

文章编号:1006-1355(2018)04-0056-06

滚筒洗衣机瞬态脱水阶段控制策略的研究

刘 铸^{1,2}, 陈海卫^{1,2}, 徐达勇^{1,2}

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要:滚筒洗衣机在瞬态脱水阶段的振动较为剧烈,为此制定脱水启动阶段电机转速的两种控制策略来实现滚筒洗衣机的减振降噪。首先,在动力学仿真软件ADAMS中建立滚筒洗衣机动力学模型,分析脱水工况下启动加速度以及偏心负载质量对瞬态脱水振动的影响。进而,依据瞬态脱水振动特点制定两种控制策略:分段式加速的开环控制策略以及基于传感器测振的闭环控制策略。最后,建立ADAMS与Simulink联合控制仿真模型,对比研究传统加速方式工况下以及两种控制策略下滚筒洗衣机瞬态脱水阶段的振动情况。结果表明这两种控制策略在瞬态脱水阶段对滚筒洗衣机具有良好的抑振作用。

关键词:振动与波;滚筒洗衣机;瞬态脱水阶段;振动抑制;控制策略

中图分类号:TM925.33;O322;TP391.9

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2018.04.011

Study on the Control Strategies for the Spin-drying Starting Process of a Horizontal Axis Washing Machine

LIU Zhu^{1,2}, CHEN Haiwei^{1,2}, XU Dayong^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, Jiangsu China)

Abstract : The vibration of horizontal axis washing machines in spin-drying starting process is very intense. Therefore, two control strategies of the motor speed in spin-drying starting process are set forth to reduce the vibration. Firstly, the dynamics model of the horizontal axis washing machine is established in the dynamic simulation software ADAMS, and the influence of the starting acceleration and the eccentric load on the vibration of the spin-drying starting process is analyzed. Then, two control strategies, an open-loop control strategy based on stepped acceleration and a closed-loop control strategy based on vibration measurement by a sensor, are established according to the characteristics of the vibration of the spin-drying starting process. Finally, a joint control simulation model of ADAMS and Simulink is established, and the vibration of the horizontal axis washing machine in spin-drying starting process is obtained. The vibration results the traditional acceleration method and the two control strategies are compared mutually. It is shown that these two control strategies have a good anti-vibration effect for the horizontal axis washing machines in spin-drying starting process.

Keywords : vibration and wave; horizontal axis washing machine; spin-drying starting process; vibration suppression; control strategies

脱水振动一直是制约洗衣机提升减振降噪性能的关键。通过优化洗衣机悬挂系统以及对脱水阶段进行振动控制可以取得一定的振动抑制效果。

在悬挂系统的结构优化方面,魏玉东建立了滚筒洗衣机悬挂系统参数化模型,通过仿真得到影响整机动态特性的关键零部件参数,并提出了结构优化思路^[1]。Turkay等讨论了悬挂系统的不同优化公式,通过优化减振器刚度、阻尼系数降低了脱水瞬态振动^[2-3]。近年来,平衡环技术被逐步引入到滚筒洗衣机中,其为一中空的环形腔体,内部采用自由移动的球体或液体作为平衡质量。其在临界转速之上可显著抑制衣物偏心所引起的脱水振动,进而降低整机的噪声水平。但平衡环在临界转速之下增大了偏

收稿日期:2017-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51205166)

作者简介:刘铸(1992-),男,河北省张家口市人,硕士研究生,主要研究方向为噪声振动控制、CAE仿真。

E-mail: 18800582867@163.com

通信作者:陈海卫(1982-),男,硕士生导师,副教授。

E-mail: chenhaiwei8012@163.com

心质量,使脱水瞬态振动加剧。陈海卫等指出了平衡环引入后,传统平面悬挂结构难以抑制平衡环所引起的瞬态振动,在筒体底部改用四根阻尼器支撑,可大大降低平衡环所引起的筒体的摇摆运动^[4]。在脱水瞬态阶段控制方面,Nygads等分析了磁流变阻尼器对滚筒振动的影响,并运用对阻尼器的控制策略实现了对脱水瞬态振动的抑制^[5]。陈海卫等通过分析不同负载工况下的脱水振动情况,得到了最佳加速时间常数^[6]。

