

# 交通运输行业标准《永磁调节式磁流变阻尼 装置》

## 编制说明

(征求意见稿)

《永磁调节式磁流变阻尼装置》编写组

2017年7月

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 1 工作简介 .....                 | 1  |
| 1.1 任务来源 .....               | 1  |
| 1.2 协作单位 .....               | 1  |
| 1.3 主要工作过程 .....             | 1  |
| 1.4 标准起草人及分工 .....           | 2  |
| 2 标准编制原则及标准主要内容的编制依据 .....   | 3  |
| 2.1 编制原则 .....               | 3  |
| 2.2 标准主要内容的编制依据 .....        | 3  |
| 2.2.1 适用范围 .....             | 3  |
| 2.2.2 规格 .....               | 5  |
| 2.2.3 技术要求 .....             | 6  |
| 3 预期的经济效果、社会效果及环境效果分析 .....  | 13 |
| 3.1 实施本标准的经济效果分析 .....       | 13 |
| 3.2 实施本标准的社会效果及环境分析 .....    | 13 |
| 4 采用国际标准和国外先进标准的程度 .....     | 13 |
| 5 与有关的现行法律、法规和强制性标准的关系 ..... | 14 |
| 6 重大分歧意见的处理及依据 .....         | 14 |
| 7 其他事项 .....                 | 14 |

# 《永磁调节式磁流变阻尼装置》征求意见稿 编制说明

## 1 工作简介

### 1.1 任务来源

根据《关于组织实施 2016 年交通运输标准化项目的通知》，按照《交通运输部关于下达 2016 年交通运输标准化计划的通知》（交科技函〔2016〕506 号）以及《交通运输部标准化项目协议书》（计划编号：2016-139）的有关要求，完成《永磁调节式磁流变阻尼器》制修订及相关技术性工作。

### 1.2 协作单位

标准主编单位：柳州东方工程橡胶制品有限公司

标准参编单位：湖南大学

柳州欧维姆机械股份有限公司

湖南科技大学

陕西省公路勘察设计院

长春市市政工程设计研究院

标准归口单位：全国交通工程设施（公路）标准化技术委员会（SAC/TC 223）

### 1.3 主要工作过程

本项目任务书下达后，项目承担单位柳州东方工程橡胶制品有限公司成立了标准编写组。编制组进行了相关资料的查阅和收集工作，收集了目前已经发布磁流变阻尼器及其他类型的拉索外置减振阻尼器标准、相关规定及专利情况，对磁流变阻尼器或其他类型的拉索外置减振阻尼器的在斜拉索上的使用情况及技术特性进行了调研及分析。

2016 年 4 月，标准编写组提交了《永磁调节式磁流变阻尼器》标准的立项申请；2016 年 7 月份，项目通过了交通运输部的评审，正式立项。

2016 年 8 月，标准编写组针对项目中的预算及标准草案进行了修改，8 月 24 日，标准的项目协议书正式签订。标准编写组在进行了标准开题论证会后，正式启动标准的编制工作。

2017 年 1 月 20 日，全国交通工程设施（公路）标准化技术委员会在北京组

织召开了《永磁调节式磁流变阻尼器》工作大纲和标准草案技术评审会。与会专家一致认为：工作大纲内容齐全、完整，实施方案和技术路线可行，具有较好的指导性和可操作性，进度计划和资源配置合理，为顺利完成该项目的编写提供了保障；标准草案章节安排合理。工作大纲和标准草案满足相关文件要求。

2017年4月14日，全国交通工程设施（公路）标准化技术委员会在北京组织召开《永磁调节式磁流变阻尼器》的征求意见稿的评审会议。根据评审专家的意见，标准编写组分析整理数据，细化技术要求及条款，并将标准草案名称更改为《永磁调节式磁流变阻尼装置》。至目前为止，编写组已经完成了标准的征求意见稿和编制说明等文件。

#### 1.4 标准起草人及分工

| 人员安排     | 姓名  | 工作单位           | 分工   |
|----------|-----|----------------|--|
| 1. 负责人   | 刘志东 | 柳州东方工程橡胶制品有限公司 | 1、总体组织协调、总体技术负责<br>2、主要问题调研，<br>3、确定测试验证方案<br>4、规范相关条文修订，主持完成征求意见稿、送审稿和报批稿 |
| 2. 主要起草人 | 华旭刚 | 湖南大学           | 1、主要技术理论研究<br>2、规范相关条文修订   |
| 3. 主要起草人 | 陈政清 | 湖南大学           | 1、主要技术理论研究<br>2、规范相关条文修订   |
| 4. 主要起草人 | 李世军 | 柳州东方工程橡胶制品有限公司 | 1、主要问题调研，调研成果整理<br>2、技术相关的测试验证<br>3、规范相关条文修订                               |
| 5. 主要起草人 | 资道铭 | 柳州欧维姆机械股份有限公司  | 1、组织协调<br>2、规范相关条文修订   |
| 6. 主要起草人 | 禹见达 | 湖南科技大学         | 1、主要技术问题分析及调研<br>2、规范相关条文修订  |
| 7. 主要起草人 | 陈长海 | 陕西省公路勘察设计院     | 1、主要问题调研<br>2、规范相关条文修订   |

