

基于 PCA-TN 的直升机主减速器 通用热分析计算

赵 宁, 彭艳军, 蔺彦虎

(西北工业大学 机电学院, 西安 710072)

摘 要: 针对当前热分析方法无法满足直升机主减速器结构复杂多变的问题,提出了一种快速获取主减速器温度场分布的通用热分析方法。以典型直升机主减速器为样本,进行了主成分分析(principal component analysis,PCA),并结合热网络法(thermal network,TN),分析获得 3 种通用热分析单元体模型。对于不同结构的主减速器,通过单元体及其衍生体的组合可以迅速且有效地建立其系统热分析模型,求解获得温度场分布。以某直升机主减速器为例,应用该方法进行了热分析,并与试验进行了对比,结果表明:该方法能高效计算主减速器的温度场分布,计算值与试验值最大误差为 5.07%,满足主减速器热分析工程计算需求。

关 键 词: 主减速器; 热分析; 主成分分析; 热网络法; 温度场分布

中图分类号: V233.1; TK124

文献标志码: A

General thermal analysis of helicopter gearbox based on PCA-TN

ZHAO Ning, PENG Yanjun, LIN Yanhu

(School of Mechanical Engineering,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Targeting the problem of current thermal analysis methods which could not meet the complexity and polytropy of structure of helicopter gearbox, a general thermal analysis method which could quickly obtain the temperature distribution of helicopter gearbox was proposed. The combination of thermal network (TN) and principal component analysis (PCA) taking typical helicopter gearboxes as sample drew a conclusion of three models of general thermal analysis unit-body. Any thermal analysis model of helicopter gearbox of different structures could be quickly and efficiently established by unit-bodies and its derivatives. As an example, the method was applied to a helicopter gearbox. Through comparison of the analytical results and the experiment results, it was found that the temperature distribution of the helicopter gearbox could be high-efficiently obtained by the method, and the maximum error between analysis and experiment was 5.07%, meeting the requirement of engineering calculation for thermal analysis of gearbox.

Key words: gearbox; thermal analysis; principal component analysis; thermal network; temperature field distribution

收稿日期:2015-11-11

基金项目:国家自然科学基金(51075328)

作者简介:赵宁(1958—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事传动系统设计及动力学研究。

引用格式:赵宁,彭艳军,蔺彦虎. 基于 PCA-TN 的直升机主减速器通用热分析计算[J]. 航空动力学报,2017,32(7):1676-1682.
ZHAO Ning, PENG Yanjun, LIN Yanhu. General thermal analysis of helicopter gearbox based on PCA-TN[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(7):1676-1682.

直升机主减速器是传动系统的核心部分,其结构复杂,传递功率大,转速高,工作温度高。减速器运转时,内部各摩擦副产生大量的热,若润滑、冷却不充分或散热结构不合理,将导致零部件温度过高,出现变形、胶合或熔化等问题,降低其工作性能,严重时导致零部件失效,对主减速器的正常工作产生严重威胁。因此,研究直升机主减速器的温度场分布,预测高温危险部分,对主减速器的设计及优化具有重要意义。

目前,国内外直升机主减速器热分析方法主要有试验法、有限元法和热网络法。试验法耗资巨大且周期长;有限元法能实现简单结构的热分析,不适用于结构复杂、零部件多的系统的热分析;热网络法因具有简单可行、边界条件易于处理等优点,已广泛应用于航空、航天、电子器件和油田等多个领域。近年来,已有许多学者基于热网络法对齿轮传动系统进行了热分析研究。在直升机齿轮传动系统方面,刘志全等^[1-2]考虑失去润滑后传动系统热状态参数的时变特征,在稳态热分析的基础上,求解了某直升机齿轮传动系统的瞬态温度场;之后马璇等^[3]以 ZD-10 减速器为对象进行了试验研究;杨攀^[4]开发了几种典型主减速器结构的热分析软件。在车用齿轮传动系统方面,许翔等^[5-6]建立了车用齿轮传动箱的传热仿真模型,计算了温度场分布,预测了关键部件温度随大气环境温度的变化规律,计算值与试验值吻合较好^[6];张启胤等^[7]对车用变速箱进行了热平衡分析,得出变速器稳态温度场分布。在行星齿轮传动系统方面,黄飞等^[8]和张永红等^[9-10]建立了行星轮系的发热模型和热传递模型,利用热网络法获得了系统的稳态和瞬态温度场。

