

动力荷载作用下压电 主元杆件的动力稳定控制性能研究

田鹏刚^{1,2}, 王社良², 高宗祺¹, 陆建勇¹

(1. 陕西省建筑科学研究院, 陕西 西安 710082; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 压电材料是一种良好的功能性材料, 具有独特的压电效应, 其中包括正、逆压电效应两类. 本文根据压电材料的正、逆效应设计并制作了能够实现测—控合一的压电主元杆件, 即在结构中起主要作用的杆件上集成压电堆, 以形成所谓的压电主元杆件. 本文根据稳定及动力学等原理, 建立了压电主元杆件的动力稳定控制基本方程, 采用数值模拟方法探讨了动荷载作用下压电主元杆件的动力稳定控制性能. 研究结果表明考虑机电耦合作用时, 压电堆长度和压电堆夹持力等因素的共同影响, 使得压电主元杆件动力失稳区域面积减小, 相应的动力稳定控制性能提高. 这说明适当提高激励电压, 即可有效地提高压电主元杆件的动力稳定控制性能.

关键词: 压电主元杆件; 动力稳定; 智能控制

中图分类号: TU311.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)02-0187-05

空间杆系钢结构具有结构形式新颖、建筑造型优雅和跨越能力强大等特点, 在国内外的研究与应用已日趋广泛, 并且得到了迅猛发展^[1-2]. 这类结构具有缺陷敏感结构的特征, 频率分布比较密集, 振型影响数目较多, 受力、变形、构造、失效机理和性能评价理论等也均较复杂, 加之在其服役期内要受到设计荷载、施工质量、环境与人为等多种因素的作用和影响, 结构的材性将发生变化, 同时也不可避免地产生一些累积损伤, 使得其抗灾可靠性不断降低, 有可能发生突然坍塌, 特别是难以承受强地震等动力灾害的作用^[3].

本文根据压电材料的正、逆压电效应, 设计并制作出用于智能稳定控制的压电主元杆件, 同时对压电主元杆件的动力稳定性能进行了研究, 探讨了利用该种构件进行空间杆系钢结构动力稳定控制的适用性和有效性.

1 压电主元杆件的工作原理

1.1 压电材料的本构关系

压电材料具有正逆压电效应, 即压电材料电学量和力学量是相互耦合的, 这种机电耦合关系可用压电方程表述为:

$$\{\sigma\} = [C] \{\epsilon\} - [e]^T \{E\} \quad (1)$$

$$\{D\} = [e] \{\epsilon\} + [\epsilon] \{E\} \quad (2)$$

式中: $\{\sigma\}$ 和 $\{\epsilon\}$ 分别为应力和应变矢量; $[C]$ 为弹性常数矩阵; $[e]$ 为压电应力常数矩阵; $[\epsilon]$ 为介电常数矩阵; $\{D\}$ 、 $\{E\}$ 分别是压电体的电位移和电场强度向量.

从式(1)和式(2)可以看出, 式(1)右边第一项 $[C] \{\epsilon\}$ 与普通材料的本构关系相同, 即服从虎克定律, 而第二项 $[e]^T \{E\}$ 则反映了正压电效应的存在, 表示电场强度对应力的负贡献作用; 式(2)第一项 $[e] \{\epsilon\}$ 反映了逆压电效应的存在, 表明了应变对电位移的贡献, 第二项 $[\epsilon] \{E\}$ 则与普通材料一样, 反映了电工学的基本关系. 上述本构关系很好地体现了压电材料的机电多场耦合关系.

收稿日期: 2010-01-14 修改稿日期: 2011-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10972168); 陕建科 2009 博-001 专项资助

作者简介: 田鹏刚(1978-), 男, 陕西永寿人, 博士, 高级工程师, 主要研究结构健康监测与工程事故处理.

