

超越离合器研究现状及发展趋势分析

侯祥颖^{1,2} 张钰哲^{1,2} 张红^{1,2} 张健^{1,2} 李政民卿^{1,2} 朱如鹏^{1,2}

(1 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

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

摘要 超越离合器一般具有超越和接合两种状态,是实现传动系统工况转换的核心部件。随着机械传动系统技术的发展,对超越离合器的工况要求越来越高。为了便于深入系统地开展超越离合器研究,满足新时代高端装备发展需求,通过梳理啮合式、摩擦式两种不同类型的超越离合器相关文献,总结了近年来超越离合器的研究热点、难点,并分析了超越离合器的未来发展方向,为后续超越离合器研究的开展提供了依据和借鉴。

关键词 超越离合器 啮合式 摩擦式 发展趋势

Research Status and Development Tendency Analysis of Overrunning Clutch

Hou Xiangying^{1,2} Zhang Yuzhe^{1,2} Zhang Hong^{1,2} Zhang Jian^{1,2} Li Zhengminqing^{1,2} Zhu Rupeng^{1,2}

(1 College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

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

Abstract Overrunning clutches, as kernel components to achieve working condition changes, have two different working states of overrunning and engaging. With the development of mechanical transmission system technology, the working condition requirements for overrunning clutch are higher and higher. In order to facilitate further systematic research on overrunning clutch, meet the requirements of new age development of high-end equipment, through combing the related literature of mesh type, friction type two kinds of different types of overrunning clutch, the research hotspot and difficulties of overrunning clutch in recent years are summarized, and the future development direction of the overrunning clutch is analyzed. It is provided a basis and reference for subsequent overrunning clutch research.

Key words Overrunning clutch Mesh type Friction type Development tendency

0 引言

超越离合器是动力传输过程中实现发动机与传动轴脱开与接合的关键部件,是控制传动系统运行工况转换的核心,在飞机、汽车、船舶等领域得到广泛的应用。经过数十年的发展,我国已经基本形成了相关的产业链和技术积累,因此,相关研究热度有所下降。然而,与欧美发达国家相比,我国在超越离合器方面的技术储备还有明显差距,诸多技术瓶颈亟待突破。为此,梳理了近年来超越离合器的相关研究文献,阐述了超越离合器的基本发展过程,总结了超越离合器现阶段发展特点,分析了相

关技术与国外的差距,展望了超越离合器的未来发展方向,以期为后续超越离合器的深入研究提供依据和借鉴。

1 超越离合器研究现状

根据工作原理的不同,超越离合器一般分为啮合式和摩擦式两种。啮合式离合器是指通过两个零件上相互啮合的齿爪传递动力和转矩,具有结构简单、可靠性高等优点,却往往具有冲击振动大等缺陷;摩擦式离合器则是利用滚子、楔块等元件通过摩擦传递转矩的形式,实现动力的传输和断开,摩擦式离合器可以实现高转速下的楔合-脱开,但是,

接合可靠性和寿命有待进一步提升。

1.1 啮合式超越离合器

啮合式超越离合器利用相互啮合的结构传递转矩,因而,在接合-脱开过程中难免有冲击、磨损等问题。同时,外形尺寸相对较大,因而多适用于低速或要求不高的场合。啮合式超越离合器主要包括滑销式、牙嵌式以及棘轮棘爪离合器等类型。滑销式超越离合器的弹簧力不可调节,离合器打滑时,滑销与外壳内壁相对滑动,易磨损发热,适用于载荷不太大、转速不太高、过载频率不太高的场合,近年来少有研究;牙嵌离合器只宜在两轴不回转或转速差很小时进行结合,否则,牙齿可能会因受撞击而折断^[1]。因此,滑销式、牙嵌式等离合器应用场合相对受限,而棘轮式离合器应用相对较为广泛^[2]。

美国杨百翰大学 Roach G M 等早在 2002 年便讨论了多种超越离合器(弹簧、斜撑、滚柱、棘轮棘爪等)的工作特点,发现棘轮棘爪式离合器具备极大优势和工程价值,并探讨了棘轮棘爪式超越离合器的不同设计方法^[3]。美国、俄罗斯(苏联)早在 20 世纪就开始对棘轮离合器开展了大量基础研究^[4-7]。目前,棘轮离合器在美国现役航空装备中仍在发挥重要作用^[8-9]。我国诸多型号的航空涡轮起动机中也仿照欧美采用棘轮式离合器结构^[10-11];而目前在舰船领域、汽车领域中,棘轮式同步离合器也得到了广泛应用。诸多学者对其碰撞特性、动态行为、设计方法等开展了广泛研究^[12-15]。

近年来,周晓等探讨了棘轮和棘爪的瞬态工作动力学规律和碰撞特性,研究了棘轮棘爪差动角速度、接触刚度系数等对碰撞力和棘轮速度的影响规律^[16-17]。陈礼顺等分析了棘轮离合器故障原因,其疲劳裂纹导致传动结构失效,从而引起了发动机无法启动的问题^[18]。沈小刚等发现当差动角速度为 120 r/min 左右时,棘轮和棘爪之间碰撞力会超过材料的屈服强度而出现破坏失效^[19]。孙新杰等就棘轮离合器结构设计及强度计算、装配参数和运动规律等方面开展了理论性研究,为棘轮离合器设计、制造和实验提供了借鉴^[20-21]。

