

某型直升机异常离地状态的尾桨涡环特性分析

费景荣

(海军航空大学航空基础学院, 山东烟台, 264001)

摘要 为弄清某型直升机连续发生的两起异常离地后加速快转事故的原因,根据直升机尾桨涡环的机理,结合事故直升机的状态特点,进行了计算、分析,有关参数计算结果与事故直升机飞参记录的数据一致。研究表明,由于该型机在地面处于尾桨小拉力状态时,进入尾桨涡环的临界偏转角速度小,因而异常离地时一旦意外偏转,尾桨涡环易进、难改,即尾桨涡环特性显著变差。经分析,提出了相关应对措施,有利于提高该型机的起降安全水平。研究结论对其他类似机型也有参考价值。

关键词 直升机尾桨小拉力状态;尾桨涡环;异常离地;加快旋转;飞行安全

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2022.01.011

中图分类号 V212.4 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2022)01-0079-04

An Analysis of Characteristics of Tail Rotor Vortex Ring in an Abnormal Lift-off State for a Certain Type of Helicopter

FEI Jingrong

(School of Basic Science for Aviation, Naval Aviation University, Yantai 264001, Shandong, China)

Abstract In order to find out the causes of two abnormal lift-off acceleration fast-turning accidents occurring in succession, according to the mechanism of the helicopter tail rotor vortex ring, combination with the state characteristics of the accident helicopter, the calculation and analysis of the tail rotor vortex ring characteristics are carried out, and the results of the parameter calculation are consistent with the data recorded by the accident helicopter. The research result shows that this type helicopter being in the small pull state of the tail rotor on the ground, and the critical deflection angle speed of the corresponding tail rotor vortex ring being small, once an unexpected deflection occurs to the abnormal lift-off, there is in a situation of easily entering into the tail rotor vortex ring state and hardly changing out, i. e. the characteristics of the tail rotor vortex ring going from bad to worse. After analysis, the relevant measures are put forward to improve the safety level of this type helicopter take-off and landing. The findings also refer to other similar helicopter.

Key words small pull state of helicopter tail rotor; tail rotor vortex ring; abnormal off-ground; acceleration fast-turning; flight safety

某型直升机 2018、2019 年连续发生了两起在着陆接地后因特殊情况异常离地、加速快转而导致的

收稿日期: 2021-04-26

作者简介: 费景荣(1966—),男,山西稷山人,教授,研究方向为飞行技术与安全。E-mail: fjr_hi@163.com

引用格式: 费景荣. 某型直升机异常离地状态的尾桨涡环特性分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2022, 23(1): 79-82. FEI Jingrong. An Analysis of Characteristics of Tail Rotor Vortex Ring in an Abnormal Lift-off State for a Certain Type of Helicopter[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(1): 79-82.

飞行事故。有关视频资料表明,国外也多次发生此类事故,且状态变化具有共性。由于直升机的着陆偏差等特殊情况难以完全避免;加之,直升机在舰上、水面上空、野外起降时,因扰动气流等因素导致状态不稳,也可能出现异常离地,因而对此类事故的防范应引起足够重视。直升机异常离地后容易出现加速快转、难以制止的原因及预防措施,是飞行员非常关心的问题。经查阅,部分直升机飞行理论教材^[1-4]、有关机型的技术资料对这些问题未加介绍、分析,飞行员认识不清。对此应引起关注,采取措施加以应对。鉴于一旦直升机低空出现持续快速偏转现象后风险极高,本文结合有关事例就这些问题进行计算与分析。

1 某型直升机两起典型事故介绍

1.1 事故过程

事故 1:2018 年 11 月 13 日,某型直升机在着陆接地后飞行员关断自动驾驶仪,直升机滑行过程中状态不稳,飞行员增加总距离地。直升机离地后加速向右偏转,最后带坡度坠地。

事故 2:2019 年 03 月 17 日,某型直升机正常着陆后向停机坪滑行,因在左转弯对正停机位置的过程中前轮未摆正,飞行员修正前轮位置时上提总距杆过量,直升机离地并右偏;离地后带左坡度加速右偏约一圈半后(此过程中直升机离地面最高 3.3 m)触地,并继续向右偏转约 180°后坠地。