|          |     |                  |                           |
|----------|-----|------------------|---------------------------|
| 8. 主要起草人 | 熊高波 | 柳州东方工程橡胶制品有限公司   | 1、技术相关的测试验证<br>2、规范相关条文修订 |
| 9. 主要起草人 | 李建国 | 长春市市政工程<br>设计研究院 | 1、主要问题调研<br>1、规范相关条文修订    |

## 2 标准编制原则及标准主要内容的编制依据

### 2.1 编制原则

适用性：结合我国公路桥梁发展现状，充分考虑标准使用各方的技术水平。

先进性：充分借鉴国外先进技术标准，体现行业的发展方向和科技发展水平。

成熟性：充分调研国内外相关产品应用情况，分析其技术特点和技术要求，支撑本标准技术内容编制。

经济性：合理考虑企业生产成本与检测机构检测能力，在满足技术要求情况下降低成本，节约能源。

### 2.2 标准主要内容的编制依据

#### 2.2.1 适用范围

##### 1) 永磁调节式磁流变阻尼器的工作原理

永磁调节式磁流变阻尼器中的阻尼介质——磁流变液主要由非导磁性母液和均匀散布在其中的高导磁的软磁性微粒组成。在没有磁场作用的状态下，磁流变液符合牛顿流体的力学特性，有较低的粘度；而当它处于强磁场作用下时，其悬浮颗粒被感应由磁中性变成强磁性，在磁极之间形成“链”状，使其在瞬间(毫秒级)由液体变为粘塑体，表现为一种具有一定屈服强度的类似于固体的力学特性。见图 1：

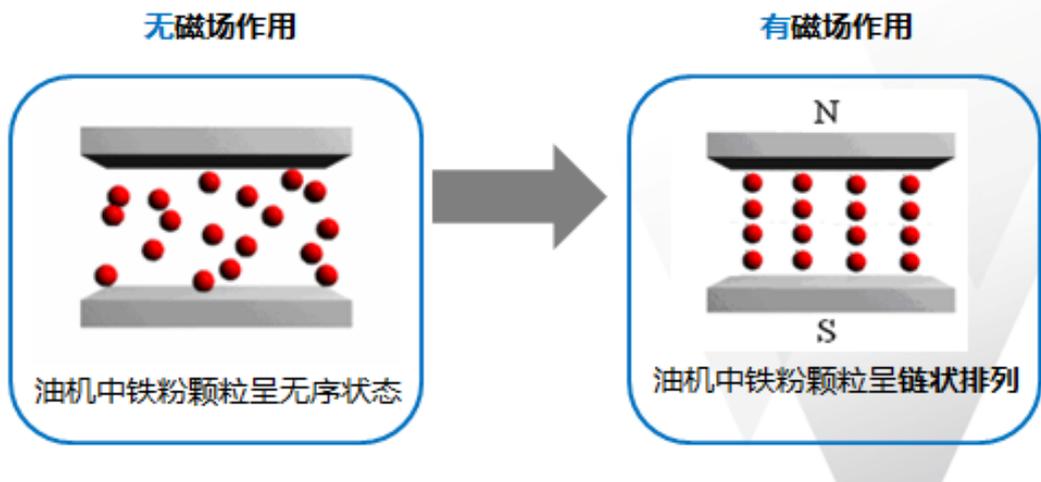


图1 磁流变液在磁场作用下的特性

永磁调节式磁流变阻尼器在湖南洪山大桥及浏阳河大桥的应用，经过实桥验证，阻尼器能有效地抑制了拉索的风雨振。永磁调节式磁流变阻尼器在斜拉索上的大量应用及所取得的减振效果，以及衍生出一系列柔性桥梁非线性设计理论和抗风理论方面的创新成果，曾获国家科技进步二等奖，湖南省科技进步一等奖。

