Low Frequency
Pneumatic Isolation Solutions

FABREEKA
VIBRATION & SHOCK CONTROL





低频振动解决方案
精密气浮式减振器

FABREEKA
VIBRATION & SHOCK CONTROL

Global Thinking



- Fabreeka® International, Inc.
  Corporate Headquarters - Stoughton, MA, USA
- Fabreeka-Canada Ltd.
- Fabreeka United Kingdom
- Fabreeka GmbH Deutschland
- Fabreeka Taiwan

自1936年以来，在解决振动和冲击问题领域Fabreeka公司一直都居于领导地位。我们的公司为各个行业提供振动和冲击问题的整体解决方案。

我们的减振系统是完全依据严谨的工程理论和成功的实践经验设计的。Fabreeka公司提供的不仅是减振器，更可以为客户提供解决振动和冲击问题的工程方案。

- 服务
- 方案
- 产品

了解更多有关产品、服务以及相关应用。您可以与我们遍及全球的分公司联络。

4 简介
减振的目的就是控制干扰振动，将其不良影响控制在可接受的范围内。

5 技术讨论 - 气浮式减振器
气浮式减振器基础知识 - 自然频率、阻尼和传导率

9 设计与服务
我们的技术团队可以提供振动的测量和分析，同时还可以做动态分析、结构分析和有限元分析。这些都是全面解决方案的重要部分。

产品

11 精密气浮式减振系统 (PAL)
低频、自动水平的气浮式减振器，每个最高负载55吨。

17 变频精密气浮式减振系统 (Delta-K™)
该系统可以让测量设备在保证设计精度时，能够进行快速测量和移位的变化，从而使设备功能最佳化。

18 电子水平控制精密气浮式减振系统 (PA-DEL)
PA-DEL控制器是用在对水平精度的要求极高同时要求减振系统快速复位的应用中。

19 快速泄压装置(RDS)和位置监控系统(***STATUS***)
快速泄压装置可以让减振系统内的压力快速降低。位置监控系统可以显示减振器的浮起状况。

20 精密充气式水平调节减振器 (PLM)
坚固耐用的低频充气式橡胶减振器。

应用

22 精密机械
钻石车削和高精度机床。

23 计量与检测
坐标测量仪、晶圆检查设备和精密检测设备。

24 汽车测试
测功机台架，道路模拟测试台及振动台。

25 航空航天测试
真空兼容减振器和真空箱减振。

26 飞机地面振动测试
为飞机地面振动测试提供软支撑系统。

27 核磁共振成像和核磁共振
核磁共振成像和核磁共振设备的减振解决方案。



简介

低频振动和冲击可以影响精密测量、快速测量以及生产加工设备的准确性，重复性和生产效率。由于对产品精确度有更高的要求，所以必须增加生产加工设备、计量仪器和工程及研究设备的动态稳定性。对低频和超低频进行减振是一个改善现有振动环境的方法，这种方案提供了几乎“无振动”环境，从而使制造加工精度得到显著的提升。

力学的振动和冲击是广泛存在的。振动和冲击带来的问题可能是可忽略的或者是极具破坏性的，这一点取决于干扰振动的恶劣程度和设备的敏感度。

由低量地震干扰构成的振动环境在地球上是普遍存在的，这种振动对于人来说是感觉不到的，但是却可以导致敏感设备在操作中产生问题。加上日常由卡车、走路、叉车、机械和通风暖通系统产生的振动，使得更多的设备受到了影响。

源自机器或其他来源（声音的）的振动被传递到支撑结构（例如：建筑物的地板）上，从而导致了不利的环境和带来了有害的干扰振动。

上述这些振动可以对精密加工设备、坐标测量仪、核磁共振设备、实验室和半导体加工设备等带来影响。

减振的目的是控制干扰振动，将干扰振动的不利影响控制在可接受的范围内。减振器被设计来为不同型号的设备提供振动和冲击的保护。

如果需要减振的设备本身就是震源（例如：冲击和振动试验台），减振的目的就是减少振动从震源到支撑结构的传播。（图1）

相反的，如果需要减振的设备是干扰振动的接受者（例如：电子显微镜，坐标测量仪），则减振的目的是减少从基础传到设备的振动。（图2）

减振器是一个弹性支撑，它可以将设备从稳态或被迫振动状态分离。气浮式减振器的主要优点就是它的设计垂直自然频率和水平自然频率低至 0.4 Hz 到 5 Hz。因此，被隔离的振动可以低至 0.7 Hz。



图1

为四柱道路模拟试验台产生低频高振幅的振动，为测试车辆模拟实际道路状况。气浮式减振器可以减少振动对外界的传递。



图2

由于机器测量精度的要求，坐标测量仪对于某些频率的振动和冲击非常敏感。气浮式减振器可以隔绝低频振动，减少外界振动对测量仪的影响。

技术讨论

自然频率

气浮式减振器中包括一个空气室，该部分由一个加强型气囊密封。减振器充气后，负载是由位于气囊上部的盖板支撑的。（图3）

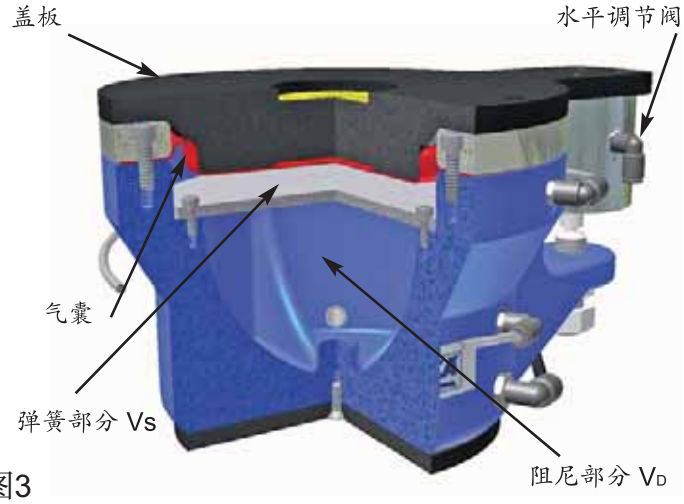


图3

气囊的有效面积和气囊上的压力决定了减振器的负载能力。水平调节阀可以控制减振器内部的气体压力和减振器的浮起高度。

典型的气浮式减振器设计中空气室由两部分组成，分别是弹簧腔和阻尼腔。在Fabreeka的设计中，阻尼腔是与弹簧腔分开的，这两部分通过气管相连（详见阻尼部分）。这种设计理念可以使用于不同的减振器形状，因为只有腔体总容量（有效容量）决定了减振器的自然频率（公式1）。注意，公式中的压力（P）是与负载（W）成比例的，因此就算是负载发生变化也可以使自然频率保持不变。

公式1 *

$$F_n = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{nP(A_{eff})^2 g}{Vm}\right)^{\frac{1}{2}}$$

这里：Fn = 自然频率 (Hz)

g = 重力加速度 (m/s^2)

n = 气体绝热膨胀系数，等压比热与等容比热的比值（空气为1.4）

m = 负载 (kg)

A_{eff} = 气囊的有效面积 (m^2)

V = 气体容积 (m^3)

P_{abs} = 绝对压力 (bar)

气浮式减振器的刚度主要由空气腔的压力和容积决定。空气弹簧的刚度可以由气体定律中压力-容积关系决定，如果：

(a) 绝热压缩
(b) 容积的变化相对于初始容积来说，比较小

得出：

公式2

$$K = \frac{nP(A_{eff})^2}{V}$$

这里：

K = 刚度 (N/m)

n = 气体绝热膨胀系数（在频率低于1 Hz时，空气为1.0）

P_{abs} = 绝对压力 (bar)

A_{eff} = 空气腔的有效面积 (m^2)

