

通过COMSOL进行虚拟样机建模探究 影响自行车自平衡的因素

2019.5.13

小组成员：聂文恺、陈华辰、邱锦盛、李懿轩

报告人：陈华辰

第一部分：科学问题

- 影响自行车自平衡的因素是什么？
- 自十九世纪八十年代用链条传动的安全自行车面世以来，现代自行车并没有从根本上发生改变。
- 在一个多世纪后的今天，科学家们仍在试图找出使自行车保持平衡的关键所在。这里，我们重点探究在没有人操作情况下影响自行车稳定运动的一些因素。
- 为了简化模型并且便于操作，我们将通过COMSOL软件对自行车运动进行虚拟样机模拟，并且对使用的模型做出一些合理的假设。

第二部分：科学意义

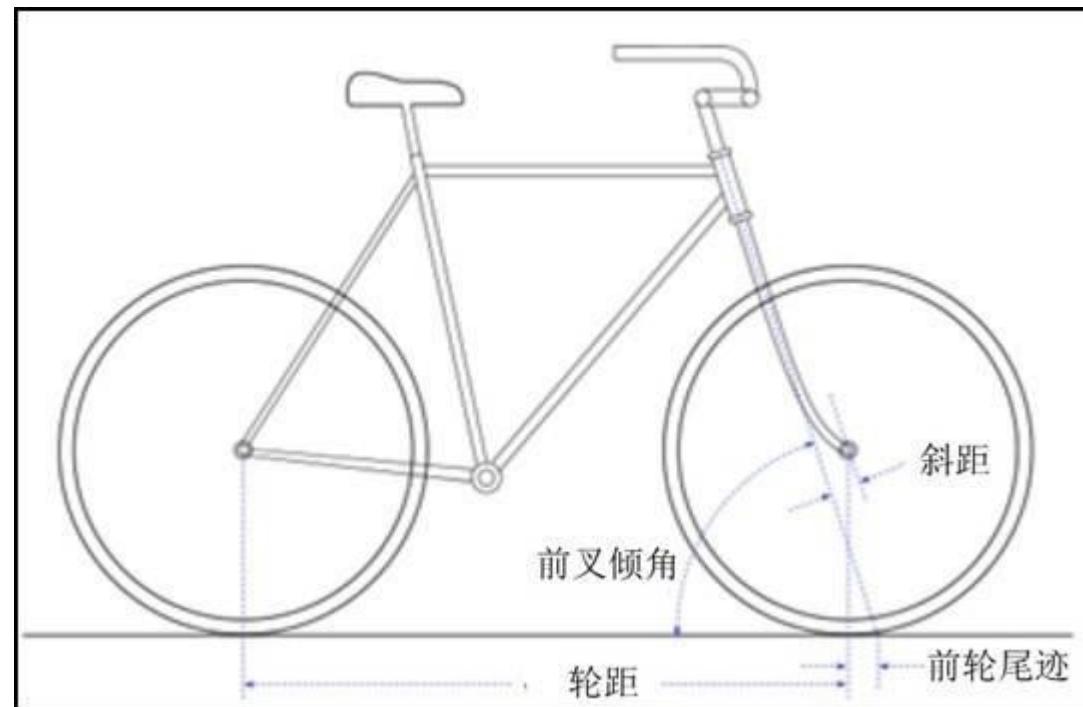
- 早期的研究大多集中注意于如何加速的问题。事实已经证明，自行车是一种最省力最优秀的非机动交通工具。不过要讲清楚行进中的自行车为什么不倒的问题，即自行车的自平衡的稳定性的问题，可不那么简单。
- 一百多年来这项研究吸引了许多著名的力学家、物理学家乃至数学家参加，累计发表的有名的论文，包括以英、德、法、俄、意大利等各种语言的论文，在百篇以上，其中还有博士、硕士和学士的毕业论文，包括著名力学家铁木辛科和杨（Timoshenko and Young）【1】。
- 令人惊异的是，迄今这个问题很难说已经最后解决了。人们还在继续研究。

第二部分：科学意义

- 最近，代尔夫特和康奈尔大学的一组研究人员发表了一篇综合性评论，他们使用自己的研究成果展示了自行车的自稳定性。该研究表明，这种现象并非仅仅是某个简单的原因引起的。而是多种因素的组合，包括陀螺效应和前叉倾角、自行车几何结构、速度及质量分布，都对保持无人操控自行车的直立前进发挥了作用。
- 我们在COMSOL软件的论坛博客上【3】找到了一个受此项研究启发的模型，该模型用来演示无人自行车的自稳定行驶情况。

