

# 民用飞机起落架机轮轮毂轴承 寿命分析研究

## Analysis and Research on Life of Landing Gear Hub-bearing for Civil Aircraft

陈 功 / Chen Gong

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘 要:

通过对某型民用飞机起落滑跑情况下的受力分析,获得了各起落架所受的载荷。结合相关标准文件及该飞机起落架轮毂轴承本身参数,计算出了各轴承的额定动载荷及当量动载荷。而后通过滚动轴承寿命计算及修正公式计算出了各轴承的使用寿命。研究发现,该系列轴承的使用寿命完全满足某型飞机对于起落架系统的性能要求。

**关键词:**起落架轮毂轴承;当量载荷;可靠性;基本/修正额定寿命

**中图分类号:**V226

**文献标识码:**A

[Abstract] Load of “C-type Aircraft” landing gear is derived by stress analysis during taking off/landing. Rating load and equivalent load of LG hub-bearing is calculated from its inherent parameter along with relevant standard documents. After that, life of the bearing is calculated and adjusted by empirical formula. The research found that the life of the hub bearing was fully satisfied with the need of landing gear performance.

[Key words] land gear hub-bearing; equivalent load; reliability; basic/adjusted rating life

## 0 引言

起落架系统作为民用飞机结构重要的组成部分,其性能直接关系到飞机起降滑跑时的稳定性和安全性。民用飞机的起落架系统通常由支架、作动筒、液压装置、机轮、刹车装置等构成。中国民航局2011年颁布的《运输类飞机适航标准(CCAR-25-R4)》25.731条中对起落架机轮的可靠性提出了明确的要求。而起落架机轮中的轮毂轴承作为重要的承力与传动部件,将直接决定机轮转动时的稳定性和耐久性,关系到整个起落架系统的性能。

由于轮毂轴承的种类繁多,轴承的选型工作应根据起落架的特定工况(如所受载荷的大小和形式,额定转速要求等)并结合相关设计准则和经验公式进行。同时,为了确保所选轴承的可靠性与安全性,在选定轴承并确定安装方案之后需对其进行

校核工作,尤其是轴承寿命的校核。

本文以国内某型民用飞机为例(以下简称“某型飞机”),结合飞机本身的参数(如飞机重量、机轮直径等)和性能指标(滑跑距离,滑跑速度等)分别分析其前起落架和主起落架机轮轮毂轴承的典型工作状态。最后根据轴承本身参数及其工况对其使用寿命进行估算、修正和评估。

由于本文中所有数值表达参数均采用了人为的模糊及偏离处理,这将导致最终估算结果与实际情况有所偏差。然而该偏差不足以影响最后定性分析的结论。

## 1 滚动轴承简介

### 1.1 轴承的分类与适用范围

滚动轴承按其结构、材料、排列可分为许多种类。机械工程设计手册等文献对典型轴承按其适

用范围做了详细分类,部分内容如下。

深沟球轴承:可承受径向载荷与双向轴向载荷。适用于汽车变速箱、通用电动机、家用电器等。

角接触球轴承:可承受径向载荷与单向轴向载荷。适用于机床主轴、高频马达、高速赛车车轮轮毂等。

推力球轴承:可承受单向轴向载荷,无法承受径向载荷。适用于汽车传动轴、机床变速装置等。

圆柱滚子轴承:可承受较大的径向载荷和冲击载荷。适用于发电机、减速装置、中型及大型电动机等。

圆锥滚子轴承:可同时承受较大的径向载荷、轴向载荷和冲击载荷。适用于常规交通工具(汽车、飞机)轮毂、建筑机械、大型农业机械等。

### 1.2 某型飞机起落架机轮轮毂轴承介绍

某型飞机属于重型交通工具,且其起落架机轮轮毂轴承需同时承受轴向、径向载荷与冲击载荷,故其有针对性地选用了圆锥滚子轴承标准件。主/前轮毂轴承均为双列成对使用。轴承的内圈与起落架机轮转轴固接;轴承的外圈与起落架机轮轮毂内圈固接。主起落架机轮轮毂轴承与前起落架机轮轮毂轴承的安装位置如图1所示。

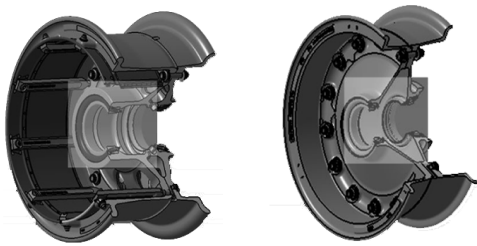


图1 轴承在机轮中的安装位置  
(左图为主起落,右图前起落架)

