

用于转子自动平衡的双盘电磁型平衡头 移动控制方法研究

曹 晰 陈立芳* 高金吉

(北京化工大学 化工安全教育工程研究中心, 北京 100029)

摘 要: 电磁型自动平衡系统通过在线辨识转子系统不平衡量, 计算并控制平衡盘移动至最佳平衡位置, 从而减小或消除原系统的振动。但该技术的工业化应用受到移动控制过渡时间长且可能令系统瞬时振动增强的限制, 实例罕见。针对其在移动控制上的不足, 采用系统仿真方法研究了可相对转轴正反两个方向任意转动的双平衡盘移动控制策略, 并对两类特殊情况给出了解决措施。实验表明使用该控制策略平衡头移动迅速准确, 缩短了动平衡时间, 规避了系统瞬时振动增强的可能。

关键词: 电磁平衡头; 平衡盘; 移动控制; 转子自动平衡系统

中图分类号: TB114; TB21

引 言

电磁型自动平衡是 20 世纪后期发展起来的一项转子在线平衡技术, 其平衡装置结构紧凑, 可靠性较高, 平衡过程短, 具有广阔的工业应用前景。目前国外该项技术仍处于保密状态, 而国内报道的同类型平衡装置均存在一定的不足, 尚待完善。例如, 文献[1-2]中研制的单向电磁型自动平衡装置, 平衡质量只能单方向移动, 控制上存在困难; 其双向电磁型自动平衡装置结构比较复杂, 轴向尺寸较大, 起支撑作用的轴承在高转速时可能因离心力较大而发生松动, 平衡转速受到限制^[3]。文献[4-5]所提出的电磁型自动平衡装置, 试验平衡过程历时 184 s, 工程应用价值不大。鉴于工程上的强烈需求, 有必要从实用性角度对电磁型自动平衡控制系统进行改进。

本文介绍了一种新型双盘电磁型自动平衡系统。在物理实验装置基础上建立了转子自动平衡控制模型。从理论上提出了可自由旋转平衡盘的移动定位算法, 并利用上述模型对控制算法进行仿真, 证实了算法的有效性。

收稿日期: 2010-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(50635010)

第一作者: 男, 1982 年生, 博士生

* 通讯联系人

E-mail: chenlf@mail.buct.edu.cn

1 双盘电磁型自动平衡系统

1.1 双盘电磁型转子自动平衡实验装置

图 1 是一种具有实际应用前景的双盘电磁型转子自动平衡装置, 主要包含平衡执行器、检测器及控制器 3 个部分。平衡执行器由与机体连接的静环和连接在旋转轴上的动环组成。检测器安装在静环上, 完成被控对象振动的实时监测。当触发自动平衡控制时, 控制器依据计算得到的不平衡向量, 发射适当的电压脉冲驱动动环内的平衡盘转动到相应位置, 从而产生平衡补偿量, 使不平衡转子得到平衡。

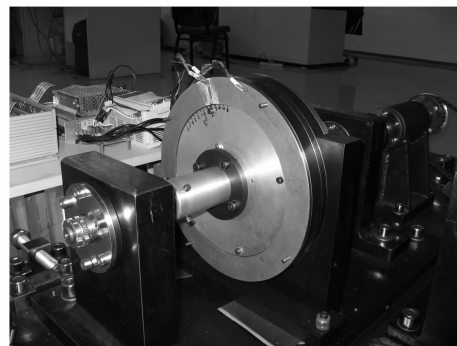


图 1 可自由旋转的双盘电磁型转子自动平衡系统

Fig. 1 Bi-disc free rotation electromagnetic balancer
for the rotor auto-balancing system

1.2 动环结构

动环是电磁型自动平衡系统中的关键部件, 随转子一起转动, 其内部结构主要包括平衡盘、磁性板

和端盖 3 部分,以中间磁性板成对称分布,如图 2 所示。平衡盘上的磁极数决定了电磁型平衡头动作步长(在本设计中为 4.5°),同时决定了该平衡系统的绝对静态误差。

