

风扇齿轮驱动系统的概念设计

Conceptual Design of Fan Gear Drive System

陈聪慧 信琦 / 中航工业沈阳发动机设计研究所

导读: 齿轮驱动风扇(GTF)发动机以低排放、低噪声、低油耗、低维护费用等优点被市场认可, 成为下一代民用发动机的主要发展方向之一。本文对风扇齿轮驱动系统的概念设计过程作简单介绍。

关键词: 齿轮驱动涡扇发动机; 风扇齿轮驱动系统; 概念设计

Keywords: geared turbofan; fan gear drive system; conceptual design

0 引言

降低耗油率和减少污染排放是下一代民用航空发动机的主攻发展方向和“卖点”。降低耗油率的主要方法有: 提高整机热效率(增加压气机的出口压力、增加涡轮前温度)、提高发动机推进效率(降低排气速度, 增大空气流量)。增加航空发动机部件(压气机、燃烧室、涡轮)的效率需要设计水平、加工水平和材料能力的全面提升。限于当前的材料和冷却技术的水平, 现有航空发动机涡轮前的温度已接近安全使用的极限值, 很难进一步提高。因此, 提高发动机推进效率(降低排气速度, 增大空气流量)成为主要的发展方向, 其中齿轮驱动风扇(GTF)发动机和开式转子(Open Rotor)发动机是主要代表。

我国对GTF发动机的研究尚属预研阶段。为了探索GTF发动机的设计要点和关键技术, 在第二批中航工业派往英国克兰菲尔德大学留学项目的团队项目中开展了GTF发动机的概念设计工作。近年来, 中航工业沈阳发动机设计研究所也对GTF发动机的齿轮驱动系统进行了概念设计工作。

本文以第二批中航工业派往英国克兰菲尔德大学留学项目的团队项目和沈阳发动机设计研究所的工作为基础, 对GTF发动机的关键技术风扇齿轮驱动系统的概念设计加以介绍。

1 技术现状

现役的民用大推力、高涵道比涡扇发动机的风扇均由涡轮直接驱动(图1),

由于强度和叶尖切线速度的限制, 风扇的转速一般都在4000~5500r/min, 涵道比一般不能大于8, 较低的转速使得涡轮效率较低, 必须采用4~5级的低压涡轮来驱动风扇和增压级压气机。

齿轮驱动涡扇发动机(图2)是在风扇后增加一个齿轮驱动系统, 风扇不再由低压涡轮轴直接驱动, 这样风扇和低压涡轮不需在同一个转速下工作, 风扇转速在3000~4000r/min, 而增压级压气机和低压涡轮系统可以工作在8000~10000r/min的转速下, 这种设计可以使风扇、增压级压气机和低压涡轮都具有更高的效率, 采用较少级数的增压级(2~3级)和低压涡轮(2~3级)就可以满足功率的要求。同时, GTF发动机相对于直接驱动的发动机具有更大的涵道比, 从而获得更高的推进效率, 更低的耗油率, 也会减少噪声。

GTF发动机并不是一个新的概念。霍尼韦尔公司在1970年就将这种结构应用在了TFE731发动机上。

2007年, 普惠公司开始对其GTF发动机进行地面试验, 验证机的推力为136kN。普惠公司认为: GTF发动机将成为下一代商用飞机的动力, 相对于现役的民用发动机, 可降低15%的燃油消

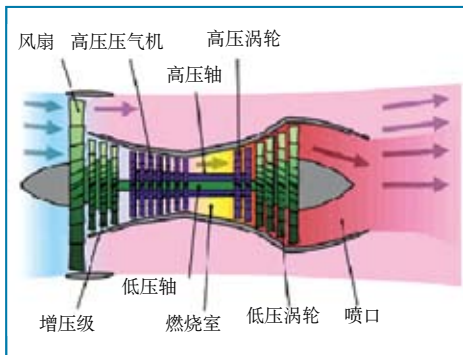


图1 直接驱动涡扇发动机

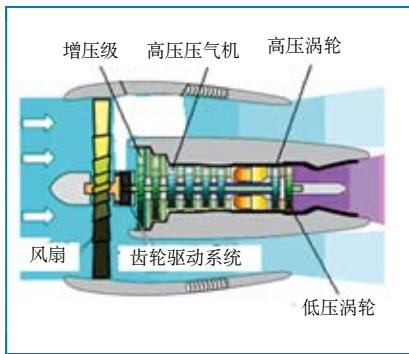


图2 齿轮驱动涡扇发动机

表1 直接驱动风扇发动机和齿轮驱动风扇
发动机性能参数对比

性能参数	直接驱动风扇	齿轮驱动风扇
核心机流量(kg/s)	25	25
风扇增压比	1.70	1.45
涵道比	6	11
总增压比	36	36
增压级压比	1.44	1.69
高压压气机压比	14.69	14.69
燃烧室出口温度(K)	1400	1400
耗油率(mg/N·s)	15.98	15.01
净推力(kN)	26.63	28.64

