

基于 B 样条的高频比动平衡机的永久标定实现

赵鼎鼎 蔡萍

上海交通大学, 上海, 200240

摘要:提出了一种基于双三次 B 样条插值对刚性转子动不平衡测试系统进行系统标定的方法,该方法可以避免和减少硬支承动平衡测量系统中由于忽略了惯性力和系统阻尼带来的测量误差,实现硬支承和软支承动平衡测量中系统的永久标定。在德国申克 ST590 平衡电测系统中采用 0.5kg、1.6kg、5kg、16kg 转子分别在 180~1423r/min 转速范围内进行标定实验,实验结果表明,该方法的标定结果与状态标定的标定结果具有同等的标定精度和测量精度。

关键词:B 样条插值; 永久标定; 动不平衡; 状态标定

中图分类号:TH877

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.03.007

Permanent Calibration Method Based on B-spline in High Ratio Balancing Machine

Zhao Dingding Cai Ping

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240

Abstract:An improved calibration method based on bicubic B spline interpolation was introduced, which can reduce errors as a result of ignoring rotor's inertia and system's damping and can achieve a permanent calibration both on hard bearing and soft bearing frame. Finally an experiment was setup to get calibration results and measurement results at several rotating speeds between 180~1423r/min on different rotors. After comparing measurement results from direct calibration results and interpolation calibration results, the effectiveness and veracity were proved.

Key words:B spline interpolation; permanent calibration; dynamic unbalance; state calibration

0 引言

系统标定是动不平衡测试系统中的一项重要内容,用于确定测量传感器输出与不平衡量测量结果之间的对应关系。系统标定结果的优劣直接影响到不平衡量的测量精度,合理和优化的标定操作不仅能够提高不平衡量的测量精度,同时也能够提高系统的测量效率,降低工业现场操作的难度。

动不平衡测试系统与一般的测试系统有许多共同点,同时也有许多不同点。被测量转子的强介入性和无法完全避免的校正平面之间的干扰性,都限制了动不平衡测量精度的提高。在硬支承平衡下,转子本身的惯性力和系统阻尼都被忽略,而将系统按照静力学的平衡法则进行动不平衡测量系统的标定和平面分离解算。这种忽略了转子惯性力和系统阻尼的平面分离原理限制了动不平衡测试精度的提高。而且,转子的惯性力和系统阻尼都会随着测量转速的改变而变化,所以单一测量转速下的系统标定结果不能很好地满足不同测量转速下的动平衡测量要求。

长久以来一直认为测量转速高于 0.5 倍系统固有频率的平衡机是无法实现系统的永久标定的。在有关动平衡机的教材中,都将平衡机分作硬支承和软支承来分别讲解。为了实现系统的永

久标定,不得不舍弃高转速下软支承平衡机测量精度高的优点。刘钊等^[1]给出了试重法实现永久标定的原理。贺大拙^[2]指出,转子的惯性力和惯性力矩是导致永久标定和系统特性有差异的主要原因。周仕炎等^[3]明确指出,系统的阻尼会导致永久标定方法的性能衰退和恶化,同时给出了一种相移电路用以补偿系统阻尼对测量系统带来的影响。刘健等^[4]综合了各种永久标定和状态标定的方法,同时对各种标定方法进行了分析和比较,总结了各标定方法的优缺点。上述研究都只是分析了永久标定的问题所在,仍然限于测量转速小于 0.3 倍系统固有频率这一前提,没有给出一种通用的动平衡机的永久标定方法。

1 动不平衡测量过程

图 1 对通用动不平衡测量过程进行了描述。不平衡转子中存在着不对称的质量微元,当转子沿其几何轴线旋转时不平衡量表现为转子旋转时的离心力,同时激起支承系统的振动,其力学过程为转子在不平衡量引起的离心力的作用下做受迫振动。依靠振动传感器将支承系统的振动拾取出来,通过信号调理和信号处理电路模块除去传感器信号中与旋转频率不同的信号分量,提取得到不平衡信号的特征参数——与转频同频信号成分的幅值和相位。最后再按照下面公式描述的动不

平衡测量的平面分离方程分离出对应校正面上的幅值和相位：

$$f(M\omega^2)g(C\omega)(S\eta^{(1)}\eta^{(2)}\dots\eta^{(n)})m = U \quad (1)$$

式中, ω 为测量转速; M 为转子的质量; C 为系统的黏性阻尼系数; S 为校正平面和传感器平面之间的耦合; η 为各种信号调理和信号处理环节的传递函数; m 为校正面上的不平衡量; U 为传感器的输出; f 函数表示转子惯性力对振动响应的影 响; g 函数表示黏性阻尼对振动响应的影 响。