现有对滚筒洗衣机脱水振动的研究多集中于悬挂系统优化与控制,而对脱水阶段转速的控制策略研究极少。本文在脱水阶段对转速的两种控制策略进行对比分析,证明这两种控制策略对于滚筒洗衣机脱水振动具有良好的抑制效果。

1 滚筒洗衣机模型与振动评价指标

1.1 仿真模型的建立

为研究脱水控制策略,首先应分析滚筒洗衣机的振动特性,建立滚筒洗衣机仿真模型。以LG公司某款新型滚筒洗衣机为例,见图1(a),其特点如下:

(1) 盛水桶直接固定在机壳上,降低了可产生噪音部件的数量;

(2) 悬挂系统为倒立摆式结构,脱水桶通过减振器与机壳底部直接连接,并随电机转子转动;

(3) 为双平衡环结构,脱水桶前后两侧外壁均装有球体平衡环。此款洗衣机由于双平衡环的使用而使脱水稳态振动大大减小,但在脱水瞬态阶段,若加速启动方式不当,左右水平方向振幅较大,易发生脱水桶撞筒以及机壳走动现象。在电机定子上安装一个三轴加速度传感器可以检测脱水桶三个方向的振动信号,通过将测得的振动加速度信号两次积分即可得到振动位移,也就得到了脱水桶的振动情况。

通过动力学仿真软件ADAMS建立该滚筒洗衣机虚拟样机模型如图1(b)所示。

在脱水桶上传感器安装位置处建立随体坐标系XYZ,代表脱水桶的三个振动方向。其参数按照实体样机设置如表1所示。

1.2 评价瞬态脱水振动的指标

评判瞬态脱水振动剧烈与否的两个重要指标是瞬态最大振幅以及振幅较大的瞬态振动持续时间,如图2所示。

而这两点主要受滚筒洗衣机悬挂系统以及平衡环的影响。首先,滚筒洗衣机从电机启动达到脱水转速阶段,会经过悬挂系统的共振频率区间以致脱水桶振动较大;其次,这一转速也会经过平衡环的失

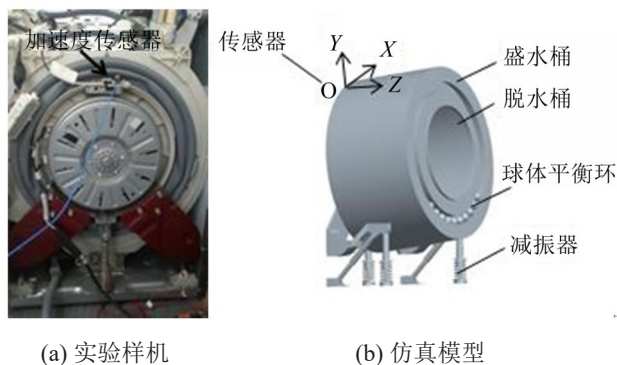


图1 滚筒洗衣机样机与模型

表1 滚筒洗衣机基本参数表

参数	符号	默认值	单位
脱水桶质量	m_b	4.5	kg
衣物旋转半径	R_u	0.2	m
悬挂系统弹簧刚度系数	K	7 000	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
悬挂系统黏性阻尼系数	c_b	150	$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$
平衡环质量	m_d	1	kg
平衡环节圆半径	d	0.23	m

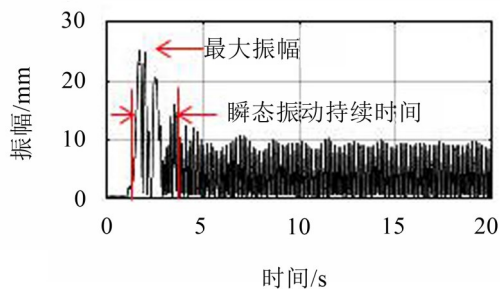


图2 评价瞬态脱水振动的两个指标

稳区间,平衡环内球体与衣物间断性处于同一侧,增大了旋转偏心质量而使振动加剧^[7]。

对于最大振幅也有限制条件,最大振幅过大时会发生脱水桶撞筒以及机壳的走动现象^[8]。所以最佳脱水瞬态阶段应使电机快速启动到脱水转速,同时最大振幅又不超过限定值。

为研究最大振幅的限定值,进行滚筒洗衣机脱水振动实验及仿真,可得当各方向振幅达到25 mm时会发生撞筒现象,其振幅可以通过传感器直接测得。但无法通过测量来直接判断机壳是否走动。为此对机壳走动条件进行以下分析。