## 2) 永磁调节式磁流变阻尼器的性能特点

与现有技术相比，永磁调节式磁流变阻尼器的优点就在于：该阻尼器是由磁流变液提供阻尼力，由永磁体起调节控制作用，这样靠自身就能提供必要的阻尼力，不需要配置供电系统，用于桥梁结构减振时，可避免由于不方便或不能保证可靠的供电而给阻尼器的使用造成的障碍，同时使得这种磁流变阻尼器减振系统更加简单、可靠，也更加美观。

永磁调节式磁流变阻尼器与常规的黏滞流体阻尼器、粘性剪切型阻尼器等相比，具有显著的技术特性：

- (1)、工作温度范围大。-40 度至 130 度之间性能不降低也不变化。
- (2)、阻尼力极易调节。安装后在现场经调节后可使每根拉索达到最优控制效果，即使桥梁运营后也很方便调节到最优控制状态，以使每根拉索得到最佳减振效果。
- (3)、非常适用于高频率小位移的振动结构，在振幅极小的情况下就有很大的阻尼力，因此可将拉索振动抑制到肉眼不可见的程度。
- (4)、不需要外部电源，适用更广泛，使用成本更低。
- (5)、采用高精度加工与密封，可长效密封，阻尼介质为惰性耐用材料，因

此使用寿命长。

(6)、减振效果显著，安装阻尼器后斜拉索的最大振幅可以控制到小于拉索长度的  $1/1700$ ，实测斜拉索对数衰减率  $\delta$  达到  $\geq 3\%$  以上。

(7)、安装简便，一般条件下不需要后期的使用维护。

鉴于永磁调节式磁流变阻尼装置在桥梁拉索减振控制中的良好减振效果，以及产品的优良技术特性，特规定永磁调节式磁流变阻尼装置适用于桥梁拉索减振装置。

## 2.2.2 规格

永磁调节式磁流变阻尼器阻尼力分为 7 级，即 900N，1200N，1500N，2000N，2500N，3000N，4000N。

由拉索振动控制的机理可以得知，要控制拉索的振动，必须在阻尼器安装的位置能让阻尼器正常工作。阻尼力设计过小，达不到提供阻尼的要求；阻尼力过大，阻尼器有可能在安装位置部位不能运动耗能，那么会形成刚性连接，特别是对于低频的微振，基本不会起到阻尼效果。

在永磁调节式磁流变阻尼器的已有的工程案例中，湖南长沙洪山大桥单根最长的斜拉索长 289.8 米，采用的阻尼器阻尼力为 2000N；北京京包高速上地铁路分离式立交桥单根最长的斜拉索长 222 米，采用的阻尼器阻尼力为 2000N。根据对湖南长沙洪山大桥和北京京包高速上地铁路分离式立交桥的斜拉索经常进行了实桥检测验证，阻尼器在风雨激振下能有效地控制拉索的振动。

从实际的工程案例可以得知，永磁调节式磁流变阻尼器设计阻尼力为 2000N（单个阻尼器为 2000N，一根拉索安装 2 个阻尼器）已经满足了 300 米斜拉索的减振控制。目前国内斜拉索桥梁的单根拉索最长约 500 米，永磁调节式磁流变阻尼器 2500N 到 4000N 的阻尼力，能满足拉索的减振控制要求。

根据永磁调节式磁流变阻尼器的技术特性，阻尼器在拉索未开始振动时已经一直为拉索提供附加阻尼；当拉索振动时，阻尼器即开始提供阻尼力阻尼器一直会控制斜拉索的振幅。因此，阻尼器  $\pm 15\text{mm}$  的行程能满足拉索减振要求。

因此，永磁调节式磁流变阻尼器的阻尼力 900N 至 4000N，行程  $\pm 15\text{mm}$ ，已经满足了桥梁拉索的减振控制要求。

## 2.2.3 技术要求

### 1) 适用温度性能

永磁调节式磁流变阻尼装置的适用温度主要由其阻尼介质—磁流变液特性以及密封件系统特性决定。根据机械行业标准 JB/T 12512-2015《磁流变液》的规定，磁流变液的使用温度为 $-40^{\circ}\text{C}\sim 130^{\circ}\text{C}$ ；根据 GB/T 15242.1《液压缸活塞和活塞杆动密封装置用同轴密封件尺寸系列和公差》的规定，密封件的使用温度范围为 $-40^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。考虑到实际的使用工况，永磁调节式磁流变阻尼装置的使用环境温度取 $-40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 。

### 2) 减振目标要求

北京京包高速上地铁路分离式立交桥实桥检测研究：

北京市上地铁路分离式立交桥是京包高速（五环路~六环路）工程中的一座单塔式斜拉索桥，全长 510m，主跨 320m，主塔每侧设置斜拉索 22 对，共计 88 根拉索，单根拉索最长 222 米。公路的设计时速为 100 公里/小时，双向六车道，桥梁全宽 35.5m。该桥全桥 88 根斜拉索均设置安装了永磁调节式磁流变阻尼装置，共计 88 套。

