

文章编号:1674-8190(2015)04-490-05

## 星型风扇驱动齿轮箱概念设计探讨

冯金, 覃坤, 王丹

(中航商用航空发动机有限责任公司 机械系统部, 上海 201108)

**摘要:** 风扇驱动齿轮箱在齿轮传动涡扇发动机中发挥重要作用, 为了支撑我国宽体客机发动机总体方案论证, 进一步开展齿轮传动涡扇发动机的研制工作, 以五路分流人字齿星型风扇驱动齿轮箱为研究对象开展概念设计。所设计的齿轮箱的主要结构特征为: 太阳轮为浮动构件, 通过花键传扭; 行星轮采用齿轮/轴承一体化设计并选用调心滚子轴承; 齿圈采用柔性支承, 通过摩擦传扭。基于概念设计, 本文总结并分析了后续研制过程中可能遇到的技术难点, 包括传动效率、均载机构、支承与连接结构、齿面修形及系统动力学五个方面, 为进一步开展风扇驱动齿轮箱的研制工作指出方向。

**关键词:** 宽体客机; 齿轮传动涡扇发动机; 风扇驱动齿轮箱; 概念设计

**中图分类号:** V232.8

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2015.04.015

## Discussion on Conceptual Design of Fan Drive Gear System with Star Gears

Feng Jin, Qin Kun, Wang Dan

(Department of Mechanical System, AVIC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

**Abstract:** The fan drive gear system(FDGS) plays an important role in geared turbofan(GTF) engine. In order to support the scheme demonstration of wide-body jetliner engine and the further research on geared turbofan, the fan drive gear system conceptual design is focused on. The fan drive gear system of star gear configuration consists of five branches which are of herringbone gears. There are several features as follows: the sun gear is floating while using spine to transmit torque. The planetary gears are of integrated gear/bearing using single row spherical roller bearing. The ring gears are flexible mounted using friction to transmit torque. With the conceptual design, several technical difficulties are analyzed for further research such as transmission efficiency, load sharing, mounting structures, tooth surface modification and system dynamic.

**Key words:** widebody jetliner; GTF; FDGS; conceptual design

## 0 引言

高涵道比双转子涡轮风扇发动机自 20 世纪 70 年代初投入使用以来, 受风扇叶尖切线速度限制, 与风扇相连的增压级与低压涡轮只能在较低转速运行, 导致增压级级数增多, 重量大且效率低。为解决上述问题, 可在由增压级及低压涡轮组成的低压转子与风扇转子间安装一套合适的风扇驱动

齿轮箱(Fan Drive Gear System, 简称 FDGS), 使风扇转子工作于低转速、低压转子工作于高转速, 即齿轮传动涡扇发动机(Geared Turbofan, 简称 GTF)<sup>[1-3]</sup>。相比船舶、风电等领域, 航空领域特别是涡扇发动机中所使用的行星齿轮减速器具有载荷大、转速高、寿命长和重量轻等特点, 设计难度较大, 在国内仍然处于理论研究阶段。

国外对风扇驱动齿轮箱的研究已相对成熟, 目前已有几种小型涡扇发动机采用齿轮传动的风扇, 且基本是在涡轴发动机的基础上改型而成, 例如 Astafan、ALF502、LF500 系列及 TFE731<sup>[4]</sup>。美国 P&W 公司于 20 世纪 80 年代后期开展了一项

收稿日期: 2015-10-10; 修回日期: 2015-10-29

通信作者: 冯金, fengjin\_acae@163.com

用于传动风扇减速器的研发工作,研制成一台减速比约为3:1,传动功率为23 860 kW,传动效率达99.5%的风扇驱动齿轮减速器,并应用于PW8000齿轮传动涡扇发动机<sup>[5]</sup>。该发动机经过一系列改进,于2008年改称为“清洁动力PW1000G系列发动机”,目前已获得庞巴迪CS100/300、空客A320NEO、IrkutMC-21和三菱MRJ70/90等机型的订单,预计2016年开始交付<sup>[6]</sup>。