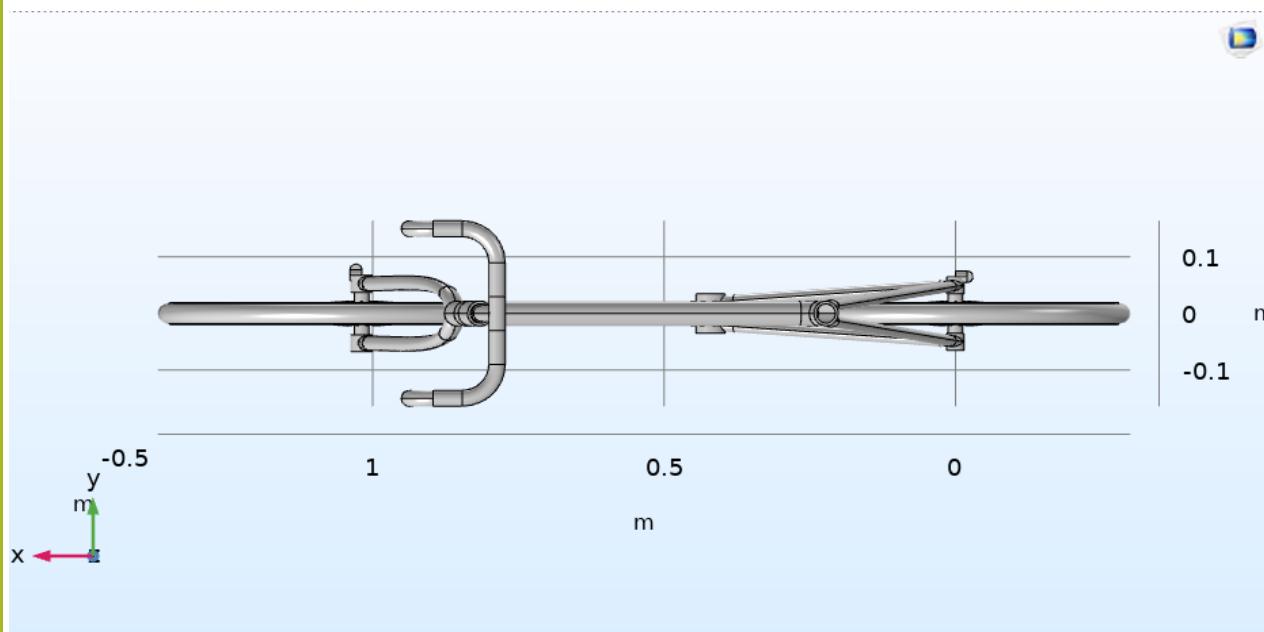
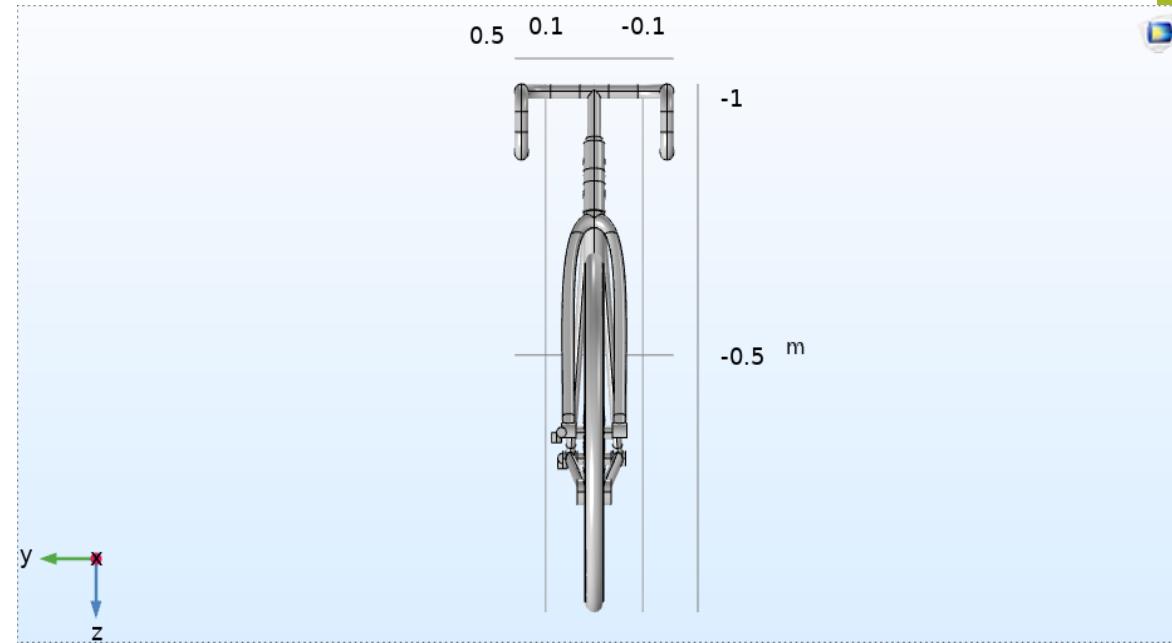
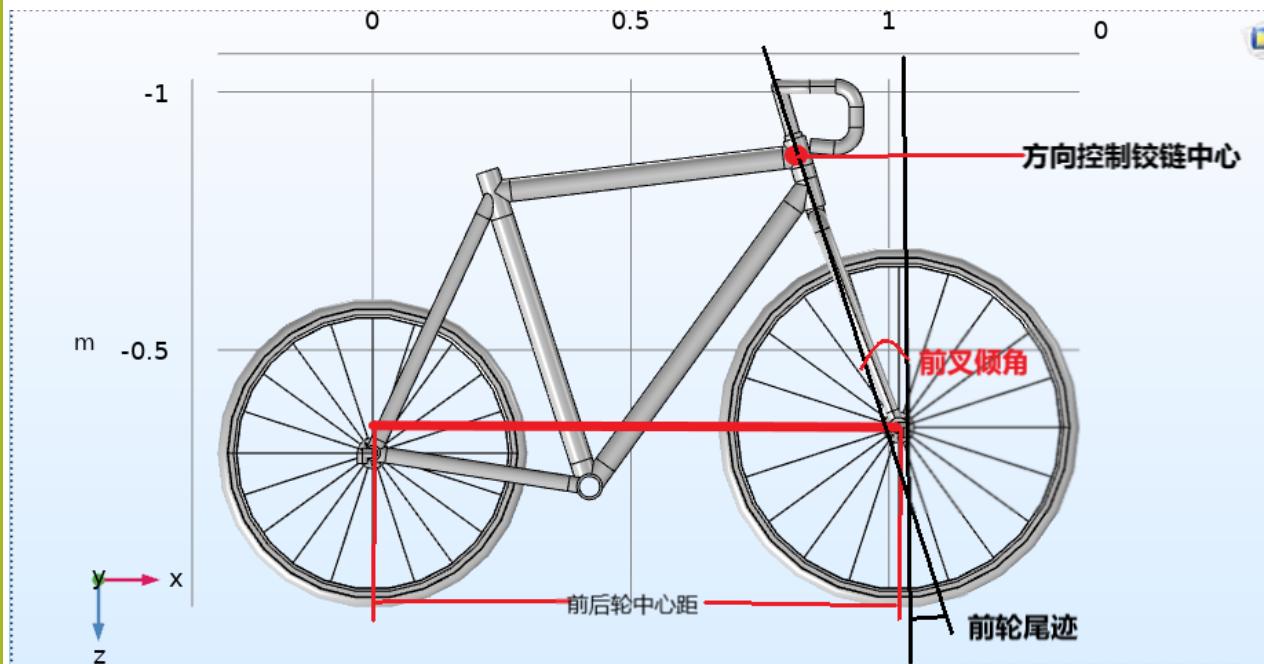
第三部分：研究内容

- 探究影响自行车的平衡的因素。
- 我们的猜测：
- 可能因素一：初始车速
- 可能因素二：前叉倾角
- 可能因素三：自行车重心的位置



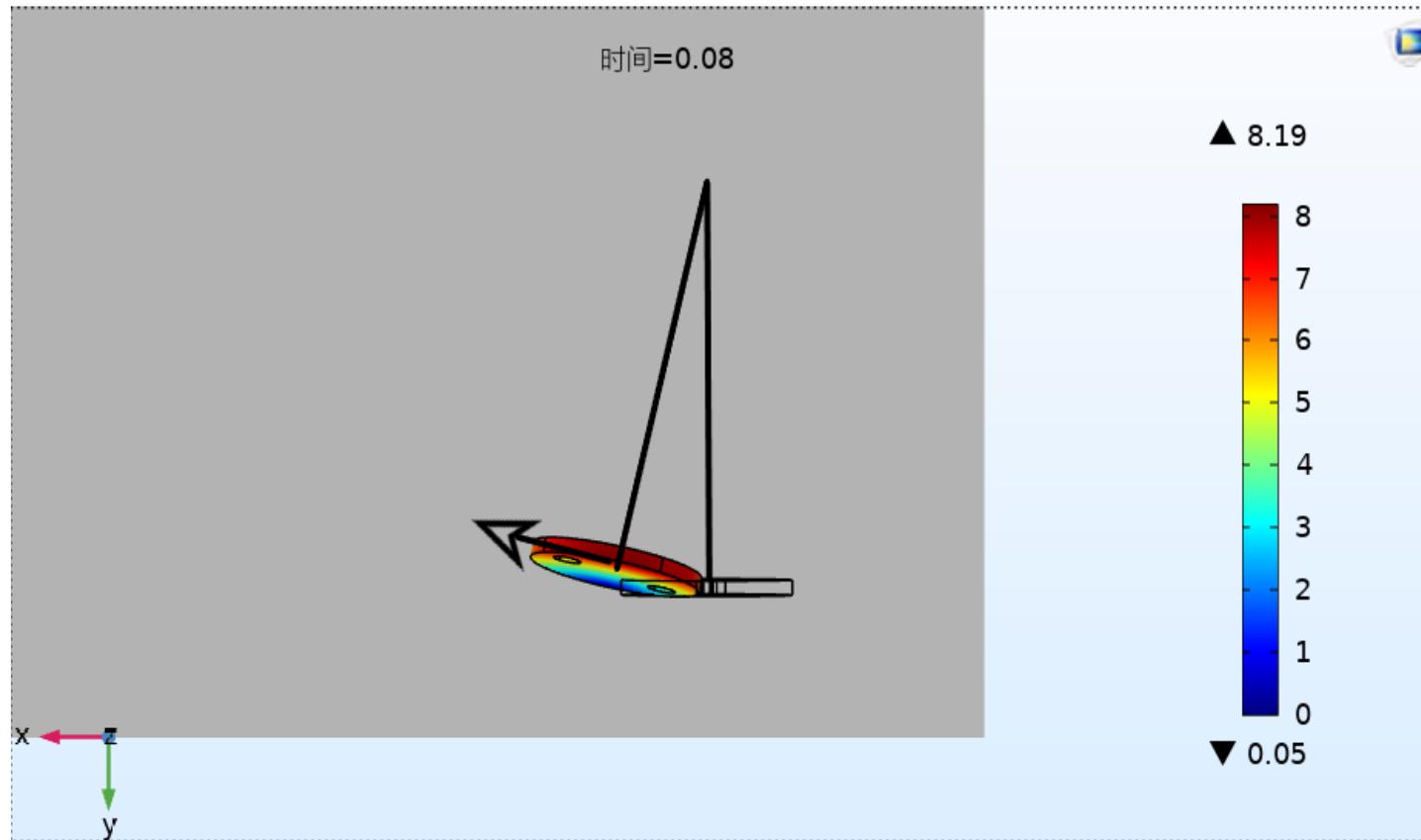
第三部分 研究内容

- 所用comsol模型介绍：
- 该模型做出以下假设：
 - 假设所有组件均为刚性。
 - 所有接头均视为无摩擦。
 - 建模时，假设自行车车轮与地面只有点接触。
 - 车轮做纯滚动。
 - 假设自行车在平面上移动。
 - 该自行车模型假设具有无后座车架，通过在后车架上添加的质量来定义。

