

⑭
92-96

现场转子双面动平衡的 单双试重组合测试法

TH113.25

The Single and Two Weights United Testing Method
for the Double-Face Dynamic Balance of the Spot Rotator

唐一科
Tang Yike

顾乾坤
Gu Qiankun

(重庆大学机械工程一系, 重庆, 630044)

A

摘要 提出了一种采用单双试重组合的, 现场测试刚性转子双面动不平衡量的新方法。并介绍了该方法的基本原理和测试程序。通过模拟和对比实验, 还验证了该方法能明显提高转子不平衡量的现场测试精度。

关键词 刚性转子; 现场测试; 双面动平衡; 试重法

中国图书资料分类法分类号 TH113.25

ABSTRACT A new united method of the single and two weights was proposed to test the double-face dynamic balance of the rigid rotator in the field. The basic principles of the method and the testing programs were discussed. The simulating and comparable test verified that the new method could obviously increase the test precision of the unbalance of the rotators.

KEYWORDS rigid rotator; field test; double-face dynamic balance; testing weight method

0 前 言

随着现代机器产品向高速、高效、高精度方向发展, 对机器产品动平衡质量的要求也不断提高。对许多机器来说, 不仅需要在制造过程中对零部件进行精密平衡, 而且需要对生产运行状态作现场监视和整机现场动平衡。例如, 精密宽砂轮无心外圆磨床, 精密皮革削匀机, 各型风机和重要发电设备等。目前, 整机现场动平衡正作为动平衡技术的重要分支逐步进入生产领域, 在提高设备的生产效率和使用寿命等方面发挥重要作用。近年来, 不少学者开始注意深入研究整机现场动平衡方法和仪器, 并取得了一些研究成果^[1~3], 但还远远不能满足生产部门提出的各种要求, 尤其是对多校正面平衡方法和仪器的要求。对此, 本文提出了一种采用单、双试重组合的, 现场测算刚性转子双面动不平衡量的新方法。经过模拟和对比实验, 证明该方法对提高转子不平衡量的现场测试精度和进一步简化测试过程均有良好的工程效果。如进一步利用单片微机, 则可研制出一种新型智能动平衡仪, 为转子现场动平衡提

* 收文日期 1993-08-22

供新的手段。

1 基本原理

如图所示为实际安装条件下的机器刚性转子现场测试示意图。设校正面 1、2 上有原始不平衡量 \bar{G}_{10} 、 \bar{G}_{20} ，并用复数表示为 $\bar{G}_{10} = G_{10}e^{j\theta_{10}}$ 、 $\bar{G}_{20} = G_{20}e^{j\theta_{20}}$ 。设校正面 2 上的不平衡量对校正面 1 的影响系数为 K_{12} ，则可得校正面 1 上的当量单面不平衡量 \bar{G}_1 为

$$\bar{G}_1 = \bar{G}_{10} + K_{12}\bar{G}_{20} \quad (1)$$

同理可得校正面 2 上的当量单面不平衡量 \bar{G}_2 为

$$\bar{G}_2 = \bar{G}_{20} + K_{21}\bar{G}_{10} \quad (2)$$

式中 K_{21} 为校正面 1 的不平衡量对校正面 2 的影响系数。

如果在转子校正面 1、2，半径为 R ，角度为 β 的位置上，各加一已知试重 G ，则仿(1)、(2)式可得

$$\bar{G}'_1 = \bar{G}_{10} + K_{12}\bar{G}_{20} + (1 + K_{12})\bar{G} \quad (3)$$

$$\bar{G}'_2 = \bar{G}_{20} + K_{21}\bar{G}_{10} + (1 + K_{21})\bar{G} \quad (4)$$

再假定 \bar{G}_1 、 \bar{G}_2 存在时，在测点 1、2 测得的振动幅值为 A_{10} 、 A_{20} ； \bar{G}'_1 、 \bar{G}'_2 存在时，在测点 1、2 测得的振幅值为 A_1 、 A_2 ，则在线性振动的假设条件下，可得到

$$\frac{A_1}{A_{10}} = \left| \frac{\bar{G}'_1}{\bar{G}_1} \right|; \quad \frac{A_2}{A_{20}} = \left| \frac{\bar{G}'_2}{\bar{G}_2} \right| \quad (5)$$