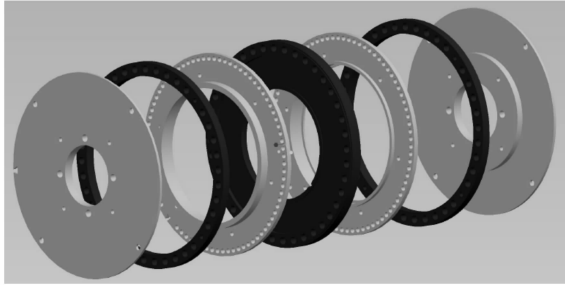


图 2 平衡执行器的动环结构

Fig. 2 The structure of the rotation ring in the balancing actuator

1.3 平衡盘的平衡原理

当测量振幅小于设定门限时,两块平衡盘成固定位置放置,产生的合力矢量用来平衡系统固有的不平衡质量;当测量振幅大于设定门限时,控制器利用电磁原理驱动两块平衡盘移动以产生与转子不平衡向量完全相反的平衡补偿向量,进而消除主要振源;当两块平衡盘成 180° 相对放置时,其平衡补偿向量互相抵消,不提供平衡功能;当两块平衡盘位置重合时,其平衡补偿向量的量值最大,也是系统能够提供的最大平衡能力。

2 平衡盘的移动控制

2.1 平衡盘运动建模

在自动平衡过程中,核心问题之一是对平衡盘进行定位并确定最佳转动方式。由于每个平衡盘都可以自由转动,单盘自由度为 2,因此对应于每个确定的合力位置,均有 8 种不同移动方案,其中有两种移动方案会使合力穿越不平衡质量所在位置,进而造成振动加强,因此不可取;其它移动方案则在过渡过程上存在优劣问题。为了详细说明这一过程,建立如图 3 的平衡盘运动模型。为简化表达,将两平衡盘等效为两个单位质量的平衡块,将动环视为半径为 r 的圆周,建立直角坐标系。 X 轴正向为零相位,逆时针方向为正向角度。

设第 k 次调节后平衡块位置分别为

$$A_k: (x_{A_k}, y_{A_k}) = r e^{j\alpha_k}$$

$$B_k: (x_{B_k}, y_{B_k}) = r e^{j\beta_k}$$

其中 $\alpha_k, \beta_k \in [0, 2\pi)$ 为其转角。

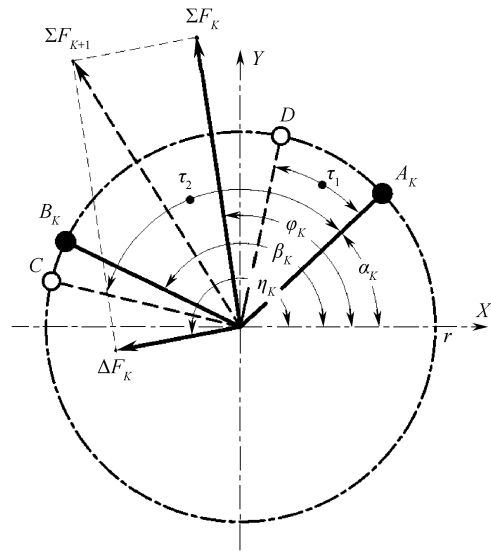


图 3 平衡盘运动模型

Fig. 3 The motion model for balancing discs

由 A_k 、 B_k 产生的等效平衡力为 $\Sigma F_k: (x_{\Sigma F_k}, y_{\Sigma F_k})$, 转角为 φ_k , 则有

$$\begin{cases} x_{\Sigma F_k} = r(\cos\alpha_k + \cos\beta_k) \\ y_{\Sigma F_k} = r(\sin\alpha_k + \sin\beta_k) \\ \varphi_k = \frac{\alpha_k + \beta_k}{2} \end{cases} \quad (1)$$

设新增不平衡力为: $\Delta f_k = \eta_k e^{j\theta_k}$, 则需新增平衡力

$$\Delta F_k = \eta_k e^{j(\theta_k + \pi)} \quad (2)$$

故而,平衡块需要产生的第 $k+1$ 次平衡力为:

$$\vec{\Sigma F}_{k+1} = \vec{\Sigma F}_k + \vec{\Delta F}_k \quad (3)$$

由于动环转动步长为 4.5° , 平衡力最大误差为: $e_{\max} = r e^{j\frac{\pi}{40}}$ 。

2.2 平衡盘定位

计算经过第 $k+1$ 次平衡后平衡块所在位置

(1) $|\Sigma F_{k+1}| \geq 2r$, 即所需平衡力已达到或超过平衡头所能提供的最大平衡力, 则两个平衡块相互重合于转角 φ_{k+1} 处, 且剩余不平衡量为

$$\sigma_{k+1} = (|\Sigma F_{k+1}| - 2r) e^{j(\varphi_{k+1} - \pi)} \quad (4)$$

(2) $|\Sigma F_{k+1}| < 2r$, 记此时两个平衡块的转角分别为 $\alpha_{k+1}, \beta_{k+1}$, 则

$$\begin{cases} \alpha_{k+1} + \beta_{k+1} = 2\varphi_{k+1} \\ \sin\alpha_{k+1} + \sin\beta_{k+1} = \sin\alpha_k + \sin\beta_k - \frac{\eta_k}{r} \sin\theta_k \end{cases} \quad (5)$$