1.2 事故直升机的状态特点

上述事故中直升机状态变化的共性特点是:异常离地后加速右转、难以改出。以事故 2 为例,飞参数据表明,该机地面滑行中总距从 10°开始增加到 15°,直升机离地的后的 3 s 内,平均偏转角速度为 16(°)/s,随后的 4 s 内,平均偏转角速度迅速增加至 55(°)/s。

2 事故中直升机的状态特点分析

飞参数据表明,两起事故中直升机异常离地、出现右偏转后,偏转角速度均持续增大。考虑到事故当日直升机在空中一切正常,而某型直升机旋翼为左旋(俯视),出现难以制止的向右快速偏转,可初步判明在旋转过程中尾桨进入涡环状态。为分析其具体特点,下面首先计算两种不同条件下尾桨涡环的临界偏转角速度。

2.1 尾桨涡环的临界偏转角速度计算

单旋翼直升机在悬停回转和侧飞等情况下,尾

桨可能会进入涡环状态^[5]。由于尾桨涡环和旋翼涡环的机理和成因相同,可根据旋翼涡环边界的高-辛判据确定尾桨涡环边界^[6]。就上述事故看,进入尾桨涡环是直升机在垂直上升中偏转引起,因而以下确定某机在垂直飞行状态下,尾桨涡环对应的临界偏转角速度^[5]:

旋翼轴扭矩:

$$Q_R = \frac{P \times 1\,000}{n_R \left(\frac{2\pi}{60}\right)} \quad (1)$$

尾桨拉力:

$$F_{wj} = \frac{Q_R}{L} \quad (2)$$

尾桨拉力系数:

$$C_{wj} = \frac{F_{wj}}{0.5\rho(\Omega_{wj}R_{wj})^2\pi R_{wj}^2} \quad (3)$$

尾桨的诱导速度:

$$v_{wj} = \frac{\sqrt{C_{wj}(\Omega_{wj}R_{wj})^2}}{2} \quad (4)$$

尾桨涡环的临界诱导速度:

$$v_{wjlj} = 0.28v_{wj} \quad (5)$$

尾桨涡环的临界旋转角速度:

$$v_{wj} = \frac{57.3v_{wjlj}}{L} \quad (6)$$

式(1)中,发动机轴功率 P 根据旋翼扭矩的百分比计算,旋翼扭矩来自于该机训练中的飞参数据。对某型直升机,旋翼转速 $n_R = 210$ r/min,尾桨转速 $\Omega_{wj} = 988.95$ r/min。下标 wj 代表尾桨, $wjlj$ 代表尾桨临界值。半径 $R_{wj} = 4$ m,尾桨轴到重心的距离 $L = 5.1$ m。

为便于通过对比分析事故原因,取两种情况加以计算:直升机着陆接地后低总距、尾桨小拉力状态,空中悬停高总距、尾桨大拉力状态。

某型直升机不同条件下尾桨涡环的临界偏转角速度 ω_{ij} 计算结果如表 1。

表 1 某型直升机尾桨涡环的临界偏转角速度

初始状态	$Q_R/\%$	P/kW	$v_{ij}/(\text{m/s})$	$\omega_{ij}/((^\circ)/\text{s})$
空中悬停 $G=11.2$ t	69	1738	2.8	31.5
地面滑行	20	504	1.5	16.9

可见,空中悬停状态尾桨涡环的临界偏转角速度为 31.5(°)/s,地面滑行状态仅为 16.9(°)/s。即某型直升机异常离地过程中容易进入尾桨涡环。

2.2 事故直升机的状态特点分析

某型直升机在地面滑行状态的临界偏转角速度为 16.9(°)/s;以事故 2 为例,飞参数据显示,直升机离地后最初 3 s 的平均偏转角速度 16(°)/s。这表

明该机异常离地后,很快接近并随后超过了临界偏转角速度、进入了尾桨涡环状态。此结论还可进一步做如下分析。

如上述,事故直升机离地后的状态变化特点主要包括两个方面:直升机加速快转、飞行员反向蹬舵难以改出。其原因包括两个方面:

