负责将发动机的功率和转速按一定比例传递给主旋翼、尾推进桨以及液压泵等附件,同时负责将旋翼及尾推进桨载荷传递至机身,其性能的优劣直接影响高速直升机研制的成败,其寿命、重量、可靠性等指标能否实现对全机研制和使用均有重大影响<sup>[4-6]</sup>。

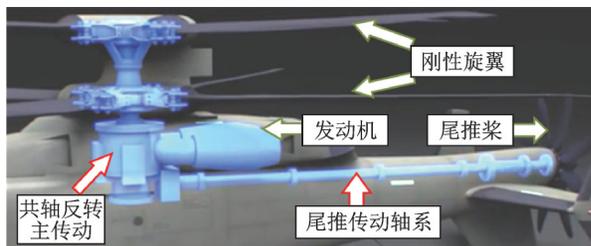


图1 共轴刚性旋翼高速直升机传动系统布局<sup>[3]</sup>

Fig.1 Coaxial rigid rotor high-speed helicopter transmission system layout<sup>[3]</sup>

## 1 共轴反转传动系统构型原理

高速直升机有垂直起降/悬停、低速飞行、高速前飞等多种工作模式<sup>[7]</sup>。由共轴反转的两幅旋翼实现悬停和爬升,由尾推进桨实现高速前飞,旋翼不需要倾转,相对倾转式旋翼机可靠性更高。如图2所示,悬停/爬升状态,发动机主要功率传递给主旋翼轴,高速前飞状态,发动机主要功率传递给尾推进桨。为了降低重量和成本,旋翼和尾推进桨一般共用发动机。起飞、降落、悬停和低速飞行时,只有旋翼必须由发动机提供动力驱动,为直升机提供垂直方向的升力,低速飞行时还提供水平方向的推进力;高速前飞时,只有尾推进桨必须由发动机提供动力驱动,为直升机提供水平方向的推进力,直升机的升力主要来自机翼,旋翼提供的升力不再占主导地位,并且旋翼提供的升力可直接在动力驱动下提供,也可间接在飞行风力作用下自转提供,后者的升力效率更高。因此,旋翼和尾推进桨均不需要进行连续驱动,只需要进行断续驱动,如果低速飞行时推进桨不驱动,则整个直升机飞行期间,发动机在旋翼和尾推进桨两者之间进行交替驱动即

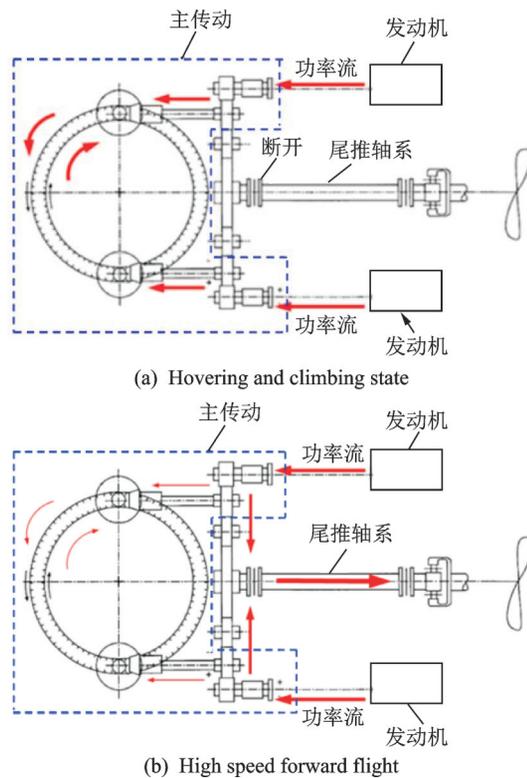


图2 不同飞行状态下传动系统的功率流<sup>[7]</sup>

Fig.2 Power flow of the transmission system in different flight conditions<sup>[7]</sup>

可。因此,相对于常规直升机的传动系统,高速直升机的共轴反转传动系统构型设计更加复杂。

实现共轴反转输出是高速直升机对传动系统最基本的功能需求。实现共轴反转输出的主传动系统构型可分为4类(见图3):以圆柱齿轮为基础实现共轴反转输出的传动构型,以锥齿轮为基础实现共轴反转输出的传动构型,以差动轮系为基础实现共轴反转输出的传动构型,以及以面齿轮为基础实现共轴反转输出的传动构型。

图3(a)所示传动系统构型的传动原理是通过一对圆柱齿轮啮合驱动内旋翼轴支路,另一对圆柱齿轮啮合驱动外旋翼轴支路,即通过圆柱齿轮啮合(可能为最后一级传动,也可能在后面再增加一级以适用更高的减速、传递功率需求)实现内、外旋翼轴共轴反转输出。

图3(b)所示传动系统构型的传动原理是通过一对锥齿轮啮合驱动内旋翼轴支路,另一对锥齿轮啮合驱动外旋翼轴支路,即通过锥齿轮啮合(可能为最后一级传动,也可能在后面再增加一级以适用更高的减速、传递功率需求)实现内、外旋翼轴共轴反转输出。

图3(c)所示传动系统构型的传动原理是通过行星架驱动内旋翼轴(或外旋翼轴),内齿圈驱动外旋翼轴(或内旋翼轴),即通过差动轮系实现内、外旋翼轴共轴反转输出。

图3(d)所示传动系统构型的传动原理是通过一对面齿轮啮合驱动内旋翼轴支路,另一对面齿轮啮合驱动外旋翼轴支路,即通过面齿轮啮合(可能为最后一级传动,也可能在后面再增加一级以适用