当悬挂系统水平方向力大于洗衣机地脚静摩擦力时,即会发生走动现象,此时

$$\Delta F = F_{\text{水平}} - f_{\text{静}} > 0 \quad (1)$$

$$f_{\text{静}} = \mu \cdot F_{\text{竖直}} \quad (2)$$

式中: ΔF 为机箱走动阻抗力, $F_{\text{水平}}$ 为悬挂系统对地脚产生的水平方向的力, $F_{\text{竖直}}$ 为洗衣机对地面的正压力, $f_{\text{静}}$ 为地脚与地面之间的静摩擦力, μ 为静摩擦

系数。根据地面情况,静摩擦系数 μ 通常取值0.25~0.6^[9]。

由于对悬挂系统直接测力很难实现,可以通过振幅来间接分析受力情况。通过仿真分析可知在不同的负载及加速度情况下,各方向振幅和悬挂系统力的变化存在正比关系,但比值并不固定。水平方向力和振幅比值在24至33之间,竖直方向力与竖直方向振幅比值在2.5至3.7之间,若分别取平均值,则可估算出

$$\Delta F = 28.5A_{\text{水平}} - \mu(3.1 \cdot A_{\text{竖直}} + G) \quad (3)$$

$$A_{\text{水平}} = \sqrt{A_X^2 + A_Z^2} \quad (4)$$

式中: μ 取值0.25, G 为洗衣机整机重量,取值646.8 N, $A_{\text{水平}}$ 、 $A_{\text{竖直}}$ 分别为水平方向(X、Z合方向)和竖直方向(Y方向)脱水桶位移,而三个方向振动位移可以通过传感器测得。

综上所述,脱水瞬态阶段应满足的条件是:脱水桶三个方向振幅均不超过25 mm,机箱走动阻力大于0,同时脱水瞬态阶段时间应尽量减小。

2 开环控制策略

2.1 传统的脱水加速方式

本文中滚筒洗衣机采用直驱电机,其脱水转速控制采用线性加速形式。传统的脱水加速启动方式是将电机从静止直接线性加速到脱水工作转速(6.7 Hz以上),加速度为 $2\pi\text{rad/s}^2$ 。经仿真分析可知在滚筒洗衣机基本参数一定时,脱水瞬态最大振幅受负载质量以及脱水加速度的影响。图3为在负载质量为1 kg、3 kg、5 kg、7 kg时,电机从静止直接线性加速到6.7 Hz时,最大振幅 A (为X向瞬态最大振幅)随加速度 a 的变化情况。可以看出,若电机直接从静止加速到脱水转速,在负载达到7 kg时,最大振幅将达到30 mm以上,极易发生撞筒和机壳走动现象。为减小脱水瞬态最大振幅,本文首先采用如下的开环控制策略。

2.2 分段加速方式

通过分析脱水振动特点,将脱水阶段分为三个阶段进行,如图4所示,分为A、B、C三个加速区间。

在A区间先将电机线性加速到较低转速 Ω_1 ,稳定运行一段时间,使衣物能随滚筒旋转并保持较低的振动。B区间转速从 Ω_1 以加速度 a_1 线性加速到转速 Ω_2 ,为脱水瞬态振动区间,此间电机转速要经过悬挂系统的共振转速区间以及平衡环内球体的失稳转速区间,因此脱水桶振幅较大,瞬态最大振幅位于该区间内,是下文重点分析的阶段。C区间为转速从 Ω_2 加速到所需脱水转速 Ω_3 (6.7 Hz以上),由于

