

航空螺旋桨动平衡配平的建模算法

孟现召, 张洪涛, 唐晓波, 付小蓉

(中国民用航空飞行学院 洛阳分院, 河南 洛阳 471000)

摘 要: 航空螺旋桨在高速旋转过程中会产生振动,减小振动的方法是对螺旋桨进行动平衡配平.相对于传统配平算法而言,该建模配平算法通过建立与待配平螺旋桨特征数据相符合的配平模型,并采用矢量分解算法精确计算出拟安装配重的质量和安装位置,有效解决了工程实践中拟配平螺旋桨的实际轻点位置与桨毂上预置的可安装配重位置不一致的矛盾.工程实践中对实际案例的配平结果表明:建模配平算法能够一次性将拟配平螺旋桨的振动值降低至 $1.27 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ (0.05IPS) 以下达到“best”等级,相对于不大于 $4.826 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ (0.19IPS) 的合格阈值而言,可100%保证一次性配平成功.

关 键 词: 航空螺旋桨; 动平衡; 建模配平; 配平系数; 矢量分解

中图分类号: V214.3⁺3

文献标志码: A

Modeling algorithm of aero-propeller dynamic balancing

MENG Xian-zhao, ZHANG Hong-tao, TANG Xiao-bo, FU Xiao-rong

(Luoyang College, Civil Aviation Flight University of China,
Luoyang Henan 471000, China)

Abstract: The aero-propeller will vibrate in high-speed rotation. The way of resisting vibration is to perform a dynamic balancing procedure to this propeller. Compared with the traditional balancing algorithm, this algorithm of modeling balancing based on the feature model of the propeller to be balanced, and with the vector decomposition algorithm, enables to accurately calculate the total amount and the installing positions of counterweights to be installed, thus effectively solving the actual problem of inconformity between the positions of actual light-spot and preset counterweights on the propeller to be balanced in engineering practice. The practice result shows that it is easy to reduce the vibration level of the propeller to the “best” range of less than $1.27 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ (0.05IPS) with the modeling balancing algorithm, and absolutely keep the vibration level within acceptable range with only one balancing for the qualified threshold value of not more than $4.826 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ (0.19IPS).

Key words: aero-propeller; dynamic balancing; modeling balancing;
balancing factor; vector decomposition

航空螺旋桨在装机后的高速旋转过程中会产生振动,这种振动一方面使航空器重要承力部件承受较大的交变载荷易造成疲劳破坏^[1],另一方面还降低了航空器的乘坐舒适性,所以振动的强度必须限制在一个可接受的范围内.目前在航空

维修领域普遍采用的做法是对螺旋桨进行在线动平衡配平.

动平衡配平就是在转子的适当位置增加或减少合适质量的配重,调整转子的质心位置,使不平衡力减小到能够满足设备稳定运行为止^[2].在航

收稿日期:2015-07-23

基金项目:中国民用航空飞行学院科学研究基金重点项目(ZJ2014-05)

作者简介:孟现召(1975—),男,河南伊川人,工程师,硕士,主要研究方向为航空器维修及飞行器动力工程.

空维修实践中,某型振动测试仪^[3]因得到众多航空器(部件)制造商的认可和推荐^[4-5]而应用广泛。该型振动测试仪能够测量并计算出转子的轻点位置和拟安装的配重质量,在航空维修实践中进行动平衡配平的通用方法就是按照该型振动测试仪的配平方案将拟配平部件的振动值控制在该型测试仪接受的范围内。

在航空螺旋桨上,配重片安装在桨毂上的桨叶根部两侧位置,如图1。一般地,在拟配平的螺旋桨等高速旋转部件上,转子的轻点位置是不确定的,而预置的用来安装配重的标准安装点往往只有特定的几个^[4],这些预置的配重标准安装点与实际轻点位置刚好重合的概率很小,这就使配重难以有效地安装在真正的轻点位置上。图1示出了在某型二叶螺旋桨桨毂上配重片的安装实例,可以看出这些预置的配重标准安装点仅存在于桨叶两侧位置。