以上都是针对特定齿轮传动系统的热分析研究,对于结构复杂多变的直升机主减速器,热网络法的应用存在局限性。一方面由于结构的复杂性,使得热网络建模困难,且计算参数较多,计算过程复杂且效率低,对研究人员的学科背景和研究能力要求较高,一般工程技术人员较难掌握。另一方面由于结构的多变性,使得每次热分析都需根据不同的结构重新建模计算,耗时耗力。本文结合主成分分析法和热网络法,提出了一种快速的主减速器通用热分析方法,旨在准确、高效的获得不同结构的直升机主减速器稳态温度场,为主减速器的瞬态热分析及优化设计提供基础和参考依据,并为工程应用服务。

1 主成分分析法和热网络法原理

1.1 主成分分析原理

主成分分析法是一种多元统计分析方法,其基本思想是以数据信息丢失最少为原则,将具有一定相关性的原始变量通过线性组合形成一组较少个数的互不相关的新变量,以达到对变量空间降维的目的。数据信息主要反映在方差上,方差越大,包含信息越多,常用累计方差贡献率来衡量^[11]。设 $\mathbf{X}=(x_1, x_2, \cdots, x_n)^T$ 为一 n 维随机向量,则新变量的表达式为 $\mathbf{Y}=(y_1, y_2, \cdots, y_p)^T = \mathbf{a}_{p \times n} \mathbf{X}$,其中 $p \leq n, \mathbf{a}_{p \times n}$ 为系数矩阵。

主成分分析是先计算数据信息的协方差矩阵,进而求解其特征值和相应的单位特征向量,最后依据累计方差贡献率确定主成分。具体步骤如下:

1) 数据标准化。实际中变量的量纲往往不同,在主成分计算之前应先消除量纲的影响,常用的方法是将原始数据标准化。设 m 个样本的数据矩阵为 $\mathbf{X}_{m \times n}$,则标准化的变换公式为

$$x'_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j) / s_j \tag{1}$$

式中 $\bar{x}_j = \sum_{i=1}^m x_{ij} / m, s_j^2 = \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 / (m - 1), i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n$ 。

2) 计算协方差矩阵,及其特征值和单位特征向量。数据标准化后的协方差矩阵就是原变量的相关系数矩阵,其特征根 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_n$ 所对应的单位化特征向量为 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \cdots, \mathbf{a}_n$ 。

3) 选择主成分,得出主成分的表达式。协方差矩阵的特征值就是主成分的方差,特征值对应的单位特征向量就是主成分的系数。累计方差贡献率为

$$G(s) = \sum_{i=1}^s \lambda_i / \sum_{k=1}^n \lambda_k \tag{2}$$

根据累计方差贡献率确定主成分个数,通常累计方差贡献率大于 85% 时对应的前 p 个主成分便包含了原 n 个变量所能提供的绝大部分信息,主成分个数就是 p 个。根据 p 个特征根的单位特征向量就可得到主成分的表达式。

1.2 热网络法原理

热网络法是一种热电比拟的分析方法。对一个系统进行热网络分析时,首先将其细分成单元节点,每个节点代表系统中相对应的某一零部件或者流体介质上某一点、某一表面或某一体积上

的温度,节点之间传递热量时,无论是以何种方式换热都用热阻代替,于是可形成系统整体的热网络。然后根据 Kirchhoff 定律,热网络中任一节点的热平衡方程可以表示为

$$q_i - \lambda_{ij}(t_i - t_j) - h_{io}(t_i - t_o) - h_{ia}(t_i - t_a) = 0 \tag{3}$$

