



·脉冲功率技术·

枢轨接触面形貌对电枢起动特性的影响*

车英东^{1,2,3}, 赵伟康^{1,2,3}, 王志增^{2,3}, 田文^{1,2,3}, 孔佑军^{1,2,3}, 袁伟群^{2,3}, 严萍^{2,3}

(1. 中国科学院大学, 北京 100190; 2. 中国科学院 电工研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院 电力电子与电力驱动重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 在脉冲大电流直线驱动装置中, 电枢和轨道的接触状态会改变电枢起动特性, 而电枢起动过程将直接影响整个发射系统的效率和寿命, 因此有必要对电枢起始阶段的滑动接触状态进行研究。搭建发射实验平台, 通过高速相机观察电枢起动状态, 并结合有限元软件 ANSYS, 对电枢的预紧力、初始接触状态以及电磁压力、电流密度进行仿真分析, 研究电枢表面形貌对电枢起动的影响。结论表明: 开槽电枢增加了电枢本身的柔顺性, 使得预紧力增大, 同时由于电流趋肤效应使得电流密度分布更加均匀, 从而电磁压力增大, 电枢起动变慢, 接触电阻变小。实验和仿真结果对于改善电枢起动过程的接触状态, 减轻烧蚀具有重要意义。

关键词: 枢轨接触状态; 电枢起动; 电枢表面形貌; 高速相机; 有限元仿真

中图分类号: TM89 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.190370

Influence of armature-rail contact surface morphology on starting characteristics of armature

Che Yingdong^{1,2,3}, Zhao Weikang^{1,2,3}, Wang Zhizeng^{2,3}, Tian Wen^{1,2,3}, Kong Youjun^{1,2,3}, Yuan Weiqun^{2,3}, Yan Ping^{2,3}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The armature-rail contact interface affects the characteristics of armature startup in the pulsed high current linear driver. Furthermore, the armature startup has an influence on the system efficiency and lifetime. This paper discusses the effect of armature surface morphology on armature startup. In the experiments, a high-speed camera was set up to observe the armature startup. Combined with the finite element software ANSYS, the pre-tightening force and contact status were simulated. Besides, the electromagnetic pressure and current density were also obtained by simulation. The results show that groove increased the flexibility of armature and the homogeneity of current distribution was improved by the current skin effect. Owing to the increasing pressure, the groove armature startup was delayed and its contact resistance reduced. The results have important significance to improve contact condition and reduce erosion.

Key words: armature-rail contact state; armature startup; armature surface morphology; high-speed camera; finite element simulation

脉冲大电流直线驱动装置可以利用电磁能将物体加速到超高速, 具有安全性高、数控性强的特点, 但是大量的研究工作都是围绕电枢和导轨之间的可靠接触问题展开的^[1]。良好的起始接触状态对于避免起始位置的烧蚀至关重要, 是保证系统安全高效发射的基本要求^[2]。在滑动接触状态下, 接触电阻的变化反映着发射过程的接触状态的变化规律, 对于提高发射器性能和寿命具有重大意义^[3-5]。

T. Watt 等人研究了电枢起始阶段的损伤, 通过实验发现轨道表面的槽蚀现象发生在电枢的起始位置附近, 而且会沿着电枢运动方向向前延伸, 并且不同位置有不同的形态^[6]。朱仁贵等人对 C 型固体电枢的电流密度进行了仿真计算, 通过改变电枢的头部尺寸和尾翼外张量, 分析了接触压强、接触面积、接触力的变化规律, 提出了通过控制压入比来改善枢轨的电接触状态的方法^[7]。徐伟东等人研究了连续发射条件下的滑动电接触特性, 通过计算

* 收稿日期: 2019-09-19; 修订日期: 2019-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51875546, 51577178)

作者简介: 车英东 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事脉冲功率大电流的研究; cheyingdong@mail.iee.ac.cn。

