

# 新型磁流变阻尼器的设计和试验

赵晓文<sup>1</sup>, 姚凯<sup>1</sup>, 侯忠明<sup>1</sup>, 杜彦亭<sup>2</sup>

1. 总后建筑工程研究所, 西安 710032
2. 西安交通大学机械学院, 西安 710049

**摘要** 针对磁流变阻尼器存在的过热、结构复杂、磁场利用率不高和沉淀等问题, 结合车辆减振对阻尼器拉压阻尼力成比例控制的需求, 设计了磁场外置的旁路式、液体单向流动的新型车用磁流变阻尼器, 并完成样机试制和台架拉压试验。新型磁流变阻尼器在工作原理和结构上都有突出特点, 有效解决了磁场利用效率, 输出拉、压力的匹配, 沉淀和多自由度受力的问题。将阻尼发生装置设计成外置串联结构, 线圈置于缸筒内且靠近筒壁, 减小了阻尼器的径向尺寸, 散热条件好, 便于维修。实验设计准确合理。通过试验分析励磁电流、振幅、频率对阻尼力的影响, 新型磁流变阻尼器的拉压阻尼力成比例控制结构设计合理有效, 可满足车辆减振对阻尼器阻尼力控制的要求; 平行圆盘缝隙式阻尼发生装置能明显提高磁流变阻尼器的磁场利用率, 使阻尼力范围更大, 更易控制。新型磁流变阻尼器的设计为改进和其性能提供了新的技术途径, 为车辆减振应用提供了一种有效可行的新型阻尼装置和重要的研究依据。

**关键词** 车辆; 磁场外置; 旁路式; 单向流动; 磁流变阻尼器

**中图分类号** TH122

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2010)13-0047-05

## Design and Experimental Study of the MR Damper

ZHAO Xiaowen<sup>1</sup>, YAO Kai<sup>1</sup>, HOU Zhongming<sup>1</sup>, DU Yanting<sup>2</sup>

1. Architecture Engineering Research Institute, General Logistics Department, Xi'an 710032, China
2. Institute of Mechanical, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

**Abstract** In consideration of problems of current magnetic rheology damping devices concerning overheating, structural complexity, low magnetic field utilization ratio and precipitations, based on the requirement for the vehicle's shock absorption, which should be proportionally controlled with the damping device, this paper presents a design of a new-type magnetic rheology damping device for vehicles that adopts an external magnetic field of bypass type and a one-way liquid flow, for which the advanced development and test phases have already successfully completed. The new magnetic rheology damping device has prominent features in its working principle and structures, including the efficient use of magnetic field, the matching of pull and push forces, and the handling of precipitation and forces of multi-degrees of freedom. The damping part is connected to the structure in a serial manner, and the coil is inside the cylinder near the tube wall, to reduce the size in the radial direction, to secure a good radiation condition and for convenient maintenance. The effects of the exciting current, the oscillation amplitude and the frequency on the damping force are experimentally analyzed, and the new magnetic rheology damping device is shown to be able to generate the pull and push damping force to effectively match the proportional control structural design, which satisfies the requirement in attenuating the vehicle's vibration. The parallel disc slit type damping can enhance the efficiency of the magnetic field in generating the magnetic rheology damping force, to extend the damping force's range and to ease its control. The new device provides a new technical way for the performance improvement, an effective feasible new antihunt device and an important vehicle's antivibration application.

**Keywords** vehicle; magnetic exteriorization; bypass type; uniflow; MR damper

收稿日期: 2009-07-29

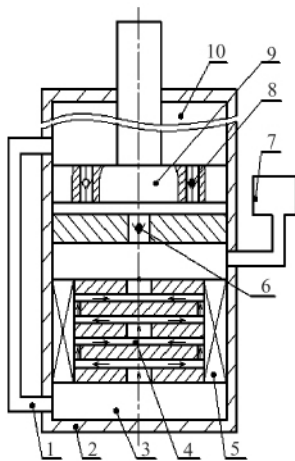
作者简介: 赵晓文, 工程师, 研究方向为军事工程抢修抢建技术, 电子信箱: yaokai029@sohu.com