首先,直升机异常离地往往由状态不稳等特殊情况导致,飞行员因缺乏足够的心理准备而情绪紧张,上提总距杆易多、易快;且难以像正常情况下协调一致地蹬舵制偏、甚至来不及蹬舵,容易导致直升机离地后较快偏转。而如上所述,在地面尾桨处于小拉力状态,尾桨涡环对应的临界偏转角速度较小,直升机一旦较快偏转,尾桨很快就会进入涡环状态,使尾桨拉力进一步减小,偏转进一步加快。其次,在直升机离地过程中飞行员增加总距后,发动机分配给尾桨的功率也相应增加;如果此时飞行员反向蹬舵制止偏转,也会使尾桨的功率增大。即直升机异常离地后随偏转角速度增大,尾桨的功率与诱导速度也增大,尾桨则会持续处于尾桨涡环状态且强度不断增大,因而向反方向蹬舵难以制止直升机快速偏转。

2.3 异常离地状态下的尾桨涡环特性

上述分析表明,直升机异常离地状态下的尾桨涡环易进、难改,涡环特性显著变差,具体表现:一是由于在地面尾桨处于小拉力状态,尾桨涡环的临界偏转角速度较空中悬停状态时降低近一半,即更容易进入尾桨涡环状态。二是异常离地进入尾桨涡环后如果飞行员蹬舵制止偏转,会使尾桨功率与尾桨涡环的临界偏转角速度增大,同时直升机偏转角速度也迅速增大,导致尾桨持续处于涡环状态且强度不断增大,即蹬舵难以制止直升机快速偏转。由于单旋翼直升机的尾桨涡环机理相同,此结论对其他类似机型也适用。

直升机的尾桨涡环状态与旋翼涡环状态的产生条件不同,但形成机理与物理本质相同,都是在特定飞行条件下尾桨、旋翼处于周期性地“形成-破裂-形成-破裂”的不稳定环状气泡中,尾桨、旋翼周围的气流非常紊乱,气动效率显著下降,飞行状态急剧变化,飞行员难以控制,对飞行安全影响极大,一直都是直升机理论和飞行领域关注的问题。

需要说明的是,在已看到的国内外的直升机理论教材^[1-4,7-8]、直升机(尾桨)涡环研究文献^[9-12]中,尾桨涡环状态的产生条件都仅限于空中悬停转弯、大侧风条件下悬停或小速度飞行、侧飞等大功率状态;至于异常离地状态下的尾桨涡环问题,未曾见到,飞行员对此问题了解、重视不够,因而应采取有

效措施加以应对。

3 预防某型直升机异常离地事故的操控措施

由于某型直升机异常离地状态下尾桨涡环特性显著变差,表现为易进难改、加速快转,加之此时高度低、处置余地小,风险很高,因而保证飞行安全的关键是预防,而飞行员又是预防的重点环节。

根据此类事故形成的事故链:接地后状态偏差或不稳→异常离地→杆舵操纵不协调、直升机加速快转进入尾桨涡环状态→失控坠地,以下从操控的角度提出三方面预防措施。

1)由于着陆接地后状态不稳是导致异常离地的一个重要诱因,因而应注重完善着陆操纵程序,尽量避免着陆接地后状态不稳定现象。如着陆接地前出现摇晃、振动等情况时,应及时控制、视情复飞;再如,垂直着陆接地后,应确保在直升机无前后位移、且总距较低的情况下再断开自动驾驶仪,这一点为避免接地后状态不稳非常重要。

2)接地后状态急剧变化时尽量避免异常离地。因为,直升机在垂直离地前后受力很复杂,正常起时为保证直升机稳定地垂直离地,特别是为预防离地过程中快速偏转,对总距和脚蹬操纵协调动作有很高要求,具体规定是:上提总距杆应柔和,并视情调整上提总距杆的速度,根据总距位置和机头变化趋势决定蹬舵时机和量;接近离地,上提总距杆特别柔和,注意判断离地时机。其中,根据飞行经验,离地时机的判断依据是直升机飘飘欲起,有离地趋势;机头有偏转的趋势;直升机抬头、倾斜。可见,正常情况下直升机垂直离地过程中的操纵属于精确操纵。而紧急情况下异常离地,往往没有充分地思想准备,加之情绪紧张,很难做到协调操纵。因此,应尽量避免异常离地,特别要尽可能避免在特殊平台、复杂地形、扰动气流条件下着陆时异常离地。因为,此时异常离地,不仅容易导致直升机加速快转,而且离地过程中如果出现大坡度与大的旋翼拉力力矩,加剧机体倾斜,容易导致直升机翻倒^[13]。

