

DOI: 10.3901/JME.2013.22.192

基于电液比例伺服复合加载及迭代学习控制的合成绝缘子疲劳试验方法*

汪首坤 王军政 赵江波 彭建敏

(北京理工大学复杂系统的智能控制与决策重点实验室 北京 100081)

摘要: 为模拟合成绝缘子的微风振动状态, 实现其疲劳试验过程, 研究电液比例伺服复合加载技术。针对合成绝缘子的实际负载工况, 设计出一种复合式电液伺服加载系统, 包括静态比例加载和动态伺服加载两部分, 分析系统工作原理, 建立伺服加载的数学模型, 设计出基于PD型迭代学习的加载控制方法, 实现动态加载力的精确控制, 并采用AMESim和Matlab进行联合数字仿真。仿真和实际试验结果均验证了所加载方法和控制方法是正确可行的, 能够取得高精度的控制效果。根据所提的加载方法和控制方法, 已研制出相应的合成绝缘子电液加载系统, 其静态加载力可达150 kN, 动态加载力幅值可达20 kN, 加载精度达到了0.5 kN, 加载频率最高可达100 Hz, 连续振动次数达到3千万次。

关键词: 合成绝缘子 电液伺服加载 迭代学习控制 动态加载力

中图分类号: TP211

Fatigue Test Method of Compound Insulator Based on Electric-hydraulic Proportional-servo Loading Technology and Iterative Learning Control

WANG Shoukun WANG Junzheng ZHAO Jiangbo PENG Jianmin

(School of Automatic Control, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: In order to simulate the vibrating condition in breeze and carry out the fatigue test for the compound insulator, the electro-hydraulic loading technology for the compound insulator is researched. Based on actual loading characteristic of the compound insulator, a compound electro-hydraulic servo load system is firstly designed, including static proportional load and dynamic servo load sub-systems. Then the working principle of this system is analyzed, and the mathematic model of electro-hydraulic servo load is also built. The control method based on PD-type iterative learning control is designed, to achieve the high-precision control for dynamic load force. The mathematic simulation based on AMESim and Matlab is completed. The results of simulation and actual experiment have proved that the load principle and control method are correct and feasible, and can achieve high-precision control effect. According this discussed electro-hydraulic loading technology and control method, the actual electric-hydraulic loading system for compound insulators has been developed, with 150 kN maximum static force, 20 kN maximum dynamic force, 0.3 kN force control precision and 100 Hz maximum load frequency, and more than 30 million number of continues vibration.

Key words: Compound insulator Electro-hydraulic servo load Iterative learning control Dynamic load force

0 前言

合成绝缘子具有抗污秽、重量轻等特点, 在新建架空输电线路上将得到越来越多的应用^[1]。架空

输电线由于气候的作用, 存在3种不同的振动, 即微风振动、次档距振荡和舞动。微风振动发生频率最高, 它是由稳定的层流风引起的导线振动, 其特点是振动频率高(5~100 Hz), 幅值低(一般小于导线直径的2倍), 发生概率高(几乎是连续发生的)^[2]。导线经受微风振动时, 通过悬垂线夹传递给合成绝缘子, 使合成绝缘子始终处于振动状态。合

* 教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-12-0049)和北京市自然科学基金(4132034)资助项目。20121226收到初稿, 20130920收到修改稿

成绝缘子在复合交变应力作用下会产生疲劳现象, 交变应力强度和次数达到某一数值时合成绝缘子就会发生脆性断裂, 在未达到脆性断裂之前其抗拉强度亦会逐步降低^[3]。因此, 研究合成绝缘子微分振动下的疲劳特性对于其研制、生产和检验都至关重要。

合成绝缘子具有强度高和重量轻的机械特性^[4], 常规的机械加载方式难以精确模拟高频和低幅值的微风振动特点, 从而难以满足合成绝缘子疲劳试验要求。本文设计了一种复合式电液伺服阀控缸系统, 分析了系统工作原理, 建立了伺服加载的数学模型, 并采用了基于 PD 型迭代学习的加载控制方法, 模拟了合成绝缘子在微风振动状态的负载状态, 并通过数字仿真和实际试验, 验证了加载控制方法的正确性。

