

基于MINITAB的主成分分析法研究 发动机装配参数与整机振动关系

Correlation Analysis of Aeroengine Assembly Parameters and Whole Body Vibration Using Principal Component Analysis Based on MINITAB

沈献绍¹ 李鸿¹ 柏树生^{1,2} 艾延廷²

1 驻黎阳机械公司军事代表室 2 沈阳航空航天大学

摘 要: 运用基于MINITAB的主成分分析法研究装配参数对整机振动的影响, 并从大量的装配参数中提取出对整机振动影响较大的关键装配参数, 进而找到与之相对应的关键零部件及关键装配环节。

关键词: MINITAB; 航空发动机; 主成分分析; 装配参数; 整机振动

Keywords: MINITAB; aeroengine; principal component analysis; assembly parameters; whole body vibration

0 引言

航空发动机整机振动的常见原因有: 转子不平衡、转子热弯曲、转子不对中、转子碰磨、轴承座连接松动、转子支承结构间隙、滚动轴承故障、齿轮故障、油膜振荡、转轴裂纹、旋转失速与喘振、不均匀气流涡动等。本文主要研究由于转动部件不平衡引起的整机振动, 零件本身产生的不平衡量和部件中各个零件装配相对位置的变化都将引起该类型的振动^[1]。

现代航空发动机是由数以千计的零件以及由这些零件组成的组件、部件、单元体和成品件、附件装配而成。航空发动机装配质量直接影响到发动机的性能(推力、油耗、温度、流量)、寿命及工作可靠性。研究发现, 发动机装配不当将引入振源, 装配方式和工艺质量直接影响整机振动。在装配过程中有诸如间隙、摆动量(转动角度)、同心度(跳动量)、活动量、偏移量等上百个装配参数需要加以控制, 但在这些装配参

数中对整机振动产生影响种类和数目是有限的, 而且对整机振动的影响程度也有强弱之分^[2-3]。本文将基于MINITAB的主成分分析法从这些装配参数中甄别出对整机振动影响较大的关键装配参数。

1 主成分分析原理及计算步骤^[4-5]

1.1 主成分分析原理

主成分分析(PCA)是利用降维的思想, 把多指标转化为少数几个不相关的综合指标的一种多元统计分析方法, 从可观测的显式变量中提取信息, 组成不能直接观测的隐含变量。所采用的主要原则是使方差最大, 不改变样本的数据结构, 尽可能多地保留原变量所包含的信息, 同时用尽可能少的主成分替代原有变量, 从而使问题简化。

假定有 n 个样本, 每个样本共有 p 个指标(变量)描述, 这样就构成了一个 $n \times p$ 阶的数据资料矩阵:

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_p) = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{其中 } X_i = \begin{bmatrix} x_{1i} \\ x_{2i} \\ \vdots \\ x_{ni} \end{bmatrix}。$$

作 $X_1, X_2, \dots, X_p$ 的线性组合即综合指标, 记新变量指标为 $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$, 则有:

$$\begin{cases} Z_1 = a_{11}X_1 + a_{21}X_2 + \cdots + a_{p1}X_p \\ Z_2 = a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \cdots + a_{p2}X_p \\ \cdots \cdots \\ Z_p = a_{1p}X_1 + a_{2p}X_2 + \cdots + a_{pp}X_p \end{cases} \quad (2)$$

在上述方程组中要求:

$a_{1i}^2 + a_{2i}^2 + \cdots + a_{pi}^2 = 1, i=1, 2, \dots, p$, 且系数 a_{ij} 由下列原则确定:

- 1) Z_i 与 $Z_j (i \neq j, i, j=1, \dots, p)$ 不相关;
- 2) Z_1 是 $X_1, X_2, \dots, X_p$ 的一切线性组合中方差最大者; Z_2 是与 Z_1 不相关的 $X_1, X_2, \dots, X_p$ 的所有线性组合中方差最大者; $\cdots$; Z_p 是与 $Z_1, Z_2, \dots, Z_{p-1}$ 都不相关

