

文章编号:1000-582X(2010)06-020-05

基于灰色关联的应力盘驱动力耦合度分析

谢开贵¹, 胡 博¹, 欧阳稳², 万勇建³, 陈民铀¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 云南省电力设计院, 云南 昆明 650051; 3. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘 要:提出基于灰色关联分析理论的能动磨盘各驱动器间耦合度分析方法。该方法选择某一驱动器策动力对应应力盘各测量点面形变化量为母序列、其它驱动器策动力对应面形变化量为子序列;运用初值化方法对序列进行预处理,进而计算各子序列的灰色关联系数;最后,由各子序列灰色关联系数计算灰色关联度。根据灰色关联度的内涵,本文选择关联度为其对母序列的耦合度,以实现应力盘各驱动器间耦合效应的定量计算,为深入分析应力盘控制系统,为制定合理的控制策略、方案提供了保证。对有效变形口径为 420 mm,包含 12 个驱动器和 60 个微位移阵列传感器的能动磨盘进行了驱动器耦合度分析,分析结果与实际情况相吻合,表明模型能准确刻画驱动器间的耦合效应。

关键词:能动磨盘;驱动力;耦合度;灰色关联分析

中图分类号: TM732

文献标志码: A

Coupling degree analysis of stressed-lap driving forces using the gray correlation technique

XIE Kai-gui¹, HU Bo¹, OUYANG Wen², WAN Yong-jian³, CHEN Min-you¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Yunnan Power Designing Institute, Kunming 650051, Yunnan, P. R. China; 3. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu 610209, Sichuan, P. R. China)

Abstract: A new method for analyzing the coupling degree of stressed-lap driving forces based on the gray correlation analysis theory is proposed. One of the surface shape displacement vectors corresponding to stressed-lap driving forces is taken as the primary sequence, and the others as the secondary sequences. The sequences are pretreated by using initial value processing, and the gray-correlation-coefficients (GCC) of subsequences are calculated. The gray-correlation-degree (GCD) can therefore be obtained using the GCCs of the subsequences. According to the concept of GCD, the GCD is explained as the coupling degree of secondary sequence to the primary sequence to achieve the quantitative calculation of coupling effect between the motors placed on a stressed-lap. The proposed method provides a useful tool to make deep analysis and reasonable control strategies for stressed-lap control systems. A case study on the coupling degree of an active-lap with diameter 420 mm, 12 drivers, and 60 micro-movement sensors shows that simulating results coincide with the actual situation, which means the proposed method can accurately describe the coupling degree

收稿日期: 2009-12-24

基金项目: 重庆市自然科学基金重点项目资助(CSTS2008BC7031)

作者简介: 谢开贵(1972-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电力系统分析与计算、规划与可靠性,电力市场及人工智能等方面的研究和教学工作,(E-mail)kaiguixie@yahoo.com.cn.

between various drivers of a stressed-lap.

Key words: active-lap; driving force; coupling degree; gray correlation analysis

大口径深型非球面在空间光学、天文、航天、卫星、激光聚变、激光定向能武器等中得到广泛应用,这对现代先进光学中大口径深型非球面的制造技术提出了严峻的挑战^[1]。采用小磨具进行局部研磨来产生非球面面形的传统方法容易形成局部的高频残差而且加工效率低^[2],很难满足空间光学、天文观测、地空监测等领域对大尺寸高陡度非球面光学元件的要求^[3-12]。能动磨盘技术采用大尺寸刚性盘作为基盘,在周边可变应力的作用下,盘的面形可以实时地进行变形,以适配非球面不同离轴位置上的吻合研磨,因而具有优先去除表面最高点的特点,并能够很好地控制中、高频残差的出现,有效地提高加工效率^[3-12]。

