

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.10.007

# 航空管路块卡离散化模型分析及 其对管系振动特性的影响研究\*

王鸿鑫<sup>1</sup>, 权凌霄<sup>2\*</sup>

(1. 上海飞机设计研究院, 上海 200126; 2. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**针对航空液压管路在高速高压化发展趋势下谐振失稳现象日益严重的问题,对航空液压管路支撑参数变化引起的管路振动固有特性改变进行了研究。针对多支撑航空液压管系中常见的P卡及块卡等支撑元件,将其对管路的约束作用进行了离散,建立了管路支撑的离散化模型,进一步在ANSYS软件平台中搭建了一段航空液压管系的有限元模型,分别改变支撑数量、支撑位置、支撑刚度和预紧力,分析了参数变化对管系振动特性的影响,得到了支撑参数对管系振动特性的作用规律。研究表明,支撑参数对管路振动固有特性的影响具有一定规律,通过改变支撑参数从而避免管路谐振失稳的方法是可行、有效的。

**关键词:**大飞机;多支撑航空液压管路;支撑元件;振动特性分析

中图分类号:TH113.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)10-1193-05

## Analysis of the discrete model of the aerial pipeline block and its influence on the vibration characteristics of the pipe system

WANG Hong-xin<sup>1</sup>, QUAN Ling-xiao<sup>2</sup>

(1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China;

2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Aiming at the increasingly serious problem of the resonance instability in the development trend of high speed and high pressure of the aviation hydraulic pipeline, studies on the inherent characteristics of pipeline vibration caused by the change of the support parameters of the aviation hydraulic pipeline were carried out. The constraint function of the supporting element which was common in the multi support aviation hydraulic pipe system was discretized. The discrete model of pipeline support was established, and further the finite element model of the hydraulic pipe line was founded in the ANSYS software platform. The number of support, support position, support stiffness and preload were changed, to analyze the impact on the vibration characteristics of the pipe system with the parameters changed, the effect of support parameters on the vibration characteristics of the pipe system. In addition, the effect of the support parameters on the vibration characteristics of the pipe system was obtained. The research results show that the influence of support parameters on the inherent characteristics of the pipeline vibration has a certain rule, and it is feasible and effective to avoid the resonance instability by changing the parameters of the support parameters.

**Key words:** big airplanes; multi support aviation hydraulic pipeline; supporting element; vibration characteristic analysis

## 0 引言

据民航总局统计,飞机液压管路失效占飞机元件

类故障的52%,谐振失稳是飞机液压管路振动故障产生的主要原因。随着航空液压系统不断向高速高压化发展,管路振动影响日益突出。因此,有必要在管路的

收稿日期:2016-05-03

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2014CB046405);国家自然科学基金面上项目(51375423);国家自然科学基金项目(51505410)

作者简介:王鸿鑫(1979-),男,上海人,高级工程师,主要从事民用飞机液压系统集成设计与验证研究工作。E-mail: WangHongxin@comac.cc

通信联系人:权凌霄,男,博士,副教授。E-mail: lingxiao@ysu.edu.cn

基础激励和压力脉动的作用下对管系振动进行有效的控制。振动控制可分为主动控制、被动控制及半主动控制。被动振动控制的优点是结构简单、成本低、便于维护及不需要外接能源,能够更好地适应航空液压管路安装空间有限的特点,因此,成为航空液压管路振动控制的主要方法。在航空液压管路安装 P 卡及块卡等支撑元件,将管路与机体连接的同时,能够起到减振的作用。一般来说,管路支撑元件具有一定的弹性和阻尼特性,另外,在一定空间的航空管路上,支撑元件的安装数量、位置及预紧力等,均会对管系振动特性产生影响。合理设计这些参数,能够避开激振源共振频率,从而实现航空液压管路振动被动控制。

在国外,英国巴斯大学 A H M Kwong 和 K A Edge<sup>[1]</sup>采用传递矩阵法对液压管路的动态响应进行预测,并对管路管夹的位置进行了优化设计;德国斯图加特大学的 Herrmann 等<sup>[2]</sup>以降低某固定点的振动力和位移为目标,采用有限元仿真结合实验测试的方法通过优化支撑的布局来抑制管路振动噪声;意大利罗马大学的 Maria Laura De Bellis 等人<sup>[3]</sup>研究了一端固支,中部弹支的外伸输液管路的稳定性,给出了临界流速与支撑刚度的关系。

