

控制系统延迟对轴扭振的影响

程天威, 王 爽, 杨 影

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘 要: 控制系统中的轴扭振会引起系统控制量的振荡, 加大机械传动装置磨损, 甚至会导致传动轴断裂。在工业应用中, 多采用陷波滤波器抑制轴扭振, 而陷波频率的选取通常未考虑控制系统延迟因素。基于电机角速度增量、轴转矩增量和电机电磁转矩增量的相位图, 分析了控制系统延迟对轴扭振频率的影响。仿真结果对分析结论给予了验证。

关键词: 控制系统; 轴扭振; 陷波频率; 延迟

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)12-0025-05

Influence of Control System Delay on Shaft Torsional Vibration

CHENG Tianwei, WANG Shuang, YANG Ying

(College of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The shaft torsional vibration of control system would cause the oscillation of system control quantity, which would increase mechanical transmission gear wears, and even led to the shaft fracture. The shaft torsional vibration could usually be suppressed by using notch filter on industrial application, but the selection of notch frequency was not considering the factor of control system delay. The influence of control system delay on shaft torsional vibration was analyzed by using the phase diagram of angular velocity increment, shaft torque increment and motor torque increment. Simulation results validated the analytical conclusions.

Key words: control system ; shaft torsional vibration; notch frequency; delay

0 引 言

目前电机传动系统多为两质量或三质量系统, 主要包括控制器、驱动器、电动机和机械传动装置等。其中常用到的传动轴、变速器和联轴器等机械传动装置不是理想刚体。随着应用工况对电机传动系统动态性能的要求越来越高, 系统频带逐渐增宽。当两质量机械传动装置的固有谐振频率落在系统带宽内时, 系统便会产生谐振。如果此时的固有谐振频率信号没有得到有效地衰减, 系统中就会出现持续的谐振现象。长时间工作在这种谐振状态, 会导致系统性能恶化和零部件寿命缩短, 甚至会使传动轴断裂^[1]。

对速度指令加一个低通滤波器是一种避免轴

扭振的方法, 但这会降低伺服系统的频响带宽^[2]。基于陷波滤波器的轴扭振抑制方法能够衰减指定频率的幅值而对其他频率没有影响^[3-5]。在包含弹性机械传动装置的转速电流闭环系统中, 将陷波滤波器串入速度控制环路中, 对转速调节器输出的电流环给定信号进行陷波处理, 从而抑制电机电流的振荡, 进而达到抑制轴扭振的目的^[6]。陷波滤波器的抑制效果主要取决于陷波频率选取。如果设计的陷波频率出现偏差, 会影响轴扭振的抑制效果, 严重时甚至不再适用^[7]。

两质量系统中的控制环节包括转速调节器、电流调节器和测速环节等。通常分析的轴扭振频率是由两质量机械传动装置得出的, 并没有考虑控制环节的影响。现代电机传动系统是数字控制

作者简介: 程天威(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

王 爽(1977—), 男, 博士, 研究方向为电力电子与电机驱动控制。

系统,其以离散时间步长方式运行。离散时由存储数据产生的采样-保持延迟、由执行控制律需要时间产生的计算延迟和由位置估计速度产生的速度估计延迟,都可能会对轴扭振产生影响,其中延迟的作用可以用相位滞后量来表示^[8]。

本文基于电磁转矩增量相对于角速度增量的相位关系,开展了研究控制系统延迟对轴扭振的影响分析。由于电流环的采样频率相比于转速环很快,所以本文着重分析由数字控制在转速环中引入的延迟对轴扭振的影响。

1 两质量系统中的轴扭振

对两质量机械传动装置建模时,可将机械传动装置认为是一个具有机械阻尼特性的弹簧,而电机侧和负载侧可分别简化为具有一定惯量的刚体,如图1所示。

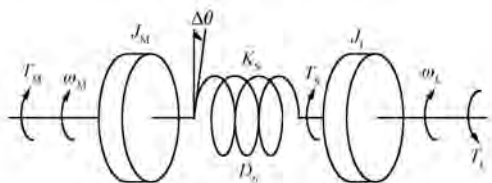


图1 两质量机械传动装置模型

其中: J_M ——电机侧转动惯量;

