

机组现场动平衡

曲景和 (哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

〔提要〕 本文提供了机组现场动平衡使用的仪表设备、测量的数据以及计算补偿质量及其相位的方法。供机组现场动平衡参考。

主题词 动平衡 燃气轮机动力装置 安装 现场试验

高速旋转机器的转动部件必需做动平衡,使不平衡质量限制在允许范围内。两个以上的转子经联轴节联结成了转子系。对整个转子系动平衡不但需要制造工艺装备,而且受动平衡机的限制有时很难实现,另一种方法是使转子及联轴节的不平衡质量非常小,他们叠加起来的不平衡质量也不超过转子系的允许范围。实践证明这种做法有时也是不必要的。因为,按适当的要求对转子及联轴节动平衡,然后在安装现场对转子系进行现场动平衡,同样可以保证机组安全可靠地运行。这就是本文介绍现场动平衡的目的。

一、用图1所示的仪表设备进行现场动平衡

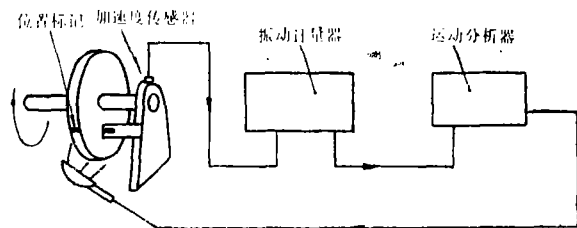


图 1

图1所示测量仪表调试好之后,利用机组的起动设备将机组开动。在某一转速(3000 r/min)下,通过振动计量器指示振动矢量的速度有效值为13mm/s,与此同时,通过

运动分析器测量出振动矢量的相位角 α_0 为 50° 。两者给出了转子系最初不平衡质量在3000r/min时引起的振动矢量 V_0 。将 V_0 按比例绘制在图2上。

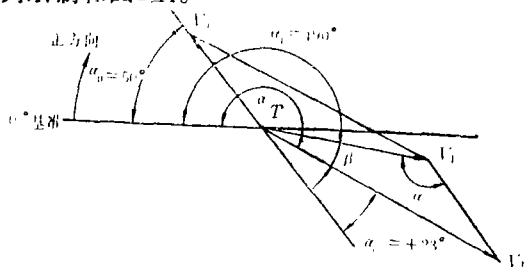


图 2

停机后,将已知的试验质量安装在转子系任意角度的已知半径上。试验质量应有足够的量值,能在转子系上引起明显的效果。假定将6g的试验质量固定在转子系上,并以上述相同的角度位置作基准点。机组重新开动,在相同转速(3000r/min)下,新测得的振动矢量速度有效值为18mm/s,并且,当转子系上的位置标记和机组上的固定标记用相位偏差调节器调成一直线时,测出新的相位角 $\alpha_1 \pm 190^\circ$ 。新的振动矢量的速度有效值18mm/s及其相位角 $\alpha_1 = 190^\circ$ 用振动矢量 V_1 表示。 V_1 是由最初不平衡质量和6g试验质量组合作用的结果。将 V_1 按上述相同的比例描绘在图2上。

在图2上,已获得了振动矢量 V_0 及 V_1 。如果用 V_T 表示在3000r/min时6g试验质量单独

作用引起的振动矢量。则振动矢量 V_1 是由振动矢量 V_0 与 V_T 合成的结果。因此, 振动矢量 V_T 可求出(见图2):

$$V_T^2 = V_0^2 + V_1^2 - 2V_0V_1\cos\alpha$$

经计算 $V_T = 29\text{mm/s}$

振动矢量 V_T 的相位角 α_T 用下式计算(见图2): $\alpha_T = 190^\circ + \beta$

$$\text{由 } V_0/\sin\beta = V_T/\sin\alpha$$

得 $\beta = 17^\circ$

$\alpha_T = 207^\circ$, 试验质量就固定在这个位置上。

由于振动矢量的速度有效值 V_T 的大小是与6g试验质量 M_T 成比例的。同理, 振动矢量速度有效值 V_0 的大小也与最初不平衡质量 M_0 成比例。因此, 确定最初不平衡质量 M_0 是很容易的。而进一步确定补偿质量 M_C 及其相位也不难。