更高的减速、传递功率需求)实现内、外旋翼轴共轴反转输出。

图3所示的4种共轴反转构型的优缺点比较如表1所示。

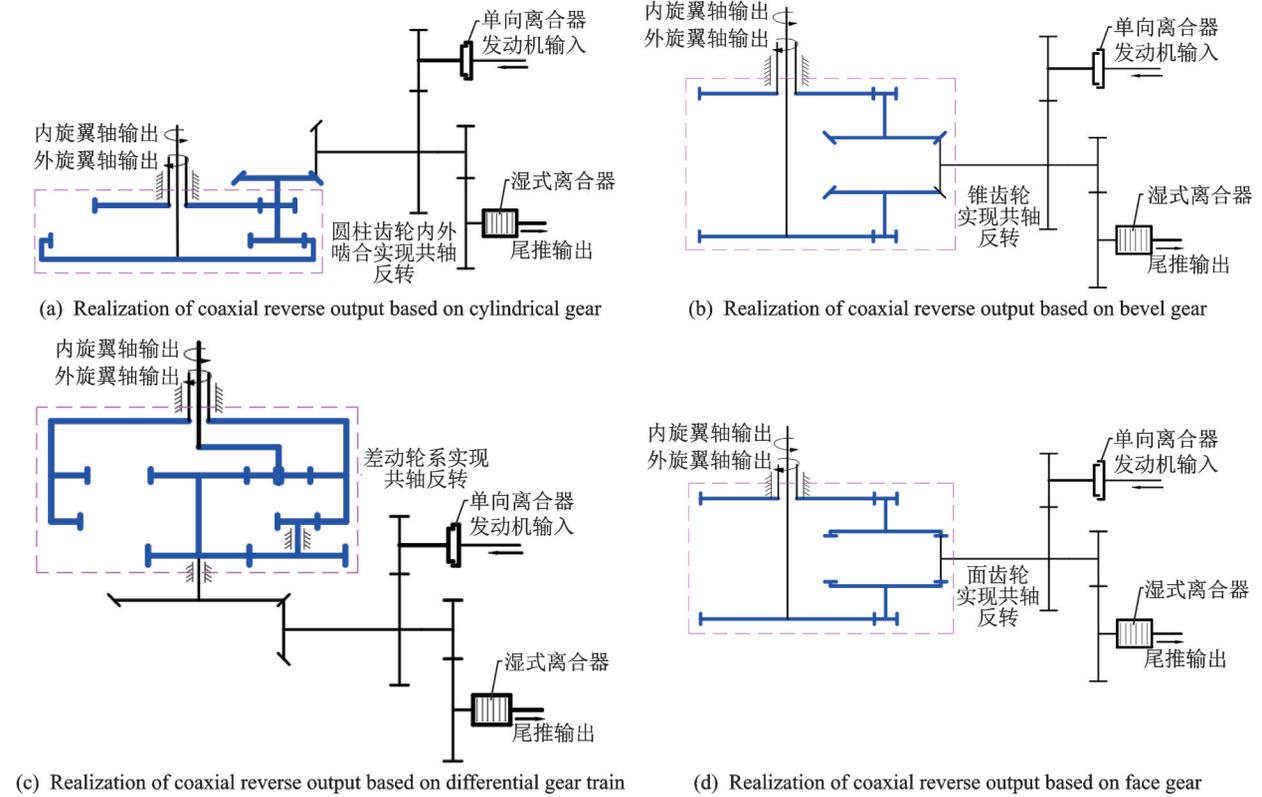


图3 4种共轴反转传动系统主要构型原理

Fig.3 Main configuration principles of four coaxial reversal transmission systems

表1 4种构型的优缺点比较

Table 1 Comparison of four coaxial reversal transmission systems

构型	优点	缺点	典型直升机型号
以圆柱齿轮为基础实现共轴反转输出	可设计成大孔径内旋翼轴,有利于上旋翼内操纵机构布置;将圆柱齿轮作为最后一级实现共轴反转输出,可减小主减高度尺寸 <sup>[8]</sup> ,减轻重量	最后一级实现共轴反转输出的圆柱齿轮为大尺寸薄辐板结构,加工过程中变形控制难度大,且大载荷下齿轮辐板弹性变形较大,易造成偏载,影响齿轮啮合	俄罗斯Ka-26、Ka-15
以锥齿轮为基础实现共轴反转输出	可设计成大孔径内旋翼轴,有利于上旋翼内操纵机构布置;将锥齿轮作为最后一级实现共轴反转输出,零件数少,结构简单	多对锥齿轮副同时啮合,形成封闭链,支撑结构设计较复杂,安装调整难度大	中国“海鸥”共轴直升机,美国SB>1高速直升机
以差动轮系为基础实现共轴反转输出	传动比范围大、承载能力强	零件数多,结构复杂,配齿设计和制造安装困难,内旋翼轴孔径受太阳轮尺寸限制,不利于上旋翼内操纵机构布置	美国XH-59A,俄罗斯Ka-25、Ka-32
以面齿轮为基础实现共轴反转输出	可设计成大孔径内旋翼轴,有利于上旋翼内操纵机构布置;面齿轮实现减速换向,不承受轴向力,支撑结构设计更为简单,零件数少;结构紧凑,可减小主减高度尺寸	面齿轮受根切和齿顶变尖的限制,其承载能力有限,且目前制造高性能的面齿轮的难度大	暂无公开报道应用型号

## 2 以圆柱齿轮为基础实现共轴反转输出的传动系统构型现状

卡莫夫设计局设计的多用途直升机Ka-26的共

轴反转传动系统采用了以圆柱齿轮为基础实现共轴反转的传动方式<sup>[9]</sup>,如图4所示,采用三级减速传动,第一级通过螺旋锥齿轮实现减速换向,第二级和第三级是圆柱齿轮和星形轮系实现共轴反转输出。

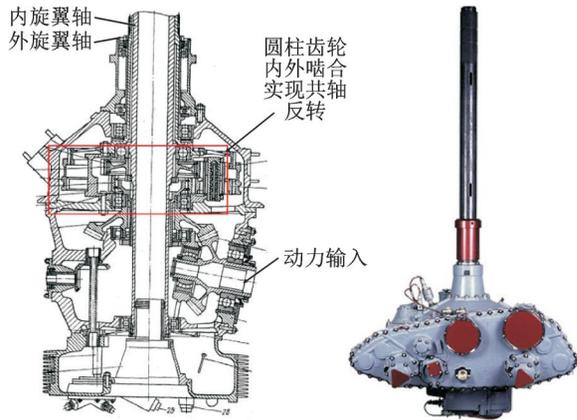


图 4 Ka-26 共轴直升机主减速器结构与实物图<sup>[9]</sup>

Fig.4 Structure and physical diagram of Ka-26 coaxial helicopter main reducer<sup>[9]</sup>

西科斯基公司 2006 年申请了如图 5 所示的圆柱齿轮内外啮合共轴反转传动系统构型专利<sup>[7]</sup>,主传动链为三级减速传动,第一级为圆柱齿轮减速(由圆柱齿轮 54 输入,圆柱齿轮 56 输出),第二级为锥齿轮减速换向(由锥齿轮 60 输入,锥齿轮 62 输出),第三级为圆柱齿轮内、外啮合减速并车(一路由圆柱齿轮 66 输入,圆柱齿轮 72 输出;另一路由圆柱齿轮 68 输入,内齿圈 74 输出),再通过与圆柱齿轮 72 和内齿圈 74 相连的内旋翼轴 48 和外旋翼轴 50 实现两路共轴反转输出,图中  $R_i$  为传动比。同时,通过两级圆柱齿轮减速传动,将功率由圆柱齿轮 80 传输给尾传动轴组件,经尾推减速器之后传输给尾推进浆,详见图 6。