将(1)、(2)、(3)、(4)式代入(5)式，即得到

$$\frac{A_1^2}{A_{10}^2} = \left| 1 + \frac{(1 + K_{12})\bar{G}}{\bar{G}_{10} + K_{12}\bar{G}_{20}} \right|^2; \quad \frac{A_2^2}{A_{20}^2} = \left| 1 + \frac{(1 + K_{21})\bar{G}}{\bar{G}_{20} + K_{21}\bar{G}_{10}} \right|^2$$

将上式展开可得

$$\frac{A_1^2}{A_{10}^2} = 1 + \frac{G^2(1 + K_{12})^2}{X_1^2 + Y_1^2} + \frac{2G(1 + K_{12})(X_1\cos\beta_1 + Y_1\sin\beta_1)}{X_1^2 + Y_1^2}$$

$$\frac{A_2^2}{A_{20}^2} = 1 + \frac{G^2(1 + K_{21})^2}{X_2^2 + Y_2^2} + \frac{2G(1 + K_{21})(X_2\cos\beta_2 + Y_2\sin\beta_2)}{X_2^2 + Y_2^2}$$

式中

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= G_{10}\cos\theta_{10} + K_{12}G_{20}\cos\theta_{20} \\ Y_1 &= G_{10}\sin\theta_{10} + K_{12}G_{20}\sin\theta_{20} \\ X_2 &= G_{20}\cos\theta_{20} + K_{21}G_{10}\cos\theta_{10} \\ Y_2 &= G_{20}\sin\theta_{20} + K_{21}G_{10}\sin\theta_{10} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

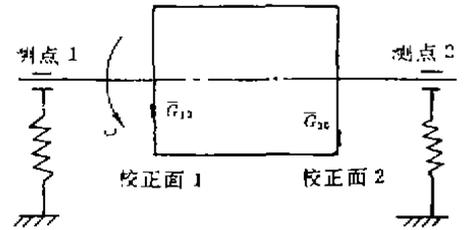
解(6)式的联立方程组，即可得到转子原始不平衡量的计算公式如下：

$$G_{10} = \left\{ \frac{D_1^2 + D_2^2}{M^2} \right\}^{1/2}, \quad \theta_{10} = \text{tg}^{-1} \left\{ \frac{D_2}{D_1} \right\} \quad (7)$$

$$G_{20} = \left\{ \frac{E_1^2 + E_2^2}{M^2} \right\}^{1/2}, \quad \theta_{20} = \text{tg}^{-1} \left\{ \frac{E_2}{E_1} \right\} \quad (8)$$

式中

$$D_1 = X_1 - K_{12}X_2$$



转子现场测试示意图

$$\left. \begin{aligned} D_2 &= Y_1 - K_{12}Y_2 \\ E_1 &= X_2 - K_{21}X_1 \\ E_2 &= Y_2 - K_{21}Y_1 \\ M &= 1 - K_{12}K_{21} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

显然,问题的关键在于如何用试验方法获取(9)式中各特征参数 $X_1, Y_1, X_2, Y_2, K_{12}, K_{21}$ 的值。下节即对此作详细讨论。

2 测试方法

在现场测试中,令 $i = 1, 2, 3$ 时,分别选取 $\beta_i = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ 。取 $\beta_1 = 0^\circ$ 时,分别在转子1,2校正面,半径 R ,角度为 0° 的位置上各加一已知试重 G ,在转子正常运转状态下,分别测得支承1,2上的振动幅值为 A_{11}, A_{21} ;用同样方法,当 $\beta_2 = 120^\circ$ 时,测得相应振动幅值 A_{12}, A_{22} ; $\beta_3 = 240^\circ$ 时,测得相应振动幅值 A_{13}, A_{23} ,于是由前述可得