由上述可知:

$$V_0/M_0 = V_T/M_T$$

最初不平衡质量 M_0 用下式给出:

$$M_0 = M_T \cdot V_0/V_T \quad (\text{用 } V_0/V_T \text{ 做比例系数})$$

$$M_0 = 2.7\text{g}$$

$$\text{补偿质量 } M_C = M_0 = 2.7\text{g}$$

补偿质量固定相位角 α_c 用下式给出:

$$\alpha_c = -\alpha_T + \alpha_0 + 180^\circ$$

$$= +23^\circ \text{ 相对试检质量固定位置而言。}$$

+23°角表示补偿质量应固定在从试验质量固定位置算起正方向(机组旋转方向)旋转23°角的位置上。而且其固定半径与试验质量的固定半径相同。

转子系用此种方法平衡之后, 其振动水平可通过测量装置进行重复校对。

有时, 应用一次这种平衡法转子系可能没有完全平衡好。当剩余的不平衡高得不能令人接受时, 应此种平衡方法反复进行, 直到取得令人满意的结果为止。

二、用图3所示仪器进行现场动平衡

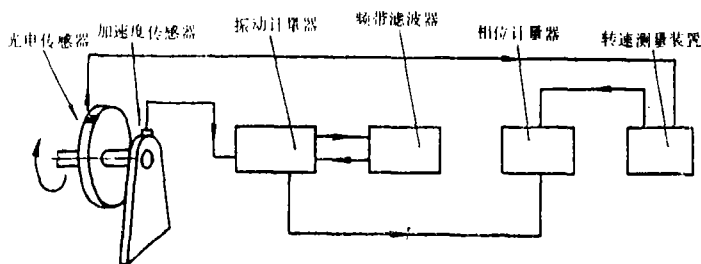


图 3

图3所示的仪器调试好之后, 利用机组的起动设备进行起动和升速。通过转速测量装置显示转子系的转速。假定在转速1500r/min时, 振动计量器显示的振动矢量速度有效值 $V_0 = 3.8\text{mm/s}$, 与此同时, 相位计量器指示的相位角 $\alpha_0 = 120^\circ$ 。记录好数据就停机。

将4g试验质量固定在转子系的已知半径上。当机组再次运行在1500r/min时, 新的

振动矢量速度有效值 $V_1 = 2.1\text{mm/s}$, 相位角 $\alpha_1 = 40^\circ$ 。

与上述方法完全相同, 将振动矢量 V_0 及 V_1 按比例绘在矢量图上(图4)。

下面进行的计算方法和步骤与上述完全相同。

从图4中计算 $V_T = 4\text{mm/s}$ 。同时, $\alpha_T = 330^\circ$ 。

最后, 确定补偿质量大小及其固定位置。

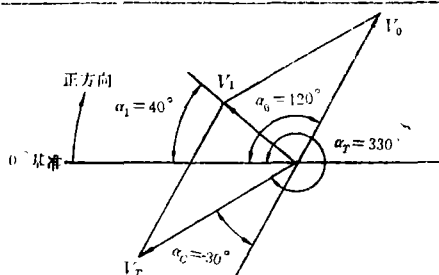


图 4

最初不平衡质量 M_0 由下式给出:

$$M_0 = \frac{V_0}{V_T} M_T = 3.8 \text{ g}$$

补偿质量 $M_C = M_0 = 3.8 \text{ g}$

补偿质量的固定位置由角 α_C 给出:

$$\alpha_C = -\alpha_T + \alpha_0 + 180^\circ$$

$\alpha_C = -30^\circ$ 相对试验质量固定位置而言。

-30° 表示补偿质量应固定在从试验质量固定位置算起向负方向(与转子系旋转方向相反)转 30° 的位置上。其半径与试验质量固定半径相同。

补偿质量固定好之后, 在所有运行范围内, 机组的振动水平都是令人满意的, 则, 动平衡结束。否则, 应将此种平衡方法进行多次, 直到取得令人满意的结果为止。

三、完全利用机组上的仪表设备进行现场动平衡

现场动平衡所使用的仪表全部是机组上的监控仪表, 则更加简便易行。下面介绍仅仅利用机组上的振动测量仪表和转速测量仪表进行现场动平衡的方法。

应用这个方法需要对机组进行四次试运转。而每次试运转都必须在机组转速监控仪表指示出同一种转速值时, 通过机组的振动监控仪表记录下此时的振动值。转速的选取应在此种转速下进行四次试运转时机组的振动小于允许值为基准。还应指出, 除了首次试运转外, 而后依次进行的试运转, 分别

将试验质量安装在半径相同而相位差 90° 的三种不同位置1、2、3上(见图5)。

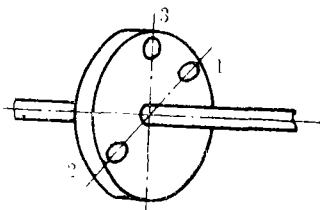


图 5

利用机组上的起动设备进行首次试运转。在转速指示为 1400 r/min 时, 振动测量仪表显示的振动矢量速度有效值 $V_0 = 3.5 \text{ mm/s}$ 。 V_0 是由转子系最初不平衡质量在转速 1400 r/min 时引起的振动矢量的速度有效值。记录好数据就停机。