3)由于飞行员杆舵操纵不协调,是异常离地进入尾桨涡环的直接原因。因此,在地面修正状态偏差时,重点是柔和上提总距杆,关键是总距与脚蹬协调操纵。需强调的是,由于直升机的总距杆、驾驶杆、脚蹬之间的协调操纵复杂、难度大,且操纵灵敏度高,垂直飞行和小速度飞行时稳定性弱,因而对操纵动作的协调性、柔和性要求很高。作为一名直升机飞行员,既要注重培树“柔和、协调”的操纵品质,

更要立足于自驾故障或未接通、“联动操纵”效能下降等复杂情况,强化“柔和、协调操纵是直升机操纵特性的根本要求,也是特殊情况下避免飞行状态剧变的关键”的理念,将“柔和、协调”的良好操纵品质固化为“本能”性习惯、升华为科学素养。

4 结论与建议

1)如前述,有效预防、避免异常离地是避免此类事故、保证安全的关键。为此,应及时补充、完善某型机的教材和技术资料,加强教育、提高认识,增强防范意识,注重飞行前准备,提高应急处置能力。

2)加强检查、维护,保证“联动操纵”机构正常发挥作用。某型机采用了总距-纵向、总距-横向和总距-方向的联动机构,明显减轻了飞行员协调操纵的负担。但由于机械装置难免存在安装误差、空行程、损伤等情况,可能使“联动操纵”的作用显著下降,进而对此类特情产生不利影响。因而应加强检查、维护,保证“联动操纵”正常发挥作用。

3)完善设计,增加直升机的总距杆操纵限制功能。由于总距杆同时控制着旋翼的总距、转速、拉力及发动机功率,决定着飞行性能、旋翼气动特性和飞行状态;且总距杆与脚蹬、驾驶杆的操纵均有关联,因而更强调柔和操纵。实践证明,在紧急情况、边界状态下飞行员操纵总距杆容易过粗,除异常离地外,还可能诱发旋翼失速、旋翼涡环、发动机超扭等险情^[14-15],对飞行安全影响极大。因此,可借鉴先进固定翼战机飞控系统的极限状态限制(如通过控制率进行软限制或通过增加杆力进行硬限制等功能,完善设计,对操纵总距杆的速度进行限制,最大限度地实现“无忧虑”操纵。这对发挥直升机性能、保证安全有普遍意义。

参考文献

- [1] 徐道琦. 直升机飞行原理[M]. 北京:海潮出版社, 2002:286-290.
- [2] 王永虎. 直升机飞行原理[M]. 成都:西南交通大学出版社,2017:251-256.
- [3] 苏峰,孙斐. 直升机飞行力学[M]. 北京:海潮出版社, 2010:71-76.
- [4] 张雅铭,张苇. 直升机基本原理[M]. 郑州:河南科学技术出版社,2012:169-176.
- [5] 汤连刚,朱宇,李显耀,等. 直升机尾桨涡环飞行试验研究[J]. 飞行力学,2008,26(5):63-66.
- [6] 高正. 直升机空气动力学的最新成果[M]. 北京:航空工业出版社,1999:141.
- [7] A·M·沃洛特柯. 直升机实用飞行原理(飞行动力学)[M]. 傅百先,陈新民,译. 北京:海潮出版社,1992:256.
- [8] R·W·普劳蒂. 直升机性能及稳定性和操作性[M]. 高正,施永立,陈文轩,译. 北京:航空工业出版社,1990:77-79.
- [9] 孙文胜,马鸿儒. 直升机尾桨涡环边界的计算[J]. 飞行力学,2014,32(2):126-128.
- [10] 陆洋,高正,黄文明,等. 直升机涡环状态边界的飞行试验研究[J]. 南京航空航天大学学报,2001,33(5):405-409.
- [11] 廖伦金. 直升机低速飞行特性与意外右偏航[J]. 飞行力学,2008,26(2):87-90.
- [12] 孟晓伟,张宏林,杨文凤. 直升机倾斜式尾桨涡环预测与试飞研究[J]. 航空科学技术,2018(1):58-62.
- [13] 朱清华,张呈林,郭才根. 直升机总体布局与气动布局设计[M]. 北京:航空工业出版社,2018:203.
- [14] 费景荣. 对直升机涡环特性及处置的探讨[J]. 飞行力学,1998,16(3):82-84.
- [15] 费景荣. 共轴式直升机涡环特性有关问题分析[J]. 飞行力学,2014,32(4):356-358.

(编辑:姚树峰)