表2 风扇齿轮驱动系统的设计输入参数

风扇起飞状态下的功率(MW)	17.3
输入轴(低压涡轮轴)转速(r/min)	8000
输出轴(风扇)转速(r/min)	3500
传动比	2.3:1

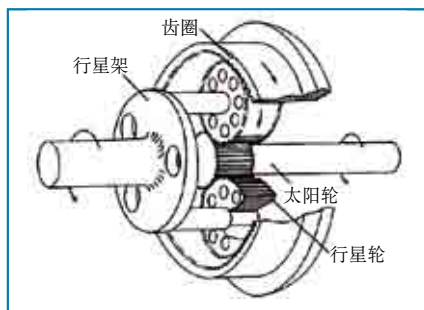


图3 简单的行星齿轮传动

耗率。

2 齿轮驱动系统概念设计

2.1 方案简介

本文所介绍的齿轮驱动风扇发动机的概念设计是在已有的核心机基础上,重新进行低压部件(风扇、齿轮驱动系统、增压级、低压涡轮)的设计。齿轮驱动风扇发动机和直接驱动风扇发动机性能对比见表1。

2.2 概念设计

齿轮驱动系统是GTF发动机与直接驱动涡轮发动机在结构上的主要差别。传动功率大小决定了齿轮尺寸。虽然齿轮驱动系统(减速器)已经被广泛地

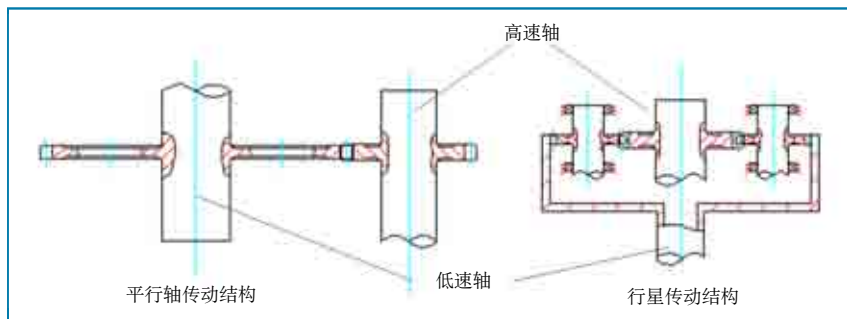


图4 齿轮箱尺寸比较图

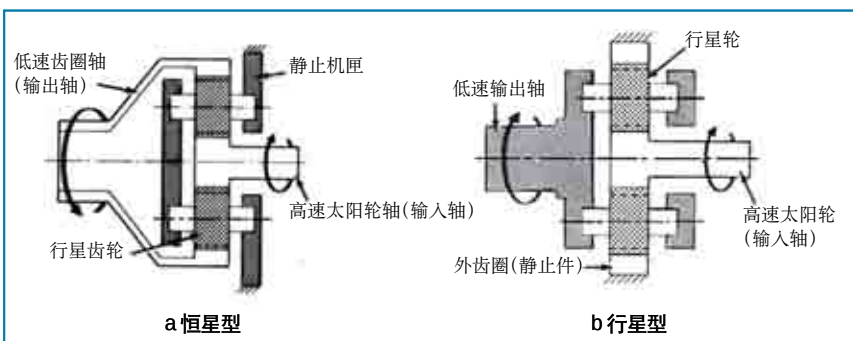


图5 行星齿轮传动

应用于涡桨、涡轴和涡扇发动机,但作为下一代单通道民航客机的动力,齿轮驱动系统(减速器)传递的功率(功率将达到20~40kSHP),远高于目前正在使用的减速器。

1) 设计目标和设计输入

本文的风扇齿轮驱动系统的设计目标是:概念设计目标定在15000 h 无故障间隔(MTBUR);齿轮箱效率应不小于99%。

根据发动机性能和其他部件的初步计算和协调结果(根据风扇转速和功率,以及涡轮转速和现有的设计能力)确定的设计输入参数见表2。

2) 齿轮驱动系统形式的选择

行星齿轮传动(图3)传输功率是通过两个或两个以上的路径,这样可以使行星齿轮在传动相同功率的情况下与平行轴传动系统相比具有更小的空间(图4)。另外,从涡轮风扇发动机的流路角度和飞行阻力方面考虑,行星齿