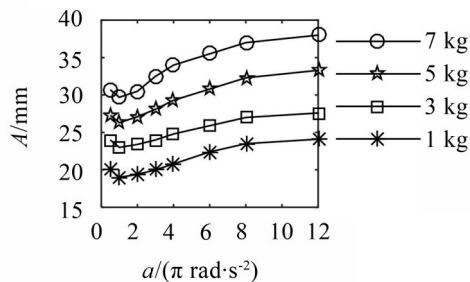


图3 直接加速方式的最大振幅随加速度变化情况

在转速 Ω_2 以上时已经达到了脱水稳态阶段,因此振动较小。

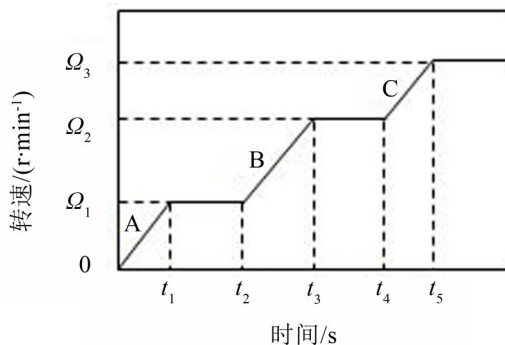


图4 分段加速方式

仿真分析可知,分段加速的最大振幅受到负载质量及加速度 a_1 的影响。图5为采用分段加速方式时最大振幅 A 在不同负载下随加速度 a_1 变化情况。与图3对比可以看出其最大振幅明显减小。

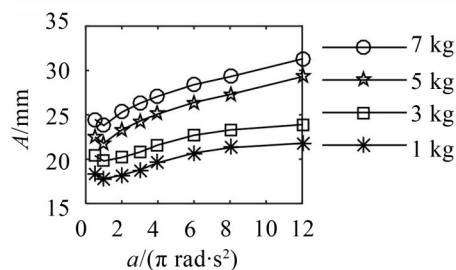


图5 分段加速时最大振幅随加速度 a_1 变化情况

2.3 基于分段加速方式的开环控制策略

本小节基于分段加速的方式,制定一种开环控制策略。为得到加速阶段的关键参数 Ω_1 、 Ω_2 、 a_1 ,对滚筒洗衣机模型进行动力学仿真分析。图6为在不同负载质量下脱水桶稳态振幅(X向)与转速的关系,发现其振幅最大的转速区域位于2.5 Hz至4.2 Hz。这一区域应当位于分段加速中的B区间内,下面通过分析振动特点对B区间三个关键参数进行选取。

首先考虑 Ω_1 的选取,此时衣物可以随滚筒转动,其离心力大于自身重力。当离心力等于自身重力时,存在一临界转速 ω ,由公式

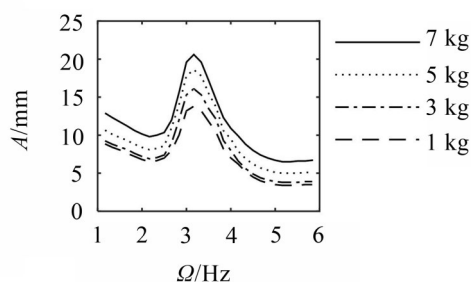


图6 不同负载时稳态振幅随转速的变化情况

$$mg = m\omega^2 r \quad (5)$$

得到 $\omega = 1.1 \text{ Hz}$ 。式中,重力加速度 g 取 9.8 m/s^2 ,衣物旋转半径 r 取 0.2 m 。若使滚筒以启动转速 Ω_1 旋转时,衣物能随脱水桶转动,则 $\Omega_1 \geq \omega$,从图6可以看出在 2.1 Hz 处振幅最小,取 $\Omega_1 = 2.1 \text{ Hz}$ 。

其次,考虑脱水稳态转速 Ω_2 ,若使脱水振动达到稳态,平衡环在此时应达到稳态,同时脱离悬挂系统的共振转速区间。仿真分析可知,这一转速位于 4.8 Hz 以上。由图6可知,选取 $\Omega_2 = 5.2 \text{ Hz}$ 时稳态振动最小。

