

多级转子堆叠预测改进算法研究

赵丹丹 李其建 石尚武

(中国航发沈阳发动机研究所 辽宁 沈阳 110500)

摘要: 为了解决多级转子堆叠预测过程计算量大和就近装配相位偏差对预测结果的影响,通过增加相邻盘间连接螺栓数量约束,将解析法和遍历法相结合,融入单盘几何形心参数,提出一种改进的转子堆叠预测算法,使转子初始不平衡量和转子同轴度达到最优。经程序计算验证,算法的预测结果稳定,可以为多级转子堆叠装配提供依据。

关键词: 堆叠预测; 同轴度; 转子装配

0 引言

目前,我国企业普遍引入 Precitech 公司开发的转子堆叠优化设备 SPS-1000L 对燃气涡轮发动机转子进行测量,实现转子同轴度的优化。文献 [2]、[3] 将转子各部件之间的安装角度作为连续变量来处理,未考虑实际操作时安装相位的限制;文献 [4]、[5] 采用遍历的方式计算最优装配位置,当堆叠零件较多时无法计算出最优解。

本文增加相邻盘间连接螺栓约束,将解析法和遍历法相结合,提出一种改进的优化计算方法。另外,SPS-1000L 系统没有考虑堆叠时轴线形状对转子初始不平衡量的影响。本文在 SPS-1000L 堆叠预测原理上,加入单盘几何形心参数,使转子不平衡量和转子同轴度同时达到最优。通过验证表明,本文转子堆叠预测技术达到了改善发动机试车振动的目的。

1 SPS-1000L 堆叠优化

1.1 堆叠优化算法简介

影响多级盘转子结构装配质量的关键参数为连接止口处的同轴度和垂直度。SPS-1000L 系统通过测量单盘的同轴度和垂直度,得出单盘对转子组件同轴度的影响量 SP (Stack Projection), SP 计算公式如式 (1) 所示。

$$\overline{SP}_i = \delta_{Ri} - 2H_i * \delta_{Fi}/D_i \quad (1)$$

式中: \overline{SP}_i - 单盘对转子组件同轴度影响量 (mm);

δ_{Ri} - 单件同轴度 (mm);

δ_{Fi} - 单件垂直度 (mm);

D_i - 单件连接面直径 (mm);

H_i - 连接面至优化连接面的高度 (mm);

n - 转子组件单件的数量。

SPS-1000L 系统通过遍历计算各单盘 \overline{SP}_i 所有可能相位,矢量求和得到整个转子的 \overline{SP} ,进而得出转子 \overline{SP} 最小时各单盘的安装相位。

1.2 SPS-1000L 系统装配误差分析

SPS-1000L 系统寻找最优解时未考虑相邻机件连接螺栓的影响,按照 1° 间隔计算的最优解并不能直接应用于多级转子堆叠优化装配。实际操作中只能采用就近装配原则,即只能在计算出的最优相位的基础上就近对齐螺栓孔,选择与最优解相位最接近的可行安装位置,而就近装配后的相位偏差会影响最终优化结果。

如某一机件 A 采用就近安装时,连接边螺栓数量 N 产生的最大误差如公式 (2) 所示。

$$|\overline{SP}_{就近后}| = 2|\overline{SP}_A| \sin\left(\frac{360}{2 \times N}\right) \quad (2)$$

式中: N - 机件 A 与上一机件连接螺栓数量;

\overline{SP}_A - 机件 A 的 SP , 数值一般为 $0.01 \sim 0.2\text{mm}$;

$\overline{SP}_{就近后}$ - 机件 A 就近安装后转子组件的 SP 。

根据公式 (2) 计算 N 为 30、40、50、60, $|\overline{SP}_A|$ 为 0.2mm 、 0.1mm 、 0.05mm 时 $|\overline{SP}_{就近后}|$ 如表 1 所示。

由表 1 可知,就近装配会影响堆叠优化结果。螺栓

表 1 就近装配影响分析结果

N	$\overline{SP}_{就近后}$			误差占比/%
	\overline{SP}_A			
	0.2mm	0.1mm	0.05mm	
30	0.0209	0.01047	0.0052	10.47
40	0.0157	0.00785	0.0039	7.85
50	0.0126	0.00628	0.0031	6.28
60	0.0105	0.00524	0.0026	5.24

