

用于滴灌的碟式分离机的动平衡

孙步功¹, 龚俊², 辛舟²

(1. 甘肃农业大学 工学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对滴灌用黄河水泥沙碟式分离机的振动问题, 采用影响系数法进行了分离机整机全速动平衡. 转鼓装在分离机的平衡试验台上, 在上、下轴承双测点进行平衡. 当测点数 N 大于校正面数 M 时, 方程为非正规复数线性方程组. 采用共轭转置矩阵左乘原方程, 求得所对应的复数正规方程组. 在复数域用列主元消去法求解, 在求得各校正面应加配重的复数结果后再转换成矢量输出, 通过编程求得校正重量的最优近似解. 分析了利用最小二乘法求解矛盾方程组最优近似解的问题. 结果表明, 用影响系数法对碟式分离机在工作转速下进行整机平衡, 平衡后分离机振动大幅度下降, 运转趋于平稳, 实际效果明显.

关键词: 碟式分离机; 滴灌; 振动; 影响系数法; 动平衡

中图分类号: TQ051.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-6254(2008)02-0061-04

Dynamic balance of dish separator used for drip irrigation

SUN Bu-gong¹, GONG Jun², XIN Zhou²

(1. College of Engineering Gansu Agricultural University Lanzhou Gansu 730070, China; 2. College of Mechanical Electronic Engineering Lanzhou University of science and Technology Lanzhou Gansu 730050, China)

Abstract: To solve the problem of vibration in the disc separator for drip irrigation of Yellow River water-mud, the calculation and test of whole machine full speed dynamic balance of disc separator are carried out based on the influence coefficient method. The separator is fitted at the testing rig with test spots on the top bottom of bearing. The equation is the informal complex linear equation when the number of testing spots is more than that of correction planes. Conjugate transpose matrix equation is multiplied by the original equation to get the corresponding complex equations. The new equation is resolved by the method of main element elimination in the complex field. The equalized complex numbers in all adjusting planes are transformed into vectors. The approximate optimization solution of equalizing weight is calculated by programming. The specialties of resolving approximate optimization solution of inconsistent equations by the least square method are analyzed. The result shows that the balance based on method of influence coefficient method has better effects, which make the separator vibration restrained and operating effectively.

Key words: disc separator; drip irrigation; vibration; influence coefficient method; dynamic balance

碟式分离机属高速旋转机械, 其转子工作时的振动, 会导致轴承等传动件寿命下降, 带来噪声, 机器运行状态恶化, 影响生产, 严重时发生事故, 造成

人员伤亡, 因此必须进行动平衡校正^[1-3]. 目前国内普遍采用的方法是: 使用动平衡机进行不平衡量测量; 根据测量结果进行钻削或铣削完成去重加工, 直

收稿日期: 2008-01-16

基金项目: 国家教育部研究基金资助项目 (008K-003)

作者简介: 孙步功 (1971-), 男, 甘肃通渭人, 副教授, 博士研究生 (sunbg@gsau.edu.cn), 主要从事分离技术与装备的研究.

龚俊 (1963-), 男, 四川中江人, 教授, 博士生导师 (gong@lut.cn), 主要从事固液分离理论及设备的研究.

至达到精度要求为止. 动平衡工艺对操作工人的依赖性强, 生产效率低下, 平衡精度不高. 而且转子上的切槽数较多, 影响转子质量. 国外公司有全自动一体化动平衡校正机, 虽然平衡精度高, 但对不同规格的转子适应性差^[4]. 考虑到目前国内外实际情况, 笔者提出了一种新的平衡校正方法. 在计算机上使用动平衡综合程序, 快捷地完成各项计算以及校正质量合成等任务, 大大提高了计算精度和速度. 实现整机现场全速动平衡.

1 分离机结构与测点布置

1.1 分离机结构

兰州理工大学自行研制的喷嘴排渣碟式分离机结构如图 1 所示^[5].