最后,考虑加速度 a_1 对脱水瞬态振幅的影响,从图5综合考虑各负载下最大振幅,选取 $a_1 = \pi \text{ rad/s}^2$,可以使最大振幅尽量达到最小。

综上,开环控制策略以固定的三段式加速方式启动,选取 $\Omega_1 = 2.1 \text{ Hz}$ 、 $\Omega_2 = 5.2 \text{ Hz}$ 、 $a_1 = \pi \text{ rad/s}^2$ 。

3 闭环控制策略

3.1 闭环控制策略的制定

上节所述的开环控制策略,是在不同的负载质量下采用同一种分段加速模式。由图5可知,负载 3 kg 及以下时, a_1 对最大振幅的影响不大,且最大振幅也相对较小,以 $\pi \text{ rad/s}^2$ 加速会增加瞬态振动持续时间,而以较大的加速度运行可以迅速通过瞬态振动区间,并且最大振幅也不会超过限定值。由于在不同负载时的振动情况并不相同,传统的启动方式并不能实现针对不同负载情况的最佳启动方式。例如由图5可以看出在负载 3 kg 、 7 kg 时,最佳加速度应在 $8 \pi \text{ rad/s}^2$ 、 $\pi \text{ rad/s}^2$ 左右,且不会超过脱水瞬态振动限定值。但是我们并不能预知负载质量,所以制定了一种闭环控制策略。

闭环控制策略是基于分段启动方式的将三轴加速度传感器检测到的振动信号反馈来控制电机加速度的策略。首先电机加速到启动转速 Ω_1 ,稳定一段时间后,以 $\pi \text{ rad/s}^2$ 的加速度启动到稳态转速 Ω_2 ,若加速度传感器检测到某方向振幅达到 25 mm ,则通过反馈立即降速到 Ω_1 ,一段时间后再以减半的加速

度 $\pi \text{ rad/s}^2$ 启动,以此类推,最小加速度为 $\pi \text{ rad/s}^2$,直到能够顺利加速到 Ω_2 。稳定一段时间后再加速到脱水工作转速 Ω_3 。

下文将通过 ADAMS 与 Simulink 联合仿真方式建立闭环控制策略模型,并模拟其不同负载时的加速方式曲线。

3.2 ADAMS 与 Simulink 联合控制仿真模型

建立 ADAMS 和 Simulink 的联合控制模型来对振动反馈控制脱水转速进行仿真。首先在 ADAMS 动力学模型的基础上,设置一个变量 Speed,即将脱水阶段转速作为输入,设置三个变量 SensorX、SensorY、SensorZ,即将传感器测得三个方向的振幅作为输出,导出控制参数并生成链接文件。然后在 Simulink 中建立反馈控制模型如图7所示,该模型包括几个模块,分别为防行走检测模块 a、防撞筒检测模块 b、计数模块 c、稳态转速控制模块 d、加速度选择模块 e、启动速度检测模块 f 以及 ADAMS 动力学计算模块 g。下面分别对几个模块进行简介。

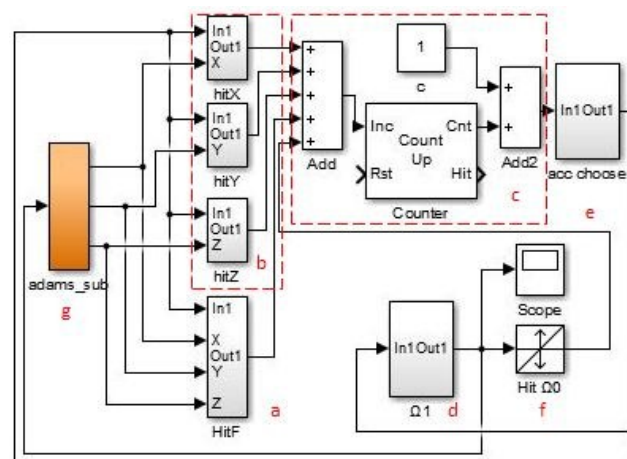


图7 Simulink 脱水闭环控制模型

在防行走检测模块中,输入量为 X 、 Y 、 Z 三个方向的振幅,通过式(4)、式(5)建立模块得到 ΔF 。用 Switch 做为判断开关,当加速度大于 0 时输入 ΔF ,小于 0 时输入一个负数,即加速度大于 0 时才会对 ΔF 是否大于 0 做出判断。当 ΔF 达到 0 时即将发生行走现象,触发 Hit Crossing 输出一个上升沿信号。

