

# 液体黏滞阻尼器技术进展与关键技术探讨

郭有松<sup>1,2</sup>, 张 敏<sup>1</sup>, 张 磊<sup>1</sup>, 谭立军<sup>1</sup>, 刘 迪<sup>1</sup>, 杨 力<sup>1</sup>

(1 容大结构减振设备有限公司, 常州 213132; 2 上海交通大学深海工程国家重点实验室, 上海 200240)

**[摘要]** 针对黏滞阻尼器的发展历程, 介绍了黏滞阻尼器的国内外研究情况以及国内的应用情况。首先介绍了黏滞阻尼器的耗能机理、结构组成与本构关系。其次对比分析了美国 HITEC、欧盟 EN15129、国内 2012 标准与 2013 规程的关键内容。最后, 针对行业需求与黏滞阻尼器设计生产过程中的关键技术, 对如何满足标准要求进行了阐述。通过以上论述得出了国内阻尼器生产厂家对阻尼器设计理念、耗能机理、关键技术的认识已经达到国际先进水平。

**[关键词]** 黏滞阻尼器; 工程抗震; 标准对比分析; 设计、生产关键技术的控制

突发性的地震和飓风等自然灾害, 会对建筑结构造成巨大的破坏, 带来重大的人员伤亡和财产损失。因此, 建筑结构抗震与抗风一直是国内外学者们不断研究的热点。美国华裔学者 J.T.P Yao<sup>[1]</sup>于 1972 年提出采用振动控制来降低结构振动响应的方法后, 以被动控制为代表的控制手段已经在学术界与工程界发展应用多年。被动控制的主要产品包括: 黏滞阻尼器、隔振支座、软钢、BRB 与 TMD<sup>[2]</sup>。其中, 利用黏滞阻尼器进行结构振动控制始于 20 世纪 80 年代末, 美国纽约州立大学 Buffalo 分校在美国科学基金会的资助下开始了黏滞阻尼器的研制, 并对其减振机理、阻尼材料、热力学性能进行了系统的研究<sup>[3]</sup>。此后, 以美国 Taylor<sup>[4]</sup>、意大利 FIP<sup>[5]</sup>和 ALGA<sup>[6]</sup>以及日本 Kajima<sup>[3]</sup>等公司为代表阻尼器生产企业开发出了一系列相关产品, 并应用于实际工程。

国内 20 世纪 90 年代初, 东南大学<sup>[7]</sup>、广州大学<sup>[8]</sup>、同济大学<sup>[9]</sup>、北京工业大学<sup>[10]</sup>、哈尔滨建筑大学<sup>[11]</sup>、上海材料研究所、南京丹普科技工程有限公司和常州容大结构减振设备有限公司等研究机构与企业对黏滞阻尼器开展了系统性的研究, 生产出了系列化的产品大量应用建筑、桥梁等结构抗震领域, 应用地域范围包括北京、云南、四川、陕西、山西、海南、河北、江苏、浙江、上海、天津、新疆等省市。其中以北京火车站、昆明机场最为典型。目前黏滞阻尼器用于结构抗震、抗风已经被行业接受, 其计算模型已经成熟, 形成了阻尼器的设计规范、规程与施工手册。同时阻尼器作为耗能元件在国防、能源、工业等领域应用广泛。

本文结合产品特点、行业需求与标准要求, 对美国 HITEC<sup>[6]</sup>、欧盟 EN 15129—2009<sup>[12]</sup>、我国《建筑消能阻尼器》(JG/T 209—2012)<sup>[13]</sup>与《建筑消能

减振技术规程》(JGJ 297—2013)<sup>[14]</sup>的关键内容进行对比分析, 并对黏滞阻尼器的关键技术以及在设计生产过程中如何实现, 进行了探讨。