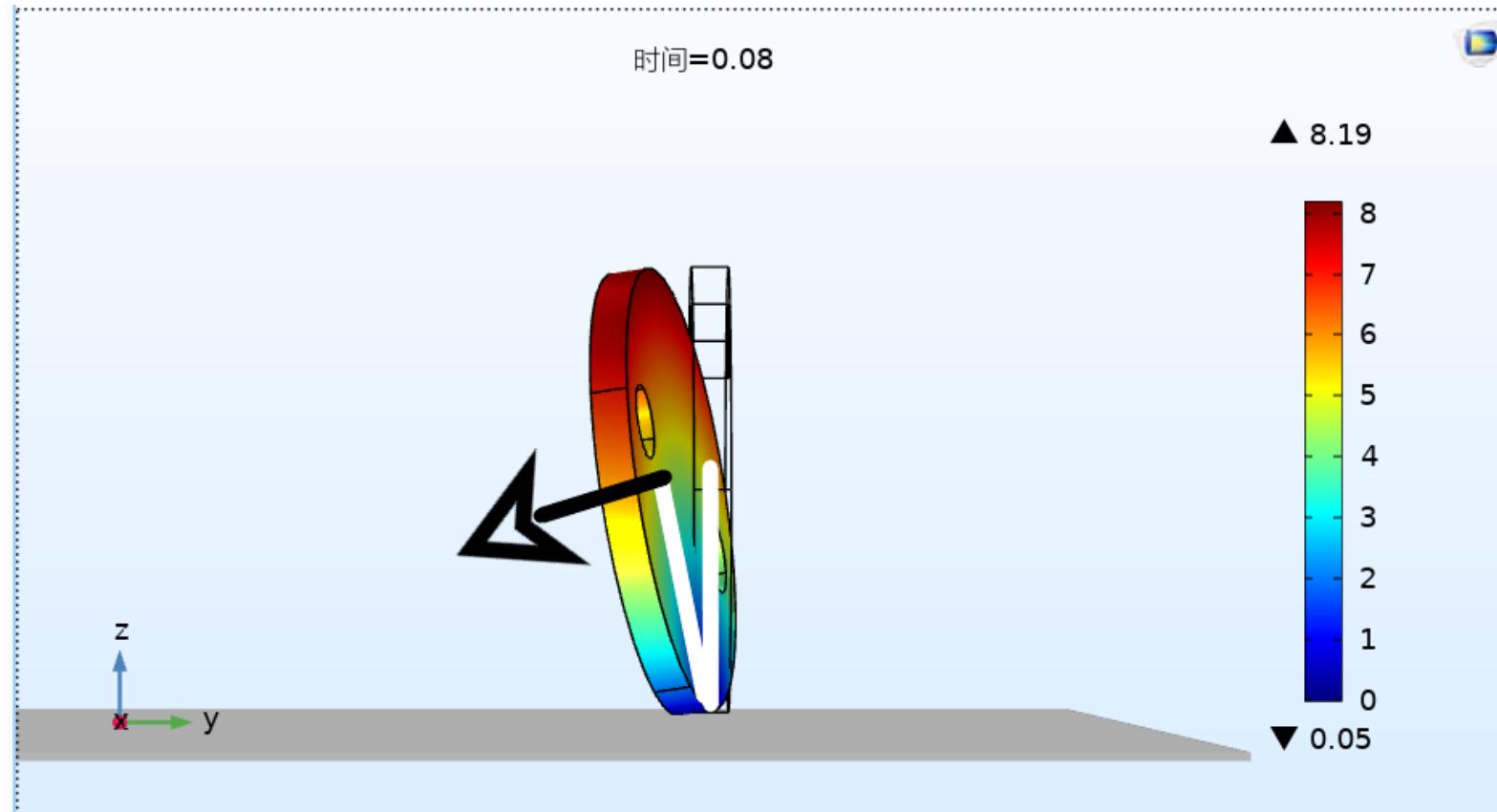


这辆自行车由四个刚性组件组成：后轮；后车架，包括无后座车架；前车架，包括车把；以及前轮。

车轮偏航



车轮倾斜



无滑滚动模型

前进方向无滑移:

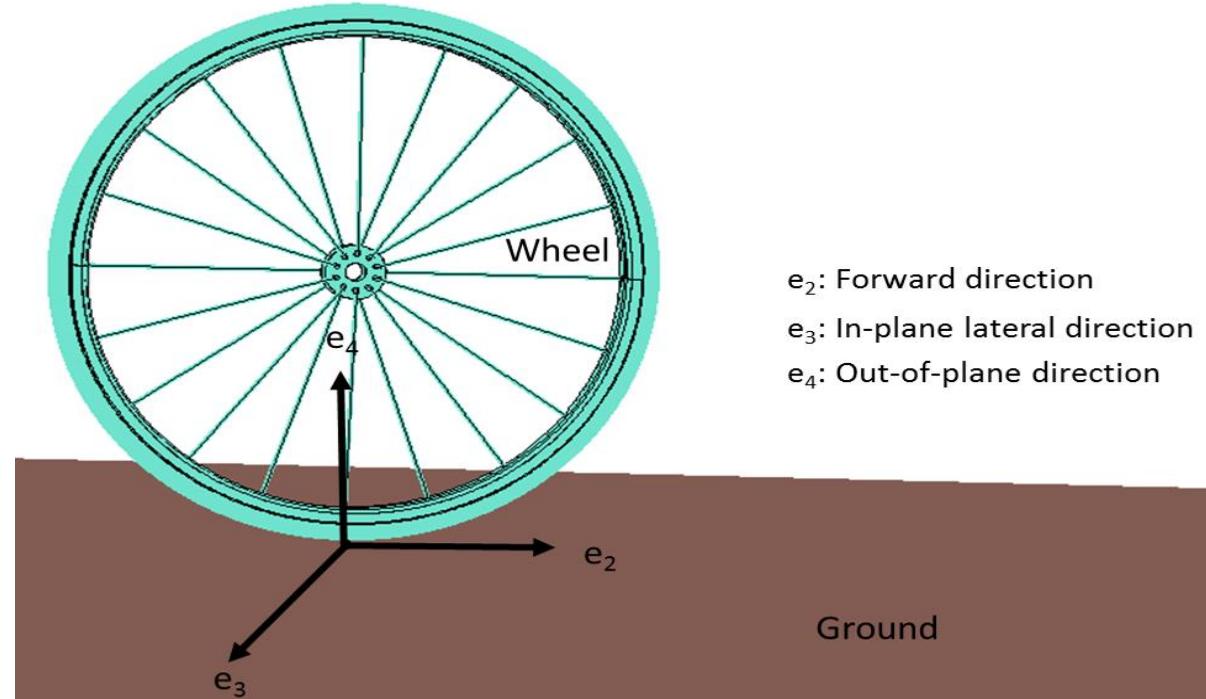
$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} \cdot \mathbf{e}_2 = r \frac{d\theta_s}{dt}$$