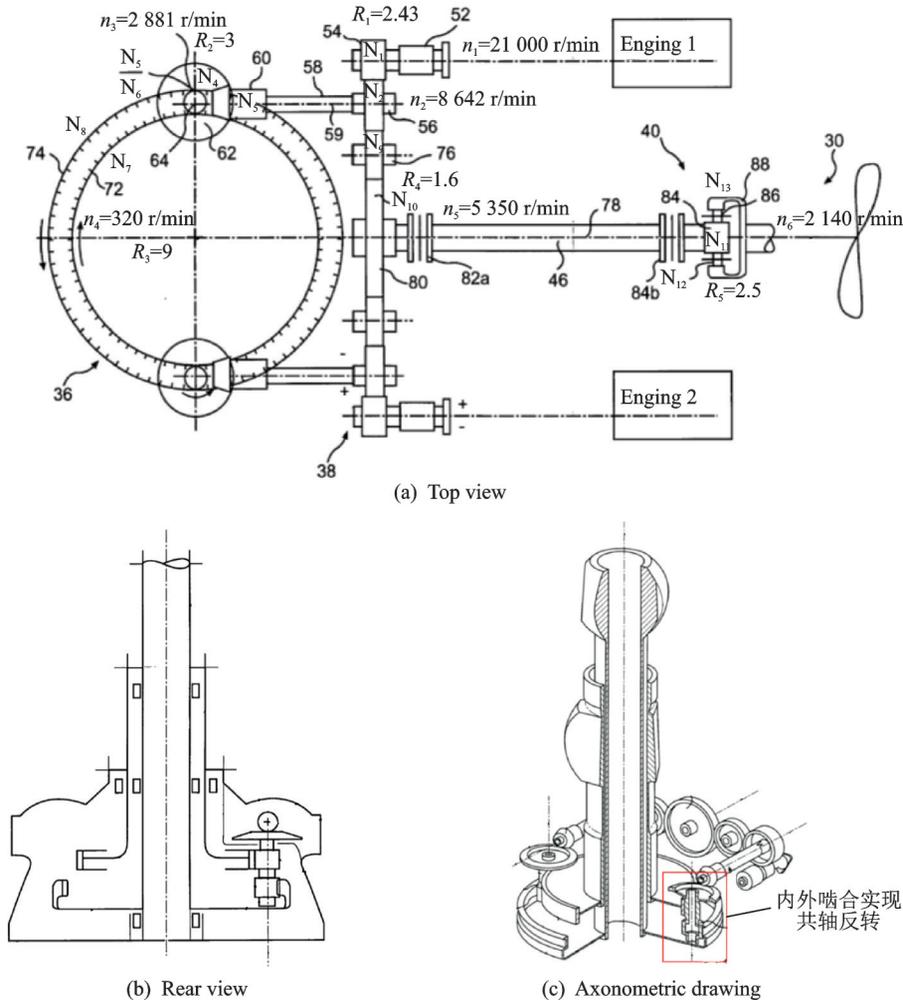


图 5 圆柱齿轮内外啮合共轴输出构型<sup>[7]</sup>

Fig.5 Cylindrical gear internal and external meshing coaxial output configuration<sup>[7]</sup>

西科斯基公司 2013 年申请了如图 7 所示的圆柱齿轮外啮合的功率分流型共轴反转传动系统构型专利<sup>[10]</sup>,主传动链采用三级传动,第一级为锥齿轮减速换向,第二级为圆柱齿轮减速并进行功率分流(由圆柱齿轮 66 分别传递给圆柱齿轮 78、80),第三级为圆柱齿轮减速并车(一路由圆柱齿轮 84 传

递给圆柱齿轮 48,另一路由圆柱齿轮 82 传递给圆柱齿轮 44)实现共轴反转输出。

### 3 以锥齿轮为基础实现共轴反转输出的传动系统构型现状

如图 8 所示为采用锥齿轮作为最后一级实现

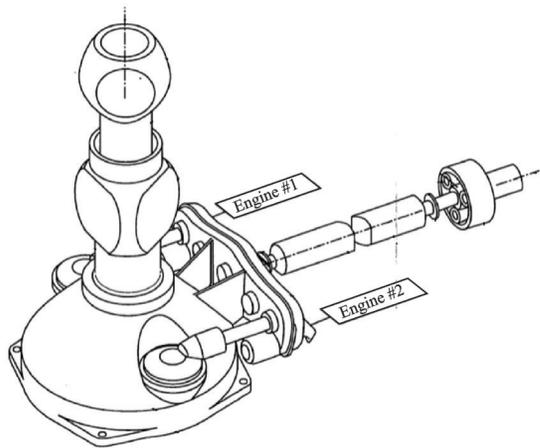


图6 传动系统外形图<sup>[7]</sup>

Fig.6 Outline drawing of transmission system<sup>[7]</sup>

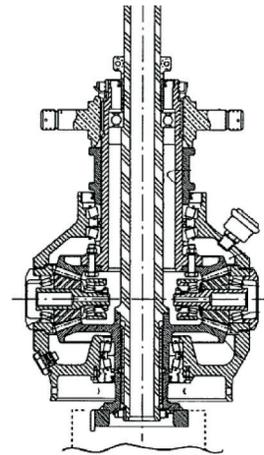
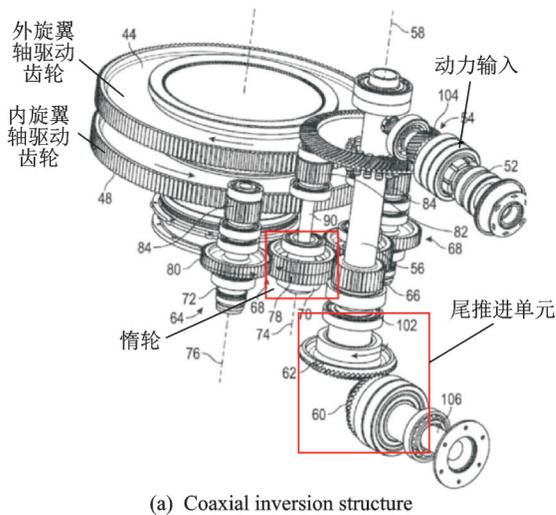
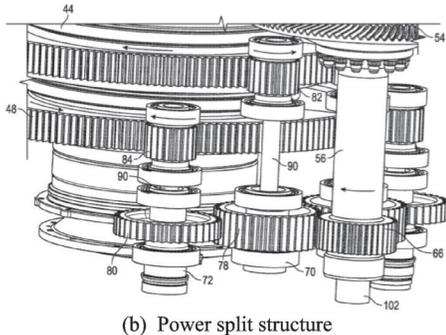