将 10 g 试验质量固定在转子系的位置1上(见图5)。再次试运转, 在 1400 r/min 的同样转速下, 测得振动矢量速度有效值 $V_1 = 8.5 \text{ mm/s}$, V_1 是由 10 g 试验质量与最初不平衡质量组合作用的结果。记录好数据就停机。

在第三次试运转前, 将 10 g 试验质量围绕转子旋转 180° , 固定在相同半径的位置2上。

进行第三次试运转, 在 1400 r/min 的同样转速下, 测得振动矢量速度有效值 $V_2 = 2.7 \text{ mm/s}$ 。 V_2 是由 10 g 试验质量固定在位置2时与最初不平衡质量组合作用的结果。记录好数据停机。

进一步需要解决的问题是根据上述试运转测得的振动矢量速度有效值如何绘制矢量图。并通过图解法计算出补偿质量的大小及相位。

首先对振动矢量 V_1 和 V_2 进行分析。因为, V_1 、 V_2 是由最初不平衡质量和固定在相互成 180° 的1、2两个位置(见图5)上试验质量组合作用的结果。如果用 V_{T1} 和 V_{T2} 表示 10 g 试验质量分别固定在图5所示的位置1、2上时在 1400 r/min 运行中单独作用引起的振动矢量速度有效值。则 V_{T1} 、 V_{T2} 作用在一条

直线上,且数值相等($V_{T1}=V_{T2}=V_T$),方向相反。振动矢量 V_1 是由振动矢量 V_0 和 V_{T1} 合成的结果;振动矢量 V_2 是由振动矢量 V_0 和 V_{T2} 合成的结果。振动矢量 V_1 和 V_2 的合成示意图如图6所示。

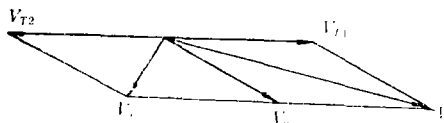


图 6

由图6可见,合成 V_1 和 V_2 的两个平行四边形是完全相同的。 V_0 是两个相同平行四边形的共用边; V_T 是两个相同平行四边形的另一个边; V_1 、 V_2 是两个相同平行四边形的对角线。

上述三次试运转分别给出了振动矢量速度有效值 V_0 、 V_1 、 V_2 的大小。然而,没有给出振动矢量的相位角,所以,振动矢量还不能确定。不管怎样,可以分别以 V_1 、 V_2 的数值大小为半径按比例地描绘出两个同心圆(见图7)。

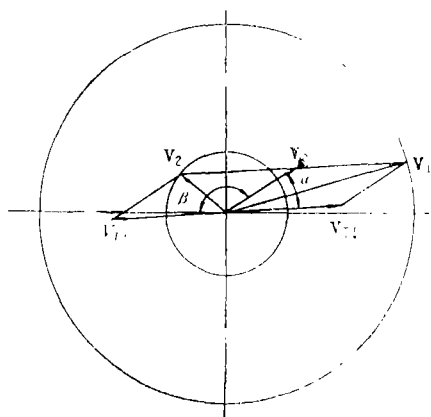


图 7

进一步描绘矢量图。将半径 V_1 、 V_2 分别画在图7中每个圆的任意半径上。在图6中已知。两个相同平行四边形是以半径 V_1 、 V_2 作对角线构成的。为此,连接半径 V_1 和 V_2 的端点,找出此线段的中点 V_0 。再连接圆心和 V_0 做两个相同平行四边形的共用边。

至此,在图7中已看出:如果半径 V_1 和 V_2 的夹角确定了,长度等于 V_0 的共用边也就产生了。由上述已知,图7中每个平行四边形的另一边用 V_T 表示。而 V_0 与 V_{T1} 的夹角用 α 表示, V_0 与 V_{T2} 的夹角用 β 表示。图7不仅给出了所有振动矢量按比例的正确表示方式,而且存在着下列关系:

$$V_2^2 = V_{T2}^2 + V_0^2 - 2V_{T2}V_0\cos\alpha \quad (1)$$

$$V_1^2 = V_{T1}^2 + V_0^2 - 2V_{T1}V_0\cos\beta \quad (2)$$

$$\text{且 } \cos\beta = -\cos\alpha$$

$$\therefore V_1^2 = V_{T1}^2 + V_0^2 + 2V_{T1}V_0\cos\alpha \quad (3)$$

将式(1)与式(3)相加得:

$$V_T = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 - 2V_0^2}{2}} = 6\text{mm/s}$$