在我国,北京航空航天大学焦宗夏、王少萍<sup>[4,5]</sup>研究了飞机液压能源管路系统振动特性及控制;李鑫等<sup>[6]</sup>基于系统特征阻抗,利用粒子群优化算法在限定范围内优化卡箍位置,使在激振源频率点的特征阻抗加权和降到最低,从而达到充液管道振动衰减的目的。空军工程大学何宇廷等利用简化模型分析了飞机压力加油管系的固有特性,计算了管路支撑位置与系统固有频率的对应关系,并结合液压泵的转动频率确定了管系发生共振的频率范围,给出了管夹间距的安全范围。徐州工程学院智友海及史向平等<sup>[7]</sup>利用有限元方法分析直管频率响应,以管系质量最轻为目标,对管路管径及弹性支撑刚度进行优化分析,提出了防止管系共振的方法。

目前,我国民用大飞机液压管系设计主要参考美国伊顿及帕克等公司的标准,一定程度上影响了国产大飞机事业的发展。上述研究多采用集中参数法建立支撑元件模型,对揭示航空液压管系振动具有重要作用,但是,如果进一步考虑支撑与管路之间的相互作用,这种建模方法还可进行深入研究。

本研究采用分布参数建模方法建立块卡支撑的离散模型,研究支撑参数对管系振动特性的影响。取得的研究成果为航空液压管系动力学设计提供理论基础。

# 1 航空液压管路块卡离散模型

块卡是一种常见的航空液压管路支撑元件,块卡结构图如图 1 所示。

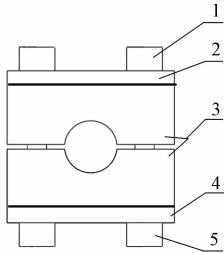


图 1 航空块卡结构

1—螺栓;2—盖板;3—管夹体;4—底板;5—螺母

一般的块卡都是由螺栓、盖板、管夹体、底板、螺母等零件构成。一种常见的航空块卡各零件材料参数如表 1 所示。

表 1 管夹材料参数

|       | 密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 杨氏模量 $E/\text{Pa}$    | 泊松比 $\mu$ |
|-------|-------------------------------------------|-----------------------|-----------|
| 管夹体   | $0.91 \times 10^3$                        | $1.5 \times 10^9$     | 0.42      |
| 盖板、底板 | $7.93 \times 10^3$                        | $2.04 \times 10^{11}$ | 0.285     |
| 螺栓、螺母 | $7.83 \times 10^3$                        | $2.1 \times 10^{11}$  | 0.274     |

安装了多个块卡的一根长直航空液压管系示意图如图 2 所示。

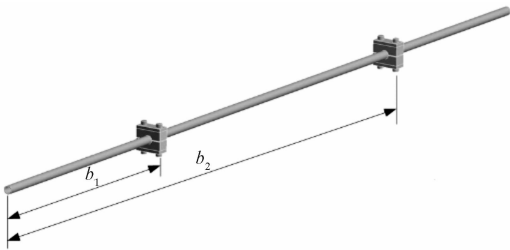


图 2 多支撑的直航空液压管系示意图

对于这种具有多支撑的长直航空液压管系,根据管路设计安装标准,当管路压力、外径等参数不同时,块卡的各项参数会有所不同。本研究以图 2 带有多个块卡的长直航空液压管系为研究对象。

图 2 中,管路长度  $L$  取  $2.136 \text{ m}$ ;管路外径  $D$  取  $0.22 \text{ mm}$ ;管路壁厚  $e$  取  $0.02 \text{ mm}$ ;管材密度  $\rho$  取  $7.93 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;管材杨氏模量  $E$  取  $2.04 \times 10^{11}$ ;管材泊松比  $\mu$  取  $0.285$ 。

传统航空液压管路力学分析大都采用集中参数法建立管路支撑模型,并将约束形式分为轴向固支和轴向自由两类,很好地满足了机舱、机翼以及平尾等部位的液压管路力学分析的要求。但是由于管路支撑的扭转刚度是由平移刚度产生的,存在着支撑与管路之间的相互耦合作用。比如航空发动机吊挂、起落架等部