J_L ——负载侧转动惯量;

D_S ——阻尼系数;

K_S ——刚度系数;

$\Delta\theta$ ——轴扭转角;

T_S ——轴转矩;

T_M ——电机电磁转矩;

T_L ——负载转矩;

ω_M ——电机角速度;

ω_L ——负载角速度。

由图1可得轴转矩方程和运动方程为

$$\begin{cases} T_S = K_S(\theta_M - \theta_L) = \frac{K_S}{s}(\omega_M - \omega_L) \\ T_M - T_S - D_S(\omega_M - \omega_L) = J_M s \omega_M \\ T_S - T_L + D_S(\omega_M - \omega_L) = J_L s \omega_L \end{cases} \quad (1)$$

由于系统的阻尼系数较小,在忽略阻尼系数后,根据式(1)可得两质量机械传动装置模型结构图如图2所示,其中 T_D 为电机动态转矩。

即: $T_M - T_S = T_D$; $T_D = J_M s \omega_M$

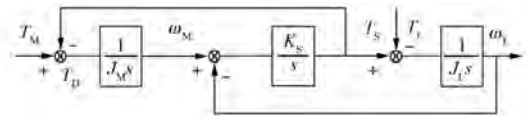


图2 两质量机械传动装置模型结构图

$$\frac{T_S}{T_M} = \frac{1}{(J_M + J_L)} \frac{K_S J_L}{\frac{J_M J_L}{(J_M + J_L)} s^2 + K_S} \quad (2)$$

$$\frac{\omega_M}{T_M} = \frac{1}{(J_M + J_L) s} \frac{J_L s^2 + K_S}{\frac{J_M J_L}{(J_M + J_L)} s^2 + K_S} \quad (3)$$

由式(3)可计算出固有谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K_S \left(\frac{J_M + J_L}{J_M J_L} \right)} \quad (4)$$

2 延迟对轴扭振的影响分析

将由数字控制引入的延迟等效到反馈通道上,可得延迟的传递函数为

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = e^{-\tau s} \quad (5)$$

其中 τ 为延迟时间。

式中: $G(s)$ ——延迟环节的传递函数;

$C(s)$ ——延迟环节的输出量;

$R(s)$ ——延迟环节的输入量。

当延迟时间很小时,常把它展开成泰勒级数,并略去高次项:

$$G(s) = \frac{1}{1 + \tau s + \frac{\tau^2}{2!} s^2 + \dots} \approx \frac{1}{1 + \tau s} \quad (6)$$

由式(6)可得含有延迟的闭环系统框图,如图3所示。其中转速环采用PI调节器,传递函数为

$$G_{ASR}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (7)$$

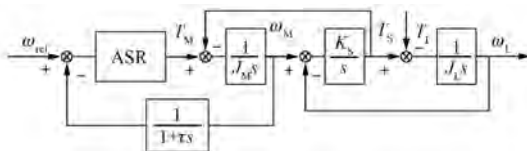


图3 含有延迟的闭环系统框图

由图3可得包含延迟的从电机电磁转矩到电机角速度的传递函数为

$$\frac{\omega_M}{T_M} = (J_L \tau s^2 + J_L s) / [J_M J_L \tau s^3 + J_M J_L s^2 + (K_P J_L + K_S J_L \tau + K_S J_M \tau) s + (K_I J_L + K_S J_L + K_S J_M)] \quad (8)$$

式中: K_P ——转速调节器的比例系数;