将式(3)减去式(1)得:

$$\cos\alpha = \frac{V_1^2 - V_2^2}{4V_TV_0} \quad \alpha = 39^\circ$$

但是,当 $\cos\alpha = \cos(-\alpha)$ 时,对于最初不平衡质量引起的振动矢量 V_0 位于 $V_{T2}-V_{T1}$ 轴线的上边或者下边是不明显的。也就是最初不平衡质量 M_0 位于试验质量 M_T 固定位置1和2连接线的上边或者下边是不明显的。有必要将10g试验质量固定在位置3上进行第四次试运转。并在1400r/min时给出振动矢量速度有效值 V_3 (严格地讲获得振动矢量 V_3 不是必须的)。

如果振动矢量速度有效值 V_3 比单独由试验质量引起的 V_T 值大时,则 V_0 将位于 $V_{T2}-V_{T1}$ 轴线的上边(用实线表示在图8上)。如果 V_3 的数值比 V_T 小, V_0 位于 $V_{T2}-V_{T1}$ 轴线下边。(图8中虚线)。

将10g试验质量固定在位置3上。在机组运行到1400r/min时测出振动矢量速度有效值 $V_3 = 8\text{mm/s}$ 。 $V_3 > V_T$,所以, V_0 位于 $V_{T2}-V_{T1}$ 轴线的上边。由于 V_0 与 V_{T1} 的夹角 $\alpha = 39^\circ$,所以,最初不平衡质量位于从位置1朝位置3方向旋转 39° 的位置上。补偿质量必须固定在从位置2向下旋转(逆时针方向) 39° 的位置上。而且,固定半径与试验质量固定半径完全相同。

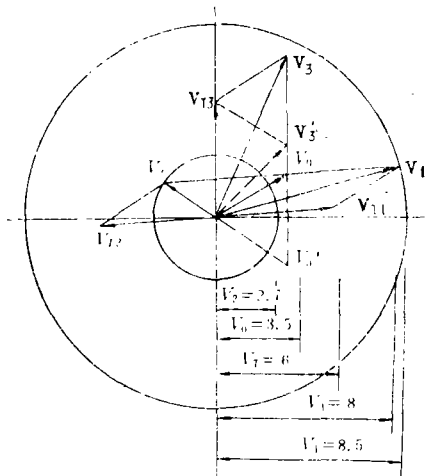


图 8

补偿质量的数量如前所述:

$$M_C = M_0 = (V_0/V_T) \cdot M_T = 5.8g$$

将补偿质量固定好后, 机组在其所有转速范围内运行时, 会有令人满意的振动结果。当出现不能令人接受的振动结果时, 应检查试验质量固定位置是否出现错误, 测量数据是否正确, 补偿质量固定位置是否正确以及计算过程中是否产生错误。然后决定是否将此种平衡方法再重复进行一次。

参 考 文 献

SK15HE燃气轮机发电机组现场调试资料。

On-Site Dynamic Balancing of Turbo-Generator Sets

Qu Jinghe

(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

Abstract

Presented in this paper are a description of instrumentation used for on-site dynamic balancing of turbo-generator sets, measured data and a method for calculating the mass and phase for compensation.

Key Words: dynamic balancing, gas turbine power installation, installation, on-site testing

* ~~~~~ *

§ 新产品、新技术信息 §

* ~~~~~ *

R90—1 DG—10.3/39—1 型硫酸余热锅炉 是硫酸工业先进而实用的节能设备, “具有国内同类炉型的先进水平”。**主要技术参数:** 蒸发量 10.5t/h; 过热蒸汽压力 3.82MPa; 蒸汽温度 450℃; 给水温度 104℃; 热回收率 56.65%(设计值)。特点: 全自然循环、W形烟道、膜式水冷壁、双层护板、自制冷凝水喷水减温; 性能稳定、负荷适应性强、操作简便; 成功地解决了磨损和腐蚀问题; 制造质量好, 运行安全可靠; 密封与保温良好, 余热回收率高(实际平均达63.9%)。从1980年至今, 已为全国各化工厂、磷肥厂提供了 5, 5.5, 8, 10.5, 12, 12.5和14t/h 的硫酸余热锅炉28台, 其中22台已投运。资中银山磷肥厂 10.5t/h 炉, 1986年年增收53.74万元。

承接设计, 产品销售服务。

(需要者请与编辑部联系)