$$\begin{aligned} \frac{A_{i1}^2}{A_{i0}^2} &= 1 + \frac{G^2(1+K_{12})^2}{X_1^2 + Y_1^2} + \frac{2G(1+K_{12})X_1}{X_1^2 + Y_1^2} \\ \frac{A_{i2}^2}{A_{i0}^2} &= 1 + \frac{G^2(1+K_{12})^2}{X_1^2 + Y_1^2} + \frac{2G(1+K_{12})(-\frac{1}{2}X_1 + \frac{1}{2}\sqrt{3}Y_1)}{X_1^2 + Y_1^2} \\ \frac{A_{i3}^2}{A_{i0}^2} &= 1 + \frac{G^2(1+K_{12})^2}{X_1^2 + Y_1^2} + \frac{2G(1+K_{12})(-\frac{1}{2}X_1 - \frac{1}{2}\sqrt{3}Y_1)}{X_1^2 + Y_1^2} \end{aligned}$$

由此可得

$$\frac{A_{i1}^2 + A_{i2}^2 + A_{i3}^2}{3A_{i0}^2} = 1 + \frac{G^2(1+K_{12})^2}{X_1^2 + Y_1^2} \quad (10)$$

$$\frac{A_{i2}^2 - A_{i1}^2}{A_{i3}^2 - A_{i1}^2} = \frac{\sqrt{3}Y_1 - 3X_1}{-\sqrt{3}Y_1 - 3X_1} \quad (11)$$

同理可得

$$\frac{A_{i1}^2 + A_{i2}^2 + A_{i3}^2}{3A_{i0}^2} = 1 + \frac{G^2(1+K_{21})^2}{X_2^2 + Y_2^2} \quad (12)$$

$$\frac{A_{i2}^2 - A_{i1}^2}{A_{i3}^2 - A_{i1}^2} = \frac{\sqrt{3}Y_2 - 3X_2}{-\sqrt{3}Y_2 - 3X_2} \quad (13)$$

从(10)~(13)式,解得

$$X_1^2 + Y_1^2 = \frac{G^2(1+K_{12})^2}{\varepsilon_1 - 1}$$

$$Y_1 = \sqrt{3}S_1X_1$$

$$X_2^2 + Y_2^2 = \frac{G^2(1+K_{21})^2}{\varepsilon_2 - 1}$$

$$Y_2 = \sqrt{3}S_2X_2$$

式中

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{3A_{i0}^2} \sum_{i=1}^3 A_{i1}^2, \quad S_1 = \frac{A_{i2}^2 - A_{i3}^2}{2A_{i1}^2 - A_{i2}^2 - A_{i3}^2}$$

$$e_2 = \frac{1}{3A_{20}^2} \sum_{i=1}^3 A_{2i}^2; \quad S_2 = \frac{A_{12}^2 - A_{23}^2}{2A_{21}^2 - A_{22}^2 - A_{23}^2}$$

进一步可解得

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= G(1 + K_{12})(e_1 - 1)^{-1/2} \cos \alpha_1 \\ Y_1 &= G(1 + K_{12})(e_1 - 1)^{-1/2} \sin \alpha_1 \\ X_2 &= G(1 + K_{21})(e_2 - 1)^{-1/2} \cos \alpha_2 \\ Y_2 &= G(1 + K_{21})(e_2 - 1)^{-1/2} \sin \alpha_2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \operatorname{tg}^{-1}(\sqrt{3} S_1) \\ \alpha_2 &= \operatorname{tg}^{-1}(\sqrt{3} S_2) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

此外,根据线性振动理论,振幅与不平衡量之间可建立如下关系式,即

$$A_{10} = K_1 |\bar{G}_{10} + K_{12} \bar{G}_{20}| \quad (16)$$

又因 $|\bar{G}_{10} + K_{12} \bar{G}_{20}|^2 = X_1^2 + Y_1^2$, 故可得

$$A_{10}^2 = K_1^2 (X_1^2 + Y_1^2)$$

代入(16)式,可得

$$K_{12} = \left(\frac{A_{11}^2 + A_{12}^2 + A_{13}^2 - 3A_{10}^2}{3K_1^2 G^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \quad (17)$$

同理可得

$$K_{21} = \left(\frac{A_{21}^2 + A_{22}^2 + A_{23}^2 - 3A_{20}^2}{3K_2^2 G^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \quad (18)$$