从上述公式可以看出，支撑重量的响应是由无阻尼空气弹簧的容积决定的。

注意，即使我们选用薄的弹性气囊，它也能在较低压力状态下表现出附加刚度。这个附加刚度会影响减振器的充气分配。为了减小该附加刚度，工作压力应该高于3bar。另外，阀的刚度也会对减振器的整体刚度产生影响。

* 充气压力大于 3 bar

阻尼

减振器中阻尼的目的是尽快的吸收或减少能量。在共振时，阻尼也同样能减少振动的振幅。当震源的频率与减振器的自然频率相等时，就会产生共振现象。

如图5所示，理想的减振器应该在减振区域拥有尽量小的阻尼同时在自然频率下尽量多的减少共振振幅。然而，阻尼也同样能导致减振效率的降低。

阻尼腔与弹簧腔用气管相连，可以为减振系统提供垂直方向的阻尼。（见图4）当气体在两个腔体间流动时，会产生能量的变化，通过分析这个变化率可以得到阻尼的公式。该公式是弹簧腔和阻尼腔之间的气管和容量比的函数。

图4



为得到更好的减振方案，需要仔细考虑阻尼的问题。对于使用空气弹簧的大质量系统来说，阻尼对于阻止由于干扰引起的瞬时振动（例如大桥或平台的移动）和限制共振时的振幅是至关重要的。假定某个气体容量比，可以保证空气能够层流流入阻尼腔，通过该气体容量比可以确定气管的长度和直径。这种设计理念使得可以根据实际情况在较大范围内调整阻尼。无论大或是小的干扰，当空气是层流流入气管时，阻尼是最优的选择。

传输率

减振器的自然频率和阻尼特性决定了它的传输率。

传输率就是通过减振器的振动与干扰振动的比值。公式3 为传输率的基本公式。公式中，Fd 是干扰频率，Fn 是减振器的自然频率。

$$T = \frac{1}{\left(\frac{F_d}{F_n}\right)^2 - 1}$$ 公式3

考虑到阻尼，公式则变为公式4，ξ为减振器的阻尼。

$$T = \sqrt{\frac{1 + \left(2 \times \frac{F_d}{F_n} \times \zeta\right)^2}{\left[1 - \frac{(F_d)^2}{(F_n)^2}\right]^2 + \left(2 \times \frac{F_d}{F_n} \times \zeta\right)^2}}$$ 公式4

当共振产生时传输率的值最大，也就是当干扰频率和减振器的自然频率相等时（Fd / Fn = 1）。共振情况下，传输率的公式可表述为下面公式5。注意，在共振时减振器的振幅数量与减振器阻尼是函数关系。

$$T = \frac{1}{2\zeta}$$ 公式5

图5通过图表的形式显示了减振器的传输率与频率比的函数关系。图中可以看出不同阻尼对减振区域和振动扩大区域的影响，其中也包含共振时产生的最大振幅。

当干扰频率大于减振器自然频率的√2倍，开始减振（传输率减少）。频率比决定着减振效果的优劣。气浮式减振器的主要优点是它具有较低的自然频率和相对应的传输率。在10Hz高阻尼情况下，80%到90%的振动被衰减。

注意，随着阻尼的增加，传输率曲线变得扁平，也就是说接近共振区域曲线由高变低，但是在需要减振的区域，曲线又开始增强。曲线显示如果减振器的阻尼很大，为获得理想的减振效果，减振器的自然频率必须降低

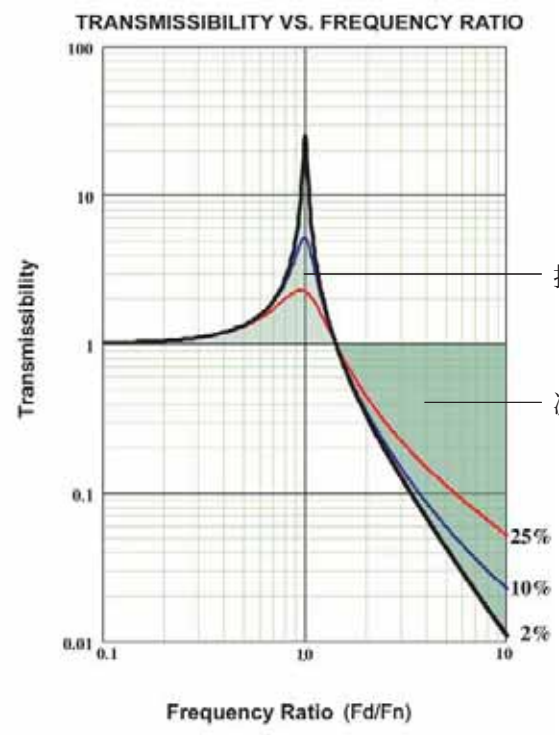


图5

理论上的传输比曲线不会标示出输入干扰振动的频率大小(Fd)。包括气浮式减振器在内的所有减振器，输入的干扰振幅下都显示出不同的动态自然频率。干扰振动小时，减振器变得较硬，因此具有稍高的自然频率。干扰振动变大时，减振器的表现更接近于它的理论传输率曲线。

实测的传输率曲线应该在测量过程中指出输入振动的振幅。

应用

无论是通过分析还是测试进行减振器的选择，都首先要对减振器的负载以及支撑基础进行动态的评估。结构的刚度较差可以导致减振效果的低下。支撑基础或者负载可以被看作为一个弹簧，它们的刚度可以通过测试或计算得到。如果负载的支撑结构太“软”并且在低频接近减振器自然频率附近产生弯曲或位移，减振系统的效果就会降低了。

为了确保减振器的减振效果如预期一样好，在设计实践中，支撑结构的动态刚度一般为减振器的10-20倍。每一种结构（框架、基础，惯性质量块）都有质量和刚度，因此有不同的共振频率。这些频率称为结构共振，与形状、支撑的方式和材料有关。

当采用气浮式减振器时，从传输率图中可以看出，在频率大于10Hz时，可以达到80-90%的减振效果。因此，如果支撑结构的刚度至少是减振器自然频率的10倍，在结构共振时的任何干扰振动都会被显著的降低。如果支撑结构是焊接的钢或者铝时，这点尤为重要。因为金属的阻尼都比较小，所以在共振被激励时，振幅都比较大。（见图6）

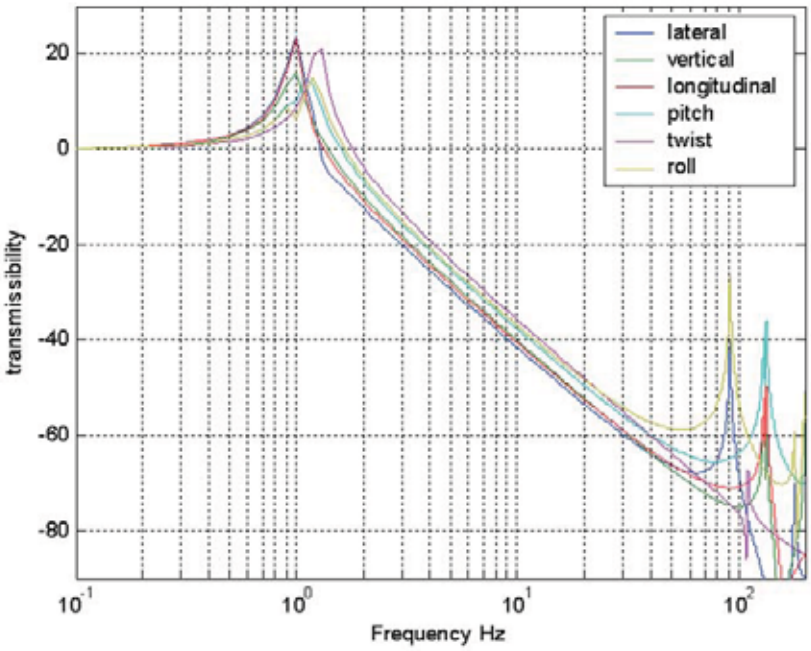


图6

图6的传输比曲线显示减振器的平动和转动频率，而且支撑基础的共振频率为80Hz以上。

当结构共振是有害的时候，一个有效的方法就是增加结构的阻尼，阻尼可以减少振幅。如果高频结构共振不会影响整个系统的运行，那么使结构变硬对于降低结构共振也是有帮助的。

正确使用气浮式减振器的第二个条件是减振器的摆放位置。在设计中，减振器气囊表面应该与负载和支撑结构的综合重心位于同一平面。如果按照这种形式，减振器就只会有平动模式（水平和垂直）。如果所有的减振器都是在做6轴自由的运动，当减振器置于重心之下时，转动模式也是存在的。（如图6）