从现有文献可知,国外在棘轮离合器理论研究方面已经形成了完备的设计制造体系,应用较为广泛,接合转速可达到 8 000 r/min 左右;而国内棘轮离合器的研究尚不够深入,棘轮离合器目前仅用于 2 000 r/min 以下的相关产业领域。其典型结构形式如图 1 所示。

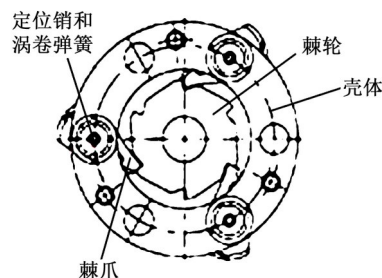


图1 棘轮棘爪超越离合器典型结构

Fig. 1 Typical structure of ratchet-pawl overrunning clutch

1.2 摩擦式超越离合器

摩擦式超越离合器大致可分为滚柱式、扭簧式、楔块式、弹簧式等。其中,扭簧式离合器承受载荷受到扭簧匝数的影响很大,溜滑角很大,且无过载保护,往往应用于防逆转机构等要求较低的场合^[22-23];近年来,弹簧离合器因其能够用于 20 000 r/min 以上的超高转速并且具备质量轻便、可靠性高的特点,得到了研究人员的重视。但目前尚未形成系统的设计方法,加之加工制造困难,尚未实现工程应用。

1.2.1 滚柱式超越离合器

滚柱式超越离合器的研究和应用历史比较早,我国的相关研究可追溯到 20 世纪 50 年代,经过多年的研究积累,已经形成了系列化产品和诸多优化设计方案。近年来,国内外学者针对滚柱式离合器在优化设计、可靠性、动态摩擦行为强度分析、故障失效等方面开展了广泛研究。滚柱离合器目前主要用于 6 000 r/min 以下转速的场合,其典型结构特征如图 2 所示。

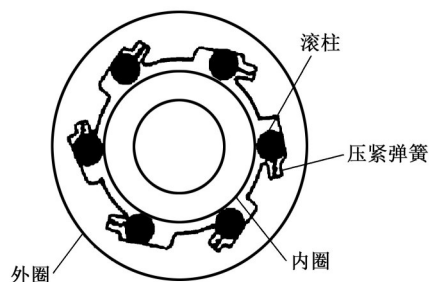


图2 滚柱式超越离合器典型结构

Fig. 2 Typical structure of roller overrunning clutch

杨世明等从滚柱离合器几何结构方面对空程角、自锁条件、设计计算方法、优化设计等方面开展了大量研究,并进行了相关实验验证^[24-30]。谢明等根据四滚柱式超越离合器的工作原理,应用模糊数学的理论与方法建立了离合器系统模糊可靠度的数学模型^[31]。孙东辉等研究了滚柱轴承离合器的动态特性、应力分布、赫兹接触、误差偏载影响规律等特性,从动态接触行为规律及强度方面开展了大量仿真和实验研究^[32-37]。朱胜等则进行了滚柱离合器故障分析和磨损

失效研究,并针对超越离合器失效形式进行了结构改善和优化,并进行了实验验证^[38-39]。薛渊等提出了弧块-滚柱式低副新型超越离合器,建立其几何和力学模型并进行了实验验证^[40]。而国外学者对滚柱离合器的研究相对较为成熟,目前的研究主要集中在其滑动摩擦、功率损失、动态效应以及优化设计方面^[41-43]。

1.2.2 楔块式超越离合器

楔块式离合器又称斜撑离合器,国外的研究和应用比较早,早在20世纪40-50年代,已经涌现出大量的研究成果^[44-48]。国外学者在斜撑超越离合器方面的研究文献仍停留在多年以前,主要集中在摩擦非线性动态规律、失效及稳定性等方面^[49-51],但是其技术已经远远领先我国。目前,在德、美等国已经形成了完整的设计、加工、装配和系列化专利和产品,并形成了较高的技术壁垒。而我国在相关领域的关键技术方面尚未突破。楔块式离合器工作转速能够达到15 000 r/min以上,在航空、燃气轮机等领域应用广泛,其典型结构如图3所示。

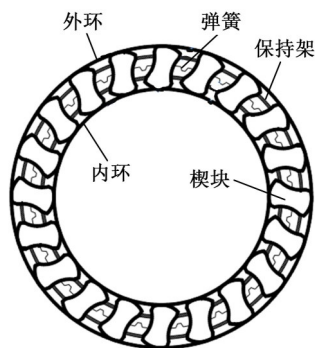


图3 楔块式超越离合器典型结构

Fig. 3 Typical structure of sprag overrunning clutch

我国开始楔块超越离合器的设计研究较晚,扈文庄等在2000年以后才将相关技术和研究方法开展起来^[52-53]。朱楚等对斜撑离合器的力学特点、结构设计、楔块结构参数、有限元仿真和动力学仿真等方面进行了分析研究并开发了相关软件^[54-57]。顾俊等针对斜撑式超越离合器楔块疲劳损伤问题对离合器寿命进行了预测^[58],建立了对数螺旋式楔块单向离合器设计与分析的完整数学模型,探讨了不同离合器参数对其接合特性的影响^[59],并进行了楔块修形设计以提高强制连续的临界转矩^[60]。李可夫等开展了斜撑楔块离合器的接触分析和动态测试研究,提出了离合器动态测试实验原理^[61]。雷美娟等针对斜撑离合器基体和涂层之间的摩擦磨损机理开展了研究^[62]。万载宏等对斜撑离合器楔合失败的原因进行了分析和讨论,为故障诊断提供了依据^[63]。在楔块离合器研究的基础上,诸多学者对其进行了改进设计。高飞等根据楔块离