1 加载原理

根据某型号合成绝缘子在微风振动下的受力分析, 其负载力由静态负载力和动态负载力两部分组成, 其中静态负载力较大, 最大可达 150 kN, 动态负载力幅值较小, 通常不大于 10 kN, 但是变化频率极快, 高达 100 Hz。微风振动过程能够用单一或组合正弦波来描绘, 因此动态负载力可简化为正弦曲线。绝缘子负载力 F 可用式(1)来描绘

$$F = F_s + F_d \sin(2\pi ft) \quad F_s \geq 5F_d \quad (1)$$

式中, F_s 为静态负载力, F_d 为动态负载力幅值, f 为动态负载力频率, t 为时间。

由于合成绝缘子在微风振动下的负载状态包括静态大负载和动态高频小负载, 因此, 传统的伺服阀控缸系统难以精确模拟这种复合式负载规律, 本文设计了伺服阀和比例阀复合式控制的电液伺服加载原理, 如图 1 所示。

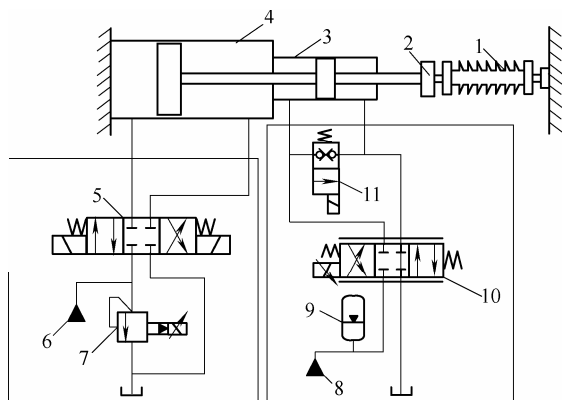


图1 复合式电液伺服加载原理

1. 合成绝缘子 2. 力传感器 3. 激振液压缸 4. 平衡液压缸
5. 电磁换向阀 6. 比例油源 7. 比例溢流阀 8. 伺服油源
9. 蓄能器 10. 伺服阀 11. 电磁球阀

为了实现静动结合的复合式加载规律, 加载液

压缸设计为一种特殊的组合形式, 它在结构上由一个大的平衡液压缸和一个小的激振液压缸组合而成, 平衡液压缸活塞面积大, 产生静态大负载力, 激振液压缸活塞面积小, 产生动态小负载力, 平衡液压缸和激振液压缸的活塞共用一个活塞杆, 从而实现了静态力和动态里的叠加与传递。

由图 1 可知, 加载液压缸的控制油路包括一套比例加载回路和伺服加载回路, 分别独立供油。比例加载回路由电磁换向阀、比例溢流阀及油源组成, 通过比例溢流阀控制平衡液压缸产生静态大负载力, 并通过电磁换向阀控制静态负载力方向; 伺服加载回路由电磁球阀、伺服阀、蓄能器及油源组成, 通过伺服阀控制激振液压缸产生动态小负载力, 电磁球阀位于伺服阀的两个控制油口之间, 用于控制伺服加载回路状态: 当它失电时, 伺服加载回路输出有效; 当它通电时, 小缸两腔沟通, 其输出力为零, 伺服加载回路输出无效。

根据复合式电液伺服加载原理, 整个加载过程分为静态加载和动态加载两个阶段: 首先是静态加载过程, 由比例溢流阀和大缸构成了比例阀控缸系统, 逐步调节至设定的静态负载力, 此时伺服加载回路中的电磁球阀通电, 伺服加载系统处于休眠状态; 当静态加载误差小于一定阈值后, 进入动态加载阶段, 此时电磁球阀断电, 由伺服阀和激振液压缸构成的伺服加载系统开始工作, 按照设定规律产生动态加载力。在动态加载过程中, 比例加载闭环工作在低增益模式下, 防止静态加载力受动态加载力干扰而发生漂移。