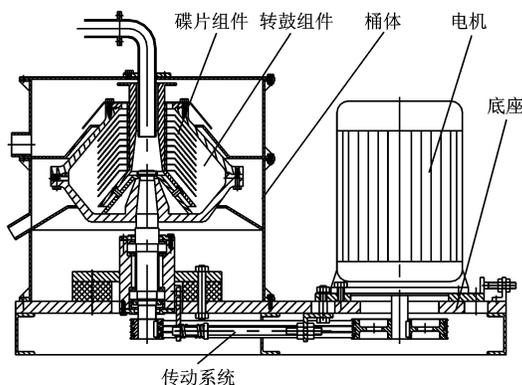


图 1 碟式分离机结构

Fig 1 Structure diagram of dish separator

1.2 测点布置

碟式分离机转鼓属挠性转子, 采用影响系数法进行整机平衡. 转鼓装在分离机本机改制的平衡试验台上校正, 理论上测振传感器可装在如图 2 所示的 3 个测点位置, 但实际上转鼓顶端测点存在很大的几何不同心度而不能利用, 因而在上、下轴承双测点进行平衡^[6].

2 计算原理

转子支承系统在一定的转速和支承条件下, 若测点数为 N 而校正面数为 M , 求得影响系数后按线性假定条件, 在理想平衡条件下各测点的剩余振动为 $0^{[7]}$, 则有:

$$\sum_{j=1}^M K_{ij} G_j + A_i = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

式中 i 为测点号; j 为校正面号; K_{ij} 为 j 平面加试重对 i 测点的影响系数; A_i 为 i 测点的原始振动值; G_j

为 j 平面应加的平衡配重量, K_{ij} , A_i , G_j 为矢量.

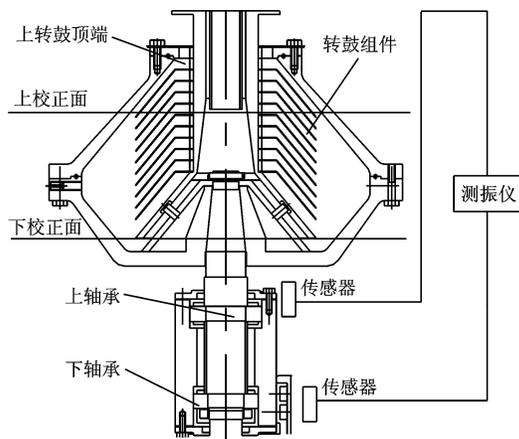


图 2 动平衡测试示意图

Fig 2 Sketch dynamic balance test

为方便求解, 将式 (1) 由计算机自动换算成复数形式:

$$\sum_{j=1}^M [(K_{ijc} + K_{ijs}) (G_{jc} + iG_{js}) + (A_{ic} + iA_{is})] = 0 \quad (2)$$

式中 K_{ijc} , G_{jc} , A_{ic} 为相应复数的实部; K_{ijs} , G_{js} , A_{is} 为相应复数的虚部.

将式 (2) 写成矩阵形式

$$KG + A = 0 \quad (3)$$

求解矩阵方程 (3) 时, 如果测点数与校正面数相等 ($N = M$), 则式 (3) 为正规复数线性方程组, 此时可求得校正重量 G 的一组精确解; 另一种情况是选定的测点数大于校正面数 ($N > M$), 此时方程 (3) 为矛盾方程, 不存在精确解, 但可用最小二乘法求其最优近似解, 使矛盾方程的各式近似成立, 对此下面重点予以讨论.

设平衡配重的某一组近似解为

$$G_j = G_{jc} + iG_{js} \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3) 后求得各方程两边之差, 该值即为各测点处的剩余振动, 表示为

$$R_i = R_{ic} + R_{is} = \sum_{j=1}^M [(K_{ijc} + K_{ijs}) (G_{jc} + iG_{js})] + (A_{ic} + iA_{is}) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

式中 R_i 为 i 点的剩余振动; R_{ic} , R_{is} 分别为其实部与虚部. 展开后为

$$\begin{aligned} R_{ic} &= \sum_{j=1}^M (K_{ijc} G_{jc} - K_{ijs} G_{js}) + A_{ic} \\ R_{is} &= \sum_{j=1}^M (K_{ijs} G_{js} - K_{ijc} G_{jc}) + A_{is} \end{aligned} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

按最小二乘法准则,若平衡配重 $G_j = G_{j_c} + G_{j_s}$ 的一组值能使各测点的剩余振动的平方和 S 达到最小值,即

$$S(G_{j_c}, G_{j_s}) = \sum_{i=1}^N |R_i|^2 = \sum_{i=1}^N (R_{ic}^2 + R_{is}^2) \quad (7)$$

该组值即为式 (4) 的最优近似解,这时满足

$$\frac{\partial S}{\partial G_{j_c}} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial G_{j_s}} = 0 \quad (8)$$

