

直升机主减速器干运转能力重点研究领域与提升途径分析

常继华

(长沙民政职业技术学院民政与社会工作学院 湖南 长沙 410004)

摘要: 本文针对直升机主减速器干运转能力, 研究其复杂性、系统性及特殊性, 围绕直升机主减速器干运转能力预测与提升途径, 从基础理论与工程试验方面对热分析、润滑状态分析、温度测量与油膜厚度测量等重点研究领域进行分析, 结合直升机主减速器干运转能力研究内容及诸多技术瓶颈与发展滞后的现状, 提出干运转能力提升途径的进一步研究思路, 为直升机主减速器干运转能力研究提供参考。

关键词: 直升机; 主减速器; 干运转; 温度; 润滑

0 引言

直升机以其独特飞行性能, 在国防、应急运输与救援、国民经济发展与民生保障等方面发挥着不可替代的作用, 其重要性在战争、抗震救灾、返回太空舱搜寻、火灾救援和医疗救助等具体应用中都已得到体现。然而, 由于直升机飞行事故不断发生, 近几年更是受到广泛关注, 这对直升机的安全性提出了更高要求。

相较于发动机而言, 直升机传动系统在可靠性与安全性方面的要求更高。由于直升机的独特构型, 一台发动机发生故障失效后, 另一台发动机仍能保障飞行动力。同为直升机的三大关键部件之一, 传动系统为单一动力通道并无冗余备份, 一旦发生故障失效就会动力中断。因此, 必须考虑传动系统由于弹道损伤、油路堵塞和润滑泵机械故障等原因导致润滑失效而动力中断。苏联实际飞行数据统计, 润滑系统故障导致的直升机飞行事故的比例为 35%^[1]。国外早期直升机试验结果表明, 传动系统干运转能力最长为 5 ~ 9min。

目前, 国际航空标准、我国民用航空适航规章及国军标 GJB 3696-99 都对直升机传动系统干运转能力提出不低于 30min 的明确要求。直升机无滑翔能力且飞行员逃生困难, 足够的干运转能力可以保证直升机具备足够的飞行时间用来返航或寻找安全地点着陆。世界直升机制造强国的直升机传动系统干运转能力现已大多达到了 30min^[2-4]。

传动系统干运转能力的提升, 不仅能够提高直升机传动系统的安全性能, 同时也能提高其整体技术水平。面对对直升机传动系统更高速度、更大载荷、更高可靠性和更高安全性的日渐迫切的需要, 如何使我国直升机传动系统干运转能力达到不低于 30min 的要求成为当前亟待解决的难题。

1 干运转能力研究领域

直升机传动系统包括主减速器、中间减速器、尾减速

器、动力传动组件与尾传动组件等五大主要部分, 其中, 主减速器是传动系统中体积和重量最大且最为复杂, 也是最容易失效的装置。主减速器将发动机输出的几万转每分钟的高速小转矩动力, 经过减速器减速至几百转每分钟的低速大转矩动力并传递给旋翼。

主减速器具有高传动比、高温、高速和重载等特点, 要求体积小、重量轻、功重比高、可靠性高及安全性高, 工作环境复杂且恶劣、散热条件差, 与地面一般减速器存在非常大的差异。主减速器中齿轮为易失效部件, 因此成为该领域重点研究关注的对象。

如图 1 所示, 理论研究开展基于齿轮机械传动、热分析和润滑分析等基础理论, 以及局部与系统耦合关系。失油条件下时变特性更强、耦合关系更加紧密。干运转能力预测则是计算不同时间点系统状态及关键参数变化, 考虑到干运转能力预测计算方法与胶合机理尚需进一步研究, 因此预测结果还不够准确。面向齿面油膜厚度与温度测量的工程试验技术进步与发展, 是干运转能力基础理论研究干运转能力提升途径探索研究的有力支撑。