某型飞机起落架轴承主要几何参数如表1所示。

## 2 轴承载荷计算

### 2.1 某型飞机全机受力分析

当飞机在滑跑时,地面对飞机的支撑反力绝大部分将直接加载到轮毂轴承上。因此该型飞机滑跑时的全机受力情况是研究轴承载荷的前提条件和必要输入。某型飞机三轮接地后的受力情况如图2所示。

图中飞机自身重力  $G$ 、主/前起落架到重心距离

表1 某型飞机起落架轴承主要几何参数

参数	含义	主	前
轴承内径 / $d$	轴承内圈直径	$\approx 110\text{mm}$	$\approx 54\text{mm}$
轴承外径 / $D$	轴承外圈直径	$\approx 170\text{mm}$	$\approx 108\text{mm}$
滚子当量直径 / $D_{we}$	滚子大小端面直径平均值	$\approx 12.3\text{mm}$	$\approx 9.5\text{mm}$
轴承安装间距 / $w$	成对安装时的间距	$\approx 146\text{mm}$	$\approx 146\text{mm}$
载荷偏心距离 / $e$	载荷作用点与对称面的距离	$\approx 32\text{mm}$	--
滚子个数 / $Z$	单列轴承内含的棍子个数	33 个/列	40 个/列
滚子公称接触角 / $\alpha$	滚子轴线与轴承轴线夹角	$\approx 11.5^\circ$	$\approx 17^\circ$
滚子当量长度 / $L_{we}$	用于计算载荷的滚子长度	$\approx 253\text{mm}$	$\approx 14\text{mm}$

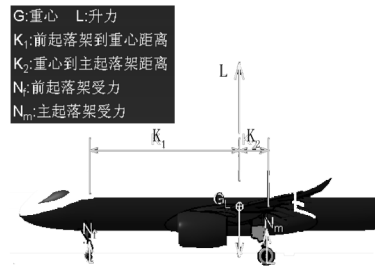


图2 某型飞机全机受力情况

$K_1/K_2$  均为飞机本身参数,此处均可视为已知;升力  $L$  是飞机滑行速度  $v$  的函数。根据平面受力平衡原理,主/前起落架所受地面对其支持反力  $N_m, N_f$  可分别表示为:

$$\begin{cases} N_f = \frac{K_2}{K_1 + K_2} [G - L(v)] \\ N_m = \frac{K_1}{2K_1 + 2K_2} [G - L(v)] \end{cases} \quad (1)$$

式(1)受力分析仅考虑直线滑跑情况。当飞机处于转弯时,机轮与地面的静摩擦力将会产生一个平行于机轮转轴方向的侧向力。然而,对于一般的民用飞机来说,相比直线滑跑,转弯情况所占比例极少,故在本次研究中予以忽略。

### 2.2 起落架轮毂轴承受力分析

分析某型飞机主/前起落架结构可知,地面对起落架机轮支持反力将通过结构件加载到轮毂轴承上。主/前起落架机轮轮毂轴承结构示意图及受力分析情况如图3所示。

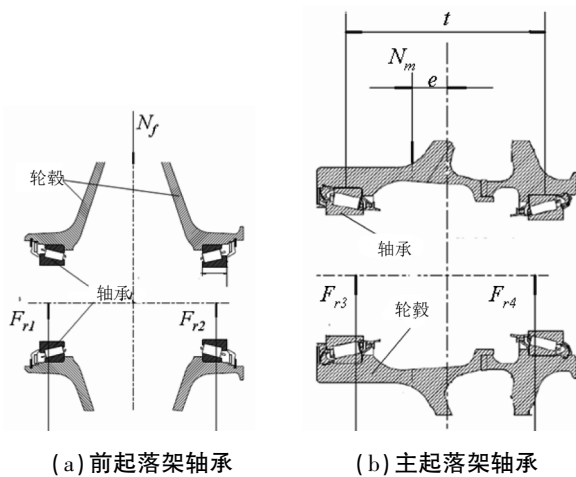


图3 轮毂轴承受力情况

如图3左图所示,由于前起落架轮毂为对称结构,故作用在前起落架上的支持反力作用点与轮毂的对称平面重合。两列轴承亦为对称分布,因此支持反力被均匀地分布到两列轴承上,每列轴承上所受径向载荷  $F_{r1}$ 、 $F_{r2}$  分别为:

$$F_{r1} = F_{r2} = \frac{1}{2} N_f \quad (2)$$

如图3右图所示,由于主起落架单侧轮毂为非对称结构,故作用在主起落架上的支持反力作用点与两列轴承的对称面存在偏心距  $\varepsilon$ ,因此两列轴承所受径向载荷  $F_{r3}$ 、 $F_{r4}$  分别为:

$$F_{r3} = \left(\frac{1}{4} + \frac{e}{2w}\right) \cdot N_m \quad (3)$$

$$F_{r4} = \left(\frac{1}{4} + \frac{e}{2w}\right) \cdot N_m \quad (4)$$

### 2.3 轴承额定径向动载荷

轴承的额定径向动载荷  $C_r$  指一套滚动轴承理论上所能承受的恒定的径向载荷。在该径向载荷的恒定作用下,轴承的寿命为100万转。滚动轴承的额定径向动载荷与轴承的类型、尺寸、规格、受载情况有关。对于某型飞机所用圆锥滚子轴承,其额定径向动载荷计算公式为:

$$C_r = b_m f_c (i L_{ue} \cos \alpha)^{7/9} Z^{3/4} D_{ue}^{29/27} \quad (5)$$

式(5)中,  $i$ 、 $L_{ue}$ 、 $\alpha$ 、 $Z$ 、 $D_{ue}$  均为轴承本身参数,已在表1中列出。 $b_m$ 、 $f_c$  均为载荷系数,与轴承类型、规格、受载情况有关,该系数可从相关国标 GBT63912003 文件中查表插值获得  $b_m = 1.1$ 、 $f_c = 83.7$ (前)、 $f_c = 88.7$ (主)。根据以上参数,前/主起落架每列轴承的额定径向动载荷分别为:

$$C_{r1} = 220.5 \text{ kN}, C_{r2} = 473 \text{ kN}$$

### 2.4 轴承当量径向动载荷

轴承的当量径向动载荷  $P_r$  指存在一个假象等效径向动载荷,在该载荷的作用下,滚动轴承具有与实际载荷条件下相同的寿命。滚动轴承的当量径向动载荷主要取决于外部载荷的大小。对于某型飞机所用圆锥滚子轴承,其额定径向动载荷为:

$$P_r = X F_r + Y F_a \quad (6)$$

式(6)中  $F_r$ 、 $F_a$  分别为单列轴承所受外部径向载荷与外部轴向载荷。 $X$ 、 $Y$  分别为径向载荷系数与轴向载荷系数,该系数可从相关国标 GBT63912003 文件中查表获得  $X = 1$ 。根据以上参数,前/主起落架每列轴承的当量径向动载荷分别为:

$$P_{r1} = F_{r1} \approx 40 \text{ kN}, P_{r2} = F_{r2} \approx 40 \text{ kN}$$

$$P_{r3} = F_{r3} \approx 150 \text{ kN}, P_{r4} = F_{r4} \approx 130 \text{ kN}$$

## 3 轴承寿命估算与修正

### 3.1 滚动轴承寿命计算

滚动轴承的寿命是衡量其可靠性和安全性的重要指标,一般以转数表示。滚动轴承的寿命与其额定动载荷与当量动载荷的比值有直接关系。对于圆锥滚子轴承,其寿命  $L_{ue}$  可通过式(6)进行计算:

$$L = \left(\frac{C_r}{P_r}\right)^{10/3} \quad (7)$$

结合本文2.3、2.4节中所获得的各轴承的额定径向动载荷  $C_r$  与当量轴向动载荷  $P_r$ ,通过式(6)分别计算出前/主起落架各轴承的寿命如下(单位:百万转):

$$L_1 = \left(\frac{C_{r1}}{P_{r1}}\right)^{10/3} = 311.86, L_2 = \left(\frac{C_{r2}}{P_{r2}}\right)^{10/3} = 311.86$$

$$L_3 = \left(\frac{C_{r3}}{P_{r3}}\right)^{10/3} = 45.98, L_4 = \left(\frac{C_{r4}}{P_{r4}}\right)^{10/3} = 74.08$$

通过计算可以看出,受载较小的前起落架轮毂轴承的寿命大大高于主起落架。另外,由于主起落架机轮受力存在偏心距,造成远端列轴承寿命  $L_4$  高于近端列轴承的寿命  $L_3$ 。

### 3.2 滚动轴承寿命修正

通过本文3.1中的计算已获起落架轮毂各轴承的寿命,该寿命的计算是在可靠度为90的前提下进行的。如需保证更高的可靠度,需对寿命进行一定的修正。滚动轴承寿命的修正公式如式(8)所示:

(下转第83页)

履职不佳、违反规章或政策而被调查等原因,主动启动委任代表的暂停。DMS 可能会由于委任代表没有完成培训、没有通过培训测试或者 1 年内没有更新个人资料等原因自动暂停委任代表。