我国对齿轮传动涡扇发动机的研究尚处于预研阶段,仅仅对其进行了相关理论研究。例如,张德志等<sup>[7]</sup>对齿轮驱动涡扇发动机结构的设计特点进行了分析,童万军等<sup>[8]</sup>对基于流量法的齿轮传动涡扇发动机动态性能建模技术开展了研究。同样,对于风扇驱动齿轮箱,国内亦处于理论研究阶段,陈聪慧等<sup>[9]</sup>、侯明曦等<sup>[10]</sup>分别对风扇驱动齿轮箱进行了概念设计,采用五路分流人字齿星型齿轮传动形式并使用了滑动轴承支承行星轮。

本文以某型风扇驱动齿轮箱为对象开展概念设计研究,设计五路分流人字齿星型传动构型,并给出齿轮箱结构、安装方式、轮齿参数、浮动形式、轴承选型等,对齿轮承载能力、传动效率和均载系数进行计算。基于概念设计,提出五路分流人字齿星型风扇驱动齿轮箱设计存在的技术难点。

## 1 风扇驱动齿轮箱概念设计

### 1.1 设计要求

概念设计阶段风扇驱动齿轮箱设计要求为:

- ①传递功率达到40 000 kW;
- ②传动效率达到99%;
- ③输出转速1 800 r/min;
- ④传动比略大于3:1。

### 1.2 传动形式

为了获得较大的功率密度,根据传动比要求,结合国内外现有研究成果,风扇驱动齿轮箱概念设计方案采用五路分流人字齿星型齿轮传动结构,包括一个太阳轮,五个行星轮和一个分半内齿圈,如图1所示。太阳轮为浮动构件,作为输入端与输入轴通过花键连接,并与五个均匀分布的行星轮相啮合;每个行星轮采用齿轮/轴承一体化设计,由调心滚子轴承在内部支承,与内齿圈相啮合;内齿圈为半浮动构件,作为输出端通过螺栓与输出轴连接;整个齿轮箱的重力及齿轮啮合时产生的扭矩通过行星架由传扭支架承受。

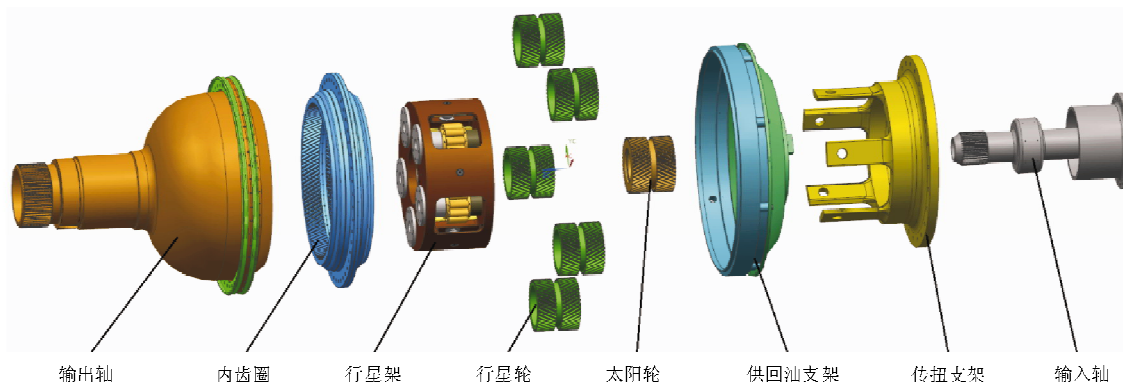


图1 风扇驱动齿轮箱传动结构

Fig.1 Transmission configuration of FDGS

### 1.3 齿轮传动设计

进行星型齿轮传动比设计时需满足如下条件:

#### ①同心条件

$$z_3 = z_1 + 2z_2 \quad (1)$$

#### ②均布安装条件

$$\frac{(z_1 + z_3)}{5} = N \quad (2)$$

#### ③邻接条件

$$(z_1 + z_2) \sin\left(\frac{180^\circ}{5}\right) > z_2 + 2ha^* \quad (3)$$

式中： $z_1$ 、 $z_2$  和  $z_3$  分别为太阳轮、行星轮和齿圈的齿数； $N$  为自然数； $ha^*$  为齿顶高系数。

在确定齿数时，首先根据上述条件列出传动比大于且最接近 3:1 的方案，再选择太阳轮齿数与行星轮齿数最接近的几组作为备选方案。

由于太阳轮依靠花键传扭，可以根据其转速和传递功率确定满足强度要求的内花键最小尺寸，从而根据内花键大径最小值确定太阳轮齿根圆直径最小值，进一步对备选方案进行筛选。齿轮箱外廓受流道限制，据此可以确定齿圈齿根圆直径最大值，进而对备选方案进行筛选。再结合齿轮承载能力分析、传动效率分析，可以优化备选方案。优化前的一组备选方案如表 1 所示。