2 基础理论研究

2.1 胶合机理

直升机主减速器齿轮失油条件下的失效形式为胶合。目前, 胶合机理尚不明朗, 国内外学者从未停止相关研究^[5-7]。目前, 齿面温度与胶合存在密切关系已成行业共识。因此, 齿轮胶合承载能力计算一般采用 1937 年 H. Blok 提出的闪现温度为基准的温度准则。该方法认为齿面任意啮合位置的最大接触温度 θ_a 应不大于齿面胶合温度 θ_s , 即:

$$\theta_a = \theta_M + \theta_{fmax} < \theta_s \quad (1)$$

式中: θ_M - 本体温度;

θ_{fmax} - 闪现温度最大值, 不同工况下齿面胶合温度通过试验获得。

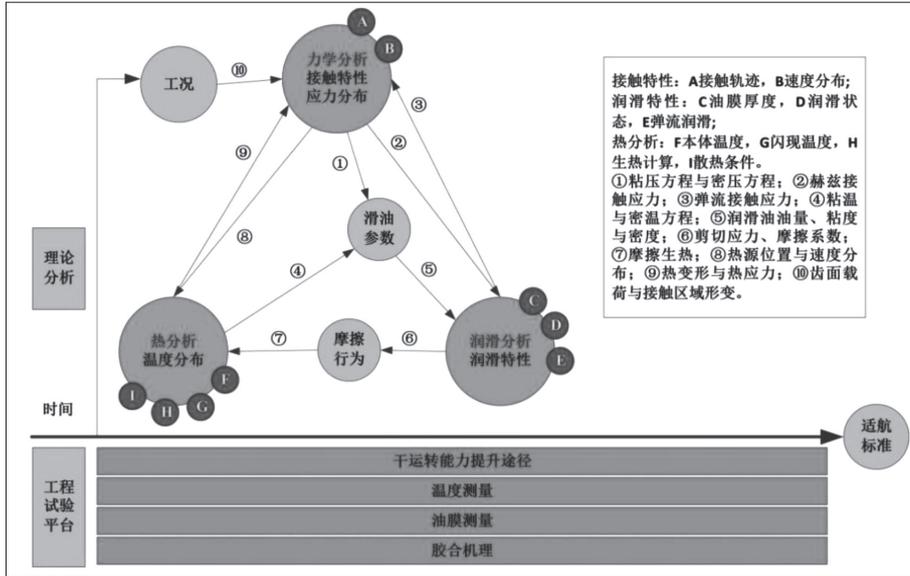


图1 直升机主减速器干运转能力研究领域

2.2 齿面温度分析

2.2.1 热源分析

齿面温度热源主要来自齿面摩擦功率损失，其齿面热流密度计算公式为：

$$q_c = \gamma \beta \mu_c P_{nc} V_e \quad (2)$$

式中： γ - 热转换系数；

μ_c - 摩擦系数；

β - 分配系数；

P_{nc} - 接触区域平均压力；

V_e - 齿面相对滑动速度。

如图2所示，不同润滑状态下的摩擦系数存在巨大差异。由此可见，润滑状态控制对齿面本体温度与闪现温度变化影响明显。

2.2.2 温度分布分析

齿轮传动过程中在吸收摩擦产生热量的同时，齿轮各面也在向外进行热扩散。对于温度分布计算，一是采用基于一维热传导得出的计算公式，二是基于二维或三维的有限元计算方法。边界条件准确确定及网格质量，主要影响计算结果。在到达热稳态后，本体温度为恒定值，而闪现温度则呈现周期变化。在失油条件下，齿面