通信作者: 袁伟群 (1976—), 男, 博士, 研究员, 主要从事脉冲大电流放电的研究; yuan_wq.iee.ac.cn。

电流所经过的轨道电阻及电枢体电阻所产生的温升,分析了该发射模式下滑动电接触性能的变化^[8]。陈允等人研究了铝电枢与不同材料轨道之间的滑动电接触特性,得出了铝电枢-铝轨道之间的电接触性能最佳的结论^[9]。Schneider 等人对于电枢测速采用了毫米波多普勒雷达、激光干涉测速等多种测量方法,但是在电磁力加速过程中,受强磁场、机械振动等恶劣条件的影响,完整而精确地测量速度仍然相当困难^[10-11]。

本文从改变滑动接触面的形貌出发,设计了3种不同表面形貌的电枢,进行多组重复发射实验,计算枢轨接触电阻,通过高速相机判断电枢的起动时刻;结合有限元软件,对电枢-轨道的初始接触状态进行仿真计算,得到装填预紧力、电磁压力、电流密度等特征量的变化规律。

1 实验

1.1 实验设置

脉冲大电流直线驱动装置的实验平台如图1所示。实验平台主要由电源系统和直线驱动系统组成。电源系统由20个脉冲成型网络并联组成,单模块的额定充电电压是3 kV。直线驱动系统由汇流装置、电枢、消音设备、回收箱组成。轨道表面为平面型,材料为铬钴铜合金,长度620 mm,轨道间距16 mm。电枢采用单体C形结构,材料为6061-T6铝合金。

膛尾和膛口电压使用差分探头来测量,精确度为 $\pm 1\%$;驱动电流使用罗氏线圈进行测量,灵敏度为0.02 mV/A。起始位置使用透明的聚碳酸酯作为上绝缘,起动过程采用高速相机进行拍摄,相机以45°的俯角对准透明区域的电枢,采用80 000帧的拍摄速率。使用示波器对电压、电流信号进行采集,示波器和高速相机的动作通过同一个电信号进行同步触发。

使用3种不同结构的电枢进行实验,对电枢表面进行不同的处理,分别为无槽、竖槽、横槽电枢,电枢的其他特征均相同,每种结构的电枢进行3次发射实验,每组完成后更换轨道,保证3组实验具有相同的初始接触状态。图2是3种电枢结构的示意图,开槽电枢的槽深均为0.5 mm,槽宽均为1 mm;竖槽电枢的开槽长度为6 mm,槽间距是5.5 mm,且3条竖槽轴对称分布于电枢侧面;横槽电枢的开槽长度12 mm,即贯穿侧面,槽间距是1 mm。