合器的加工模具特点和结构进行分析,进行了模具和弹簧的改进设计与加工^[64]。Wang P等提出了新形式的超越离合器结构设计思路和方法,并开展了应力分析、摩擦受力、楔合性能等仿真验证^[65-67]。

1.2.3 特殊设计超越离合器

针对常用超越离合器使用的局限性,诸多学者针对特定的工况条件、结构要求设计了专门的超越离合器,以满足使用要求。孔令亮针对车辆传动系统的使用需求,提出了一种多模式的新型超越离合器,并进行了自锁原理、接触分析、模态及动态响应研究^[68]。吴松峻等运用TRIZ理论S曲线,分析设计了一种新型低副超越离合器,并验证了其设计强度和接合性能^[69]。黄谢鑫提出了超越离合器新型转角差模型并进行了动力学分析,为系统匹配和疲劳寿命的估计提供了指导^[70]。新型超越离合器结构设计、分析方法已成为目前研究的方向之一。

链环式超越离合器是一种结构独特的超越离合器,它是针对在脉动无级变速器中使用的滚柱式超越离合器的缺陷而研制的。黄靖远等通过精确模型对链环式离合器的自锁、摩擦等进行了大量研究^[71-72]。魏东等进行了新型张环式超越离合器自锁条件分析、承载分析和Adams仿真,并进行了原理性实验验证^[73];随后又拓展了欧拉公式物理模型并提出了适于高速重载应用场合的扩环式挠性环超越离合器,并进行了结构设计和强度校核验证^[74-75]。

吴松峻等设计了低副双螺旋超越离合器,并进行了强度校核验证^[76]。宋宁宁等提出了一种偏心圆弧型超越离合器设计方法,并进行了误差分析和验证^[77]。曲秀全等提出了楔块式低副单向超越离合器,具备大转矩、抗冲击的优点^[78];随后又提出了双楔块式低副单向超越离合器设计,并进行了主要性能理论计算^[79]。郭延磊等针对带式输送机特殊起动工况,设计出了一种大转矩、小磨损、抗冲击能力强的新型楔块式低副单向超越离合器^[80]。

2 超越离合器发展趋势分析

就目前研究现状来看,超越离合器的研究主要集中在承载分析、动载规律、疲劳寿命、加工制造等方面,但是近年来针对特殊工况的新型离合器设计和分析方法也逐渐成为研究的热点方向。

目前,我国在超越离合器设计制造等方面与西方发达国家还有较大差距。随着我国工业技术体系的发展和高端工业装备制造进程的推进,使得超越离合器面临高转速、超精密、低磨损、长寿命、高可靠等更高要求,同时对揭示摩擦磨损机理、提升

正向设计和制造水平提出了更高挑战。

2.1 新型超越离合器理论研究

为了解决特殊工况下超越离合器面临的特殊问题,近年来诸多专家学者提出了多种新型的超越离合器设计,其中,以磁流体超越离合器和弹簧超越离合器最具有代表性。

磁流体超越离合器是利用磁流变液剪切应力来进行离合的一种装置,它传递的力矩随外加磁场的变化而迅速变化,具有寿命长、运转平稳、结构简单、控制特性好等优点,因而具备较为广阔的应用前景。但其研究也面临机理不明确、设计不成熟等问题,因此我国的磁流变离合器尚处于实验室研究阶段,实际应用技术尚不成熟,目前未能实现商业化和市场化^[81-82]。

弹簧超越离合器是专门为实现超高转速(20 000 r/min以上)提出的,其具有空间尺寸小、温度上升小、传动平稳、工作转速高、超越磨损小、寿命长等优点,因而得到国内外学者的重视^[83-85]。然而弹簧超越离合器在结构设计优化、动态行为分析、寿命预估及实验等研究方面尚不完善,加之制造加工技术难点尚未突破,因而尚停留在实验室研究阶段,其相关技术瓶颈亟待突破。

2.2 超越离合器综合寿命提升

超越离合器的失效主要形式是疲劳和磨损,这直接关系着离合器的服役寿命和使用成本,同时也关乎传动系统整体的可靠性,因而会成为未来研究的重点问题之一:一方面要通过失效机理分析建立起理论依据,另一方面要从设计、加工等方面入手实现离合器寿命的提升^[86]。

超越离合器在工作中往往有两种状态:超越状态和楔合状态。两种不同的工作状态下离合器的接触疲劳和摩擦磨损模型会有明显不同,因此,需要针对离合器工况,如何精确预估混合工作状态下的综合离合器寿命是现阶段面临的技术难题之一,也是具有十分巨大的实际应用价值的。

为了提升超越离合器寿命,需要从设计、制造、材料等多个方面开展研究。一是通过几何设计降低应力、提升强度,从而提升寿命^[87-88];在加工制造方面,有待于进一步提升材料性能^[89]、降低安装误差、提升制造精度,从而提高离合器寿命。同时,在超越离合器加工制造过程中,诸多机理尚未揭示清晰,薄层结构的弹塑性规律与加工工艺的结合不够,因此,如何将理论与加工工艺关联、提升制造装配水平,也是我国超越离合器发展面临的问题。

3 结论

通过梳理近年来超越离合器的研究文献,从啮合式和摩擦式两个大类对超越离合器研究进行了概括和总结。对我国研究的热点、难点进行了归纳和分析,并基于现有研究预测了未来超越离合器可能的发展方向。