的 $X_1, X_2, \dots, X_p$ 的所有线性组合中方差最大者。这样决定的新变量指标 $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$ 分别为原变量指标 $X_1, X_2, \dots, X_p$ 的第一, 第二, $\dots$, 第 p 主成分。

原总体 X 的总方差定义为 $\sum_{i=1}^p \sigma_{ii}$, 可以推导出 $\sum_{i=1}^p \sigma_{ii} = \sum_{i=1}^p \lambda_i, \sum_{i=1}^p \lambda_i$ 为主成分的总体方差, 即原总体 X 的总方差可分解为不相关的主成分的方差之和。称总方差中属于第 k 主成分 Z_k 的比例 $\lambda_k / \sum_{i=1}^p \lambda_i$ 为主成分 Z_k 的贡献率; 又称 $\sum_{k=1}^m \lambda_k / \sum_{i=1}^p \lambda_i$ 为主成分 $Z_1, \dots, Z_m$ ($m < p$) 的累积贡献率, 它反映了前 m 个主成分解释全部随机向量变化的比例。累积贡献率越大, 丢失的数据信息就越少, 但后续计算量也会相应增大, 故通常 m 取值标准应使累积贡献率达到85%以上。

1.2 主成分分析计算步骤

主成分分析方法的计算步骤归纳如下:

1) 将原始数据资料阵标准化;

2) 计算变量的相关系数矩阵:

$R = (r_{ij})_{p \times p}$, 其中 $r_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, p)$ 为原变量 X_i 与 X_j 的相关系数;

3) 计算 R 的特征值及相应的特征向量。首先解特征方程 $|\lambda_i - R| = 0$, 求出特征值 $\lambda_i (i, j = 1, 2, \dots, p)$, 并使其按大小顺序排列, 即 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq 0$; 然后分别求出对应于特征值 λ_i 的特征向量 $e_i (i = 1, 2, \dots, p)$;

4) $Z_i = a_{1i} X_1 + a_{2i} X_2 + \dots + a_{pi} X_p$ 即为所求主成分, 其中 $i = 1, 2, \dots, p$;

5) 求累积贡献率 $\sum_{k=1}^m \lambda_k / \sum_{i=1}^p \lambda_i$, 并确定 m 值。

2 装配参数与振动参数选取及其关系模型的建立

2.1 主要装配参数的选取

每台发动机都有大量的装配参数,

但对整机振动参数影响较大的部分集中在与转动部件相关的装配参数中。本文中航空发动机的低压转子由三级低压压气机转子与一级低压涡轮转子(Ⅱ级涡轮转子)组成, 高压转子由五级高压压气机转子与一级高压涡轮转子(Ⅰ级涡轮转子)组成。根据其双转子的结构特点, 研究过程中从大量装配参数中选出具有代表性的主要装配参数进行研究。它们主要从与第二、四、六、八级压气机及第一、二级涡轮相关的装配参数中选取。据此本文选取了如下20个主要装配参数:

1) 后支承和后机匣的配合间隙 L1;

2) 后支承点径向活动量 L2;

3) Ⅰ级涡轮轴承内环对外环的偏移量 Wy1;

4) 第6级叶片榫头与5级静子内环间轴向间隙 Q6;

5) 第6级叶片榫头与6级静子内环间轴向间隙 H6;

6) 2级叶片榫头与2级静子叶片的轴向间隙 H2;

7) 第2级叶片榫头与前机匣静子叶片间的轴向间隙 Q2;

8) 后中介轴承内环的偏移量 Wy2;

9) Ⅰ级涡轮叶片与外环的径向间隙 W1;

10) Ⅰ级涡轮叶片缘板端面与Ⅰ级涡轮导向器封严圈端面的轴向间隙 A;

11) Ⅰ级涡轮转子轴向活动量 A2;