1.2 实验结果及分析

典型的电流、接触电阻波形如图3所示。电流波形的下降沿阶段的转折点对应电枢的出膛时刻,由3组电流波形可得,无槽电枢的出膛时刻最早,横槽电枢的出膛时刻最晚。

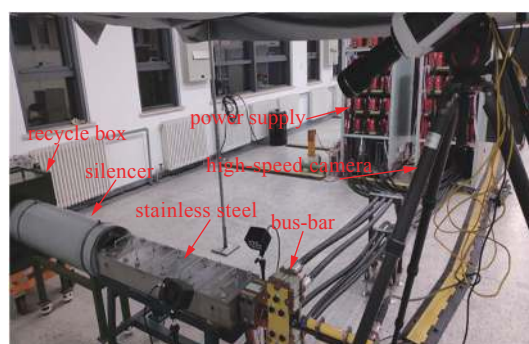


Fig. 1 Experimental platform

图1 实验平台

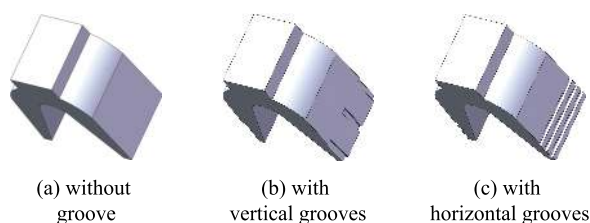


Fig. 2 Three structures of armature

图2 3种电枢结构

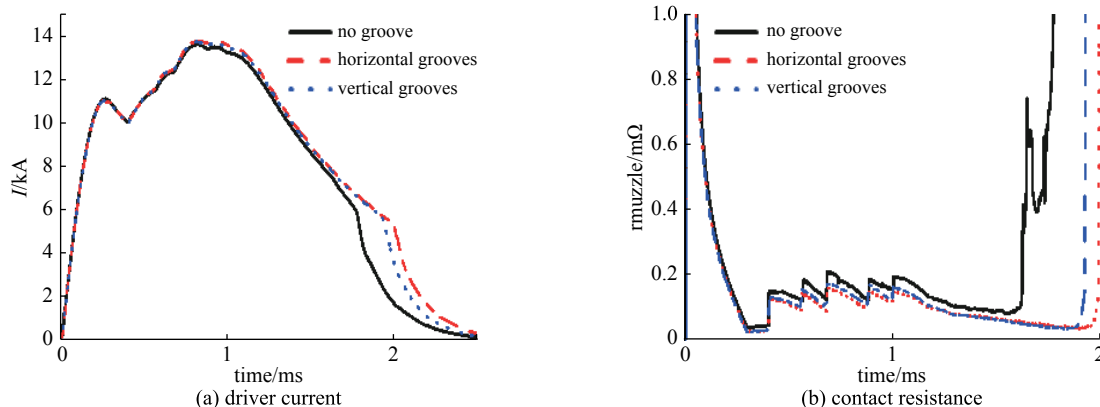


Fig. 3 Typical driver current and contact resistance

图3 典型的驱动电流和接触电阻

由 3 组接触电阻波形可得, 无槽电枢的接触电阻最大, 横槽电枢的接触电阻最小。

通过高速相机的软件对电枢的运动进行追踪, 将电枢和聚碳酸酯导向块的接触位置设置成追踪点, 另一个对称的接触位置设置成坐标原点, 逐帧播放画面, 可以得到电枢的位移-时间曲线, 设定第一个不为 0 的位置对应的时刻作为电枢的起动时刻, 追踪过程如图 4 所示。

表 1 是实验中电枢的起动时刻。无槽电枢的起动时刻最早, 横槽电枢的起动时刻最晚。

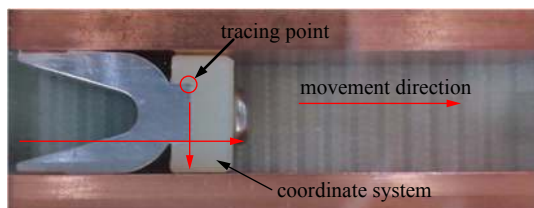


Fig. 4 Judging armature startup

图 4 电枢起动时刻的确定

表 1 电枢起动时刻
Table 1 Startup time of armature

experiment No.	startup time/ μs		
	no groove	vertical groove	horizontal groove
1	125	162.5	175
2	150	175	187
3	162.5	180	190

3 组实验之后的电枢起始位置对应的轨道如图 5 所示, 红圈表示电枢对应的起始位置, 箭头表示电枢的运动方向。3 组实验之后的轨道表面均有铝沉积层的附着, 无槽电枢起始位置的轨道上铝沉积层最多, 存在明显的烧蚀现象。开槽电枢起始位置的轨道上有很薄的一层铝沉积层, 烧蚀现象有所缓解。

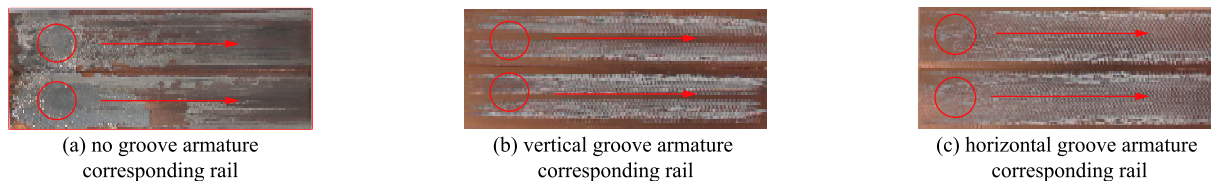


Fig. 5 State of the rail after the experiments, the circles represent the starting positions, the arrows represent the directions of motion