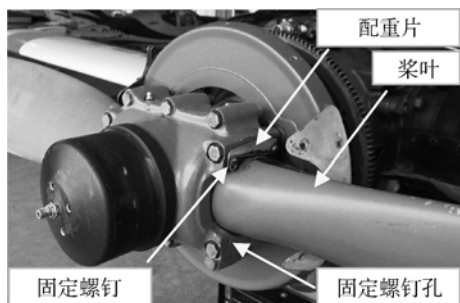


图1 某型螺旋桨桨毂上配重片的安装位置

Fig. 1 Installing position of counterweights on a certain propeller hub

配重的配平作用靠其旋转离心力实现,不同型号的螺旋桨其桨毂尺寸不同,这影响到配重所在位置的旋转半径。作为一种通用型仪器,该型测试仪不可能预知所有型号螺旋桨桨毂的特征尺寸,这决定了其不可能做到根据不同的螺旋桨型号自动修正拟安装配重的质量。配重质量计算精度不高和配重实际安装位置偏离预期造成实际配平过程中需要多次进行“配平-测试-再配平”的重复过程,费时费力,甚至出现反配平现象^[6]。

机械工程领域对转子的动平衡配平已有较多研究^[7-8],较为成熟的有影响系数法^[9]。但受限于航空器部件上有限的预置安装位置,该方法同样无法解决实际轻点位置与配重标准安装位置不一致时配重的安装问题,且测试中需安装试重和多次试车,计算和操作较为复杂。

无试重动平衡配平方案则大多采用了在转子上安装平衡头^[10-11]、平衡盘^[12]、电磁自控装置^[13]等对转子的不平衡力进行主动修正,但受限于航空器特殊的运行环境和航空法规的限制,这种增加额外装置的方法不能适用于航空维修领域。

本文提出了一种建模配平算法,包括矢量分解和配平系数测算等子算法,解决了配重安装位置与实际轻点位置之间的符合性问题,能够针对具体型号螺旋桨精确修正所需的配重质量,在不增加额外装置的前提下实现了在线无试重快速精确配平。

1 建模配平算法

该算法包括了建模、矢量分解和配平系数测算3个步骤,分别解决配重的有效安装和配重质量的精确计算问题。

1.1 建立配平模型库

设 b 为螺旋桨桨叶数目,设 γ 为相邻两桨叶轴线之间的夹角,根据力矩平衡原理,各桨叶在旋转平面内应该是均匀分布的,有

$$\gamma = \frac{2\pi}{b} \quad (1)$$

对二叶螺旋桨而言 $b=2$,显然 $\gamma=\pi$,即两桨叶的中心线 Y_1 与 Y_2 共线。由于配重片安装在桨叶两侧这些配重安装点预置于桨毂周缘上,在维修环节对其定位只需指明其所处的点钟方向即可,称之为点钟位置(注:螺旋桨的旋转方向分顺时针和逆时针,本文所指点钟位置的分布决定于实际螺旋桨的旋转方向)。在二叶螺旋桨上配重安装点分别位于2,4,8,10点钟方向上,分别将其表示为 P_2, P_4, P_8 和 P_{10} 。则以正上方为参考零位,以螺旋桨旋转方向为正方向,将某逆时针旋转的二叶螺旋桨的桨叶水平放置,可得其配平模型如图2。

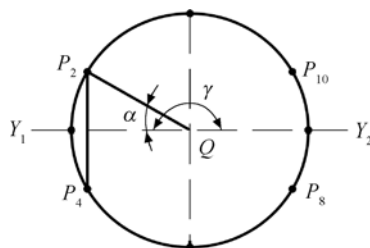


图2 两叶螺旋桨配平模型

Fig. 2 Balancing model for two-blades propeller

由配平模型可知桨叶中心线 Y_1 与 Y_2 分别位于 $\pi/2$ 和 $3\pi/2$ 位置,则各配重安装点的相对位置可表示为

$$\begin{cases} P_2 = \pi/2 - \alpha \\ P_4 = \pi/2 + \alpha \\ P_8 = 3\pi/2 - \alpha \\ P_{10} = 3\pi/2 + \alpha \\ \alpha = \arcsin\left(\frac{|P_2 P_4|}{2 \times |P_2 Q|}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中 α 为配重安装点所在半径与最接近的桨叶中心线之间的夹角, $|P_2 P_4|$ 为同一桨叶两侧的两个配重安装点之间的距离, $|P_2 Q|$ 为配重安装点 P_2 与螺旋桨旋转中心 Q 之间的距离。

对三叶螺旋桨而言 $b=3$,由式(1)可得 $\gamma=2\pi/3$,则桨叶中心线 Y_1, Y_2, Y_3 之间互差 $2\pi/3$,所以逆时针旋转的三叶螺旋桨的配平模型如图3所示。

