

减振汲能一体化的新型机电离合惯容阻尼器

李芦钰¹, 赵紫阁¹, 梁启刚¹, 张晓华², 欧进萍¹

(1. 大连理工大学 建设工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:近年来, 离合惯容阻尼器 (clutching inerter damper, CID) 在结构振动控制中被广泛研究。由于被动 CID 装置未考虑飞轮速度重置并不能实现理想的分段模型, 导致其控制性能受限, 因此本研究探讨了 CID 理想模型的半主动实现。文中从理想 CID 模型与被动 CID 模型的对比研究出发, 深入阐述了 2 种模型的性能差异与局限性。随后, 提出了一种汲能减振一体化的机电离合惯容阻尼器 (Electromechanical clutching inerter damper, ECID) 方案, 给出了电惯容、飞轮速度重置与汲能功能的实施方案, 建立了 ECID 的机电混合仿真模型。通过理论与仿真分析, 深入研究了 ECID 的控制性能和汲能性能, 探究了 ECID 内部电路中电阻和电容对系统性能的影响, 研究表明了 ECID 具有显著的振动控制和能量回收能力。本研究为离合惯容器、变惯容和能量回收提供了综合方案, 对自供能半主动变惯容装置的发展具有理论参考意义。

关键词: 机电离合惯容阻尼器; 减振汲能一体化; 半主动控制; 能量回收

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

An innovative electromechanical clutching inerter damper integrated vibration reduction and energy absorption

LI Luyu¹, ZHAO Zige¹, LIANG Qigang¹, ZHANG Xiaohua², OU Jinping¹

(1. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Clutching inerter damper (CID) has been extensively studied in structural vibration control recently. Because the passive CID device does not take into account flywheel speed reset and cannot achieve an ideal piecewise model, its control performance is limited. Therefore, this study explores the semi-active implementation of the ideal CID model. This paper begins with a comparative study of the ideal and passive analytical models of CID, providing insight into the performance differences and limitations of the two models. Subsequently, an electromechanical clutching inerter damper (ECID) scheme is proposed, which includes energy harvesting and variable inertance. The implementation of the electrical inertance, flywheel speed reset, and energy recovery functions are also discussed, and an electromechanical hybrid simulation model of the ECID is established. This paper thoroughly examines the control and energy recovery performance of the ECID through theoretical and simulation analyses. It explores the effects of resistance and capacitance in the ECID circuit on system performance and demonstrates that the ECID has significant vibration control and energy recovery capabilities. This study presents a comprehensive scheme for the implementation of CID, variable inertance, and energy recovery, which has theoretical reference significance for the development of self-powered semi-active variable inertance devices.

Key words: electromechanical clutching inerter damper (ECID); integrated vibration reduction and energy absorption; semi-active control; energy recovery

收稿日期: 2024-05-04; 修回日期: 2024-06-15

基金项目: 国家资助博士后研究人员计划项目 (GZB20230103); 国家自然科学基金项目 (52308305)

作者简介: 李芦钰 (1980—), 男, 教授, 博士, 主要从事结构振动控制研究。E-mail: liluyu@dlut.edu

通信作者: 梁启刚 (1994—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事结构振动控制研究。E-mail: lqg@dlut.edu.cn

0 引言

结构振动控制策略广泛应用于土木工程结构中。YAO^[1]提出了结构振动的概念。结构振动控制技术主要包括 4 种类型:被动控制、主动控制、半主动控制和混合控制。其中,被动控制技术因其原理简单、成本低廉、无需外部能量输入而成为工程中最常用的控制技术^[2-3]。而半主动控制技术结合了被动控制和主动控制的优势,控制效果优于被动控制,且对外部能量输入需求较小^[4-6]。

作为一种新型减振单元,惯容器在结构振动控制领域受到广泛关注与研究。SMITH^[7]于 2002 年首次提出了惯容器的概念,标志着该领域的重要里程碑。最早出现的惯容器装置是齿轮齿条式惯容器^[8],然而,由于齿轮齿条机械的啮合存在齿隙问题^[9-11],导致结构在运动方向变化时产生滞后和瞬时冲击力,进而影响了惯容器的效果。随后,PARAGEORGIU 等^[10]于 2005 年提出了滚珠丝杠惯容器,其紧密的机械结构和灵活的安装方法为该领域带来了新的发展方向。WANG 等^[12]提出了液压惯容器,其能够承受大吨位载荷的直接作用,进一步拓展了惯容器的实现方式。齿轮齿条惯容器、滚珠丝杠惯容器和液压惯容器被认为是 3 种较为成熟的机械惯容器。此外,一些学者也开展了新型惯容阻尼器的理论和试验研究^[13-15]。然而,尽管各类以机械方式实现的被动式惯容器在结构振动控制方面取得了一定进展,但它们都面临着一个共同的挑战,即如何实现易于封装的变惯容装置。

在外部激励不确定的情况下,被动式惯容器并非始终有利于抑制结构振动。因此,通过可变惯容实现更优控制变得十分必要。CHEN 等^[16]提出了一种基于半主动惯容器和半主动阻尼器的悬架,并提出了一种基于模型参考的半主动控制策略。HU 等^[17]提出了一种可变惯容惯容器。通过电机控制旋转体中活动质量块的位置,改变旋转体转动惯量来调整惯容器的惯容系数。该装置利用频率跟踪器跟踪激励频率,控制结构加速度和惯容器加速度的相位差保持在 90°。BRZESKI 等^[18-20]将无极变速箱与惯容器结合,通过控制变速箱的传动比来改变惯容系数,但变速箱一般体积较大且结构复杂。FARAJ 等^[21]在 2019 年讨论并验证通过改变丝杠导程实现转动惯量调整的可能性,但丝杠导程是固定变化的,该方案本质上属于被动控制,变惯容方式不够灵活。HIRAMOTO 等^[22]提出了一种可变惯容惯容器,通过改变旋转体的转动半径实现变惯容,同时提出了一种基于模型参考的半主动控制策略,基于线性矩阵不等式(linear matrix inequalities, LMIs)方法设计参考主动控制律。TAKINO 等^[23]提出了一种可变惯容惯容器,该装置通过电机控制质量块的转动半径改变转动惯量,从而实现变惯容。他们利用实测位移数据进行快速傅里叶变换,使惯容器能够跟踪主频率,以实现半主动控制。综上可知,基于惯容器的半主动控制研究较少,且现有半主动变惯容装置不尽完善。一是变惯容方式的局限性。采用机械式变转动惯量的方式变惯容,一方面增加了机械装置的复杂性,另一方面限制了装置的可变惯容范围。二是半主动控制算法的局限性。基于主动控制律的控制算法,没有结合装置本身的特点,不能充分发挥半主动惯容装置的优势。

离合惯容阻尼器(clutching inerter damper, CID)的出现为变惯容装置及算法提供了一种新的形式。MAKRIS 等^[24]首次提出了 CID 的单向出力力学模型,该模型是一种理想模型,是符合 BangBang 控制策略的分段模型。WANG 等^[25]在单自由度(single-degree-of-freedom, SDOF)系统中对 CID 进行了性能分析,并与惯容器进行了对比分析,指出了 CID 模型在位移和加速度控制的优势。MÁLAGA-CHUQUITAYPE 等^[26]使用一种更实际的模型研究了棘轮刚度和齿轮啮合间隙等参数对结构响应的影响,并进行了 3D 打印装置的动力试验测试,指出了 CID 相对于惯容器的若干优势。LI 等^[27]对 SDOF 中的 CID 进行了等效线性化研究并将其拓展至多自由度结构分析中。随后,对惯容器、CID 和含有减速机的 CID 进行了理论分析和振动台试验对比研究^[28],指出提升附加惯性和阻尼均可提升被动 CID 装置的控制性能。

然而,被动 CID 装置由于未考虑飞轮速度重置并不能实现理想的分段模型,导致其控制性能受限。通过半主动方式实现其理想分段模型是一种更好的选择,但现有研究对变惯容装置的实现方式不利于装置封装。因此,本文提出一种减振汲能一体化的机电离合惯容阻尼器(electromechanical clutching inerter damper, ECID),该方案易于装置封装,不仅可以实现性能更优的分段控制模型,而且具有能量回收功能。本文的主要框架是:首先,建立了理想 CID 模型和被动 CID 模型在 SDOF 结构的运动方程,并对其性能进行了对比分析,阐述了 2 种模型的性能差异;其次,将离合惯容器、变惯容和能量回收结合,提出了一种可汲能和变惯容的机电离合器惯容阻尼器,给出了 ECID 内部电路的具体实施方案,推导了 ECID 的控制力表达式;再次,建