然而应力盘多个输入外力之间有强烈的耦合效应,这种耦合效应会严重影响控制策略、方案的制定和控制系统的稳定性。耦合作为物理学概念,是指 2 个(或 2 个以上的)系统或运动形式通过各种相互作用而彼此影响的现象。耦合度^[13-14]就是描述系统或要素相互彼此作用影响的程度。文献[13]借鉴物理学中的容量耦合(capability coupling)概念及容量耦合系数模型,定义城市化与生态环境间的耦合度。还有文献利用多变量控制系统方块图来分析控制系统的耦合问题,并根据系统方块图写出传递函数阵,进而实现对耦合度的定量计算。此外,Bristol 还提出相对放大系数方法,Rosenbrock 也提出一种判断系数耦合度的方法,但这些方法都无法真正反映系统的耦合度^[13]。而且鲜有关于应力盘驱动器耦合度分析的文章。

运用灰色关联分析法来定义这种耦合度。为合理地确定控制方案以避免不利的耦合或将耦合减弱到可以令人接受的程度,具有重要的理论意义和工程实用价值。

1 能动磨盘(CCAL)的结构和工作特点

如图 1,能动磨盘(computer control active lap, CCAL)采用 1/3 工件口径尺寸的刚性铝合金材料作为基盘,在 12 个变力矩的作用下,基本形状为球面的磨盘能够产生需要的低阶变形;产生磨盘变形的力矩是靠安装在应力盘边缘上的驱动电机和连杆装置来实现的。12 个驱动电机分为四组,每 3 个构成一组,成等边三角形分布,每个驱动电机又装有另一个驱动电机施力的着力点和测力传感器,4 组等边三角形合力可以产生必要的弯矩和扭矩。同时,为克服磨盘在离轴加工时因自重产生的形变,在磨

盘上又加载了由 3 个驱动电机构成的重力平衡系统,保证了加工中对工件施加的恒定压力。在加工过程中,安装于基盘上的驱动电机根据计算机发出的磨盘相对镜面位置和方向指令,改变边缘力矩的大小,使磨盘表面始终与非球面光学镜表面匹配^[4]。

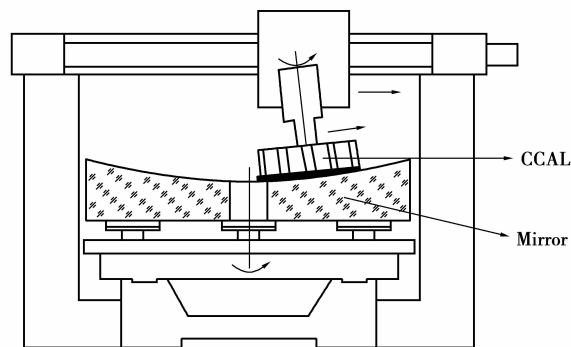


图 1 CCAL 结构示意图

能动磨盘加工过程的运动规范是主轴带动被加工大镜转动,磨盘在磨头轴驱动下相对工件转动,由被加工件的顶点起始向工件边缘平移;同时,为了使磨盘与被加工区域更好吻合,在磨头轴驱动下的磨盘还受一偏摆轴的驱动,使其偏摆角度始终与被加工区域的法线方向相一致,从而实现工件的全口径匹配加工,如图 2 所示。

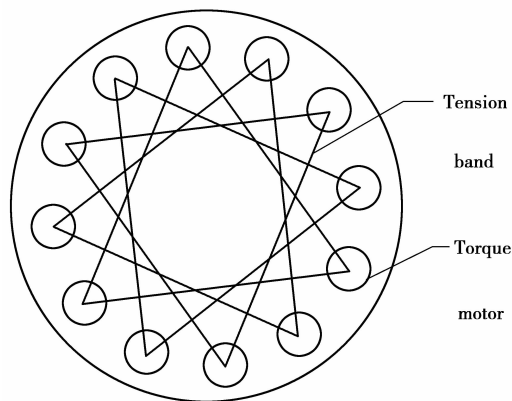


图 2 应力盘驱动器与连杆系统俯视图

2 灰色关联分析

灰色关联分析是利用灰色关联度来表征 2 个事物的关联程度,其基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密^[15]。曲线越接近,相应序列之间的关联度就越大,反之就越小。灰色系统理论以部分信息已知、部分信息未知的“小