由式 (8) 可得极值条件

$$\sum_{j=1}^M \left(\sum_{i=1}^N K_{ij} K_{ij} \right) G_j + \sum_{i=1}^N K_{ij} A_i = 0 \quad (9)$$

式中 K_{ij} 为 K_{ij} 的共轭复数。

上式即为具有 M 个未知复数 M 个方程的复数正规方程组,它的解就是矛盾方程组 (3) 的最优近似解。式 (9) 可简写为

$$K^T K G + K^T A = 0 \quad (10)$$

式中 K^T 为复数矛盾方程组 (3) 系数矩阵的共轭转置矩阵。

式 (10) 表明用共轭转置矩阵 K^T 左乘原矛盾方程,即可求得所对应的复数正规方程组,对它可直接在复数域用列主元消去法求解,在求得各校正面应加配重的复数结果后再转换成矢量输出,通过编程可方便地求得校正重量的最优近似解^[8]

$$G = -K K^{-1} K^T A \quad (11)$$

将式 (11) 结果代回式 (5) 即可预测各测点剩余振动 R_i 的大小,并由下式求得均方根剩余振动

$$R' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |R_i|^2}{N}} \quad (12)$$

若各测点剩余振动最大值 $|R_i|_{\max} \gg R'$, 则可进行加权迭代计算,将式 (3) 乘以不同的加权因子 E_i , 形成加权后新的矛盾方程组求解,求得一组新的校正重量的近似解,它将使各测点剩余振动值趋于一致,使 $|R_i|$ 大者压低,自然 $|R_i|$ 小者将会有所增加。加权因子可取为

$$E_i = \sqrt{|R_i| / R'} \quad (13)$$

式中 E_i 为加权因子。

幅相影响系数 K_{ij} 可由试验求得,平衡计算的精度决定于影响系数的精度。加试重后振幅和相位变化愈大,相对误差就愈小,求得的影响系数精度就愈高,校正计算结果就愈可靠。为选择高精度等级的影响系数参与平衡计算,依据误差分析将影响系数按精度分级,计算机算出 K_{ij} 后自动判断所属精度等级,如精度偏低则舍弃该校正面,否则会使平衡过程复杂化^[9]。

3 讨论

3.1 校正面的选择

喷嘴排渣碟式分离机的结构决定了在转鼓上可设置上、下两个校正面,在校正面数量选择上应坚持宜少不宜多的原则。其理由是:① 在工作转速下加配重困难、费时,校正面增加亦即增加了加重和启动的次数;② 理论上测点数 N 不变时校正面数 M 愈多,平衡后剩余振动愈小,但实际中由于影响系数、试配重等误差不可避免, M 越多时计算结果的累计误差也愈大,反而会出现 M 愈多平衡后残余振动越大的情况^[10]。

3.2 平衡解的稳定性

影响系数法的核心问题是复数方程组的求解,由于测试、计算中存在测量误差和计算的舍入误差,平衡方程组的影响系数矩阵是由试加重决定的,实际中可能出现影响系数病态矩阵,这样所得的解可能偏离真实解很远,如用失真的解去平衡原转子自然收不到预期效果,因此存在现场平衡解的稳定性问题。在分离机平衡中时常会遇到,计算出的配重大小及位置明显不合理,需按经验修正,否则,配重后振动下降不明显甚至会出现振动增大的情况。

4 结论

由上述计算原理结合喷嘴排渣碟式分离机动平衡特点,编制成在计算机上现场使用的动平衡综合程序,快捷地完成影响系数计算与分级、常规与加权最小二乘法的平衡计算、测点剩余振动预测、加权迭代计算以及校正质量合成等任务,大大提高了计算精度和速度。

用影响系数法对自行研制的适于黄河水泥沙分离的碟式分离机在工作转速下进行整机平衡,表 1 为平衡结果,平衡后分离机振动大幅度下降,运转趋于平稳,实际效果明显。实践结果证明平衡时必须抑制下轴承处的振动。

表 1 碟式分离机整机动平衡前后振幅对照
Tab 1 Swing comparison pre and post of dynamic balance of dish separator

	振幅 / μm		转速 / (mm/s)	
	平衡前	平衡后	平衡前	平衡后
上轴承处	53.2	7.4	124.3	6.2
下轴承处	92.8	33.1	158.3	8.7