K_I ——转速调节器的积分系数。

用 $j\omega$ 代替 s , 可得延迟的传递函数为

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau} \quad (9)$$

转速调节器 ASR 的输入是转速偏差, 在用小信号分析扭振时为 $-\Delta\omega_M$ 。由图 3 可知, 此时 ΔT_M 相对于 $-\Delta\omega_M$ 的总相位滞后角为转速调节器本身引入的相位滞后角与延迟引入的相位滞后角之和:

$$\alpha = \theta_{ASR} + \theta_{Delay} \quad (10)$$

其中: 转速调节器本身引入的相位滞后角与延迟引入的相位滞后角分别为

$$\theta_{ASR} = 90^\circ - \arctan\left(\frac{K_P \omega}{K_I}\right) \quad (11)$$

$$\theta_{Delay} = \arctan(\omega\tau) \quad (12)$$

分析式 (11) 与式 (12) 可知 $0 < \theta_{ASR} < 90^\circ$ 、 $0 < \theta_{Delay} < 90^\circ$, 进而可知 $0 < \alpha < 180^\circ$ 。

为便于分析延迟对轴扭振的影响, 引入延迟系数 D 。延迟系数 D 与延迟时间 τ 和固有谐振频率 f_0 的关系如下:

$$\tau = \frac{D}{f_0} \quad (13)$$

将式 (13) 代入式 (12) 可得

$$\theta_{Delay} = \arctan\left(\omega \frac{D}{f_0}\right) = \arctan\left(2\pi D \frac{f}{f_0}\right) \quad (14)$$

分析式 (14) 可知, 轴扭振频率 f 和固有谐振频率 f_0 是一个数量级的, 延迟的引入使得总相位滞后角 α 受延迟系数 D 的影响很大。接下来分析总相位滞后角 α 对轴扭振的影响。

利用机电模拟法, 将刚度系数 K_S 等效成电感, 电机侧转动惯量 J_M 和负载侧转动惯量 J_L 等效成电容, 阻尼系数 D_S 等效成电阻, 电机角速度 ω_M 和负载角速度 ω_L 等效成电压, 电机电磁转矩 T_M 、负载转矩 T_L 和轴转矩 T_S 等效成电流源, 如图 4 所示。

轴扭振发生后, 轴转矩的振荡导致电机角速度振荡, 然后通过电机势振荡或转速电流闭环

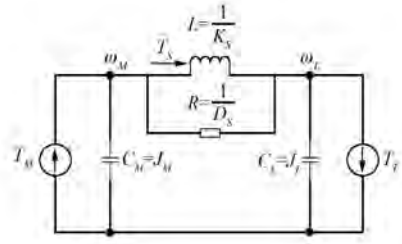


图 4 等效电路图

系统的控制, 造成电机电流和电磁转矩振荡。

将式 (2) 改写为增量方程, 并用 $j\omega$ 代替 s , 可得到两质量机械传动装置的频率特性为

$$\left[K_S - \frac{J_M J_L}{(J_M + J_L)} \omega^2 \right] \Delta T_S = \frac{K_S J_L}{(J_M + J_L)} \Delta T_M \quad (15)$$

通常大型设备运行时负载转矩基本不变或变化慢, 在分析轴扭振时可认为 $\Delta T_L = 0$ 。由图 4 可知, 在 $\Delta T_L = 0$ 的条件下, 相当于负载电流源支路开路, 再用 $j\omega$ 代替 s , 可得

$$\Delta\omega_M = j \left(\frac{\omega}{K_S} - \frac{1}{\omega J_L} \right) \Delta T_S \quad (16)$$

在轴扭振发生时, 两质量机械传动装置处于谐振状态, 此时电机角速度增量 $\Delta\omega_M$ 、电机电磁转矩增量 ΔT_M 和轴转矩增量 ΔT_S , 都是以谐振频率进行振荡的正弦波。由式 (16) 可知, $\Delta\omega_M$ 的幅值与 ΔT_S 的幅值成比例, 相位超前 90° , 而由式 (15) 可知, ΔT_M 的幅值与 ΔT_S 的幅值成比例, 所以 ΔT_M 的幅值与 $\Delta\omega_M$ 的幅值也成比例。在闭环控制系统中, 控制系统延迟和转速调节器本身会引入一定的相位滞后角, 使 ΔT_M 相位滞后于 $-\Delta\omega_M$ 相位。