样本、贫信息”不确定性系统为研究对象,通过对已知信息的生成、开发,提取有价值的信息,实现对系统运行规律的正确认识和确切描述。

灰色关联动态分析的建模步骤如下

第 1 步,确定母序列、子序列。

将系统指标序列作为母序列 $x_0(k)$,将影响系统指标的因素序列作为子序列 $x_i(k)$ 。

第 2 步,预处理原理数据。

消除数量级大小不同的影响,以便于进行计算和比较分析。一般采用初值化和均值化加以处理,即

初值化变换

$$X_i(k) = \frac{x_i(k)}{x_i(1)} \quad (1)$$

用各序列原始数据的第一个数据去除该序列中的每一个数据,将得到一个大于零的序列与之对应。

均值化变换

$$X_i(k) = \frac{x_i(k)}{\bar{x}_i} \quad (2)$$

先分别求出各序列的均值,再用各自的均值去除各自序列中的每个数据,便得到一个与原始数据相对应的大于零而近于 1 的新序列。

第 3 步,求母序列与各子序列差的绝对值,并找出其中的最大值和最小值

$$\Delta_{0i}(k) = |X_0(k) - X_i(k)|, \quad (3)$$

$$\Delta_{\max} = \max \max |X_0(k) - X_i(k)|, \quad (4)$$

$$\Delta_{\min} = \min \min |X_0(k) - X_i(k)|. \quad (5)$$

第 4 步,计算灰色关联系数

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (6)$$

式中 ρ 为分辨系数,其作用在于提高关联系数之间的差异显著性。 ρ 一般在 0 到 1 之间选取,常取值 0.5。

第 5 步,计算灰色关联度 γ_{0i} 。

为求总的关联度,需要考虑不同的观测点在总体观测中的重要性程度,则需要确定各点的权重。本文采用算术平均的方法计算灰色关联度。

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_{0i}(k). \quad (7)$$

关联度越接近于 1,说明关联程度越大。

3 应力盘各驱动器策动力耦合度

耦合度是指变量之间的耦合程度,变量之间的耦合度越大,其相互之间的影响程度越大。灰色关联度是指序列之间的相似程度,序列之间的灰色关联度越大,表示其变化规律越相似。耦合度与灰色关联度都是对变量之间的关系度量,其定义具有一定的相似性。由于弹性薄板多个输入外力之间有

强烈的耦合效应,并且这种关系目前还没有完善的数学描述模型,下面将应用灰色关联分析方法进行耦合度定义。

设只在驱动 F_1 (即驱动向量 $F = (F_1, 0, \dots, 0)$) 作用下各测量点位移的观测值向量为 $D_1 = (D_{11}, D_{12}, \dots, D_{1N})$; 同样地,对于任一 m ($m = 1, 2, \dots, M$),有驱动 F_m (即驱动向量 $F = (0, \dots, 0, F_m, 0, \dots, 0)$) 作用下各测量点位移的观测值向量为 $D_m = (D_{m1}, D_{m2}, \dots, D_{mN})$ 。

为分析各驱动力之间的耦合关系,将各驱动力单独作用时能动磨盘面形变化量间的灰色关联度定义为各驱动力之间的耦合度。在计算其灰色关联度时,先确定母、子序列,再按第 3 节中的定义进行计算。例如计算驱动器 F_j 对驱动器 F_i 的耦合度,将驱动器 F_i 单独作用时应力盘面形变化量作为母序列,将驱动器 F_j 单独作用时应力盘面形变化量作为子序列,并按初值化方法对母、子序列进行预处理,则驱动器 F_j 对驱动器 F_i 的耦合度为

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_{ij}(k). \quad (8)$$

其中

$$\xi_{ij}(k) = \frac{\min \min |D_{ik} - D_{jk}| + \rho \max \max |D_{ik} - D_{jk}|}{|D_{ik} - D_{jk}| + \rho \max \max |D_{ik} - D_{jk}|}.$$