图8 锥齿轮传动共轴输出构型<sup>[11]</sup>

Fig.8 Coaxial output configuration of bevel gear drive<sup>[11]</sup>



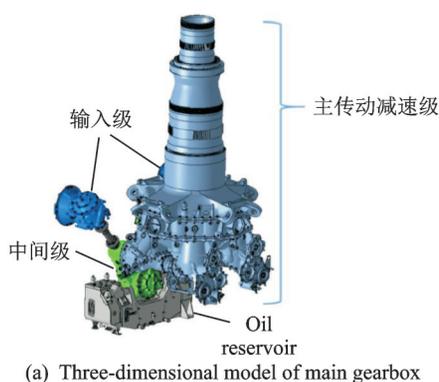
(a) Coaxial inversion structure



(b) Power split structure

图7 圆柱齿轮功率分流型共轴输出构型<sup>[10]</sup>

Fig.7 Cylindrical gear power split type coaxial output configuration<sup>[10]</sup>



(a) Three-dimensional model of main gearbox

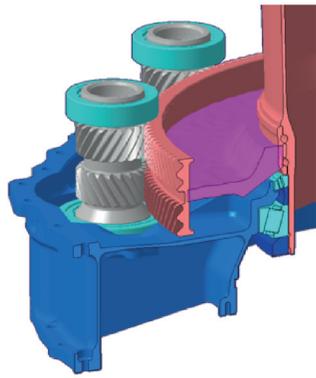


(b) Main gearbox installed on the test bench

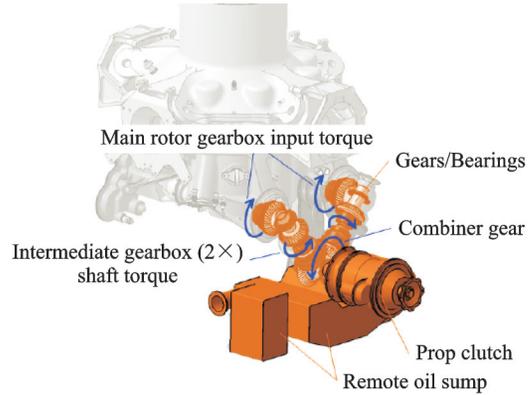
共轴反转输出的传动构型<sup>[11]</sup>,该结构零件数量少,结构简单,适合轻型共轴式直升机。

根据相关资料<sup>[12-13]</sup>,西科斯基公司与波音公司联合研制的SB>1技术验证机传动系统也采用以锥齿轮为基础实现共轴反转输出的传动系统构型,主传动链为五级传动,前三级均为锥齿轮减速换向,且由第三级锥齿轮传动实现内、外旋翼轴两路反向输出,第四级为人字齿轮分扭传动,第五级为人字齿轮减速并车实现共轴输出,详见图9。尾传动链为两级传动,第一级与主传动链共用(圆锥齿轮减速换向),第二级为圆锥齿轮并车输出。

专利 The main gearbox of the helicopter coaxial configuration<sup>[14]</sup>(图10)提出的传动系统构型采用二级传动,第一级为一个主动锥齿轮驱动上下布置的两个从动锥齿轮反向转动,上从动锥齿轮通过一对圆柱齿轮副驱动内旋翼轴,下从动锥齿轮同样通过一对圆柱齿轮副驱动外旋翼轴,最终实现内、外旋翼轴共轴反转输出。专利 Coaxial-rotor helicopter gearbox(图11)<sup>[15]</sup>和北京航空航天大学于研制的“海鸥”共轴式小型无人直升机(图12)<sup>[16-17]</sup>传动原理类似,均是由一个主动锥齿轮驱动两个从动锥齿轮,带动内、外轴实现共轴反转输出。



(c) Rotor shaft drive gear pair structure



(d) Power input structure of main reduction and tail thruster

图 9 SB>1 技术验证机传动系统部分结构示意图<sup>[12-13]</sup>

Fig.9 Schematic diagram of part of the transmission system of SB>1 technical verification machine<sup>[12-13]</sup>

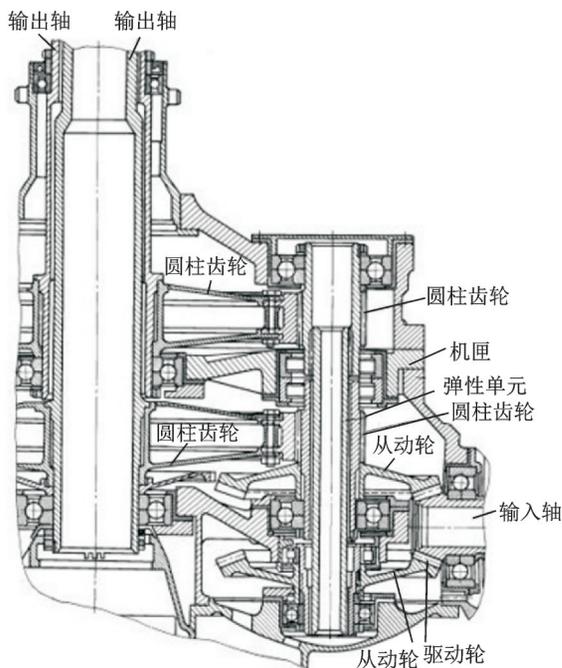


图 10 锥齿轮换向共轴反转传动系统<sup>[14]</sup>

Fig.10 Bevel gear commutation coaxial reverse transmission system<sup>[14]</sup>

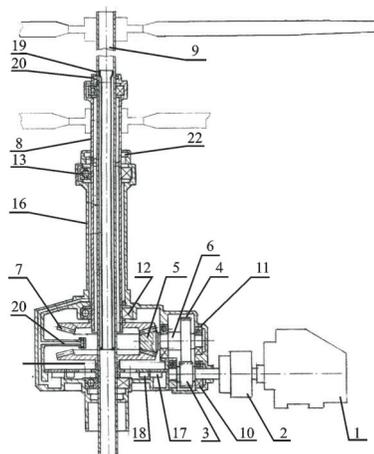


图 11 锥齿轮换向共轴反转传动系统<sup>[15]</sup>

Fig.11 Bevel gear commutation coaxial reverse transmission system<sup>[15]</sup>

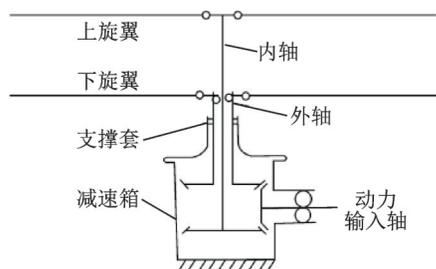


图 12 “海鸥”共轴无人直升机动力传动原理图<sup>[16-17]</sup>

Fig.12 “Seagull” coaxial unmanned helicopter power transmission principle diagram<sup>[16-17]</sup>