位的液压管系会承受更为复杂的力学工况,这种作用则会更加明显,因此,进行力学分析时,需要对支撑模型进一步优化。

考虑块卡宽度因素的影响,本研究建立的块卡离散化模型如图 3 所示。

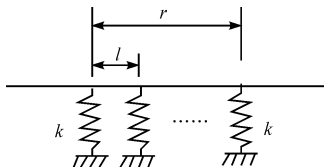


图 3 块卡支撑离散化模型

沿块卡轴向以微元长度  $\Delta l$  为单元,可以将宽度为  $r$  的块卡沿轴向等效离散为个弹簧,弹簧刚度为  $k$ 。

为便于研究,本研究在软件中将图 2 的长直航空液压管系简化成动力学模型(如图 4 所示),然后采用上述的块卡离散化动力学模型分析块卡参数变化对管系固有特性的影响。

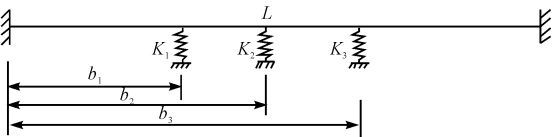


图 4 长直管系动力学模型

## 2 块卡数量与位置对管系振动特性的影响

改变块卡数量从 0 个逐一增加到 6 个,所有块卡平均分布,得到管系前 5 阶固有频率如图 5 所示。

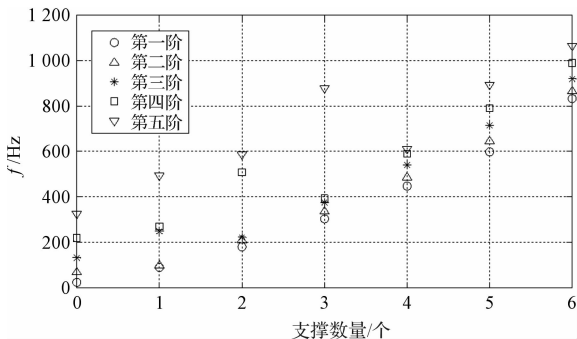


图 5 不同块卡数量对应的前 5 阶固有频率

可以看出,随着块卡数量增加,前 5 阶固有频率总体呈增加趋势,但是存在一定的非线性特性。其中,第 3 阶固有频率在块卡数量为 1 时比块卡数量为 2 时大;第 4 阶固有频率在块卡数量为 2 时比块卡数量为 3 时大;第 5 阶固有频率在块卡数量为 3 时比块卡数量为 4 和 5 时大。

下面分析管系中有 2 个块卡时,块卡位置对管系

振动特性的影响。由于管系两端固支,根据对称性原理,两个管夹的最佳支撑位置一定对称,即图 2 中,  $b_2 = L - b_1$ ,其中: $L$ —管路总长。

$b_1$  不同时,管系的前 5 阶固有频率如图 6 所示。

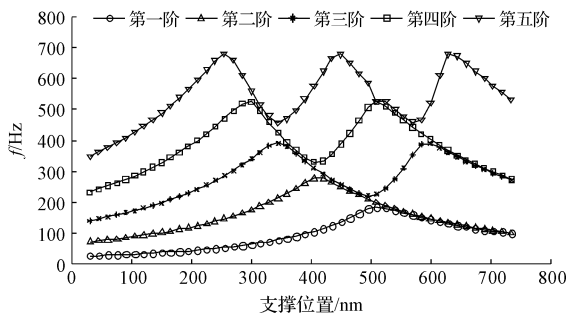


图 6 双支撑时不同块卡位置对应的前 5 阶固有频率

可以看出,当  $b_1$  取 0.345 m 时,第 3 阶固有频率为 446.51 Hz,达到最大,且远大于图 4 中块卡数量为 1 时的第 3 阶固有频率。可见,合理设置块卡位置,会得到比增加块卡数量更好的控制效果。