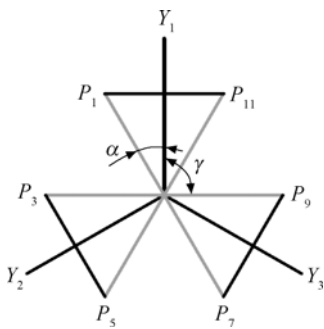


图3 三叶螺旋桨配平模型

Fig. 3 Balancing model for three-blades propeller

则三叶螺旋桨上各配重安装点的相对位置可表示为

$$\begin{cases} P_1 = \alpha \\ P_3 = 2\pi/3 - \alpha \\ P_5 = 2\pi/3 + \alpha \\ P_7 = 4\pi/3 - \alpha \\ P_9 = 4\pi/3 + \alpha \\ P_{11} = 2\pi - \alpha \\ \alpha = \arcsin\left(\frac{|P_3 P_5|}{2 \times |P_3 Q|}\right) \end{cases} \quad (3)$$

同样地, $|P_3 P_5|$ 为同一桨叶两侧的两个配重安装点之间的距离, $|P_3 Q|$ 为配重安装点 P_3 与螺旋桨旋转中心 Q 之间的距离。

用相同的方法对更多桨叶数目的螺旋桨进行建模,就建立了涵盖不同桨叶数目的螺旋桨的配平模型库。

1.2 配平模型实例化

建模的目的是为了对螺旋桨桨毂上预置的各配重安装点进行精确定位。由于不同型号的螺旋桨上其桨毂尺寸、桨毂上预置的各配重安装点之间的相对位置等不尽相同,需要根据拟配平螺旋桨桨毂的实际几何尺寸来对其配平模型进行实例化。

以二叶螺旋桨为例,实例化过程如下:

1) 目视获取拟配平螺旋桨的桨叶数目 b ,对二叶螺旋桨显然 $b=2$ 。

2) 在通用配平模型库中找到二叶螺旋桨对应的配平模型,如图2。

3) 在实际待配平螺旋桨的桨毂上测量配平模型对应的表征桨毂特征尺寸的数据,如图4中的 $|P_2 P_4|$ 和 $|P_2 Q|$ 。

4) 将测量结果代入二叶螺旋桨配平模型所对应的式(2)中,计算出各配重安装点的实际位置,即完成了该型螺旋桨的配平模型实例化。

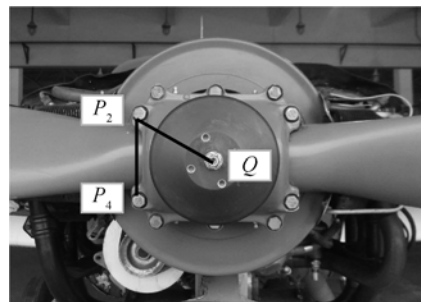


图4 螺旋桨桨毂的特征参数

Fig. 4 Characteristic parameters of propeller hub

1.3 矢量分解算法

配平模型实例化后,获得了拟配平螺旋桨桨毂上各预置配重安装点的确切位置,就可以将拟安装在任意轻点位置上的一个配重分解为两个配重分别安装在与该轻点位置相邻的两个标准安装位置上,使在这两个标准安装位置上的两个配重的矢量合成效果等同于原拟安装在轻点位置上的一个配重,解决了配重安装位置不匹配这一工程难题。

如图5,对任意的配重质量力 F_{QC} ,均可将其分解为拟安装在与其相邻的两个标准安装位置上的两个配重质量力 F_{QA} 和 F_{QB} 。

根据矢量分解原理^[14],不难得出

$$F_{QA}^2 = F_{QC}^2 \times \left(\frac{\sin^2 \angle AQC}{\sin^2 \angle QAC} + 1 - \frac{2 \times \sin \angle AQC \times \cos \angle CQB}{\sin \angle QAC} \right) \quad (4)$$

以及

$$F_{QA}^o = F_{QC}^o \times \left[\frac{\sin^2 \angle CQB}{\sin^2 \angle QAC} + 1 - \frac{2 \times \sin \angle CQB \times \cos \angle AQC}{\sin \angle QAC} \right] \quad (5)$$

在式(4)和式(5)中, F_{QC} 作为拟安装在轻点位置上的配重质量力, 为已知量; 未知量为 $\angle AQC$, $\angle CQB$, $\angle QAC$, 欲求解 F_{QA} 和 F_{QB} 需首先确定这三个角的值. 方法如下:

1) 将拟安装配重的质量力 F_{QC} 的点钟位置转化为以参考零点为起始点的角度形式(单位为 rad).

该型振动测试仪以点钟位置来表述螺旋桨旋转平面上各点的空间位置. 给出的配平方案如图6, 图中“ADD 7.3 GMS AT 6:52”包含了拟安装配重的质量(7.3 g)和轻点的点钟位置 3.5954 rad (6:52)两个信息.