立了 ECID 的机电混合仿真模型,分析了 ECID 内部电路参数对其减振和汲能效果的影响,给出了电路的参数设计建议;最后,对有关结论进行了梳理和总结。

1 理想 CID 与被动 CID 模型的比较

离合惯容器的理想分段模型实际上难以通过被动方式实现,原因在于被动方式无法将飞轮的动能在减速阶段清零但不对加速阶段产生影响。虽然在被动离合惯容装置中引入阻尼可以给飞轮提供减速机制,但同时会在加速阶段给结构附加阻尼力。本章将对 CID 的被动分析模型与理想分段模型进行对比研究,探究理想分段模型的等效阻尼效果,同时为机电式离合惯容器的电容参数设计奠定基础。

1.1 理想 CID 在 SDOF 结构的建模

理想 CID 在单自由度结构的简化分析模型如图 1 所示。飞轮中暗含的棘轮使得飞轮只能单向运动,保证结构可以加速驱动飞轮,而飞轮减速的惯性不能反馈到结构。CID 中 2 个棘轮安装方向相反,保证一侧飞轮顺时针旋转,另一侧逆时针旋转,装置即可控制结构往复运动。

当结构受到外界激励时,结构产生水平运动。当结构处于加速阶段时,棘轮啮合,结构驱动飞轮转动,获得飞轮传递的惯性力;而当结构减速时,棘轮脱合,结构不接受飞轮惯性力,同时飞轮速度适时清零。CID 的理想模型的数学模型如式(1)所示:

$$F_{\text{CID}}(t) = \begin{cases} b\ddot{x}(t), & \ddot{x} > 0 \\ 0, & \ddot{x} \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: b 为 CID 工作时的惯质; $\beta = b/m$ 可定义为装置相对于质量为 m 的结构的附加惯质比; \ddot{x} 和 \dot{x} 分别为装置两端点间的相对速度和加速度响应,当装置在单自由度系统中时,也可表示单自由度结构的响应。当结构处于加速阶段时,CID 工作,其运动满足转矩平衡,忽略转动阻尼,则有

$$F_{\text{CID}}(t) \cdot r = J_f \cdot \ddot{\theta}(t) \quad (2)$$

式中: F_{CID} 为 CID 产生的惯性力; $J_f = MR^2/2$ 为 CID 中飞轮的转动惯量, M 和 R 分别为 CID 中飞轮的质量和半径; r 为 CID 中齿轮的半径; $\ddot{\theta}(t)$ 为飞轮的旋转加速度。在理想条件下,假设齿轮和齿条紧密啮合, $\ddot{x}(t) = \ddot{\theta}(t) \cdot r$, 联立式(2)可得

$$b = MR^2/2r^2 \quad (3)$$

在地震激励下,CID 在单自由度系统的运动方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x}(t) + kx(t) + F_{\text{CID}}(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (4)$$

式中: m 、 k 和 c 分别为单自由度系统的质量、刚度和阻尼; x 、 \dot{x} 和 \ddot{x} 分别为单自由度系统的相对位移、速度和加速度; \ddot{x}_g 为地震加速度。

式(1)可以视为一个理想的单向传力模型,它暗含了飞轮速度可在结构每一个振动的减速阶段被清零,使得飞轮可以在结构每一个加速阶段被重新驱动获得动能,而这难以通过被动方式来实现。

1.2 被动 CID 在 SDOF 结构的建模

理想 CID 模型要求飞轮每次被驱动前已经处于静止状态,如果给飞轮附加一定的黏滞阻尼,确实可以在棘轮脱合时给飞轮减速,但也会在棘轮闭合时提供阻尼。作为一种被动形式的方案,该方案可能近似实现理想模型的控制效果。在 CID 装置的 2 个飞轮上附加黏滞阻尼后,装置在单自由度系统的运动方程为

$$\begin{cases} m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) + F_a(t) + F_b(t) = -m\ddot{x}_g(t) \\ F_a(t) \cdot r = J_f \cdot \ddot{\theta}_a(t) + L \cdot \dot{\theta}_a(t) \\ F_b(t) \cdot r = J_f \cdot \ddot{\theta}_b(t) + L \cdot \dot{\theta}_b(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $F_a(t)$ 和 $F_b(t)$ 为 CID 在 2 个方向提供的力; L 为 2 个方向转动系统的阻尼系数; $\ddot{\theta}_a$ 、 $\ddot{\theta}_b$ 、 $\dot{\theta}_a$ 、 $\dot{\theta}_b$ 分别为 2 个方向转动系统的角加速度和角速度。 $F_a(t)$ 和 $F_b(t)$ 还与装置和结构之间连接件受力相同,如式(6)所示:

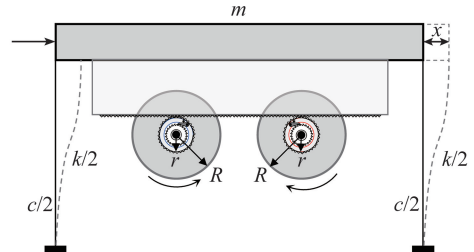


图 1 CID 在单自由度结构的分析简图

Fig. 1 Schematic diagram of CID in the SDOF structure

$$\begin{cases} F_a(t) = C_c \cdot [\dot{x}(t) - \dot{\theta}_a(t) \cdot r] \cdot \frac{1 + \text{sign}[\dot{x}(t) - \dot{\theta}_a(t) \cdot r]}{2} \cdot \frac{1 + \text{sign}[\dot{x}(t)]}{2} \\ F_b(t) = C_c \cdot [\dot{x}(t) - \dot{\theta}_b(t) \cdot r] \cdot \frac{1 - \text{sign}[\dot{x}(t) - \dot{\theta}_b(t) \cdot r]}{2} \cdot \frac{1 - \text{sign}[\dot{x}(t)]}{2} \end{cases} \quad (6)$$

式中:sign 为符号函数。式(6)将结构和 CID 之间的连接考虑为阻尼器,且阻尼系数 C_c 足够大,两者之间通过阻尼器传递作用力。当 C_c 相对于结构阻尼足够大时,结构响应可基本不受 C_c 影响。

1.3 理想 CID 和被动 CID 模型的控制性能分析

图 2 和图 3 分别展示了附加不同阻尼的被动 CID 和理想 CID 在谐振激励下的峰值位移、加速度频响曲线以及 El Centro 和 Kobe 地震波下的位移和加速度时程图。计算中,结构质量 m 取为 29.1 kg,固有频率 ω 取为 2π rad/s,阻尼比 ξ 取为 0.01,飞轮的转动惯量 J_f 取为 $0.0059 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,齿轮半径 r 取 0.026 m。图中 $\gamma = L/r/c$ 是定义的飞轮附加阻尼比。

由图可知,当 γ 较小时,被动 CID 的控制效果不如理想 CID,这是由于飞轮附加阻尼小,飞轮减速慢无法将速度及时减到 0,而结构需要在速度大于飞轮时驱动飞轮,因此装置提供控制力的时间短,控制效果较差。当 γ 较大时,控制效果甚至超过了理想 CID,这是由于飞轮附加阻尼大,飞轮速度可以及时减小到 0,更加趋近于理想 CID;另外,被动 CID 模型在结构加速阶段也向结构提供阻尼,也是其控制效果随 γ 增加而提升的原因。可以看出,理想 CID 的控制效果与附加一定阻尼的被动 CID 等效,可以推断理想 CID 模型是暗含阻尼效果的。