轮箱具有最紧凑的结构。普惠公司的PW1000G和霍尼韦尔TFE731发动机齿轮驱动系统均采用恒星型行星齿轮减速器。行星齿轮有两种结构,恒星型(图5a)和行星型(图5b)。

通过对比分析,行星齿轮减速器是最合适的选择。本文的齿轮驱动系统采用恒星型行星齿轮减速器、5个行星齿轮,其变速箱结构如图6。

3) 齿轮的设计

a) 齿形选择

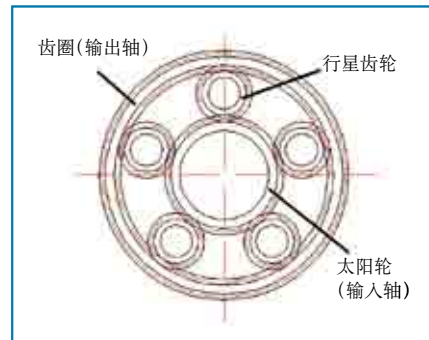


图6 风扇齿轮驱动系统减速器方案图

在现有的航空发动机传动系统中,主要采用直齿圆柱齿轮、斜齿圆柱齿轮和圆锥齿轮。斜齿圆柱齿轮有轴向重合度,它的总重合度大于直齿圆柱齿轮,因此在同样的轴向长度下,与直齿圆柱齿轮相比,斜齿圆柱齿轮不但承载能力大,而且工作平稳,适用于高速、高载荷的使用条件。

风扇齿轮驱动系统采用的齿轮必须考虑发动机、齿轮箱以及齿轮箱轴承之间的相互影响。采用人字型齿将会最大程度地降低行星齿轮轴承上的载荷,因为在啮合时人字型齿的轴向载荷将会被抵消,而单斜齿可以提供最紧凑的结构(由于加工原因,人字型齿需要空刀槽)。因此,为获得最小的空间和平稳的运转,本文的风扇齿轮驱动系统的齿形采用双斜齿(人字型齿),根据最初传动比(2.3:1)的要求,初步确定参数如表3。

b) 齿轮载荷

单个行星齿轮上的载荷分布见图7。

c) 齿轮强度校核

考虑到初步设计,假设每个行星齿轮上的载荷都是相等的(传动的功率平均分布在5个行星轮上)。齿轮材料采用渗碳淬火钢,齿根弯曲疲劳强度按公式(1)计算,接触疲劳强度按公式(2)计算,弯曲疲劳、接触疲劳许用应力按公式(3)计算。

$$\sigma_F = \frac{KF Y_{Fa} Y_{Sa} Y_{\beta}}{b m_n \epsilon_{\alpha}} \quad (1)$$

其中, K —斜齿轮的载荷系数,

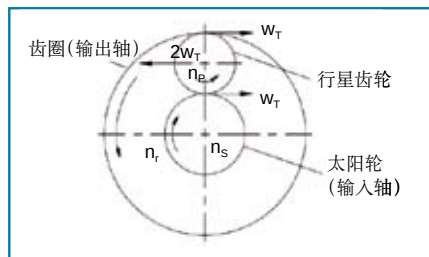


图7 单个行星轮上的载荷示意图

$K=K_A K_V K_{\alpha} K_{\beta}$; Y_{Fa} —斜齿轮的齿形系数; Y_{Sa} —斜齿轮的应力校正系数; Y_{β} —螺旋角影响系数。