当负载只有垂直方向的振动时，传输比曲线与理论曲线（图5）十分类似。然而，除了结构模式，当负载在水平方向振动并且系统的重心高于减振器气囊的平面时产生了摇摆模式。有害的摇摆模式可以通过改变减振器的位置来解决，也就是说转动模式和平动模式是同时存在的。

如果系统的重心高出减振器气囊平面很多，不稳定因素就出现了。气浮式减振器必须满足稳定系统的要求，所以减振器的摆放位置需要在稳定系统设计规定的限制之内。（如图7）

在行业标准中，将减振器的中心用一条线连接。该线为基线，构造一个垂直高度为基线长度1/3的三角形。如果负载重心在该平面上的投影在三角形内部，系统就是稳定的并且显示出有效的减振和阻尼特性。

注意：减振器在所有转动方向上的相对位置是设计稳定系统的首要考虑因素。另一个重要因素是减振器本身的设计。阻尼率、气体有效容积和阀流量都是变量。Fabreeka的工程师可以根据您的实际应用为您提供合适的减振方案。



图7

如果重心在三角形之外，系统很有可能会有稳定性的问题。在这种情况下，有时我们会在现场进行减振器的升级调整，例如通过增加阻尼或可变水平调节阀，从而达到系统的稳定。不过，增加阻尼会稍微增加系统的刚度，因此增加了每个减振器在垂直方向的自然频率。

设计服务

现场振动测量和分析

低频振动和冲击可以影响精密测量仪器的准确性，重复性和生产效率。绝大多数精密加工机械和测量仪器的生产厂商为保证他们产品的正常使用提出了相应的振动规范。Fabreeka利用高精度的仪器测量现场的振动频率和振幅，并提出合适的振动控制方案。

我们的工程师经常在世界范围内为客户进行振动测量和特殊的数据分析。

图8（右上角）振动测量软件记录了振动的振幅和频率，以供日后分析。Fabreeka全球各个公司都可以提供此服务。

图9（右边中间）现场振动水平与设备提供商的规范进行对比，进而确定在振幅超出机器允许范围的频率，需要减振的效率。

图10（左下角）Fabreeka工程师也可以在减振系统安装后做验收振动测试。验收测试可以提供减振后的振动振幅。





图8

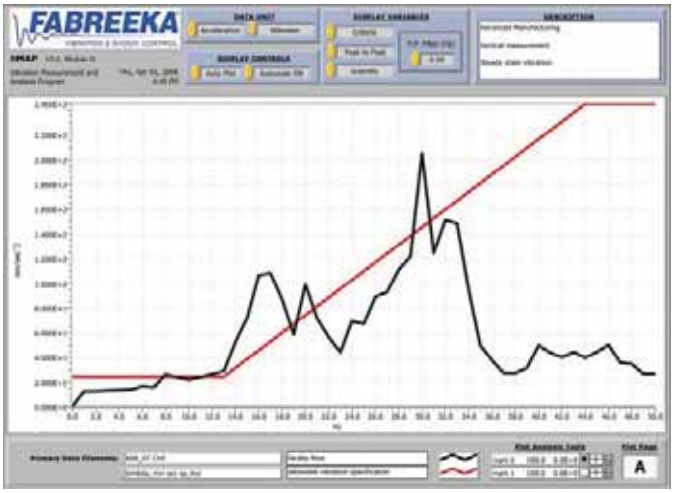


图9

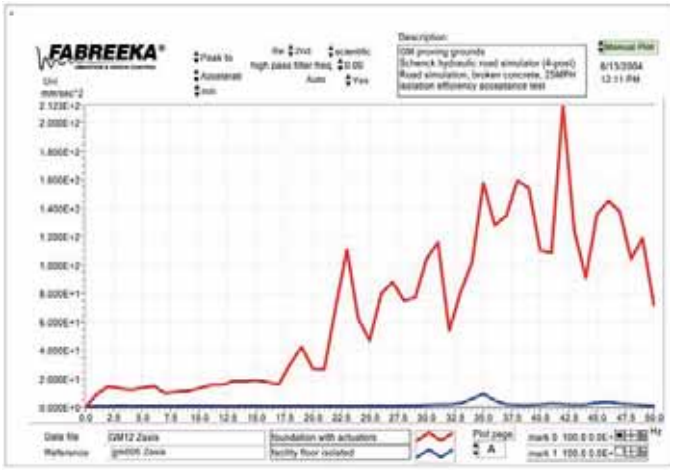


图10

动态分析和有限元分析

正如在第七页中技术讨论部分所述，支撑结构的动态反应也是整体减振方案的一部分。

在关键点通过变化刚度，质量和阻尼调整振幅时，检查振动结构中的模态图形是非常有价值的一步。

通过有限元分析，可以明确反映出结构的振型、响应频率以及隔振系统对于设备干扰的输入和（或）环境干扰输入的响应。

模态结构（每个轴的刚度）标示了每个频率下结构的物理趋势和任何变形，例如弯曲或扭转。总的来说，结构的模态表明了这种结构上各个节点与结构刚度的相关程度。（见图11）

在向客户提供任何支撑结构和基础的设计时必须同时提供可靠的、符合静态和动态准则的结构配置。由于静态负载或者外力引发的偏移应该在可接受的范围之内。设计要尽可能接近实际的结构，这样就可以预测实际结构的反应并且使得出错率是最小的。

支撑结构的刚度计算可以得出结构的静态和动态的表现和应力集中的发生点。应力和结构的几何形状、负载和受力的分布是相关的。应力分析可以显示出静态和动态载荷所施加的应力值。（见图12）

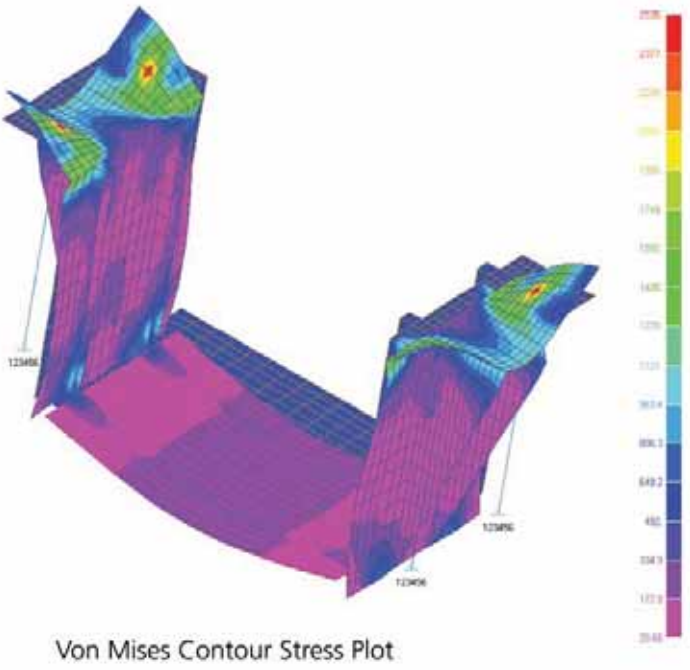
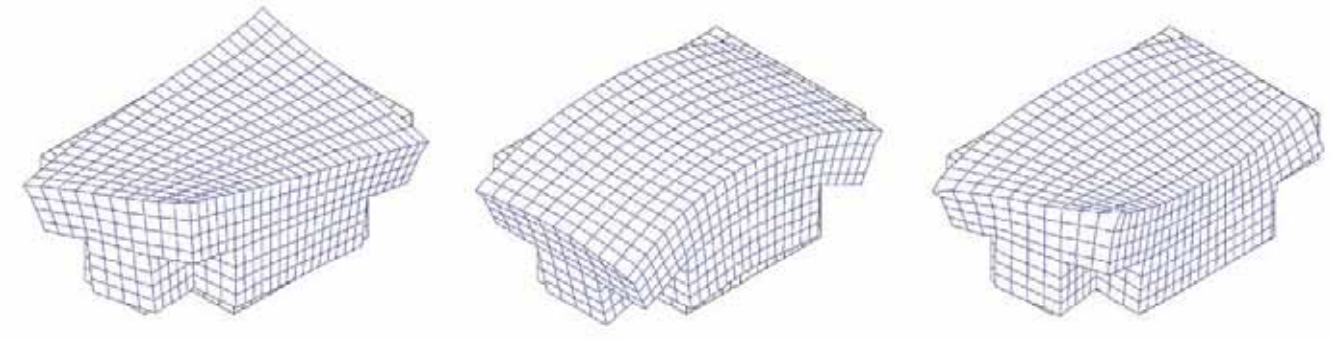