就目前来看,啮合式离合器研究尚未突破核心设计技术,其几何设计、动态啮合、疲劳寿命之间的耦合关联机制有待于进一步深入揭示。由于其应用场合往往局限于航空、船舶、车辆等领域中,且对其工况要求不高,因而,啮合式离合器的研究目前发展相对缓慢。但如果能够深入阐述其冲击、损伤机理,啮合式离合器,尤其是棘轮离合器的设计应用仍有很大的提升空间。

摩擦式离合器在现阶段成为超越离合器研究的热点,主要因其具备接合平稳、接合转速高、体积小等优势。但是,目前摩擦式离合器的摩擦磨损机理尚不明晰,设计与接合可靠性关联规律有待于进一步开展研究,配套的加工工艺和制造水平也还需完善。

无论是哪种形式的超越离合器或者是新型超越离合器,都需从结构设计、力学特性、接合性能和寿命预估几个方面开展深入研究,提升几何结构与力学性能和耦合设计分析能力。超越离合器综合研发能力的提升将是我国未来突破国际技术垄断的必经之路。

参 考 文 献

- [1] 孙冬梅,王瑜,郭占正.正梯形牙嵌离合器接合与分离过程研究[J].机械传动,2015,39(7):167-169.
SUN Dongmei, WANG Yu, GUO Zhanzheng. Study on engagement and separation process of positive trapezoid jaw clutch[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39(7): 167-169.
- [2] 常斌.高速超越弹簧离合器设计技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2012:1-7.
CHANG Bin, Research on high speed spring overrunning clutch design technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012: 1-7.
- [3] ROACH G M, HOWELL L L. Evaluation and comparison of alternative compliant overrunning clutch designs[J]. Journal of Mechanical Design, 2002, 124(3): 485-491.
- [4] GOLUBEV Y A. Self-locking reversible ratchet clutch and its calculation[J]. Russian Engineering Research, 2008, 28(12): 1217-1219.
- [5] BONDALETOV V P. Motion of a detent of a free running ratchet-gear mechanism at high ratchet's rotational speeds[J]. Vestnik Mashinostroeniya, 2009, 29(1): 10-11.
- [6] ROACH B, MARK G. An Investigation of compliant over-running ratchet and pawl clutches[D]. Provo: Brigham Young University, 2003: 9-87.
- [7] SORENSON K K. Pawl and ratchet clutch, in particular for an air tur-

