航空发动机转子静、偶不平衡量 控制方法研究



李鹏飞*,王娟,赵洪丰 中国航发沈阳发动机研究所,辽宁 沈阳 110015

摘 要:针对航空发动机转子静、偶不平衡量控制方法开展研究,基于坐标变换原理,以转子不同心度满足设计要求为约束 条件,以转子静、偶不平衡量线性加权和最小为优化目标,提出了一种转子不同心度与不平衡量的计算方法,应用该方法对 某型发动机的风扇转子进行了分析,表明该工艺方法能够明显改善转子不平衡量,达到控制转子静、偶不平衡量的目的。

关键词:转子,不平衡,不同心,线性加权,坐标变换,航空发动机

中图分类号:V231.96

文献标识码:A

航空发动机转子在工作中高速旋转,转子的不平衡量 对整机的振动响应有较大的影响[1],因此,转子装配在整机 装配中占有重要地位。发动机的转子通常由多级盘通过止 口定心、螺栓紧固的方式装配形成,目前国内发动机转子的 装配方法主要有平面矢量合成法和堆叠优化装配法,平面 矢量合成法的思路是测量部件的静不平衡量,装配时将部 件的轻点(重点)进行平面矢量合成,以合成矢量最小为各 盘相对角度,这种方法主要考虑部件单独不平衡量对组件 的影响,忽略了止口跳动对部件惯性轴、旋转轴的影响,转 子装配后,组件跳动、初始不平衡量均可能存在不合格的情 况。堆叠优化装配法的思路是用堆叠优化转台分别对转子 部件进行跳动测量,按照组件柱面同心度最小给出部件的 安装角度,根据此安装角度进行转子装配。这种方法考虑 了止口跳动对转子不平衡量的影响,但忽略了转子部件单 独不平衡量,转子装配后,组件跳动合格,但初始不平衡量 可能不合格。参考文献[1]在未考虑转子跳动的情况下,给 出了一种采用 Powell 法的转子不平衡量优化算法,参考文 献[2]在参考文献[1]的基础上,给出了一种基于遗传算法的 不平衡量优化方法。

本文介绍了一种基于坐标变换原理的转子不平衡量及

DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2019.03.003

不同心度计算的方法,可以实现任意盘间安装位置的转子 组件不同心度和不平衡量的预测,并通过线性加权法实现 转子静、偶不平衡量的控制和优化。

1 转子不同心度、不平衡量计算原理

发动机转子组件由多个部件装配而成,各部件的同心 度偏差通过一定的组合方式形成转子的同心度偏差,不平 衡量可以看作转子质心相对旋转轴之间的位置关系,通过 测量转子各部件连接面的偏差及质心位置,利用坐标变换, 就可以计算得到不同组合方式下转子各部件质心位置相对 组件旋转轴的空间坐标,从而可以计算出组件不平衡量的 大小。通过此方法,可以获得任意安装位置下转子组件的 不同心度和不平衡量,计算流程如图1所示。

2 部件跳动及不平衡量测量

在转子装配前需要测量部件的跳动及不平衡量,跳动 测量采用发动机转子堆叠优化转台,堆叠优化转台可以分 离出被测量的形状公差和位置公差,不平衡量测量采用动 (静)平衡机。航空发动机的转子通常设计为多级盘结构, 本文介绍最基本的转子组件仅含两个部件的情况,对于转

收稿日期:2019-01-24; 退修日期:2019-02-18; 录用日期:2019-02-25 *通信作者.Tel.:15712479855 E-mail:512042139@qq.com

引用格式: Li Pengfei, Wang Juan, Zhao Hongfeng. Research on the control method of aeroengine rotor static and couple unbalance [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(03):13-18. 李鹏飞, 王娟, 赵洪丰. 航空发动机转子静、偶不平衡量控制方法研究[J]. 航空科学技术, 2019, 30(03):13-18.



图1 计算流程图 Fig.1 Calculate flow chart

子组件含多于两个部件的情况,可等效为部件两两装配形成,各部件的跳动及不平衡量测量参数结果,见表1,结构参数见表2。

表1 部件跳动、不平衡量测量参数 Table 1 Run-out and unbalance measurement

parameters of part

跳动/不平衡量参数	PART1	PART2
柱面同心度/mm	$2A_1 \angle \alpha_1$	$2A_2 \angle \alpha_2$
端面垂直度/mm	$B_1 \angle \beta_1$	$B_2 \angle \beta_2$
部件不平衡/(g·mm)	$U_1 \angle \lambda_1$	$U_2 \angle \lambda_2$