面内横向无滑移:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} \cdot \mathbf{e}_3 = r \frac{d\theta_l}{dt}$$

面外方向无滑移:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} \cdot \mathbf{e}_4 = 0$$



\mathbf{e}_2 : Forward direction
 \mathbf{e}_3 : In-plane lateral direction
 \mathbf{e}_4 : Out-of-plane direction

其中, $\mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3, \mathbf{e}_4 (\mathbf{e}_4 = \mathbf{e}_2 \times \mathbf{e}_3)$ 分别是瞬时前进方向 (倾轴)、面内横向 (旋转轴) 及面外方向 ; $\frac{d\mathbf{u}}{dt}$ 是重心的平移速度; r 是车轮半径; $\frac{d\theta_s}{dt}$ 是车轮自转角速度; $\frac{d\theta_l}{dt}$ 是倾斜角速度。

相关参数

1	lI	0.02[m]	倾斜杆长
2	lr	0.01[m]	倾斜杆半径
3	vf	4.6[m/s]	初始前进速度
4	xHB	0.80757	方向控制铰链中心x坐标
5	zHB	-0.9	方向控制铰链中心z坐标
6	IBxx	9.2[kg*m^2]	后框架惯性张量xx分量
7	IBxz	2.4[kg*m^2]	后框架惯性张量xz分量
8	IByy	11[kg*m^2]	后框架惯性张量yy分量
9	IBzz	2.8[kg*m^2]	后框架惯性张量zz分量
10	mB	85[kg]	后框架质量
11	xB	0.3[m]	后框架质心x坐标
12	zB	-0.9[m]	后框架质心z坐标
13	rR	0.3[m]	后轮半径
14	IRxx	0.0603[kg*m]	后轮惯性张量xx分量
15	IRyy	0.12[kg*m]	后轮惯性张量yy分量
16	mR	2[kg]	后轮质量
17	sll_r	0.065[m]	后轮旋转杆长
18	st	18[deg]	前叉倾角
19	wb	1.0188[m]	前后轮中心距
20	IHxx	0.05892[kg]	前框架惯性张量xx分量
21	IHxz	-0.00756[k]	前框架惯性张量xz分量
22	IHy	0.06[kg*m]	前框架惯性张量yy分量
23	IHzz	0.00708[kg]	前框架惯性张量zz分量
24	mH	4[kg]	前框架质量
25	xH	0.9[m]	前框架质心x坐标
26	zH	-0.7[m]	前框架质心z坐标
27	rF	0.35[m]	前轮半径
28	IFxx	0.1405[kg*m]	前轮惯性张量xx分量
29	IFyy	0.28[kg*m]	前轮惯性张量yy分量
30	c	0.08[m]	前轮尾迹
31	mF	3[kg]	前轮质量
32	sll_f	0.0675[m]	前轮旋转杆长

其中，我们假设将人的质量与后框架质量合并。考虑人的质量时后框架质量为85KG，不考虑人时则为10KG。

制造扰动：

考虑人质量时：在后框架质心上作用一个大小为500N的力，方向沿+y方向。持续时间从0s到0.08s.

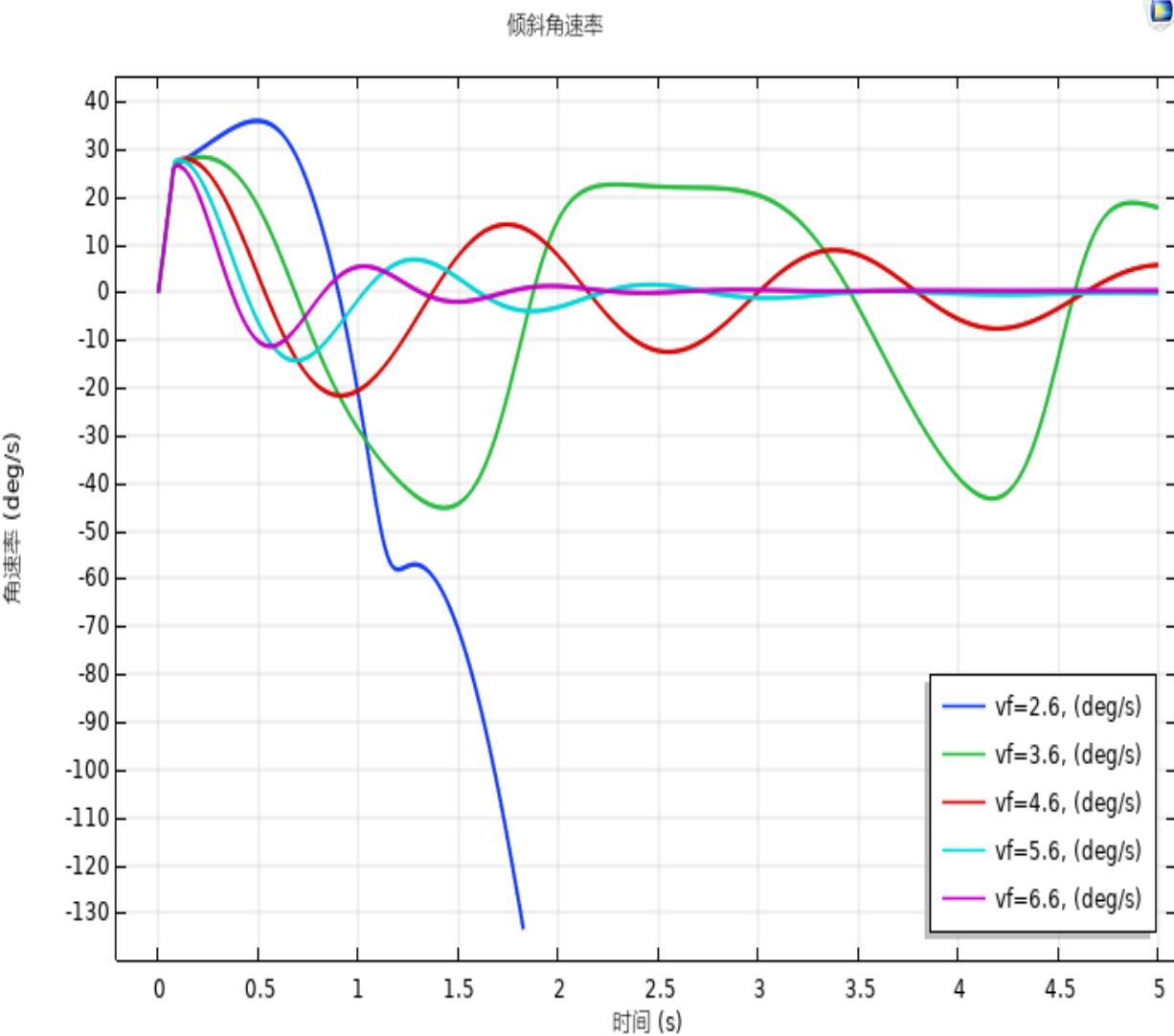
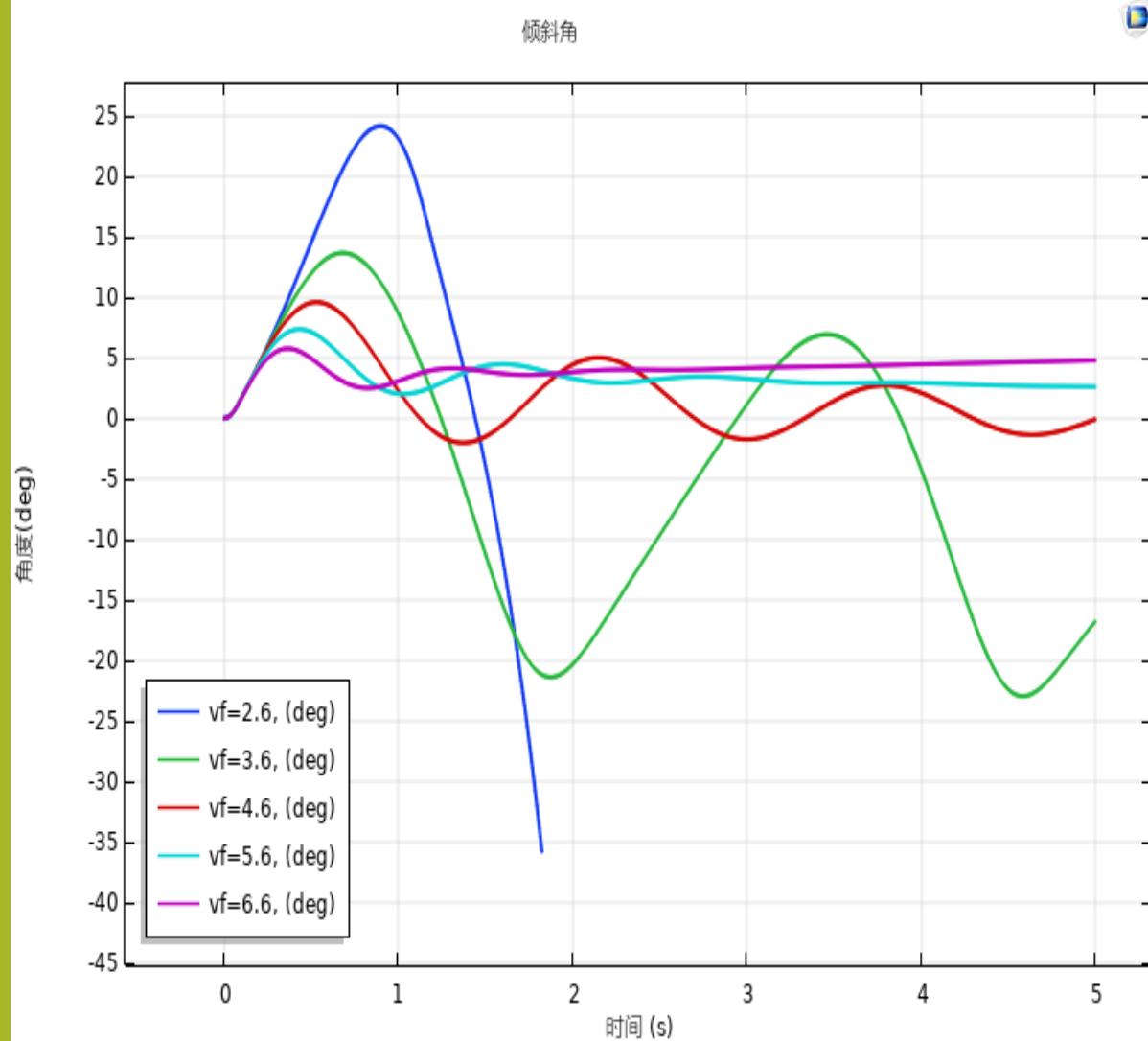
不考虑人质量时：在后框架质心上作用一个大小为60N的力，方向沿+y方向。持续时间从0s到0.08s.