为了便于分析, 这里将 ΔT_M 进行分解, 可得

$$\begin{cases} \Delta T_M = \Delta T_{M.1} + j \Delta T_{M.2} \\ \Delta T_{M.1} = -\lambda_{M.1} \Delta T_S \\ \Delta T_{M.2} = -\lambda_{M.2} \Delta T_S \end{cases} \quad (17)$$

把式 (17) 代入式 (15) 中, 化简可得

$$\left\{ \left[\left(K_S + \frac{K_S J_L}{J_M + J_L} \lambda_{M.1} \right) - \frac{J_M J_L}{J_M + J_L} \omega^2 \right] + j \left(\frac{K_S J_L}{J_M + J_L} \lambda_{M.2} \right) \right\} \Delta T_S = 0 \quad (18)$$

由式 (18) 可知两质量机械传动装置的谐振频率为

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(K_S + \frac{K_S J_L}{J_M + J_L} \lambda_{M.1}\right) \left(\frac{J_M + J_L}{J_M J_L}\right)}$$

(19)

由式(19)可知系数 $\lambda_{M.1}$ 使两质量机械传动装置的谐振频率 f_{res} 偏离固有谐振频率 f_0 , 有以下 3 种情况:

- (1) 若系数 $\lambda_{M.1} > 0$, 则 $f_{\text{res}} > f_0$ 。
- (2) 若系数 $\lambda_{M.1} = 0$, 则 $f_{\text{res}} = f_0$ 。
- (3) 若系数 $\lambda_{M.1} < 0$, 则 $f_{\text{res}} < f_0$ 。

由式(15)和式(16)可得 ΔT_M 、 $\Delta \omega_M$ 和 ΔT_S 间的相位图, 如图 5 所示。由图 5 中 $\Delta T_{M.2}$ 与 $\Delta \omega_M$ 相位关系可知有以下 3 种情况:

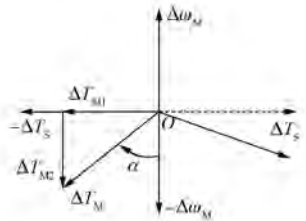


图 5 相位图

- (1) 当 $\Delta T_{M.2}$ 与 $\Delta \omega_M$ 方向相反时, $\Delta \omega_M$ 的振荡幅度会被 $\Delta T_{M.2}$ 衰减, 系统呈现衰减振荡。
- (2) 当 $\Delta T_{M.2}$ 与 $\Delta \omega_M$ 方向相同时, $\Delta \omega_M$ 的振荡幅度会被 $\Delta T_{M.2}$ 增强, 系统呈现发散振荡。
- (3) 当 $\Delta T_{M.2}$ 等于零时, $\Delta \omega_M$ 的振荡幅度不会被 $\Delta T_{M.2}$ 影响, 系统呈现等幅振荡。

由 $0 < \alpha < 180^\circ$ 可知 ΔT_M 位于第 3 象限或第 2 象限。由图 5 可得当 ΔT_M 位于第 3 象限, 有 $\lambda_{M.1} > 0$ 和 $\lambda_{M.2} > 0$ 。由系数 $\lambda_{M.1} > 0$ 可知 $f_{\text{res}} > f_0$ 。由式(17)可知 $\Delta T_{M.2}$ 的值取决于 $\lambda_{M.2}$, 当系数 $\lambda_{M.2} > 0$ 时, $\Delta T_{M.2}$ 与 $\Delta \omega_M$ 方向相反, 系统引入阻尼, $\Delta \omega_M$ 呈现衰减振荡。此时 α 角越小, 阻尼越强, 对系统振荡幅度衰减得越厉害。

3 仿真分析

仿真分析选用的参数如下: 电机侧惯量为 $1.03 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$; 负载侧惯量为 $0.011 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; 刚度系数为 $349.06 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$; 阻尼系数为 0; 负载转矩为 0, 速度指令为阶跃信号, 在 0.01 s 给定 300 rad/s 。