売り	冬部性结构参数
122	百叫十纪冯罗奴

Table 2 Structural parameters of each part

结构参数	PART1	PART2
跳动测量止口半径/mm	R_1	R_2
跳动测量基准面至被测面高度/mm	H_{a1}	H_{a2}
部件质量/kg	m_1	<i>m</i> ₂
质心相对不平衡量测量基准高度/mm	H_{o1}	H _{o2}
部件质心相对组件质心高度/mm	L_1	L_2

3 **坐标变换方法及优化过程**

3.1 坐标旋转

给定空间直角坐标系*OXYZ*,若使其绕*OY*轴旋转一个 角度ε(ε为由坐标轴正方向向原点逆时针旋转角度),可获 得一个新的坐标系*O'X'Y'Z'*,在齐次坐标下,空间任意一点 在新坐标系中的坐标*X'*,*Y'*,*Z'*,与其在原坐标系中的坐标 *X*,*Y*,*Z*之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon & 0 & -\sin \varepsilon & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \varepsilon & 0 & \cos \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$
(1)

即空间坐标系绕Y轴逆时针旋转 ε 的旋转矩阵为:

$$Rot_{y}(\varepsilon) = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon & 0 & -\sin\varepsilon & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ \sin\varepsilon & 0 & \cos\varepsilon & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

同理,坐标系只绕*OX、OZ*轴逆时针旋转*ε*,相应的坐标 变换矩阵为:

[1 0			0		0]
$Rot_x(\varepsilon) =$	$0 \cos \varepsilon$		ε	$\sin\!arepsilon$		0
	0	$0 - \sin \varepsilon$		$\cos \varepsilon$		0
	_0	0 0		0		1
\mathbf{P}	[co	$\mathrm{os}\mathcal{E}$	sir	1E	0	0]
	$-\mathrm{sin}\varepsilon$		$\cos\!\epsilon$ 0		0	
$\operatorname{Rol}_{z}(\mathcal{E})$ –		0	C)	1	0
	0		0		0	1

依次绕各坐标轴旋转坐标系,可将坐标系旋转到任意 姿态,相应的变换矩阵可由三个基本旋转矩阵相乘求得,即 假设空间直角坐标系*OXYZ*,先绕*OX*轴旋转α,再绕*OY*轴 旋转β,最后绕*OZ*轴旋转γ得到一个新的坐标系*O'X'Y'Z'*, 则变换矩阵表达为:

 $T = Rot_{z}(\gamma) \times Rot_{y}(\beta) \times Rot_{x}(\alpha)$ (2)

3.2 坐标平移

给定空间直角坐标系 OXYZ,将坐标原点依次沿 OX轴 正方向移动距离 a,沿 OY轴正方向移动距离 b,沿 OZ轴正 方向移动距离 c,可以得到一个新的坐标系 O'X'Y'Z',在齐次 坐标下,空间任意一点在新坐标系中的坐标 X',Y',Z',与其 在原坐标系中的坐标 X,Y,Z之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} x'\\ y'\\ z'\\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -a\\ 0 & 1 & 0 & -b\\ 0 & 0 & 1 & -c\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x\\ y\\ z\\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{T}_{m}(a,b,c) \begin{bmatrix} x\\ y\\ z\\ 1 \end{bmatrix}$$
(3)

 $T_m(a,b,c)$ 为空间坐标系沿X轴、Y轴、Z轴正向分别平移a,b,c的平移矩阵。

3.3 **数学模型的建立**

计算模型的建立基于以下假设条件:

(1)部件各连接面端面为理想平面,柱面为理想圆,即 忽略止口跳动的形状公差,止口跳动仅表现为位置公差,

(2)部件为刚性装配,各部件连接面圆心重合^[3]。

图2(a)、图2(b)分别为两部件测量坐标系下的质心位 置和连接面圆心位置,O₁-X₁Y₁Z₁、O₂-X₂Y₂Z₂分别为部件 PART1及PART2的部件测量坐标系,图3为组件示意图,其 中PART1的部件坐标系O₁-X₁Y₁Z₁为组件的装配坐标系, O-XYZ为旋转坐标系,旋转坐标系的Z轴为转子前后支点 的截面圆心连线。本文建立的数学模型的部件跳动测量坐 标系与部件不平衡量测量坐标系一致,若实际情况存在部 件跳动测量坐标系与部件不平衡量测量坐标系不一致的情 况,还需要将部件的质心坐标由不平衡量测量坐标系变换 至部件跳动测量坐标系中,另外,该计算模型的部件不平衡 仅表现为静不平衡,实际工程应用中,应根据实际单盘的宽 径比选择机件进行动平衡或静平衡。