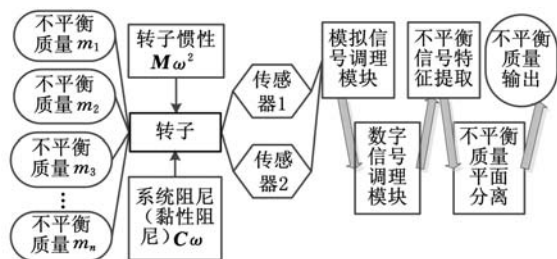


图 1 动不平衡测量流程

典型的动平衡测量的结构见图 2, 转子在弹性支承下沿轴线做旋转运动, 由达朗伯原理可以获得系统的动力学方程:

$$f(M\omega^2)g(C\omega) \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_{11}^{(1)} & \eta_{12}^{(1)} \\ \eta_{21}^{(1)} & \eta_{22}^{(1)} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} \eta_{11}^{(n)} & \eta_{12}^{(n)} \\ \eta_{21}^{(n)} & \eta_{22}^{(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

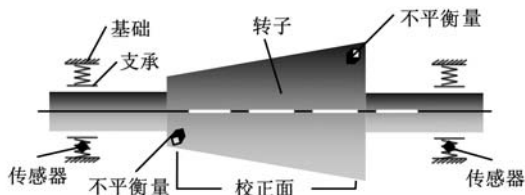


图 2 不平衡转子测量示意图

在系统的动力学方程(式(2))中, 存在着与测量转速密切相关的物理量, 如转子的惯性量 $M\omega^2$ 和系统阻尼 $C\omega$ 。由于它们都是测量转速的函数, 所以无法直接实现与转速无关的系统的永久标定。本文提出了改进的系统标定方法, 该方法能够克服测量转速和转子质量对测量系统带来的影响, 其标定的结果能够涵盖除转子本身结构参数以外的所有系统参数对测量结果带来的影响, 从而能够实现只需一次永久的标定即可在不同转速下进行动平衡测量。

2 动平衡测量的标定过程

动不平衡测量的力学模型如图 3 所示。图 3 可以同时表示硬支承和软支承的动不平衡测量系统力学模型。当被测量转子绕 X 轴旋转时, 由于不平衡量的存在, 转子在旋转的同时伴有沿 Y 轴

的横向平动和绕 Z 轴的摆动。平面 A 和平面 B 是按照校正工艺选取的校正平面, m_1 、 m_2 是将分散的不平衡量等效集中到校正平面上的不平衡量。可以得出系统的动力学方程为^[5]

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{y} + C_1\dot{y} + K_1y_1 + K_2y_2 &= \\ m_1r_1\omega^2\cos(\omega t) + m_2r_2\omega^2\cos(\omega t + \theta) & \\ J\ddot{\alpha} + C_2\dot{\alpha} + K_1y_1l_1 + K_2y_2l_2 &= \\ m_1r_1\omega^2h_1\cos\omega t + m_2r_2\omega^2h_2\cos\omega t + \theta & \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, M 、 J 为转子质量和转子绕 Z 轴的转动惯量; C_1 、 C_2 分别为两个支承处的系统黏滞阻尼系数; K_1 、 K_2 分别为支承处沿 Y 轴方向的刚度系数; y 为转子质心沿 Y 轴的平动位移; y_1 、 y_2 分别为一维传感器感受到的振动位移量; r_1 、 r_2 为校正平面上的集中不平衡量所处径向位置; θ 为校正面上等效集中不平衡量位置之间夹角; l_1 、 l_2 为两个传感器分别到转子质心的距离; h_1 、 h_2 为两校正平面分别到转子质心的距离。

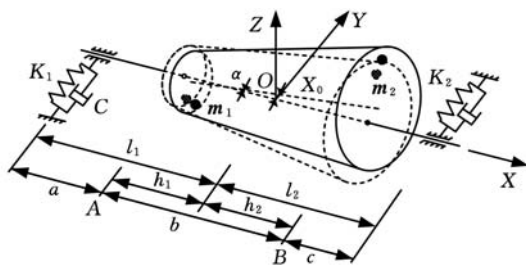


图 3 不平衡转子的动力学模型

通过不平衡转子的动力学方程(式(3))可以获得动不平衡测量系统的系统标定方程:

$$\begin{bmatrix} \frac{r_1(b+c)}{a+b+c}\rho_{11} & \frac{r_2c}{a+b+c}\rho_{21} \\ \frac{r_1a}{a+b+c}\rho_{12} & \frac{r_2(a+b)}{a+b+c}\rho_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, a 、 b 、 c 为转子的结构参数; m_1 、 m_2 为校正平面上的不平衡质量; U_1 、 U_2 为传感器信号输出。