在防撞筒检测模块中,分别单独判断 X 、 Y 、 Z 三个方向的振幅信号。用 Switch 做为判断开关,当加速度大于 0 时输入振幅,小于 0 时输入 0 ,即加速度大于 0 时才会对 X 、 Y 、 Z 三个方向的振幅是否大于 0 做出判断。当振幅达到 25 时即将发生撞筒现象,触发 Hit Crossing 输出一个上升沿信号。

在计数模块中,将 a、b 两个模块产生的上升沿计数,加一后传给加速度选择模块。

在稳态转速控制模块中,对加速度积分得到转速并进行判断,转速小于 Ω_2 时直接输出该转速;转速达到 Ω_2 时,输出稳态转速 Ω_2 ,此时脱水启动成功。

启动速度检测模块为一个单独的Hit Crossing,触发值为2.1,当检测到转速为 Ω_1 时,产生一个上升沿信号。

在加速度选择模块中,将计数模块的信号输入Multiport Switch模块进行判断,然后做出相应的加速减速选择。脱水启动后初始值为1,延时一段时间后开始加速到转速 Ω_1 ,此时触发启动速度检测模块,计数变为2;延时一段时间后以 $8\pi\text{rad/s}^2$ 加速,若由于振幅过大触发防撞筒/行走检测模块,计数变为3并以 $8\pi\text{rad/s}^2$ 减速到 Ω_1 ;若没有触发则顺利加速到稳态转速 Ω_2 。直至选取合适的加速度启动成功。若以 $\pi\text{rad/s}^2$ 加速也出现振幅过大情况,则计数变为9并减速报错,此时应适当调整衣物质量。

ADAMS动力学计算模块是在MATLAB命令窗口输入Adams_sys后得到的ADAMS_sub,将该方框拖拽到Simulink模型中即可实时对ADAMS中的动力学模型进行计算。

对控制模型参数进行设置,选择Simulink模型菜单栏Simulation-Configuration Parameters, Type选择Variable-step, Solver选择ode45, Max step size设置为0.000 1或以下以保证精度。

图8(a)、图8(b)分别为负载3 kg、7 kg时仿真得到的闭环控制策略速度曲线。可以看出,3 kg时

$a_1 = 8\pi\text{rad/s}^2$ 可以直接加速到 Ω_2 ; 7 kg时 a_1 从 $8\pi\text{rad/s}^2$ 依次降到 $\pi\text{rad/s}^2$ 后可以顺利加速到 Ω_2 。

4 仿真对比

图9、图10分别对比了在负载质量为3 kg、7 kg时最大振动方向(X方向)振动曲线。从图9可以看出,负载为3 kg时,传统的直接加速方式最大振幅较大,持续时间也较长;开环控制策略可以很好地降低最大振幅并在一定程度上缩短瞬态振动时间;闭环控制策略相对于开环控制策略最大振幅略有增加,但是瞬态振动的持续时间大大缩短。

从图10可以看出,负载为7 kg时,直接加速方式最大振幅达到29.7 mm,会发生严重的撞筒以及机壳走动现象;开环控制策略最大振幅为23.8 mm,在最大振幅限定值内;闭环控制策略在依次以 $8\pi\text{rad/s}^2$ 、 $4\pi\text{rad/s}^2$ 、 $2\pi\text{rad/s}^2$ 加速时,振幅会达到25 mm而迅速降速到 Ω_1 ,最终以 $\pi\text{rad/s}^2$ 加速,最大振幅为23.8 mm位于振幅限定值内。所以,两种策略相对于传统的直接加速方式,最大振幅减小明显;相较于开环策略,闭环策略针对不同负载情况选择最优加速度,保持了大负载时振动较小的优点,同时也缩短了小负载时的瞬态振动时间而减小振动。