(a) PART1部件坐标系



(b) PART2部件坐标系

图2 部件坐标系模型

Fig.2 Coordinate system model of part 各部件、组件下连接面圆心与质心符号表示见表3。

3.4 部件测量坐标系下质心坐标及连接面圆心坐标

根据部件不平衡量和质量,可以得到部件在不平衡量 测量坐标系下的质心坐标为:

 $O_{ui} = U_i / m_i = (U_i \cos \lambda_i / m_i, U_i \sin \lambda_i / m_i, H_{oi}, 1), i = 1, 2$ (4) 根据部件跳动测量结果,可以得到部件在部件跳动测 量坐标系下各截面圆心坐标为:

$$M_{ii} = (A_i \cos\alpha_i, A_i \sin\alpha_i, H_{ai}, 1), \quad i = 1, 2$$
(5)
采用列矢量表达,形式为:



图3 组件坐标系模型

Fig.3 Coordinate system model of component

表3 各截面的圆心和质心坐标

Table 3 Center of circle and center of mass coordinates of each section

参数	PART1	PART2
部件跳动测量坐标系下连接面圆心	$M_{\rm tl}$	M_{i2}
部件不平衡量测量坐标系下部件质心	$O_{\rm u1}$	$O_{\rm u2}$
装配坐标系下连接面圆心	M_1	M_2
装配坐标系下各部件质心	O_1	<i>O</i> ₂
旋转坐标系下连接面圆心	M _{r1}	M _{r2}
旋转坐标系下各部件质心	$O_{\rm rl}$	O _{r2}

$$O_{ui} = \begin{bmatrix} x_{ui} & y_{ui} & z_{ui} & 1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
$$M = \begin{bmatrix} x_{ui} & y_{ui} & z_{ui} & 1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

$$\mathbf{M}_{ti} = \begin{bmatrix} x_{ti} & y_{ti} & z_{ti} \end{bmatrix}$$

3.5 装配坐标系下质心坐标及连接面圆心坐标

以PART1为装配基准,PART2相对PART1零相位的装 配角度为angle12(后视逆时针为正方向)。实际上,航空发 动机转子各部件均由*n*个螺栓连接形成组件,因此,angle12 的取值应为:

angle
$$12 \in (2Pi \times i/n), \quad i = 1, 2, \cdots, n$$
 (6)

部件PART1质心在装配坐标系下的坐标为:

$$O_1 = U_1/m_1 = (U_1 \cos\lambda_1/m_1, U_1 \sin\lambda_1/m_1, H_{o1}, 1)$$
(7)

部件 PART2 装配到 PART1上,部件 PART2 质心在装配 坐标系下的坐标 0,为:

$$O_{2} = T_{m} (-A_{1} \cos\alpha_{1}, -A_{1} \sin\alpha_{1}, -H_{a1}) Rot_{z} (-\beta_{1}) \times Rot_{y} \times (-\arctan(\frac{B_{1}}{2R_{1}})) \times Rot_{z} (\beta_{1} - \text{angle12}) \times O_{u2}$$

(8)

部件PART1后止口圆心在装配坐标系下的坐标为:

$$M_1 = M_{t1}$$
 (9)
部件PART2后止口圆心在装配坐标系下的坐标为:
 $M_2 = T_m(-A_1\cos\alpha_1, -A_1\sin\alpha_1, -H_{a1}) \times Rot_z(-\beta_1) \times Rot_z$
 $(-\arctan(\frac{B_1}{2R_1})) \times Rot_z(\beta_1 - \text{angle12}) \times M_{t2}$
(10)

3.6 旋转坐标系下质心坐标及连接面圆心坐标

将装配坐标系变换到旋转坐标系可通过先绕坐标轴旋 转相应角度得到,其变换矩阵表达为:

$$R_{z-z'} = Rot_{z} (-\arctan(\frac{M_{2}(2,1)}{M_{2}(1,1)})) \times Rot_{y} (\arctan(\frac{\sqrt{(M_{2}(1,1))^{2} + (M_{2}(2,1))^{2}}}{M_{2}(3,1)})) \times (11)$$

$$Rot_z(\arctan(\frac{M_2(2,1)}{M_2(1,1)}))$$

式中: $M_2(i,j)$ 为矩阵 M_2 第*i*行、第*j*列的元素。

旋转坐标系下,各连接面柱面圆心坐标*M*_n及质心坐标 *O*_n表示为:

$$M_{ii} = R_{i-i} \times M_i, \quad i = 1,2$$
 (12)

$$O_{ii} = R_{i-i} \times O_i, \quad i = 1,2$$
 (13)