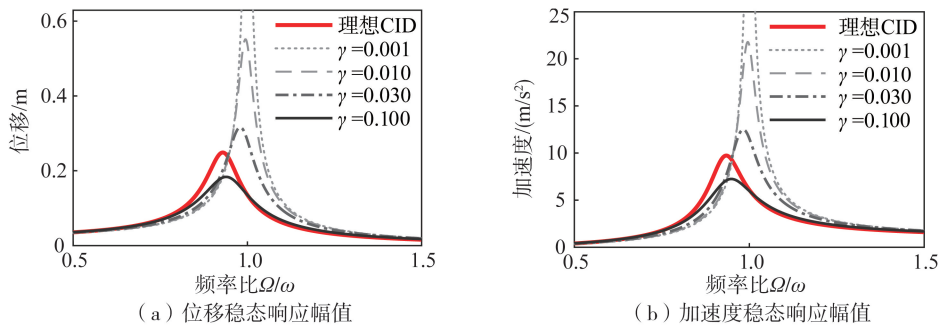


图 2 理想和被动 CID 模型在 SDOF 系统受谐振激励时的稳态响应幅值

Fig. 2 Steady-state response amplitude of the SDOF system with ideal and passive CID models under harmonic excitation

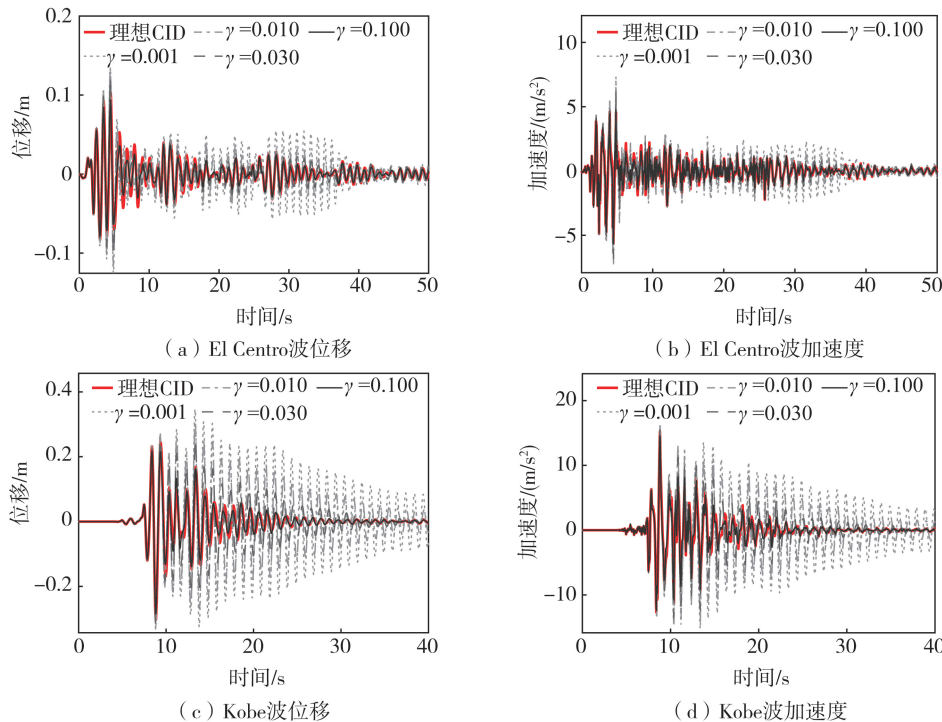


图 3 理想和被动 CID 模型在 SDOF 系统受地震激励时的时程响应曲线

Fig. 3 Time history responses curves of the SDOF system with ideal and passive CID models under seismic excitation

2 ECID 的设计和实现

尽管通过引入黏滞阻尼可以提升被动 CID 的控制性能,达到理想模型的效果,但考虑变惯容、单向传力、黏滞阻尼实施与封装等问题后,被动装置的设计也显得尤为复杂。为了能够实现理想 CID 模型,本文提出了一种新的可汲能的机电式可变惯质离合惯容器,如图 4 所示。其工作原理是结构运动带动丝杠运动,单向轴承保证飞轮和直流电机单向运动,当结构处于加速阶段,单向轴承闭合,结构驱动飞轮和直流电机转动,获得飞轮提供的机械惯量和外接电路中提供的电惯量,同时直流电机作为发电机可以进行能量回收;而当结构减速时,单向轴承脱合,装置不提供惯量,同时外接电路提供阻尼将飞轮和直流电机速度清零。通过机电比拟理论可知,电容与电惯量对应,如果外界电路中采用调节方便的可变电容,ECID 便实现了可变惯质的能力,和汲能属性一起为后续自供能半主动变惯容控制奠定基础。本文重点是对 ECID 装置的预期性能进行探究,变惯容控制策略与 CID 理想模型一致。

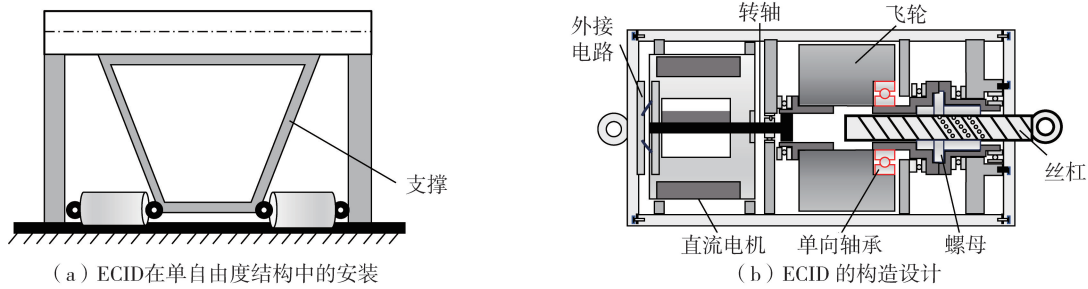


图 4 ECID 的安装与设计简图

Fig. 4 Installation and design diagram of ECID

2.1 机电系统比拟

FIRESTONE^[29]于 1933 年提出了机电比拟理论,SMITH^[7]2002 年提出惯容器的同时也完善了该理论。将力与电流类比,将速度与电压类比,可得到惯容器、阻尼、弹簧与电容、电阻、电感的对应关系,如图 5 所示。可知,电容与惯容器相对应,这也为后文电惯容的实现提供了理论依据。

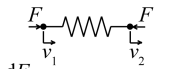
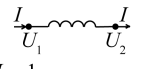
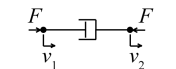
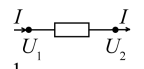
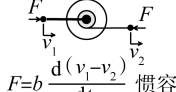
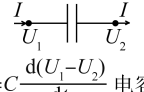
机械系统	电气系统
 $\frac{dF}{dt} = k(v_1 - v_2)$ 刚度	 $\frac{dI}{dt} = \frac{1}{L}(U_1 - U_2)$ 电感
 $F = c(v_1 - v_2)$ 阻尼	 $I = \frac{1}{R}(U_1 - U_2)$ 电阻
 $F = b \frac{d(v_1 - v_2)}{dt}$ 惯容	 $I = C \frac{d(U_1 - U_2)}{dt}$ 电容

图 5 机械系统和电气系统之间的对应关系

Fig. 5 Correspondence between mechanical and electrical systems

2.2 机电惯量的实施

电惯容部分的构造原理如图 6 所示,直流电机的转子与飞轮通过转轴相连,直流电机的电枢与外接电路串联。飞轮驱动直流电机转子转动,在磁场中产生电磁感应,进而在电枢和外接电路中产生电流,此时转子受到磁场对它的旋转运动进行阻碍的电磁转矩。

图 6 中, ω 为转子旋转角速度; T_1 为旋转运动的转矩; T_e 为电磁转矩; T_0 为直流电机的阻尼转矩; I_a 为电枢电流; Z_e 为电枢外接电路的阻抗。为了提升惯容器的电惯容,可以通过

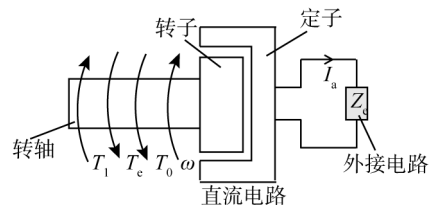


图 6 ECID 电惯容部分示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the electronic inductance part of ECID