兰州交通大学设计了如图 13 所示的共轴反转齿轮传动系统<sup>[18-19]</sup>,采用二级传动,首先通过锥齿轮传动实现减速、共轴反转输出,然后通过行星轮系驱动内、外旋翼轴,实现上、下旋翼以等速共轴反转。

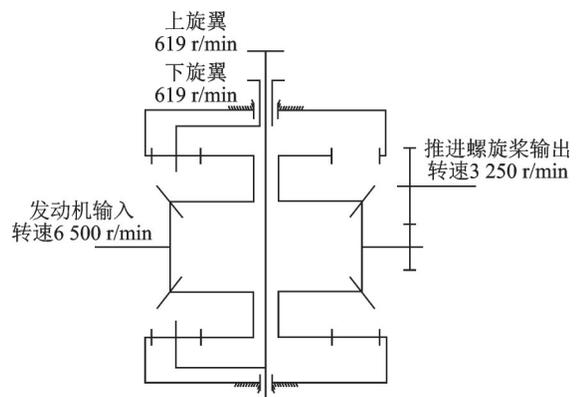


图 13 共轴反转传动系统简图<sup>[18-19]</sup>

Fig.13 Schematic diagram of coaxial reversal transmission system<sup>[18-19]</sup>

#### 4 以差动轮系为基础实现共轴反转输出的传动系统构型现状

1973年7月26日成功实现首飞的XH-59A技术验证机传动系统采用复合行星轮系共轴输出构

型<sup>[20]</sup>,主传动链为两级传动(见图14),第一级为锥齿轮减速(速比为3.84),第二级为差动轮系(速比为5),上旋翼为从动齿圈输出,下旋翼为行星架输出。附件传动由发动机输入轴通过圆柱齿轮传动。

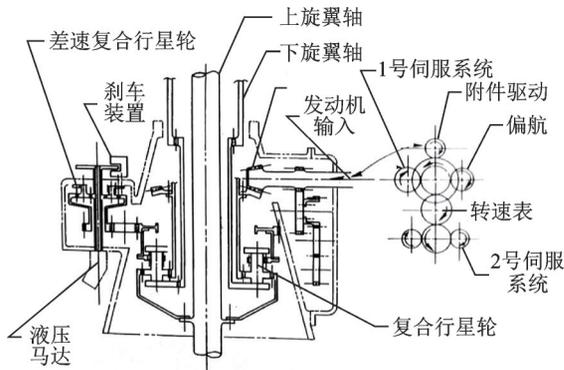


图14 差动轮系共轴输出构型(XH-59)<sup>[20]</sup>

Fig.14 Coaxial output configuration of differential gear train (XH-59)<sup>[20]</sup>

舰载直升机 Ka-25、Ka-27、Ka-28、Ka-29、Ka-31、Ka-32等均采用封闭差动行星轮系实现内外轴的等速反向输出<sup>[9]</sup>。Ka-25传动链结构见图15<sup>[9]</sup>, Ka-32传动链结构见图16<sup>[8]</sup>。

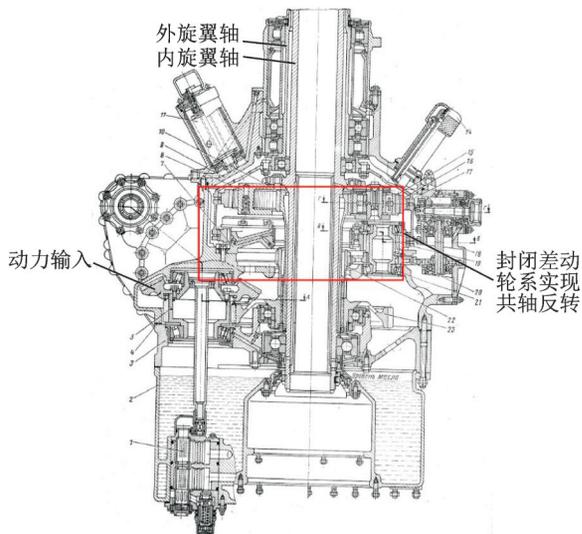


图15 Ka-25共轴直升机主减速器<sup>[9]</sup>

Fig.15 Ka-25 coaxial helicopter main gearbox<sup>[9]</sup>

中国航发湖南动力机械研究所设计了一种封闭差动行星共轴输出构型(图17)<sup>[21]</sup>,由定轴轮系和差动行星轮系组成的封闭差动行星构型,以太阳轮为输入端,差动级行星架和齿圈分别连接内外输出轴,实现共轴反转输出。

黑龙江农业工程职业学院设计了一种共轴直升机主减速器<sup>[22]</sup>,共三级传动,第一级为圆柱齿轮减速,第二级为圆锥齿轮减速换向,第三级为共轴差动行星轮系实现共轴反转输出,如图18所示<sup>[22]</sup>。