通过方程组 5 即可推得第 $k+1$ 次平衡后两个

平衡块的位置。在图3中,上述位置分别标记为C与D。

2.2 平衡块移动控制

以图3为例,当不考虑移动过渡过程对系统振动的影响时,两个平衡块从位置 A_k 、 B_k 移动到C、D共有8种不同的移动方式。在这八种移动方式中,“ A_k 逆时针移动到D, B_k 逆时针移动到C”是最佳移动方案;而其余方式不满足转子最佳平衡控制要求,因为在平衡块移动过程中将出现系统剩余不平衡量升高的现象,特别是“ A_k 顺时针移动到C, B_k 逆时针移动到D”及“ A_k 顺时针移动到D, B_k 逆时针移动到C”。在这两种移动方式下平衡块将穿越转子系统不平衡量所在相位,极大强化转子振动,需要严格避免。鉴于平衡盘移动方式将对控制效果产生极大影响,有必要对其进行严格分析与计算。

若要求平衡盘移动过程中,每一步系统残余不平衡都不大于不平衡量初始值或出现振荡现象,则移动原则可以表述为“在移动全过程中系统的残余不平衡量呈单调下降趋势”。故当平衡盘角速度一定时,做如下定义

$$\begin{cases} \tau_1 = \alpha_{k+1} - \alpha_k \\ \tau_2 = \beta_{k+1} - \beta_k \end{cases} \quad (6)$$

则有如下结论

(1) $|\tau_1| \leq |\tau_2|$, A_k 定位在D, B_k 定位在C, 且 $\alpha_k \leq \alpha_{k+1} \leq \alpha_k + \pi$ 时, A_k 正向(逆时针)转动, 否则负向转动; $\beta_k \leq \beta_{k+1} \leq \beta_k + \pi$ 时, B_k 正向(逆时针)转动, 否则负向转动;

(2) $|\tau_1| > |\tau_2|$, A_k 定位在C, B_k 定位在D, 且 $\alpha_k \leq \beta_{k+1} \leq \alpha_k + \pi$ 时, A_k 正向(逆时针)转动, 否则负向转动; $\beta_k \leq \alpha_{k+1} \leq \beta_k + \pi$ 时, B_k 正向(逆时针)转动, 否则负向转动。

3 平衡盘移动仿真

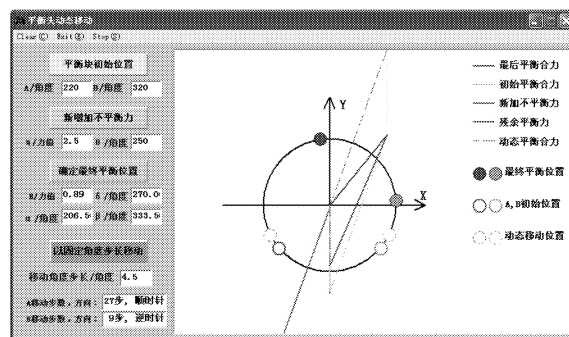
取单个平衡盘所产生的平衡力为单位平衡力,并以此为基准量化系统不平衡力。选取实际平衡头的调节步长 4.5° ,因而自动平衡结束时系统残余不平衡力可能不为零。方向角定义与前文相同。转子平衡过渡时间取决于两平衡盘中最大的移动步数。

3.1 一般平衡位置

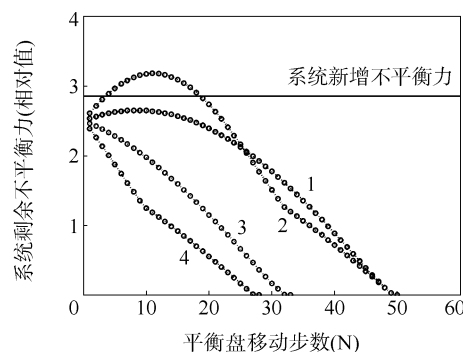
对平衡盘移动的一般情况进行控制仿真,如图4所示。初始状态时,A平衡盘位于 220° ,B平衡盘位于 320° ,系统新增不平衡力

$$\Delta f_k = 2.5e^{\frac{25}{18}\pi}$$

平衡盘移动控制采取单向与双向移动两类基本控制方案。采用单向移动控制时,两个平衡盘均只能按同一个方向移动;而采用双向移动控制时,两个平衡盘的移动方向可以不同。



(a) 平衡盘移动



(b) 不同移动控制对比

1—单向移动(不考虑限定条件); 2—单向移动(考虑限定条件);
3—双向移动(不考虑限定条件); 4—双向移动(考虑限定条件)