在项目现场，对安装了永磁调节式磁流变阻尼装置的部分拉索进行了减振实桥检测试验，试验现场及部分拉索减振检测分析如下图 2 和图 3：

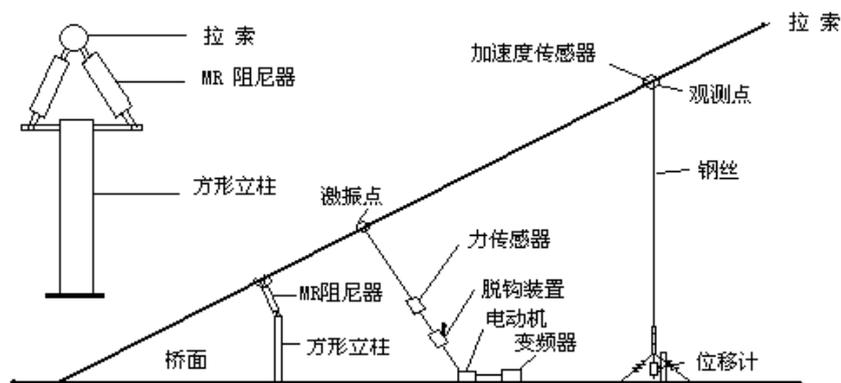


图 2 试验布置图



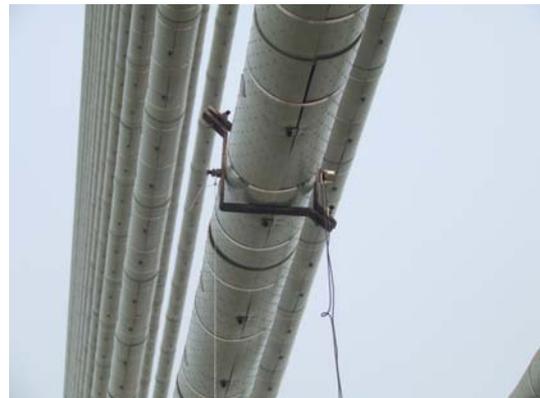
(a) 数据采集系统



(b) 激振装置



(c) 位移测量



(d) 测点布置

图 3 现场测试系统

根据对 C11' N 和 C18' N 号拉索进行实桥减振检测, 分别进行安装阻尼器和不安装阻尼器的工况进行检测, 检测结果如下图 4-图 7 所示:

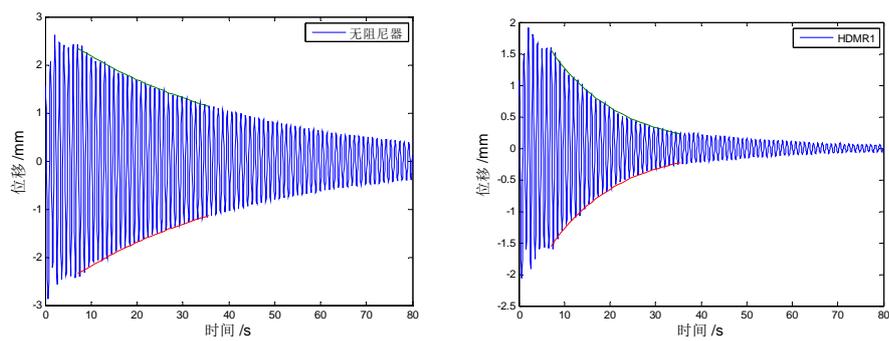


图 4 C11' N 第一阶模态减振时程曲线

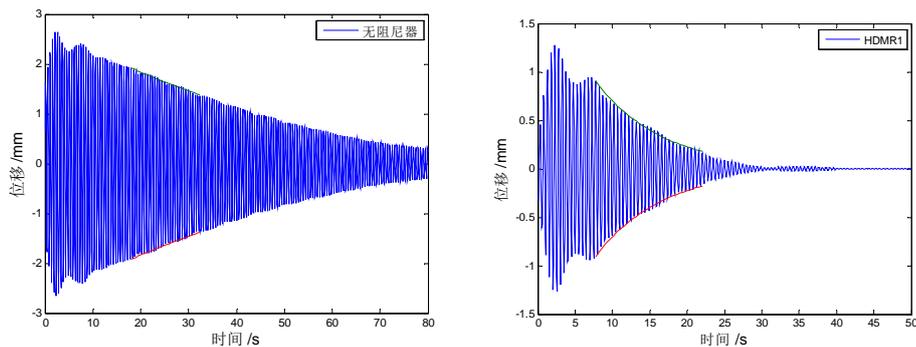


图 5 C11' N 第二阶模态减振时程曲线

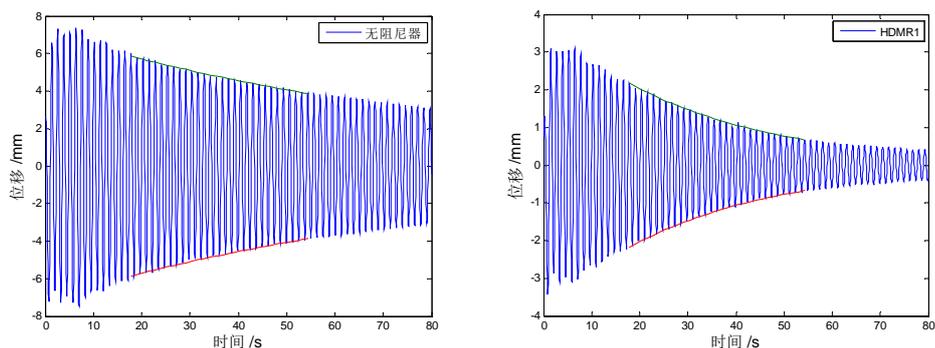


图 6 C18' N 第一阶模态减振时程曲线

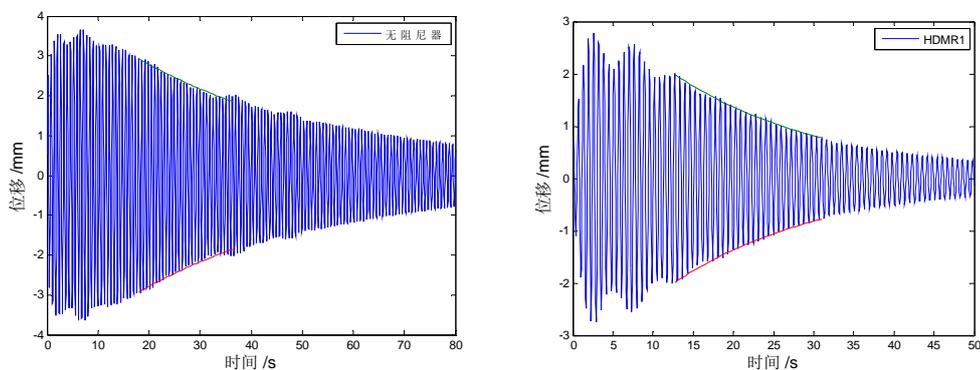


图 7 C18' N 第一阶模态减振时程曲线

(1) C11' N 号拉索前二阶模态减振时程曲线表明：没有安装阻尼器时拉索的第一阶模态对数衰减率为 2.38%，第二阶模态对数衰减率为 1.13%；而安装了 HDMR1 档永磁调节式磁流变阻尼器后，拉索的第一阶模态对数衰减率为 7.35%，第二阶模态对数衰减率为 5.65%。

(2) C18' N 号拉索前二阶模态减振时程曲线表明：没有安装阻尼器时拉索的第一阶模态对数衰减率为 1.44%，第二阶模态对数衰减率为 1.57%；而安装了 HDMR1 档永磁调节式磁流变阻尼器后，拉索的第一阶模态对数衰减率为 4.02%，第二阶模态对数衰减率为 3.20%。

检测报告见图 8:

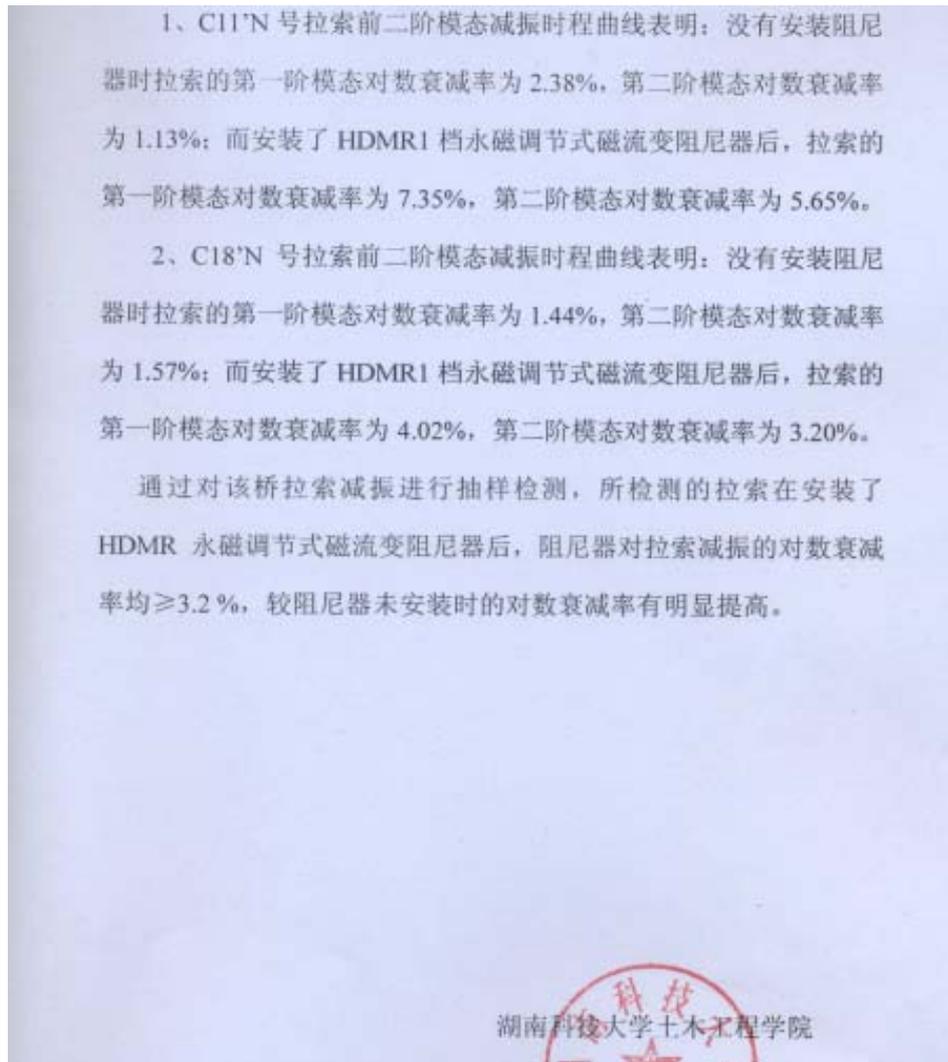


图 8 京包高速实桥检测报告

根据实桥检测的结果，本标准要求安装永磁调节式磁流变阻尼装置后，拉索振幅限制值为拉索长度 $1/1700$ 之内，拉索振动模态对数衰减率不应小于 $3\%$ 。

### 3) 外观与尺寸

永磁调节式磁流变阻尼装置是一种高精度的密封液压装置产品，根据产品的实际应用情况及要求，本标准规定：

磁流变阻尼器外观应表面平整，无机械损伤，无锈蚀，无渗漏，标识清晰；连接构件应无锈蚀，无毛刺、裂痕等缺陷，外表面防腐涂层均匀，无漏涂、挂流等缺陷。

磁流变阻尼器长度允许误差在 $\pm 3\text{mm}$ 之内；连接构件的尺寸公差不应低于 GB/T 1804 中的 c 级的规定。

#### 4) 力学性能

根据机械行业标准JB/T 12512-2015《磁流变液》有关要求，磁流变液的力学性能要求规定见表1：

表1 磁流变液力学性能要求

| 项目                | 性能指标            |
|-------------------|-----------------|
| 剪切应力 (B=0.5T) kPa | 实测值 $\geq 40$ 。 |
| 抗沉淀性 (6个月) %      | 实测值 $< 20$ 。    |
| 抗团聚性 (6个月)        | 松软易分散。          |

根据国家标准GB/T 13560-2009《烧结钕铁硼永磁材料》有关要求，永磁磁铁的力学性能要求见表2：

表2 永磁磁铁力学性能要求

| 项目                     | 性能指标                              |
|------------------------|-----------------------------------|
| 剩磁 ( $B_r$ )           | 实测值不小于1.29 (T)。                   |
| 磁极化强度矫顽力 ( $H_{cJ}$ )  | 实测值不小于1350 (kA/m)。                |
| 磁感应强度矫顽力 ( $H_{cB}$ )  | 实测值不小于912 (kA/m)。                 |
| 最大磁能积 ( $(HB)_{max}$ ) | 实测值范围302~350 ( $\text{kJ/m}^3$ )。 |

根据减振耗能液压装置产品的特性，以及对斜拉索减振控制目标的要求，磁流变阻尼器的力学性能要求见表3：

表3 磁流变阻尼器力学性能要求

| 项目     | 性能指标  |
|--------|---|
| 阻尼力    | 实测值偏差应在产品设计值 $\pm 20\%$ 以内。   |
| 极限位移   | 实测值不应小于设计位移120%。  |
| 滞回曲线   | 实测滞回曲线应光滑，无异常。  |
| 耐疲劳性能  | 产品的耐疲劳循环试验不应小于200万次，在疲劳耐久性试验后无渗漏，无损伤。   |
| 温度相关性能 | 在 $-40^\circ\text{C}$ 、 $0^\circ\text{C}$ 和 $60^\circ\text{C}$ 时实际阻尼力值相对于 $23^\circ\text{C}$ 时的实际阻尼力的偏差不超过 $\pm 20\%$ 。 |