- 衡量平衡程度：通过模拟0-5s内自行车的运动，分别绘制倾斜角速率-时间、倾斜角-时间、偏航角速率-时间、偏航角-时间的图像进行分析。

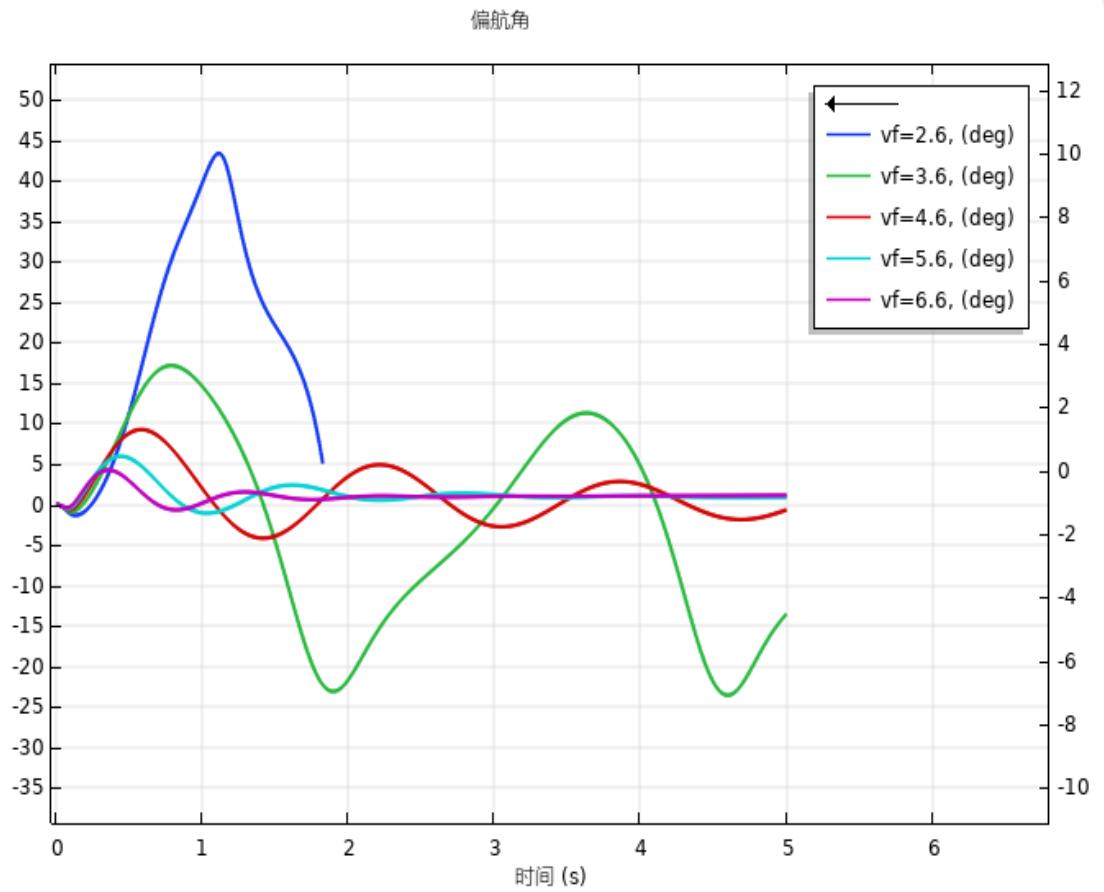
第四部分：研究结果

- 初速度 (v_f) 对自平衡的影响 (3组) :
 - 后框架质量为85kg, 干扰力为500N, v_f 区间2.6m/s-6.6m/s, 间距为1m/s
 - 后框架质量为10kg, 干扰力为60N, v_f 区间2.6m/s-6.6m/s, 间距为1m/s
- 后框架质量为10kg, 干扰力为60N, v_f 区间8m/s-14m/s, 间距为2m/s