式中 q_i 为节点 i 的热流量; λ_{ij} 为节点 i 和 j 间的导热系数; t_i, t_j 分别为节点 i, j 的温度; h_{io} 为节点 i 与润滑油之间的表面传热系数; h_{ia} 为节点 i 与空气或混合气体的表面传热系数; t_o 为润滑油的温度; t_a 为空气或混合气体的温度。

联立所有方程,化简后可得通用表达式为

$$\mathbf{A}_{n \times n} \cdot \mathbf{T}_{n \times 1} = \mathbf{B}_{n \times 1} \tag{4}$$

式中 $\mathbf{T}_{n \times 1}$ 为节点温度向量; $\mathbf{A}_{n \times n}$ 为节点温度系数矩阵,由相关的热阻表示; $\mathbf{B}_{n \times 1}$ 为节点热流量。求解此方程组可得主减速器的稳态温度场。

1.2.1 热阻的计算

热传递方式分 3 种:热传导、热对流和热辐射^[12]。对主减速器而言,辐射散热可忽略不计。传导热阻分平面与圆柱面两种,计算模型为

平面

$$R_c = L/(\lambda A_c) \tag{5}$$

圆柱面

$$R_c = \ln(r_2/r_1)/(2\pi\lambda L) \tag{6}$$

式中 R_c 为热阻; L 为传热方向上的传热长度; λ 为零部件导热系数; A_c 为与传热方向垂直的传热面积; r_1, r_2 为圆柱内外壁直径。

对流换热热阻也分平面与圆柱面两种情况,其计算模型为

平面

$$R_v = 1/(hA_v) \tag{7}$$

圆柱面

$$R_v = 1/(2\pi r L h) \tag{8}$$

式中 h 为表面传热系数; A_v 为对流换热的有效面积; r 为圆柱面直径。

1.2.2 表面传热系数的计算

1) 齿面与润滑油表面传热系数

齿面与润滑油之间的表面传热系数采用 Handschuh 计算模型^[13],即

$$Nu = 0.228Re^{0.731}Pr^{0.333} \tag{9}$$

将式(9)带入 $Nu = hL/\lambda_o$ 并变形得

$$h = 0.228Re^{0.731}Pr^{0.333}\lambda_o/L \tag{10}$$

式中 Re 为雷诺数($Re = v h_m/\nu$); Pr 为润滑油的普朗特数($Pr = \nu\rho c_p/\lambda_o$); λ_o 为润滑油导热系数; L

为定型尺寸(齿轮取其齿宽中点的分度圆直径); V 为齿宽中点节圆上的线速度; h_m 为平均齿高; ν 为润滑油的运动黏度; ρ 为润滑油密度; c_p 为润滑油比定压热容。

2) 轴承与润滑油表面传热系数

Harris^[14]曾推荐滚动轴承向润滑油传热及轴承腔内壁向润滑油传热的表面传热系数为

$$h = 0.332\lambda_o Pr^{1/3}(u/\nu x)^{1/2} \tag{11}$$

式中 u 为保持架表面速度; x 为轴承节圆直径。

3) 箱体与空气表面传热系数^[14]

$$h = 0.3\lambda_a Re^{0.57}/L_d \tag{12}$$

式中 L_d 为外壳直径; $Re = u_a L_d/\nu_a$; u_a 为气流流速; ν_a, λ_a 为空气的运动黏度和导热系数。

4) 旋转轴外表面与润滑油表面传热系数^[15]

$$h = 0.11\lambda_o(0.5Re^2 Pr)^{0.35}/d \tag{13}$$

式中 $Re = \pi\omega d^2/\nu$; ω, d 为轴的角速度和直径。

1.2.3 功率损失计算

功率损失包括齿轮副功率损失和轴承功率损失。Anderson-Loewenthal 法认为齿轮副功率损失包括滑动损失、滚动损失和风阻损失^[16]。轴承功率损失是由于轴承中的摩擦引起的,其计算按 Palmgren 的方法进行^[16]。