参考文献 (References)

- [1] 孙启才,金鼎五. 离心机原理结构与计算 [M]. 北京:机械工业出版社, 1978: 184—190.
- [2] Cambiella A, Benito J M, Pazos C et al Centrifugal separation efficiency in the treatment of waste emulsified oils [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2006, 84(1): 69—76.
- [3] Wang Yan in, Forsberg E, Li Jingxian et al Continuous ultra-fine classification in a disc-stack nozzle centrifuge effects of G-forces and disc geometry [J]. China Particology, 2003, 1(2): 70—75.
- [4] Sutherland K. Centrifuge focus solids removal the options [J]. Filtration & Separation, 2005, 42(6): 16—20.
- [5] 孙步功,龚俊,辛舟. 黄河泥沙分离机流量公式推导及试验流量确定 [J]. 甘肃农业大学学报, 2004, 39(6): 710—712.
SUN Bu-gong GONG Jun XIN Zhou. Determination of experimentation formula and flux of silt separator [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2004, 39(6): 710—712. (in Chinese)
- [6] 张宏辉,张万利. 基于影响系数法的车轮平衡机检测系统 [J]. 机械设计与制造, 2007(7): 167—168.
ZHANG Hong-hui ZHANG Wan-li A detecting system for wheel balancer based on the effect coefficient method [J]. Machine Design and Manufacturing, 2007(7): 167—168. (in Chinese)
- [7] 孙步功. 适于黄河泥沙分离的碟式离心机设计与试验研究 [D]. 兰州:兰州理工大学, 2004.
- [8] 辛舟. 基于滴灌的黄河水泥沙分离试验研究 [J]. 排灌机械, 2005, 23(3): 32—34.
XIN Zhou. Silt of Yellow River separating based on drip irrigation [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005, 23(3): 32—34. (in Chinese)
- [9] 胡庆翰,蔡萍,秦鹏,等. 一种新型高精度动平衡测量系统 [J]. 传感技术学报, 2007, 20(7): 1506—1509.
HU Qing-han CAI Ping QIN Peng et al Research on a novel high accuracy dynamic balancing measurement system [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(7): 1506—1509. (in Chinese)
- [10] 孙步功,龚俊,辛舟. 碟式分离机在黄河水农业灌溉中的应用 [J]. 排灌机械, 2007, 25(4): 46—49.
SUN Bu-gong GONG Jun XIN Zhou. Application and study on dish separator in agricultural irrigation for Yellow River [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2007, 25(4): 46—49. (in Chinese)
- (责任编辑 贾国方)
-
- (上接第 26 页)
- [5] 杨娟丽,王均,常近时. 万家寨水电站水中含沙对空化压力的影响 [J]. 水利水电技术, 2005, 36(5): 64—67.
YANG Juan-li WANG Jun CHANG Jin-shi Effect of sediment-laden flow on cavitation pressure inside of hydraulic machineries in Wanjiashai Hydropower Station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(5): 64—67. (in Chinese)
- [6] 王磊,朱茹莎,常近时. 青铜峡与八盘峡水电站水中泥沙含量对空化压力的影响 [J]. 水力发电学报, 2008(4). (待发表)
WANG Lei ZHU Ru-sha CHANG Jin-shi Effect of sediment-laden flow on cavitation pressure inside of hydraulic machineries in Qingtongxia and Bapanxia Hydropower Station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007(12). (Wait for publishing) (in Chinese)
- [7] Knapp R T, Daily J M, Hammitt F G. Cavitation [M]. New York: McGraw-Hill Book Co. 1970: 6—25.
- [8] 常近时. 宇宙射线电离强度对清水空化压力特性的决定性影响 [J]. 中国科学, 2008. (待发表)
CHANG Jin-shi Decisive influence of the ionization strength of cosmic rays on the cavitation characteristics of pure water [J]. Science in China, 2008. (Wait for publishing) (in Chinese)
- [9] Coutier-Delgosha O, Fortes-Patella R, Reboud J L et al Numerical simulation of cavitating flow in 2D and 3D inducer geometries [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2005, 48(2): 135—167.
- [10] Lear W E, Sherif S A, Steadham J M. Design considerations of jet pumps with supersonic two-phase flow and shocks for refrigeration and thermal management applications [J]. International Journal of Energy Research, 2000, 24(15): 1373—1389.
- (责任编辑 张文涛)