图 5 实验结束后的轨道起始位置的状态

2 仿 真

2.1 建立模型

在电枢装填到起始位置后, 电枢由于自身的过盈量而受到装填预紧力, 用于保证初始状态具有良好的接触性能。由于结构对称只需对其 1/2 建模; 只模拟电枢起始位置的接触状态, 对模型中的轨道长度进行了缩短, ANSYS Workbench 中的模型如图 6 所示。 δ 为单侧过盈量, d 为电枢的半宽(装填电枢之前)。仿真模型中的具体的材料参数见表 2。 ρ 是材料密度, E 是材料弹性模量, ν 是材料的泊松比, δ_s 是材料屈服强度。

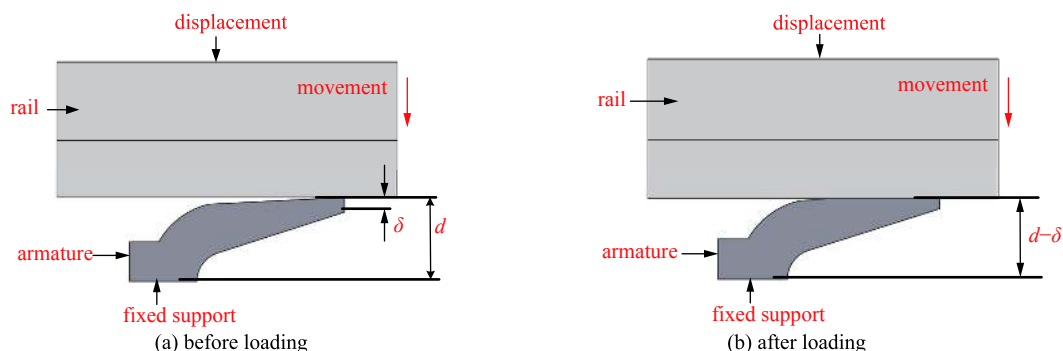


Fig. 6 Calculation model of the pre-tightening force

图 6 预紧力计算模型

ANSOFT Maxwell 的仿真模型如图 7 所示。建立三维瞬态电磁场, 由于结构对称只需采用 1/2 建模, 在对称面 symmetry 上设置对称边界条件, 在模型周围设置空气域 vacuum 来计算电磁场。

由于研究对象的尺寸远小于电磁波波长, 位移电流可以忽略。同时根据工程电磁场常用方法, 引入矢量磁位 A 和标量电位 φ , 且有

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi - \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} \quad (2)$$

式中: \mathbf{B} 为磁通密度; \mathbf{E} 为电场强度。

表 2 仿真模型中的主要参数

	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/Pa	ν	δ_s
rail	8 830	1.1×10^{11}	0.34	4.0×10^8
armature	2 770	7.1×10^{10}	0.33	2.8×10^8

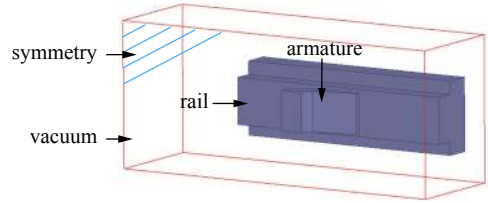


Fig. 7 Schematic diagram of the simulation model

图 7 仿真模型示意图

结合库伦规范,可以得到准静态条件下的电磁场控制方程

$$\sigma\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu}[\nabla\times\nabla\times\mathbf{A}] + \sigma\nabla\varphi = 0 \quad (3)$$

$$\nabla\cdot\sigma\nabla\varphi=0 \quad (4)$$

式中: μ 为磁导率; σ 为电导率。

2.2 仿真结果与分析

以 3 种电枢的第 1 次实验的起动时刻进行说明, 起动时刻对应的电枢受到装填预紧力和垂直于枢轨接触面的电磁压力如表 3 所示。 F_N 表示电枢单侧受到的正压力。 3 种结构的电枢的单侧过盈量 δ 均为 0.5 mm, 当轨道挤压电枢后, 电枢的宽度和轨道内表面的间距相同, 此时无槽电枢的预紧力最小, 横槽电枢的预紧力最大。 通电之后, 在垂直于电枢运动方向上, 电枢受到垂直于接触面的电磁压力, 无槽电枢的电磁压力最小, 横槽电枢的电磁压力最大。