图12

电子显微镜的支撑钢架的应力分析。此分析还包括结构的动力模态分析（共振）。



Mode 7: 69.58533 Hz.　　Mode 8: 73.43653 Hz.　　Mode 9: 99.11916 Hz.

图11

MRI混凝土基础的前三个结构模态

产品

精密气浮式减振器（PAL）

精密气浮式减振器能够为计量器具，电子显微镜，核磁共振设备，测量三坐标和精密加工设备提供极低频率下的减振功能。

Fabreeka的精密气浮式减振系统采用伺服控制的空气弹簧。在需要同时控制高度和振动的条件下，这种减振器是非常理想的。Fabreeka PAL减振器满足了计量器具，电子显微镜，检测设备和精密加工设备的严格要求。

PAL减振器描述

标准的Fabreeka PAL减振器拥有低至1.7Hz的固有频率。某些订制产品的固有频率可以低至0.5Hz。

完整的Fabreeka PAL系统包含至少3个主动减振器（因为3点决定一个平面）。每个减振器都有一个水平调节阀，它是负载传感器和高度控制单元。可以根据设备的重量增加所需从动减振器的数量。

减振系统会配置一个控制盒，高度自动控制阀，连接管路和其他安装用的配件。



PAL减振器装在ZEISS坐标测量机的支撑框架



PAL减振器的性能

PAL减振器可以自动回复到原定的水平位置，进而对于支撑负载的变化和重心的转移做出快速的反应。

气浮式减振系统的性能是需要在减振器固有频率，水平调节阀的精度和系统回复稳定时间这三个因素之间相互协调的。

对于一个确定的输入干扰振动，回复稳定时间是指减振器回复到初始设定位置的时间。这个干扰可以是外界的或者是机器本身引起的，例如龙门吊架或者机台的运行。

最短的回复稳定时间取决于最佳的阻尼和对应的阀流量。回复稳定时间过长的气浮式减振器是不可接收的，因为精密测量和定位机械可能会因此产生重复性误差和生产效率的下降。

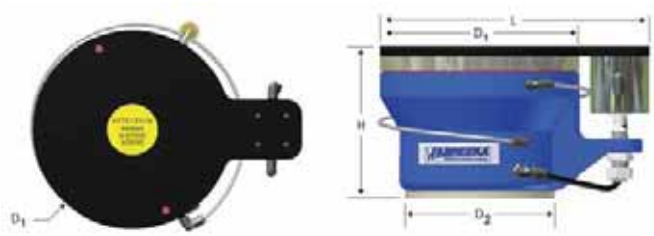
针对不同的案例，Fabreeka可以提供不同的水平调节阀。在减振方案的设计中，阀的流量、刚度和精度都是主要的参数。Fabreeka的水平调节阀的精度可以达到+/- 0.15 mm 或 +/- 0.025 mm。阀的流量和刚度可以根据减振器的设计和阻尼来选择。

FABREEKA
VIBRATION & SHOCK CONTROL

PAL减振器的特性/规格

固有频率	(-6)	(-12)
垂直	2.5 - 2.7 Hz	1.5 - 1.7 Hz
水平	2.0 - 4.5 Hz	2.0 - 4.5 Hz
阻尼		
垂直(可调节)	6% - 20%	6% - 20%
水平	5% - 6%	5% - 6%

PAL减振器的尺寸 *



* 实际尺寸可能会变化，请与Fabreeka核实。

			H	H		Max Lifting Capacity[1]	
Type	D1	D2	Deflated	Max. Lift	L	lbs	Kg
PAL 18-6	6.50 in 165 mm	6.00 in 152 mm	6.00 in 153 mm	6.25 in 160 mm	9.21 in 234 mm	1,800	800
PAL 21-6	7.87 in 200 mm	5.90 in 150 mm	6.00 in 153 mm	6.40 in 163 mm	10.60 in 270 mm	2,100	950
PAL 21-12	7.87 in 200 mm	7.87 in 200 mm	12.00 in 305 mm	12.40 in 315 mm	10.60 in 270 mm	2,100	950
PAL 36-6	8.65 in 220 mm	7.50 in 190 mm	6.00 in 153 mm	6.40 in 163 mm	11.40 in 290 mm	3,600	1,630
PAL 55-6	10.25 in 260 mm	9.00 in 230 mm	6.00 in 153 mm	6.40 in 163 mm	13.00 in 330 mm	5,500	2,500
PAL 55-12	10.25 in 260 mm	10.25 in 260 mm	12.00 in 305 mm	12.40 in 315 mm	13.00 in 330 mm	5,500	2,500
PAL 75-6	11.80 in 300 mm	10.45 in 265 mm	6.00 in 153 mm	6.40 in 163 mm	14.55 in 370 mm	7,500	3,400
PAL 133-6	15.00 in 380 mm	13.78 in 350 mm	6.00 in 153 mm	6.40 in 163 mm	17.70 in 450 mm	13,300	6,030
PAL 133-12	15.00 in 380 mm	15.00 in 380 mm	12.00 in 305 mm	12.40 in 315 mm	17.70 in 450 mm	13,300	6,030
PAL 255-6	20.87 in 530 mm	18.50 in 470 mm	6.00 in 153 mm	6.50 in 165 mm	23.60 in 600 mm	25,500	11,560
PAL 255-12	20.87 in 530 mm	18.10 in 460 mm	12.00 in 305 mm	12.50 in 317 mm	23.60 in 600 mm	25,500	11,560
PAL 416-8	25.20 in 640 mm	23.00 in 585mm	8.00 in 203 mm	8.45 in 215 mm	28.00 in 710 mm	41,600	18,870
PAL 1000-6	37.40 in 950 mm	35.80 in 910 mm	6.00 in 153 mm	7.00 in 178 mm	40.15 in 1020 mm	100,000	45,360
PAL 1000-18	35.98 in 914 mm	35.98 in 914 mm	17.70 in 450 mm	18.70 in 475 mm	39.00 in 990 mm	100,000	45,360

[1]最大工作压力为 7 bar

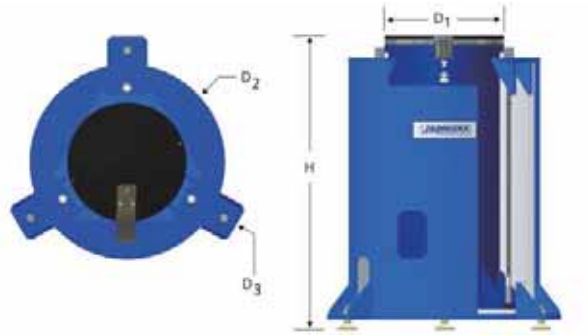


PAL减振器的特性/规格

单摆式减振器

	(-15/-19)	(-36)	(-52/-60)
固有频率			
垂直	1.3 - 1.5 Hz	0.9 - 1.0 Hz	0.7 - 0.9 Hz
水平	1.3 - 1.5 Hz	0.6 - 0.7 Hz	0.4 - 0.5 Hz
阻尼			
垂直(可调节)	6% - 20%	6% - 20%	6% - 20%
水平(可调节)	3% - 6%	3% - 6%	3% - 6%