FAA 可能要求委任代表完成后续行动,以解除暂停状态。FAA 的后续行动可能包括额外的培训、咨询服务或者重新取得任职资格。管理专家应该继续跟踪委任代表,以确保完成了 FAA 的要求。基于委任代表的后续行动表现,管理专家将解除暂停状态或者启动终止流程。

### 7.2 委任代表的上诉

对于 FAA 禁止的委任代表申请或者是 FAA 主动发起的委任终止的委任代表,允许其进行上诉。所有的上诉活动都将在 DMS 中处理并记录。

申请人或者委任代表必须在禁止或有原因终止的 15 个日历日内在 DMS 中启动上诉流程。作为上诉请求的一部分,在发起上诉时,委任代表应该提供支持他们上诉的任何证据。一旦申请人或者委任代表在 DMS 中递交了上诉申请,DMS 将自动通知适当的 FAA 的任命或选择官员,他们将在 DMS 中复查上诉信息,并成立上诉处理小组,这个小组由 2~3 个没有参与初始决议的任命或选择官员组成。

上诉小组将对相关的文件进行复查,并有权利要求进一步的信息。复查的流程一般参照委任代表的选择和评估流程,上诉小组必须在接受上诉请求的 45 个日历日内完成上诉流程。并做出以下结论:

(1) 支持初始的终止或禁止结论,初始的决定是能站得住脚,将不再接受进一步的上诉。

(2) 推翻初始的终止或禁止结论,FAA 恢复委任代表或者申请人的原有权利。

## 8 结论

委任代表的出现是随着航空工业迅速发展,适航审定系统基于管理和技术上自我调控的需要的产物,这是一种独特的并且具有远见性的产物。由于委任代表完成了委任的工作,使得局方的工作人员得到了缓解,将更有能力和精力致力于其他影响安全的领域,更加有助于提高航空的安全性。实践证明,很多复杂的型号和审定过程,适航审定系统也迫切地需要委任代表的专业技术能力。委任代表队伍极大地协助和支持了适航审定工作,为确保航空安全、维护公众利益和促进民用航空事业的发展做出了重大贡献。

### 参考文献:

- [1] Part 21—Certification Procedures for Products and Parts [S]. FAA, 2015. 10. 05.
- [2] Part 183—Representatives of the Administrator [S]. FAA, 2015. 10. 05.
- [3] Order 8000. 95 CHG1, Designee Management Policy [S]. FAA, 2015. 6. 17.

(上接第 55 页)

$$L_{nm} = \left( \frac{\ln\left(\frac{100}{S}\right)}{\ln\left(\frac{100}{90}\right)} \right)^{\frac{1}{\varepsilon}} L \quad (8)$$

其中:S 为可靠度值,取值范围为(0,100),数值越大,表示可靠度越大; $\varepsilon$  为韦布尔指数,此处取 1.5。

圆锥滚子轴承属于常见机械零部件,90 可靠度完全可以适用。但考虑到起落架轮毂轴承对于飞机起降滑跑性能的重要性,本研究将可靠度提升至 S=95 对轴承的寿命进行修正。修正后的轴承寿命如下(单位:百万转):

$$L_{nm1} = 192.82, L_{nm2} = 192.82$$

$$L_{nm3} = 28.52, L_{nm4} = 45.93$$

### 3.3 计算结果评估

通过本文 3.1 中的计算和 3.2 中的修正,已获得可靠度为 95 前提下的各列轴承寿命,并以转数的形式给出。根据模型飞机机轮参数可按式(9),结合主/前起落架机轮直径  $D_L$ ,将转数  $L$  换算为里程数  $K$ :

$$K = 2\pi D_L \cdot L \quad (9)$$

经计算,某型飞机前起落架机轮轮毂的转动寿命约为  $6.04 \times 10^5$  km (合  $3.78 \times 10^5$  mi),主起落架机轮轮毂的转动寿命约为  $1.05 \times 10^5$  km (合  $6.6 \times 10^4$  mi)。

根据某型飞机的设计需求并综合考虑国内外相似机型的设计惯例,主/前起落架机轮轮毂的使用里程超过  $5 \times 10^4$  mile 时将进行全面的维护和保养工作,其中就包括更换轮毂轴承。根据以上计算可知,该型号飞机的前/主起落架轮毂轴承在使用至其最大寿命