## 0 引言

磁流变液 (Magnetorheological Fluids, MRF) 是一种可控流体, 它在外加磁场作用下, 其磁性悬浮粒子被感应, 铁磁性颗粒沿磁场方向形成链状或链束状有序结构, 能在短时间内由液体变成具有一定剪切屈服强度的黏塑性体, 并随着磁场强度的增大, 剪切屈服强度增大, 从而对液体的正常流动产生极大的阻尼作用。磁流变阻尼器是一种利用磁流变液体的流变效应制成的通过控制磁场大小使阻尼力连续顺逆可控可调的智能阻尼装置。由于磁流变液体性能和阻尼器结构设计方面的原因, 现有的磁流变阻尼器还存在过热、磁场利用效率不高、沉淀、结构复杂等问题<sup>[1-2]</sup>。此外, 在车辆减振应用时, 减振器应满足拉伸行程产生的阻尼力大于压缩过程产生的阻尼力, 以便在压缩行程中充分利用弹性元件的弹性来缓和冲击, 在拉伸行程能又迅速衰减振动; 另外, 车辆在行进过程中的振动主要是垂直方向的运动, 减振器的安装应设计成适应垂直减振的需要<sup>[3-4]</sup>。针对现有磁流变阻尼器存在的问题和车辆减振应用需求, 本文设计了一种新型的磁流变阻尼器。

## 1 新型磁流变阻尼器设计原理

新型的磁流变阻尼器原理方案如图 1 所示。



1—管道;2—缸筒;3—下腔;4—环形流道;5—线圈;  
6—单向阀;7—储液腔;8—单向阀;9—活塞;10—上腔

图 1 新型磁流变阻尼器原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MR damper

该阻尼器的工作原理如下: 当活塞 9 向上运动即拉伸行程时, 单向阀 6 打开, 活塞上均布的单向阀 8 关闭, 上腔 10 中的磁流变液经过外置的管道 1 进入下腔 3, 然后流入环形流道 4, 流动的方向如图 1 中箭头所示, 线圈 5 通电, 环形流道中的磁流变液发生磁流变效应, 产生阻尼力, 接着磁流变液通过单向阀 6 进入无杆腔, 储液腔 7 中有磁流变液和一定压力的氮气, 活塞 9 向上运动时, 为了补偿有杆腔和无杆腔的体积差, 储液腔 7 中的一部分磁流变液在氮气压力作用下通过单向阀

6 也进入无杆腔。当活塞 9 向下运动即压缩行程时, 单向阀 6 关闭, 单向阀 8 打开, 磁流变液由无杆腔进入有杆腔, 由于无杆腔和有杆腔存在体积差, 一部分磁流变液仍通过管道 1 进入下腔 3, 通过环形流道 4, 产生阻尼力, 最后进入储液腔 7, 完成一个工作循环。通过改变通入线圈的电流改变磁场强度, 从而获得可控的阻尼力。

## 2 新型磁流变阻尼器的设计特点

该磁流变阻尼器原理设计具有以下突出特点<sup>[5]</sup>。

1) 提高了磁场利用效率。磁流变阻尼发生装置采用线圈外置的平行环形缝隙结构, 如图 2 所示, 外绕式励磁线圈产生的磁力线平行于线圈的轴线, 在磁流变液的流动方向上设置换向装置, 使磁流变液体通过阻尼发生装置时主要为径向流动, 保证了磁流变液的流动方向与磁力线方向垂直, 使磁场对磁流变效应的贡献得到大幅度的提高。采用平行缝隙结构可获得较长的磁流变阻尼工作通道, 提高了阻尼器的出力范围, 同时可通过增加平行缝隙的数量方便地增加阻尼力, 轴向尺寸增加小, 便于加工制造和维护。

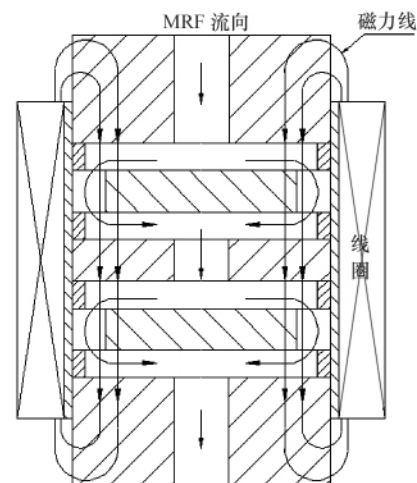


图 2 磁流变阻尼发生装置结构原理

Fig. 2 Schematic diagram of MR damping structure

2) 利于散热和维修。如图 1 所示, 将阻尼发生装置设计成外置串联结构, 线圈置于缸筒内且靠近筒壁, 减小了阻尼器的径向尺寸, 散热条件好, 便于维修; 引线可以从缸筒壁引出, 简单可靠, 同时使密封条件得到改善, 解决了将线圈放置在活塞上带来的种种缺陷; 设置在磁流变阻尼器外围的储液腔体, 既可解决磁流变阻尼器的液体补偿又能补充液体。