- bine starter; EP0331982[P]. 1989-09-13.
- [8] KROCHMALNY A, LOUDEN P J. Enhanced air turbine starter clutch design [C]. Aerospace Technology Conference and Exposition, 1994(942104): 1-6.
 - [9] KROCHMALNY A, ROUSSEL A, SMITH A. Air turbine start system for the next generation of large commercial aerospace engines [J]. Aerospace Technology Conference and Exposition, 1994, 103: 1990-1998.
 - [10] 侯升亮, 侯磊, 梁廷伟. 某型航空用棘轮棘爪离合器动力学仿真分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(9): 83-95.
HOU Shengliang, HOU Lei, LIANG Tingwei. Dynamic simulation analysis of a ratchet pawl clutch for a certain type of aviation [J]. Scientia Sinica Technologica, 2018, 48(9): 83-95.
 - [11] 陈光, 洪杰, 马艳红. 航空燃气涡轮发动机结构[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 264-346.
CHEN Guang, HONG Jie, MA Yanhong. Structure of aviation gas turbine engine [M]. Beijing: Beihang University Press, 2010: 264-346.
 - [12] WU Y C, SUN Z H. Design and analysis of a novel speed-changing wheel hub with an integrated electric motor for electric bicycles [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013: 1-8.
 - [13] 宋成军, 魏君波, 龚立新, 等. 自动同步离合器棘轮棘爪碰撞问题的讨论[J]. 热能动力工程, 2003(3): 301-303.
SONG Chengjun, WEI Junbo, GONG Lixin, et al. Some observations concerning the collision of ratchet and pawl in an automatic synchronizing clutch [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003(3): 301-303.
 - [14] 董喆渊, 刘永文. 自动同步离合器棘爪弹簧刚度特性仿真分析[J]. 现代制造工程, 2009(3): 55-58.
DONG Zheyuan, LIU Yongwen. The stiffness simulation analysis of the torsion spring of synchronizing-self-shift clutch [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009(3): 55-58.
 - [15] 曹志刚, 吴鲁纪, 杨林杰, 等. 自动同步离合器基本原理和研究发展概况[J]. 机械传动, 2010, 34(8): 92-94.
CAO Zhigang, WU Luji, YANG Linjie, et al. Summary on basic mechanism and development status of sss clutch [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2010, 34(8): 92-94.
 - [16] 周晓, 马秋成, 张跃春, 等. 大功率自动同步离合器棘轮棘爪碰撞过程仿真分析[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(6): 836-839.
ZHOU Xiao, MA Qiucheng, ZHANG Yuechun, et al. Simulation analysis of ratchet and pawl collision process in high-power synchronous-self-shifting clutch [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(6): 836-839.
 - [17] 侯升亮. 某型航空发动机棘轮棘爪离合器动力学仿真与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 20-45.
HOU Shengliang. An aeroengine clutch the ratchet wheel and pawl dynamics simulation and anslysis [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 20-45.
 - [18] 陈礼顺, 杜锐锋, 刘新灵. 棘轮离合器疲劳裂纹原因分析[J]. 失效分析与预防, 2014, 9(1): 39-42.
CHEN Lishun, DU Ruifeng, LIU Xinling. Analysis of fatigue crack of ratchet clutch [J]. Failure Analysis and Prevention, 2014, 9(1): 39-42.
 - [19] 沈小刚, 刘永文. 船用同步离合器棘轮棘爪碰撞问题的仿真分析[J]. 船舶工程, 2010, 32(3): 24-26.
SHEN Xiaogang, LIU Yongwen. Simulation analysis of the collision problem to the ratchet and pawl mechanism in marine synchronous [J]. Ship Engineering, 2010, 32(3): 24-26.
 - [20] 孙新杰. 浅谈棘轮离合器设计[J]. 中国科技信息, 2011(15): 111-116.
SUN Xinjie. Design of ratchet clutch [J]. China Science and Technology Information, 2011(15): 111-116.
 - [21] 胡培俊. 棘轮棘爪离合器分析与计算[J]. 内燃机与配件, 2018(4): 46-47.
HU Peijun. Analysis and calculation of ratchet and pawl clutch [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018(4): 46-47.
 - [22] 张济政, 权英华, 孙吉平, 等. 超越离合器的发展现状及趋势[C]. 第三届中国机械技术史国际学术会议论文集, 2002: 398-403.
ZHANG Jizheng, QUAN Yinghua, SUN Jiping, et al. The current conditions and development expectation of overrunning clutch [C]. Proceedings of the Third China-Japan International Conference on History of Mechanical Technology, 2002: 398-403.
 - [23] 钱杨. 扭簧式离合器的机构原理及设计研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2003(3): 71-75.
QIAN Yang. Mechanism principle and design study on torsion spring clutch [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2003(3): 71-75.
 - [24] 杨世明. 滚柱超越离合器接合时空转角的分析[J]. 机械设计与研究, 2003(6): 51-52.
YANG Shiming. Analysis of the idle angle of the roller overrunning clutch [J]. Machine Design & Research, 2003(6): 51-52.
 - [25] 廖军刚. 双曲面滚柱加载器设计理论的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 1-54.
LIAO Jungang. Study on the design theory of hyperboloid loader with rollers [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 1-54.
 - [26] 徐晶莹. 航空传动系统超越离合器设计[J]. 科技与企业, 2014(14): 364.
XU Jingying. Design of overrunning clutch in aviation transmission system [J]. Technology and Enterprise, 2014(14): 364.
 - [27] 郭鑫, 王玉飞, 沈倩. 滚柱式超越离合器失效分析及结构优化[J]. 科技资讯, 2017, 15(16): 17-19.
GUO Xin, WANG Yufei, SHEN Qian. Failure analysis and structure optimization of roller overrunning clutch [J]. Science & Technology Information, 2017, 15(16): 17-19.
 - [28] 胡凯杰. 超越离合器外圈近净成形加工关键技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018: 7-38.
HU Kaijie. Research on key technologies of near-net-shape forming process for overrunning clutch outer ring [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018: 7-38.
 - [29] 许兆棠. 压杆压紧滚柱式超越离合器的设计[J]. 机械传动, 2010, 34(7): 41-43.
XU Zhaotang. The design of overrunning clutch with rollers held down by compressed bars [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2010, 34(7): 41-43.
 - [30] 龚正. 滚柱式超越离合器关键零件力学分析及结构改进的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012: 19-47.
GONG Zheng. Mechanical analysis and structure improvement of the