表 1 风扇驱动齿轮箱齿轮参数  
Table 1 Gear parameters for FDGS

部件名称	齿数	模数	压力角/(°)	总齿宽/mm	螺旋角/(°)
太阳轮	37	5	25	220	31
行星轮	38	5	25	220	31
齿圈	113	5	25	220	31

齿轮材料采用第二代齿轮钢 16Cr3NiWMo-VNbE，其承载能力计算结果表明，轮齿接触强度安全系数、弯曲强度安全系数及胶合承载能力安全系数均大于最小许用安全系数。

## 1.4 轴承设计

现有航空发动机使用经验表明，滚动轴承和滑动轴承均可用于风扇驱动齿轮箱。考虑到五路分流人字齿星型齿轮传动系统在传动过程中会不断进行自定心及找正，采用滑动轴承能够很好地改善系统的均载特性。但是按照设计要求，每个行星轮上的轴承需要承受近 30 t 的径向力，而按照我国滑动轴承现有的设计加工水平，最多只能达到要求的 52%。若想提高承载能力，需要进一步减小轴承间隙，并配以高性能的涂层保护轴瓦。除此之外，为了满足 30 min 断油的适航要求，必须为滑动轴承配一套辅助供油系统。综上，可以看出选择滑动轴承难度太大。

近年来，齿轮/轴承一体化设计逐渐在航空领域开始应用，其与滑动轴承一样具有结构紧凑、重量轻的特点，且不需要辅助供油系统。因此，在概

念设计方案中最终决定使用滚动轴承并采取齿轮/轴承一体化的支承形式。

## 1.5 安装形式

整个齿轮箱的重力及齿轮啮合时产生的扭矩通过行星架由传扭支架传递给发动机承力框架。传扭支架受行星架重力载荷及齿轮啮合扭矩共同作用，为了使传扭支架中连杆根部所受应力最小，对其受力影响因素进行分析，经理论分析及有限元验证，将任意连杆置于顺航向 3 点钟位置。

## 1.6 传动效率

齿轮箱传动效率在很大程度上决定了滑油系统的热负荷，为了提高齿轮传动效率，使滑油系统的热负荷控制在发动机可以接受的范围内，需对齿轮啮合功率损失、齿轮风阻功率损失以及齿面滑油热交换效率等技术问题进行研究。

在概念设计阶段，传动效率计算主要在于对传动过程中功率损失的计算。传动功率损失可以分为齿轮功率损失和轴承功率损失<sup>[11]</sup>。齿轮功率损耗按照 Anderson-Loewenthal 公式，将人字齿分成两个斜齿进行估算；轴承功率损耗按照 Harris 公式进行估算。计算结果表明，齿轮功率损失为 335.8 kW，轴承功率损失为 83.81 kW，传动效率达到 99.09%。

## 1.7 均载机构

人字齿星型风扇驱动齿轮箱的结构非常复杂，人字齿轮是二分支分流传动，传动过程中由于不可避免的对称性误差，需要通过齿轮的轴向自位浮动来达到均载，而传动系统中的五个行星轮同时与太阳轮、外齿圈啮合，其自位的调整受太阳轮和外齿圈的约束，整个系统的均载过程十分复杂。

均载机构的设计通过减少加工误差引起的变形和为载荷变化提供浮动构件两种方式来实现。为降低均载系数，将太阳轮设计为浮动构件，并将齿圈设计为柔性支承。在概念设计阶段，采用均载系数静态分析方法<sup>[12-13]</sup>，将制造误差、安装误差等位移参数等效到齿轮啮合线上，结合齿轮啮合刚度及支撑刚度，通过受力平衡建立方程组求解。其