3) 解决输出拉、压力的匹配问题。如图 1 所示, 现有车辆用阻尼器采用单杆式结构, 拉伸时阻尼缸有效面积小于压缩时阻尼缸面积, 因而压力相同时拉伸阻尼力小于压缩阻尼力, 给磁流变阻尼器的控制带来难度, 同时控制能耗也较大。该磁



流变阻尼器原理方案实现了在拉伸过程中阻尼器活塞的受力面积大(有效作用面积为上腔的环形面积),在压缩过程中的受力面积小(有效作用面积为活塞杆的截面积),两个截面积的大小可根据两个方向输出力的要求进行匹配设计,从结构上解决两个方向对输出力的要求,使控制难度和能耗降低。其拉压力匹配设计原理如下。

在线圈输入电流一定,外加激励一定的情况下,阻尼力与有效工作面积成正比,对于拉伸行程,有

$$F_{拉} = \Delta p \cdot A_{拉} \quad (1)$$

$$A_{拉} = \frac{1}{4} \pi (D^2 - d^2) \quad (2)$$

式中,  $F_{拉}$  为拉伸阻尼力, N;  $\Delta p$  为工作过程总压差, Pa;  $A_{拉}$  为拉伸行程有效工作面积,  $m^2$ ;  $D$  为活塞直径, m;  $d$  为活塞杆直径, m。

对于压缩行程,有

$$F_{压} = \Delta p \cdot A_{压} \quad (3)$$

$$A_{压} = \frac{1}{4} \pi \cdot d^2 \quad (4)$$

式中,  $F_{压}$  为压缩阻尼力, N;  $A_{压}$  为压缩行程有效工作面积,  $m^2$ 。

由式(1)~式(4),可得

$$F_{拉} = k_{力} F_{压} \quad (5)$$

$$k_{力} = \frac{D^2 - d^2}{d^2} \quad (6)$$

式中,  $k_{力}$  为比例系数。

由式(6)可知,通过合理地选择活塞直径  $D$  和活塞杆直径  $d$ ,就可使拉伸阻尼力大于压缩阻尼力并成一定的比例关系,从而满足阻尼力和承压面积的匹配。

4) 解决沉淀问题。因磁流变液体中的铁磁颗粒粉末比重较大,静置时会出现凝聚和沉降现象,使工作介质中磁性颗粒减少,影响磁流变阻尼器的阻尼控制效果。如图1所示,该方案能保证无论在拉伸行程还是在压缩行程,磁流变液始终从下腔流入,上腔流出,磁流变液中的磁性颗粒在液流冲击作用下被快速搅拌并均匀地分布在磁流变液中,解决了磁流变液的沉淀问题。

### 3 新型磁流变阻尼器拉压试验

根据样机的设计要求(阻尼器工作时拉伸行程最大阻尼力为 9800N,压缩行程最大阻尼力为 3920N),比例系数计算如下:

$$k_{力} = \frac{F_{拉}}{F_{压}} = \frac{D^2 - d^2}{d^2} = \frac{9800}{3920} = 2.5 \quad (7)$$

为达到标准化要求,取与实际计算出的尺寸相近的液压缸筒、活塞杆标准系列尺寸。根据计算和缸筒系列尺寸标准,取活塞直径  $D=63mm$ ,根据式(1)计算得  $d \approx 33.67mm$ ,取  $d=36mm$ 。这样,实际阻尼缸的比例系数与计算结果  $k_{力}=2.5$  较为接近。

#### 3.1 试验设计

试验在 MTS-808 拉压试验机上完成,该试验机是一台液

压伺服控制拉压试验机。试验原理示意如图3所示,根据磁流变阻尼器的具体工作工况,调节输入电信号,对磁流变阻尼器进行拉压试验,通过力传感器输出监测、记录、显示试验数据和波形。试验装置如图4所示。