复合式电液伺服加载系统的控制原理如图 2 所示, 它包括伺服加载和比例加载两个控制闭环, 分别控制输出静态力和动态力, 它们的输出线性叠加后作用于合成绝缘子。伺服加载闭环中的开关 K 用于控制是否输出动态加载力, 它在物理上对应伺服加载回路上的电磁球阀。由于比例溢流阀动态特性差, 并存在滞环和死区, 比例加载采用最简单的 P 控制方式, 实现加静态加载力的“粗控制”; 由伺服阀和小缸构成的伺服加载系统用于实现动态加载力的“精控制”, 因此它是保证整个加载系统动态特性和加载精度的关键, 本系统采用 PD 型迭代学习控制实现高精度动态加载控制。

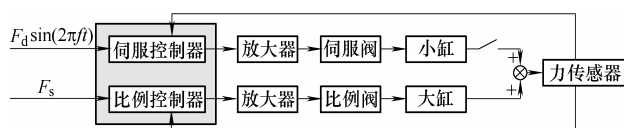


图2 加载控制原理图

2 电液伺服力加载模型

电液伺服加载系统由流量型伺服阀和复合液压缸中的对称型小缸组成,是一套典型的力控制系统,根据经典的流量线性、流量连续和力平衡方程^[5],能够绘制出电液伺服力控制系统框图,如图 3 所示。图 3 中 U 为输入的控制指令, F 为输出的加载力, x_v 为伺服阀阀芯位移, K_a 为放大器增益, K_{sv} 为伺服阀增益, K_p 为伺服阀压力增益, K_f 为力传感器增益, A_p 为小缸有效面积, V_1 为小缸有效容积, K_{ce} 为泄漏系数, β_e 为液压弹性模量, m 为运动部件质量, c 为负载阻尼系数, k 为负载弹性系数。

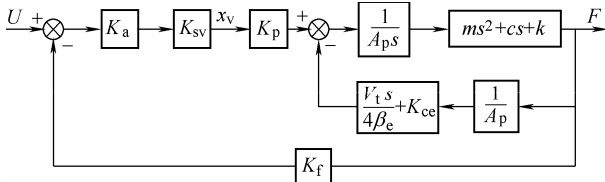


图 3 电液伺服力控制系统的方框图

根据系统方框图,能够推导出系统的开环传递函数,如式(2)所示

$$G_H = \frac{K_a K_{sv} K_p A_p \left(\frac{m}{k} s^2 + \frac{c}{k} s + 1 \right)}{K_{ce} \left(\frac{m V_1^3 s^3}{4 \beta_e K_{ce} k} + \left(\frac{V_1 c}{4 \beta_e K_{ce} k} + \frac{m}{k} \right) s^2 + \left(\frac{V_1}{4 \beta_e K_{ce}} + \frac{c}{k} + \frac{A_p^2}{K_{ce} k} \right) s + 1 \right)} \quad (2)$$

式(2)的分子部分为一个振荡环节, ω_1 和 ζ_1 分别为振荡频率和阻尼系数,它们的表达式为

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

$$\zeta_1 = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{1}{km}} \quad (4)$$

式(2)分母部分的三阶方程可分解为一个惯性环节和一个振荡环节,惯性环节转折频率为 ω_2 , 振荡环节的振荡频率和阻尼系数分别为 ω_3 和 ζ_3 , 引用液压弹簧刚度 $k_h = 4 \beta_e A_p^2 / V_1$, 它们的表达式为

$$\omega_2 = \frac{K_{ce}}{A_p^2} \left(\frac{kk_h}{k + k_h} \right) \quad (5)$$

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{k + k_h}{m}} \quad (6)$$

$$\zeta_3 = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{1}{M(k + k_h)}} + \frac{K_{ce} k_h^2}{2 A_p^2 (k + k_h)} \sqrt{\frac{m}{k + k_h}} \quad (7)$$