$$N = 1.047 \times 10^{-4}(M_l + M_v)n \tag{14}$$

式中 N 为轴承功率损失, M_l 为外载引起的摩擦力矩, M_v 为黏性摩擦力矩。

2 直升机主减速器的主成分分析

直升机主减速器由各零部件组成,因而各零部件可视为主减速器的描述变量。通过这些变量可以说明主减速器的构成,但无法描述出主减速器的结构,且存在变量信息重叠、多重共线性等问题。通过主成分分析,可以得出个数较少的、互不相关的和更加合理的主减速器描述变量。

2.1 初始变量的选择

直升机主减速器涉及生热和传热的主要零部件有齿轮、轴、轴承和外箱体。由于减速器的外箱体结构复杂,热网络计算时常简化处理,因此不计入变量。齿轮、轴和轴承是主减速器的主要描述变量,结合热网络原理,分析各变量的通用热分析模型,可以确定初始变量。

1) 齿轮。主减速器中常用齿轮类型包括直齿轮、斜齿轮、人字齿轮、直齿锥齿轮、螺旋锥齿轮和面齿轮等。齿轮轮齿通过相对滑动和滚动产生

热量,其中一部分与滑油交换,一部分与箱体内的混合气体交换,一部分通过辐板传递到轴系。由于齿轮转速高,各轮齿的温度可视为相等。因此,热网络计算时,齿轮经简化后的通用热分析模型为一个圆柱体,其半径与分度圆半径相等,宽度与辐板厚度相等。此外,行星轮系内部结构复杂,热分析时需单独考虑,主成分分析时可视为单个复杂的齿轮。

2) 轴。主减速器内的轴多为变径轴,热分析时常简化为光轴。由于存在直径差异较大的轴,需将其阶段化。因此,本文轴的定义为与齿轮一一对应的阶段轴。

3) 轴承。主减速器常用的滚动轴承有深沟球轴承、角接触球轴承、自动调心球轴承、圆柱滚子轴承、圆锥滚子轴承和球面滚子轴承。轴承滚子与内外滚道摩擦生热,一部分热量与滑油交换,一部分向内圈传递,一部分向外圈传递。因此,轴承的通用热分析模型为内圈和外圈组成的模型。

综上所述,直升机主减速器是齿轮、轴和轴承的三维变量空间。

2.2 主成分提取

以典型的黑鹰、阿帕奇、科曼奇、米 26 和虎式直升机主减速器为对象,统计齿轮、轴和轴承数量为样本数据。由于变量单位统一,无需标准化。计算样本数据的协方差矩阵、特征值、特征向量以及累计方差贡献率,然后提取主成分。计算结果如表 1。

表 1 特征值及主成分贡献率
Table 1 Eigenvalue and principle component contribution rates

成分编号	特征值	方差贡献率/%	方差累计贡献率/%
1	2.739	91.308	91.308
2	0.261	8.692	100
3	0	0	

提取成分 1 和成分 2 为主成分,将特征值对应的特征向量单位化,并结合实际进行归整,原始变量和主成分的关系如表 2 所示。

2.3 主成分分析

主成分分析中的关键问题是如何给主成分赋予新的含义,并给出合理的解释。表 2 中的主成分 1 包括单个齿轮、轴和轴承,主成分 2 包括单个齿轮、轴和双轴承。

表 2 主成分与原始变量的关系

Table 2 Relationship between principle components and original variables

主成分编号	零部件个数		
	齿轮	轴	轴承
1	1	1	1
2	1	1	2

主减速器中各零部件的连接关系为齿轮由轴支撑,轴由单个或多个轴承支撑,轴承由箱体支撑。所以主成分 1 和主成分 2 描述的是组成主减速器的单元体结构。热分析时,如果主成分 2 中的某个轴承不生热,其可以衍化成主成分 1。所以热分析时只考虑主成分 2。将齿轮和行星轮系单独考虑,则主减速器的单元体结构包括两种:① 齿轮、轴和双轴承;② 行星轮系、轴和双轴承。