图4 一般情况下平衡盘移动的控制仿真

Fig.4 A general simulation of the control of the motion of balancing discs

由于平衡盘的最终位置一定,因此无论采用何种移动方式,系统均能达到平衡状态,但由图4(b)可以很明显的看到不同移动方式在调整过程中对系统振动产生的影响。

不考虑平衡盘转动方向,则顺时针单向移动时,A盘移动了47步,B盘移动了49步;双向移动时,A盘顺时针移动了32步,B盘逆时针移动了49步。两者在平衡过程中均造成了系统振动增强,而以双向移动更为剧烈。

考虑平衡盘移动方式,则逆时针单向移动时,A盘移动了32步,B盘移动了30步;双向移动时,根据方程6确定最佳移动方式,则有A盘顺时针移动了27步,B盘逆时针移动了9步。此时,两类移动

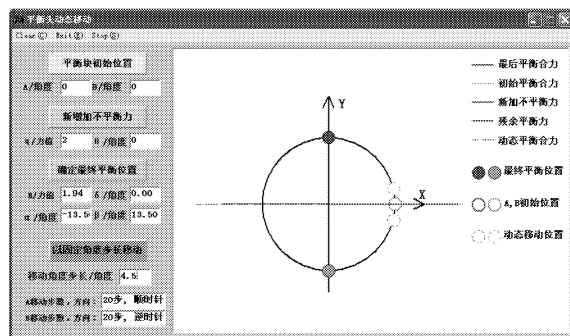
方式均满足了平衡块移动原则,但双向移动的平衡时间要小于单向移动。实际系统中平衡盘每 1 步移动所用时间取决于驱动电磁脉冲。就本例而言,实际平衡时间小于 4 s。

3.2 特殊平衡位置

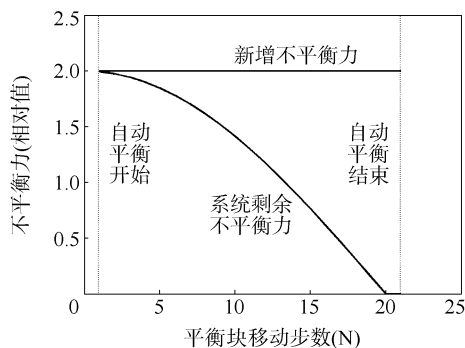
双盘可自由转动的电磁平衡头有两类特例平衡位置需要单独考虑。

3.2.1 平衡块初始位置重合

两个平衡盘在 k 时刻重合于转角 φ 处;在 $k+1$ 时刻,转子系统所需平衡力方向角为 $\varphi + \pi$,且不小于平衡头最大平衡能力。此时,两个平衡盘双向转动角度相等,当且仅当两个平衡盘按不同方向转动时方能保证转子系统振动不被增强,如图 5 所示。



(a) 平衡盘移动



(b) 剩余不平衡力变化

图 5 平衡块重合时平衡盘的定位仿真

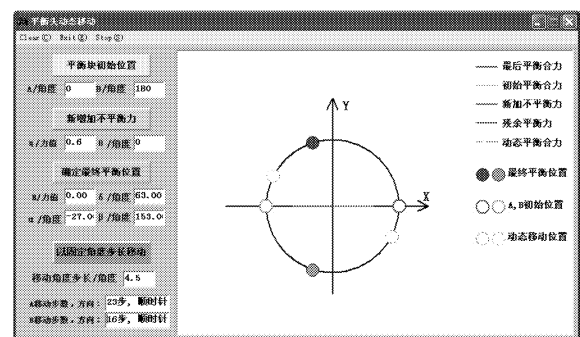
Fig. 5 A simulation of the control of motion of balancing discs when the balancers overlap

初始状态时, A 平衡盘与 B 平衡盘均位于 0° 处, 转子系统新增不平衡力 $\Delta f_k = 2e^{0j}$, 则最佳移动方式为: A 平衡盘顺时针移动 20 步, B 平衡盘逆时针移动 20 步。