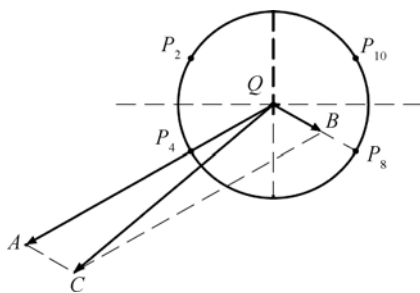


图5 矢量分解算法

Fig. 5 Vector decomposition algorithm



图6 某型振动值测试仪的配平方案

Fig. 6 Balancing solution of a certain vibration tester

点钟位置的设置规则为: 以桨毂上某点为参考零点, 作为12点钟位置; 以螺旋桨的正常旋转方向为正方向, 按钟表上点钟位置的划分方法将整个圆周划分为12等份^[9], 由于螺旋桨旋转方向分顺时针和逆时针, 故点钟位置的分布也随螺旋桨旋转方向不同而分为顺时针和逆时针. 图7示出的是以正上方为参考零点、以逆时针为正方向

的点钟位置划分方法.

由点钟位置的设置规则可知, 1个点钟对应的角度是 $\pi/6$, 1个分钟对应的角度是 $\pi/360$; 则对于任意一个点钟位置, 其对应的角度形式为

$$h = \frac{h_c \times \pi}{6} + \frac{h_m \times \pi}{360} \quad (6)$$

式中 h 为点钟位置的角度表示形式, h_c 为点钟位置中的点钟部分, h_m 为点钟位置中的分钟部分.

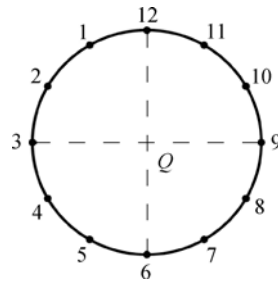


图7 点钟位置

Fig. 7 O'clock position

2) 参见图5, 以二叶螺旋桨为例, 由配平模型可得到式(4)和式(5)中拟求解的3个角的值分别为

$$\begin{cases} \angle AQC = h - P_4 \\ \angle CQB = P_8 - h \\ \angle QAC = \pi - \angle AQC - \angle CQB = \pi + P_4 - P_8 \end{cases} \quad (7)$$

由实例化的配平模型中 P_2 和 P_8 的实际值即可计算出该3个角的值, 则 F_{QA} 和 F_{QB} 可求.

1.4 配平系数测算

对螺旋桨-发动机振动系统进行动力学特性研究的结果表明系统的振动是与螺旋桨旋转同频、等幅、相位恒定的简谐振动^[15], 激振力是振动系统等效偏心质量 m 的离心力 $F = me\omega^2$ ^[15-16].

实践中螺旋桨-发动机振动系统的等效偏心质量 m 以及偏心距 e 等参数并不易测得, 在工程上应用广泛的该型振动测试仪中, 采用了测量系统总体振动值的方法来计算所需配重的质量^[3].

振动值与拟安装配重质量之间的对应关系称之为配平系数, 计算式为

$$M_0 = K_0 \times V_y \quad (8)$$

式中 M_0 为拟安装配重的质量, K_0 为配平系数, V_y 为振动值峰值. 该型振动测试仪中 V_y 的单位为 IPS (inch per second, 英寸/秒), 所以配平系数 K_0 的单位为 “g/IPS”. 在本文中定义 V_y 的单位为 m/s, 则配平系数 K_0 的单位为 “g/(m/s)”.

式(8)使该型振动测试仪在无试重的前提下得到了拟安装配重的质量^[3],所以配平系数 K_0 的取值精度决定了传统算法对配重质量的计算精度. 该型振动测试仪以发动机功率大小为参照对 K_0 进行分段估值^[3],方法粗放误差较大;新的建模配平算法采用影响系数法^[9]通过实际配平实验来测算 K_0 ,提高了取值精度.

该型振动测试仪对振动值的典型测量结果如图 8.



图 8 某型测试仪对振动的测量结果

Fig. 8 Vibration testing result of a certain tester

该测量结果图中“1734RPM”为测量振动值时的螺旋桨转速,“0.15IPS@12:52”包含了振动值 3.81×10^{-3} m/s(0.15IPS)和重点位置 6.737 rad(12:52)两个信息. 重点位置是振动系统等效质心所在的点钟位置,根据矢量合成原理和点钟位置的设置规则,轻点位置与重点位置之间的角度差为 $\pi(6:00)$,可得

$$P_0 = P_g + \pi \quad (9)$$

式中 P_0 为轻点位置(拟安装配重的位置), P_g 为重点位置.