对于单元体 1,其内部的结构支撑关系分为简支和悬臂。假设热分析时不考虑某个或多个零部件,则其可衍生为其他的结构形式,如图 1 和图 2 所示。其中简支结构记为 S,其衍生体记为 S1~S5,悬臂结构记为 C,其衍生体记为 C1~C5。

对于单元体 2,太阳轮与输入轴相连,热分析

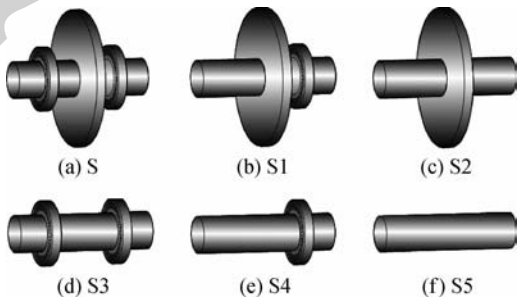


图 1 单元体 1 简支结构及其衍生体
Fig. 1 Supported structure of the first unit-body and its derivatives

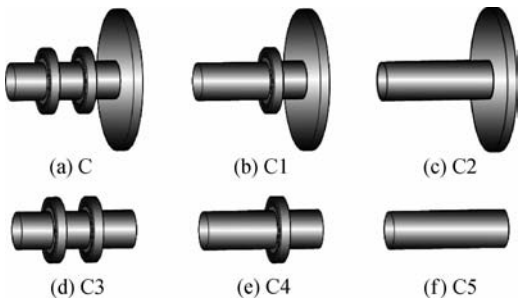


图 2 单元体 1 悬臂结构及其衍生体
Fig. 2 Cantilever structure of the first unit-body and its derivatives

时不考虑在行星轮系内,所以支撑关系为悬臂支撑,其结构及衍生体如图 3 所示。行星轮系悬臂结构记为 P,其衍生体记为 P1 和 P2。

由主成分分析可以得出:直升机主减速器由单元体 S,C,P 及各自的衍生体组成。

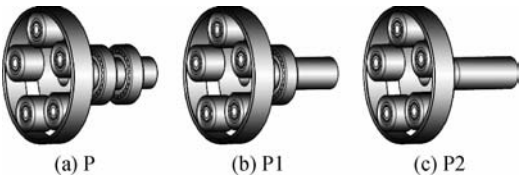


图 3 单元体 2 及其衍生体

Fig. 3 The second unit-body and its derivatives

2.4 通用性验证

通过 3 种单元体 S,C 和 P,可以快速的实现不同结构的直升机主减速器的构型,并生成相应的热分析子结构,进而形成热网络,求解获得温度场分布。因此,单元体构型方法的通用性是关键。本文通过对文献[2-4,17-18]中不同结构的主减速器进行构型举例,如表 3 所示,一定程度上说明了方法的通用性。需注意,构型时对于工况相同的功率流分支只考虑单支,构型顺序从输入到输出。

表 3 不同结构的主减速器的单元体构型

Table 3 Configuration of gearbox with different structures by unit-bodies

文献号	单元体结构	详细单元体结构
[2]	C-S	C-S
[3]	S-S	S-S
[4]	S-S-S-C-C-P-C-P	S4-S-S3-C-C2-P2-C2-P1
[17]	C-C-S-P	C-C1-S1-P1
[18]	C-C-S-P-C-P	C-C-S1-P2-C2-P

3 应用实例及试验验证

3.1 应用实例

某直升机主减速器如图 4 所示。减速器双发共 3 级,初级为锥齿轮换向,第 2 级为锥齿轮并车,第 3 级为行星轮系传动。其单元体结构为 S-S-S-C-C-P,详细单元体结构为 S-S-S-C1-C1-P。