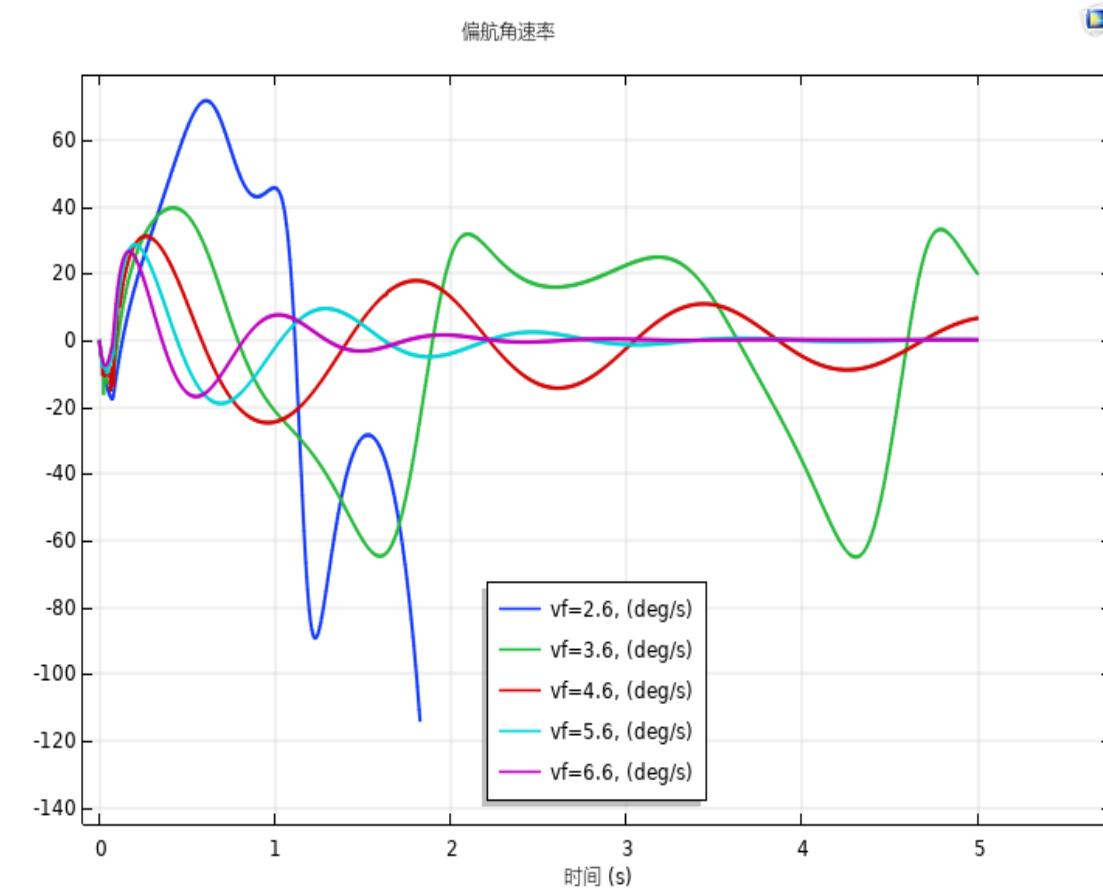
第一组：后框架质量为85kg，干扰力为500N



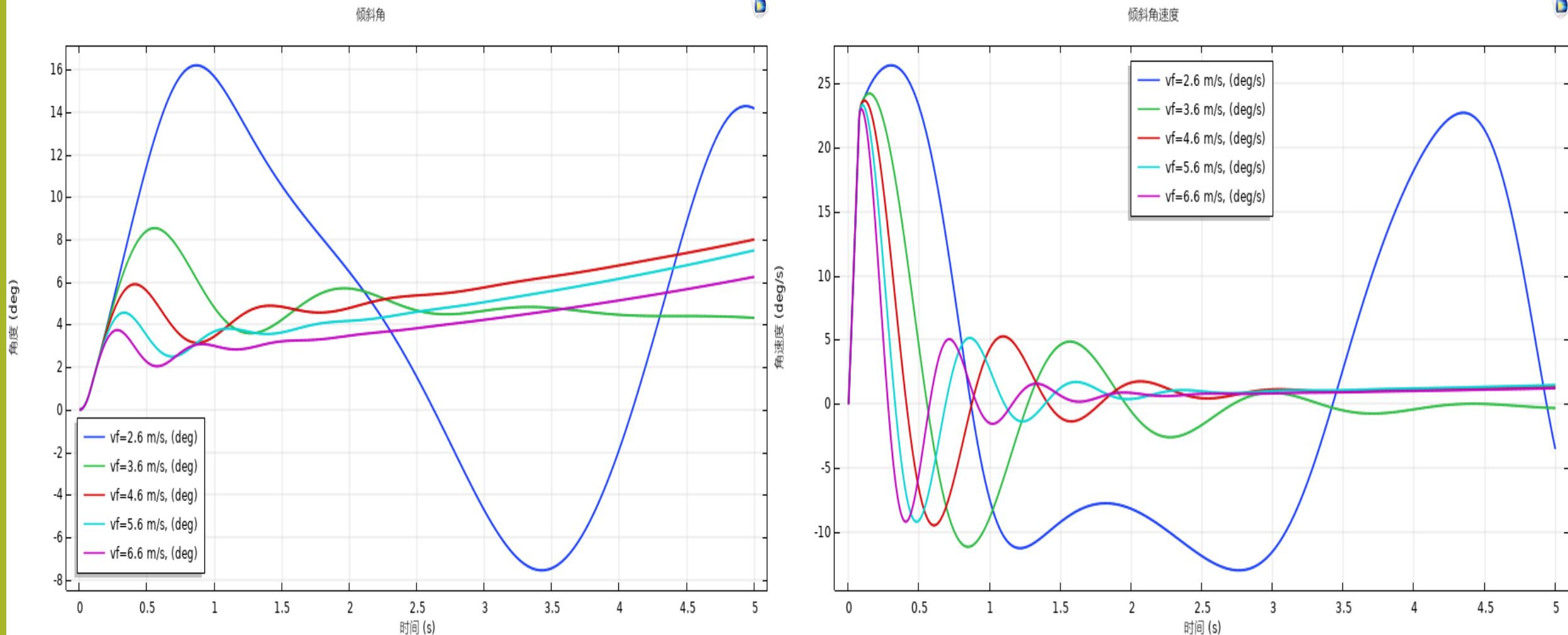
角度(deg)



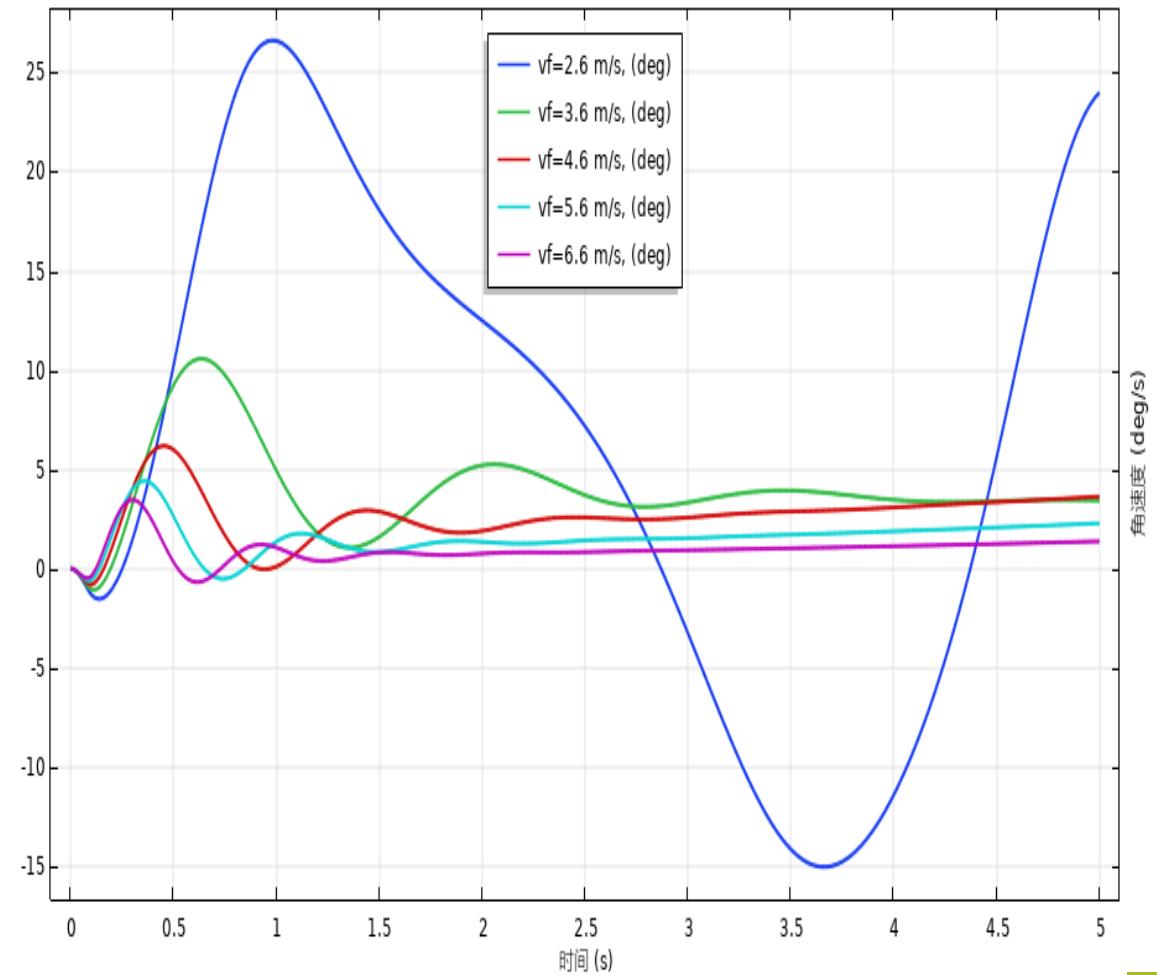
角速率(deg/s)