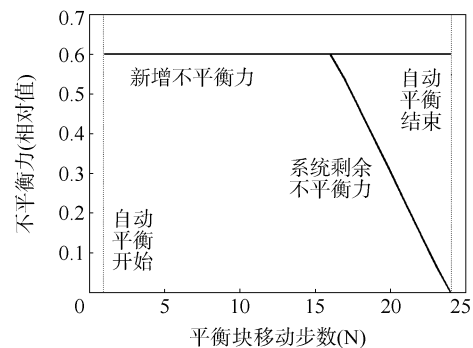
3.2.2 平衡块初始位于同一直径两端

在 k 时刻, 转子自身处于平衡状态, A 平衡盘位于转角 φ 处, B 平衡盘位于转角 $\varphi + \pi$ 处, 即两平衡

盘位于同一直径的两端; 在 $k+1$ 时刻, 转子所需平衡力方向角恰为 φ 或 $\varphi + \pi$ 。这种情况下, 当且仅当两个平衡盘按同一方向转动且不经不平衡力所在象限时方能保证转子系统振动不被增强, 如图 6 所示。初始状态时, A 平衡盘位于 0° 处, B 平衡盘位于 180° 处, 转子系统新增不平衡力 $\Delta f_k = 0.6e^{0j}$, 则最佳移动方式为: A 平衡盘顺时针移动 23 步, B 平衡盘顺时针移动 16 步。这也是电磁平衡头平衡作用最缓慢的情况。



(a) 平衡盘移动



(b) 剩余不平衡力变化

图 6 平衡块直径分布时平衡盘定位仿真

Fig. 6 A simulation of the control of the motion of the balancing discs where balancers have a distribution of diameter

4 结论

实验仿真表明, 本文提出的平衡盘移动原则与方法不仅能优化平衡盘双向移动, 而且缩短了平衡过渡时间, 提高了电磁平衡系统的实用性, 为电磁式自动平衡系统的工业化应用进行了有益的尝试。作为新兴的转子在线平衡技术, 电磁型自动平衡存在很多优势与特点。多平衡盘固然能加快平衡速度, 提高平衡精度, 但平衡盘可能的动作方式也呈几何级数增长。不同的动作方式对平衡过渡过程影响各

异,存在导致系统振动增强的可能,因而讨论 N 个平衡盘的最佳移动控制有着非常重要的实践意义,是未来工作的重点之一。

参考文献:

- [1] 欧阳红兵,赵勇彬,汪希萱. 电磁式自动平衡头在线平衡实验及应用研究[J]. 振动与冲击, 2002, 21(1): 24-26.
Ouyang H B, Zhao Y B, Wang X X. Experiments and applications of online auto-balancing with electromagnetic auto-balancing head[J]. Journal of vibration and shock, 2002, 21(1): 24-26. (in Chinese)
- [2] 汪希萱,曾胜. 电磁式在线自动平衡系统及其动平衡方法研究[J]. 热能动力工程, 2003, 18(1): 53-57.
Wang X X, Zeng S. The study of an on-line automatic dynamic balancing system and its dynamic balancing method when used on a flexible rotor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003, 18(1): 53-57. (in Chinese)
- [3] 欧阳红兵,汪希萱. 两种新型电磁式在线自动平衡头[J]. 机械制造, 2002, 40(7): 47-48.
Ouyang H B, Wang X X. New type electromagnetic on-line auto balancing head[J]. Machinery, 2002, 40(7): 47-48. (in Chinese)
- [4] 葛哲学,陶利民. 新型电磁式自动平衡装置的研究[J]. 机械, 2001, 28(6): 62-64.
Ge Z X, Tao L M. Study on a new electromagnitic automatic-balancing instrument [J]. Machinery, 2001, 28(6): 62-64. (in Chinese)
- [5] 李勇,陆永平. 采用永磁频差电动机的自动平衡头[J]. 微特电机, 1998, 26(5): 31-33.
Li Y, Lu Y P. Automatic balancing head using PM frequency difference motor[J]. Small & Special Machines, 1998, 26(5): 31-33. (in Chinese)

Study of bi-disc electromagnetic balancer movement control for rotor auto-balancing

CAO Xi CHEN LiFang GAO JinJi

(Engineering Research Center of Chemical Technology Safety, Ministry of Education, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Rotor unbalance can be identified online and calculated by an electromagnetic balancer, and the balancing discs subsequently moved to the best compensating position in order to suppress or eliminate the unbalance. However, industrial applications of auto-balancing technology are limited by its long transition time and transient vibration enhancement. In response to these deficiencies in balancer movement control, bi-disc free rotation control strategies have been established and the solutions for two special cases are given. Experiments using the new solutions showed that the balancer could be moved more rapidly and more accurately than with existing methods. As a result, the balancing time was reduced and, more importantly, transient vibration enhancement was avoided.

Key words: electromagnetic balancer; balancing disc; movement control; rotor auto-balancing system