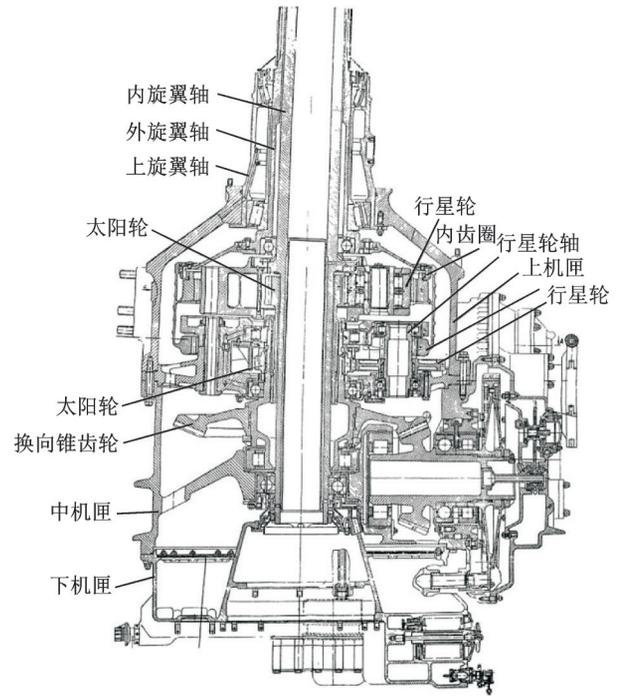
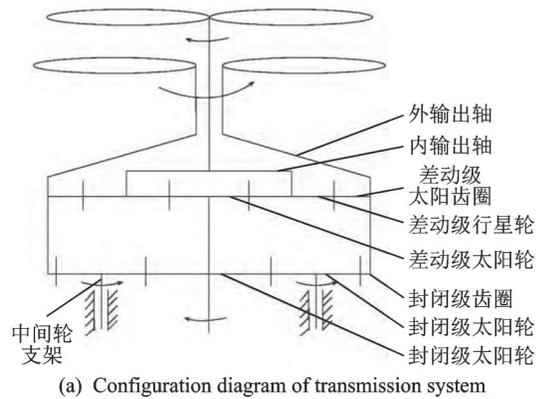
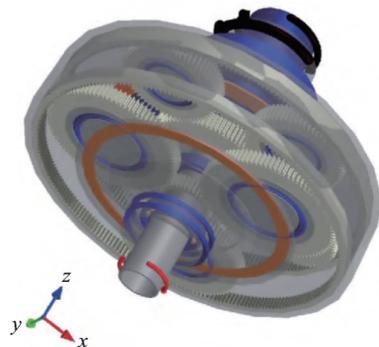


图16 Ka-32主减速器结构与实物图<sup>[8]</sup>

Fig.16 Structure and physical diagram of Ka-32 main gearbox<sup>[8]</sup>



(a) Configuration diagram of transmission system



(b) Simulation model

图17 封闭差动共轴反转传动系统<sup>[21]</sup>

Fig.17 Closed differential coaxial reversal drive system<sup>[21]</sup>

共轴差动行星轮系由一级定轴轮系和一级行星结构组成, I级为双联行星定轴轮系,齿圈连接外旋翼轴, II级为差动轮系,行星架连接内旋翼轴,二级齿圈连接外旋翼轴,通过选择合适的齿轮齿数,实

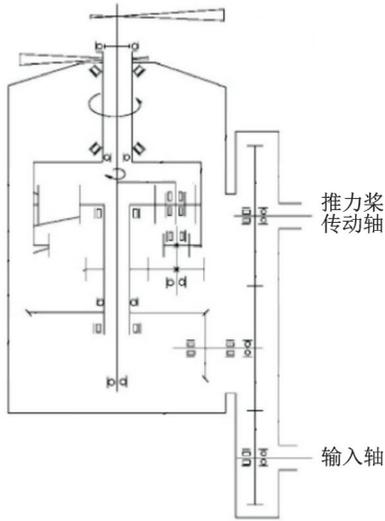


图 18 含尾推进的共轴反转传动系统<sup>[22]</sup>

Fig.18 Coaxial reversal drive system with tail propulsion<sup>[22]</sup>

现内、外旋翼轴等速反转。

直升机设计研究所研究了单输入双输出的定轴轮系与差动轮系组合的 Ka-32 共轴直升机传动系统典型构型<sup>[23]</sup>,研究了影响差动轮系与定轴轮系功率分配的影响因素,得到了传动系统不存在功率循环的条件,部分功率流情况如图 19 所示。另外,研究了 Ka-32 共轴双旋翼高速直升机主减轮系的传动

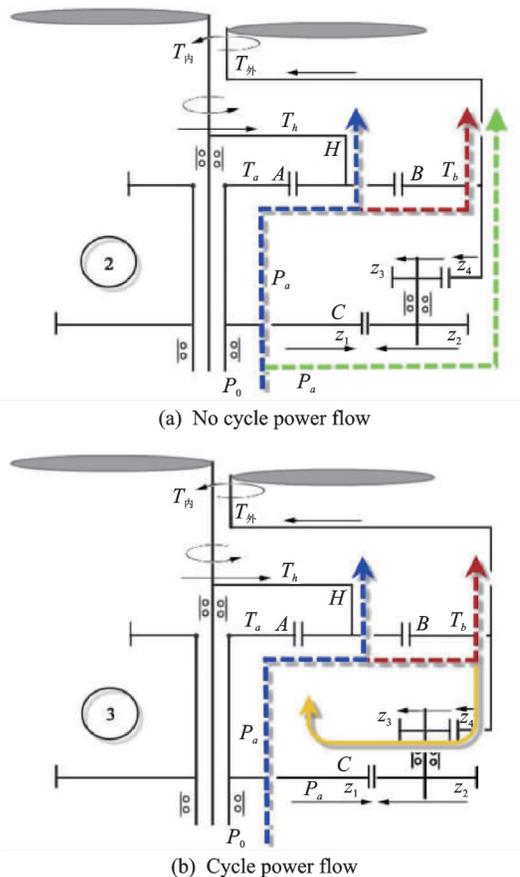


图 19 共轴反转传动系统功率流向<sup>[23]</sup>

Fig.19 Power flow direction of coaxial reversal drive system<sup>[23]</sup>

效率计算方法,并分析了效率与内外旋翼轴负载之间的关系,得到了主减轮系方案的最低效率<sup>[24]</sup>。

重庆大学机械传动国家重点实验室采用键合图分析 Ka-32 直升机传动系统两输出轴等速反转的条件,获得了系统内部各变量随时间变化的规律<sup>[25]</sup>。

南京航空航天大学对图 20 所示的共轴反转主减减速器封闭差动复合行星轮系的振动特性进行了深入研究<sup>[26-27]</sup>,分析得到了系统的 4 种模态及模态特征。复合行星齿轮系由两个不同子系统组成,带有阶梯行星轮的定轴轮系称为封闭级,由太阳轮  $s_1$ 、阶梯行星轮  $a_i$ 、 $b_i$  和内齿圈  $r_1$  组成;差动行星齿轮系称为差动级,由太阳轮  $s_2$ 、行星轮  $p_j$  和内齿圈  $r_2$  组成。输入功率传输到系统时分成两条路径,一部分通过太阳轮  $s_1$  经封闭级传输到内齿圈  $r_1$ ,另一部分通过太阳轮  $s_2$  经差动级传输到行星架  $c_2$  和内齿圈  $r_2$ ,通过适当的参数设计,可实现内外输出轴  $c_s$ 、 $r_s$  等速反向输出,其中行星轮  $p$  个数为  $N$ ,阶梯行星轮  $a$ 、 $b$  个数为  $M$ 。