数越少影响越大、单盘 SP 越大影响越大，且当多个盘都就近装配时，可能出现误差累加，因此就近装配的影响不能被忽略。

2 改进堆叠优化

2.1 改进遍历可行域

为了使堆叠优化计算出的结果能够避免就近装配，对于各盘的角度必须特定控制。由于单盘 SP 相位不一定恰好在螺栓孔位上，因此本文通过设定单盘 SP 的 0° 基准的相位在螺栓孔位的方式，并以相邻螺栓间隔角度为步长，确定计算的可行域。

另外，当转子前 $n-1$ (n 为转子组件单盘数) 个单盘相位已知时，第 n 个单盘 SP 相位必然与前 $n-1$ 个单盘 SP 相差 180° 时，转子组件的 SP 最好。因此本文对第 2 ~ 第 $n-1$ 单盘采用遍历法，第 n 个单盘采用解析法来获得所有可行解，进一步减少计算次数。

设转子单盘前安装边的基准相位为基准 1，后安装边基准相位为基准 2，基准 1 与基准 2 间隔相位为 θ 基准间隔，以基准 1 相位为单盘 SP 的 0° 基准，基准 1 和基准 2 需要选择在安装边螺栓孔位上，如图 1 所示。

制定遍历过程：首先按基准面对齐所有盘，然后第 2 ~ 第 $(n-1)$ 级盘逐次转动 1 个与上一级盘相邻螺栓间隔，解析计算最后一级盘最优安装相位。

将遍历法与解析法相结合，使堆叠优化的计算次数减少为 $N_{2,1}N_{3,2}\cdots N_{n-1,n-2}$ ($N_{i,i-1}$ 为机件 i 与机件 $i-1$ 连接螺栓的数量， n 为转子机件数量)。相比 SPS-1000L 系统的计算量 (360^{n-1})，改进算法的计算量大大减少。同时不需要就近安装，避免了误差产生。

2.2 转子组件轴线形状优化方法

单盘形心轴线偏离转子组件轴线的大小，会直接影响转子组件的初始不平衡量。例如图 2 中所示三种情况，最终转子组件同轴度都为 0，但 (a) (b) 中安装相位的单盘形心轴线偏向转子组件轴线的同一侧，而 (c) 中单盘转子轴线均匀分布在转子组件轴线的两侧，装配效果最优。

本文在传统堆叠优化算法的基础上增加单盘对转子组件轴线形状的影响量 AP (Appearance Prejection) 的优化。将各机件的 \overline{SP}_i 构成首尾相连的一系列矢量。机件 i 的 SP 中点值作为机件 i 对转子组件轴心 AP 的影响大小， AP 的计算公式如式 (3) 所示。

$$AP = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \frac{x_i+x_{i-1}}{2}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \frac{y_i+y_{i-1}}{2}\right)^2} \quad (3)$$

式中： $x_i = x_{i-1} + sp_i \cos \alpha_i$

$y_i = y_{i-1} + sp_i \sin \alpha_i$

α_i 为机件 i 的 SP 相对机件 1 的 0° 基准面的相位， sp_i 为机件 i 的 SP 值大小， $x_0=y_0=0$ 。

通过计算 AP ，选择 AP 最小的安装相位，可以避免出现“曲轴”的形式。

2.3 改进堆叠优化算法

理论上按照堆叠优化方法可以将转子组件同轴度达到较小的值 (如 0.000001mm)，但是由于受装配因素 (如加温 / 冷却装配方式、螺栓拧紧方式等) 影响，实际很难使转子组件同轴度达到理论计算值。

因此过度追求理论同轴度最小，对转子装配质量没有太大实际意义。另外，当转子组件 SP 最小时， AP 不一定最小。本文设定 SP 阈值，对小于阈值的计算解进行 AP 计算，筛选出 AP 最小的解作为最