应用开发的直升机主减速器通用热分析软件计算了主减速器的温度场分布。部分计算过程如图 5 和图 6 所示,部分计算结果如图 7 所示,图中节点含义具体为 1 表示齿轮齿面平均温度;2 表示

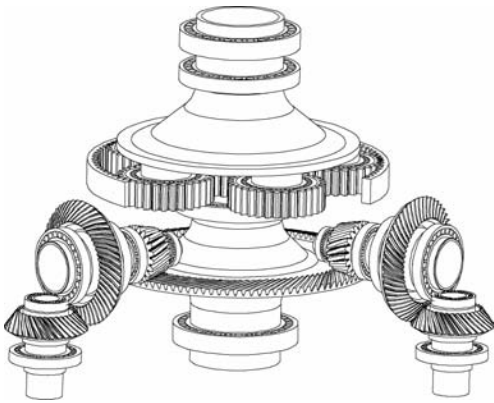


图 4 某直升机主减速器

Fig. 4 A helicopter gearbox

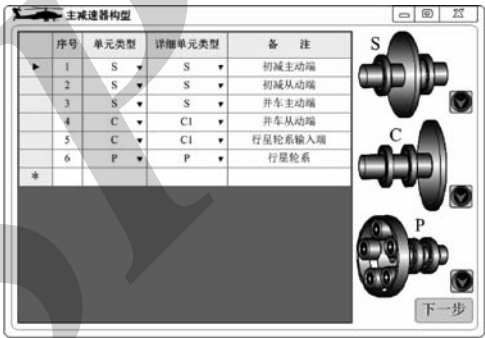


图 5 直升机主减速器构型界面

Fig. 5 Interface of helicopter gearbox configuration

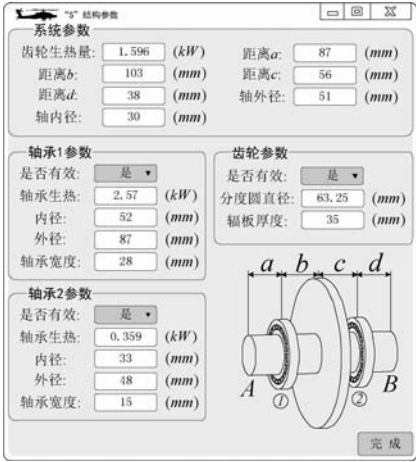


图 6 S 单元体参数输入界面

Fig. 6 Interface of input parameters of S unit-body

示齿轮与轴相切面处温度;3 表示轴承 1 内滚道温度;4 表示轴承 1 外滚道温度;5 表示轴承 1 与轴相切面处温度;6 表示箱体内表面在轴承 1 处的温度;7 表示箱体外表面在轴承 1 处的温度;8 表示齿轮与轴承 1 中间处轴外表面温度;9 表示

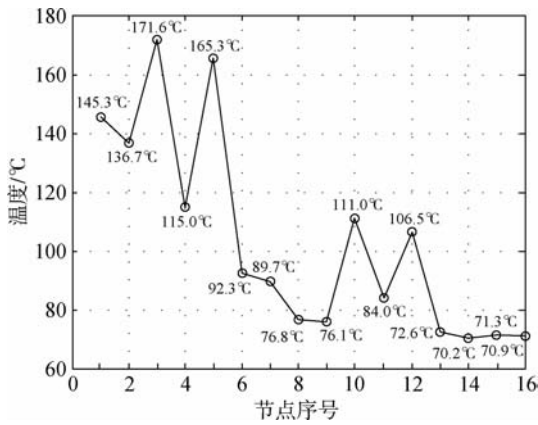


图 7 某 S 单元体温度场分布

Fig. 7 Temperature distribution of a S unit-body

齿轮与轴承 1 中间处轴内表面温度;10 表示轴承 2 内滚道温度;11 表示轴承 2 外滚道温度;12 表示轴承 2 与轴相切面处温度;13 表示箱体内表面在轴承 2 处的温度;14 表示箱体外表面在轴承 2 处的温度;15 表示齿轮与轴承 2 中间处轴外表面温度;16 表示齿轮与轴承 2 中间处轴内表面温度。