因此,系统开环传递函数可以写成式(8),式中 K_v 为系统开环增益

$$G_H = \frac{K_v \left(\frac{s^2}{\omega_1^2} + \frac{2\zeta_1 s}{\omega_1} + 1 \right)}{\left(\frac{s}{\omega_2} + 1 \right) \left(\frac{s}{\omega_3^2} + \frac{2\zeta_3 s}{\omega_3} + 1 \right)} \quad (8)$$

$$K_v = K_a K_{sv} K_p A_p K_p / K_{ce} \quad (9)$$

由于合成绝缘子质量小和刚度大的力学特性,使系统负载运动部分的质量 m 很小,但是液压弹簧刚度却很高,因此,频率 ω_3 相对 ω_1 和 ω_2 , 可忽略式(8)分母中的振荡环节。最终,开环传递函数分母可简化为一个惯性环节,如式(10)所示

$$G_H = \frac{K_v \left(\frac{s^2}{\omega_1^2} + \frac{2\zeta_1 s}{\omega_1} + 1 \right)}{\frac{s}{\omega_2} + 1} \quad (10)$$

由于开环增益 K_v 中包含了伺服阀压力增益 K_p , 而流量型伺服阀的压力增益通常较大^[6], 因此伺服加载系统开环传递函数为一个高增益系统,其分子部分包含了一个振荡环节,因此,稳定性较差,必须在控制器中进行校正。常规的 PID 控制难以取得满意的控制效果,控制增益过大容易导致振荡,而控制增益过小则难以保证控制精度。因此,本文设计了基于 PD 型迭代学习控制的加载控制策略,实现高频高精度的动态力加载。

3 迭代学习的加载控制策略

20 世纪 70 年代,日本学者 ARIMOTO 在处理重复系统控制问题时提出迭代学习控制的概念,经过众多学者的研究和发展,它已成为智能控制的一个重要分支^[7]。迭代学习控制适用于难以精确建模的非线性系统,能够在有限周期内通过简单学习实现对期望目标的准确跟踪,并具有控制结构简单,鲁棒性强等优点,因此非常适用具有重复运动规律的控制系统的实时控制^[8]。由于合成绝缘子动态负载力为重复性极强的标准正弦规律,因此选用迭代学习控制作为电液伺服力加载系统的控制方法。

式(11)为一阶 PID 型迭代学习控制的通用算法^[9], 式中, K_p 、 K_i 和 K_d 分别为比例、微分和积分系数, e_k 为第 k 次迭代时的控制误差。

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + K_P e_k(t) + K_D \dot{e}_k(t) + K_I \int_0^t e_k(\tau) d\tau \quad (11)$$

该通用算法存在多种更为有效的简化形式,例如 P 型算法、D 型算法、PI 型算法、PD 型算法等。本文采用 PD 型迭代学习控制算法,实现高频高精度的电液伺服加载控制,并对算法中的微分系数和初始值设定进行了改进,进一步提高算法收敛速度。

本文采用的 PD 型迭代学习控制算法可用式(12)表示

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + K_P e_k(t) + K_D(t) \dot{e}_k(t) \quad (12)$$

与通用形式相比,该式简化了积分项,保证迭代控制的稳定性,微分系数 K_D 为一个时变参数,它根据误差 e_k 和误差变化量 Δe_k ($\Delta e_k = e_k - e_{k-1}$),按照二维模糊规则在线改变。 $e_k(t)$ 和 $\Delta e_k(t)$ 的模糊集均设置为 {NB, NS, ZO, PS, PB}, 而 $K_D(t)$ 的模糊集设置为 {NVB, NB, NM, NS, ZS, ZO, PS, PM, PB, PVB}, 同时, $e_k(t)$ 、 $\Delta e_k(t)$ 和 $K_D(t)$ 的隶属度函数均为标准正态分布。模糊规则基于 Mickwyck-William 矩阵和工程经验^[10],如表 1 所示。