## 1 液体黏滞阻尼器的介绍

### 1.1 黏滞阻尼器耗能机理

黏滞阻尼器的阻尼力来自于结构内部相互作用, 包括: 1) 阻尼介质与活塞之间的相互作用; 2) 阻尼介质与油缸之间的相互作用; 3) 介质之间的相互作用; 4) 活塞杆与密封件之间的相互作用。这种与活塞运动速度方向相反的力, 称之为阻尼力。在阻尼器工作过程中, 这些相互作用过程实现了机械能转换为热能并耗散掉。

### 1.2 黏滞阻尼器结构形式

黏滞阻尼器分为单出杆与双出杆两种结构形式, 单出杆由于结构复杂, 目前已基本被行业淘汰, 只在安装位置受限的场合使用。双出杆阻尼器由于结构简单, 而被业内广泛采用。其结构形式如图 1 所示。

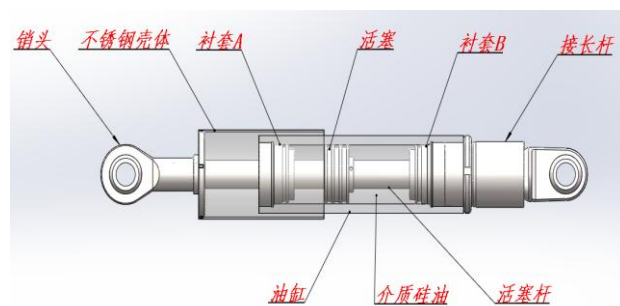


图 1 常州容大公司双出杆黏滞阻尼器结构示意图

### 1.3 本构关系

目前行业内广泛采用由美国 Taylor 提出<sup>[4]</sup>的黏滞阻尼器本构关系公式:

$$F = CV^\alpha \quad (1)$$

式中:  $F$  为阻尼力;  $C$  为阻尼系数;  $V$  为活塞运动

速度； $\alpha$  为速度指数。其中  $\alpha < 1$  为非线性阻尼器，适用于抗震、抗风； $\alpha = 1$  为线性阻尼器，适用于 TMD； $\alpha > 1$  为超线性阻尼器，适用于速度锁定装置。

## 2 黏滞阻尼器行业标准对比

行业标准作为规范产品的法规性文件，其合理性、实用性对产品的阶段性发展影响深远。本文结合美国 HITEC、欧盟 EN15129 以及国内的 2012 标准与 2013 规程，对黏滞阻尼器的行业标准进行比较分析，分别如表 1~7 所示。

本构关系测试 表 1

| 标准                | 加载方式  |
|-------------------|---|
| 美国 (HITEC) 标准     | 频率 0.5Hz, 变位移, 每工况 10 圈                         |
| 欧盟标准 EN15129-2009 | 0.01、0.25、0.5、0.75、1 倍的设计速度, 3 圈                |
| 2012 标准           | 设计频率, 位移 0.1、0.2、0.5、0.7、1、1.2 倍设计位移, 5 圈取第三圈数据 |
| 2013 规程           | 无   |

疲劳耐久性测试 表 2

| 标准                | 加载方式  |
|-------------------|---|
| 美国 (HITEC) 标准     | 0.5Hz, 设计位移, 20 圈   |
| 欧盟标准 EN15129-2009 | 无, 通常要求每项均不超过 2 个设计地震等级阻尼器耗能量, 由工程师制定                                 |
| 2012 标准           | 设计位移小于 100mm, 30 圈, 设计位移大于 100mm, 5 圈, 抗风型, 0.1 倍设计位移, 6 万次, 每 2 万次暂停 |
| 2013 规程           | 连续加载 30 圈   |

温度相关性测试 表 3

| 标准                | 加载方式                        |
|-------------------|-----------------------------|
| 美国 (HITEC) 标准     | 低温 -40℃, 高温 50℃, 0.5Hz, 3 圈 |
| 欧盟标准 EN15129-2009 | 无                           |
| 2012 标准           | -20~40℃, 10℃测一次             |
| 2013 规程           | -20~40℃, 10℃测一次             |

低速摩擦阻力 表 4

| 标准                | 加载方式               |
|-------------------|--------------------|
| 美国 (HITEC) 标准     | 无                  |
| 欧盟标准 EN15129-2009 | 速度 $\leq 0.1$ mm/s |
| 2012 标准           | 无                  |
| 2013 规程           | 无                  |