4 算例分析

针对有效变形口径为 420 mm,包含 12 个驱动器和 60 个微位移阵列传感器(如图 3 所示)的能动磨盘进行驱动器耦合度分析,其中部分驱动器策动力作用下位移传感器记录的面形数据如图 4 所示。运用模型计算各驱动器策动力间的耦合度如表 1 所示。

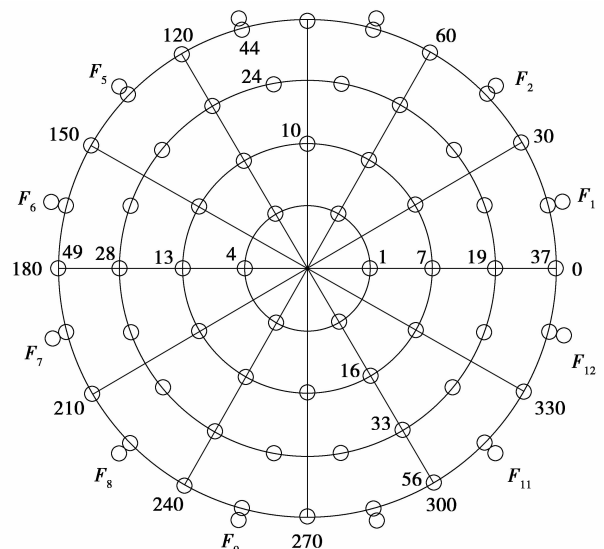


图 3 微位移传感器分布及力驱动器系统

由表 1、图 5 可知, F_1 与 F_7 耦合度最大, 与 F_4 和 F_{10} 的耦合度最小。再结合图 3、图 4 可知, 对 1 号驱动力影响最大的是与其相差 180° 的 7 号驱动力, 二者在面形变化规律上最接近, 而与 1 号驱动力相差 90° 的 4 号和 10 号驱动力在面形变化方向上与

1 号驱动力刚好相反, 在数值上体现为对 1 号驱动力的耦合度最小。分析其他驱动力间的耦合度, 也满足类似的规律, 即相差 180° 的驱动力间耦合度最大, 相差 90° 的驱动力间耦合度最小。