PAL减振器的尺寸 *



* 实际尺寸可能会变化，请与Fabreeka核实。

			H	H		Max Lifting Capacity[1]	
Type	D1	D2	Deflated	Max. Lift	D3	lbs	Kg
PAL 21-15P	7.87 in 200 mm	11.00 in 279 mm	15.00 in 381 mm	15.40 in 391 mm	N/A	2,100	950
PAL 55-15P	10.25 in 260 mm	18.50 in 470 mm	15.00 in 381 mm	15.40 in 391 mm	23.75 in 603 mm	5,500	2,500
PAL 55-52P	10.25 in 260 mm	18.50 in 470 mm	52.00 in 1321 mm	52.40 in 1331mm	23.75 in 603 mm	5,500	2,500
PAL 75-19P	11.63 in 295 mm	14.88 in 378 mm	19.00 in 483 mm	19.40 in 493 mm	N/A	7,500	3,400
PAL 133-36P	15.00 in 380 mm	24.50 in 622 mm	36.00 in 914 mm	36.40 in 924 mm	31.50 in 800 mm	13,300	6,030
PAL 133-60P	15.00 in 380 mm	24.50 in 622 mm	60.00 in 1524 mm	60.40 in 1534 mm	31.50 in 800 mm	13,300	6,030
PAL 255-36P	20.87 in 530 mm	30.50 in 775 mm	36.00 in 914 mm	36.45 in 926 mm	37.50 in 953 mm	25,500	11,560
PAL 255-60P	20.87 in 530 mm	30.50 in 775 mm	60.00 in 1524 mm	60.45 in 1536 mm	37.50 in 953 mm	25,500	11,560
PAL 416-36P	25.20 in 640 mm	36.50 in 927 mm	36.00 in 914 mm	36.45 in 926 mm	45.00 in 1143 mm	41,600	18,870
PAL 416-60P	25.20 in 640 mm	36.50 in 927 mm	60.00 in 1524 mm	60.45 in 1536 mm	45.00 in 1143 mm	41,600	18,870

[1]最大工作压力为 7 bar

单摆式减振器

采用特殊设计的气囊，可以使减振器的水平自然频率接近1.5Hz。另外，用单摆式减振器，水平方向的自然频率可以低至0.4Hz。单摆式减振器的自然频率可以根据公式6算出，其中L等于单摆的长度。

$$F_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{L}}$$ 公式6

在右方，PAL 133-36P单摆式减振器用来支撑大型核磁共振下重量为36000公斤的混凝土质量块。垂直和水平方向的自然频率分别是1.0 Hz 和 0.7 Hz。



客制/OEM 减振器

Fabreeka可以按照客户具体需求订做减振器，使其更好的满足客户机器的设计要求。在洁净室的应用中，水平调节阀排放出的气体被排到室外，减振器也要选用适合洁净室要求的材料和包装。此外，也可以用非磁性材料制造减振器。



			H	H		Max Lifting Capacity[1]	
Type	D1	D2	Deflated	Max. Lift	L	lbs	Kg
PAL 3-2.5	3.20 in 80 mm	3.20 in 80 mm	2.50 in 64 mm	2.75 in 70 mm	6.20 in 157 mm	260	115
PAL 4-3.5	6.00 in 152 mm	4.00 in 102 mm	3.50 in 89 mm	3.75 in 95 mm	8.00 in 203 mm	295	130
PAL 5.5-2.5	3.95 in 100 mm	3.95 in 100 mm	2.50 in 64 mm	2.75 in 70 mm	6.95 in 177 mm	480	210
PAL 9-4	5.10 in 130 mm	5.10 in 130 mm	3.65 in 94 mm	3.95 in 100 mm	8.15 in 207 mm	735	330
PAL 9-6	5.10 in 130 mm	5.10 in 130 mm	6.00 in 153 mm	6.25 in 159 mm	8.71 in 221 mm	735	330

[1]最大工作压力为 7 bar



PAL 5.5 - 2.5





100,000级的洁净室中使用的减振器

水平调节阀

Fabreeka可以提供多种水平调节阀。精度从+/- 0.15 mm到+/- 0.025 mm*，具有可调节流量，以满足使用的要求。阀的刚度，流量和精度是决定减振系统最佳稳定时间和减振效率的重要参数。

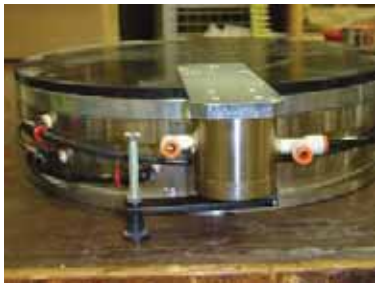
* 杠杆臂会改变调节阀的精度，不过会增加可调节行程。



PALV 5-5 阀



带有杠杆臂的水平调节阀



带有杠杆臂的水平调节阀



PAL与水平调节阀

摇篮式平台和机台架

摇篮式平台和订制的机台架可以降低系统的重心，从而增加了气浮式减振系统的稳定性。

正确使用气浮式减振器的一个重要条件就是将减振器放置于需要减振的设备之下。在系统的设计中，减振器的弹性平面应该尽可能的接近有效载荷负载和其支撑结构的重心。

当有效载荷在水平方向上振动时其重心高于减振系统的弹性平面，就会产生摇摆现象。如果重心高于弹性平面很多，整个系统则会出现不稳定。气浮式减振器的放置位置一定要满足稳定系统的要求。（见第8页，图7）

使用摇篮式平台可以使减振器更接近重心，进而减少摇摆现象。（参阅右上角插图）当不能对机器的底部进行修改用来放置减振器的情况下和需要刚性支撑框架的系统，都可以使用摇篮式平台。

摇篮式平台的结构和动态设计是十分重要的。（见第10页，图12）在使用PAL或者PLM减振器时，控制设备本身重量引起的压力和形变（弯曲）和动态刚度（结构共振）是成功方案的一个组成部分。









气囊型气浮式减振器

气囊型气浮式减振器能够为试验台，大型质量块，或者需要大的动态位移和提升高度的应用提供低频减振。

气囊型气浮式减振器在垂直和水平方向拥有1.2Hz至4.0Hz的固有频率，具体频率取决于浮起的高度和气囊的式样（单曲、双曲或者多曲气囊）。水平弹簧常数（刚度）和气囊稳定性也是浮起高度的函数。所以，每种式样的气囊都有最佳浮起高度。通过增加空气的容积，例如增加辅助气罐，可以降低垂直方向的固有频率。

气囊型气浮式减振器的特色之一就是它能提供较大的位移行程。不同式样的气囊型减振器的浮起或升起高度可以达到50.8mm至76.2mm。因此，它可以在需要大的动态位移的案例中应用。

气囊型和隔膜型的气浮式减振器都具有非常低的阻尼（3%-4%），只有将阻尼腔连接到空气腔才能增加它的阻尼。大多数的减振设计需要10% - 15%的阻尼，取决于案例、减振器的型号和回复平稳时间。

完整的减振系统包含至少3个主动减振器（因为3点决定一个平面）。每个减振器都有一个水平调节阀，它是负载传感器和高度控制单元。可以根据设备的重量增加所需从动减振器的数量。