1.2 压电主元件的设计

对于一般的压电材料,其压电应变系数 e_{33} 都很小,约为 $(300-700) \times 10^{-12} \text{ m/V}$. 根据文献[4]的结果,即使施加 1 000 V 电压,其变形量也只有 0.3—0.7 μm . 而在工程应用时,实用压电驱动元件既要有一定的位移输出量,又要能承受一定的载荷,特别是在低频范围工作时,足够的输出位移量更是非常必要的. 因此,对单个压电体而言,无论怎样选取其几何形状,在一定的驱动电压下都很难满足工程要求. 虽然通过增加驱动电压可以增大其输出位移,但驱动电压要受到压电材料工作上限电压的限制,而且要获得很大的驱动电压,对于前置放大器的性能要求也很高,这些都将限制其应用范围. 但若在给定的电压下,采用多片压电片在力学上串联、电学上并联的思想集成压电堆^[4-6],使各个压电片在同一驱动电压 V 的作用下,各自的输出位移量可以进行线性叠加,其结构原理如图 1 所示.

设压电堆由 n 个几何、物理参数相同的压电片组成,各个压电片间布置了导电片以便给各压电片施加驱动电压,则在理想情况下,各个压电片两端的电压均为 V . 这样,对于每一个压电片,其输出位移 δ 在幅值和相位上是相同的,压电堆的总位移为各片输出位移量的线性叠加,即

$$\delta = n \delta = n \left[\frac{F}{k_i} + e_{33} V \right] = \frac{F}{k_s} + d_s V \tag{3}$$

$k_s = \frac{k_i}{n}$, $d_s = ne_{33}$, 分别表示压电堆的等效力学刚度和等效压电系数; k_i 压电材料的轴向刚度.

从电学上讲,上述线性叠加关系对电荷量 Q 同样存在,即

$$Q = nQ_i = n(e_{33}F + C_iV) = d_sF + C_sV \tag{4}$$

式中: $C_s = nC_i$, C 是压电材料的等效电容.

当压电材料仅在图示 3 轴方向(如图 1 所示),即极化方向施加外力 F 和外电压 V 时,并且假设该方向的应变沿厚度 t 是均匀分布的,则压电材料产生的变形量 δ 和其横截面 A 上的面电荷 Q 可由式(3)和式(4)得到

$$\left. \begin{aligned} \delta &= \frac{F}{k} + e_{33} \varphi \\ Q &= e_{33}F + C\varphi \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式中: $k = \frac{C_{33}^E A}{t}$, C_{33}^E 是压电材料的弹性模量; $C = \frac{\varepsilon_{33}^T A}{t}$ 是压电材料的轴向等效刚度; ε_{33}^T 是压电材料的介电常数; e_{33} 是压电材料的压电系数; $\varphi = E_3 t$ 是压电材料沿 3 轴方向上下表面间的内电势差; E_3 是压电材料的电场强度.

在忽略压电材料自感应电场影响的条件下,存在 $V = \varphi_0$. 在零应力 ($F = 0$) 和零位移 ($\delta = 0$) 状态下,由式(5)可得到压电材料的输出位移和夹持力,即输出力分别为

$$\left. \begin{aligned} \delta_0 &= e_{33} V \\ F_0 &= ke_{33} V \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

从上式可以看出,压电材料的输出位移 δ_0 及输出力 F_0 与外加电压 V 存在着线性关系,比例系数分别为 e_{33} 和 ke_{33} ,而且 δ_0 与压电材料的厚度 t 无关. 因此,根据式(6)所示的关系,即可研制开发文中的压电主元件.