3.2 试验验证

对文中第 3.1 节实例中的减速器进行了台架试验,试验原理图如图 8 所示。由于功率大转速高,主减速器采用喷油润滑,润滑油选用发动机合成润滑油 DOD-L-85734。测温系统由温度传感器和温度采集系统组成,加载器由相应的控制系统控制。

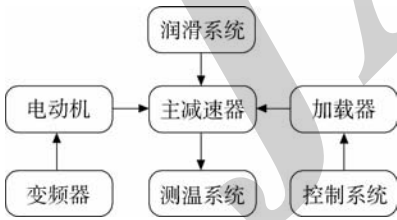


图 8 试验原理图

Fig. 8 Schematic diagram of experiment

受试验条件限制,只在主减速器左右发动机的初级换向主动端某轴承外环端面布置了温度传感器。开机后逐次递增加载,在达到试验工况且运转达到热平衡后开始测量。滑油工作温度是影响主减速器温度场分布的关键因素之一。试验分别测量了滑油工作温度在 81.4, 91.0, 100.4, 109.8℃时测试点的温度。试验测试结果与热分析计算结果如图 9 所示。

由图 9 可得,计算值与试验值趋势一致,最大误差为 5.07%,验证了主减速器通用热分析方法

计算结果的准确性。为简化问题,热分析时做了一些假设,如忽略辐射传热,对于一些结构复杂、形状不规则的传热部位简化处理等,这是导致误差产生的主要原因。此外,温度测试试验时,环境温度的细微变化都会影响测试结果,产生误差。

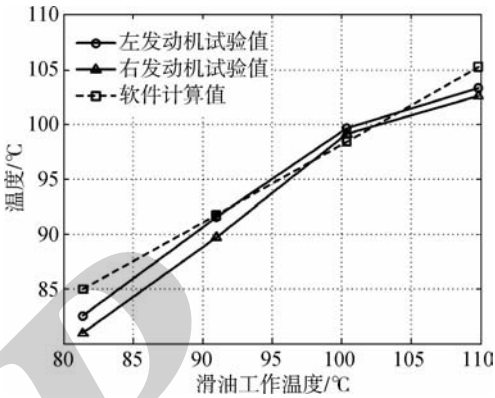


图 9 初级主动端某轴承外环端面温度

Fig. 9 Temperature of outer ring transverse of a primary driver bearing

4 结 论

1) 在直升机主减速器主成分分析的基础上,结合热网络法分析了提取的主成分,获得 S, C 和 P 三种通用热分析单元体模型,提出一种直升机主减速器快速、通用热分析方法。

2) 通过对文献[2-4, 17-18]中不同结构的主减速器的举例,方法的通用性在一定程度上得到了验证。开发了直升机主减速器通用热分析软件,以某直升机主减速器为例,说明了方法的应用过程,同时方法的高效性得到了体现。

3) 对主减速器进行台架试验,在不同滑油工作温度下,测试了初级主动端某轴承外环端面的温度,理论值与试验值吻合甚好,方法计算结果的准确性得到了验证。

参考文献:

[1] 刘志全,沈允文,陈国定,等. 某直升机齿轮传动系统的稳态热分析[J]. 中国机械工程,1999,10(6):607-610.
LIU Zhiqun, SHEN Yunwen, CHEN Guoding, et al. Steady state thermal analysis of a helicopter gear transmission system[J]. China Mechanical Engineering, 1999, 10 (6):607-610. (in Chinese)
[2] 刘志全,沈允文,陈国定,等. 某直升机齿轮传动系统的瞬态热分析[J]. 航空动力学报,1999,14(3):309-312.
LIU Zhiqun, SHEN Yunwen, CHEN Guoding, et al. Transient thermal analysis of a helicopter gear transmis-