极限位移测试 表 5

| 标准                | 加载方式  |
|-------------------|---|
| 美国 (HITEC) 标准     | 无   |
| 欧盟标准 EN15129-2009 | 1 倍活塞行程   |
| 2012 标准           | 设计位移 $\leq 100$ mm, 1.5 倍设计位移, 设计位移 $> 100$ mm, 1.2 倍设计位移 |
| 2013 规程           | 不小于实际要求   |

极限耐压测试 表 6

| 标准                | 加载方式                 |
|-------------------|----------------------|
| 美国 (HITEC) 标准     | 2 倍设计速度加载            |
| 欧盟标准 EN15129-2009 | 1.25 倍最大阻尼力, 运动 120s |
| 2012 标准           | 1.5 倍最大阻尼力, 180s     |
| 2013 规程           | 无                    |

一致性测试 表 7

| 标准                | 加载方式 |
|-------------------|------|
| 美国 (HITEC) 标准     | 有    |
| 欧盟标准 EN15129-2009 | 无    |
| 2012 标准           | 有    |
| 2013 规程           | 有    |

## 3 行业标准分析

### 3.1 本构关系测试分析

从本构关系测试加载方式来看, 美国 HITEC 的标准加载 10 圈, 圈数过多, 实质没有必要, 有取代疲劳测试之嫌。我国标准加载圈数也相对较多, 从阻尼器测试结果看, 各圈重合非常好, 加载 3 圈即可满足要求, 欧盟 EN15129 的标准相对合理。

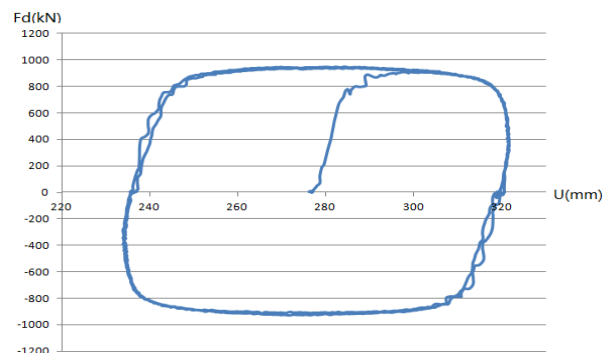


图 2 常州容大金鹏大厦 100t 阻尼器测试 (4 圈)

### 3.2 疲劳耐久性测试

对比 4 个标准可以看出, 我国 2013 规程最为严格, 依此要求, 行程分别为 300mm 和 30mm 的阻尼器, 同样加载 30 圈, 前者产生的热量是后者

的 10 倍。黏滞阻尼器作为个性化产品，其性能要求应和需求相适应。所有产品统一按 30 圈来测试，有待商榷。欧盟 EN15129 的标准按照两个设计地震等级需求的耗能量来限制较为合理。

### 3.3 温度相关性测试

4 个标准对比来看，根据本国环境温度条件进行测试，对我国环境条件，黏滞阻尼器进行低温测试，测试在环境温度低至-20℃时的性能参数非常必要。而对高温测试，由于阻尼器为耗能元器件，测试过程中，温度升高均能超过 50℃，因此，进行高温测试，实无必要。

### 3.4 低速摩擦阻力

对比低速摩擦阻力测试标准来看，各国的抗震标准要求不同。其中我国抗震标准要求小震即耗能，低速对低速摩擦阻力没有要求。对于抗震型耗能器件，其低速摩擦阻力应该越低越好，否则阻尼器会给结构带来额外的附加载荷。

### 3.5 极限位移测试

当实际发生地震等级大于设计地震等级时，要求阻尼器满足抗震要求与结构安全，其本质为设计裕度。从 4 个标准来看，只有我国 2012 的标准有具体要求。按照我国 2012 标准，如果设计位移 90mm，极限位移就需要达到 135mm。标准按照 100mm 来定量划分，对阻尼器在实际工程中安装布置不利。从结构设计角度来看，结构设计师在进行阻尼器行程设计时，应该充分估计行程裕度，生产厂家按设计给定的行程参数进行产品的生产，不需要再考虑行程裕度，更利于产品的生产和验收，避免产生歧义。建议结构工程师在设计文件中能同时给出的阻尼器设计位移与极限位移。