在实际工程应用时,为了便于与主体结构连接并节约工程造价,可以根据结构稳定监测与控制的要求,在普通杆件的适当部位设置若干压电堆,如在变形最大处设置等,以形成压电主元件,如图 2

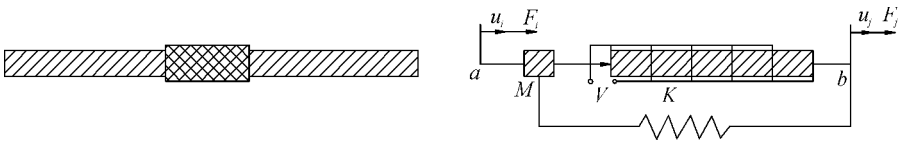


图 2 压电主元件构造及计算模型示意图

所示. 然后, 将压电主元杆件集成于结构受力或变形的关键部位. 这样, 利用其传感性能即可实现对结构服役状态信号的采集, 并根据一定的阈值判别来实现结构的稳定监测. 当然, 也可根据稳定控制的需要, 采用相应的控制律给压电主元杆件施加激励电压, 并利用其驱动性能促使压电主元杆件产生驱动力或变形, 从而给结构施加一定的驱动, 以此来提高结构的失稳临界荷载, 进而实现空间结构的智能稳定控制.

2 考虑耦合时压电主元杆件动力稳定控制基本方程

考虑机电耦合作用时, 由于逆压电效应, 使得压电主元杆件在受到电场作用后压电堆部分将产生驱动力 $P_2(t)$, 这时若杆件两端受有 $P_1(t)$ 作用, 则中间部分将会受到 $P_1(t) \pm P_2(t)$, 如图 3 所示. 由图 3 可得^[1, 6]

$$\left. \begin{aligned} E_1 I_1 \frac{\partial^4 V_1}{\partial x_1^4} + P_1 \frac{\partial^2 V_1}{\partial x_1^2} + m_1 \frac{\partial^2 V_1}{\partial t^2} &= 0 \\ E_2 I_2 \frac{\partial^4 V_2}{\partial x_2^4} + P_1 \frac{\partial^2 V_2}{\partial x_2^2} \mp P_2 \frac{\partial^2 (V_D - V_2)}{\partial x_2^2} + m_2 \frac{\partial^2 V_2}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: m_1, m_2 分别表示杆件两端和中间压电堆部分单位长度的质量; $E_1 I_1, E_2 I_2$ 分别表示杆件两端和中间压电堆部分的抗弯刚度; $V_1(x, t), V_2(x, t)$ 分别表示杆件对应部分的侧向挠度; V_D 表示杆件在 D 处的挠度值. 根据边界条件令

$$\left. \begin{aligned} V_1(x, t) &= f(t) \sin \frac{m\pi x}{l}, \quad -l_1 - l_2 \leq x \leq l_1, \quad l_2 \leq x \leq l_1 + l_2 \\ V_2(x, t) &= f(t) \sin \frac{m\pi x}{l}, \quad -l_2 \leq x \leq l_1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

整理可得

$$\left\{ \begin{aligned} \left[(E_1 I_1 \frac{\pi^4}{l^4} - P_1 \cdot \frac{\pi^2}{l^2}) f(t) + m_1 \frac{d^2 f}{dt^2} \right] \sin \frac{\pi x}{l} &= 0 \\ \left[(E_2 I_2 \frac{\pi^4}{l^4} - (P_1 \pm P_2) \cdot \frac{\pi^2}{l^2}) f(t) + m_2 \frac{d^2 f}{dt^2} \right] \sin \frac{\pi x}{l} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

欲使式(9)满足式(7), 则必有 $\sin \frac{\pi x}{l} \neq 0$. 令 $\omega_1^2 = \frac{E_1 I_1 \pi^4}{m_1 l^4}, \omega_2^2 = \frac{E_2 I_2 \pi^4}{m_2 l^4}$

代入式(9)并整理后可得

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d^2 f}{dt^2} + \omega_1^2 (1 - \frac{P_1}{P_E}) f(t) &= 0 \\ \frac{d^2 f}{dt^2} + \omega_2^2 \left[1 - \frac{(P_1 \pm P_2)}{P_E} \right] f(t) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

上式即考虑机电耦合时, 压电主元杆件在任意动力荷载作用下的稳定方程.