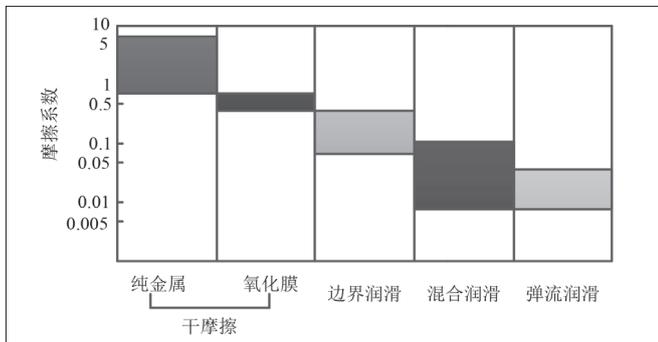


图2 不同润滑状态下摩擦系数

本体温度与闪现温度都无法再达到稳态。根据 H. Blok 胶合失效理论，高温位置与温度大小是温度分析的重点内容。

2.3 润滑分析

2.3.1 齿面弹流状态判断

齿面相对运动把具有一定黏度的润滑油带入收敛几何形状的间隙，形成具有一定厚度的压力油膜，分离两金属接触面，如图3所示。

不同的润滑状态对应的摩擦行为存在着巨大差异，齿面接触区域的润滑状态判断通常采用油膜厚度与齿面粗糙度的比值，即膜厚比，可表示为：

$$\lambda = h / \sigma = h / \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (3)$$

式中： h - 接触区油膜厚度；

σ - 润滑面综合粗糙度；

σ_1, σ_2 - 两齿面粗糙高度值的均方根偏差。

$\lambda \geq 3$ 时，为全膜润滑状态； $1 < \lambda < 3$ 时，为混合润滑状态； $\lambda \leq 1$ 时，为边界润滑状态。

2.3.2 润滑状态变化分析

齿面弹流润滑基础理论研究主要基于充分润滑的条件下，即正常供油条件下。而失油条件下则是润滑状态加速恶化的过程^[8]。失油极端工况一般发生在充分润滑一定时间后，因此，充分润滑不仅是乏油润滑理论的基础，也是失油极端工况下的初始条件。在失油润滑条件下，温度加速升高，润滑状态变化更快，时变特性更强，系统分析更为复杂，直至齿面胶合失效导致动力中断。接触区油膜厚度大小及油膜存在时间对齿干运转能力有着显著影响^[9,10]。

3 试验过程状态监测

3.1 试验方式

破坏性试验与非破坏性试验方式是直升机干运转能力

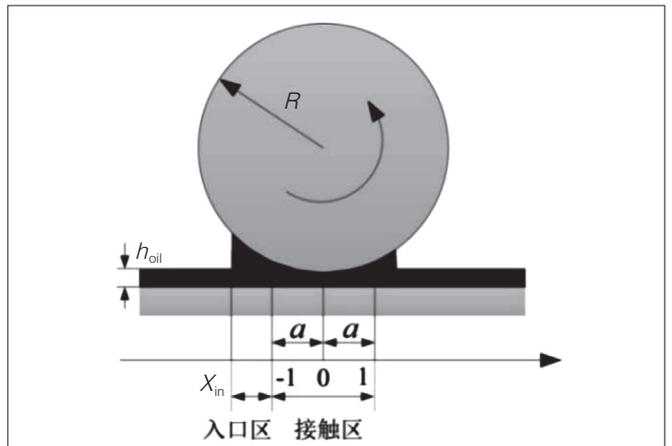


图3 接触区压力油膜

相关试验都不可缺少的。通过破坏性试验,记录失油条件下齿轮传动完整运行时间、完整运行过程、破坏程度和一定工况下胶合承载能力等,但大量试验不需要进行破坏性试验,此时对齿面温度或油膜厚度实施更为准确的测量尤为重要,以避免胶合失效意外发生而增加试验成本。

3.2 状态监测

齿面温度与油膜厚度大小都直接反映失油条件下齿轮运转工况的变化程度,因此成为试验过程重点监测对象。由油膜厚度与粗糙度确定膜厚比直接反映润滑状态,但是在工程试验中二者动态测量都还无法获得令人满意的结果。温度与润滑状态存在密切关系并相互影响,通过测量齿面温度或齿面接触区域固-液接触比例等较易获得数据,亦可间接实现润滑状态及齿轮传动过程状态。因此,开展齿轮传动工程试验油膜厚度测量研究就显得十分必要,但根据齿面温度测量方法创新与测量设备技术的发展速度,齿面温度测量成为状态监测的主要方法。