- key parts of the roller overrunning clutch[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012: 19-47.
- [31] 谢明, 杨桦. 四滚柱式超越离合器系统模糊可靠度计算[J]. 公路交通科技, 2005(4): 136-138.
- XIE Ming, YANG Hua. Analysis and calculation on fuzzy reliability of four roller overrunning clutch system[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005(4): 136-138.
- [32] 孙东辉. 等距回转面斜滚子离合器结构分析及优化[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013: 11-57.
- SUN Donghui. Structure analysis and optimization research for isometric surface of revolution clutch with skewed rollers[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013: 11-57.
- [33] 谢明军, 陈国定. 制造误差对超越离合器滚柱失效的影响分析[J]. 机械传动, 2008(4): 57-59.
- XIE Mingjun, CHEN Guoding. The effect of manufacture error on roller failure for overdrive clutch[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2008(4): 57-59.
- [34] CHEN L W, CHEN Y C. Wedge-shaped track design and contact analysis of overrunning clutches[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2008, 222(D9): 1647-1656.
- [35] 王鹏, 李平康, 李文广, 等. 一种新型滚柱式控制分离型超越离合器的设计[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(7): 777-784.
- WANG Peng, LI Pingkang, LI Wenguang, et al. Design of a new type of roller controlled release overrunning clutch[J]. Scientia Sinica Technologica, 2013, 43(7): 777-784.
- [36] 陈前. 纯电动汽车变速箱超越离合器寿命分析与测试[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 7-60.
- CHEN Qian. Life analysis and test of overrunning clutch of pure electric vehicle gearbox[D]. Changchun: Jilin University, 2020: 7-60.
- [37] 殷玉枫, 常争艳, 刘中. 滚柱轴承离合器的动力特性分析[J]. 太原科技大学学报, 2006(4): 281-284.
- YIN Yufeng, CHANG Zhengyan, LIU Zhong. Dynamic properties analysis for roller bearing clutch[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2006(4): 281-284.
- [38] 朱胜, 李萍, 井江. 一种滚柱式超越离合器的改进设计[J]. 现代制造技术与装备, 2016(6): 151-153.
- ZHU Sheng, LI Ping, JING Jiang. An improved design of overrunning roller clutch[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2016(6): 151-153.
- [39] 马磊, 孟鸿超, 韩红雨, 等. 外星轮超越离合器圆柱滚子磨损失效研究[J]. 金属加工(冷加工), 2020(1): 84-86.
- MA Lei, MENG Hongchao, HAN Hongyu, et al. Research on wear failure of cylindrical roller in overrunning clutch of alien wheel[J]. Metal Working(Metal Cutting), 2020(1): 84-86.
- [40] 薛渊, 陆念力, 曲秀全, 等. 弧块-滚柱式低副超越离合器扭转刚度和接合能耗的研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007(7): 785-789.
- XUE Yuan, LU Nianli, QU Xiuyan, et al. Research on torsional stiffness and contact consumption energy of an arc-block-roller lower pair overrunning clutch[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007(7): 785-789.
- [41] LIU K, BAMBA E. Analytical model of sliding friction in an overrunning clutch[J]. Tribology International, 2005, 38(2): 187-194.
- [42] CONTROZZI M, LUCIANI L B, MONTAGNANI F. Unified approach to bi-directional non-back drivable roller clutch design[J]. Mechanical and Machine Theory, 2017, 116: 433-450.
- [43] DUTT K A, SONI S B, PATEL D V. Hertzian contact stress analysis in roller power transmission one-way clutch by using finite element analysis[M]//Advanced Engineering Optimization Through Intelligent Techniques. Berlin: Springer, 2020: 1-88.
- [44] FARKAS E J, RACKLE J W. Sprag type overrunning clutch: US2542914 A[P]. 1951-02-20.
- [45] MCFARLAND F R. Trapped spring sprag clutch: US2735527 A[P]. 1956-02-21.
- [46] HERMANN T G. One-way sprag clutch with spring means: US3207278[P]. 1965-09-21.
- [47] GORSKY R J. Sprag clutch: US2834445[P]. 1958-05-13.
- [48] DODGE A Y. Sprag type one-way clutch: US2555484 A[P]. 1952-10-21.
- [49] SINOUE J J, THOUVEREZ F, JEZEQUEL L. Analysis of friction and instability by the centre manifold theory for a non-linear sprag-slip model[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 265(3): 527-559.
- [50] VERNAY P, FERRARIS G, DELBEZ A, et al. Transient behaviour of a sprag-type over-running clutch: an experimental study[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 248(3): 567-572.
- [51] OLIVER S, HAMPSHIRE J, ENGBER M, et al. Optimized gas turbine control system for improved US navy landing craft air cushion (LCAC) operation[C]. ASME Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference & Exposition. New York: ASME, 2017: 1-3.
- [52] 扈文庄. 燃气涡轮起动机减速器用超越离合器研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004: 1-52.
- HU Wenzhuang. Research on the freewheel clutches of gas turbine strating engine reducer[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004: 1-52.
- [53] 朱自冰. 高速超越斜撑离合器设计技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004: 18-61.
- ZHU Zibing. Research on design technology of high speed overrunning sprag clutch[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004: 18-61.
- [54] 朱楚. 高速斜撑超越离合器设计方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012: 9-65.
- ZHU Chu. Research on design method of high speed sprag overrunning clutch[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012: 9-65.
- [55] 盖小涛. 高速超越离合器楔合性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 1-48.
- GAI Xiaotao. Research on engaging property of high speed sprag overrunning clutch[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 1-48.
- [56] 韩红雨, 宗晓明, 张作超, 等. ZL50用新型超越离合器用斜撑块的精密技术研究[J]. 智能制造, 2018(12): 35-37.
- HAN Hongyu, ZONG Xiaoming, ZHANG Zuochao, et al. Research on precision technology of new type overrunning clutch used in ZL50[J]. Intelligent Manufacturing, 2018(12): 35-37.
- [57] 严宏志, 杨兵, 胡魁贤, 等. 单圆弧PCE型离合器楔合过程力学特性分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 1034-1038.