12) Ⅰ级涡轮叶片榫头与Ⅱ级涡轮导向器的轴向间隙 B;

13) 第6级压气机转子叶片径向间隙 Y6;

14) 低压压气机转子的轴向活动量 A1;

15) 2级叶片端面与前机匣内壁之间的径向间隙 Y2;

16) 前支承盖环槽跳动量 L3;

17) 轴间轴承的径向活动量 L4;

18) Ⅱ级涡轮转子轴向活动量 A3;

19) Ⅱ级涡轮叶片叶冠与Ⅱ级涡轮导向器的纵向间隙 L5;

20) Ⅱ级涡轮转子叶片端面与Ⅱ级导向器内壁的径向间隙 W2。

2.2 整机振动参数的选取

整机振动参数的选取是根据该型发动机在工厂实际试车过程中所需测量值而定, 具体有如下两个值:

1) 压气机机匣外环垂直方向振动值(垂Ⅰ);

2) 涡轮外环垂直方向振动值(垂Ⅱ)。

2.3 关系模型的建立

发动机振动参数和装配参数之间存在某种较为复杂的关系 $Y \sim X$, 无法用确定的函数形式表达, 但可借助多元统计理论来分析研究。

主成分分析法的关键在于建立关系模型, 求出相关系数矩阵。就本文而言, 则需要找出能表达装配参数及整机振动参数之间对应关系的矩阵。本文选取的振动参数是“垂Ⅰ”和“垂Ⅱ”两个值, 在建立关系模型的过程中, 将把同一组装配参数分别和这两个振动参数进行组合以求得两组系数矩阵。

假定观测 n 台发动机, 每台发动机有 p 个装配参数和 s 个振动参数, 则可以统计到如下两个矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \text{ 和}$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1s} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{ns} \end{bmatrix}$$

它们分别表示装配参数、振动参数的数据资料矩阵。

表1 各主成分的特征值、比率及累计贡献率(垂 I)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
特征值	6.1431	5.0412	3.4390	1.2683	0.9750	0.5779	0.5481	0.4860	0.3722	0.3217
比率	0.307	0.252	0.172	0.063	0.049	0.029	0.027	0.024	0.019	0.016
累积	0.307	0.559	0.731	0.795	0.843	0.872	0.900	0.924	0.943	0.959
序号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
特征值	0.1745	0.1635	0.1265	0.0966	0.0745	0.0614	0.0514	0.0363	0.0263	0.0165
比率	0.009	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003	0.003	0.002	0.001	0.001
累积	0.967	0.976	0.982	0.987	0.990	0.993	0.996	0.998	0.999	1.000

为求得装配参数与振动参数间的相关系数矩阵^[6],本文采用装配参数变化量 Δx_{ij} 与振动参数变化量 Δy_i 的比值 a_{ij} 的方法来求,则 $A=(a_{ij})_{(n-1) \times p}$ 即为所求得的相关系数矩阵,该矩阵也就是联系装配参数以及振动参数的一座桥梁。

$$\Delta x_{ij}=x_{i+1,j}-x_{ij} \quad (3)$$

$$\Delta y_i=y_{i+1}-y_i \quad (4)$$

$$a_{ij}=\Delta x_{ij} / \Delta y_i \quad (5)$$

以上(3)、(4)、(5)式中 ($i=1,2,\dots,n-1; j=1,2,\dots,p$)。

3 实例分析

MINITAB软件具有多元正态分布及其统计分析、判别分析、聚类分析、因子分析、对应分析、主成分分析等强大功能。本文选用MINITAB软件中的主成分分析方法对装配参数及整机振动关系进行研究,并使 n 、 p 、 s 分别取为108、20、2。为了便于在MINITAB软件中识别和运用数据,下面将前文所提及的20个装配参数按顺序重新编号为C1~C20。