改变外接阻抗 Z_e 的大小来调节电磁转矩。直流电机的感应电动势和电磁转矩由式(7)、式(8)所示:

$$E_a = k_e \omega \quad (7)$$

$$T_e = k_T I_a \quad (8)$$

式中: k_e 和 k_T 分别为直流电机的电动势常数和转矩常数; E_a 和 T_e 分别为直流电机的感应电动势和电磁转矩。直流电机的电枢电路模型方程和动力学方程为

$$E_a = Z_e I_a + R_a I_a + L_a \dot{I}_a \quad (9)$$

$$T_1 - T_e - T_0 = (J + J_f) \frac{d\omega}{dt} \quad (10)$$

式中: J 为直流电机转子和转轴的转动惯量; J_f 为飞轮的转动惯量; R_a 和 L_a 分别为直流电机电枢的电阻和电感。滚珠丝杠将直线运动和旋转运动互相转换,可以得到,

$$\omega(t) = \frac{2\pi}{p} \cdot v(t) \quad (11)$$

$$F(t) = \frac{2\pi}{p} \cdot T_1(t) \quad (12)$$

式中: p 为滚珠丝杠的导程。根据上文中的机电比拟理论可知,电容和惯容器相对应,为了保证电枢和外接电路只提供电惯容,其所有阻抗应只有电容,因此外接电路中的阻抗由式(13)所示:

$$Z_e I_a = -R_a I_a - L_a \dot{I}_a + \frac{\int I_a dt}{C} \quad (13)$$

式中: C 为电容。由式(13)可知,外接阻抗由一个电容,一个负电枢电阻和一个负电枢电感组成。可以采用ANTONIOU^[29]提出的浮动负阻抗转换器来实现负电枢电阻和负电枢电感。其中负阻抗电路将式(7)~式(9)、式(11)~式(13)代入式(10),忽略直流电机的阻尼转矩 T_0 ,可以得到,

$$F(t) = \left(\frac{2\pi}{p}\right)^2 (J + J_f + k_T k_e C) \cdot \ddot{x}(t) \quad (14)$$

$$b_e = \left(\frac{2\pi}{p}\right)^2 k_T k_e C \quad (15)$$

$$b_m = \left(\frac{2\pi}{p}\right)^2 (J + J_f) \quad (16)$$

$$\beta_e = b_e / m \quad (17)$$

$$\beta_m = b_m / m \quad (18)$$

式中: b_e 和 b_m 分别为电惯量和机械惯量; β_e 和 β_m 分别为电惯质比和机械惯质比。

由式(16)可知,改变装置的机械惯量,需要改变飞轮的转动惯量或者传动比和导程,该方式不够灵活。因此,本研究提出在电机电路中使用可变电容来实现可变电惯量,有效克服机械变惯量的笨重。可变电容的大小调节方便,体积小,易于封装于装置内部,可有效减小惯容器的体积和质量。

2.3 飞轮制动和能量回收的实现

ECID的内部电路如图7所示,该电路可实现可变电惯容、飞轮减速和能量回收的功能。

图7中分段电惯容-能量回收是指,当ECID处于加速阶段时,开关1、3断开,开关2闭合,为结构提供电惯量,当结构处于减速阶段时,开关1、3闭合,开关2断开,能量回收电路回收电容中的能量,电阻 R 为飞轮提供电阻尼。机械惯量的本质是飞轮承载动能,而电惯量的本质是电容储存电能。当结构一侧ECID不工作时,将电容中的电能存储到电池中,这样既达到电容释放电能的目的,也达到了汲能的目的,同时电阻 R 给飞轮提供电阻尼使其减速制动以保证其循环工作。当结构处于减速阶段时,外接电路中只有电阻,得到式(19):

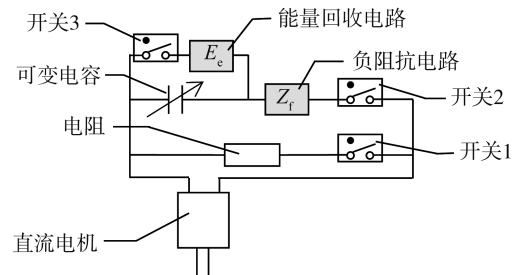


图7 ECID内部电路示意图

Fig. 7 Schematic diagram of ECID internal circuit

当结构处于减速阶段时,外接电路中只有电阻,得到式(19):

$$F(t) = \left(\frac{2\pi}{p}\right)^2 \cdot \frac{k_T k_e}{R} \cdot v(t) \quad (19)$$

由式(19)可知, $(2\pi/p)^2 \cdot k_T k_e/R$ 与阻尼是对应的。电阻与阻尼成反比,电阻越小,阻尼越大。在前文提到的机电比拟,电阻的倒数与阻尼相对应,也提供了依据。由前文知,当 $\gamma=1$ 时,被动 CID 效果优于理想 CID。当直流电机的转矩常数 k_T 为 $1 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$,直流电机的电动势常数 k_e 为 $1 \text{ V} \cdot \text{s}/\text{rad}$, p 为 0.163 m 时,电阻小于 404.5Ω 可认为阻尼满足飞轮减速至 0 的需求,从而实现理想分段模型,如式(20)所示:

$$F_{\text{ECID}}(t) = \begin{cases} b\ddot{x}(t), & \dot{x} > 0 \\ 0, & \dot{x} \leq 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中: $b = (2\pi/p)^2 (J + J_f + k_T k_e C)$ 为 ECID 工作时提供的惯容系数。

3 ECID 在 SDOF 结构的机电混合仿真与分析

本章将在 SDOF 系统中对 ECID 进行机电系统混合动力仿真研究,以评估 ECID 的减振和汲能效果。其次,也将对比电惯容与机械惯容的一致性,分析装置内部电路对系统性能的附加影响。

3.1 ECID 在 SDOF 结构的机电仿真模型

基于前文建立的 ECID 模型,首先建立 ECID 在单自由度结构系统的运动方程:

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega \dot{x}(t) + \omega^2 x(t) = \ddot{x}_g(t) - \frac{F(t)}{m} - \frac{2\pi}{p} \cdot \frac{T(t)}{m} \quad (21)$$

式中: m 、 ω 和 ξ 分别为结构的质量、自振频率和阻尼比; x 、 \dot{x} 和 \ddot{x} 分别为结构的相对位移、速度和加速度; \ddot{x}_g 为地震加速度; $F(t)$ 为机械惯容提供的力; $T(t)$ 为电惯容提供的力矩。 $F(t)$ 和 $T(t)$ 表达式为

$$F(t) = (2\pi)^2 \cdot \frac{J + J_f}{p^2} \cdot \ddot{x}(t) \quad (22)$$

$$T(t) = 2\pi \cdot \frac{k_T k_e C}{p} \cdot \ddot{x}(t) \quad (23)$$

理想状态下,负阻抗电路能完全抵消电感和电阻,但是为了满足劳斯判据需要在仿真模型中保留一部分电阻。ECID 在 SDOF 结构中的机电混合仿真模型通过 Simulink 平台搭建,如图 8 所示。

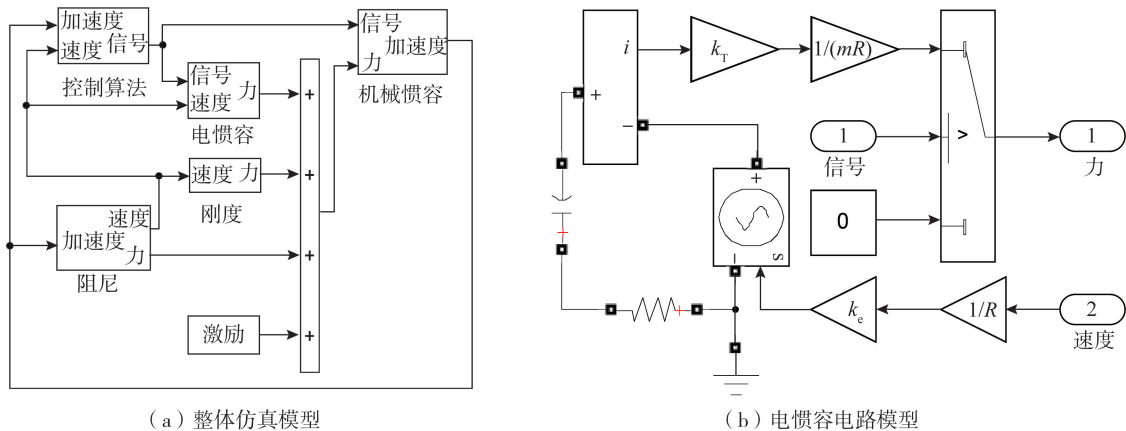


图 8 ECID 在 SDOF 系统的机电仿真模型

Fig. 8 Electromechanical simulation model of ECID in the SDOF system

3.2 ECID 的减振和汲能效果分析

分别对无控、被动 CID 和 ECID 这 3 种方案进行动力仿真并绘制结构响应频响曲线,如图 9 所示。仿真中结构参数取值同 1.3 节。由于直流电机转子远小于飞轮的转动惯量,因此可以忽略其转动惯量。飞轮的转动惯量 J_f 为 $0.0059 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,滚珠丝杠导程 p 为 0.163 m ;直流电机的转矩常数 k_T 为 $1 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$,直流电机的电动势常数 k_e 为 $1 \text{ V} \cdot \text{s}/\text{rad}$;外接电路中电容 C 为 0.0025 F ,电阻 R 为 1.3Ω 。被动 CID 模型的阻尼参数 γ 为 0.03 ,其他参数与 ECID 方案一致。