- YAN Hongzhi, YANG Bing, HU Kuixian, et al. Mechanical properties analysis of engaging process of the single arc PCE-type clutch [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 1034-1038.
- [58] 顾俊, 严宏志, 朱自冰, 等. 斜撑式超越离合器楔块的曲线拟合及寿命预测[J]. 现代制造工程, 2009(3): 79-82.
- GU Jun, YAN Hongzhi, ZHU Zibing, et al. Contact stress analysis of sprag overrunning clutch and life prediction [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009(3): 79-82.
- [59] LIU Z H, YAN H Z, CAO Y M. Design and analysis of logarithmic spiral type sprag one-way clutch [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(12): 4597-4607.
- [60] 严宏志, 赵聪, 刘志辉, 等. 阿基米德斜撑离合器楔块型面修形设计及其性能分析[J]. 中国机械工程, 2016, 27(12): 1598-1602.
- YAN Hongzhi, ZHAO Cong, LIU Zhihui, et al. Modification design and contact property analysis for profiles of archimedes type sprag clutch [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(12): 1598-1602.
- [61] 李可夫. 斜撑式超越离合器楔合过程接触分析及动态测试[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 1-50.
- LI Kefu. Contact analysis and dynamic test of sprag overrunning clutch's engaging process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 1-50.
- [62] 雷美娟, 田凌, 石金大, 等. 斜撑式超越离合器用 Cr7C3 涂层和 GCr15 基体的磨损行为研究[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 90-97.
- LEI Meijuan, TIAN Ling, SHI Jinda, et al. Wear behavior of Cr₇C₃ coating and GCr15 substrate for sprag overrunning clutch [J]. Surface Technology, 2018, 47(8): 90-97.
- [63] 万载宏. 离合器楔合失败因素分析[J]. 内燃机与配件, 2020(15): 50-52.
- WAN Zaihong. Analysis on influence factors of the clutch unreliable wedge [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020(15): 50-52.
- [64] 高飞, 宗晓明, 陈怀刚, 等. 航空超越离合器预紧弹簧压弯模具改进设计与加工[J]. 金属加工(冷加工), 2017(13): 13-16.
- GAO Fei, ZONG Xiaoming, CHEN Huaigang, et al. Improved design and processing of pre tightening spring bending die for aviation overrunning clutch [J]. Metal Working (Metal Cutting), 2017(13): 13-16.
- [65] WANG P, LI P K, KONG L L. Design and simulation research on a new type of movable wedge-ball overrunning clutch [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 3207: 1362-1366.
- [66] 张金辉. 一种凸轮离合器的设计分析[D]. 厦门: 厦门大学, 2017: 33-65.
- ZHANG Jinhui. Design and analysis for a type of cam clutch [D]. Xiamen: Xiamen University, 2017: 33-65.
- [67] 罗浩. 楔块式单向离合器楔块工作型面设计及动态仿真[D]. 镇江: 江苏大学, 2018: 24-57.
- LUO Hao. Wedge working surface design and dynamic simulation of wedge type one-way clutch [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018: 24-57.
- [68] 孔令亮. 多模式新型超越离合器的设计仿真与实验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015: 13-72.
- KONG Lingliang. Design simulation and experimental research on a novel multi-mode overrunning clutch [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015: 13-72.
- [69] 吴松峻, 李华, 姚进. 基于 TRIZ 理论的新型超越离合器设计分析[J]. 机械设计与制造工程, 2016, 45(9): 34-38.
- WU Songjun, Li Hua, Yao Jin. Design and analysis of a new type of overrunning clutch based on TRIZ [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2016, 45(9): 34-38.
- [70] 黄谢鑫. 双向可控超越离合器传动模式下动力学特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 11-29.
- HUANG Xiexin. Study on dynamic characteristics in transmission mode of seclatable two-way clutch [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016: 11-29.
- [71] 黄靖远, 张浩, 王序云, 等. 链环式超越离合器的数学模型和特性分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997(11): 37-40.
- HUANG Jingyuan, ZHANG Hao, WANG Xuyun, et al. Mathematical model and feature analysis of chain-ring overrunning clutch [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1997(11): 37-40.
- [72] 孙吉平, 高志, 黄靖远, 等. 链环式超越离合器自锁条件及数学模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003(8): 1031-1034.
- SUN Jiping, GAO Zhi, HUANG Jingyuan, et al. Selfhold condition and its mechanical model of chain-ring overrunning clutch [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2003(8): 1031-1034.
- [73] 魏东. 环式超越离合器自锁机理研究及新型张环式超越离合器的研制[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2016: 1-60.
- WEI Dong. Study on the self-locking mechanism of ring-type overrunning clutch and the development of the new expanding ring type overrunning clutch [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2016: 1-60.
- [74] 杜力, 魏东, 陈奎, 等. 一种新型扩环式挠性环超越离合器[J]. 机械传动, 2015, 39(9): 168-170.
- DU Li, WEI Dong, CHEN Kui, et al. New expanding flexible ring-type overrunning clutch [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39(9): 168-170.
- [75] 杜力, 彭斯洋, 魏东, 等. 新型张环式超越离合器的工作原理及自锁与超越条件[J]. 中国机械工程, 2017, 28(12): 1387-1393.
- DU Li, PENG Siyang, WEI Dong, et al. Working Principle of New Expanding-ring Type Overrunning Clutches and Their Self-locking and Overrunning conditions [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(12): 1387-1393.
- [76] 吴松峻, 李华, 姚进. 双螺旋超越离合器的设计分析[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(7): 11-14.
- WU Songjun, LI Hua, YAO Jin. Design and analysis of couple helix surface overrunning clutch [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2017, 46(7): 11-14.
- [77] 宋宁宇, 胡凯杰, 王平. 偏心圆弧形超越离合器工作型面设计方法及误差分析[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2017, 30(4): 26-30.
- SONG Ningning, HU Kaijie, WANG Ping. Design method and error analysis of working surface of eccentric circular arc type overrunning clutch [J]. Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition), 2017, 30(4): 26-30.
- [78] 曲秀全, 陆念力, 戴恒震. 一种新型楔块式低副单向超越离合器