3.7 组件不平衡量叠加

一般情况下,转子的不平衡量由两类基本不平衡混合 而成,即静不平衡与偶不平衡。通常用两个特定平面上的 不平衡矢量来描述转子的动不平衡。有时也将它分离成静 不平衡和偶不平衡来描述^[4,5]。本文采用转子的静不平衡和 偶不平衡来描述转子的平衡状态。

如图4所示,在组件状态下,设部件PART1及PART2质 心截面上分别存在静不平衡量 U_1 、 U_{11} ,S为组件质心位置, 可将不平衡量进行矢量合成,转换成一个静不平衡量 U_s 和 一个偶不平衡量 U_c 。

对所有部件的不平衡量进行矢量相加,即可得到转子 组件的静不平衡量大小:

$$U_{s} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} (m_{i} \cdot O_{ii}(1,1))\right)^{2} + \left(\sum_{i=1}^{n} (m_{i} \cdot O_{ii}(2,1))\right)^{2}} (14)$$

$$\Leftrightarrow x = \sum_{i=1}^{n} (m_{i} \cdot O_{ii}(1,1)), y = \sum_{i=1}^{n} (m_{i} \cdot O_{ii}(2,1)), \text{JM}$$

静不平衡量(平衡重点)相位:

$$\varphi = \begin{cases} \arctan(y/x), & x > 0, y > 0 \\ \arctan(y/x) + Pi, & x < 0 \\ \arctan(y/x) + 2Pi, & x > 0, y < 0 \end{cases}$$
(15)



图4 不平衡量的转换示意图 Fig.4 Unbalance translation diagram

对所有部件的不平衡量与部件相对转子组件质心距离 矢量的不平衡量力矩进行矢量相加,即可得到转子组件的 偶不平衡量大小:

$$U_{C} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} (m_{i} \cdot O_{ii}(1,1) \cdot L_{i})\right)^{2} + \left(\sum_{i=1}^{n} (m_{i} \cdot O_{ii}(2,1) \cdot L_{i})\right)^{2}}$$
(16)

3.8 优化过程

通过计算可获得任意安装位置的理论静不平衡量和偶 不平衡量,如果以组件的静不平衡量和偶不平衡量为优化 目标,很难存在唯一解能同时使每个目标达到最优,但应具 有各个目标之间相互妥协的一组最优解,针对该问题,通过 线性加权和法将多目标优化问题转化为单目标优化问题, 以某型发动机风扇转子为例,该风扇转子为三级盘结构,设 计变量为各部件相对安装角度 angle12 及 angle23,目标函 数表达为:

 $F(angle12,angle23) = W_1 \times U_s + W_2 \times U_c$ (17) 式中: $W_1 和 W_2$ 分别为函数的加权因子。可根据分目标函数 的容限法求加权因子 $W_1 和 W_2$ 的值,设分目标函数值的变化 范围为:

$$\begin{cases} ALFA_1 \leq U_s \leq BATA_1 \\ ALFA_2 \leq U_c \leq BATA_2 \end{cases}$$
则各项目标的容限为:
$$(18)$$

$$\Delta F_i = (BATA_i - ALFA_i)/2, \quad i = 1, 2$$
(19)
加权因子的选取写为:

 $W_i = 10^n / \Delta F_i$

这样,确定了分目标函数的上限值和下限值,即可确定 加权因子,这种取法可以起到平衡各分目标函数数量级的 作用。

约束条件为各盘止口或盘缘相对回转轴线的同心 度≤0.03mm。

4 算例

某型发动机的风扇转子中的一、二级盘通过28个螺栓 连接,二、三级盘通过30个螺栓连接,则转子组件装配共有 840个装配位置,根据单盘宽径比,确定一、三级盘进行静平 衡,二级盘进行动平衡,每级盘的跳动、不平衡量的大小和 方向取值见表4。使用MATLAB对以上算法进行了编程, 计算得到转子组件840个装配位置的组件静不平衡量U_s 和偶不平衡量U_c分布曲线如图5所示,组件静、偶不平衡 量线性加权和分布曲线如图6所示。