对配平系数 K_0 的实验测算过程如下:

1) 拆下桨毂上原有的所有初始配重,进行初始测试并记录初始振动值和重点位置 P_g .

2) 运用矢量分解算法将一个确定质量的总试重 M_0 分解在轻点位置两侧与轻点位置相邻的两个标准安装位置上^[17],得到两个分试重.

3) 安装分试重后再次测试,求得新测振动值与初始振动值的差值 ΔV_y ;代入式(8)计算出 K_0 ;并对比新测试值与初始值中重点位置的变化 ΔP_g ,根据矢量合成原理,如 ΔP_g 小于 $\pi/2(3:00)$,说明配平不足应加大 K_0 ,反之说明配平过度应减小 K_0 .

4) 验算. 拆下分试重,将测算出的 K_0 和初始振动值代入式(8)计算出新的拟安装配重的质量,

再次运用矢量分解算法将其分解后安装在桨毂上.

5) 重复步骤 3) 和步骤 4) 直至振动值降至 1.27×10^{-3} m/s(0.05IPS)以下,越小越好^[3],则末次计算所采用的 K_0 就是该螺旋桨-发动机振动系统合适的配平系数.

2 实验方案与过程

实验仪器采用了航空维修业内广泛使用的 Chadwick Helmuth Vibrex 2000 型振动测试仪,该型测试仪内置的测量评价系统得到了众多航空器制造商的认可和推荐,评价结果具有权威性.

该型测试仪对振动值 V_y 的评价标准如表 1^[3].

配平实验在某飞行学院教练机群中随机抽取的一架 TB200 型飞机上直接进行真机测试,该教练机的螺旋桨为二叶航空螺旋桨. 将桨毂上原有的初始配重片全部移除,用 Vibrex 2000 型振动测试仪测得其振动信息为 1.1684×10^{-2} m/s@2.8623 rad(0.46IPS@5:28),以此作为初始值,并在此基础上分别进行传统配平和建模配平两种方法的测试. 分别记录两种方法将初始振动值配平至合格范围所需的最低配平次数和合格后的振动值,配平次数越少、配平终了时的振动值越小说明配平效果越佳.

表 1 Vibrex 2000 型振动测试仪的振动等级划分

Table 1 Classification of vibration in Vibrex 2000 vibration tester

等级评价	$V_y/10^{-3}$ (m/s)	V_y/IPS
Best	<1.27	<0.05
Very good	$1.27 \sim 2.286$	$0.05 \sim 0.09$
Good	$2.54 \sim 3.556$	$0.10 \sim 0.14$
Acceptable	$3.81 \sim 4.826$	$0.15 \sim 0.19$
Unacceptable	$5.08 \sim 30.226$	$0.20 \sim 1.19$
Warning	≥ 30.48	≥ 1.2

2.1 传统配平方法

传统配平方法就是按照 Vibrex 2000 型振动测试仪给出的配平方案安装配重;当测试仪要求安装配重的位置与标准安装位置不一致时只能将配重安装在最接近的标准安装位置上. 过程如表 2.

表2 使用传统方法在TB200型飞机上的一个配平实例
Table 2 An example of traditional balancing method on TB200 aircraft

配平次数	传统(测试仪)配平方案	实际安装方案	测试与验证结果
1	13.5 g@6.0039 rad (11:28)	13.5 g@ P_{10}	9.652×10^{-3} m/s@3.4558 rad, unacceptable
2	10.4 g@0.2269 rad (0:36)	10.4 g@ P_2	8.382×10^{-3} m/s@2.7227 rad, unacceptable
3	9.3 g@5.8643 rad (11:12)	9.3 g@ P_{10}	7.874×10^{-3} m/s@3.3859 rad, unacceptable
4	8.2 g@0.2443 rad (0:28)	8.2 g@ P_2	7.112×10^{-3} m/s@3.1067 rad, unacceptable
5	7.3 g@6.2483 rad (11:56)	7.3 g@ P_{10}	6.35×10^{-3} m/s@3.1678 rad, unacceptable
6	5.1 g@0.0262 rad (0:03)	5.1 g@ P_2	5.334×10^{-3} m/s@2.8972 rad, unacceptable
7	5.8 g@6.0388 rad (11:32)	5.8 g@ P_{10}	4.572×10^{-3} m/s@3.639 rad, acceptable