$$\sigma_H = \sqrt{p_{ca} / \rho_{\Sigma}} \cdot Z_E \quad (2)$$

$$[\sigma] = \frac{K_N \sigma_{lim}}{S} \quad (3)$$

其中, S —疲劳强度安全系数; K_N —寿命系数; σ_{lim} —齿轮的疲劳极限。

通过计算表明,采用表3中结构参数和渗碳淬火钢材的齿轮满足齿根弯曲疲劳强度和接触疲劳强度的要求。

4) 轴承的选择和设计

轴承是风扇齿轮驱动系统中的关键部件之一。根据使用经验,在行星齿轮传动系统的齿轮箱中轴承经常出现问题,约占全部故障的三分之二。这主要有两个原因:第一,轴承的几何尺寸和安装条件都比齿轮箱内的齿轮复杂;第二,轴承对使用中不正确的条件比齿轮更为敏感。根据现有航空发动机使用经验,滚动轴承和滑动轴承都可以用于齿轮减速器,但滚动轴承和滑动轴承又有各自的优缺点(表4)。

在概念设计中,分别对采用三种轴承(圆柱滚子轴承、球面滚子轴承、滑动轴承)的齿轮驱动系统进行了设计,设计结果简图见图8,三种不同轴承对驱动系统性能的影响见表5。

概念设计结果表明:当齿轮驱动系统减速箱采用人字型齿时,行星齿轮的轴承选择对整个系统的尺寸和性能有决定性的影响。采用人字型齿和滑动轴承组合的齿轮驱动系统具有最小的尺寸、最长的寿命、最小的功耗。

5) 润滑系统

为了使滑油系统的使用维护更加简单,并未采用特殊的滑油对齿轮进行润滑,而是采用与发动机同样的润滑油。在概念设计中,润滑油的牌号是Mobile Jet Oil II。在起飞状态下,齿轮驱动系统传递的功率达17MW,即使传动效率在

表3 齿轮驱动系统参数选择

	齿数	总齿宽 (mm)	模数	压力角 (°)	螺旋角 (°)
太阳轮	35	100	5	22.5	20
行星轮	20				
齿圈	75				

表4 滑动轴承和滚动轴承对比

性能 轴承类型	寿命	使用速度范围	润滑要求
滑动轴承	无限寿命	76~150m/s	对滑油的清洁度要求高,启动时必须要有滑油润滑
滚动轴承	寿命不足	DN值不大于 3×10^6	启动时可以短时间无滑油润滑

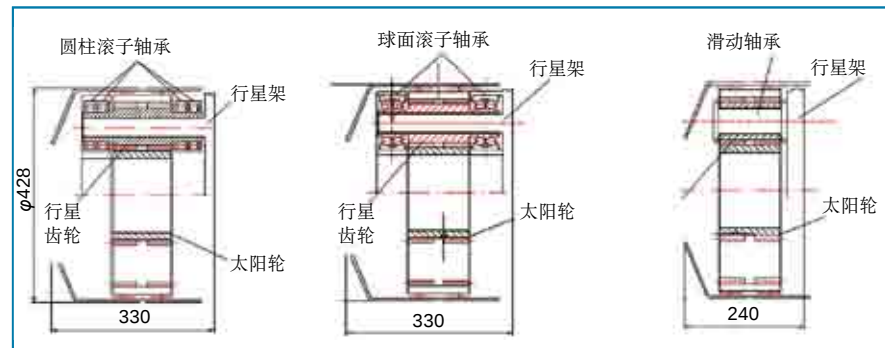


图8 采用三种不同轴承的齿轮驱动系统结构简图

表5 采用三种不同轴承的齿轮驱动系统性能和结构尺寸的对比

	圆柱滚子轴承方案	球面滚子轴承方案	滑动轴承方案
L5寿命(h)	4238	9847	无限寿命
功率损失(kW)	45.1	75.2	36.2
摩擦力矩(N·m)	30.8	45.5	24.8
齿轮驱动系统轴向尺寸(mm)	330	330	240