表 1 微分系数 $K_D(t)$ 的模糊规则表

$\Delta e_k(t)$	$e_k(t)$				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NVB	NB	NM	NS	ZO
NS	NB	NM	NS	ZO	PS
ZO	NM	NS	ZO	PS	PM
PS	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PVB

迭代学习控制的初始控制值对于收敛速度有着重要影响,如果初始控制值偏差较大,将会造成较大的控制误差,导致迭代学习次数增多,收敛速度降低^[11-12]。为了提高迭代收敛速度和控制过程的鲁棒性,将迭代学习控制值中加入初始控制值 $u_0(t)$,该值通过一个简单 P 控制算法产生,并通过遗忘因子 λ ($0 \leq \lambda \leq 1$) 调节 $u_0(t)$ 的控制比例。这样,最终的迭代学习控制算法可以用式(13)表示

$$u_{k+1}(t) = (1 - \lambda)u_k(t) + \lambda u_0(t) + K_P e_k(t) + K_D(t) \dot{e}_k(t) \quad (13)$$

本文设计的基于迭代学习控制的控制器原理如图 4 所示,迭代学习控制器并行叠加在比例控制器上,形成一种复合式控制结构。在初始控制阶段或控制规律发生突变时,比例控制器起主要作用(λ 较大),并为迭代学习控制器提供初始值;迭代学习控制器经过一定数量迭代学习周期后, λ 较大减小

并趋于零,迭代学习控制输出逐渐占据主导控制作用。

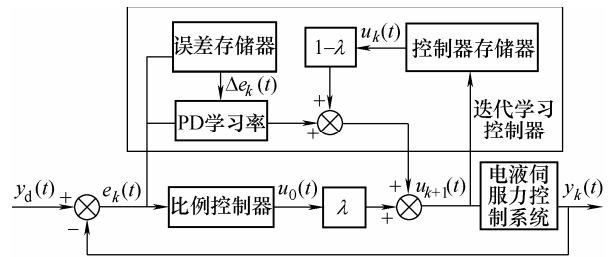


图 4 基于迭代学习控制的控制器原理图

4 基于 AMESim 和 Simulink 的仿真

本文采用 AMESim 和 Simulink 进行了电液加载系统及其控制方法的联合数字仿真:利用 AMESim 软件在液压和机械领域的专业优势,建立了整个合成绝缘子电液加载系统的数字模型,包括合成绝缘子、电液伺服加载系统和电液比例加载系统;利用 Simulink 在数值计算和控制领域的优势,设计了基于迭代学习控制的加载控制算法。

基于 AMESim 和 Simulink 的数字仿真界面如图 5 所示,主要仿真参数如表 2 所示。

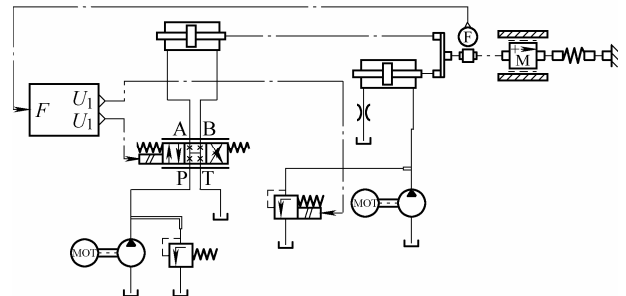


图 5 基于 AMESim 和 Simulink 的仿真界面

表 2 主要仿真参数

元件名称	仿真参数
系统油源	额定压力 25 MPa, 流量 300 L/Min
平衡液压缸	活塞直径 100 mm, 活塞杆直径 63 mm, 行程 400 mm
激振液压缸	活塞直径 63 mm, 活塞杆直径 36 mm, 行程 50 mm
伺服阀	额定流量 40 L/min, 额定电流 40 mA, 频带 120 Hz
比例阀	最高压力 31.5 MPa, 额定电流 800 mA
合成绝缘子	质量 50 kg, 弹性系数 5×10^6 N/m