5 结语

(1) 滚筒洗衣机以传统的加速方式脱水启动时瞬态振动很大,而采用分段加速的开环控制策略可

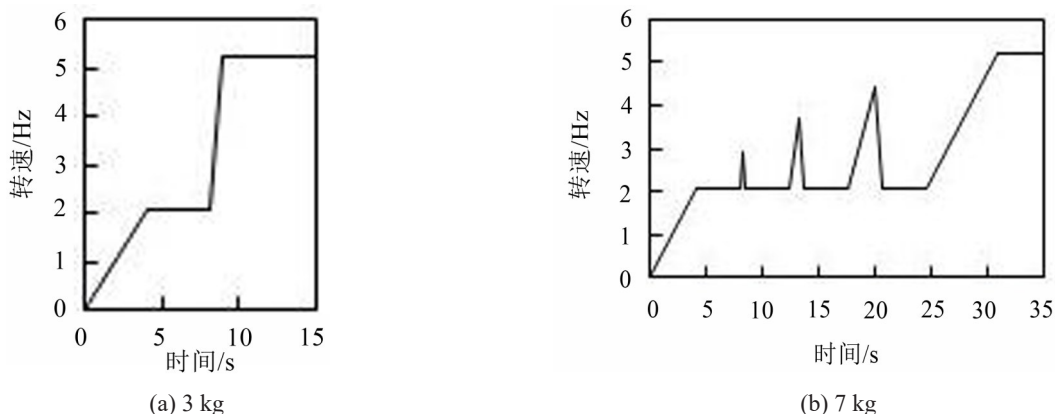


图8 不同负载条件下闭环控制策略速度曲线

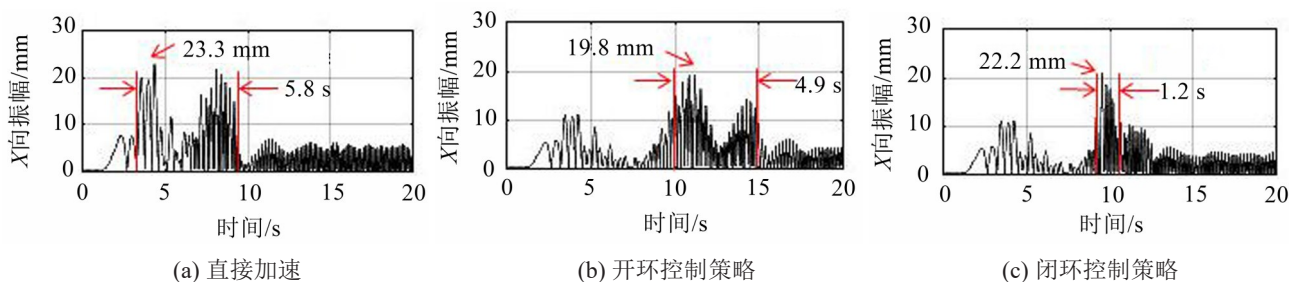


图9 3 kg负载条件下X方向振动曲线

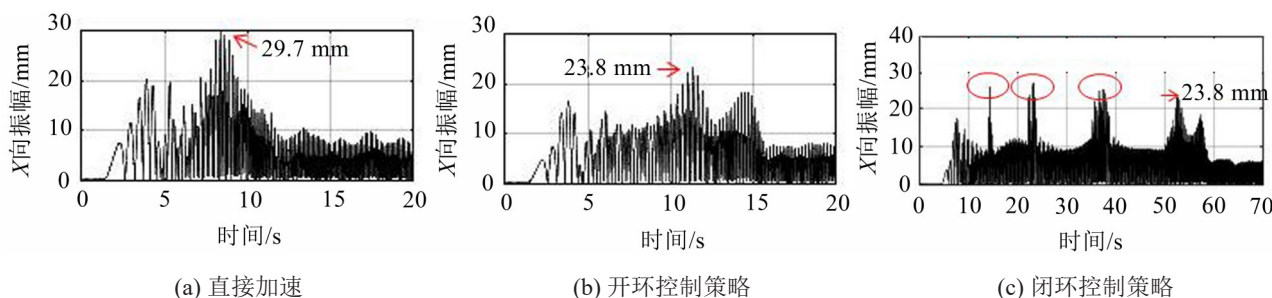


图 10 7 kg 负载时 X 方向振动曲线

以减小瞬态脱水振动。

(2) 衣物负载质量不同时,滚筒洗衣机的最佳脱水启动加速度不同。在负载质量较小时适合以较大加速度启动以缩短瞬态脱水振动的时间;负载质量较大时适合以较小的加速度启动以避免振动过大导致撞筒以及机壳走动现象的发生。

(3) 针对衣物负载质量不同时最佳加速度不同的情况,制定了采用分段加速的闭环控制策略,用传感器检测脱水桶瞬态脱水振动信号,反馈给电机来控制转速,从而实现在不同负载时以最佳加速度脱水启动。闭环控制策略在避免了振动过大引起撞筒以及机壳走动的基础上,可以减小瞬态脱水时间,更好地实现了瞬态脱水阶段的抑振作用。

参考文献:

- [1] 魏玉东. 滚筒洗衣机动态性能研究[D]. 天津:天津大学, 2008.
- [2] TURKAY O S, TUGCU A K, SUMER I T, et al. Suspension design optimization of a washing machine: Part I. Modeling and validation results[C]. Proceedings of the 19 th Annual ASME Design Automation Conference. Indiana, 1992: 117-127.
- [3] TURKAY O S, KIRAY B, TUGCU A K, et al. Formulation and implementation of parametric optimisation of a washing machine suspension system[J]. **Mechanical Systems & Signal Processing**, 1995, 9(4): 359-377.
- [4] 陈海卫, 张秋菊, 吴晓庆. 单侧带平衡环的滚筒洗衣机抑振机理的研究[J]. **机械设计**, 2015(9): 82-86.
- [5] NYGARDS T. Washing machine design optimization based on dynamics modeling[J]. **Chalmers University of Technology**, 2011.
- [6] 陈海卫, 张秋菊. 滚筒洗衣机瞬态脱水振动的分析与控制[J]. **振动与冲击**, 2013, 32(15): 47-53.