下面研究管系中只有 1 个块卡时,块卡位置变化对管系振动特性的影响。块卡位置不同时的管系固有频率如图 7 所示。

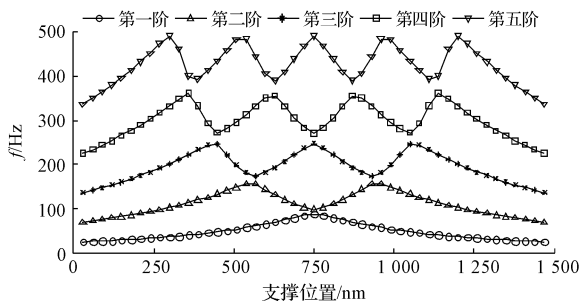


图 7 单支撑时不同块卡位置对应的前 5 阶固有频率

对比图 4、图 5 和图 6 可以发现,随着块卡数量增加,前 5 阶固有频率总体呈增加趋势,若以基频最大化为目标优化管系块卡布局,管系中应该有 3 个块卡,并分别位于距离管路左端 0.51 m、0.75 m 与 0.99 m 处。当块卡数量由 1 个增加到 2 个时,基频最大可增加 95.89 Hz,增幅为 52.02%。而块卡位置对基频的改变最大影响分别为 158.83 Hz 和 63.24 Hz,增幅分别为 86.17% 和 71.5%。可见块卡位置对管系的振动特性影响更为明显。

## 3 块卡支撑刚度对管系振动特性的影响

当液压管路穿过机体过框,可以认为该点为固支约束。当管系一端为固支,一端为弹支,管系中没有其

他支撑元件时,随着块卡支撑刚度增加,固有频率随之增大,当支承刚度达到某一数值时,该点可以认为是固支。下面研究当管系两端均为固支,块卡数量为 1,而且位于管系中点时,支撑刚度对管系振动特性的影响规律。分析得到的管系前 4 阶固有频率如图 8、图 9 所示。

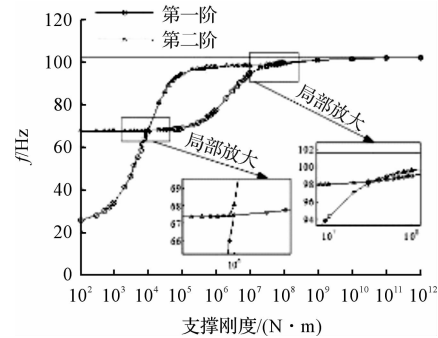


图 8 不同块卡刚度对应的前两阶固有频率

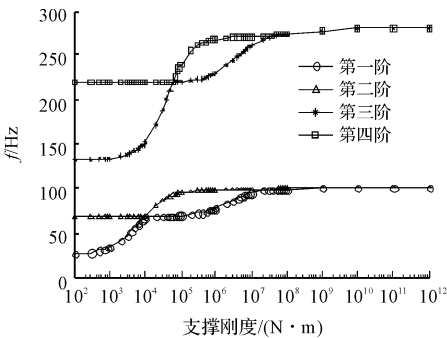


图 9 不同块卡刚度对应的前 4 阶固有频率

可以看出,在一定范围内,块卡刚度与管系固有频率成正比,但当刚度增大到一定值时,固有频率变化率逐渐减小,并最终趋于固支状态。当支撑刚度在  $1 \times 10^4$  N/m 和  $4 \times 10^7$  N/m 两点时,第 1、第 2 阶固有频率变化率变化明显;当支撑刚度在  $6 \times 10^4$  N/m 和  $5 \times 10^7$  N/m 时,第 3 和第 4 阶固有频率变化率也有明显变化,对比后文中第 3、4 阶振型可以看出,这是由于管路系统的振型发生了变化。

当支承刚度小于上述两个支承刚度的第一个值时,可以认为管路为自由约束;而当支承刚度处于这两个值之间时,管路为弹支约束;而支承刚度大于第二个值时,可以认为管路为固支约束。下面本研究结合图 7 和图 8 得到的结论,进一步分析管系处于自由、弹支和固支时的模态振型。

支撑刚度分别取  $1 \times 10^3$  N/m、 $1 \times 10^5$  N/m 和  $1 \times 10^8$  N/m 时,管系的前 4 阶模态振型如图(10~12)所示。

可以看出,管路的第 1 阶和第 3 阶振型均在  $xy$  平面内,而第 2 阶和第 4 阶振型均在  $xz$  平面内;随着块卡支撑刚度增大,各振型的振动幅度减小,但是振动频