迭代学习控制过程分两个阶段:前 2 个运行周期中遗忘因子 $\lambda=1.0$, 控制器工作在比例控制方式下(比例系数为 0.5), 产生迭代学习控制初值 u_0 ; 然后将遗忘因子 λ 降低为 0.3, 比例系数 $K_P=0.2$, 微

分系数 K_D 按照特定模糊规则变化, 控制器工作在迭代学习控制模式。

在 AMESim 和 Simulink 的联合仿真环境下, 迭代学习控制的仿真试验曲线如图 6 所示, 其中图 6a 为加载力曲线, F_e 为期望加载力, 包括 1×10^5 N 的静态力, 幅值为 1×10^4 N 和频率 10 Hz 的正弦规律动态力, 其表达式为

$$F_e = 1 \times 10^5 + 1 \times 10^4 \sin(40\pi t) \quad (14)$$

F_0 、 F_3 和 F_{10} 分别为第 0 次(初始值)、第 3 次和第 10 次的迭代学习控制曲线; 图 6b 为加载误差曲线, e_0 、 e_3 和 e_{10} 分别为第 0 次、第 3 次和第 10 次的迭代学习控制误差曲线。表 3 为迭代学习控制的仿真试验数据, 它反映了在不同迭代学习次数下的力跟踪误差和动态幅值误差(跟踪误差是实际值与期望值之间的误差, 而幅值误差则不考虑相位滞后影响, 是实际动态幅值与期望幅值的误差。绝缘子加载过程主要关注动态幅值误差)。

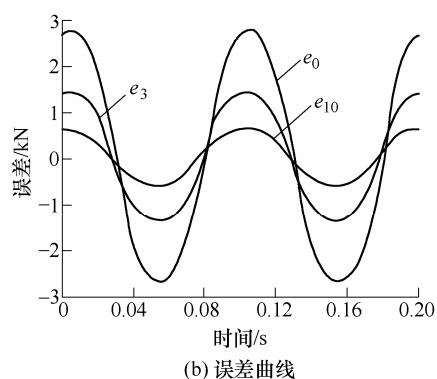
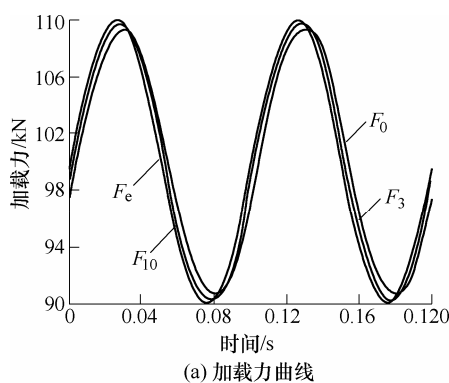


图 6 仿真试验曲线

根据 AMESim 和 Simulink 的联合仿真试验曲线和数据可以看出, 本文设计的 PD 型迭代学习过程是收敛的, 随着迭代次数的增加, 控制误差迅速降低, 当迭代次数大于 20 次后, 幅值跟踪精度达到了 0.5%。因此, 这种迭代学习控制方法应用于电液伺服力加载过程是完全可行的, 并且能够获得较高的控制精度。

表 3 迭代学习控制仿真数据

迭代次数	跟踪误差/N	幅值误差/N
0	2 711	725
3	1 390	256
5	915	121
10	626	71
20	439	52

5 试验研究

根据本文的加载原理和控制方法, 已经研制出实际的合成绝缘子电液伺服加载系统, 如图 7 所示。该加载系统能够同时完成 8 通道合成绝缘子的疲劳试验, 每个通道组成相同, 液压元件参数和试验条件与仿真试验基本相同(表 2), 不再赘述。