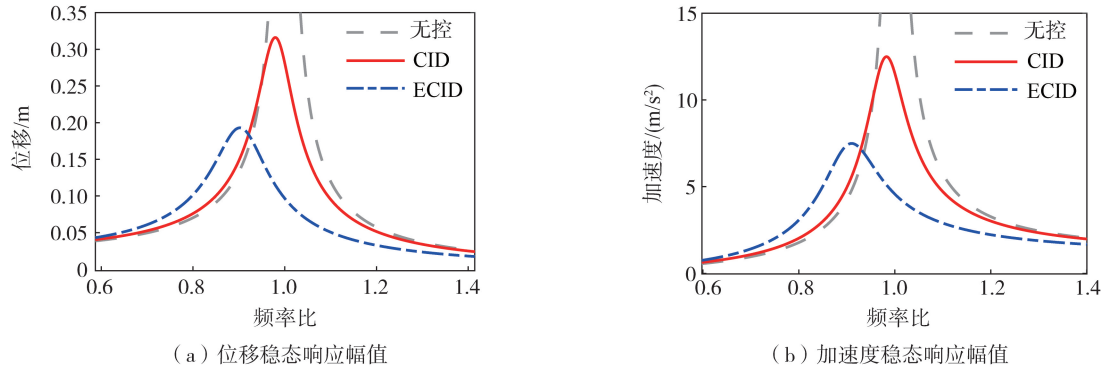


图 9 ECID 与被动 CID 模型在 SDOF 系统中受谐振激励时的稳态响应幅值

Fig. 9 Steady-state response amplitude of the SDOF system with ECID and passive CID models under harmonic excitation

由图 9 可以看出 ECID 比被动 CID 控制效果更优,并且 ECID 对结构共振频率的减小也比被动 CID 明显。这是由于被动 CID 的附加阻尼较小,飞轮无法快速制动,实现惯性力的有效利用。除此之外,ECID 还能在工作过程中进行能量回收,本文分别选取低、中、高 3 档频率,计算 ECID 在对应频率的正弦荷载下的能量回收情况。低、中、高频频率分别取 π 、 2π 和 3π rad/s,分别绘制出两方向阻尼器中电机功率的时程图,如图 10 所示, P_1 和 P_2 分别是 2 个方向的能量回收功率。取仿真时间 50 s,用功率对时间进行积分,得到能量回收的功,经过计算,在低、中、高频荷载下分别回收 1.34、68.18、5.22 能量。可以推断,结构在高频和低频激励下振动小,振动能量少,ECID 可回收的能量较少,共振频率 (2π rad/s) 附近结构振动剧烈,ECID 可回收的能量较多。

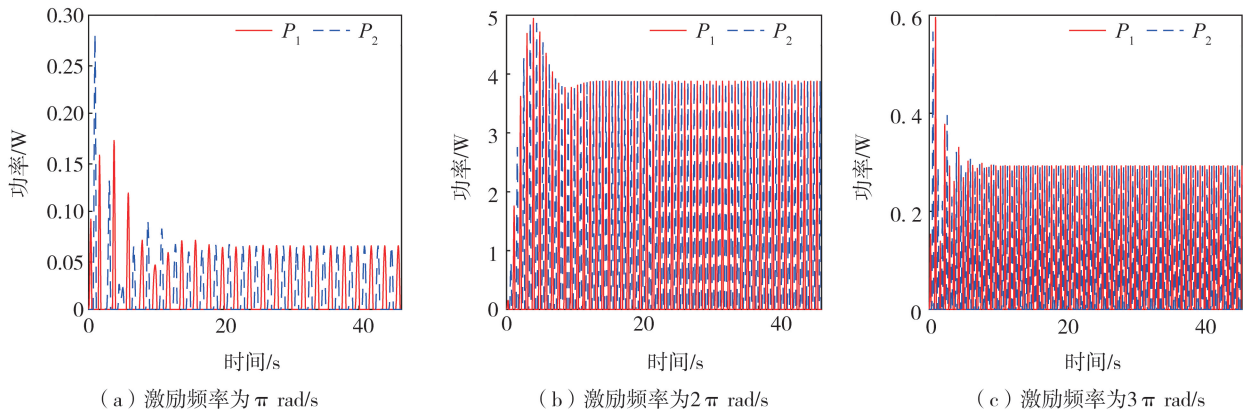
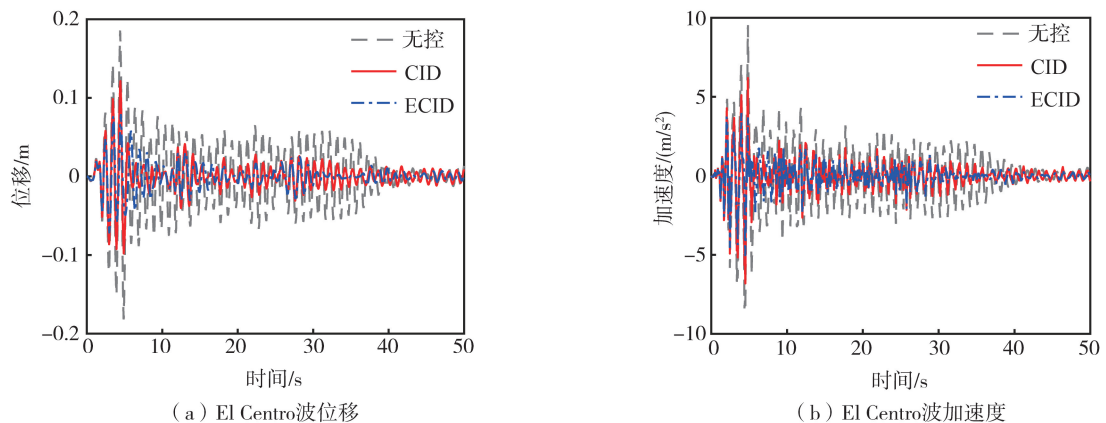


图 10 ECID 在 SDOF 系统受谐振激励时的能量回收功率曲线

Fig. 10 Energy recovery power curves of the SDOF system with ECID under harmonic excitations

考虑无控、被动 CID 和 ECID 这 3 种方案输入地震激励,绘制结构位移和加速度的时程曲线,如图 11 所示。对比 3 种方案下的结构位移和加速度曲线,可以看出 ECID 比被动 CID 控制效果明显。为了量化 ECID 和被动 CID 的控制效果,分别计算了 ECID、被动 CID 的峰值响应和方差响应减震率,同时为了突出被动 CID 相对于传统惯容器的优势,也计算了惯容器控制下的结构响应和减震率,如表 1 和表 2 所示。