标定系数 ρ_{11} 、 ρ_{21} 、 ρ_{12} 、 ρ_{22} 包含了不平衡量与测试结果之间除了转子几何参数以外的耦合关系, 即标定的结果涵盖转子质量、系统阻尼、传感器灵敏度和电路灵敏度在测量过程中的作用。解式(4)后可以获得标定结果:

$$\left. \begin{aligned} \rho_{11} &= \frac{U_{1x}(a+b+c)}{m_{1x}r_1(b+c)} \\ \rho_{12} &= \frac{U_{2x}(a+b+c)}{m_{1x}r_1a} \\ \rho_{21} &= \frac{U_{1y}(a+b+c)}{m_{2y}r_2c} \\ \rho_{22} &= \frac{U_{2y}(a+b+c)}{m_{1y}r_2(a+b)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由于系统阻尼和转子的惯性量是与测量转速有关的函数, 所以只有在标定转速和测量转速完全一致的情况下才会测量出比较精确的结果。为了实现整个转速范围内的准确测量, 避免对测量结果进行补偿和修正, 需要对标定过程进行改

进。首先,在测量的整个转速范围内选取能够覆盖整个测量范围的有限个测量转速,同时在平衡机允许的工件质量范围内选取多个不同质量的转子。然后分别在不同的测量转速下采用不同质量的转子对系统进行标定,获得一组沿测量转速和转子质量分布的系统标定结果。最后,对得到的一组系统标定结果采用双 3 次 B 样条进行插值运算,获得整个测量范围内对应不同转速和不同转子质量的标定结果,以实现硬支承和软支承下刚性转子的动不平衡测量系统的永久标定。

3 多维网格插值原理

式(5)中动不平衡测量系统的标定结果与测量转速和转子质量密切相关,所以只在某个转速和某个转子质量下进行标定,尤其在软支承下的动不平衡测量中(转子质量和系统阻尼不可被忽略时),是无法实现整个测量范围内的系统的永久标定的。所以我们提出在有限个测量转速和有限个不同转子质量下对系统进行标定,在由测量转速和转子质量张成的网格上对标定结果进行插值以获取整个测量范围内的系统特性,实现系统的永久标定。B 样条有足够的精度且可在计算机上方便地实现,适用于做插值以获取系统的永久标定结果。

在整个测量范围内,引入分划 $\Delta = \Delta\omega\Delta A$,其中, $\Delta\omega$ 是对测量转速的分划, ΔA 是对不同转子质量的分划,定义 $\Delta\omega: \alpha = \omega_0 < \omega_1 < \dots < \omega_L = \beta$; $\Delta A: a = A_0 < A_1 < \dots < A_N = b$ 。分划 $\Delta = \Delta\omega\Delta A$ 将整个测量转速和转子质量划分为 $N \times L$ 个区域: $\Omega_{ij} = \{(\omega, A) : \omega \in [\omega_i, \omega_{i+1}], A \in [A_j, A_{j+1}], i = 0, 1, 2, \dots, L-1; j = 0, 1, 2, \dots, N-1\}$ 。

B 样条插值张成的曲面可表示为

$$P(\omega, A) = \sum_{i=0}^L \sum_{j=0}^N G_{i,k}(\omega) G_{j,k}(A) p_{i,j} \quad (6)$$

$$\omega_k \leq \omega \leq \omega_{L+1}, A_k \leq A \leq A_{N+1}$$

其中, $p_{i,j}$ 为节点 (ω, A) 上的控制点; $G_{i,k}(\omega)$ 、 $G_{j,k}(A)$ 分别为沿分划 $\Delta\omega$ 和沿分划 ΔA 上的 k 次基函数,并且有如下的迭代形式(Cox - de Boor)^[6-7]:

$$\left. \begin{aligned} G_{i,1}(x) &= \begin{cases} 1 & x \in [x_i, x_{i+1}) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ G_{i,k}(x) &= \frac{x - x_i}{x_{i+k-1} - x_i} G_{i,k-1}(x) + \\ &\quad \frac{x_{i+k} - x}{x_{i+k} - x_{i+1}} G_{i+1,k-1}(x) \quad k \geq 2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