3 压电主元杆件动力稳定控制性能研究

地震作用是结构设计基准期内的常见的主要动力作用, 由于地震作用随机性很强, 频谱成分复杂, 直接对地震作用进行计算分析, 很难定量的给出规律性的结果. 但根据地震动的谱分析可以知道, 地震作用可以用不同频率和振幅的简谐荷载的组合来近似定量的表达, 因此, 研究单一频率的简谐荷载作用下结构的动力响应情况, 具有基本的理论意义. 本文以图 3 所示的简谐荷载作为输入进行研究. 研究时根据上述理论, 利用自编的 Matlab 程序对一设置压电堆的主元杆件动力稳定性能进行数值模拟. 压电主元杆件两端为普通铝合金材料, 杆件总长为 $l = 300 \text{ mm}$, 中间部分为 PZT 压电堆, 其长度为一变量. 铝合金的弹性模量 $E_1 = 7.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, 压电堆的弹性模量 $E_2 = 7.65 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, 并且铝合金部分截面惯性矩与压电堆部分截面惯性矩相等, 即 $I_1 = I_2$. m_1, m_2 分别为铝合金单位长度质量和压电堆单位长度质量. 分析时分别取压电堆的长度 $l_2 = 0.0, l_2 = 0.05l \cdots l_2 = 0.45l$ 和 $l_2 = 0.50l$ 及 $K = P_2(t)/(P_0 + P_t \cos \theta t) = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ 和 1.0 , 其中 P_0 为某一初始恒值. 则第一不稳定区域时的近似的频率: $\theta_{i,2}^* = 2\Omega_{\kappa} \sqrt{1 \pm \mu_{\kappa}^*} \quad (i = 1, 2)$.

分别绘制 $\theta^* - P_t$ 曲线, 其中横轴为 P_t , 纵轴为 $\theta_{i,2}^*$, 部分第一动力不稳定区域的计算曲线见图 4~图 8.

从图 4~图 8 可以看出, 考虑机电耦合作用时, 随着压电堆长度和压电堆夹持力的增大, 压电主元杆件的动力失稳临界频率变化不大, 其变化幅度大约为 1% 左右, 这反映了压电堆长度和夹持力以及外

部激励特性等因素的共同影响;但当给定压电堆的长度时,则随着压电堆夹持力的增加,压电主元件件的动力失稳区域面积显著减小,其减小幅度最大可达 20%左右;此外,在给定压电堆夹持力时,压电堆长度的变化对其动力失稳区域面积影响较小,即随着压电堆长度的增加,其失稳区域面积有所减小,减小幅度约为 2%。

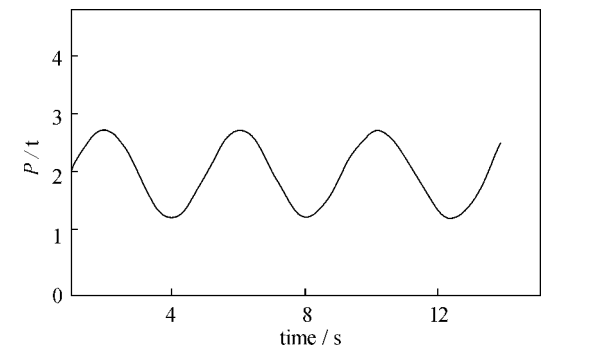


图 3 荷载 P -时间 t 关系曲线
Fig. 3 Relation curves of load (p) and time (t)