(1) 根据永磁调节式磁流变阻尼装置的实际疲劳试验，在进行了200万次的耐疲劳试验后，产品无损坏、漏油等现象。疲劳试验后的实测阻尼力在产品设计值的20%之内。设计位移为 $\pm 15\text{mm}$ ，实测极限位移 $\pm 18\text{mm}$ ，符合实测值不应小于设计位移120%。疲劳试验见图9：

|                  |  |      |                             |
|------------------|--|------|-----------------------------|
| 样品名称             | 永磁调节式磁流变阻尼器  | 样品来源 | 厂家送检                        |
| 生产单位             | 柳州东方工程橡胶制品有限公司   | 检测日期 | 2013年04月25日<br>~2013年06月03日 |
| 样品状态             | 正常   | 报告日期 | 2013年06月10日                 |
| 样品规格             | HDMR   | 试验温度 | 20℃~32℃                     |
| 检测设备             | 水平动力加载试验机  |      |                             |
| <b>疲劳试验前检测结果</b> |  |      |                             |
| 序号               | 检测项目   | 单位   | 样品实测值                       |
| 1                | 试验位移   | mm   | ±10.3mm                     |
| 2                | 阻尼力  | N    | ±1156N                      |
| <b>疲劳试验后检测结果</b> |  |      |                             |
| 序号               | 检测项目   | 单位   | 样品实测值                       |
| 1                | 试验位移   | mm   | ±9.6mm                      |
| 2                | 阻尼力  | N    | ±1125 N                     |
| 实验现象             | 送检样品永磁调节式磁流变阻尼器 HDMR 于 2013 年 4 月 25 日开始进行试验, 至 2013 年 6 月 03 日, 试验天数共 25 天, 共进行 207 万次的耐久性能试验, 阻尼器表面无裂缝, 无其它明显缺陷。 |      |                             |
| 检测结论             | 送检样品经受了 207 万次的水平疲劳试验, 阻尼器无漏油现象, 阻尼力稳定。  |      |                             |
| 备注               |  | 检测单位 | 湖南科大工程检测中心<br>(盖章)          |

图:9 200 万次耐疲劳试验报告

(2) 产品的耗能率主要体现在阻尼力与位移的时程滞回曲线中, 滞回曲线包络的面积除以理想状态下的阻尼器做功即耗能率。试验检测过程中, 产品的滞回曲线光滑、无异常。见图 10:

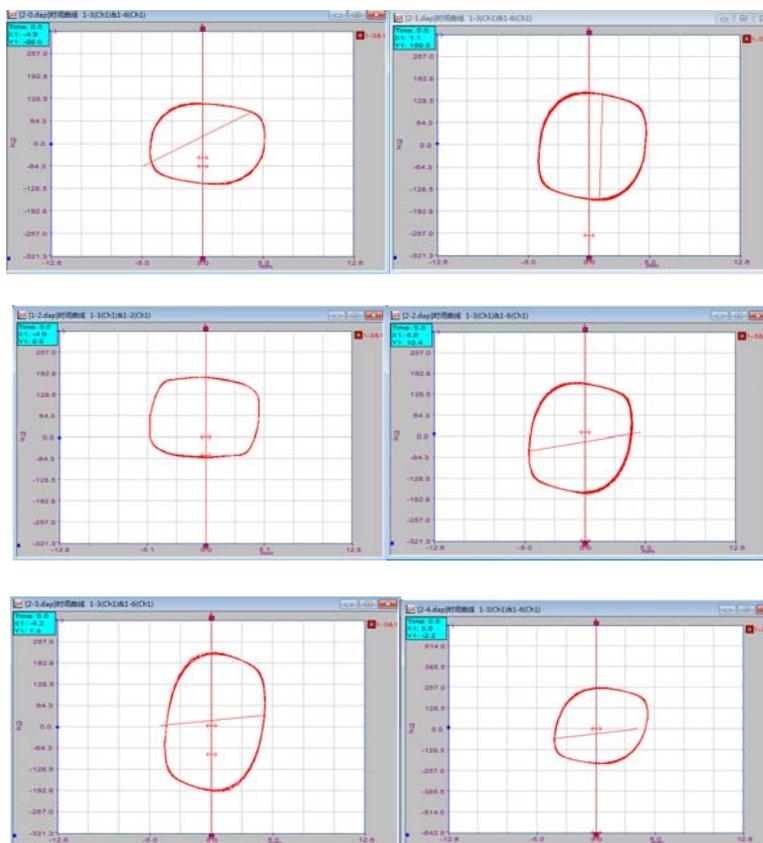


图 10 滞回曲线示意图

## 5) 工艺性能

本标准从“热处理、机加工、防腐”规定了产品主要构件的工艺要求。

### (1) 热处理

零件进行热处理时宜采用退火，退火后优质碳素结构钢的硬度应符合GB/T 699的规定。

### (2) 机加工

工作缸缸体内表面和活塞杆表面尺寸公差不应低于GB/T 1800.1中IT8级的规定；未注尺寸公差值不应低于GB/T 1804中c级的规定。

缸体内表面圆柱度和活塞杆表面圆柱度公差等级不应低于GB/T 1184中6级的规定。未注公差值不应低于GB/T 1184中L级的规定。

缸体内表面、活塞杆表面粗糙度不应低于Ra0.8的要求；安装密封件的沟槽表面粗糙度不应低于Ra1.6的要求。

活塞杆、缸体、活塞、端盖的配合面和摩擦面不应有凹坑、划痕等缺陷。相互配合面均应洁净，应将铁屑、毛刺、油污和泥砂等杂质清除干净。

### (3) 防腐

活塞杆表面镀铬、镀镍或铬镍共镀，镀层总厚度不应小于40 μm。硬铬层应符合GB/T 11379的规定，镍层应符合GB/T 12332的规定。

连接耳环、工作缸外表面及附缸外表面应进行电镀锌处理，锌层厚度不应小于20 μm。装配完成后，外露表面除活塞杆外均应喷涂一道防腐面漆，漆膜厚度不应低于80 μm。

连接构件防腐涂层应符合JT/T 722中涂层配套体系编号为“S05”的规定。

## 6) 试验方法

试验部分主要对永磁调节式磁流变阻尼装置的“设计阻尼力试验、疲劳耐久性试验和温度相关性能试验”三项技术要求规定了试验方法，与技术要求相关内容一一对应。试验方法主要规定了试验过程的加载控制、试验数据采集以及结果输出等要求。

### 3 预期的经济效果、社会效果及环境效果分析

#### 3.1 实施本标准在经济效果分析

永磁调节式磁流变阻尼装置作为斜拉索的外置减振阻尼器，其最大的特点在于，阻尼力可调，无需外置供电系统，安装简单方便。

拉索外置减振阻尼器在使用一定时期后，由于索力变换以及拉索振动疲劳等因素的影响，拉索所需的阻尼力会有所变化。永磁调节式磁流变阻尼器可以通过现场调整磁铁组合来改变阻尼器的阻尼力，方便简单。阻尼器安装到斜拉索上基本都是螺纹连接，安装及拆装都简单。相对于其他类型的阻尼器，阻尼力可调以及安装简单方便，可以节省高昂的后期管养及维修费用，有非常显著及可观的经济效益。

#### 3.2 实施本标准的社会效果及环境分析

永磁调节式磁流变阻尼器能承受 200 万次的耐疲劳性能，可以保证阻尼器长时间的使用寿命。永磁调节式磁流变阻尼器的阻尼效果稳定特性，能更好地控制拉索的振动。在风雨振或者较大的外力作用时，人们目视拉索基本不会产生振动的现象。因此，永磁调节式磁流变阻尼器作为拉索振动控制，能取得更好的社会效果。

相对于电磁流变阻尼器和粘性剪切型阻尼器来说，由于永磁调节式磁流变阻尼器采用磁铁提供阻尼力，因此无需使用到外置电源，对于安全及环境都起到了很好的保护作用。永磁调节式磁流变阻尼器的高性能密封作用，可以杜绝由于漏油而对环境产生的污染。因此，永磁调节式磁流变阻尼器作为拉索振动控制，具有良好的环境效益。

### 4 采用国际标准和国外先进标准的程度

本标准的部分内容参照了《Cable stays Recommendations of French interministerial commission on Prestressing》2002(CIP-LCPC)中相关要求，并未直接引用，而是根据我国现有的其他相关产品标准和研究成果给予借鉴；按国内标准《标准化工作导则 第一部分：标准的结构和编写》GBT1.1-2009 的基本要求编写。

## 5 与有关的现行法律、法规和强制性标准的关系

本标准不违反现行法律、法规和强制性标准。

## 6 重大分歧意见的处理及依据

无

## 7 其他事项

无