时即会被更换,不会出现超寿命使用的情况。

## 4 结论

本文通过分析某型飞机所用起落架轮毂轴承的规格、外形等参数,计算了其额定载荷。同时,通过分析某型飞机在起降滑跑时的受力情况获取了分别作用在主/前起落架机轮轮毂轴承上的当量载荷。通过额定载荷与当量载荷的关系估算了轴承的寿命,并进行了必要的修正。研究结果表明,某型飞机起落架机轮轮毂轴承的选用恰当,装配方式合理,轴承的使用寿命完全满足设计要求。

值得注意的是,本文以工程计算的方式为主。为了确保结论的可靠性,在计算过程中采取相对保

守的方式,这将导致计算结果也相对保守。本文亦未将某型飞机实际采用的起落架减震、轴承润滑等措施考虑在内,这些措施均可延长轴承的寿命。如将以上措施考虑在内,轴承的寿命将得到显著延长。

### 参考文献:

- [1] 郭婧. 滚动轴承疲劳寿命综述[J]. 甘肃科技, 2006, 22(4): 430-431.
- [2] 中国民用航空局. CCAR25-R4 中国民用航空规章第25部: 运输类飞机适航标准[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 6391 滚动轴承-额定动载荷和额定寿命[S]. 北京: 2004.

(上接第74页)

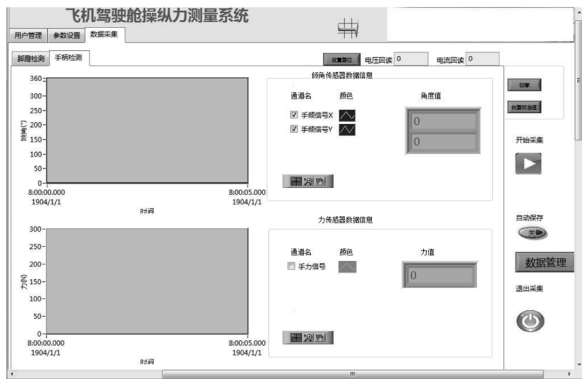


图6 数据采集界面

系统的采集的杆力和杆位移曲线如图7和图8所示。所采的结果满足设计的需要,结果可用。

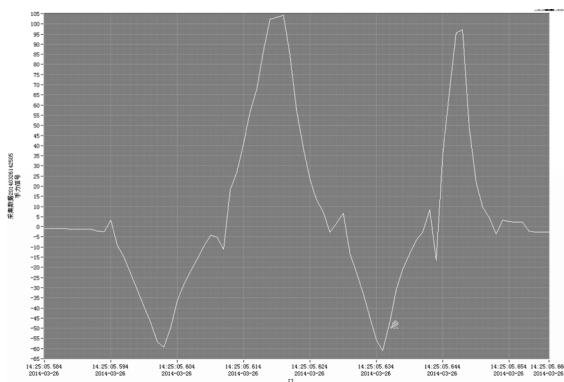


图7 系统测量的杆力曲线

## 5 结论

民用飞机的侧杆操纵力的测量是民机后期试验验证以及适航取证的一项重要工作。本文根据侧

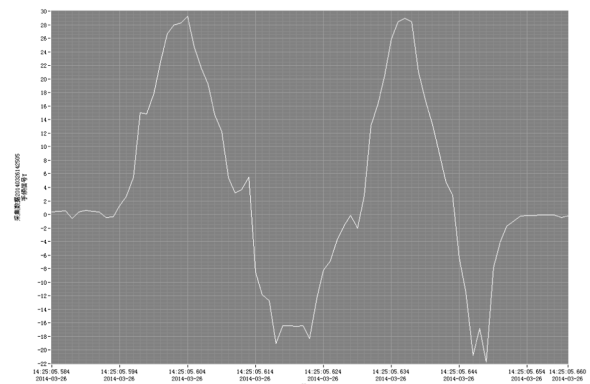


图8 系统测量的杆位移曲线

杆模块自身的特点设计了一套操纵力测量系统。该系统解决了侧杆操纵力测量中,侧杆曲面复杂、双自由度运动容易产生不同方向力的耦合、侧杆模块整体不能拆卸及改造等问题,并且能够实现测量系统的外场便携工作。目前该系统已经在民机试验中得到应用。

### 参考文献:

- [1] 孙滨生. 现代战斗机座舱布局[M]. 北京: 航空工业出版社, 1989.
- [2] 熊端琴, 郭小朝, 陆惠良, 郑伟. 飞机侧杆驾驶装置的优缺点及其改进设计探讨[J]. 人类工效学, 2006, 12(1): 36-38.
- [3] 阮奇桢. 我和 LabVIEW: 一个 NI 工程师的十年编程经验[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2009.
- [4] 刘君华. 基于 LabVIEW 的虚拟仪器设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.