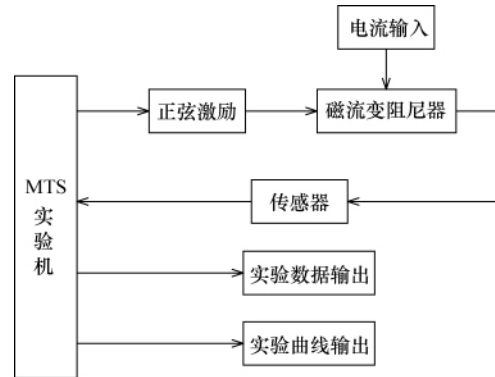


图3 实验原理

Fig. 3 Flow chart of experiment



图4 实验装置

Fig. 4 Experimental equipment

为了检验所设计的磁流变阻尼器的动态特性,研究各个参数对其影响规律,试验研究了阻尼力与励磁线圈电流、运动行程、工作频率的关系。试验输入信号采用正弦激励,通过测量输入位移-时间曲线和阻尼力-时间曲线求取阻尼力的示功图和速度特性曲线。试验方法:分别对线圈通入 0、1、2 和 3A 的电流,在每种通电情况下,输入 7 组不同的正弦激励信号,7 组信号参数如表 1 所示。

根据 MTS 实验机的自动测试系统所记录的实验数据,得到位移-时间曲线和阻尼力-时间曲线,从而求取示功图和速度特性曲线,分析阻尼器的工作性能优劣及各个参数的影响。

#### 3.2 结果分析

##### 1) 励磁电流对阻尼力的影响

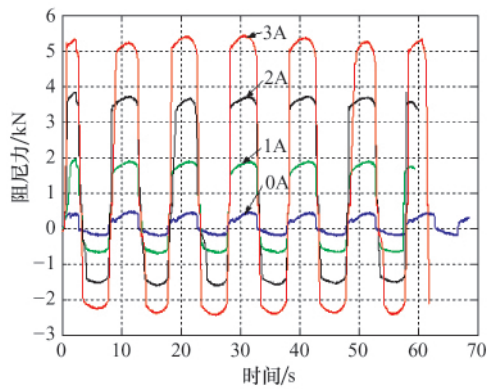
为了研究阻尼力与励磁电流之间的关系,输入正弦激励振幅为 30mm,频率为 0.1Hz,分别给线圈通 0、1、2 和 3A 的电流,得到时间-阻尼力曲线和位移-阻尼力曲线如图 5 所示。



表 1 正弦激励信号参数

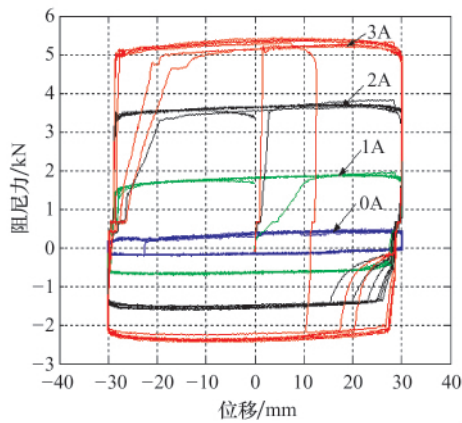
Table 1 Sine excitation signal parameters