### 3.6 极限耐压测试

对比 4 个标准，美国的标准最为严格，我国标准适中，而欧盟的标准最为宽松。黏滞阻尼器作为液压设备，2 倍的工作压力是最为基本的设计裕度。从这个角度来看，满足 4 个标准，均不是特别难。

### 3.7 一致性测试

一致性要求是考核生产厂家设计、加工、装配、自检能力比较重要的技术指标。对于阻尼器产品质量至关重要。没有测试设备的厂家很难保障产品一致性。

## 4 黏滞阻尼器关键技术与设计、生产注意事项

### 4.1 黏滞阻尼器关键技术

从行业需求与标准要求来看，黏滞阻尼器的关键指标大致包括：1) 设计使用年限：30 年；2) 疲劳试验循环次数：30 圈；3) 滞回曲线饱满；4) 速

度指数可定制；5) 低速摩擦阻尼低。

### 4.2 产品设计生产注意事项

#### (1) 设计使用年限 30 年

为了能够满足设计寿命 30 年的要求，阻尼器各关键部件均需要满足正常工作 30 年的要求，从阻尼器构件组成来看，其介质与密封尤为重要。目前的阻尼介质几乎均采用甲基硅油，其稳定性较好，可以满足设计要求。作为保证阻尼器寿命和工作可靠性的密封技术无疑成为各生产厂家最核心的关键技术。因为保密的需要，各生产厂家对此披露的信息资料不多。概括地说需要从 4 个方面加以考虑：密封件的胶料耐老化特性、密封件胶料温度适用范围、高低压工况下的密封特性、密封副的结构型式。对于高腐蚀工作环境，还需要考虑外露金属零件的表面防腐处理。

#### (2) 疲劳试验循环次数 30 圈

该关键参数是对阻尼器性能的一个综合考验，考验了阻尼器因温度升高引起的内压升高条件下的结构强度与密封性能。考验介质在高温下粘度的稳定性、比热容等。有不少阻尼器厂家的产品在疲劳试验过程中发生了泄漏，主要是密封部件性能不佳。在阻尼器结构设计时需要对其结构强度进行 100MPa 极限强度分析，要求其结构强度在屈服极限范围内。密封性能，密封圈低压与高压状态、低温与高温状态均能具有良好的密封性能。

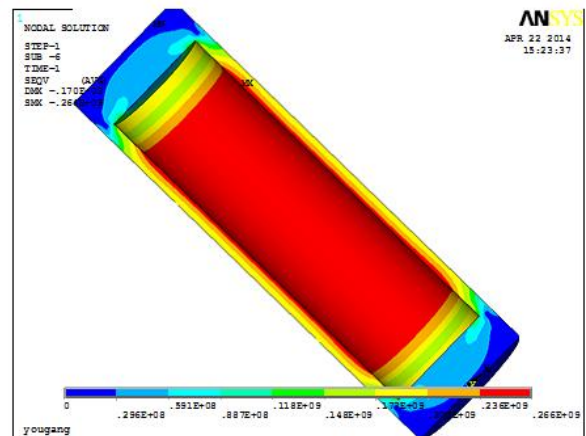


图 3 常州容大 125t 阻尼器 100MPa 内压强度分析

#### (3) 滞回曲线饱满

滞回曲线形状与速度指数有关，指数越小，滞回曲线越饱满，耗能率越高，反之指数大耗能率低。这个不能作为判断阻尼器性能参数好坏的标准，主要与需求的速度指数大小有关。

#### (4) 速度指数可定制

有国外的厂家提出速度指数可调，我们认为速度指数可调是主动控制的概念。作为被动控制元件



的黏滞阻尼器而言，称为速度指数可定制可能更准确，且不易产生歧义。速度指数可定制从另外一个角度来理解，就是产品的制造商应该根据结构工程师提出的结构需求参数进行产品的设计、生产和检验。由于建筑结构的复杂性和多样性，决定了速度指数变化，因此速度指数的定制成为阻尼器设计、制造的关键技术之一。目前掌握这一核心技术的厂家不多。