中,太阳轮与行星轮之间的啮合刚度为  $1.26 \times 10^6$  N/mm,行星轮与齿圈之间的啮合刚度为  $1.36 \times 10^6$  N/mm,太阳轮输入轴的支撑刚度为  $2.2 \times 10^4$  N/mm,齿圈输出轴的支撑刚度为  $2.2 \times 10^4$  N/mm。各误差参数按五级精度选取,如表2所示。

表2 加工装配误差

Table 2 Manufacturing and assembling errors

部件名称	偏心误差/mm	安装误差/mm	轴承制造误差/mm
太阳轮	0.010	0.03	0.03
行星轮	0.010	0.03	0.03
齿圈	0.017	0.05	0.05

计算结果表明,风扇驱动齿轮箱的均载系数最大值为1.046。

## 2 技术难点分析

根据设计要求,基于国内现有设计加工水平,通过概念设计工作对风扇驱动齿轮箱研制过程中可能遇到的技术难点进行如下分析:

### (1) 传动效率

随着传动功率的增加,考虑到滑油系统的冷却及散热能力限制,对传动效率的要求更高。然而,依据国内圆柱齿轮设计加工能力,单对齿轮实际传动效率约为99%,远不能满足要求。

此外,目前业内对高速重载系统传动效率的测量方法主要是通过测量输入输出轴扭矩及转速,再换算成输入输出功率进行传动效率计算,整个传动效率的测量精度只能达到 $\pm 0.1\%$ 。以宽体客机发动机40 000 kW的风扇提取功率为例,0.1%的误差即为40 kW,比整个附件传动系统的功率损失大几倍。该测量精度不能满足传动效率计算模型的校核要求。

### (2) 均载机构

由于不可避免的制造和装配误差,以及传动过程中发生的弹性变形,风扇驱动齿轮箱无法对载荷实现完全平均分配。行星轮传递的最大载荷与均布载荷时行星轮理论载荷的比值即为星型齿轮减速器的载荷不均匀系数。航空发动机五路分流星型传动结构的均载系数约为1.12,过大的均载系

数会带来一系列问题,诸如齿轮承载能力不足、轴承寿命减少等。因此,如何控制制造及装配误差、如何设计齿轮之间的啮合刚度以及齿轮的支撑刚度以保证载荷均匀分配是风扇驱动齿轮箱设计中的技术难点。

### (3) 支承与连接结构

风扇驱动齿轮箱为人字齿星型传动齿轮箱,工作中对各齿轮轴线的平行度有很高的要求。齿轮轴线的偏斜会导致严重的偏载,降低齿轮的寿命。由于民用大涵道比涡扇发动机通过吊挂的方式安装在飞机上,工作中整机会产生不可避免的弯曲变形,同时整机的振动也会对齿轮产生不利影响。为了避免整机变形导致的齿轮轴线偏斜,降低整机振动对齿轮的影响,需要通过支承和连接部件隔离整机的变形和振动。如何分配支承刚度并使之与整机匹配,如何设计柔性支承结构及连接结构是风扇驱动齿轮箱设计中的技术难点。

### (4) 齿面修形

人字齿轮是风扇驱动齿轮箱中的关键部件,其工作性能对发动机具有重要影响。传统的标准渐开线人字齿轮,对加工和安装误差非常敏感,在误差和变形条件下极易偏载,而且动态性能较差,容易产生剧烈的振动,因此在高速重载工况下的人字齿轮齿面修形已成为改善齿轮齿面承载性能和动态性能的重要技术手段。基于受载变形及安装误差等因素的人字齿轮齿面修形是风扇驱动齿轮箱设计中的技术难点。

### (5) 系统动力学

风扇驱动齿轮箱为多轴耦合的复杂转子系统,受到多对啮合副的变刚度激励、啮合误差激励、制造和安装误差激励等的影响,极易产生共振,导致结构失效、噪声过大等问题。因此,系统动力学响应的精确计算是提高风扇驱动齿轮箱设计技术水平的前提和关键。