组号	频率/Hz	位移/mm
1	0.1	30
2	0.2	30
3	0.5	30
4	0.2	20
5	0.2	10
6	0.5	20
7	0.5	10



(a) 时间-阻尼力曲线

(a) Curve of time vs damping force



(b) 位移-阻尼力曲线

(b) Curve of displacement vs damping force

图 5 振幅 30mm, 频率 0.1Hz 时不同通电状态测试曲线

Fig. 5 Test curves for oscillation amplitude 30mm

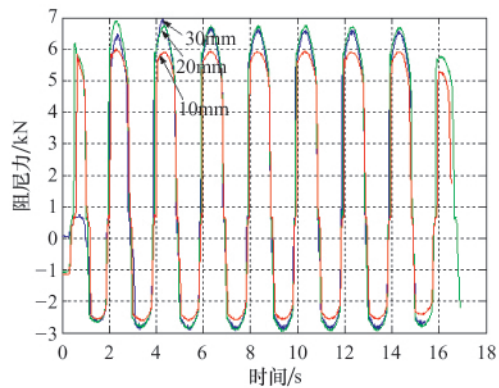
and frequency 0.1Hz

由图 5 可知, 阻尼力随着通入励磁电流的增大而增大。这是由于随着电流的增大, 工作磁场强度增强, 磁流变液的剪切屈服应力增大, 从而增大了可控阻尼力。示功图包围的面积随着通入励磁电流的增大而增大, 表示阻尼器消耗的振动的功逐渐增大。从实测得力-位移曲线即示功图可以看出, 最大拉

伸阻尼力大于最大压缩阻尼力。结构设计时的最大拉伸阻尼力与最大压缩阻尼力之比为 2.06, 略小于实际比值, 主要是结构设计时未考虑拉伸行程与压缩行程磁流变液在平行圆盘外流动压力损失以及摩擦力的作用, 但从工程角度来看, 设计的目的已经达到。在通电电流为 1、2 和 3A 时, 示功图较为圆滑、饱满, 基本没有空行程, 在拉伸行程与压缩行程转换时有微小的变形, 表明阻尼器的减振效果良好。

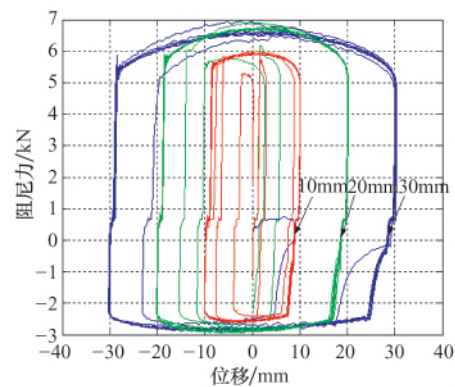
2) 振幅对阻尼力的影响

通电电流为 3A, 输入正弦激励的频率为 0.5Hz, 分别采用 10、20 和 30mm 的振幅, 测试得到的曲线如图 6 所示。



(a) 时间-阻尼力曲线

(a) Curve of time vs damping force



(b) 位移-阻尼力曲线

(b) Curve of displacement vs damping force

图 6 通电电流 3A, 频率 0.5Hz 时不同振幅测试曲线

Fig. 6 Oscillation amplitude test curves for electric

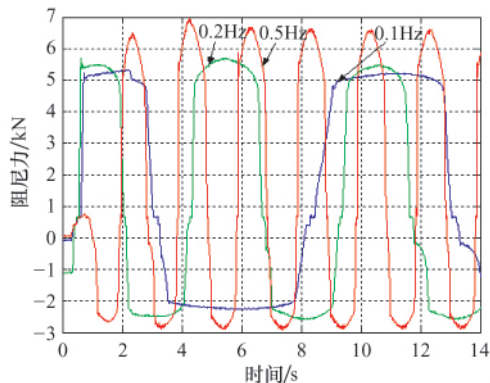
current 3A and frequency 0.5Hz

由图 6 可知, 示功图包围的面积随着振幅的增大而增大, 表示阻尼器消耗的振动功逐渐增大。示功图较为饱满, 仅在拉伸行程与压缩行程转换时有微小的变形, 可能是单向阀不能立即关闭造成的。不同振幅下的最大阻尼力差别并不十分明显, 表明黏滞阻尼力所占总阻尼力的百分比较小, 而可控阻尼力占总阻尼力的百分比较大, 这是由于在电流一定、振幅改变的情况下, 可控阻尼力是不变的, 黏滞阻尼力随振幅的增加而

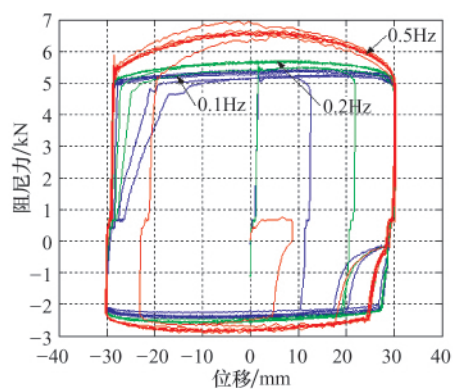
增加。达到了设计要求。

### 3) 频率对阻尼力的影响

通电电流为 3A, 输入正弦激励的振幅为 30mm, 分别采用 0.1、0.2 和 0.5Hz 频率, 测试得到的曲线如图 7 所示。



(a) 时间-阻尼力曲线  
(a) Curve of time vs damping force



(b) 位移-阻尼力曲线  
(b) Curve of displacement vs damping force

图 7 通电电流 3A, 振幅为 30mm 时不同频率测试曲线

Fig. 7 Frequency test curves for electric current 3A and oscillation amplitude 30mm