在式(7)中,当 0 被 0 除时,定义其结果为 0。当次数 $k = 4$ 时,式(7)就简化为双 3 次 B 样条的

曲面方程。在进行动平衡测量系统的标定实验中,首先选取多个测量转速和多个转子质量进行系统的标定操作,以获取一组分布于节点 (ω, A) 上的标定结果值 $P(\omega, A)$:

$$P(\omega_i, A_j) = \sum_{i=0}^L \sum_{j=0}^N G_{i,4}(\omega) G_{j,4}(A) p_{i,j} = Q_{i,j} \quad (8)$$

$$\omega_4 \leq \omega \leq \omega_{L+1}, A_4 \leq A \leq A_{N+1}$$

式(8)可简化为 $G_{\omega} p G_A^T = Q$ 。通过多点标定获取 $Q_{i,j}$, 然后通过解式(8)就可获得各个节点下的控制点值,进一步通过式(7)即可获取任意转速和任意转子质量下进行测量时所需要的系统标定系数,从而实现系统的永久标定。

4 实验结果与分析

实验在德国申克公司的 HY2BK 动平衡机上配合 ST590 动不平衡电测箱进行。当输入的动不平衡信号频率为 2~100Hz 时,该电测箱测量精度可达到 $0.5 \text{g} \cdot \text{mm}/\text{kg}$ 。系统采用磁电式传感器检测不平衡量引起的振动。

实验中采用 0.5kg、1.6kg、5kg、16kg 四种不同质量的转子,分别在转速 280、480、680、880、1080、1280、1480r/min 下对动平衡机进行了标定操作,每一次标定按照式(5)进行,得到标定结果 ρ_{11} 、 ρ_{12} 、 ρ_{21} 、 ρ_{22} 。全部完成之后将获得一组标定结果,然后沿测量转速和转子质量采用双 3 次 B 样条插值算法插值,获取测量转速范围和质量允许范围内任一点的系统标定系数。实验后的插值标定结果如图 4 所示。为了验证采用双 3 次 B 样条插值进行标定的有效性和准确性,同时在转速为 380、580、780、980、1180、1380r/min 时采用插值后的标定系数对系统进行验证,将测量的结果与标准不平衡量进行对比,表 1 给出了测量的结果和测量的误差。

从实验数据可以看出:随着测量转速的升高,系统的标定系数也呈现出增大的趋势,并且当转速超过临界值 1100r/min 左右时,标定系数会急剧增大,这表明与转速有关的测量参数对系统的标定结果有重要的影响。当测量转速更接近系统的固有频率时,转速对标定结果的影响就更加明显。这也说明了测量转速对动平衡测量和标定过程的影响是不可忽略的。

除此之外,从实验结果还可以看出,当测量转速比较低时转子的质量对系统的标定结果几乎没有影响,只有当测量转速超过某一临界值时,转子的质量才对系统的标定结果有明显的影。同时还能看出,转子质量的影响比起测量转速对系统