减振系统会配置一个控制盒，高度自动控制阀，连接管路和其他安装用的配件。



气囊型气浮式减振器能够提供低的固有频率和大的动态位移行程。



配有阻尼腔的单曲气囊型减振器和水平调节阀用在电磁振动台的质量块下。



双曲气囊型减振器配有辅助气罐、阻尼腔和水平调节阀。用在测功机台架的质量块下。

ΔK™ 变频精密气浮式减振系统

低频、大振幅的振动可以影响精密测量仪的准确性、重复性和工作效能。气浮式减振系统需要能够隔绝环境的振动和冲击，使工件和探针的相对位移最小。

Fabreeka Delta K™ (ΔK™) 控制组件配合低频气浮式减振系统不仅可以隔绝环境的振动还可以提高测量仪的重复性和工作效能，使得测量仪在恶劣环境中在设计加速度下运行。

工作原理

任何需要快速测量的精密测量仪，需要气浮式减振系统进行减振，都应考虑应用ΔK控制组件。ΔK控制组件在测量仪移动时具有高的（硬）弹簧常数，而在测量时具有低的（软）弹簧常数。

测量仪的移动部分加速和减速接近被测点时，具有高阻尼的硬减振器可以防止机器过多的移动，从而减少回复平稳时间保证测量精度。在开始测量时，ΔK控制组件从探针或机台控制器中接收到信号，随即更改减振系统的刚度和阻尼，使该系统转换成较为较软的系统。事实上，减振器进行了刚度的转变（即英文Delta K的含义）。（见图13）

Fabreeka ΔK控制组件的优点：

- 改善精密测量仪的重复性
- 快速的回复时间
- 允许精密测量仪以100%原设计加速度进行测量，而不影响精度或重复性
- Fabreeka ΔK控制组件可以安装在已经配有Fabreeka气浮式减振系统的测量仪上，用来改善测量仪的性能
- Fabreeka ΔK控制组件可以配合触发型和应变型探针





ΔK气浮式减振系统应用在Brown & Sharpe Global 7.10.7 CMM中，允许其在设计速度和精度内进行测量。

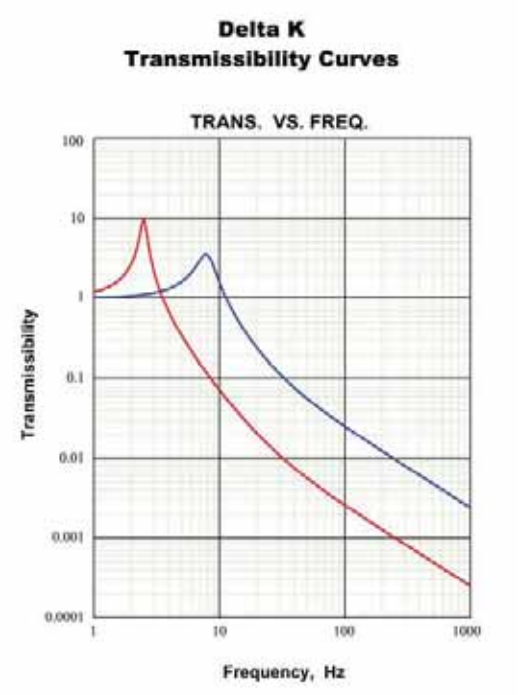


图13

精密气浮式-数字电子水平控制器（PA-DEL®）

PA-DEL数字电子水平控制器用在对于水平精度要求较高，并且要求减振器回复时间较短的减振系统中。



PA-DEL采用数字控制器，非接触式位置传感器和大流量电子阀，来增强自动水平的气浮式减振系统的性能。位置传感器和电子阀使得减振器以快于传统机械式水平调节阀三倍的速度重新调至水平位置。PA-DEL的水平精度为+/- 20 µm（微米），电子阀可以根据减振器的尺寸调整流速。PA-DEL可以安装在现有的Fabreeka气浮式减振系统，用来改善测量仪的生产效能而又不牺牲减振的需要。

操作特性

- 全电子控制电路（控制器、放大器，阀）对信号进行正向和回馈处理
- 电子控制演算法提供最佳控制参数，和调整脉冲宽度/脉冲频率
- 部分加载/卸载时，可泄压或停留在默认位置
- 控制器的编程和控制参数的设定是通过串行端口完成的
- 如果将PA-DEL控制器与现有的SPS机控器连接，PA-DEL控制器有可能实现流程自动化
- 可配置遥控器，所以大型项目的调平工作可由一人完成
- 可装入标准的19英寸机箱或安装独立机箱

位置控制

- 使用非接触式位置传感器，因此在被减振机器和外界环境之间不可能发生振动短路现象
- 传感器测量范围达45mm
- 可提供订制传感器（电压型或电流型）
- 位置控制精度可达+/- 20 µm，取决于不同的应用



快速充泄压系统 (RDS)

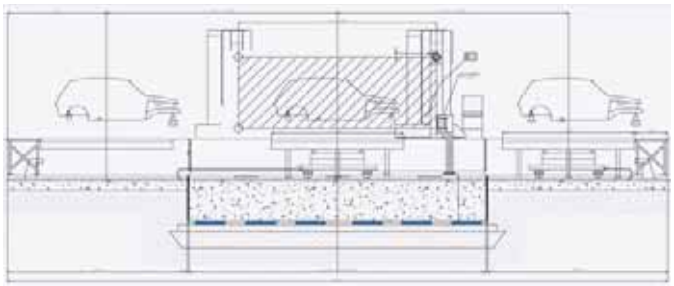
在进行某些测量时，要求精密测量仪在加载/卸载前必须位于参考基准位置，RDS特别适合在这种情况下应用。

RDS可以安装在减振系统的控制盒里，用来快速升起或降低减振系统所支撑的机器。对于需要减振地基和许多减振器的大型测量仪来说，能够快速的充放气是非常重要的。

RDS的充放气速度一般是通过水平调节阀充放气的5-10倍。RDS所用的压力只有0.7 bar，所以减振器可以保持部分压力直到再充气。将RDS和现有的机器控制器相连，有可能实现流程自动化。







现有系统可以在现场加装RDS系统

位置监控系统 STATUS

STATUS 控制器运用距离感应器来监控气浮式减振系统的浮起或充气位置。感应器可以安装在任何减振系统的三个主动减振器上。

在充气过程中，如果任何一个主动减振器的位置低于可接受的浮起位置，***STATUS*** 控制器上对应的红灯就会亮起。可以在控制器上加装声音报警。

通常情况下，当减振系统安装在大型减振基础下时，我们不可能亲眼证实减振器在正确的浮起位置。当水平调节阀受到压缩空气中的水分和油污染时，会导致减振器的泄压。



STATUS可以安装在现有气浮式减振系统或减振桌上

精密气浮式减振垫脚（PLM ）

Fabreeka PLM可以为三坐标测量仪、风机、空压机、电动机/发电机组，高速冲床等提供低频减振和冲击控制。

Fabreeka PLM系列减振垫脚为低频减振器，它不但能减少干扰振动还能为机器做水平调节。

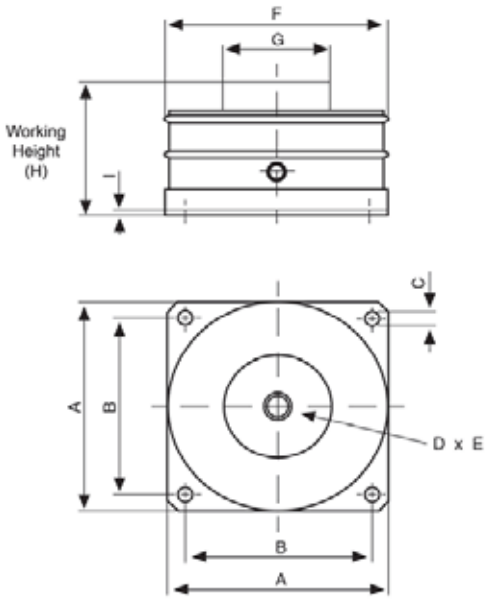
在减振的应用中，PLM的充气部分可以大幅度降低5Hz以上的振动。PLM的固有频率可以低至3Hz。