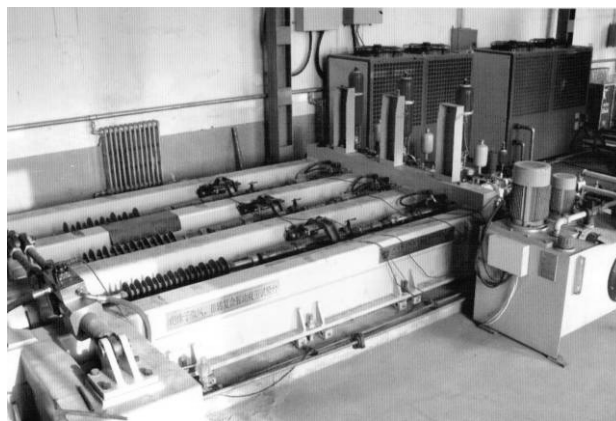


图 7 合成绝缘子电液伺服加载系统实物

测控系统采用上下位机式计算机系统, 包括加载控制器和测试计算机: 加载控制器完成底层的力闭环控制, 以 PC104 总线的嵌入式 486 级 CPU 为核心, 主频为 100 MHz, 并配备了 16 位的 A/D 和 D/A 转换模块, 控制周期小于 0.5 ms; 测试计算机为普通工控机, 用于设定加载参数, 采集并显示试验曲线和数据, 通过以太网与加载控制器完成数据通信。

为了对比研究迭代学习控制的实际效果, 针对型号为 FXBW-500/300 合成绝缘子, 分别在完全相同的试验条件下在电液伺服加载系统中采用迭代学习控制和 PID 控制, 图 8 为这两种控制方法在不同激振频率下的电液伺服加载曲线, 图 8a 为激振频率 40 Hz 的曲线, 图 8b 为激振频率 100 Hz 的曲线, F_e 为期望加载力曲线, F_{PID} 和 F_{ILC} 分别为 PID 控制和迭代学习控制(迭代次数大于 20 次)的试验曲线。表 4 更为具体地列出了激振频率从 20 Hz 到 100 Hz 变化下 PID 控制与迭代学习控制的加载误差, 表中 e_{PID} 和 e_{ILC} 分别为 PID 控制和迭代学习控制的加载

力幅值与期望力幅值的误差。

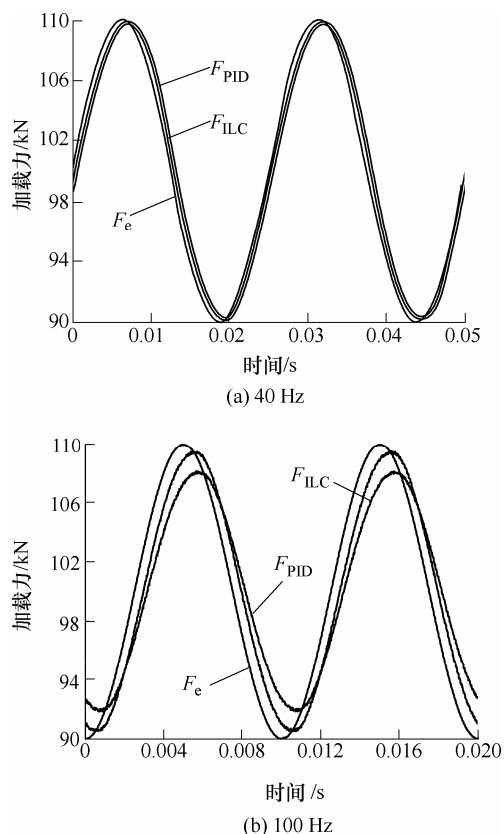


图 8 PID 控制和迭代学习控制在不同激振频率下的电液伺服加载曲线

通过实际的试验曲线和数据可以看出，在低频激振段(60 Hz 以下) 迭代学习控制和 PID 控制均能取得较好的控制效果，数值上前者略强于后者；但是随着激振频率的进一步增大，PID 控制误差显著增大，动态加载力幅值衰减明显，100 Hz 时的幅值误差达到 3 kN，而迭代学习控制的误差虽然也有所增大，但是其控制效果明显优于 PID 控制，100Hz 时幅值误差仅为 0.5 kN。