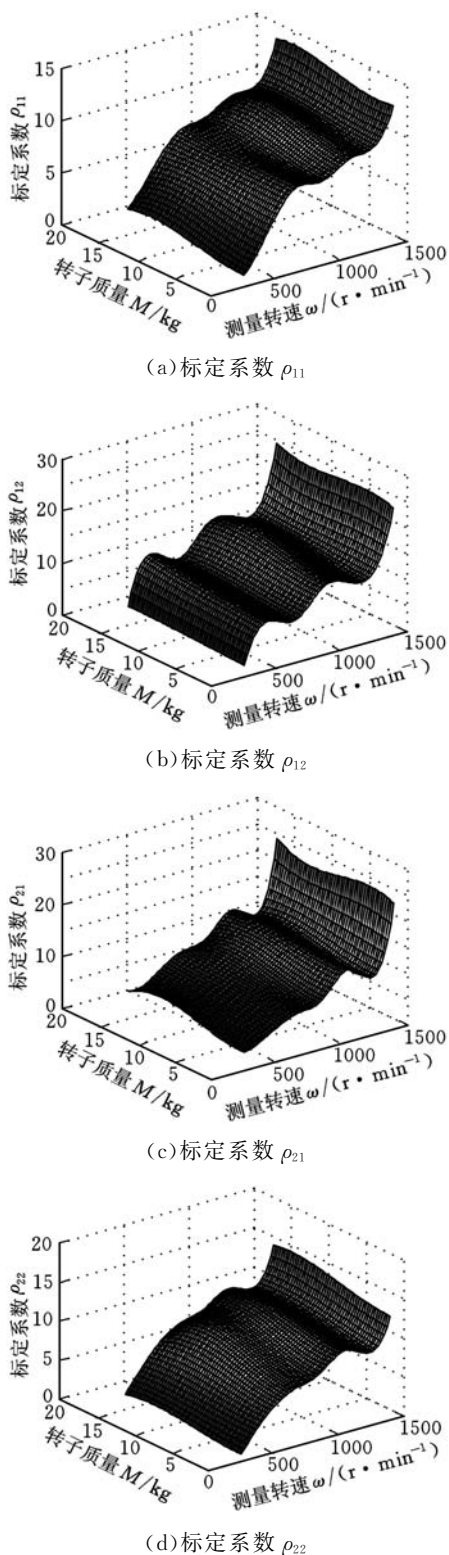


图 4 标定系数的双 3 次 B 样条插值结果

标定结果的影响要小。在转速比较低(远远低于系统的固有频率)时系统的标定结果几乎不受测量转速和转子质量的影响,这也同时验证了通常的硬支承平衡机永久标定的适应性。当测量转速在一个比较大的范围内运行时,测量转速和转子质量对系统的测量和标定将带来不可忽略的影响。

在表 1 中,采用标准的不平衡试重进行测试验证,将测量结果与不平衡量试重的标称值进行

表 1 标定结果和测量结果

测量条件		标定系数				不平衡试重		测量结果	
转子质量 M (kg)	测量转速 ω (r/min)	ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{21}	ρ_{22}	质量 m (g)	相位 $^{\circ}$	幅值误差 e_{error} (%)	相位误差 $^{\circ}$
0.5	380	2.60	7.78	3.99	2.94	0.822	0	1.06	2
0.5	580	6.76	8.03	6.78	6.16	0.822	0	2.45	1
0.5	780	7.93	10.00	7.98	7.43	0.822	0	3.44	3
0.5	980	8.46	13.05	11.89	9.42	0.822	0	2.04	2
0.5	1180	9.38	11.41	11.66	9.54	0.822	0	0.20	1
0.5	1380	11.64	19.29	17.26	10.86	0.822	0	1.52	2
1.6	380	2.65	7.90	4.00	2.93	1.79	0	2.52	2
1.6	580	6.77	8.10	6.87	6.21	1.79	0	2.76	3
1.6	780	7.93	10.01	8.01	7.44	1.79	0	3.84	1
1.6	980	8.47	13.06	11.82	9.34	1.79	0	1.44	2
1.6	1180	9.43	11.43	11.49	9.58	1.79	0	0.24	1
1.6	1380	11.57	19.65	17.58	10.97	1.79	0	2.52	2
5	380	3.04	8.26	4.39	3.08	3.72	0	3.84	2
5	580	6.85	8.46	6.98	6.85	3.72	0	1.20	1
5	780	8.03	10.39	8.64	8.27	3.72	0	4.08	2
5	980	8.98	13.86	12.24	9.84	3.72	0	1.20	1
5	1180	9.86	12.03	11.74	10.00	3.72	0	3.84	1
5	1380	11.68	19.90	18.13	11.53	3.72	0	4.20	0
16	380	3.40	9.97	4.28	3.43	8.33	0	1.32	2
16	580	6.92	9.67	7.52	7.10	8.33	0	2.34	0
16	780	8.39	11.07	9.19	8.66	8.33	0	3.00	3
16	980	9.37	14.80	12.63	10.33	8.33	0	1.44	1
16	1180	10.05	13.02	12.64	10.45	8.33	0	0.12	0
16	1380	12.52	20.79	19.07	12.64	8.33	0	2.16	2

了对比,其中最大的幅值误差为 4.2%,大多数的测量幅值误差在 2%以内,相位误差大多在 3°以内。采用基于双 3 次 B 样条插值标定后的系统测量精度与状态标定后的系统测量精度基本一致,基于双 3 次 B 样条的标定方法可以实现较宽测量转速范围(软支承和硬支承)内的永久标定。

5 结语

实验中的测量结果表明,动不平衡测量中,与测量转速和转子质量有关的测量条件对动不平衡系统的系统标定和测量结果有重要影响,尤其当测量转速接近系统的固有频率时,这种影响更加显著。当测量的转速范围较宽时,某个转速和某个质量的转子的标定结果不能适用于整个测量范围。采用有限个测量转速和转子质量进行系统标定,并将标定结果采用双 3 次 B 样条沿测量转速和转子质量进行插值,可以获得足够高的测量精度,实现转子在软支承和硬支承系统下的永久标定。

参考文献:

[1] 刘钊,任远,陆文. 动平衡试重标定法的原理与应用[J]. 制冷空调与电力机械,2007(1): 70-72.
 [2] 贺大拙. 二支座二配重面动平衡系统的快速平衡方案[J]. 中国空间科学技术,1981(3): 30-35.