表 3 计算结果

Table 3 Calculation results

armature structure	armature startup time/ μs	the pre-tightening force/N	electromagnetic pressure/N	F_N/N
with out groove	125	1 324.4	508	1 832.4
with vertical grooves	162.5	1 373.1	566	1 939.1
with horizontal grooves	175	1 403.1	658	2 061.1

3 种结构的电枢的电流密度分布如图 8 所示, 电枢的受力情况如图 9 所示。

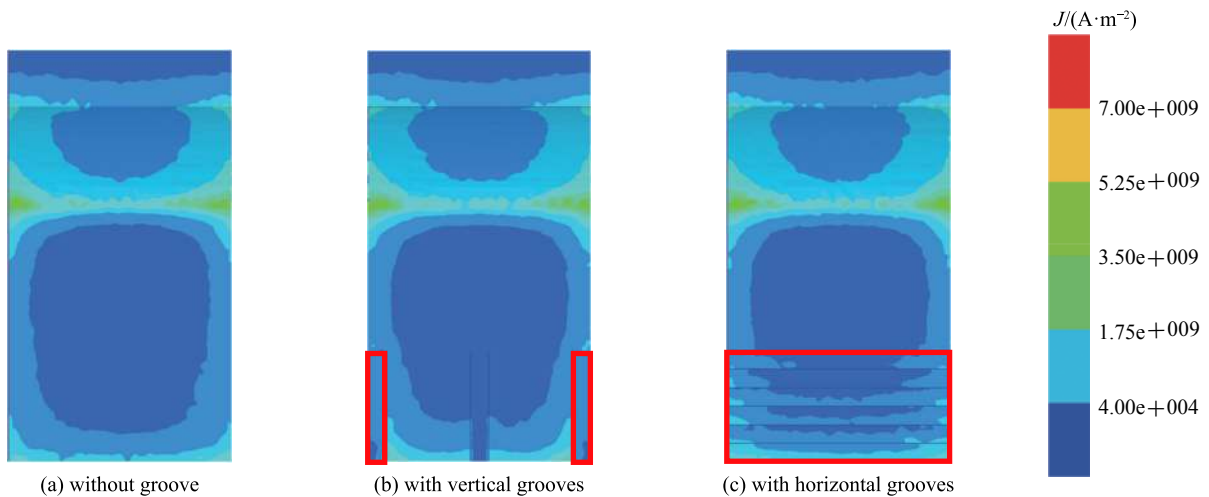


Fig. 8 Current density at $t=0.17$ ms

图 8 $t=0.17$ ms 时电流密度分布图

$$F_{\max} = \mu_s F_N \quad (5)$$

$$F_N = F_i + F_e \quad (6)$$

式中: F_{\max} 是电枢受到的最大静摩擦力; μ_s 是静摩擦系数; F_i 是电枢受到的装填预紧力; F_e 是电枢受到垂直于接触

面的电磁压力; F 是电磁驱动力; f 是静摩擦力。

在通电之后,垂直于电枢运动方向上,电枢受到 F_i 和 F_e ;在运动方向,电枢受到 F 和 F_{max} ,当 $F \geq F_{max}$ 时,电枢开始启动。从表3可知,在电枢启动时刻,无槽电枢的 F_N 最小,横槽电枢的 F_N 最大。横槽电枢的 F_{max} 最大,即需要的电磁驱动力也最大,故达到相应的电磁驱动力的时刻也最长。相比于无槽电枢,开槽电枢的接触压力较大,枢轨接触状态良好,在一定程度上减轻了电枢对轨道起始位置的烧蚀。

从图8可知,由于电流趋肤效应,开槽电枢比无槽电枢的电流分布更加均匀。在红色标注区域内,磁场和电流向电枢表面的扩散作用增强,使得横槽电枢的尾翼部分的电流密度较大的区域比其余两种结构的电枢多,因此横槽电枢受到的 F_e 也更大。