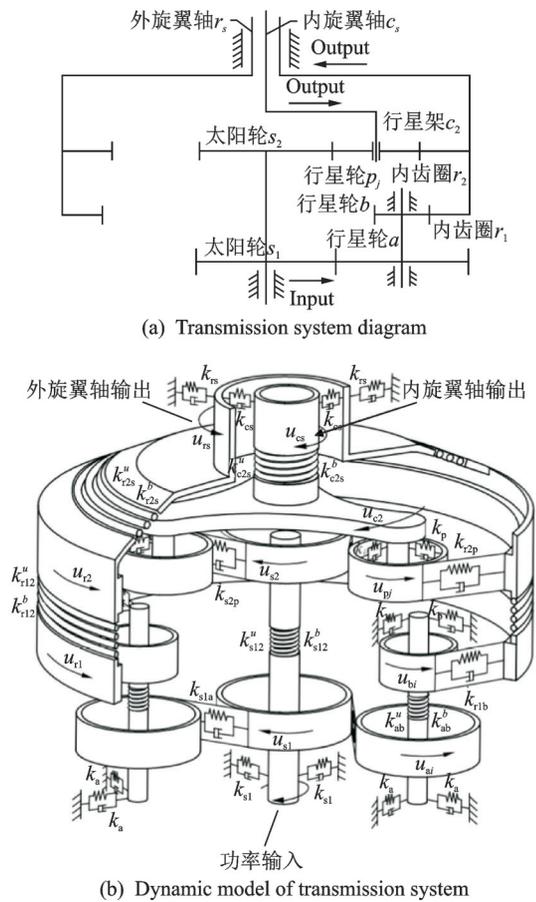


图 20 共轴反转传动系统<sup>[26-27]</sup>

Fig.20 Coaxial reversal drive system<sup>[26-27]</sup>

### 5 以面齿轮为基础实现共轴反转输出的传动系统构型现状

专利 Counter rotating facegear gearbox 提出的面齿轮传动共轴反转输出构型方案<sup>[28]</sup>采用三级传

动(见图21),第一级为锥齿轮换向减速并进行功率分流(由锥齿轮36输入到两路锥齿轮32),第二级为圆柱齿轮减速并进行功率分流(由圆柱齿轮40输入到两路圆柱齿轮42),第三级为面齿轮减速换向并车(一路通过圆柱齿轮50a与面齿轮52a驱动外旋翼轴22;另一路通过圆柱齿轮50b与面齿轮52b驱动内旋翼轴20)。该构型零件数量少,结构简单,在两个面齿轮之间布置大推力轴承58,减小主减速器高度尺寸,可以减轻重量。

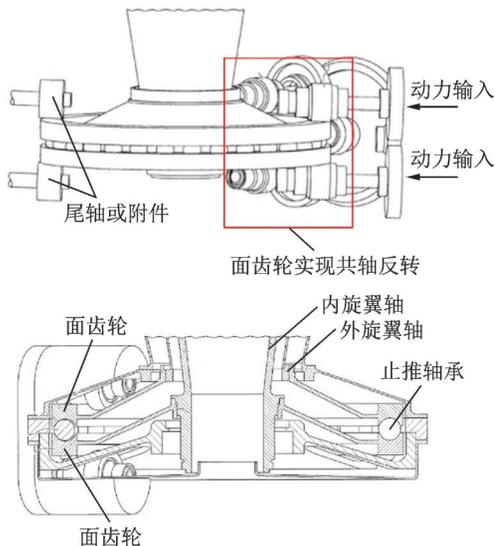


图21 面齿轮传动共轴输出构型<sup>[28]</sup>

Fig.21 Coaxial output configuration of face gear drive<sup>[28]</sup>

专利 Split-torque gear box<sup>[29]</sup>也是通过面齿轮减速换向实现内、外旋翼轴共轴反向输出,但增加了分扭齿轮,更适合于传递大功率(见图22)。

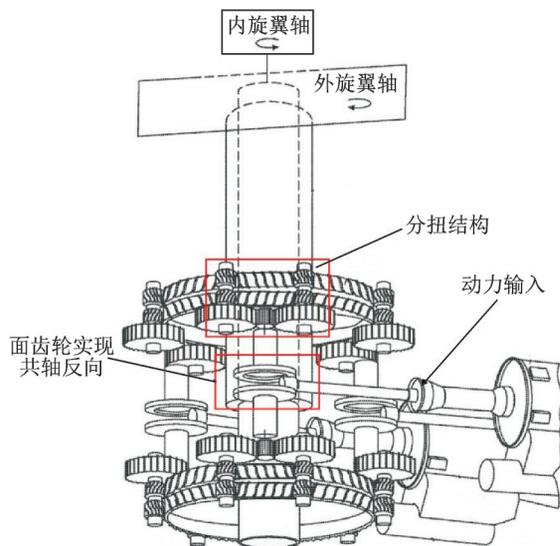


图22 面齿轮传动共轴输出构型<sup>[29]</sup>

Fig.22 Coaxial output configuration of face gear drive<sup>[29]</sup>

## 6 结 论

高速直升机技术已成为新一代直升机装备和产品的技术制高点,世界各国在相应领域的技术竞

争也日趋激烈。目前西科斯基飞机公司已完成2吨级、5吨级和13吨级验证机的飞行验证,实现了400 km/h以上的高速飞行,取得了高速直升机发展的巨大成功。配装于高速直升机的共轴反转传动系统有多种实现方式,圆柱齿轮传动布局灵活,结构简单;锥齿轮传动承载能力强,但安装调整复杂;面齿轮传动比大,且安装调整方便;差动轮系传动结构紧凑承载力强,但制造与装配复杂。本文分析了不同构型的结构特点和适用情况,可为不同需求共轴式直升机的传动系统构型选型设计提供参考。