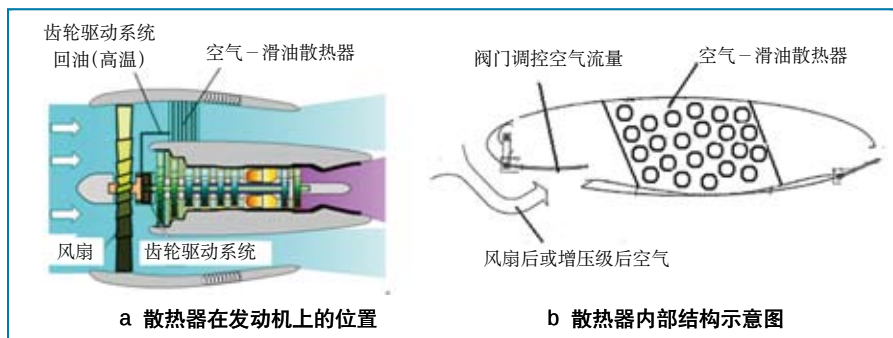


图9 空气-滑油散热器工作原理简图

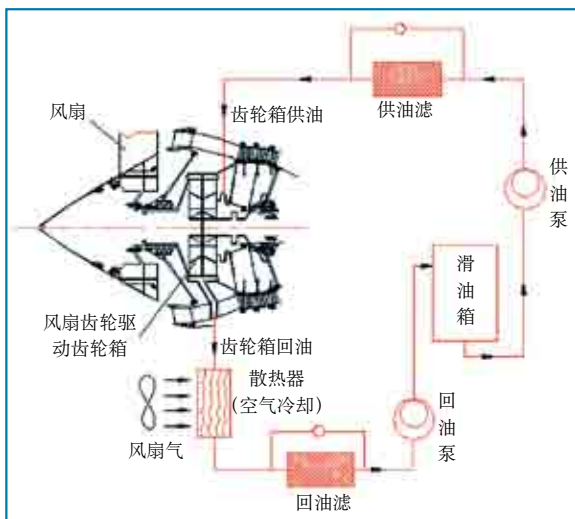


图10 风扇齿轮驱动系统滑油系统示意图

99%以上,仅风扇齿轮驱动系统就会产生上百千瓦的热量,这是以往直接驱动涡扇发动机整个润滑系统需要带走热量的几倍。同时,由于耗油率的降低,可以用于滑油冷却的燃油流量也在降低,无法带走滑油系统产生的更多的热量。采用普通燃-滑油散热器润滑系统已经无法满足GTF发动机对滑油系统维持滑油温度平衡的要求,需要更换换热能力更大的换热器。空气-滑油散热器是利用发动机风扇后或增压级后的空气来冷却

滑油系统中的滑油,原理图见图9。空气-滑油散热器可以根据滑油的温度和需要散热量来调控空气流量,从而控制空气-滑油散热器的散热能力。采用空气-滑油散热器风扇齿轮驱动系统的滑油系统简图见图10。

3 结论

通过风扇齿轮驱动系统的概念设计得到:采用“太阳型”行星传动、人字型齿形和滑动轴承可用使风扇齿轮驱动系统获得最紧凑的空间、最高的效率,而滑油系统也必须采用空气-滑油高性能散热器才能满足滑油使用的温度要求。本次概念设计中的齿轮和轴承基本上能够满足设计目标的要求。

另外,通过本次概念设计认识到:风扇齿轮驱动系统的另一项关键设计是行星传动中行星齿轮工作的均载和柔性设计,只有柔性设计才能保证齿轮在工作中的均载。同时,齿轮设计、滑动

轴承设计、高性能空气-滑油散热器设计都是齿轮驱动涡扇发动机风扇齿轮驱动系统的关键技术。

此外,风扇齿轮驱动系统的设计必须进行全面的试验验证。这些系统的、全面的试验项目包括:齿轮驱动系统的试验器试验、发动机的地面验证试验、飞行试验。另外,为了全面考核和优化设计,必须进行一些专项的试验,如效率试验、疲劳寿命试验、性能(载荷和变形)试验、过载和超转试验、断油试验等。

AST

参考文献

- [1] Buyukataman K, Wilton S. Gearbox system design for ultra-high bypass engines[C]. Orlando, FL:26th Joint Propulsion Conference. July 16-18, 1990, AIAA 90-2152.
- [2] Lynwander P. Gear drive systems: design and application[M]. New York: M. Dekker, 1983.
- [3] Xin Qin. The selection and design of bearings for geared turbofan fan gear drive system preliminary design[D]. Cranfield University, MSc thesis, 2010.
- [4] Harris T A., Kotzalas M N. Rolling bearing analysis[M]. 5th ed. CRC/Taylor & Francis, 2007.
- [5] 濮良贵, 纪名刚. 机械设计(第七版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

作者简介

陈聪慧, 研究员, 副总师, 中航工业航空发动机附件技术首席技术专家, 主要从事航空发动机传动、润滑技术研究。