不充气的PLM减振垫脚在垂直方向同样有约10Hz的固有频率，可以隔绝14Hz以上的振动。

垂直和水平方向的固有频率比大约为1:1，可维持较高的水平方向稳定性。

在减少冲击的应用中，PLM橡胶外壳为高压缩形变提供了支撑。利用外在的垫片可以防止PLM底部涨脱，以保持3.0 Hz的自然频率。







左图中，电磁振动台产生80kN至222 kN的力。该设备安装在PLM上，减少了试验过程中的振动。

PLM规格说明

Model	Dimensions									Max Load
	A	B	C	D*	E	F	G	H	I	
PLM 1	3.00 in 76 mm	2.38 in 60.5 mm	0.28 in 6.9 mm	0.375-16 M10	0.47 in 12.0 mm	2.88 in 73 mm	1.00 in 25 mm	2.50 in 65 mm	0.125 in 3.2 mm	100 lbs 45 Kg
PLM 3	4.19 in 106 mm	3.50 in 89 mm	0.28 in 6.9 mm	0.500-13 M12	0.53 in 13.5 mm	4.14 in 105 mm	1.75 in 44 mm	2.45 in 65 mm	0.125 in 3.2 mm	300 lbs 136 Kg
PLM 6	5.12 in 130 mm	4.25 in 108 mm	0.29 in 7.4 mm	0.500-13 M12	0.53 in 13.5 mm	4.99 in 127 mm	2.13 in 54 mm	3.50 in 90 mm	0.125 in 3.2 mm	600 lbs 272 Kg
PLM 12	6.88 in 175 mm	6.00 in 152 mm	0.29 in 7.4 mm	0.500-13 M12	0.53 in 13.5 mm	6.74 in 171 mm	3.00 in 76 mm	3.50 in 90 mm	0.125 in 3.2 mm	1200 lbs 544.3 Kg
PLM 24	10.0 in 254 mm	8.50 in 216 mm	0.56 in 14.2 mm	0.625-11 M16	0.75 in 19.0 mm	9.66 in 245 mm	4.75 in 138 mm	3.50 in 90 mm	0.188 in 4.8 mm	2400 lbs 1089 Kg
PLM 48	13.50 in 343 mm	12.00 in 305 mm	0.56 in 14.2 mm	0.625-11 M16	0.75 in 19.0 mm	13.31 in 338 mm	7.50 in 190 mm	3.50 in 90 mm	0.188 in 4.8 mm	4800 lbs 2177 Kg
PLM 96	18.50 in 470 mm	16.00 in 406 mm	0.81 in 20.6 mm	1.000-14 M24	0.88 in 22.4 mm	18.44 in 468 mm	10.50 in 267 mm	3.50 in 90 mm	0.250 in 6.4 mm	9600 lbs 4354 Kg
PLM 192	24.00 in 610 mm	20.00 in 508 mm	0.81 in 20.6 mm	1.000-14 M24	0.88 in 22.4 mm	24.00 in 610 mm	15.75 in 400 mm	3.50 in 90 mm	0.250 in 6.4 mm	19200 lbs 8709 Kg

* 实际尺寸可能会变化，请与Fabreeka核实。

PLM 特点

Fabreeka PLM的设计中包括模制螺纹接头，可供安装标准气阀或连接供气管路供气。不需额外的转接头。

PLM配以气阀可以通过手动打气筒或连接压缩空气进行充气与调平。如果通过充气管路，PLM可以与专用高压空气相连，很容易的进行充气和调平。不配水平调节阀的PLM，可以通过安装调节控制板（右图）来调整压力和高度。

PLM也可以与水平调节阀配套，用来控制高度。每个主动PLM减振垫脚都会配一个水平调节阀，它同时也可以作为负载传感器和控制高度元件。可以根据设备的重量，任意增加PLM的数量。

PLM减振系统可以配置一个控制盒，高度自动控制阀，连接管路和其他安装用的配件。







PLM-3减振器安装在Zeiss EVO系列扫描电子显微镜的支架中，使得放大超过30万倍的X射线几何和电子成像可以清晰的呈现。



当需要对高度进行自动控制时，体积较小的水平调节阀可以与PLM配套使用

应用

精密加工设备

精密机床加工精度的要求日益提高。利用纳米技术，可以使机器在做剪切、旋转、抛光和定位时达到微米级甚至埃级（0.1纳米）的精度。

超高精度的设备在许多行业中应用，包括半导体晶片加工、光学/镜头加工和非标材料的加工。

高精度定位设备包括钻石车削机床、X-Y坐标机和CD计量仪，通常用激光干涉法对材料定位，用以进行纳米指标检测。此外，如表面光度仪，轮廓度仪，粗糙度仪和圆度仪等设备需要提供亚微米级的测量。

设备功能包含对光学玻璃，晶体，非铁金属，高分子材料和陶瓷材料的超精密车削和微磨。通常上述材料的表面需要加工到不需要或（需要少量）抛光就达到亚微米级的表面光滑度。例如CD，隐形眼镜模具，光学镜片和激光镜等就是这样加工出来的。

Fabreeka为这些设备生产厂和最终用户提供低频振动和冲击的解决方案，以维持设备的设计精度。某些应用中需要订制系统，需要将结构分析、支撑结构的设计与减振系统的设计，一起结合到设备的设计中。



(照片采自X-TEK)



(照片采自Precitech)



(照片采自Precitech)



(照片采自Motion X)

测量机

三坐标测量仪的测量速度和精度正在逐年改善。新的坐标机的设计与生产的前提条件是车间地板是坚硬的，所以当坐标机在生产线上应用时可以达到其测量的重复性。振动是其中一个能够影响坐标机精度和重复性的环境因素。

理想情况下，如果坐标机的所有组件，包括被测工件，都在某一特定频率、振幅、相位和方向上一致地振动，那么就不会有测量性能下降的问题。对于坐标机来说，既然所有组件都是同步的，那么该情况就相当于无振动干扰的情况。当组件的振动开始不同步或者结构共振发生时，测量准确性的问题就会发生了。

为了不损失测量的准确性，三坐标的生产商都为最终用户提供了机器可接受的最大振动水平。如果在考虑一台三坐标是否需要减振系统时，这个最大振动指标是一个重要因素。



减振系统在多轴高精密-光学微结构钻石切削加工系统中应用





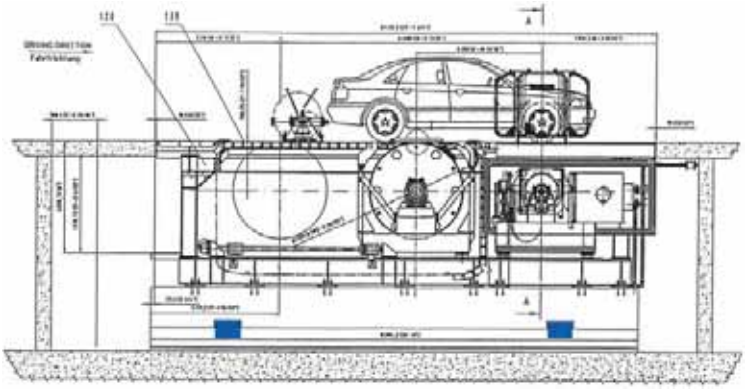


汽车测试

Fabreeka 在汽车测试领域一直居于领导地位，能够为模拟环境汽车测试提供减振系统和设计技术，同时满足日益增加的汽车测试的要求。Fabreeka可为测功机、发动机测试台、道路模拟器和多轴向振动台提供减振方案。Fabreeka可为客户提供以下专业技能服务：支撑结构与混凝土质量块的设计，动态和静态分析和验收测试。