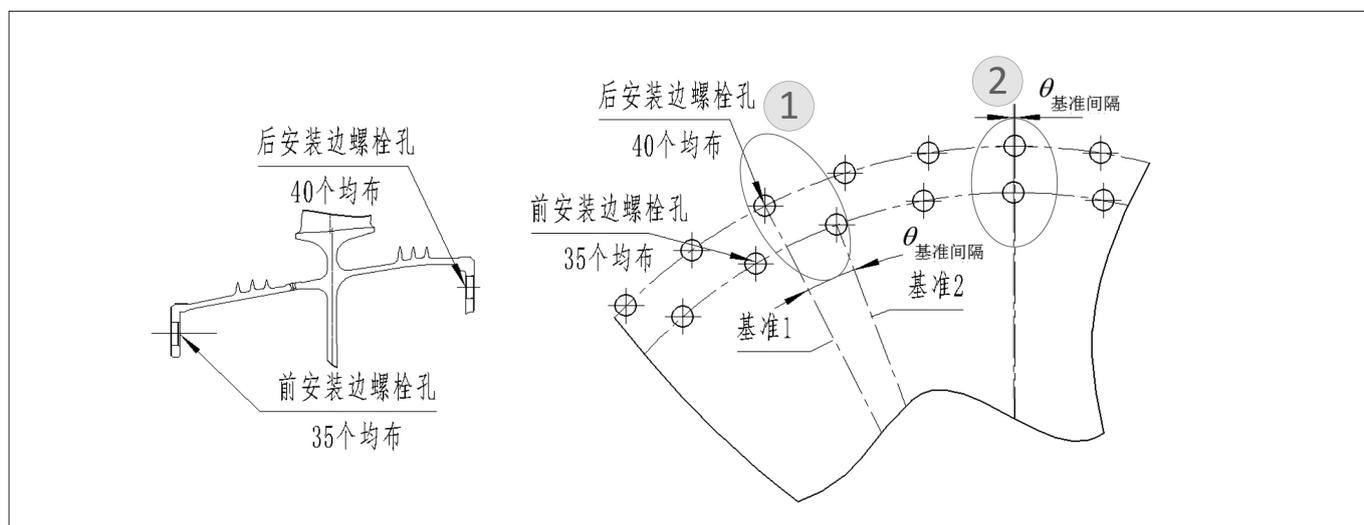


图 1 基准 1、基准 2 示意图

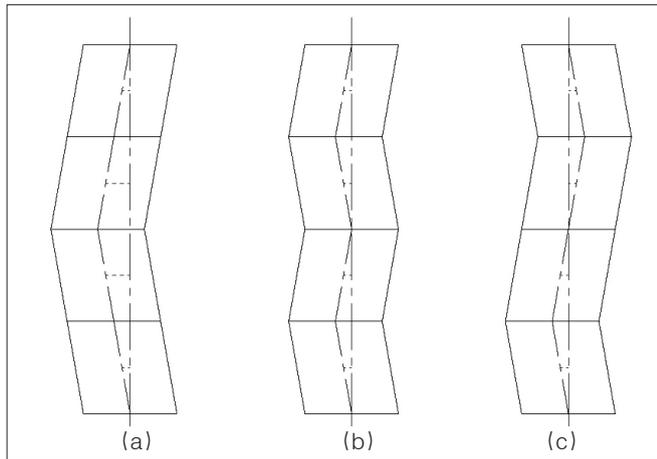


图2 堆叠相位影响示意图

优解。

将堆叠优化遍历可行域，改进和转子组件轴线形状优化方法相结合，形成改进堆叠预测算法。

3 改进效果验证

使用本文算法对某7个机件转子进行堆叠预测计算，各机件的 SP 等信息如表2所示。

根据改进堆叠优化算法计算得到最优解：机件1~7的 0° 基准面的相位依次为 0° ， 0° ， 25.714° ， 57.479° ， 47.479° ， 56.479° ， 56.479° 。理论计算按照最优解装配时转子组件的 SP 为 0.000044264mm ， AP 为 0.008mm 。

按照计算相位逐级安装，最终转子同轴度为 $\phi 0.009\text{mm}$ ，比使用“原始算法+就近装配”方法的同轴度 $\phi 0.015\text{mm}$ 更小，因此改进算法更优。

表2 改进堆叠优化算法验证结果

机件	SP大小 / mm	SP相位 / ($^\circ$)	与上一级盘连接边螺栓孔数
机件1	0.0259	298	—
机件2	0.0305	184	20
机件3	0.0166	51	28
机件4	0.026	361	34
机件5	0.0191	322	36
机件6	0.0127	65	40
机件7	0.0295	191	40

4 结语

本文改进堆叠优化算法，能够实现多级转子的堆叠优化预测，减少计算量，缩短计算时间。从工程应用角度，避免就近配对的影响和避免出现“曲轴”的形式，使转子同轴度和初始不平衡量达到最优，提高转子装配质量。

参考文献：

- [1] 孙贵青，王彤，吕玉红. 涡扇发动机先进装配工艺与装备[J]. 航空制造技术, 2017(22): 72-77.
- [2] 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.
- [3] 李立新，艾延廷，王志，等. 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.

作者简介：赵丹丹(1991.04-)，女，汉族，辽宁沈阳人，硕士研究生，工程师，研究方向：发动机装配。