表 4 不同激振频率下 PID 与迭代学习控制效果比较

频率 f / Hz	误差 e_{PID} / N	误差 e_{ILC} / N
20	51	12
40	105	21
60	358	196
80	1092	314
100	3122	533

6 结论

(1) 本文设计了一种复合式电液伺服加载系统，模拟合成绝缘子的微风振动状态，实现其疲劳试验过程。

(2) 建立了系统伺服加载的数学模型，并采用了基于 PD 型迭代学习的加载控制方法，实现动态加载力的精确控制。

(3) 数字仿真和实际试验结果均验证了本文加载方法和控制方法是正确可行的，能够取得高精度的控制效果。

此外，本文研制的合成绝缘子电液伺服加载系统已应用于国家电网多种型号合成绝缘子的疲劳试验，静态加载力最高可达 150 kN，动态加载力幅值最高可到 20 kN，加载精度 0.5 kN，加载频率最高 100 Hz，连续振动次数达到 3 千万次。

参 考 文 献

- [1] 张福林, 陈虹丽, 王黎明. 复合绝缘子振动蠕变特点及试验参数的确定[J]. 电瓷避雷器, 2004(4): 1-4.
ZHANG Fulin, CHEN Hongli, WANG Liming. The features of the vibration creep of composite insulator and the determination of its test parameters[J]. Insulators and Surge Arresters, 2004(4): 1-4.
- [2] 王景朝. 合成绝缘子疲劳的试验研究[J]. 电力建设, 2001, 22(12): 31-33.
WANG Jingchao. Test and study on fatigue of compound insulators[J]. Electric Power Construction, 2001, 22(12): 31-33.
- [3] 张锐, 吴光亚, 袁田. 架空输电线路绝缘子串机械振动疲劳性能研究[J]. 电瓷避雷器, 2009(1): 12-17.
ZHANG Rui, WU Guangya, YUAN Tian. The study of mechanical vibration characteristics of transmission line insulators string[J]. Insulators and Surge Arresters, 2009 (1): 12-17.
- [4] 高明振, 张锐, 张志伟. 线路绝缘子串机械振动疲劳性能的试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2591-2596.
GAO Mingzhen, ZHANG Rui, ZHANG Zhiwei. test study of mechanical vibration characteristics of EHV transmission line insulators string[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2591-2596.
- [5] 华清, 焦宗夏, 王晓东. 电液负载模拟器的精确数学模型[J]. 机械工程学报, 2002, 38(11): 31-35.
HUA Qing, JIAO Zongxia, WANG Xiaodong. Complex mathematical model of electro-hydraulic Torque load simulator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(11): 31-35.
- [6] 王占林. 液压伺服控制[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1987.
WANG Zhanlin. Hydraulic servo control[M]. Beijing:

Beihang University Press, 1987.

- [7] LUO Xiaohui, ZHU Yuquan, HU Junhua. PI-type iterative learning control for nonlinear electro-hydraulic servo vibrating system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(3): 451-455.
- [8] ROTARIU I, STEINBUCH M, ELLENBROEK. Adaptive iterative learning control for high precision motion systems[J]. Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(5): 1075-1082.
- [9] CHEN B, LIU G. Characteristic analysis of zero opening valve controlled asymmetrical cylinder system[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2008(36): 67-70.
- [10] BRISTOW D A, ALLEYNE A G. Monotonic convergence of iterative learning control for uncertain systems using a time-varying filter[C]//IEEE, Transactions on Automatic Control, 2008, 53(2): 582-585.
- [11] ZHAO Shengdun, WANG Lihong, HUA Chunjian. Iterative learning control of electro-hydraulic proportional feeding system in slotting machine for metal bar cropping[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45: 923-931.
- [12] BUTCHER M, KARIMI A. Linear parameter-varying iterative learning control with application to a linear motor system [J]. Transactions on Mechatronics, 2010, 15(3): 412-420.

作者简介: 汪首坤, 男, 1977 年出生, 副教授。主要研究方向为电液伺服控制, 液压元件及系统性能测试。

E-mail: bitwsk@bit.edu.cn