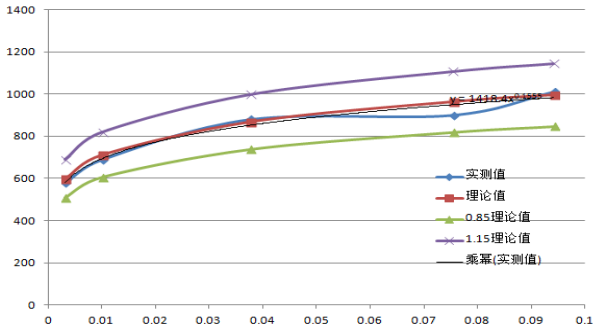


图4 常州容大 100t 阻尼器， $\alpha=0.15$

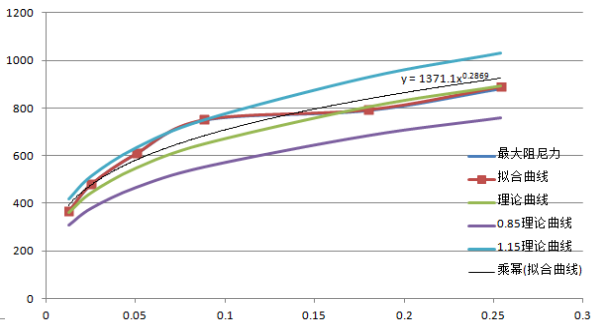


图5 常州容大 100t 阻尼器， $\alpha=0.3$

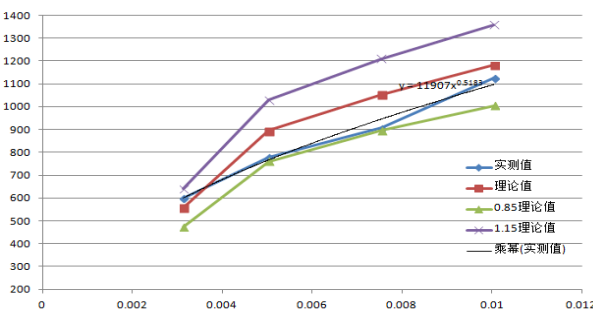


图6 常州容大 100t 阻尼器， $\alpha=0.5$

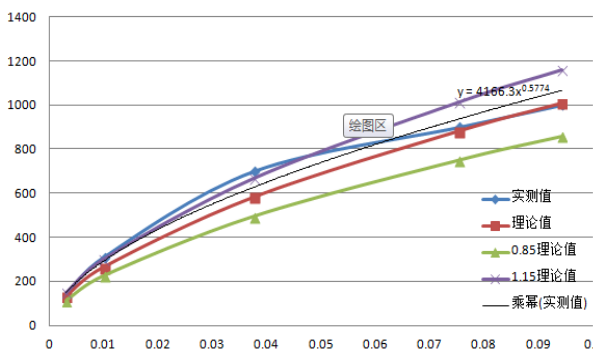


图7 常州容大 100t 阻尼器， $\alpha=0.6$

### (5) 低速摩擦阻力低

为了满足阻尼器在无地震发生时不给结构带来附加荷载，需要阻尼器具有较低的低速摩擦阻力。这就需要在产品设计时，优化阻尼介质粘度、密封结构以及阻尼结构。同时提高阻尼器零件的加工和装配精度，可有效降低黏滞阻尼器的低速摩擦阻力。

### (6) 产品性能一致性

目前我国阻尼器出厂要求 100% 自验，并按照建筑结构的重要程度由第三方按照 20%、50%、100% 不等进行抽样检测。同时标准中均提出了单个参数 15% 与批量参数 10% 的要求。需要阻尼器生产厂家具备检测手段与测试分析能力。