(a) El Centro波位移

(b) El Centro波加速度

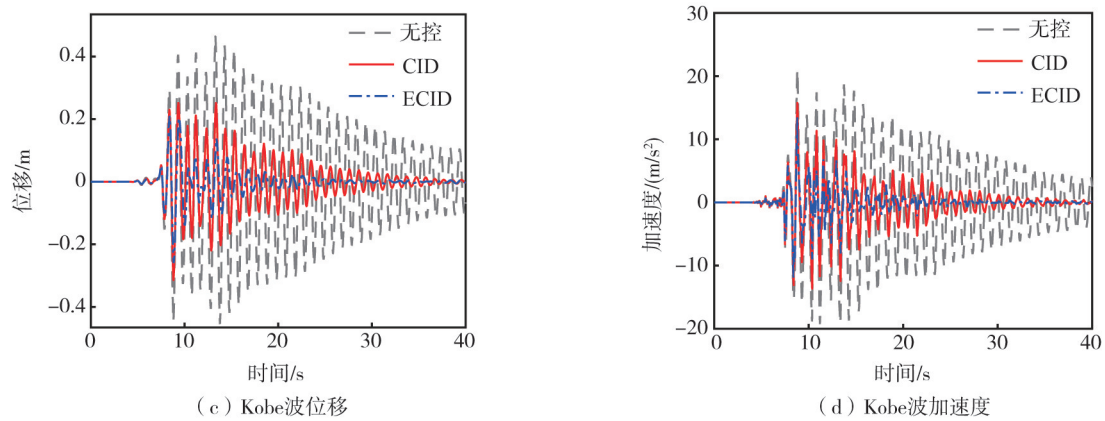


图 11 ECID、被动 CID 在 SDOF 系统受地震激励时的时程响应曲线

Fig. 11 Time history response curves of the SDOF system with ECID and passive CID models under seismic excitation

表 1 各方案下结构峰值响应减震率

Table 1 Reduction rate of structural peak response under each scheme %

方案	El Centro 波位移	El Centro 波加速度	Kobe 波位移	Kobe 波加速度
ECID	57.3	58.3	54.8	35.8
被动 CID	34.5	35.1	45.9	24.8
无控	25.3	55.2	29.7	44.9

表 2 各方案下结构方差响应减震率

Table 2 Reduction rate of structural variance response under each scheme %

方案	El Centro 波位移	El Centro 波加速度	Kobe 波位移	Kobe 波加速度
ECID	61.1	60.8	76.5	74.6
被动 CID	52.1	48.3	59.3	57.1
无控	-4.7	20.8	66.0	70.5

由表 1 和表 2 可知,对于位移响应控制,ECID 优于被动 CID 和惯容器,值得一提的惯容器在 El Centro 波下的方差响应有所放大,这也是惯容器的一个短板。对于加速度响应控制,惯容器总体表现较好,这也是惯容器的优势;ECID 明显优于被动 CID,可媲美或超越惯容器,特别是对 El Centro 波下方差响应控制。

图 12 显示了 ECID 在地震激励下的能量回收功率曲线。经过计算,ECID 在 El Centro 和 Kobe 地震激励下,可分别回收 3.98、20.92 J 能量。

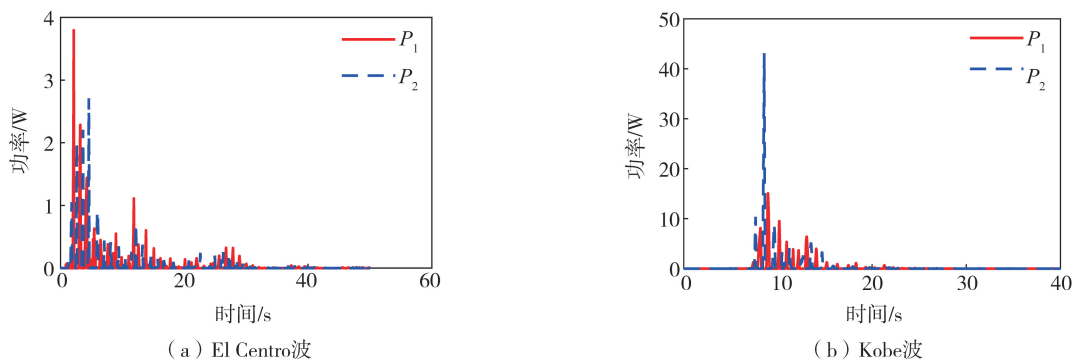


图 12 ECID 在 SDOF 系统受地震激励时的能量回收功率曲线

Fig. 12 Energy recovery power curves of the SDOF system with ECID under seismic excitation

3.3 电容对 ECID 减振性能的影响

本节对 ECID 的变惯容能力进行深入研究。由前述可知 ECID 的惯容系数 $b = (2\pi/p)^2 \cdot (J + J_1 + k_T k_e C)$, 其中电机转子转动惯量 J 可以忽略,通过改变飞轮转动惯量 J_1 和内部电路的可变电容 C 可以改变 ECID 的惯容系数。首先,保持机械惯容不变,增大电惯容,将电容 C 从 0.0025 F 逐步增大至 0.0080 F。绘制不同参

数的频响曲线,如图 13 所示。可以看出,随着 ECID 中电容 C 增大,位移和加速度的控制效果明显增强。这是由于增大电容直接增加电惯量,机械惯量不变,总惯量增加,ECID 的控制性能增强。

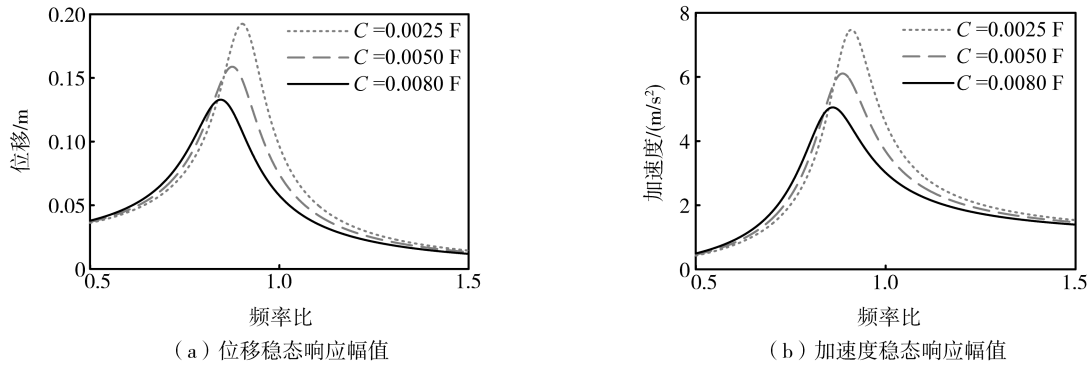


图 13 电容变化时 ECID 在 SDOF 系统受谐振激励时的稳态响应幅值

Fig. 13 Steady-state peak response amplitude of the SDOF system with ECID under harmonic excitation at different capacitances

为了进一步研究电惯容与机械惯容的功能一致性,保持 ECID 总惯容系数不变,减小机械惯容部分,用电惯容取代。由于直流电机的转矩常数 k_t 和电动势常数 k_e 的值都是 1,所以保持 J_r 和 C 的和一定即可。转动惯量 J_r 从 $0.0059 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 逐步减小至 $0.0004 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,电容 C 从 0.0025 F 逐步增大至 0.0080 F ,绘制出了不同电容参数下结构的频响曲线,如图 14 所示。

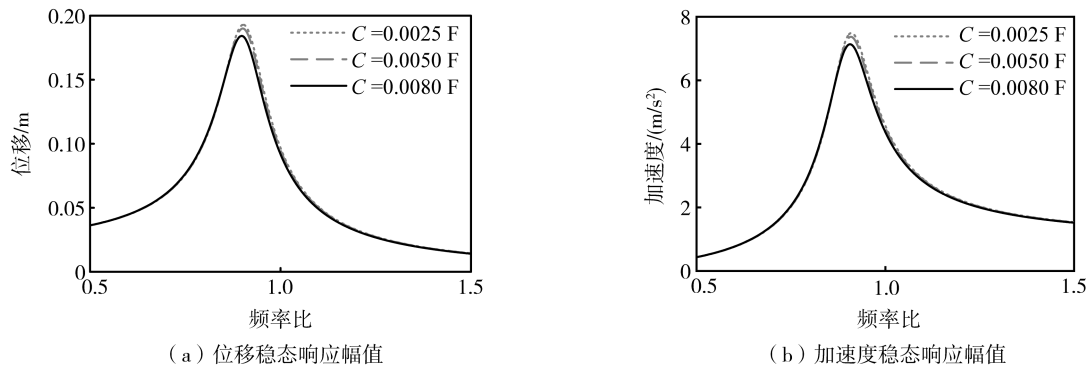


图 14 总惯容恒定时 ECID 在 SDOF 系统受谐振激励时的稳态响应幅值

Fig. 14 Steady-state peak response amplitude of the SDOF system with ECID under harmonic excitation at constant total inertance