表4 部件跳动、不平衡量大小及方向 Table 4 Run-out, unbalance size and direction of part

盘号	后止口同心度 (<i>A</i> /a:mm/(°))	后止口垂直度 (<i>B/</i> β:mm/(°))	后轴同心度 (<i>A/</i> a:mm/(°))	不平衡量 (<i>U</i> /λ:g.mm/(°))	
第1级	0.0087/194	0.026/120	_	390/128	
第2级	0.0159/318	0.0032/264	0.0143/7	修正面1 500/89	修正面2 530/249
第3级	0.011/290(盘 缘位置)			490	/89





图6 静、偶不平衡量线性加权和分布曲线



以组件静、偶不平衡量线性加权和最小为最优解,确定 一、二级盘安装角度 angle12=218.57°,二、三级盘安装角度 angle23=12°,优化位置与随机位置组件的同心度与不平衡 量数据对比,见表5,可见该方法确定的装配位置在跳动满 足图纸要求的前提下,相对随机位置能够明显改善转子的 不平衡量。

5 结论

通过分析,可以得出以下结论:

(1)通过测量转子部件的跳动及不平衡量,利用坐标变换原理,通过坐标变换可以估算出任意安装位置转子组件的不同心度与不平衡量。

(2)以转子组件不同心度为约束条件,并利用容限法确 定转子静、偶不平衡量的加权因子,以转子静不平衡量、偶 不平衡量线性加权和最小为优化目标,确定的装配位置可

表5 组件同心度与不平衡量对比

Table 5 Component concentricity and unbalance compare

	静不平衡量/ 偶不平衡量/ (g·mm) (g·mm ²)	偶不平衡量/ (g·mm ²)	一级盘止 口同心度/	二级盘止 口同心度/	三级盘盘 缘同心度/
		mm	mm	mm	
优化位置	402.8	61033	0.017	0.022	0.024
随机位置	1222.9	139387	0.017	0.004	0.016
随机位置	1131.7	190630	0.019	0.004	0.014

以实现组件不同心度满足设计要求的前提下,组件不平衡 量最优。

(3)应用该工艺方法对某型发动机风扇转子进行了分析,结果表明该工艺方法能够明显改善转子不平衡量,达到控制转子静、偶不平衡量的目的。

本文介绍的工艺方法可以广泛应用于航空发动机、燃 气轮机等的转子装配。

参考文献

(in Chinese)

[1] 曹茂国.多级盘结构转子的工艺装配优化设计方法[J].航空 发动机,1994(3):48-52.

Cao Maoguo. Optimization technique for multi-disk rotor assembly [J].Aeroengine,1994(3):48-52.(in Chinese)

- [2] 李立新.基于遗传算法的多级盘转子平衡方案优化设计[J]. 振动、测试与诊断,2008,28(2):139-142.
 Li Lixin. Optimum design for balance in multi-disk rotor installation based on genetic algorithm [J].Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008,28(2):139-142.(in Chinese)
 [3] 刘君,吴法勇,王娟. 航空发动机转子装配优化技术[J]. 航空
- 发动机,2014,40(3):75-78. Liu Jun, Wu Fayong, Wang Juan. Optimization technique of aeroengine rotor assembly [J]. Aeroengine, 2014, 40(3):75-78.

- [4] 哈托·施耐德.平衡技术理论与实践[M].北京:机械工业出版 社,1981.
 Hato Scneider. Balancing technology theory and practice[M].
 Beijing: Mechanical Industry Press, 1981. (in Chinese)
- [5] SAEARP4163 Balancing machines: Tooling design criteria[S]. 2003.

作者简介

李鹏飞(1988-) 男,硕士,工程师。主要研究方向:航空 发动机装配工艺技术。 Tel:15712479855 E-mail:512042139@qq.com 王娟(1986-) 女,硕士,高级工程师。主要研究方向:航 空发动机装配工艺技术。 赵洪丰(1977-) 男,硕士,高级工程师。主要研究方向: 航空发动机装配工艺技术。

Research on the Control Method of Aeroengine Rotor Static and Couple Unbalance

Li Pengfei*, Wang Juan, Zhao Hongfeng

AECC Shenyang Aero-engine Institute, Shenyang 110015, China

Abstract: Aiming at the control method of static and couple-unbalanced quantity of aeroengine rotor, based on the principle of coordinate transformation, with the rotor's different heart rate meets the design requirements as the constraint condition, with the rotor static and couple-unbalanced quantity linear weighting and minimum as the optimization goal, this paper proposes a calculation method of rotor concentricity and unbalance. The method is applied to analyze the fan rotor of a certain engine, which shows that the method can significantly improve the rotor unbalance and achieve the purpose of controlling the static and couple-unbalanced quantity of the rotor.

Key Words: rotor; unbalance; concentricity; linear weighting; coordinate transformation; aeroengine