4 干运转能力提升途径与建议

4.1 干运转能力提升途径

综合利用各种措施来提升干运转能力为最佳途径,目前已达成共识。当主减速器主润滑系统失效后,可通过增加辅助应急润滑系统主动提升干运转能力。辅助应急润滑系统区别于主润滑系统,辅助应急润滑系统采用油雾和油气润滑等润滑方式,润滑介质除了航空润滑油,还开展了聚苯硫醚、二硫化钼及混合介质等的探索性试验,取得了较好的效果。辅助应急润滑系统的局限性在于在主减速器上增加了装置,相对应应急辅助润滑系统,其被动提升措施更有利于实现直升机主减速器更高的发展目标。

4.2 干运转能力提升建议

4.2.1 提升材料性能与加工工艺

提升齿轮材料与润滑油材料的耐高温性能、主减速器加工工艺水平和齿面处理技术等,是提升主减速器干运转能力的基础。鉴于其发展速度、发展程度与发展的局限性,基础措施对干运转能力的提升效果较为有限。

4.2.2 改善散热条件

高速重载齿轮在润滑条件差的情况下,摩擦生热量大且成倍增加,针对性地开展特殊散热能力设计有助于延长主减速器的干运转时间。

4.2.3 设计储油结构

在失油条件下,保持一定的润滑油量对延长干运转能力具有明显效果。因此,在主减速器局部设计特殊储油结构是干运转能力提升的重要途径。

4.2.4 基于直升机传动特性结构优化重构

鉴于直升机主减速器发展过程与自身的特殊性,面向更高要求,需要对其进行结构优化重构。在不明显增

加体积、重量及复杂程度的情况下,充分并系统考虑直升机主减速器的力学特性、载荷分布、齿面温度分布、弹流润滑和干运转能力要求等,使主减速器结构更为合理、安全。

5 结语

本文针对直升机主减速器特性,结合基础理论研究 with 工程试验研究,通过对热分析、润滑状态分析、温度测量与油膜厚度测量等重点研究领域分析,给出提升直升机主减速器干运转能力的几点建议:

- (1) 改善材料性能与加工工艺是基础;
- (2) 改善散热条件;
- (3) 创新储油结构设计;
- (4) 基于直升机传动特性优化重构传动结构。

基金项目:长沙民政职业技术学院“各类课题校级培育项目”《火化机与直升机共性视角下特殊领域关键技术发展探究》,项目编号:21MYPY65。

参考文献:

- [1] 戴振东,廖自灿,刘贵龄,等.直升机传动系统干运转能力的研究[J].机械科学与技术,1999,18(2):255-258.
- [2] 管文,高正,葛友华,等.直升机减速器润滑系统应急方案优化设计[J].润滑与密封,2013,38(10):91-93.
- [3] 闫希杰.失去润滑条件下直升机弧齿锥齿轮传动系统生存寿命研究[D].长沙:国防科学技术大学,2013.
- [4] 李雅娜.民机减速器干运转能力改进设计研究[D].上海:上海交通大学,2017.
- [5] Wojciechowski, T.G. Mathia. Focus on the concept of pressure-velocity-time (pvt) limits for boundary lubricated scuffing[J]. Wear, 2018(402):179-186.
- [6] Taimin Chen, Caichao Zhu, Huaiju Liu, et al. Simulation and experiment of carburized gear scuffing under oil jet lubrication[J]. Engineering Failure Analysis, 2022(139).
- [7] Sheng Li, Ahmet Kahraman. A scuffing model for spur gear contacts[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021(156).
- [8] 温诗铸,黄平.摩擦学原理:第2版[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [9] 尹昌磊,杨沛然.椭圆接触弹性流体动力润滑的供油条件分析[J].摩擦学学报,2007,27(2):147-151.
- [10] P. Yang, J. Wang, M. Kaneta. Thermal and non-Newtonian numerical analyses for starved EHL line contacts[J]. ASME Journal of Tribology, 2006(128):282-290.