由式(3)可得两质量机械传动装置 Bode 图, 如图 6 所示。其中抗谐振频率和固有谐振频率分别为 28.4 Hz 和 294 Hz 。通过式(4)计算出的固

有谐振频率也为 294 Hz , 与图 6 的结果一致。

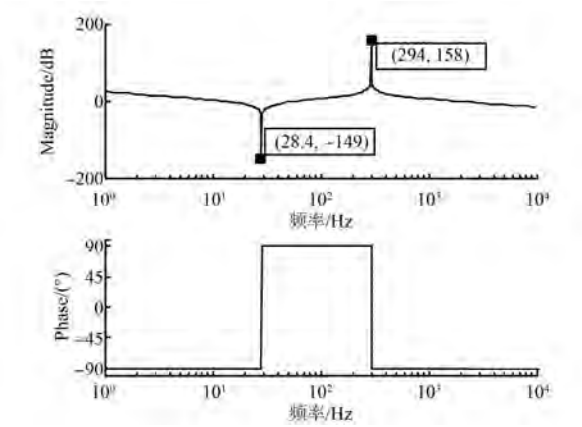


图 6 两质量机械传动装置 Bode 图

下面分别对延迟系数 D 取不同的值, 得到式(8)的 Bode 图, 如图 7 所示。

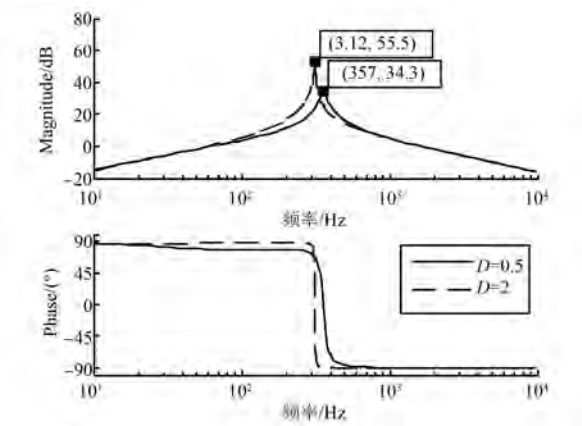


图 7 延迟 Bode 图

为了便于分析延迟对轴扭振的影响, 将图 7 中的数据制成表, 如表 1 所示。

表 1 延迟与轴扭振的关系				
固有谐振 频率/Hz	延迟系数 D	延迟 时间/s	轴扭振 频率/Hz	偏移 百分比/%
294	0.5	0.001 7	357	21.4
	2	0.006 8	312	6.1

从表 1 可知延迟的引入使得轴扭振频率偏移固有谐振频率的幅度很明显。此时不可忽略延迟对轴扭振的影响。

为进一步分析延迟对轴扭振的影响, 给出电机电磁转矩、轴转矩和电机角速度的仿真结果, 如图 8 和图 9 所示。其中图 8 为未引入延迟时的情况

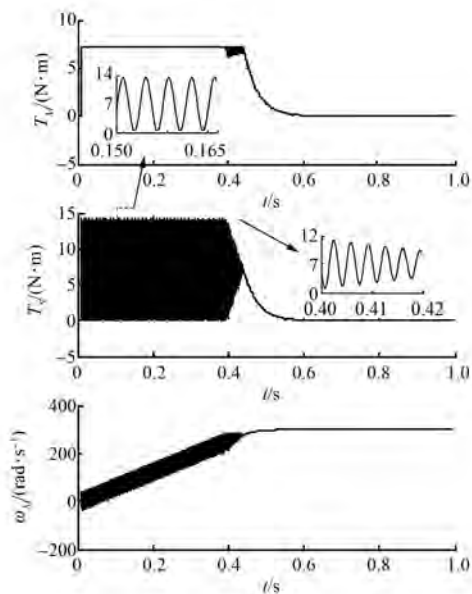


图8 未引入延迟仿真结果

况,图9为引入不同的延迟系数时的情况。

在转速上升阶段由于转速调节器饱和,电机电磁转矩为恒定值,即电机电磁转矩增量为零,可得 $\lambda_{M,1}=0$ 和 $\lambda_{M,2}=0$,所以此时轴转矩应以固有谐振频率进行等幅振荡。由图8可知,在转速上升阶段轴转矩的确呈现等幅振荡,且对其进行FFT分析得到的结果为294 Hz,与理论分析一致。