2.2 建模配平方法

建模配平算法在初次进行配平时需完成两个前置步骤,即配平模型实例化和测算配平系数 K_0 。步骤如下:

1) 配平模型实例化

如图4,测得TB200型飞机上螺旋桨桨毂特征数据为

$$\begin{cases} |P_2 P_4| = 8.66 \times 10^{-2} \text{ m} \\ |P_2 Q| = 1.12 \times 10^{-1} \text{ m} \end{cases}$$

代入式(2)即可得出该型螺旋桨桨毂上预置的各配重安装点的实际位置为

$$\begin{cases} \alpha = \arcsin \left[\frac{|P_2 P_4|}{2 \times |P_2 Q|} \right] = 0.3971 \text{ rad} \\ P_2 = \pi/2 - \alpha = 1.1737 \text{ rad} \\ P_4 = \pi/2 + \alpha = 1.9679 \text{ rad} \\ P_8 = 3\pi/2 - \alpha = 4.3153 \text{ rad} \\ P_{10} = 3\pi/2 + \alpha = 5.1095 \text{ rad} \end{cases}$$

2) 测算配平系数 K_0

根据影响系数法,拟以20 g试重评估其对该螺旋桨-发动机振动系统总体振动值的影响程度。过程为

(1) 轻点位置转化为角度形式

由初始振动信息 1.1684×10^{-2} m/s @ 2.8623 rad (0.46IPS@5:28)可知重点位置 $P_g = 2.8623 \text{ rad} (5:28)$,代入式(9)可得轻点位置为 $P_0 = P_g + \pi = 6.0039 \text{ rad} (11:28)$,也可以用点钟位置代入式(6)得到

$$h = \frac{h_c \times \pi}{6} + \frac{h_m \times \pi}{360} = \frac{11\pi}{6} + \frac{28\pi}{360} = 6.0039 \text{ rad}$$

其中 $h_c = 11$, $h_m = 28$ 。

对比实例化的该型螺旋桨的配平模型,显然

轻点位置并不在桨毂上任一预置的标准安装位置上,故此20 g试重无法直接安装。

(2) 矢量分解

以该20 g试重分解为两个分试重,分别安装在该轻点位置相邻两侧的两个标准安装位置上,步骤为,与 $P_0 = 6.0039 \text{ rad} (11:28)$ 相邻的两个配重标准安装位置分别是 P_{10} 和 P_2 。在 $\triangle BCQ$ 中, $\angle CQB = P_2 - h$,为避免 $P_2 - h < 0$,根据角度的周期性将 P_2 增加一个周期,即 2π 。则根据配平模型,有

$$\begin{cases} P_{10} = 5.1095 \text{ rad} \\ P_2 = 2\pi + 1.1737 = 7.4569 \text{ rad} \end{cases}$$

用 P_{10} 和 P_2 分别替换式(7)中的 P_4 和 P_8 ,可得3个待求角的值分别为

$$\begin{cases} \angle AQC = h - P_{10} = 6.0039 - 5.1095 = 0.8944 \text{ rad} \\ \angle CQB = P_2 - h = 7.4569 - 6.0039 = 1.453 \text{ rad} \\ \angle QAC = \pi - \angle AQC - \angle CQB = \pi + P_{10} - P_2 = 0.7942 \text{ rad} \end{cases}$$

代入式(4)和式(5),即可得出分别位于 P_{10} 和 P_2 位置上的两个分试重 M_{QA} 和 M_{QB} ,得

$$\begin{cases} M_{QA} = 25.9 \text{ g} \\ M_{QB} = 19.9 \text{ g} \end{cases}$$

矢量分解完成。

(3) 测算 K_0

将分解后得到的分试重 M_{QA} 和 M_{QB} 分别安装在桨毂 P_{10} 和 P_2 位置上,试车,测得振动值 V_y 从初始的 1.1684×10^{-2} m/s (0.46IPS) 降至 4.318×10^{-3} m/s (0.17IPS),由式(8)可计算出配平系数为

$$K_0 = M_0 \div \Delta V_y = 2715.2$$

(4) 验算 K_0

将

$$\begin{cases} K_0 = 2715.2 \\ V_y = 1.1684 \times 10^{-2} \text{ m/s} \end{cases}$$