- sion system[J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(3): 309-312. (in Chinese)
- [3] 马璇, 李建华, 陈国定. 减速器齿轮传动系统的稳态热分析及试验研究[J]. 西北工业大学学报, 2002, 20(1): 32-35.
MA Xuan, LI Jianhua, CHEN Guoding. Experimentally supported stable thermal analysis of gearbox transmission system[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2002, 20(1): 32-35. (in Chinese)
- [4] 杨攀. 基于热网络法的直升机主减速器热分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
YANG Pan. The thermal analysis of helicopter main reducer based on thermal network method[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [5] 许翔, 毕小平. 车用齿轮传动箱的传热仿真模型[J]. 机械传动, 2003, 27(5): 1-4.
XU Xiang, BI Xiaoping. Computer simulation and calculation for heat transfer in gearcase[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2003, 27(5): 1-4. (in Chinese)
- [6] 毕小平, 许翔. 车辆传动装置部件温度的热网络计算方法[J]. 汽车工程, 2009, 31(11): 1025-1028.
BI Xiaoping, XU Xiang. Calculation of component temperature in the transmission system based on thermal network method[J]. Journal of Automotive Engineering, 2009, 31(11): 1025-1028. (in Chinese)
- [7] 张启胤, 连晋毅, 吴新, 等. 基于热网络法的工程车辆传动箱稳态热分析[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(6): 977-981.
ZHANG Qiyin, LIAN Jinyi, WU Xin, et al. Analyzing steady-state heat balance of construction vehicle's transmission gearbox using thermal network method[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(6): 977-981. (in Chinese)
- [8] 黄飞, 马希直. 基于热网络法的行星减速器温度场研究[J]. 机械传动, 2011, 35(4): 19-22.
HUANG Fei, MA Xizhi. Study on temperature field of planetary reduction gear based on thermal network[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2011, 35(4): 19-22. (in Chinese)
- [9] 张永红, 苏华, 刘志全, 等. 行星齿轮传动系统的稳态热分析[J]. 航空学报, 2000, 21(5): 431-433.
ZHANG Yonghong, SU Hua, LIU Zhiquan, et al. Steady state thermal analysis of planetary transmission system[J]. Journal of Aeronautics, 2000, 21(5): 431-433. (in Chinese)
- [10] 张永红, 苏华, 刘志全, 等. 行星齿轮传动系统的瞬态热分析[J]. 航空学报, 2000, 21(6): 542-544.
ZHANG Yonghong, SU Hua, LIU Zhiquan, et al. Transient thermal analysis of planetary transmission system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(6): 542-544. (in Chinese)
- [11] 周松林, 茆美琴, 苏建徽. 基于主成分分析与人工神经网络的风电功率预测[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 128-132.
ZHOU Songlin, MAO Meiqin, SU Jianhui. Prediction of wind power based on principal component analysis and artificial neural network[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 128-132. (in Chinese)
- [12] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [13] HANDSCHUH R F. Thermal behavior of spiral bevel gears[D]. Cleveland, OH: Case Western Reserve University, 1993.
- [14] HARRIS T A. Rolling bearing analysis[M]. 2nd ed. A Wiley-Interscience Publication, 1984.
- [15] 刘志全, 张永红, 苏华. 高速滚动轴承热分析[J]. 润滑与密封, 1998(4): 66-68.
LIU Zhiquan, ZHANG Yonghong, SU Hua. Thermal analysis of high speed rolling bearing[J]. Lubrication Engineering, 1998(4): 66-68. (in Chinese)
- [16] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第13册 减速器[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
- [17] 涂亦斌. 直升机主减速器系统热分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
TU Yixiao. Thermal analysis of the helicopter main gearbox system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [18] BELLOCCHIO A T. Drive system design methodology for a single main rotor heavy lift helicopter[D]. Atlanta, Georgia: Georgia Institute of Technology, 2005.

(编辑: 王碧珺)