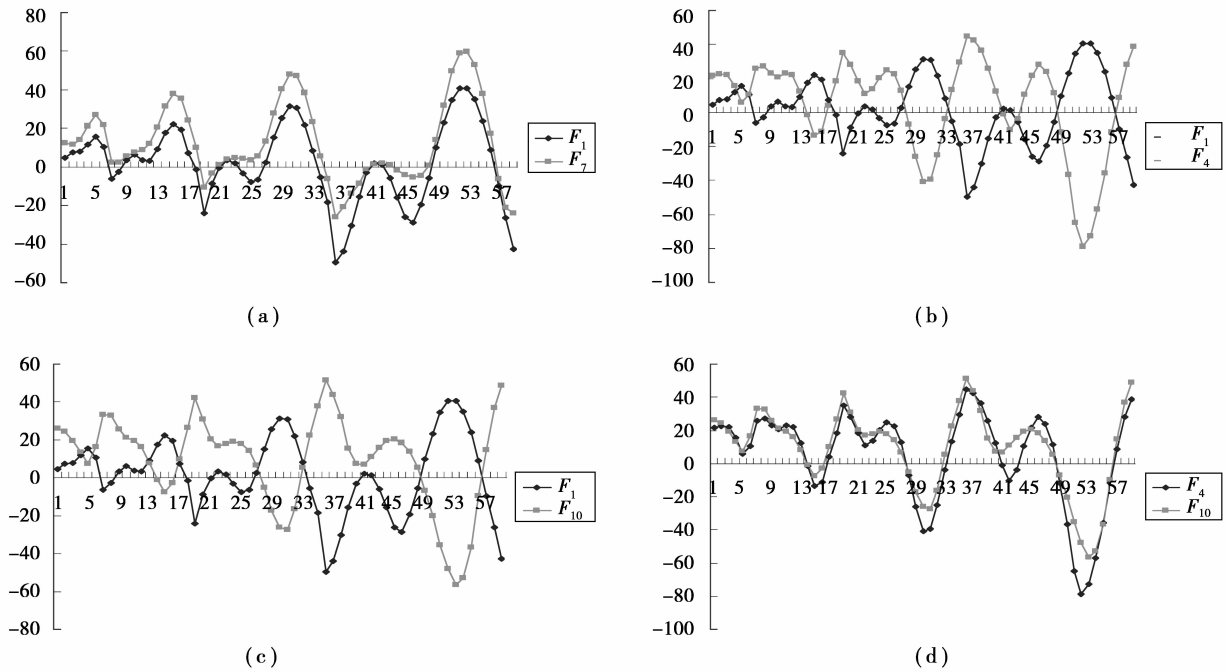


图 4 不同驱动力作用下位移传感器记录的面形数据

表 1 各驱动器间的耦合度

序号	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}	F_{12}
F_1	1.000	0.830	0.675	0.687	0.763	0.804	0.860	0.822	0.759	0.695	0.745	0.793
F_2	0.834	1.000	0.763	0.715	0.707	0.716	0.789	0.904	0.811	0.723	0.699	0.711
F_3	0.716	0.792	1.000	0.791	0.770	0.714	0.726	0.757	0.847	0.800	0.708	0.707
F_4	0.701	0.721	0.769	1.000	0.810	0.720	0.711	0.719	0.829	0.908	0.736	0.705
F_5	0.764	0.700	0.737	0.800	1.000	0.831	0.721	0.688	0.763	0.802	0.820	0.807
F_6	0.813	0.720	0.687	0.717	0.838	1.000	0.825	0.715	0.702	0.719	0.783	0.916
F_7	0.869	0.794	0.700	0.711	0.734	0.827	1.000	0.789	0.771	0.716	0.724	0.807
F_8	0.847	0.916	0.754	0.740	0.724	0.739	0.809	1.000	0.829	0.748	0.720	0.734
F_9	0.747	0.794	0.808	0.809	0.749	0.676	0.747	0.792	1.000	0.825	0.663	0.665
F_{10}	0.698	0.719	0.769	0.903	0.804	0.711	0.705	0.717	0.837	1.000	0.757	0.694
F_{11}	0.775	0.727	0.706	0.758	0.846	0.804	0.746	0.720	0.717	0.787	1.000	0.783
F_{12}	0.823	0.741	0.707	0.729	0.834	0.927	0.826	0.737	0.719	0.730	0.785	1.000

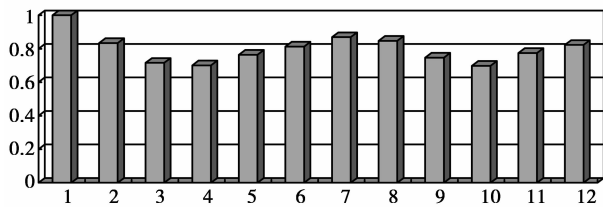


图5 其他各驱动器对驱动器1的耦合度

5 结论

给出了灰色关联度的计算步骤,并根据耦合度与灰色关联度定义的相似性及数值变化规律上的一致性,提出了用灰色关联分析法定义应力盘各驱动器间的耦合度。从而为分析应力盘面形变化特性提供工具。应用所提方法分析了有效变形口径为420 mm,包含12个驱动器和60个微位移阵列传感器的能动磨盘各驱动器间的耦合度。算例表明模型计算结果与应力盘面形变化特性相吻合,验证了模型的正确性、可行性。

参考文献:

- [1] 谌桂萍,杨力. 计算机数控应力盘面形研究[J]. 光电工程,2000,27(3): 13-17.
XIE GUI-PING, YANG LI. A study on the surface shape of a computer-controlled stressed lap[J]. Opto-Electronic Engineering, 2000,27(3): 13-17.
- [2] 程灏波,冯之敬,王英伟. 磁流变抛光光学非球面元件表面误差的评价[J]. 清华大学学报:自然科学版,2004,44(11): 1497-1500.
CHENG HAO-BO, FENG JING-ZHI, WANG YING-WEI. Evaluation on the figure errors of optical aspheric surfaces after magnetorheological polishing[J]. Journal of Tsing Hua University: Science and Technology, 2004,44 (11): 1497-1500.
- [3] 朱政,高必列,李新南,刘鸣. 主动抛光磨盘磨制非球面的工艺与面形检测[J]. 光学技术,2005,31(3): 340-343.
ZHU ZHENG, GAO BI-LIE, LI XIN-NAN, et al. The technics of active polishing lap aspheric and surface testing[J]. Optical Techniques, 2005,31(3): 340-343.
- [4] 杨力,姜文汉. 计算机控制抛光大口径高陡度非球面技术研究[J]. 光电工程,1999,26(1): 9-15.
YANG LI, JIANG WEN-HAN. A study on computer stressed lap polishing technology for large aperture and highly aspherical optical surface [J]. Opto-Electronic Engineering, 1999,26(1): 9-15.
- [5] 曾志革,邓建明,李晓今,等. 能动抛光磨盘的变形试验研究[J]. 强激光与粒子束,2004,16(5): 555-559.
ZENG ZHI-GE, DENG JIAN-MING, LI XIAO-JIN, et al. Investigation of deformation experiment for active polishing lap [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(5): 555-559.
- [6] KIM S W, WALKER B D, BROOKS D. Active profiling and polishing for efficient control of material removal from large precision surfaces with moderate asphericity[J]. Mechatronics, 2003, 13(4): 295-312.
- [7] WEST S C, MARTIN H M, NAGEL R H et al. Practical design and performance of the stressed-lap polishing tool[J]. Applied Optics, 1994, 33(34): 8094-8100.
- [8] LI Y, WANG D X. Study on distortion control technology of the active stressed lap polishing deeper aspherical mirror [C] // Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, August 21-26, 2007, Changchun, China. Changchun, China, [s. n.], 2007: 60242G.1-60242G.10.
- [9] WANG L, ZHU Y T, ZHANG Q F. Mechanical design of the stressed-lap polishing tool [C] // Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, August 21-26, 2005, Changchun, China. Changchun, China, [s. n.], 2005: 60241Y.1-60241Y.7.
- [10] ZHENG Y, LI Y, WANG L, et al. Method of stressed lap shape control for large mirror fabrication [C] // Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, May 24-31, 2006, Orlando, FL, United states. Orlando, FL, United states, [s. n.], 2006: 62730D.
- [11] WANG Y J, WU F, FAN B, et al. RBF network based surface shape modeling of stressed-lap in optical polishing process [C] // Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 25-27, 2008, Chongqing, China. Chongqing, China: [s. n.], 2008: 5616-5621.
- [12] LI Y, WANG D X. New design deforming controlling system of the active stressed lap [C] // Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation, June 23-28, 2008, Marseille, France. Marseille, France; [s. n.], 2008: 701-833.
- [13] 刘耀彬,宋学锋. 城市化与生态环境的耦合度及其预测模型研究[J]. 中国矿业大学学报,2005,34(1):91-96.
LIU YAO-BIN, SONG XUE-FENG. Coupling degree model and its forecast model of urbanization and ecological environment [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(1):91-96.
- [14] ZHENG P, ZHAO J, WU Q, et al. Evaluation of the magnetic coupling degree and performance of an axial-flux compound-structure permanent-magnet synchronous machine used for hybrid electric vehicles [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(7): 07F113-1-07F113-3.
- [15] 王学萌,罗建军. 灰色系统方法简明教程[M]. 成都: 成都科技大学出版社,1993.

(编辑 张小强)