从图3(b)可知,横槽电枢的接触电阻是最小的,无槽电枢的接触电阻是最大的。开槽之后,虽然滑动接触的表现接触面积减小,但是增强了电枢的柔顺性使得初始装填预紧力增大;初始装填预紧力的增大,使得电流分布更加均匀,因此电磁压力也会增大,故开槽电枢会受到更大的电磁压力,使电枢的启动过程变慢。

3 结 论

本文以实验分析和仿真计算相结合的方法研究了不同的枢轨接触面形貌对于电枢启动的影响,得到以下主要结论:(1)开槽电枢会减慢电枢的启动过程,其中横槽的电枢效果最明显,开槽使得电枢的柔顺性增强,与轨道接触的电枢表面的电流密度的分布更加均匀,电枢两翼受到的电磁压力增大,延迟了电枢的启动。这种对电枢表面形貌的改变,可以有效延长电枢的启动过程,有利于对该过程中的各种现象进行观察和测量。(2)开槽电枢使得滑动接触电阻减小,接触状态变好。由于电流趋肤效应的存在,使得电流在电枢侧面的分布更加均匀,同时预紧力和电磁压力的增大,使得有效接触面积增大,从而接触电阻减小。良好的初始滑动接触状态可以减轻电枢的起始烧蚀。

参考文献:

- [1] Marshall R A, Ying W. Railguns: their science and technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 4-5.
- [2] Hsieh K T, Kim B K. 3D modeling of sliding electrical contact[J]. IEEE Trans Magn, 1997, 33(1): 237-239.
- [3] Schneider M, Woetzel M, Wenning W, et al. The ISL rapid fire railgun project RAFIRA—Part I: Technical aspects and design considerations[J]. IEEE Trans Magn, 2009, 45(1): 442-447.
- [4] Barber J P, Dreizin Y A. Model of contact transitioning with realistic armature-rail interface[J]. IEEE Trans Magn, 1995, 31(1): 96-100.
- [5] Barber J P, Challita A, Mass B, et al. Contact transition in metal armatures railguns[J]. IEEE Trans Magn, 1991, 27(1): 228-232.
- [6] Watt T, Stefani F, Crawford M, et al. Investigation of damage to solid-armature railguns at startup[J]. IEEE Trans Magn, 2007, 43(1): 214-218.
- [7] 朱仁贵, 李治源, 张倩, 等. 电磁发射枢轨界面初始接触状态研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 115003. (Zhu Rengui, Li Zhiyuan, Zhang Qian, et al. Initial contact status for interface between armature and rail in electromagnetic launch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 115003)
- [8] 徐伟东, 袁伟群, 陈允, 等. 电磁轨道发射器连续发射的滑动电接触[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(3): 668-672. (Xu Weidong, Yuan Weiqun, Chen Yun, et al. Sliding electrical contact performance of electromagnetic launcher system in rapid fire mode[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(3): 668-672)
- [9] 陈允, 徐伟东, 袁伟群, 等. 电磁发射中铝电枢与不同材料导轨间的滑动电接触特性[J]. 高电压技术, 2013, 39(4): 937-942. (Chen Yun, Xu Weidong, Yuan Weiqun, et al. Sliding electrical contacts between aluminum armature and different material rails in railgun[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4): 937-942)
- [10] Schneider M, Eckenfels D, Nezirevic S. Doppler-radar: A possibility to monitor projectile velocity[J]. IEEE Trans Magn, 2003, 39(1): 183-188.
- [11] Asay J R, Konrad C H, Hall C A, et al. Continuous measurements of in-bore projectile velocity[J]. IEEE Trans Magn, 1989, 25(1): 46-51.

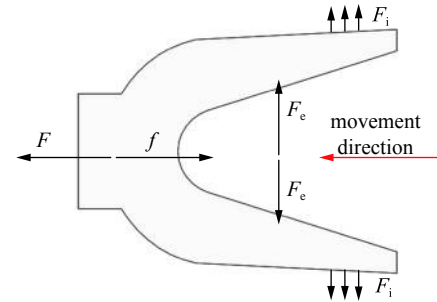


Fig. 9 Force condition of armature

图9 电枢的受力情况