率会增大。

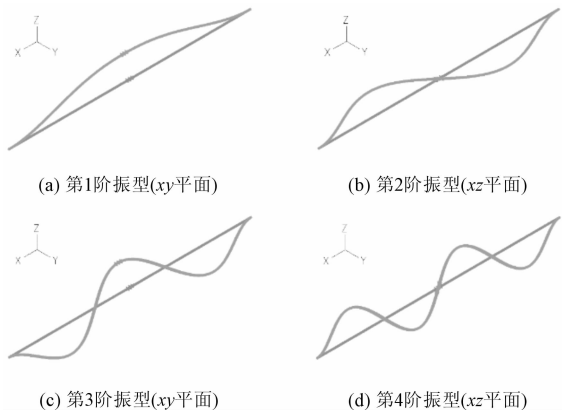


图 10 块卡支撑刚度值为  $10^3$  N/m 时管系模态振型图

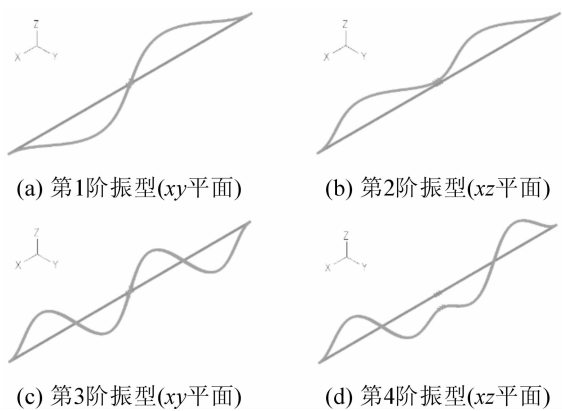


图 11 块卡支撑刚度值为  $10^5$  N/m 时管系模态振型图

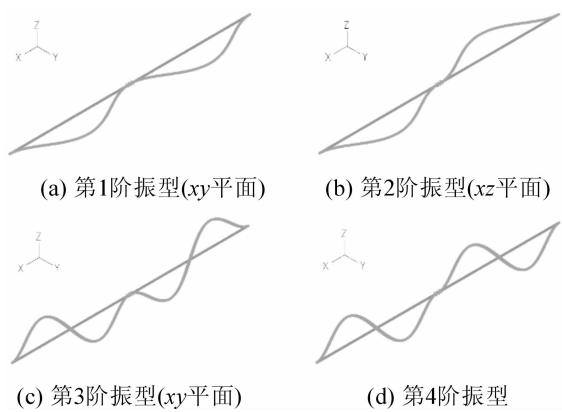


图 12 块卡支撑刚度值为  $10^8$  N/m 时管系模态振型图

## 4 块卡预紧力对管系振动特性的影响

块卡预紧力会影响支撑刚度和阻尼,二者之间存在着非线性关系。下面本研究仍以前边的管系为对象,分析块卡预紧力对管系固有振动特性的影响。

管夹预紧力的取值范围应根据连接的工作要求和螺栓组的受力大小决定。在设计时,既要保证管夹能发挥支撑作用所需的预紧力,又不能超出螺栓组的最大承受负荷。一般连接用钢制螺栓预紧力应力小于材

料屈服点的 80%<sup>[8-9]</sup>,即:

$$F_0 \leq 0.8\sigma_s A_s \quad (1)$$

式中: $F_0$ —块卡预紧力,N; $\sigma_s$ —螺栓材料的屈服极限,MPa; $A_s$ —螺栓应力截面,mm<sup>2</sup>。

$$A_s = \frac{\pi}{4} \left( d_1 - \frac{H}{6} + d_2 \right)^2 \quad (2)$$

式中: $d_1$ —螺栓小径,mm; $d_2$ —螺栓中径,mm; $H$ —螺纹牙高度,mm。

本研究选用的航空块卡连接螺栓材料屈服极限为 235 MPa,公称直径为 0.06 m,应力截面积为  $0.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ,经计算得到的最大预紧力为  $3.78 \times 10^3 \text{ N}$ 。