3.1 求对“垂 I”影响较大的关键装配参数

将求得的与“垂 I”相对应的相关系数矩阵带入MINITAB软件中,可以得到如下计算结果:

从表1可以看出,变量相关阵的最大特征值为6.1431,即第1主成分的方差为6.1431。第1主成分的方差占总方差的比率为0.307,也就是说,第1主成分的贡献率为30.7%。第2主成分的方差为5.0412,第2主成分的贡献率为25.2%。以此类

推,第13主成分的方差为0.1265,它的贡献率为0.6%,此时的累计贡献率达到了98.2%,这说明前13个主成分已经提供了原始数据的足够信息。可以用前13个装配参数替代之前的20个装配参数来研究对整机振动的影响。

由图1可看出,从第13个主成分开始,变化呈水平状态几乎达到0,这也说明13个主成分就足以满足主成分选取量要求。

根据得到的主成分系数建立第1主成分与标准化变量的关系式:

$$Z_1 = -0.167X_1 - 0.170X_2 - 0.225X_3 + 0.076X_4 - 0.325X_5 + 0.033X_6 - 0.177X_7 + 0.294X_8 + 0.372X_9 + 0.199X_{10} - 0.152X_{11} + 0.305X_{12} + 0.062X_{13} - 0.326X_{14} - 0.185X_{15} - 0.182X_{16} + 0.329X_{17} + 0.286X_{18} - 0.019X_{19} + 0.011X_{20} \quad (6)$$

这里20个系数有正数,也有负数,表示这20个变量对第1主成分都有贡献,而且有的是正相关,有的是负相关。其中绝对值最大的数是0.372,与之相对应的装配参数是“W1”,说明“W1”在第1主成分

里面影响最大,也就是说对整机振动影响最大,因此可作为本文研究所求得的关键装配参数。

第2主成分与标准化变量的关系可以用下列线性组合表示:

$$Z_2 = 0.252X_1 + 0.302X_2 + 0.207X_3 + 0.373X_4 + 0.138X_5 + 0.021X_6 - 0.294X_7 + 0.019X_8 + 0.127X_9 + 0.168X_{10} + 0.163X_{11} + 0.232X_{12} + 0.367X_{13} + 0.161X_{14} - 0.293X_{15} + 0.334X_{16} - 0.166X_{17} + 0.217X_{18} - 0.016X_{19} + 0.001X_{20} \quad (7)$$

这里“Q6”的系数0.373为正数且数值最大,说明在此主成分里面“Q6”贡献最大,可作为另一个关键装配参数。

同理,将前13个主成分相关的关键装配参数逐一挑出整理成表2。

在表2中,可以从中对应的找到11个关键装配参数,它们分别是C9、C4、C6、C19、C20、C10、C1、C8、C2、C14、C12。其中C10和C4分别有两次作为对应的关键装配参数出现,故找出的对应的关键装配参数是11个而非13个。显然此方法求出对“垂 I”影响较大的关键装配参数是:L1、L2、Q6、H2、Wy2、W1、A、B、A1、L5、W2等11个装配参数,它们的累积贡献率已达到98.2%,可以说明这些数据基本上可以代替全部20个装配参数对“垂 I”的影响。

3.2 求对“垂 II”影响较大的关键装配参数

按照上面用于求对“垂 I”影响较大的关键装配参数的方法,求出对“垂 II”影响较大的关键装配参数。

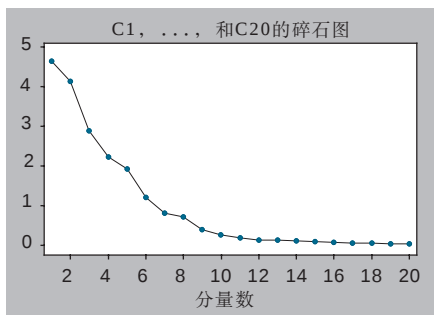


图1 C1~C20 的碎石图(垂 I)

表2 各主成分绝对值最大值及对应装配参数(垂 I)