- [7] CHUNG J, JANG I. Dynamic response and stability analysis of an automatic ball balancer for a flexible rotor [J]. **Journal of Sound & Vibration**, 2003, 259(1): 31-43.
- [8] CONRAD D C, SOEDEL W. On the problem of oscillatory walk of automatic washing machines[J]. **Journal of Sound & Vibration**, 1995, 188(3): 301-314.
- [9] 顾伟, 孙蓓蓓, 张建润. 滚筒洗衣机机身移位特性分析[J]. **振动、测试与诊断**, 2013, 33(s1): 180-183.
- [7] 刘森. 基础振动诱发的流体管道轴向耦合振动特性[J]. **北京航空航天大学学报**, 2016, 42(3): 610-618.
- [8] 王宇. 高压气井完井管柱系统的轴向流固耦合振动研究[J]. **振动与冲击**, 2011, 30(6): 202-207.
- [9] ZHANG TIANXIAO, LIU XINHUI. Reliability design for impact vibration of hydraulic pressure pipeline systems[J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2013, 26 (5): 1050-1055.
- [10] GÜCÜYEN ENGIN. Numerical analysis of deteriorated subsea pipelines under environmental loads[J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2015, 28(6): 1163-1170.
- [11] CHOU P C, CARLEONE J, HSU C M. Elastic constants of layered media[J]. **Journal of Composite Materials**, 1988, 22(7): 629.
- [12] 张立翔. 流体结构互动理论[M]. 北京: 科学出版社, 2004, 7: 42-54.
- [13] 杨超. 非恒定流充液管系统耦合振动特性及振动抑制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 19-38.
- [14] MORTON K W. 偏微分方程的数值解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006, 1: 69-88.
- [15] 张德丰. MATLAB 数值分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012, 1: 340-351.

(上接第 50 页)