## 参考文献:

- [1] 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 Mingmin, SU Bingbing, WU Linghua, et al. Status and development trend of new configuration high-speed rotorcraft[J]. Flight Mechanics, 2019, 37(3):1-8.
- [2] 王焕瑾,高正.高速直升机方案研究[J].飞行力学,2005,23(1):38-42.  
WANG Huanjin, GAO Zheng. Research on high-speed helicopter solutions[J]. Flight Mechanics, 2005, 23(1):38-42.
- [3] 佚名.来看美军最先进的未来直升机SB-1型直升机[EB/OL].(2017-04-28)[2019-12-20] <http://video.sina.com.cn/view/251175499.html>.
- [4] 邓景辉.高速直升机前行桨叶概念旋翼技术[J].航空科学技术,2012(3):9-14.  
DENG Jinghui. High-speed helicopter forward blade concept rotor technology[J]. Aviation Science and Technology, 2012(3):9-14.
- [5] 陈铭.共轴双旋翼直升机的技术特点及发展[J].航空制造技术,2009(17):26-31.  
CHEN Ming. Technical characteristics and development of coaxial twin-rotor helicopter[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2009(17):26-31.
- [6] 程广新,邹勇.高速直升机的发展趋势分析[J].中国设备工程,2019(8):183-184.  
CHENG Guangxin, ZHOU Yong. Analysis of the development trend of high-speed helicopters[J]. China Equipment Engineering, 2019(8):183-184.
- [7] YURIY G. Split torque gearbox for rotary wing aircraft with translational thrust system: US 7413142B2 [P]. 2008-08-19.
- [8] 严岳胜,郑青春,张志龙,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 Yuesheng, ZHENG Qingchun, ZHANG Zhi-long. Configuration analysis of main reducer of coaxial

- counter-rotating twin-rotor helicopter [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019(5):37-40.
- [9] KETEL M. Mechanical transmission of helicopters [M]. [S.l.]: [s.n.], 1983.
- [10] TODD A G, MANSFIELD T X. Torque split gearbox for rotary wing aircraft: US 2015/0060596A1 [P]. 2005-03-05.
- [11] ARTHUR E P, DWAIN R B, ELWOOD G, et al. Ultralight coaxial rotor aircraft: US 7198223B2 [P]. 2007-04-03.
- [12] SCOTT B, DAVID W B. Leveraging geometry optimization tools to reduce component weight, development cost, and design schedule [C]//Proceedings of AHS 72nd Annual Forum. [S.l.]: [s.n.], 2016.
- [13] SCOTT B, ERIC K. Design and development of the main rotor gearbox for the Sikorsky Boeing SB>1 defiant JMR technology demonstrator aircraft [C]//Vertical Flight Society's 75th Annual Forum & Technology Display. [S.l.]: [s.n.], 2019.
- [14] The main gearbox of the helicopter coaxial configuration: RU[P/OL]. <https://russianpatents.com/patent/230/2059535.html>.
- [15] PROKSHIN S S, BABAK A P, SEROV S N, et al. Coaxial-rotor helicopter gearbox: RU 22541569C1 [P]. 2013-08-08.
- [16] 陈志刚. 高速共轴式直升机传动机构与操纵机构研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.  
CHEN Zhigang. Research on transmission mechanism and control mechanism of high-speed coaxial helicopter [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2013.
- [17] 贺天鹏, 李书, 张俊, 等. 共轴式直升机双旋翼系统的多体动力学模型[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(S1):91-96, 221-222.  
HE Tianpeng, LI Shu, ZHANG Jun, et al. Multi-body dynamics model of coaxial helicopter dual rotor system [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2013, 33(S1):91-96, 221-222.
- [18] 孟佳东. 高速共轴式直升机总体方案设计及操纵机构力学分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.  
MENG Jiadong. Overall scheme design of high-speed coaxial helicopter and mechanical analysis of control mechanism [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.
- [19] 刘成. ZF-1型高速直升机初步方案设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
LIU Cheng. Research on preliminary design of ZF-1 type high-speed helicopter [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [20] BURGESS R K. The ABC™ rotor—A historical perspective [C]//Proceedings of The 60th Annual Forum of the American Helicopter Society. Baltimore, MD: AHS, 2004.
- [21] 余震, 朱自冰, 聂慧阳. 一种共轴输出封闭差动行星轮系分析[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(3):19-22.  
YU Zhen, ZHU Zibing, NIE Huiyang. Analysis of a closed differential planetary gear train with coaxial output [J]. *Machinery Manufacturing and Automation*, 2016, 45(3):19-22.
- [22] 宋奇慧, 戚克强, 孔凡坤. 共轴差动行星机构减速器的设计[J]. 机械传动, 2015, 39(11):88-91.  
SONG Qihui, QI Keqiang, KONG Fankun. Design of reducer for coaxial differential planetary mechanism [J]. *Mechanical Transmission*, 2015, 39(11):88-91.
- [23] 徐步算, 李英明, 单建平, 等. 卡-32共轴式旋翼直升机传动系统的循环功率流分析[J]. 机械传动, 2014, 38(10):39-42.  
XU Busuan, LI Yingming, SHAN Jianping, et al. Cycle power flow analysis of Ka-32 coaxial rotor helicopter transmission system [J]. *Mechanical Transmission*, 2014, 38(10):39-42.
- [24] 张世飞, 陈鹏, 吴文敏, 等. 共轴双旋翼高速直升机主减轮系效率分析[J]. 机械研究与应用, 2017, 30(3):61-63.  
ZHANG Shifei, CHEN Peng, WU Wenmin, et al. Efficiency analysis of coaxial twin rotor high speed helicopter main reduced gear train [J]. *Mechanical Research and Application*, 2017, 30(3):61-63.
- [25] 林超, 黄超, 蔡志钦. 同轴双输出减速器的键合图模型及仿真[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(7):34-40, 54.  
LIN Chao, HUANG Chao, CAI Zhiqin. Bond diagram model and simulation of coaxial dual output reducer [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 44(7):34-40, 54.
- [26] ZHANG Donglin, ZHU Rupeng, FU Bibo, et al. Mesh phase analysis of encased differential gear train for coaxial twin-rotor helicopter [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 8421201: 1-9.
- [27] ZHANG Donglin, ZHU Rupeng, FU Bibo, et al. Modal properties of contra-rotating encased differential gear train used in coaxial helicopter [J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2020 (8): 799-814.
- [28] TODD A G. Counter rotating facegear gearbox: US 8870538B2 [P]. 2014-10-28.
- [29] GMIRYA Y. Split-torque gear box: US 2013/0160605 A1 [P]. 2013-06-23.