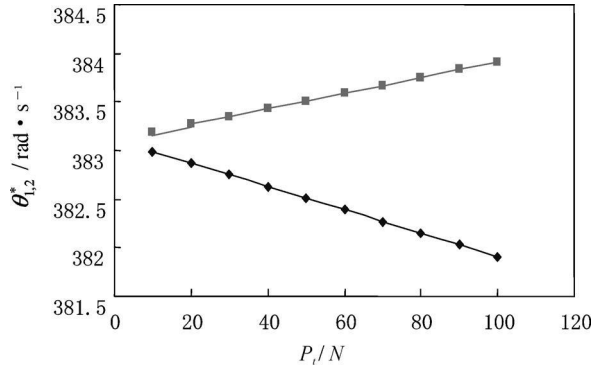


图 4 $l_2=0.2l, K=0.1$ 压电主元件件
第一动力不稳定区域

Fig. 4 First instability area with $l_2=0.2l, K=0.1$

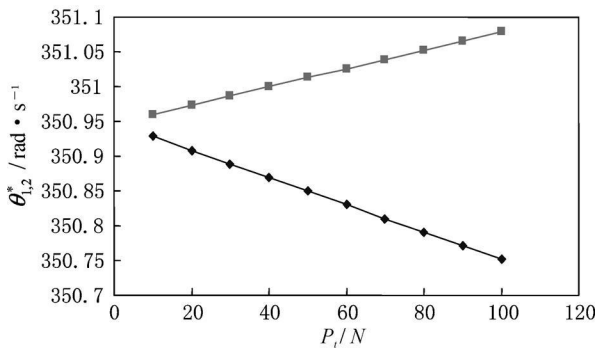


图 5 $l_2=0.3l, K=0.1$ 压电主元件件
第一动力不稳定区域

Fig. 5 First instability area with $l_2=0.3l, K=0.1$

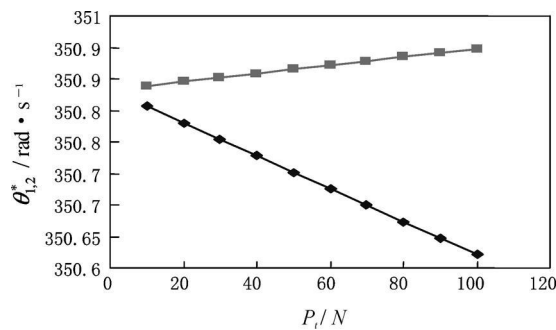


图 6 $l_2=0.3l, K=0.3$ 压电主元件件
第一动力不稳定区域

Fig. 6 First instability area with $l_2=0.3l, K=0.3$

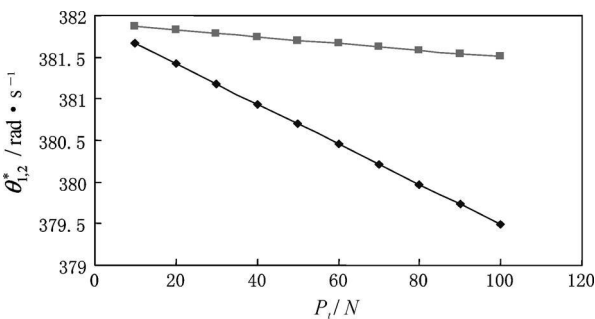


图 7 $l_2=0.2l, K=0.7$ 压电主元件件
第一动力不稳定区域

Fig. 7 First instability area with $l_2=0.2l, K=0.7$

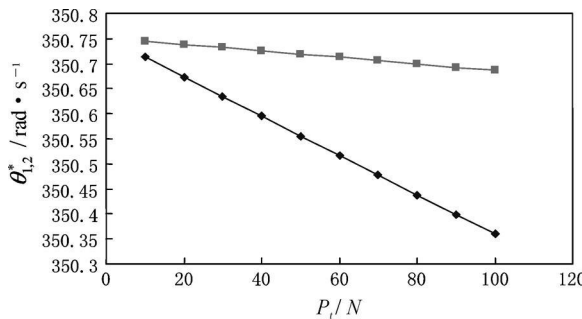


图 8 $l_2=0.3l, K=0.7$ 压电主元件件
第一动力不稳定区域

Fig. 8 First instability area with $l_2=0.3l, K=0.7$

4 结 论

(1)考虑机电耦合作用时,压电主元件件的动力失稳临界频率受压电堆长度和压电堆夹持力以及外部激励特性等因素的共同影响,比较复杂.经过分析,当外部激励给定时,由于压电堆长度和压电堆夹持