永磁同步电机驱动的液压动力系统设计与实验分析

贾永峰^{1,2} 谷立臣¹

1. 西安建筑科技大学, 西安, 710054 2. 陕西交通职业技术学院, 西安, 710018

摘要: 针对传统异步电机驱动液压动力源在实际应用中存在的效率低、响应速度慢以及低速调节性能不稳定等缺陷, 将永磁同步电机节能、调速性能好与齿轮油泵不能调速但可靠性好的技术特点相结合, 提出了一种节能型液压动力源, 并在节能和变频调速理论指导下设计开发了实验系统, 实验结果表明所研究的动力源具有可行性, 而且该动力源还表现出一些特有的系统性能和技术优势。实验结果还表明: 所提出的液压动力源在负载功率匹配、响应速度、调速精度等方面均优于异步电机驱动的液压动力源, 在低速轻载时节能效果尤为显著。

关键词: 永磁同步电机; 液压动力源; 功率匹配; 节能调速

中图分类号: TH137

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.03.008

System Design and Experimental Analysis for Hydraulic Power Unit with Permanent Magnet Synchronous Motor Drive

Jia Yongfeng^{1,2} Gu Lichen¹

1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710054

2. Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an, 710018

Abstract: For the traditional hydraulic power system driven by the asynchronous motor (ASM) has some defects in practical applications such as low efficiency, slow response and instability at low-speed, this paper researched a new energy-saving hydraulic power system based on the permanent magnet synchronous motor (PMSM) which had good performance in energy-saving and speed regulation and the gear pump which had good performance in reliability. And an experimental system was designed under the guidance of energy-saving and frequency control theory. The experimental results prove the feasibility of such a power source, show some unique system performance and technical advantages, and show that the hydraulic power driven by the PMSM is better than the hydraulic power driven by the ASM in power matching of the load, response time and speed regulation precision, especially in the energy-saving of the low-speed and light load.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); hydraulic power unit; power matching; energy-saving speed regulation

0 引言

液压设备由于其具有传动平稳、调速方便、功率体积比大等优良特性而被广泛应用于工程机械中, 但液压动力系统的整体能量利用率不高, 系统效率较低, 因此必须采用节能设计提高能源利用

率。以往的节能设计都将重点放在了液压回路的设计和高效液压元件的选择上, 并且取得了较好的节能效果, 如采用负载自适应控制, 尽量减少溢流损失和节流损失, 采用二次元件和蓄能器回收部分能量等。但是随着设计的改进和液压回路效率的提高, 想要进一步提高其效率变得越来越困难, 因此有必要将驱动液压系统的电机也包括在内来考虑, 使电机提供的功率和负载所需功率相匹配。

收稿日期: 2011-03-07

基金项目: 陕西省工业攻关项目(2008K05-04); 陕西省教育厅产业化项目(08JC10)

[3] 周仕炎, 肖之中. 解决刚性转子左右校正面影响问题的一个新途径[J]. 试验技术与试验机, 1982(4): 4-9.

[4] 刘健, 潘双夏, 杨克己. 动平衡机系统误差分析及标定方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004(4): 1-3.

[5] Qin P, Cai P. A Novel Vibration System Based on Instantaneous Motion Center for High Accuracy Dynamic Balancing Measurement of Outboard Rotor [J]. Proc. ImechE, Part C: J. Mechanical Engineering Science, 2009, 223(2): 387-395.

[6] Cox M G. The Numerical Evaluation of B-splines

[J]. Journal of Applied Mathematics, 1972, 10(2): 134-149.

[7] Prautzsch H, Boehm W, Paluszny M. Bezier and B-Spline Techniques[M]. Berlin: Springer, 2002.

(编辑 苏卫国)

作者简介: 赵鼎鼎, 男, 1982年生。上海交通大学仪器科学与工程系博士研究生。研究方向为动态测试。发表论文 7 篇。
蔡 萍, 女, 1963年生。上海交通大学仪器科学与工程系教授、博士研究生导师。