由图 7 可知, 阻尼力随频率的增大而增大, 这是由于通电电流一定, 可控阻尼力不变, 而黏滞阻尼力随频率的增大而增大, 所以总的阻尼力也增大。示功图包围的面积随着频率的增大而增大, 表示阻尼器消耗的振动的功逐渐增大。示功图较为饱满, 减振效果良好。

上述结果表明, 平行圆盘缝隙阻尼发生装置效果良好, 阻尼力随电流增加显著增大; 示功图较为圆滑、饱满, 减振效果良好; 拉压阻尼力的比例与理论设计接近, 满足工程应用, 达到了设计目的。

## 4 结论

1) 新型磁流变阻尼器在工作原理和结构上都有突出特点。有效解决了磁场利用效率, 输出拉、压力的匹配, 沉淀和多

自由度受力的问题。将阻尼发生装置设计成外置串联结构, 线圈置于缸筒内且靠近筒壁, 减小了阻尼器的径向尺寸, 散热条件好, 便于维修。

2) 实验设计准确合理。通过试验分析励磁电流、振幅、频率对阻尼力的影响, 新型磁流变阻尼器的拉压阻尼力成比例控制结构设计合理有效, 可满足车辆减振对阻尼器阻尼力大小控制的要求; 平行圆盘缝隙式阻尼发生装置能明显提高磁流变阻尼器的磁场利用率, 使阻尼力范围更大, 更易控制。

3) 新型磁流变阻尼器的设计为改进和其性能提供了新的技术途径, 为车辆减振应用提供了一种有效可行的新型阻尼装置和重要的研究依据。

## 参考文献 (References)

[1] 曹民, 喻凡. 车用磁流变减振器的研制[J]. 机械工程学报, 2004, 40(3): 186-190.  
Cao Min, Yu Fan. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40 (3): 186-190.

[2] 熊超, 郑坚, 张进秋, 等. 磁流变智能阻尼器的工作原理及设计 [J]. 机械设计与研究, 2004, 20(2): 50-53.  
Xiong Chao, Zheng Jian, Zhang Jinqiu, et al. *Journal of Machine Design and Research*, 2004, 20(2): 50-53.

[3] 周玉丰, 陈花玲. 磁流变阻尼器结构改进设计与性能研究 [J]. 宁夏工程技术, 2005, 4(4): 325-327.  
Zhou Yufeng, Chen Hualing. *Ningxia Engineering Technology*, 2005, 4 (4): 325-327.

[4] 蒙延佩, 廖昌荣, 张红辉, 等. 汽车磁流变阻尼器磁路设计及相关问题研究[J]. 功能材料, 2006, 37(5): 768-770.  
Meng Yanpei, Liao Changrong, Zhang Honghui, et al. *Journal of Functional Materials*, 2006, 37(5): 768-770.

[5] 王冰, 韩冰源, 王岩, 等. 汽车磁流变减振器研究综述 [J]. 森林工程, 2008, 24(4): 39-43.  
Wang Bing, Han Bingyuan, Wang Yan, et al. *Forest Engineering*, 2008, 24(4): 39-43.

(责任编辑 代丽)

### 本期推理小游戏答案

A 先拿 1 个, 这以后根据 B 的情况采取以下策略:

- B 拿 1 个, A 拿 2 个;
- B 拿 2 个, A 拿 1 个;
- B 拿 4 个, A 拿 2 个。

也就是说, 每次保持加上 B 拿的总数一定是 3 或 6, 由于  $499=3 \times 166+1$ , 每轮 A 与 B 拿的总数一定是 3 的倍数, 所以经过 n 次之后一定会给对方留下 1 或 4 个, 给对方留下 1 或 4 对手就输了。