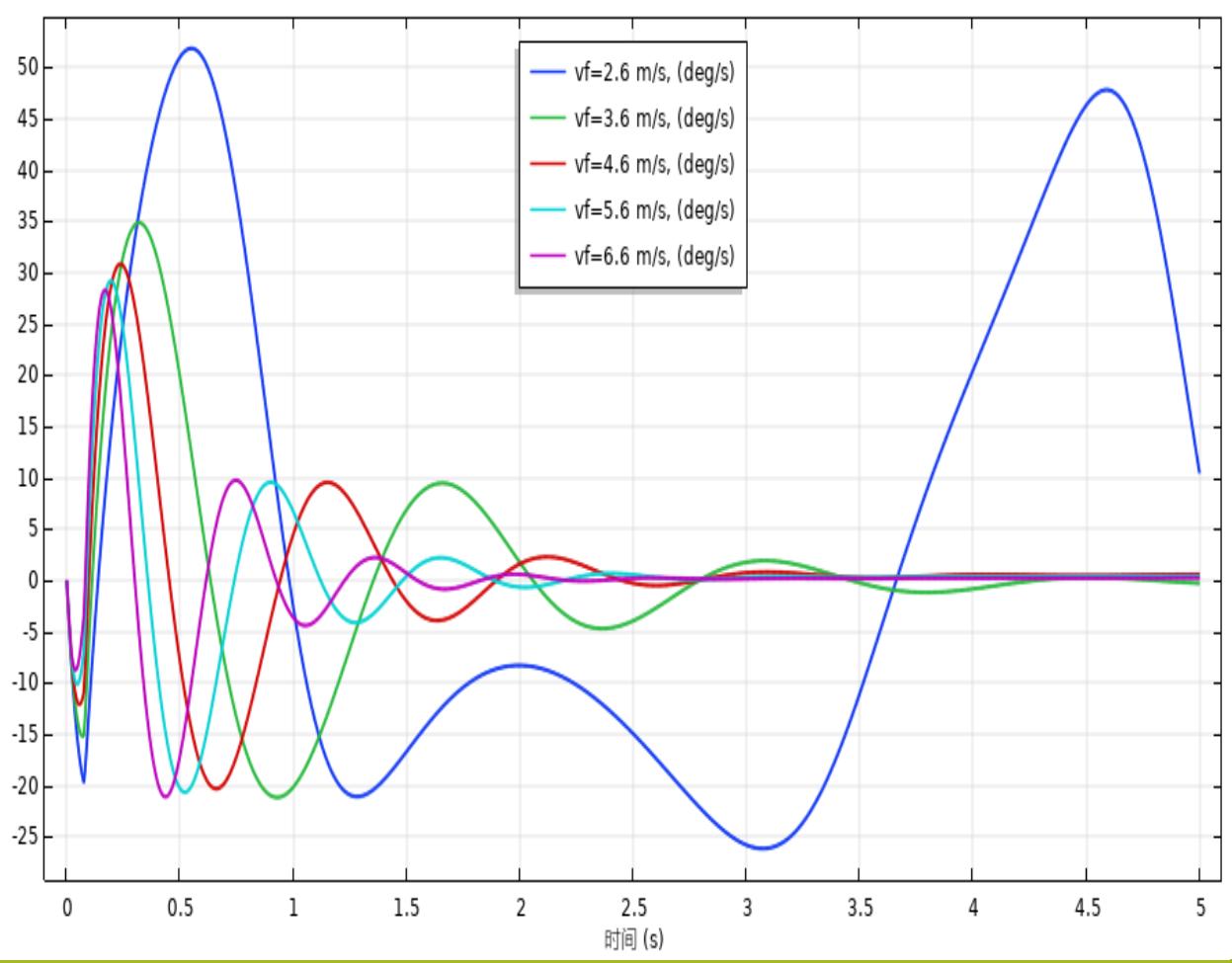
第二组：后框架质量为10kg，干扰力为60N



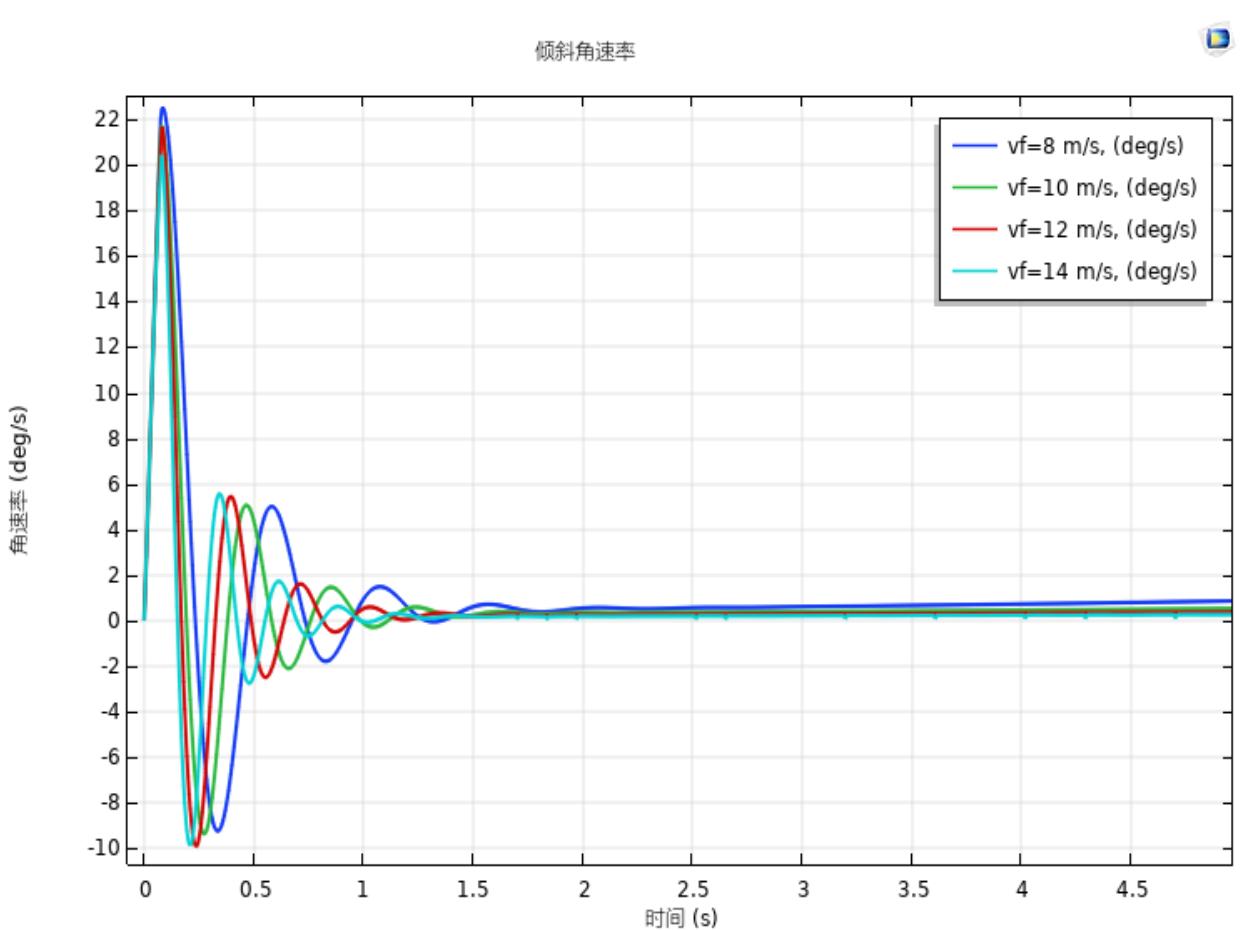