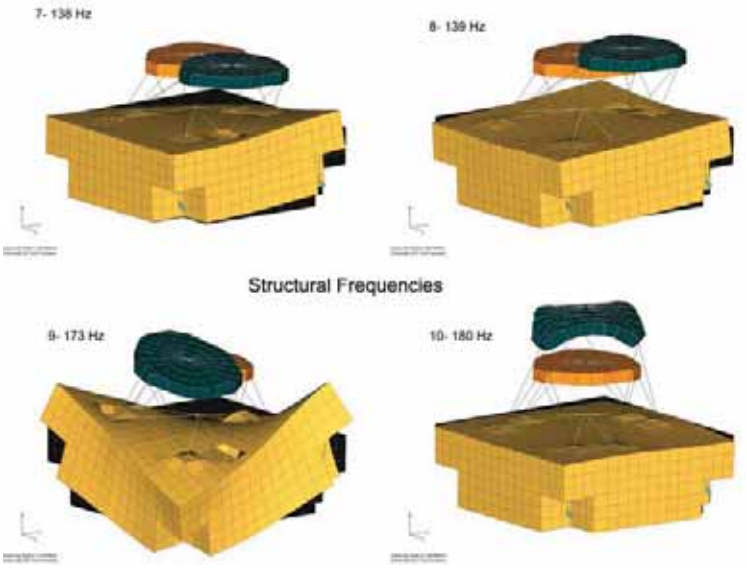
奔驰 - 四柱激励道路模拟器



丰田 - 滚动道路测试器在减振基础上



奥迪 - 发动机测试/测功机台架与基础支撑



多轴向振动台的动态分析



(照片采自 Schenck)

航空航天测试

Fabreeka的低频减振系统应用于航空航天和国防领域的重要测试中，该应用通常要求超低频的减振。该领域的应用通常包含纳米级的测量（测量误差低于数微米或十分之一角秒内）。

大型航天器或入轨道的硬件试验均需要在与太空类似的环境下进行。通常需要运用真空罐或高低温真空罐来模拟发射和太空飞行时的压力和温度效应环境。

如果真空罐的尺寸或已在使用的真空罐无法容纳外部减振设施，而测试负载又必须在真空罐内进行减振。此时必须使用与真空罐相兼容的减振系统。当减振器在真空罐内使用时，必须符合严格的材料规范以限制材料分子逃逸，同时还要满足特别真空度的要求。此外，在低温真空罐中，减振器需要在极限温度下使用，通常需使用加热毯来保持减振器达到可正常使用的温度。

真空兼容的气浮式减振材料的总质量损失率(TML)为0.85%，可挥发物比例(CVCM)为0.09%。Fabreeka设计的减振系统可以在真空度为 1.33×10^{-4} Pa的环境下运行，并有 1×10^{-7} cc/sec的最大泄露率。





（照片采自 NASA）



（照片采自 B.F. Goodrich）



软支撑系统在飞机模态测试中的应用

Fabreeka 为飞机的地面振动测试（GVT）设计了一系列选用标准和订制气浮式减振器的软支撑减振系统（SSS）。为了在GVT测试中得到准确的测试结果，飞机的模态测试必须模拟自由飞行的状态。为模拟出此状态，Fabreeka配合飞机的结构与动力测试工程师研发出软支撑减振系统。

在做飞机的动力测试和模态/抖动分析时，SSS系统中气浮式减振器将飞机与地面分离。SSS系统在识别飞机结构共振与确认机翼抖动模式上极为重要。SSS系统还包含有千斤顶系统，能在起落架位置将飞机浮起。



（照片采自欧洲航空航天和国防系统）

用于GVT测试的气浮式减振器的垂直和水平方向的固有频率要低至0.5Hz。





巴西航空工业公司的190飞机
（照片采自巴西航空工业公司）





F-35联合打击战机（照片采自洛克西德马丁）

磁共振成像与核磁共振扫描设备(MRI/NMR)

Fabreeka一直致力于减振技术的研发，这一点可从我们的专业技术、产品知识和我们为客户提供的设计方案中得到印证。Fabreeka已为所有类型、大小从300 MHz到900 MHz、高分辨率的磁共振成像（MRI），核磁共振扫描设备（NMR）和低温恒温设备提供低频减振产品。

所有用于NMR的气浮式减振器的金属均采用非磁性材料如不锈钢，铝或铜制成，减振器的高度被设计来配合现有的磁场支撑架。

减振的整体方案还包括，现场振动的测量、支撑结构的设计（包含结构、动力分析）。

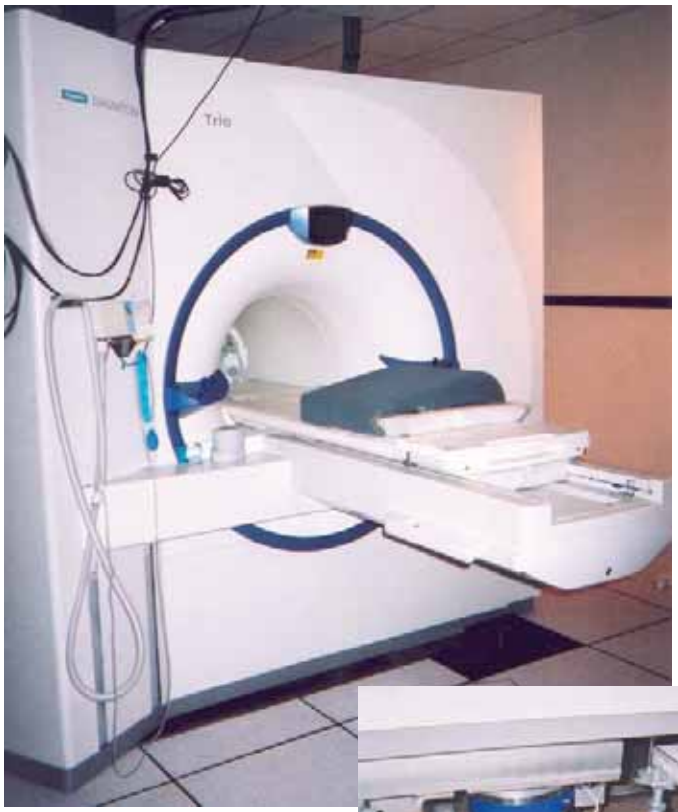


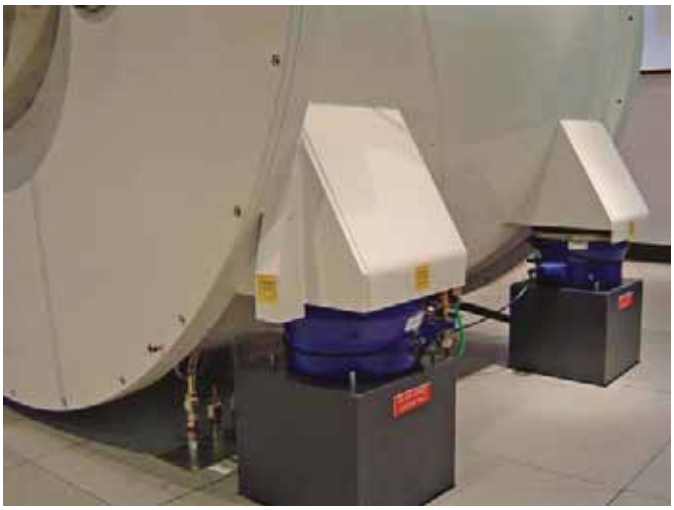


左上图，三个PAL133-72P减振器支撑800MHz的核磁共振磁体 （照片由Magnex Scientific提供）

右上图，NMR磁体的减振器高度达710mm至1830mm，在垂直和水平方向上的固有频率低至0.8Hz。

（照片采自 Cleveland Clinic）





瓦里安横式低温恒温设备
（照片由Astra-Zeneca 阿斯利康制药有限公司提供）



MRI设备减振系统通常是，将气浮式减振器置于下凹式平台或惯性质量块的下方，MRI设备由下凹式平台或惯性质量块支撑于检查室地板上。

FABREEKA®
VIBRATION & SHOCK CONTROL