代入式(8)可得

$$M_0 = K_0 \times V_y = 31.7 \text{ g}$$

将 31.7 g 试重分解后,得

$$M_{QA} = 41 \text{ g}, \quad M_{QB} = 31.2 \text{ g}$$

将桨毂上的所有已安装配重全部取下,重新在 P_{10} 安装最新分解得到的配重 $M_{QA} = 41 \text{ g}$ 和在

P_2 安装 $M_{QB} = 31.2 \text{ g}$ 后试车, V_y 从初始的 $1.1684 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ (0.46IPS) 降至 $7.62 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (0.03IPS), 配平前后系统重点位置的差值为 $\Delta P_g = 4.3459 - 2.9496 = 1.3963 \text{ rad}$, 小于 $\pi/2$, 理论上属于配平不足仍需继续增大 K_0 , 但由于振动值已进入“best”范围(见表 1), 已完全满足工程需要, 故可将 K_0 测算合格的判断标准确定为 ΔP_g 符合 $\pi/2 \pm \pi/12$ 即可. 则本例中测算出的配平系数为 $K_0 = 2715.2$, 测算完成.

测算过程总结如表 3.

表 3 在 TB200 型飞机上进行配平系数测算

Table 3 Evaluation of balancing coefficient on TB200 aircraft

测算次数	拟安装方案	矢量分解后实际安装方案	测试与验证结果
1	20 g@6.0039 rad (11:28)	25.9 g@ P_{10} , 19.9 g@ P_2	$4.318 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ @2.9496 rad, $\Delta V_y = 7.366 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, $K_0 = 2715.2$
2	31.7 g@6.0039 rad (11:28)	41 g@ P_{10} , 31.2 g@ P_2	$7.62 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ @4.3459 rad, best

由以上步骤可知对配平系数 K_0 的测算将以配平指标达到最优的“best”范围为目标, 故配平系数 K_0 测算完成后螺旋桨也已配平成功.

3 实验结果讨论

由表 2 可知, 采用传统方法进行配平时连续配平 7 次, 最终在两个位置安装了配重, 其中 P_{10} 和 P_2 位置分别累计安装 35.9 g 和 23.7 g, 最终的配平效果是 $4.572 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ (0.18IPS), 达到“acceptable”标准.

由表 3 可知, 采用建模方法进行配平时共配平 2 次(其中第 1 次是对配平系数 K_0 进行测算), 最终在两个位置安装了配重, 其中 P_{10} 和 P_2 位置分别安装 41 g 和 31.2 g, 最终的配平效果是 $7.62 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (0.03IPS), 达到“best”标准.

按照评判规则, 毫无疑问建模配平法的配平效果更佳.

对比两种方法的效果和配平过程可以看出:

1) 两种配平方法最终都在两个位置上安装了配重, 这是由实践中桨毂上预置的配重标准安装位置与螺旋桨实际轻点位置不一致这一客观矛盾所决定的.

2) 基于相同的初始振动值 V_y 和相同的初始轻点位置 P_0 , 传统配平方法计算后给出的拟安装配重质量明显偏小, 指示出传统配平算法采用的配平系数 K_0 偏小; 且传统配平方法是每次仅在

一个点钟位置上安装配重, 使多次连续配平成为必然.

3) 建模配平方法在初次对一个螺旋桨-发动机振动系统进行配平时需先测算该机型适用的配平系数 K_0 , 测算出合适的配平系数 K_0 后建模配平算法能够做到一次性配平成功且配平指标更优.

由于螺旋桨的横向尺寸较大, 受限于桨叶激波失速等因素, 为保证螺旋桨效率, 螺旋桨的最大允许转速不会很高, 资料显示现代飞机螺旋桨的转速一般在 1000~2500 r/min 之间^[18], 所以对航空螺旋桨振动的研究宜采用刚性转子模型. 文献[19]指出, 对同一规格、同一结构类型的旋转机械, 使用同一台测量仪器, 其影响系数基本一致. 实际上, 在航空领域特别是在航空器的持续适航阶段, 航空器上的螺旋桨或发动机等部件原则上都必须按照原型号更换^[5]; 而航空器部件都是标准件, 相同型号的航空器部件其各项参数都符合相应的公差控制^[4], 所以针对确定的机型, 其螺旋桨-发动机振动系统所对应的配平系数 K_0 也应该是确定的, 那么在一架飞机上测定的配平系数 K_0 就能够适用于同型号的所有其他飞机, 工程实践证明事实确实如此. 所以配平系数 K_0 的测算步骤也可称之为建模配平算法针对具体配平对象所进行的初始数据标定^[17], 标定完成后再进行同机型的配平时即可直接使用该配平系数而不需重复测定, 这就充分体现出相对于传统方法建模配