式中 K_1, K_2 称为校正面 1, 2 上的不平衡量对测点 1, 2 振动幅值的影响系数。

为了求得 K_1, K_2 , 有必要补充一次测试, 现假定仅在下校正面, 半径 $R, 0^\circ$ 位置, 加一已知试重 G (单试重), 测得支承测点 1 的振动幅值为 A_{1s} , 则有

$$A_{1s} = K_1 |\bar{G}_{10} + K_{12} \bar{G}_{20} + \bar{G}|$$

将上式两边同时平方后除以 A_{10}^2 , 即可解得

$$K_1 = [-A_{10} \cos \alpha_1 - (A_{1s}^2 - A_{10}^2 \sin^2 \alpha_1)^{\frac{1}{2}}] / G \quad (19)$$

同理可得

$$K_2 = [-A_{20} \cos \alpha_2 - (A_{2s}^2 - A_{20}^2 \sin^2 \alpha_2)^{\frac{1}{2}}] / G \quad (20)$$

其中 A_{2s} 为仅在下校正面 2, 半径 $R, 0^\circ$ 位置上加试重 G 时, 所测得的测点 2 上的振动幅值。

3 实验举例

从以上分析结果看出, 现场测取刚性转子双面动不平衡量时, 主要是利用对转子在几种状态下的支承振动幅值测试结果进行计算处理。

为了验证分析结果的正确性, 本文首先选用标准转子系统进行模拟实验, 该标准转子系统由一根经动平衡机精密平衡过的转子及其支承和驱动电机所组成。此时, 其残余不平衡量近似为零, 人为在转子两校正面的某一半径 R 上分别加一已知不平衡重, 计算所得结果与预加模拟不平衡量进行比较如表 1。

表 1 计算结果与预加模拟不平衡量的比较

	G_{10}/g	$\theta_{10}/(^{\circ})$	G_{20}/g	$\theta_{20}/(^{\circ})$
模拟不平衡	3.91	360	3.94	360
本文方法结果	3.92	358.24	3.97	358.54
误差(%)	0.26	0.48	0.76	0.40

表 2 为对某型增压器转子,采取本文方法测试计算结果与西德 R3B-100 型动平衡机的测试结果比较情况。

表 2 测试计算结果与西德 R3B-100 型机的测试结果比较

	G_{10}/g	$\theta_{10}/(^{\circ})$	G_{20}/g	$\theta_{20}/(^{\circ})$
R3B-100 型	4	296	3.8	288
本文方法结果	3.937	298.85	3.813	277.21

从以上两例看出,本文方法的测试计算精度是可以信赖的。与现有的纯单试重法和纯双试重法相比,在提高精度和简化测试程序上均产生了良好的工程应用效果。

4 结 论

本文从新的角度,推导出了一种解决刚性转子现场双面动平衡问题的新方法,经模拟和对比实验验证,该方法具有较高的测算精度。

采用单、双试重组合法进行振动测试,克服了利用转子结构参数求系统影响系数的不准确性,提高了现场动平衡的振幅“一次降低率”,较纯单试重而言,还大大简化了测试程序。

将本文的测试和计算过程,用单片微机予以实现,即可研制出便携式智能现场动平衡仪,为各型刚性转子的现场动平衡提供新的手段。

参 考 文 献

- 1 张济生. 刚性转子现场平衡的实用方法. 试验机与材料实验, 1987, (3)
- 2 唐一科等. 机器刚性转子的 ZS 动平衡法原理及应用. 重庆大学学报, 1990, 13(3): 27
- 3 周士炎等. 解决刚性转子左右校正面影响问题的一个新途径. 中国仪器仪表学会试验机学会动平衡技术年会论文集, 1981
- 4 唐一科. 用振幅测量原理研究机器刚性转子现场双面动平衡问题的新方法. 重庆大学学报, 1989, 12(4): 46
- 5 Thomson W T. Theory of Vibration with Applications. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, 1972
- 6 钟一涛等. 转子动力学. 北京: 清华大学出版社, 1987
- 7 叶能安等. 动平衡原理与动平衡机. 华中工学院出版社, 1985
- 8 王汉英等. 转子平衡技术与平衡机. 机械工业出版社, 1988