- [J]. 机械工程学报, 2004(1): 195-198.
- QU Xiuquan, LU Nianli, DAI Hengzhen. New v-shaped unidirectional clutch with lower pair [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004(1): 195-198.
- [79] 曲秀全, 薛渊, 张广芸, 等. 一种双楔块低副单向超越离合器[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007(1): 42-45.
- QU Xiuquan, XUE Yuan, ZHANG Guangyun, et al. Unidirectional overrunning clutch with dual-wedge-block lower pair [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007(1): 42-45.
- [80] 郭延磊, 王绪科. 新型带式输送机超越离合器设计研究[J]. 南方农机, 2019, 50(11): 99.
- GUO Yanlei, WANG Xuke. Design and research on overrunning clutch of new type belt conveyor [J]. China Southern Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 99.
- [81] 邓永瑞. 车辆随车发电用磁流变离合器的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019: 1-12.
- DENG Yongrui. Research on magnetorheological fluid clutch for vehicle-mounted power generation [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019: 1-12.
- [82] 赵爽. 挤-剪式磁流变离合器机理分析与试验研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2020: 1-9.
- ZHAO Shuang. Research on high torque magnetorheological clutch based on squeeze-shear mode [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2020: 1-9.
- [83] 常斌, 鲍和云, 朱如鹏. 基于 Matlab 的超越弹簧离合器弹簧的优化设计[J]. 机械制造与自动化, 2012, 41(3): 107-109.
- CHANG Bin, BAO Heyun, ZHU Rupeng. Optimal design of spring for spring overrunning clutch based on Matlab [J]. Machine Building & Automation, 2012, 41(3): 107-109.
- [84] 严宏志, 李算, 朱楚, 等. 关键结构参数对弹簧离合器传扭性能影响分析[J]. 现代制造工程, 2020(5): 33-38.
- YAN Hongzhi, LI Suan, ZHU Chu, et al. Analysis of the influence of key structural parameters on torsional performance of spring clutch [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(5): 33-38.
- [85] 严宏志, 姚毅, 刘建睿, 等. 直升机传动系统弹簧离合器扭矩传递性能有限元仿真[J]. 现代制造工程, 2019, 460(1): 100-107.
- YAN Hongzhi, YAO Yi, LIU Jianrui, et al. Finite element simulation of torque transmission performance of helicopter transmission system spring clutch [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019, 460(1): 100-107.
- [86] 马磊, 孟鸿超, 韩红雨, 等. 外星轮超越离合器圆柱滚子磨损失效研究[J]. 金属加工(冷加工), 2020(1): 84-86.
- MA Lei, MENG Hongchao, HAN Hongyu, et al. Research on wear failure of cylindrical roller in overrunning clutch of outer wheel [J]. Metal Working (Metal Cutting), 2020(1): 84-86.
- [87] 郭鑫, 王玉飞, 沈倩. 滚柱式超越离合器失效分析及结构优化[J]. 科技资讯, 2017, 15(16): 17-19.
- GUO Xin, WANG Yufei, SHEN Qian. Failure analysis and structure optimization of roller overrunning clutch [J]. Science & Technology Information, 2017, 15(16): 17-19.
- [88] 石光林, 朱林, 王汝贵. 基于多因素修正的超越离合器保持架疲劳寿命分析[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(2): 70-73.
- SHI Guanglin, ZHU Lin, WANG Rugui. The fatigue life analysis for the cage of overrunning clutch based on multiple factors correction [J]. Machine Design & Research, 2015, 31(2): 70-73.
- [89] 罗克, 王军. 混合陶瓷楔块超越离合器的设计及基本性能分析[J]. 内燃机与配件, 2018(12): 19-21.
- LUO Ke, WANG Jun. Design and basic performance analysis of ceramic sprag overrunning clutch [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018(12): 19-21.

收稿日期: 2020-12-27 修回日期: 2021-03-17

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2004700)

国家自然科学基金(51775264)

江苏省自然科学基金(BK202000428)

作者简介: 侯祥颖(1990—), 男, 山东济南人, 博士, 讲师; 研究方向为传动系统设计分析等。

(上接第161页)

- [16] DARRELL R, BEIKMANN R S, MICHAEL P. Characterizing the onset of manual transmission gear rattle [J]. SAE International Journal of Passenger Cars: Mechanical Systems, 2009, 2(1): 1352.
- [17] 陈达亮, 王东, 梁博洋. 某型双离合变速箱敲击仿真分析[J]. 汽车制造业, 2019(6): 27-30.
- CHEN Daliang, WANG Dong, LIANG Boyang. Dual-clutch gearbox rattle simulation analysis [J]. AI Automobile Industry, 2019(6): 27-30.
- [18] TANGASAWI O, THEODOSSIADES S, RAHNEJAT H. Lightly loaded lubricated impacts: Idle gear rattle [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 308: 418-430.
- [19] CRUZ MDL, THEODOSSIADES S, RAHNEJAT H, et al. Numerical and experimental analysis of manual transmissions-gear rattle [J]. SAE Technical Papers, 2009; DOI: 10.4271/2009-01-0328.
- [20] 章刚, 韦博. 变速箱搅油阻力矩预测方法[J]. 汽车零部件, 2018(10): 37-40.
- ZHANG Gang, WEI Bo. Prediction method of churning drag torque for transmission [J]. Automobile Parts, 2018(10): 37-40.
- [21] 蔡龙生, 楚俊楠, 陈俐. 基于包络解调的手动变速器齿轮敲击实验研究[J]. 传动技术, 2013, 27(2): 38-48.
- CAI Longsheng, CHU Junnan, CHEN Li. Experimental study of gear rattle in a manual transmission based on envelop demodulations [J]. Drive System Technique, 2013, 27(2): 38-48.
- [22] 石油化工科学研究院. 石油产品运动粘度测定法和动力粘度计算法: GB/T 265-1988 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1988: 4-8.
- Centralized technical management of Academy of petrochemical Sciences. Petroleum products-Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity: GB/T 265-1988. [S]. Beijing: China Standards Press, 1988: 4-8.

收稿日期: 2020-12-28 修回日期: 2021-04-01

作者简介: 吕品(1983—), 女, 河南南阳人, 硕士, 高级工程师; 主要从事变速器 NVH 仿真工作。