由图 14 可知,虽然 ECID 的总惯容一定,但是随着电容 C 增大,电惯容比例增加,结构共振响应呈轻微下降趋势。这是由于仿真模型为了满足劳斯判据,保留了部分电阻,电阻和电容产生耦合作用对系统产生了影响。此处,可以通过线性机电惯容器系统简单进行验证。首先,建立含有电阻和电容的机电惯容模型,直流电机的电枢电路模型方程可以由式(24)所示:

$$E_a = \frac{\int I_a dt}{C} + R_a I_a \tag{24}$$

忽略直流电机的阻尼转矩 T_0 和电机转子的转动惯量 J ,对式(21)和式(24)分别进行拉氏变换后再将式(24)代入式(21),可以得到 SDOF 系统的响应传递函数为

$$\frac{x(s)}{\ddot{x}_g(s)} = \frac{1+CR \cdot s}{(1+\beta_m)CR \cdot s^3 + (1+\beta_m + \beta_e + 2\xi\omega CR) \cdot s^2 + (2\xi\omega + \omega^2 CR) \cdot s + \omega^2} \tag{25}$$

固定电阻 R 为 1.3Ω ,转动惯量 J_r 从 $0.0059 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 逐步减小至 $0.0004 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,电容 C 从 0.0025 F 逐步增大至 0.0080 F ,绘制了图 15 的系统 Bode 图。可以看出,此系统可以看作一个同时含有比例环节和惯性环节的系统。随着电容 C 逐步变大,Bode 图中峰值响应逐渐减小,相位从 0° 减小到 -180° 的过程也在逐渐变缓,可以看出系统的阻尼在逐步变大。说明在安装了机电惯容的 SDOF 系统中,当电阻较小时,系统阻尼随电容 C 增大而增大,而图 14 所示的 ECID 系统与此类似。

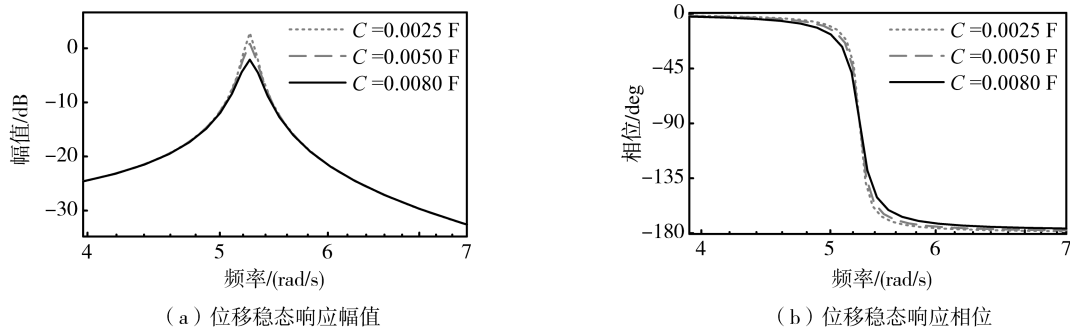


图 15 总惯容恒定时 ECID 在 SDOF 系统的 Bode 图

Fig. 15 Bode diagram of the SDOF system with ECID at constant total inertia

3.4 电阻对 ECID 减振性能的影响

当电机外接电路中只有电阻的情况下,电阻尼为 $(2\pi/p)^2 \cdot k_T k_e / R$,理论上电阻越小,ECID 的控制效果更好。将飞轮的转动惯量 J_f 固定为 $0.0001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,电容 C 分别取 0.0080 F 和 0.0050 F ,电阻 R 分别取 $1, 10, 20, 30, 40 \Omega$,其它参数不变。绘制不同电阻下的结构位移频响曲线,如图 16 所示。

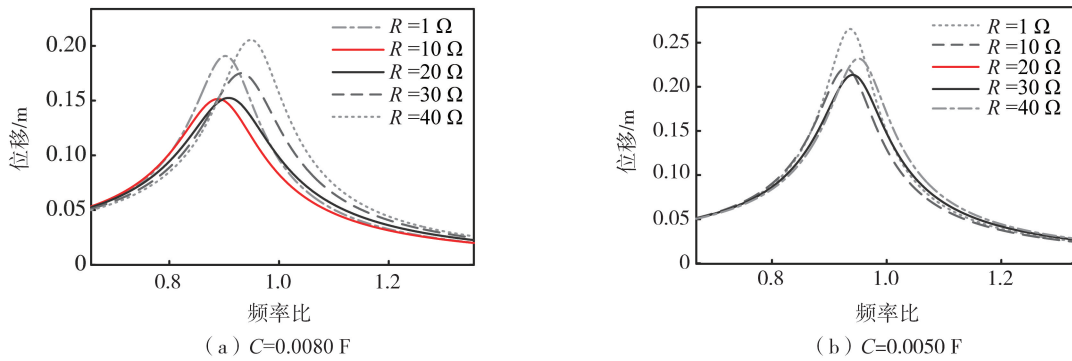


图 16 电阻变化时 ECID 在 SDOF 系统中受谐振激励下的稳态峰值位移响应

Fig. 16 Steady-state peak displacement responses of the SDOF system with ECID under harmonic excitation as resistance varies

由图 16 可知,位移频响曲线的峰值并非如前文所述的随着电阻变小而变小,随着电阻从 1Ω 增大到 40Ω ,频响曲线的峰值出现了先减小后增大的趋势。这是由于外接电路中同时包括电容和电阻时,两者具有耦合效应,电容一定时,电阻在 $1 \sim 40 \Omega$ 区间内存在最优值。对比图 16(a) 和 (b) 可知,以位移频响曲线的峰值最小为优化目标,当电容取 0.0080 F 时,电阻的最优取值在 10Ω 附近;当电容取 0.0050 F 时,电阻的最优取值在 20Ω 附近,不同电容参数对应的电阻最优取值不同。随着电阻的增加,能量回收效果也会减弱,因此,在位移控制满足要求时,应尽可能减小电阻取值。在变惯容的半主动控制策略中,当需要调节电惯容,即改变电容大小的时候,需要将电阻调至最优取值。

3.5 电容和电阻对 ECID 汲能效果的影响

为了明确电机外接电路中电容和电阻对 ECID 能量回收效果的影响,绘制了不同频率正弦激励下的稳态功率曲线,如图 17 所示。

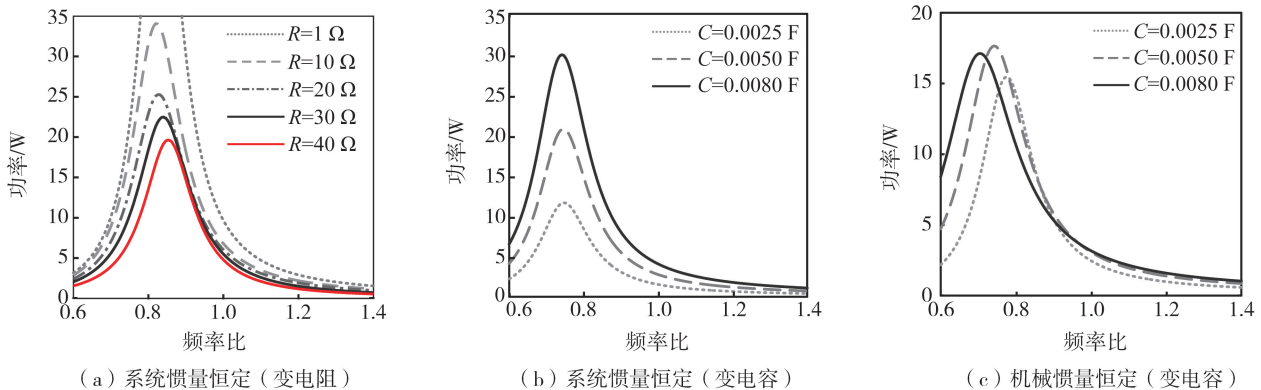


图 17 ECID 在 SDOF 系统中受谐振激励时的稳态能量回收功率

Fig. 17 Steady-state energy recovery power of the SDOF system with ECID under harmonic excitation