主成分	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
绝对值最大值	0.372	0.373	0.495	-0.790	-0.936	0.532	0.545	0.664	0.525	0.582
对应装配参数	C9	C4	C6	C19	C20	C10	C10	C1	C8	C2
主成分	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
绝对值最大值	-0.643	0.486	-0.572	-0.394	0.456	0.440	0.588	-0.476	-0.697	0.717
对应装配参数	C14	C4	C12	C18	C4	C9	C9	C11	C17	C3

表3 各主成分的特征值、比率及累计贡献率(垂 II)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
特征值	4.6433	4.1328	2.8817	2.2271	1.9122	1.1914	0.8088	0.7174	0.3936	0.2516
比率	0.232	0.207	0.144	0.111	0.096	0.060	0.040	0.036	0.020	0.013
累积	0.232	0.439	0.583	0.694	0.790	0.849	0.890	0.926	0.945	0.958
序号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
特征值	0.1820	0.1314	0.1200	0.1070	0.0837	0.0716	0.0543	0.0413	0.0253	0.0233
比率	0.009	0.007	0.006	0.005	0.004	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001
累积	0.967	0.974	0.980	0.985	0.989	0.993	0.996	0.998	0.999	1.000

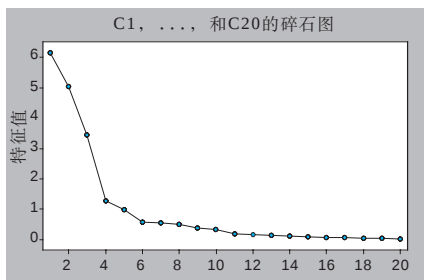


图2 C1~C20 的碎石图(垂 II)

从表3的分析结果可以看到有13个主成分的累积贡献率已高达0.980即98%,这可以说明可能有13个装配参数可以替代之前的20个装配参数来研究对整机振动的影响。

从图2中可以看出,从第13个主成分开始,变化呈水平状态几乎达到0,这也说明13个主成分就足够了。

在表4中,可以从中对应的找到11个关键装配参数,它们分别是C18、

C12、C4、C5、C3、C20、C1、C8、C10、C14、C13,其中C3和C10分别有两次作为对应的关键装配参数出现。通过以上运算结果可以得到对“垂 II”影响较大的装配参数是:L1、Wy1、Q6、H6、Wy2、A、B、Y6、A1、A3、W2等11个,它们的累积贡献率已达到98%,可以说明这些数据基本上可以代替全部20个装配参数对“垂 II”的影响。

3.3 综合分析依据“垂 I”、“垂 II”求得的关键装配参数

以上是分别通过“垂 I”、“垂 II”的参数求得了两组关键装配参数。而这两个参数都是来自于同一型号的发动机,下面就依据表2和表4,从这两组数据特点出发,求出对该型发动机整机振动影响较大的关键装配参数。

在两组关键装配参数中C1、C4、

C8、C10、C12、C14、C20等7个参数为它们所共有,所以可以确定这7个数为该型发动机的关键装配参数。

在表4中C3有两次作为对应的关键装配参数出现,显然它在“垂 II”的影响分析中是一个影响很大的参数,因此也将其定为该型发动机的关键装配参数。

结合表2和表4观察发现在“垂 I”中的C2、C19对应的“绝对值最大值”的值分别为0.582和-0.790,可见其比“垂 I”中C9(0.372)、“垂 II”中的C5(-0.435)、C18(-0.398)对应的值的绝对值都要大很多,因此可以将C2、C19定为该型发动机的关键装配参数。

由上分析可知,本文中共从20个主要装配参数中求出10个关键装配参数:C1、C2、C3、C4、C8、C10、C12、C14、C19、C20,也就是L1、

表4 各主成分绝对值最大值及对应装配参数(垂 II)