平算法可一次性配平成功的优越性。

4 结 论

航空器部件的特殊运行环境决定了在对其进行行动平衡配平时存在诸多限制,这对已在机械工程领域研究较为成熟的多种配平方法提出了新的挑战。建模配平算法充分考虑了航空器部件动平衡配平的特殊性,有效解决了配重安装位置与实际轻点位置之间的符合性问题,且计算出的配重质量更准确。

配平实验及工程实践表明,建模配平算法在解决诸如航空器部件等轻点位置与配重标准安装位置不一致的配平问题中有如下显著效果:

- 1) 100% 保证一次性配平成功,配平次数最少。
- 2) 配平指标可达到“best”等级,配平效果更优。

参考文献:

- [1] Yadav H K, Upadhyay S H, Harsha S P. Study of effect of unbalanced forces for high speed rotor[J]. Procedia Engineering, 2013, 64: 593-602.
- [2] 杨建刚. 旋转机械振动分析与工程应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [3] Honeywell Aerospace Incorporation. Chadwick helmuth vibrex 2000 operator's manual[R]. Ontario: Honeywell Aerospace Incorporation, 2000.
- [4] Hartzell Propeller Incorporation. Hartzell propeller overhaul and maintenance manual[R]. Piqua: Hartzell Propeller Incorporation, 2010.
- [5] Cirrus Design Incorporation. Airplane maintenance manual for the cirrus design SR20[R]. Duluth: Cirrus Design Incorporation, 2014.
- [6] 张宏兵, 康帅. 机务工作心得: 一次偶然故障带来的意外收获[EB/OL]. [2015-02-06]. <http://news.carnoc.com/list/72/72240.html>.
- [7] 刘曦泽, 段滋华, 李多民. 转子动平衡技术的研究现状和进展[J]. 广东石油化工学院学报, 2012, 22(3): 69-72.
LIU Xize, DUAN Zihua, LI Duomin. The status and progress of rotor balancing technology[J]. Journal of Guangdong University of Petrochemical Technology, 2012, 22(3): 69-72. (in Chinese)
- [8] 张禄林. 无试重的现场动平衡技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- ZHANG Lulin. Research on technology of field dynamic balancing without trial weights[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [9] 全国机械振动、冲击与状态监测标准化技术委员会. GB/T6557-2009 挠性转子机械平衡的方法和准则[S]. 北京: 中国国家标准出版社, 2009.
- [10] 顾超华, 曾胜, 罗迪威, 等. 一种机械式在线平衡头的设计与实验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(12): 151-155.
GU Chaohua, ZENG Sheng, LUO Diwei, et al. Design and tests for a mechanical type of online balancing actuator[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(12): 151-155. (in Chinese)
- [11] 樊红卫, 景敏卿, 王仁超, 等. 一种电磁式自动平衡头设计计算与响应试验[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(5): 807-811.
FAN Hongwei, JING Mingqing, WANG Renchao, et al. Design, calculation and response experiment of an automatic electromagnetic balancer[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2014, 34(5): 807-811. (in Chinese)
- [12] Du Z, Mei X S, Xu M X. Modelling and analysis of a new piezoelectric dynamic balance regulator[J]. Sensors, 2012, 12(11): 14671-14691.
- [13] 黄立权, 王维民, 苏奕儒, 等. 基于电磁自愈力的转子快速自动平衡实验[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(6): 704-708.
HUANG Liquan, WANG Weimin, SU Yiru, et al. Rotor quick automatic balance experiments based on electromagnetic self-recovery force[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2011, 31(6): 704-708. (in Chinese)
- [14] 夏青. 力学中的矢量合成与分解[J]. 山西财经大学学报, 2011, 33(2): 264.
XIA Qing. Vector synthesis and decomposition in mechanics[J]. Journal of Shanxi Finance and Economics University, 2011, 33(2): 264. (in Chinese)
- [15] 孟现召, 仲志丹. 一种精确测量螺旋桨重点位置的方法[J]. 机械工程师, 2014(3): 23-25.
MENG Xianzhao, ZHONG Zhidan. Method of accurately detecting the propeller's heavy spot[J]. Mechanical Engineer, 2014(3): 23-25. (in Chinese)
- [16] 钟一谔. 转子动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.
- [17] 中国民用航空飞行学院. 质心动态修正法进行飞机螺旋桨动平衡的方法: 中国, CN104019943A[P]. 2014-09-03.
- [18] 刘沛清. 空气螺旋桨理论及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [19] 徐兴科, 马红梅, 赵以万, 等. 刚性转子的动平衡[J]. 中国设备工程, 2002, 3(3): 36-37.

(编辑: 王碧琚)