图8中转速达到给定值时,转速环会退饱和,电机电磁转矩会产生波动,此时电机电磁转矩增量不等于零,系统会引入阻尼,导致振荡呈现衰减形式。图9中转速上升阶段的退饱和因为延迟的引入而会有段滞后。

分析延迟对轴扭振的影响时,对图9中 $D=2$ 时转速稳定阶段的轴转矩进行FFT分析,得到的结果为312 Hz。

由图5分析可知, ΔT_M 的位置可由 ΔT_M 滞后 $-\Delta\omega_M$ 的角度推得。通过计算可得,当 $D=0.5$ 时,滞后角约等于 75.3° ; 当 $D=2$ 时,滞后角约等于 85.7° 。

当 $D=0.5$ 和 $D=2$ 时, ΔT_M 都位于图5中的第3象限,所以有系数 $\lambda_{M,1}>0$ 和 $\lambda_{M,2}>0$ 。由式(19)可知,因为系数 $\lambda_{M,1}>0$,所以此时轴扭振频率比固有谐振频率大,而由系数 $\lambda_{M,2}>0$ 可知此时系统引入阻尼,对振荡的幅值起衰减作用,振荡呈现衰减形式。

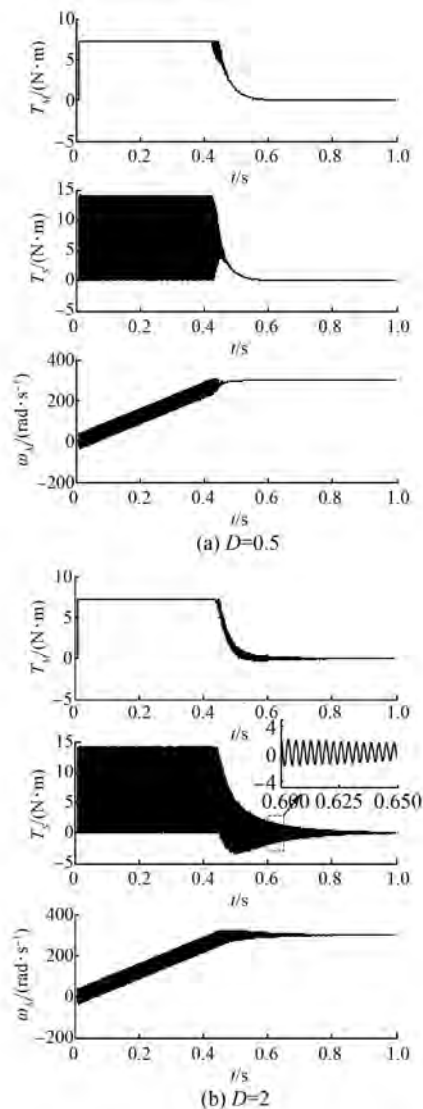


图9 引入延迟仿真结果

由于 $D=0.5$ 时的 α 角比 $D=2$ 时来得小,所以在 $D=2$ 时振荡更加剧烈。结合图9的结果可验证上述分析。

4 结 语

本文通过两质量机械传动装置的轴转矩方程和运动方程得到系统结构图和等值电路图,进一步分析得到电机角速度增量、轴转矩增量和电机电磁转矩增量的相位图,然后从电机电磁转矩增量相对于电机角速度增量相位滞后的角度分析控制系统延迟对轴扭振的影响。最后利用仿真软件MATLAB进行Bode图分析及仿真验证。理论分

(下转第133页)

- 双三相永磁同步电机缺相容错控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 86-96.
- [12] ZHOU H, ZHAO W, LIU G, et al. Remedial field-oriented control of five-phase fault-tolerant permanent-magnet motor by using reduced-order transformation matrices [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(1): 169-178.
- [13] GUZMAN H, DURAN M J, BARRERO F, et al. Comparative study of predictive and resonant controllers in fault-tolerant five-phase induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(1): 606-617.
- [14] CHEN Q, LIU G, ZHAO W, et al. Asymmetrical SVPWM fault-tolerant control of five-phase PM brushless motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 12-22.
- [15] 谢德娥, 王宇, 邓智泉. 考虑反电动势 2 次谐波的容错型磁通切换电机开路及短路故障控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 130-138.