力的耦合作用, 使得其对压电主元杆件动力失稳临界频率的影响较小, 导致其值变化不大. 也就是说, 随着压电堆长度和压电堆夹持力的增大, 压电主元杆件的动力失稳临界频率基本不变.

(2) 考虑机电耦合作用时, 压电堆长度和压电堆夹持力等因素的共同影响, 使得压电主元杆件动力失稳区域面积减小, 相应的动力稳定控制性能提高. 同时, 当给定压电堆的夹持力时, 压电堆长度的变化对其动力失稳区域面积变化的影响较小. 但当给定压电堆的长度时, 则随着压电堆夹持力的增加, 压电主元杆件的动力失稳区域面积显著减小, 这说明适当提高激励电压, 即可有效地提高压电主元杆件的动力稳定控制性能.

参考文献 References

- [1] 鲍罗金, 符·华. 弹性体系的动力稳定性[M]. 林砚田, 等译. 北京: 高等教育出版社, 1960.
BOLTIN V. Dynamic stability of elasticity system[M]. LIN Y T, Translated. Beijing: Higher Education Press, 1960.
- [2] 刘光栋, 罗汉泉. 杆系结构稳定[M]. 北京: 人民交通出版社, 1988.
LIU G D, LUO H Q. Stability of skeleton structure[M]. Beijing: China Press, 1988.
- [3] 田鹏刚. 空间结构智能稳定控制的基本理论和试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
TIAN P G. Experiment and Basic Theoretical Study of Stability Control on Space Structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2007.
- [4] DONNELL L. A new theory for the buckling of thin cylinders under axial compression and bending[J]. Trans Am Soc Mech Engs, 1934, 56: 795-806.
- [5] KOITER W T. On the Stability of Elastic Equilibrium[D] (in Dutch). Delft, Amsterdam, 1945, English transformation issued as NASA TTF10, 1967: 833-842.
- [6] TIMOSHENKO S., Einige stabilitätsprobleme der elastizitätstheorie[J]. Z. Math. Physik, 1910, 58(2): 337-385.
- [7] 王社良, 沈亚鹏. 地震作用下建筑结构的主动控制分析方法[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 1998, 30(3): 217-220.
WANG S L, SHEN Y P. Active control algorithm for buildings under seismic load[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 1998, 30(3): 217-220.

Study on the dynamic stability of piezoelectric pivot element bar under dynamical load

TIAN Peng-gang^{1,2}, WANG She-liang², GAO Zong-qi¹, LU Jian-yong¹

(1. Shaanxi Institute of Architecture Science, Xi'an 710082, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract The piezoelectric material is a good kind of functional material which provides with a unique piezoelectric effect including piezoelectric effect and converse piezoelectric effect. In view of the excellent piezoelectric effect and converse piezoelectric effect, this paper designs and fabricates piezoelectric pivot element bars which can accomplish testing-controlling functions, integrating piezoelectric stack into the element bars playing a major role to form a so-called piezoelectric pivot element bar. According to theory of structural stable science and structural dynamics, basic dynamical stability control function was put forward and the control properties were discussed with numerical simulation method. The research results show that with regard to the coupling between mechanic-electric of piezoelectric, the dynamical instability area decreases for the effect of length of piezoelectric stack and driving force, so that the stability property of piezoelectric pivot element bar increases effectively. That is to say, the methods that is used to increase the exciting voltage appropriately can improve the dynamical performance of piezoelectric pivot element bar greatly.

Key words: piezoelectric pivot element bar; dynamic stability; intelligent control