块卡预紧力连续变化时,管系的第 1 阶固有频率如图 13 所示<sup>[10-12]</sup>。

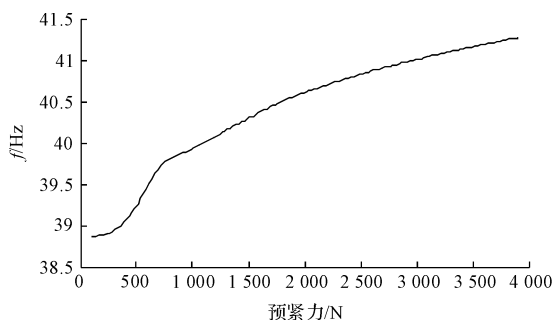


图 13 不同块卡预紧力对应的第 1 阶固有频率

可以看出,当块卡的预紧力从  $0.1 \times 10^3 \text{ N}$  增加到  $3.9 \times 10^3 \text{ N}$ ,系统第 1 阶固有频率增加了 2.39 Hz,增幅为 5.8%。显然,管路支撑的预紧力对管路振动特性有明显的影响,随着预紧力增加,管系固有频率随之增大。

## 5 结束语

本研究针对国产大飞机液压管系中管路支撑被动振动控制进行研究,采用分布参数法建立块卡的离散化动力学模型,在此基础上,得到了液压管系的支撑参数对管系振动特性的影响规律如下:

(1)管系的支撑数量、支撑位置和支撑刚度对其振动特性的影响相对较大,而管夹预紧力对管系的振动特性影响相对较小,其中支撑数量对系统的影响最大;当支撑数量改变时,需要重新优化支撑位置等参数;

(2)支撑刚度对管系的各阶固有频率的影响规律

不尽相同且频率拐点不同,在某些情况下,各阶固有频率的随支撑刚度的变化存在突变现象,当确定支撑刚度时需特别注意管系的前几阶固有频率和模态振型的突变点或拐点;

(3)随着管路支撑刚度的增加,管系各阶固有频率随之增加,当刚度值大于 108 N/m 时,管路支撑基本接近于固支状态;

(4)管夹预紧力对管系的振动特性也会产生影响,管系固有振动频率会随着预紧力增大而增大。

## 参考文献 (References):

- [1] KWONG A H M, EDGE K A. A method to reduce noise in hydraulic systems by optimizing pipe clamp locations [J]. *Journal of Systems and Control Engineering*, 1998(212): 267-279.
- [2] HERRMANN J, HAAG T, ENGELKE S, et al. Experimental and numerical investigation of the dynamics in spatial fluid-filled piping systems [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, 123(5): 3299-3304.
- [3] BELLIS M L D., RUTA G C. ELISHAKOFF J. A contribution to the stability of an overhanging pipe conveying fluid [J]. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2014, 27(1): 1-17.
- [4] 焦宗夏. 飞机液压能源管路系统的振动特性分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 1997, 23(3): 316-321.
- [5] 焦宗夏, 陈平. 液压能源管路系统振动主动控制的理论研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(4): 465-469.
- [6] 李鑫, 王少萍. 基于卡箍优化布局的飞机液压管路减振分析 [J]. 振动与冲击, 2011, 32(1): 14-20.
- [7] 智友海, 史向平. 飞机管路系统卡箍位置的可靠性优化设计 [J]. 飞机设计, 2010, 30(6): 75-80.
- [8] 杜平. 船用液压管路系统的振动特性分析 [D]. 杭州: 浙江工业大学机械工程学院, 2012.
- [9] 王莹, 赵杰, 刘录, 等. 基于一体化模型的往复式压缩机管线系统振动分析 [J]. 流体机械, 2015, 43(11): 22-28, 42.
- [10] 樊泽明. 水锤波下简支管路的振动应力及疲劳寿命分析 [J]. 机电工程, 2014, 31(3): 311-314.
- [11] 周振龙. 基于简支梁振动的主动控制技术研究 [J]. 机电工程, 2011, 28(4): 418-421.
- [12] 莫平杰, 杨世锡, 曹冲锋. 振动模态固有频率和阻尼比的 EMD 识别方法 [J]. 机电工程, 2011, 28(4): 392-396, 428.

[编辑: 李辉]

## 本文引用格式:

王鸿鑫, 权凌霄. 航空管路块卡离散化模型分析及其对管系振动特性的影响研究 [J]. 机电工程, 2016, 33(10): 1193-1197.

WANG Hong-xin, QUAN Ling-xiao. Analysis of the discrete model of the aerial pipeline block and its influence on the vibration characteristics of the pipe system [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(10): 1193-1197.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>