主成分	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
绝对值最大值	-0.398	-0.445	-0.516	-0.435	-0.438	0.851	-0.613	-0.606	0.470	0.699
对应装配参数	C18	C12	C4	C5	C3	C20	C3	C1	C8	C10
主成分	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
绝对值最大值	-0.431	-0.448	-0.421	0.488	0.472	0.495	-0.368	-0.602	0.500	-0.512
对应装配参数	C10	C14	C13	C11	C15	C6	C7	C18	C12	C4

复合材料飞机的电流回路接地技术研究

Research of Current Return Path of Composite Aircraft

张宇 / 上海飞机设计研究院

摘要: 随着复合材料在飞机中所占比重的增大, 诸多电磁兼容设计的问题也日趋凸显。本文分析了飞机复合材料结构对电流回路接地的影响, 介绍了复合材料结构内接地网的应用及研究现状, 提出了接地网设计及优化时的设计目标与方法。

关键词: 复合材料飞机; 电流回路接地; 接地网

Keywords: composite aircraft; current return path; electric structural network

0 引言

飞机的设计研究一直与采用性能优越的新材料密切相关, 近年来碳纤维复合材料由于其高强度、高模量等优异性能, 在飞机结构中得到了大量的应用。但由于其射频阻抗大、导电性差, 给飞机电磁兼容性设计带来了诸多麻烦。而传统的金属机身除了作为承力

结构外, 还具有以下功能: 电流/故障电流回路、为机载电气设备提供基准电位、静电防护、雷电防护、高强度辐射场 (HIRF) 防护、天线接地平面等。

此外, 多电飞机也是未来飞机的发展方向, 机载系统的二次动力部件将由电力驱动。这就使得飞机电源容量更大, 同时电气设备种类和电线电缆的数

量也将大大增加。因此有必要研究复合材料结构对电气系统带来的影响, 以及如何在复合材料结构区域内满足越来越多、越来越复杂的电气设备的用电要求。

本文主要针对复合材料结构对电流回路接地的影响进行了分析, 并介绍了复合材料结构内接地网的应用现状, 提出了接地网设计时应注意的设计原则。

L2、Wy1、Q6、Wy2、A、B、A1、L5、W2这10个装配参数。

4 结论

本文运用基于MINITAB的主成分分析法研究装配参数与整机振动之间的关系, 分别对“垂 I”和“垂 II”影响较大的装配参数综合分析, 从20个主要装配参数中, 挑选出10个装配参数作为关键装配参数。

在工厂中对这10个关键装配参数重点关注, 从与之相关联的零部件和装配工步中查找需要严格控制的关键点, 如在生产制造关键零部件时对其公差精度提高要求、在关键装配环节对相关工步精心操作、检验人员细心

检测关键装配参数等, 都将有助于提高发动机的装配质量, 从而提高发动机的整体性能质量。

AST

参考文献

- [1] 柏树生, 艾延廷, 翟学, 等. 航空发动机整机振动常见故障及其排除措施[J]. 航空维修与工程, 2011(1): 43-45.
- [2] 《透平机械现代制造技术丛书》编委会. 装配试车技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [3] A.H. 尼克金著, 于龙淮, 等, 译. 飞行器发动机装配工艺学[M]. 北京: 宇航出版社, 1987.
- [4] 陆兵焱, 陈友龙, 李映颖. BP神经网络主成分分析在试飞数据预测中的应

用[J]. 科技信息, 2009(17): 29-30.

[5] 孟生旺. 用主成分分析法进行多指标综合评价应注意的问题[J]. 统计研究, 1992(4).

[6] 范作民, 孙春林, 白杰. 航空发动机故障诊断导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 251-285.

[7] 马逢时, 吴诚鸥, 彩霞. 基于MINITAB的现代实用统计[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2009: 105-118.

作者简介

沈献绍, 高级工程师, 军队注册装备承制单位资格审查高级审查员, 主要从事航空发动机检验验收及其生产过程质量监督工作。