## 3 结束语

通过对风扇驱动齿轮箱进行概念设计,确定其采用五路分流人字齿星型齿轮传动结构,其中太阳轮为浮动构件,行星轮采用齿轮/轴承一体化设计

并选用调心滚子轴承,齿圈采用柔性支承。计算结果表明概念设计方案基本满足设计要求。

通过对风扇驱动齿轮箱进行概念设计,从传动效率、均载机构、支承与连接结构、齿面修形及系统动力学等五个方面对后续研制过程中可能遇到的技术难点进行分析,为进一步开展风扇驱动齿轮箱的研制工作指出方向。

### 参考文献

- [1] Joachim Kurzke. Fundamental differences between conventional and geared turbofans[C]. ASME Turbo Expo 2009; Power for Land, Sea, and Air. 2009; 145-153.
- [2] Riegler C, Bichlmaier C. The geared turbofan technology-opportunities, challenges and readiness status[C]. Proceedings of the 1st CEAS European Air and Space Conference, Berlin; 2007.
- [3] 李杰. 齿轮传动涡轮风扇(GTF)发动机先进技术综述[J]. 航空发动机, 2009, 35(4): 54-57.  
Li Jie. Overview of advanced technology for geared turbofan engine(GTF)[J]. Aeroengine, 2009, 35(4): 54-57. (in Chinese)
- [4] 陈光. 航空发动机结构设计分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006.  
Chen Guang. Analysis of aeroengine structure design[M]. Beijing: Beihang University Press, 2006. (in Chinese)
- [5] 陈光. 齿轮传动风扇 PW8000 高涵道比涡轮风扇发动机[J]. 发动机, 1998(5): 37-39.  
Chen Guang. An introduction of high bypass ratio turbofan engines PW8000[J]. Engine, 1998(5): 37-39. (in Chinese)
- [6] 聂晶, 杨瑾, 童悦. 大型民机发动机关键技术现状与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2012(21): 34-37.  
Nie Jing, Yang Jin, Tong Yue. Key technology and development of large civil aircraft engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(21): 34-37. (in Chinese)
- [7] 张德志, 张锦绣, 王凤. 齿轮驱动涡轮风扇发动机结构设计特点分析[J]. 航空发动机, 2011, 37(4): 1-4.  
Zhang Dezhi, Zhang Jinxiu, Wang Feng. Analysis of structural design characteristics for geared turbofan engine[J]. Aeroengine, 2011, 37(4): 1-4. (in Chinese)
- [8] 童万军, 唐世建. 基于流量法的齿轮传动涡轮风扇发动机动态建模[J]. 航空动力学报, 2011, 26(6): 1377-1383.  
Tong Wanjun, Tang Shijian. Geared turbofan engine transient modeling research based on CMF method[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(6): 1377-1383. (in Chinese)
- [9] 陈聪慧, 信琦. 风扇齿轮驱动系统的概念设计[J]. 航空科学技术, 2011(4): 8-11.  
Chen Conghui, Xin Qi. Conceptual design of fan gear drive system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2011(4): 8-11. (in Chinese)
- [10] 侯明曦, 李锦花, 张茂强, 等. GTF 发动机行星齿轮传动系统设计技术研究[J]. 航空发动机, 2014, 40(2): 61-64.  
Hou Mingxi, Li Jinhua, Zhang Maoqiang, et al. Research on design technology of planetary gear system for geared turbofan engine[J]. Aeroengine, 2014, 40(2): 61-64. (in Chinese)
- [11] Anderson N E, Loewenthal S H. Spur-gear-system efficiency at part and full load[R]. NASA-TP-1622, 1980.
- [12] 尹素格. 船用星型齿轮减速器的均载与动态特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.  
Yin Suge. Research on load sharing and dynamic characteristics of marine star gear reducer[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011. (in Chinese)
- [13] 袁擎宇. 星型齿轮传动系统均载分析方法的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.  
Yuan Qingyu. Research on analytical method of load sharing characteristics of star gear transmission[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)

### 作者简介:

冯金(1985—),男,博士,工程师。主要研究方向:航空发动机齿轮传动系统。

覃坤(1989—),男,硕士,助理工程师。主要研究方向:航空发动机齿轮传动系统。

王丹(1982—),女,博士,工程师。主要研究方向:航空发动机齿轮传动系统。

(编辑:马文静)