图7 常州容大 300t 动态测试台与出厂检验

## 5 黏滞阻尼器的发展历程

有国外厂家资料总结了黏滞阻尼器发展历程并进行了划代，第一代阻尼介质硅胶和第二代内置阀门，第三代采用小孔射流原理。比较前 2 代产品，第三代阻尼器在密封可靠性、速度指数可定制、低速摩擦阻力低等方面取得了比较大的突破，从而为结构工程师选择采用黏滞阻尼器提高结构抗震需求增加了信心。

但是在第三代阻尼器介绍资料中，我们看到采用小孔射流原理的第三代阻尼器主要论述的是实现指数大于 0.3 的技术，而对于实现指数  $\alpha < 0.3$  则没有涉及。而从建筑结构的需求来看， $\alpha=0.15$ 、0.2、0.25 黏滞阻尼器需求量还是比较多的。因此我们认为第三代阻尼器对于速度指数的实现范围应该放在 0~2 之间更为全面。

作为目前代表黏滞阻尼器最高技术水平的第三代产品，仍有需要改进和提高的地方。希望通过国内外厂家共同努力，早日加以突破，能够生产更适合建筑结构需求的全系列速度指数黏滞阻尼器产品。

## 6 结论

通过以上的讨论分析可知，国内经过 20 多年

的研发、应用,已经可以实现结构设计与分析,产品性能优化,产品参数可定制。同时国内黏滞阻尼器生产厂家对阻尼器设计理念、耗能机理、关键点的认识已经达到国外先进水平。在基础分析与底层理论试验尚需下功夫。

我们承认差距,理性分析、按照事物发展的客观规律,逐步完善基础理论与试验。相信并有信心通过国内同行的共同努力,在不久的将来,我国生产的黏滞阻尼器的性能、质量、可靠性能够达到国际先进水平。

#### 参 考 文 献

[1] YAO J T P. Concept of Structure Control[J]. ASCE Journal of Structural Division,1972,98(577):1567-1574.

[2] 周锡元. 建筑结构的隔振、减振与振动控制[J]. 建筑结构学报, 2003, 23 (2) .

[3] 张志强, 李爱群. 建筑结构粘滞阻尼器减振设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

[4] DOUGLAS P TAYLOR. Structural control using hybrid spring-damper isolator with intergral gapping function[R]. Taylor Devices INC Technical report.

[5] SAMUELE INFATI. Viscous dampers: a reliable technology for structural vibration damping[R]. FIP Technical report.

[6] 陈永祁. 桥梁工程液体粘滞阻尼器设计与施工[M]. 北

京: 中国铁道出版社, 2012.

[7] 李爱群. 建筑减振粘滞阻尼器工程应用新进展[J]. 建筑结构, 2006, 36 (S1) .

[8] 汪大洋,周云. 粘滞阻尼减震结构的研究与应用进展[J]. 工程抗震与加固改造,2006,28(4).

[9] 翁大根. 粘滞阻尼器力学性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2002,18(4).

[10] 李英, 闫维明. 变间隙粘滞阻尼器的性能分析[J]. 震灾防御技术, 2006,1(2).

[11] 欧进萍. 变间隙粘滞阻尼器的性能分析[J]. 震灾防御技术, 2006,1(2).

[12] EN 15129-2009 Anti-seismic devices[S]. Austrian Standards Institute.

[13] JG/T 209—2012 建筑消能阻尼器[S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部.

[14] JGJ 297—2013 建筑消能减振技术规程[S].

---

作者简介: 郭有松, 技术负责人, 总工程师, 高级工程师, 大连理工大学结构振动控制硕士研究生毕业, 上海交通大学结构强度博士研究生。从事结构振动与强度分析工作, 多次承担九五、十五、十一五国防预先研究项目与海军舰艇减振降噪项目。目前已经主持完成了舰艇管路复合阻尼器研制、动力吸振器研制、双层隔振装置研制等海军专项技术。  
Email:854636118@qq.com.