收稿日期: 2017-05-23

(上接第 29 页)

析和仿真结果表明延迟会使轴扭振的频率产生偏移并且会对振荡的幅值产生影响。

【参考文献】

- [1] 蔡昆, 马小亮. 电气传动中的扭振现象及其抑制[J]. 电气自动化, 2000, 41(5): 19-21.
- [2] MURPHY B R, WATANABLE I. Digital shaping filters for reducing machine vibration [J]. Robotica and Automation, IEEE Transactions on, 1992, 8(2): 285-289.
- [3] ELLIS G, LORENZ R D. Resonant load control methods for industrial servo drives [C] // 2000 Industry Applications Conference, 2000: 1438-1445.
- [4] HSU W C, LAI C L, HSU P L. A novel design for vibration suppression for lightly-damped servo control system [C] // Proceedings of 2011 8th Asian Control Conference, 2011: 251-256.
- [5] 夏超, 那学智, 柴晓慧, 等. 伺服系统机械谐振机理与抑制方法分析[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(1): 29-35.
- [6] SHENG M Y, SHIH C W. The detection of resonance frequency in motion control systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(5): 3423-3427.
- [7] 王建敏, 吴云洁, 刘佑民, 等. 基于数字滤波器的伺服系统谐振抑制方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(3): 485-491.
- [8] ELLIS G. 控制系统设计指南 [M]. 汤晓君, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006.

收稿日期: 2016-12-13

2017 中国(珠海)绿色创新电力峰会暨展览会新闻发布会在上海召开

11 月 20 日, “2017 中国(珠海)绿色创新电力峰会暨展览会”新闻发布会在上海新国际博览中心隆重召开。以“引领粤港澳大湾区电力创新”为主题, “2017 中国(珠海)绿色创新电力峰会暨展览会”将于今年 12 月 14 日-16 日在珠海国际会展中心举办。

中国电力企业联合会国际合作部主任兼中国国际贸易促进委员会电力行业委员会会长吴添荣, 中国电力企业联合会科技服务中心书记兼中国国际贸易促进委员会电力行业委员会常务副会长胡小正, 中国电力企业联合会国际合作部主任助理兼中国国际贸易促进委员会电力行业委员会秘书长许光滨, 南方电网公司生产技术部副主任丁士, 珠海会议展览局副局长张文骥, 珠海市会展集团有限公司总经理苏全丽等嘉宾共同出席新闻发布会。

张文骥表示, 习近平总书记明确指出, 香港、澳门发

展同内地发展紧密相连, 要支持香港、澳门融入国家发展大局, 以粤港澳大湾区建设、粤港澳合作、泛珠三角区域合作等为重点, 全面推进内地同香港、澳门互利合作。这对珠海来说是一个巨大的发展契机。

吴添荣强调, 2017 年两会期间, 粤港澳区域发展进入总理政府工作报告, 已经上升为国家战略, 作为中国经济新引擎的粤港澳大湾区将备受世界瞩目。

本届峰会契合“粤港澳大湾区”建设战略, 以“引领粤港澳大湾区电力创新”为主题, 力邀有关国际组织、国内政府机构、行业专家、企业代表等逾千人齐聚一堂, 积极组织全国电力行业代表和港澳电力机构、南方五省电力企业, 特别是珠三角地区电力企业参展参会, 共同围绕“促进电力行业转型发展、促进粤港澳地区电力深度合作、促进珠三角地区电力能源绿色发展”等议题展开分析与探讨。