由图 17(a)可知,电容一定时,电阻越大,能量回收功率越小。这是由于电阻越大,耗能越多,回收的能量越少。因此,当控制效果满足要求时,电阻应尽可能减小取值以回收更多能量。图 17(b)分析了电阻不变时,总惯量一定,不同电惯量占比下的能量回收效果。随着电容增加,电惯量占比提高,能量回收功率增大。这是因为总惯量一定,结构传递给 ECID 的动能一定,而电惯量占比高,意味着可回收的能量越多。图 17(c)分析了电阻不变时,机械惯量一定,电惯量改变对能量回收的影响。可以看出,电容增加,能量回收功率电峰值变化不明显,趋势不明。这是由于总惯量增大,结构振动和系统能量输入也会减小,电惯容比例虽然增大,能量回收未必显著增加。

4 结论

研究表明理想 CID 具有优异的控制性能,但其力学模型无法通过被动装置实现,因此本文提出一种半主动实现方式。设计了一种减振汲能一体化的新型机电离合惯容阻尼器(ECID),对 ECID 的电惯容、飞轮速度重置、汲能等功能的实现进行了具体的电气设计,建立了 ECID 在单自由度结构系统的机电混合仿真模型,并开展了深入的理论分析。得出如下结论:

1)对比了理想和被动 CID 模型的性能差异,分析了附加黏滞阻尼的被动 CID 的控制效果,随着附加阻尼的增加,被动 CID 模型的控制效果逐渐超越理想 CID 模型,被动 CID 的附加阻尼为飞轮减速提供了阻尼需求,也为 ECID 飞轮速度重置的电路设计提供了参考。

2)设计了 ECID 的电惯容、飞轮速度重置和汲能等功能的电路模型;实现了在结构加速阶段惯容系数可调,减速阶段飞轮动能可减速置零,同时电容储存能量可被回收多个功能。

3)分析了 ECID 内部电路中的电容对系统减振和汲能效果的影响。结果表明,电路参数确定的情况下,ECID 在结构共振工况下能量回收最多。通过增大电容增加电惯容,有利于抑制结构振动。在总惯容系数一定时,电惯容占比越高,汲能效果越好。

4)分析了电惯容与机械惯容的一致性,在总惯容系数一定时,分析了增加电惯容比例对系统性能的影响,指出增加电容会在系统中引入阻尼项,对减振效果具有微弱提升。

5)分析了 ECID 内部电路中的电阻对系统减振和汲能效果的影响。从减振角度看,电阻存在一定的最优值对应最优控制。从汲能角度看,电阻越大,能量回收越差,在满足减振需求的同时应尽可能减小设计电阻。

本研究主要以理论和仿真分析为主,探索了 ECID 的可行性和预期性能,未来将会开展相关的试验研究,形成更成熟的自供能半主动变惯容减振装置。

参考文献:

- [1] YAO J T P. Concept of structural control[J]. Journal of the Structural Division, 1972, 98(7): 1567-1574.
- [2] RONG K, LU Z. An improved ESM-FEM method for seismic control of particle tuned mass damper in MDOF system[J]. Applied Acoustics, 2021, 172: 107663.
- [3] RONGK J, LU Z, ZHANG J W, et al. Nonlinear gas-spring DVA for seismic response control: Experiment and numerical simulation[J]. Engineering Structures, 2023, 283: 115940.
- [4] 王梁坤, 施卫星, 周颖. 新型半主动调谐质量阻尼器减震性能的数值模拟[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(1): 172-179.
WANG Liangkun, SHI Weixing, ZHOU Ying. Numerical study on seismic performs of a new semi-active tuned mass damper[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(1): 172-179. (in Chinese)
- [5] 石运东, 韦鑫, 丁阳, 等. 三维隔震单层球面网壳结构频率相关变阻尼半主动控制[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(1): 143-153.
SHI Yundong, WEI Xin, DING Yang, et al. Semi-active control with frequency dependent variable damping for three-dimensional isolated single-layer spherical reticulated shell structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(1): 143-153. (in Chinese)
- [6] 闫路悦, 黄浩宇, 李易. 一种形状记忆合金半主动 TMD 系统的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(2): 81-88.
YAN Luyue, HUANG Haoyu, LI Yi. Experimental study on a shape memory alloy semi-active TMD system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2024, 44(2): 81-88. (in Chinese)
- [7] SMITH M C. Synthesis of mechanical networks: The inerter[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(10): 1648-1662.
- [8] SMITH M C, WANG F C. Performance benefits in passive vehicle suspensions employing inerters[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 42(4): 235-257.
- [9] NORDIN M, GALIC' J, GUTMAN P O. New models for backlash and gear play[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 1997, 11(1): 49-63.

- [10] PAPAGEORGIU C, SMITH M C. Laboratory experimental testing of inerters[C]//Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control. Seville, Spain. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 3351–3356.
- [11] PAPAGEORGIU C, HOUGHTON N E, SMITH M C. Experimentaltesting and analysis of inerter devices[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2009, 131(1): 011001.
- [12] WANG F C, HONG M F, LIN T C. Designing and testing a hydraulic inerter[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2011, 225(1): 66–72.
- [13] 刘良坤, 谭平, 闫维明, 等. 一种新型惯容减震器的设计及减震效果研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(15): 156–163, 170.
LIU Liangkun, TAN Ping, YAN Weiming, et al. Design of a novel inerter damper and its aseismic effect under earthquake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(15): 156–163, 170. (in Chinese)
- [14] 汪志昊, 程志鹏, 王浩, 等. 电涡流惯质阻尼器对斜拉索振动控制研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(12): 53–63, 115.
WANG Zhihao, CHENG Zhipeng, WANG Hao, et al. Eddy-current inertial mass damper for cable vibration control[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(12): 53–63, 115. (in Chinese)
- [15] 台玉吉, 黄智文, 严爱国, 等. 一种曲柄连杆式惯容器的力学性能与隔震性能研究[J]. 工程力学, 2024, 41(8): 36–46.
TAI Yuji, HUANG Zhiwen, YAN Aiguo, et al. Study on mechanical properties and seismic isolation performances of a crank train inerter[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(8): 36–46. (in Chinese)
- [16] CHEN M Z Q, HUY L, LI C Y, et al. Application of semi-active inerter in semi-active suspensions via force tracking[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2016, 138(4): 041014.
- [17] HU Y L, CHEN M Z Q, XU S Y, et al. Semiactive inerter and its application in adaptive tuned vibration absorbers[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(1): 294–300.
- [18] BRZESKI P, LAZAREK M, PERLIKOWSKI P. Experimental study of the novel tuned mass damper with inerter which enables changes of inertance[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 404: 47–57.
- [19] LAZAREK M, BRZESKI P, PERLIKOWSKI P. Design and identification of parameters of tuned mass damper with inerter which enables changes of inertance[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 119: 161–173.
- [20] LAZAREK M, BRZESKI P, PERLIKOWSKI P. Design and modeling of the CVT for adjustable inerter[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(14): 7611–7625.
- [21] FARAJ R, JANKOWSKI, GRACZYKOWSKI C, et al. Can the inerter be a successful shock-absorber? The case of a ball-screw inerter with a variable thread lead[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(14): 7855–7872.
- [22] HIRAMOTO K, YAMAZAKI I. Semi-active vibration control of structural systems with a variable inerter[J]. IFAC-PapersOnLine, 2022, 55(27): 230–235.
- [23] TAKINO M, ASAI T. Development and performance evaluation of an electromagnetic transducer with a tuned variable inerter[J]. Journal of Vibration and Control, 2023, 29(9/10): 2035–2048.
- [24] MAKRIS N, KAMPAS G. Seismic protection of structures with supplemental rotational inertia[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2016, 142(11): 04016089.
- [25] WANGM, SUN F F. Displacement reduction effect and simplified evaluation method for SDOF systems using a clutching inerter damper[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2018, 47(7): 1651–1672.
- [26] MÁLAGA-CHUQUITAYPE C, MENENDEZ-VICENTE C, THIERS-MOGGIA R. Experimental and numerical assessment of the seismic response of steel structures with clutched inerters[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 121: 200–211.
- [27] LI L Y, LIANG Q G. Seismic assessment and optimal design for structures with clutching inerter dampers[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2020, 146(4): 04020016.
- [28] LIANGQ G, LI L Y. Theoretical and experimental analyses of structures with supplemental clutching inertia devices[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2023, 52(3): 609–623.
- [29] FIRESTONE F A. A new analogy between mechanical and electrical systems[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1933, 4(3): 249–267.
- [30] ANTONIOU A. Floating negative-impedance converters[J]. IEEE Transactions on Circuit Theory, 1972, 19(2): 209–212.