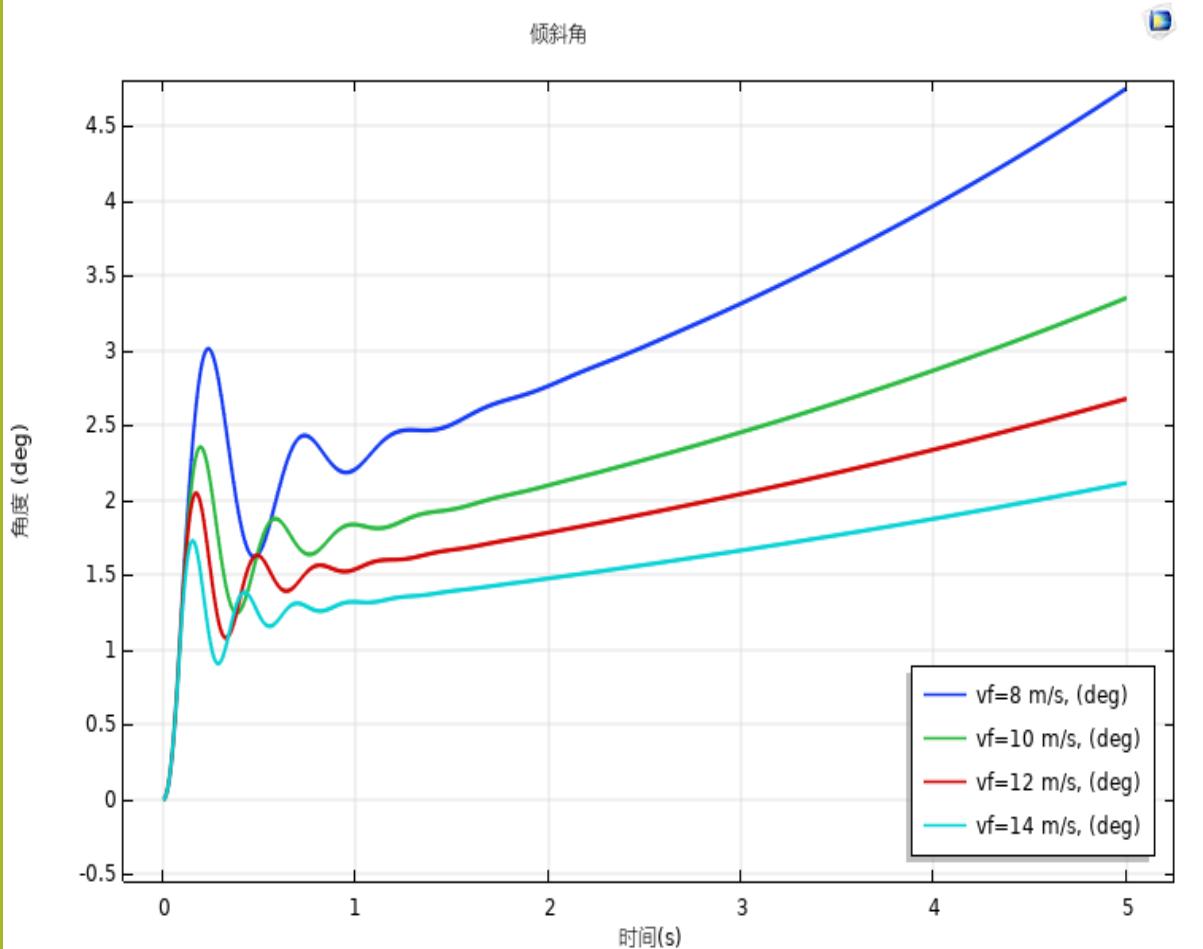
偏航角

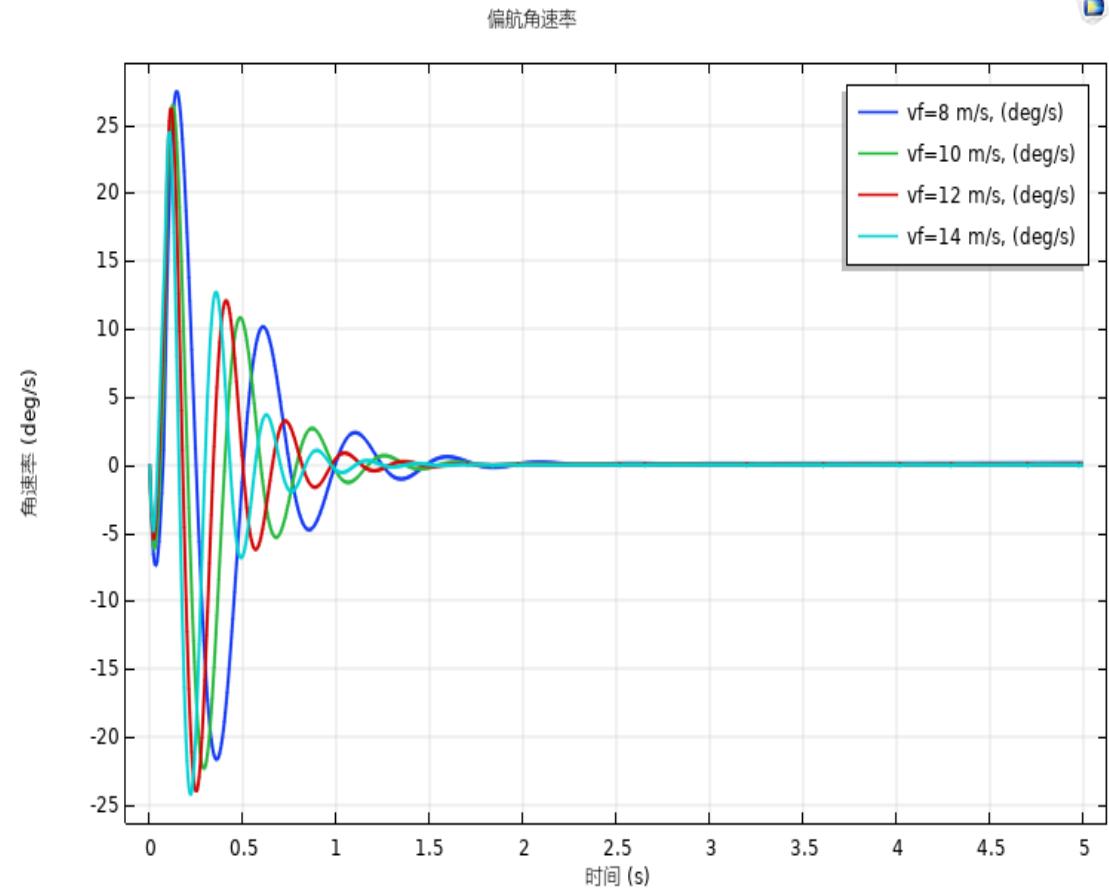
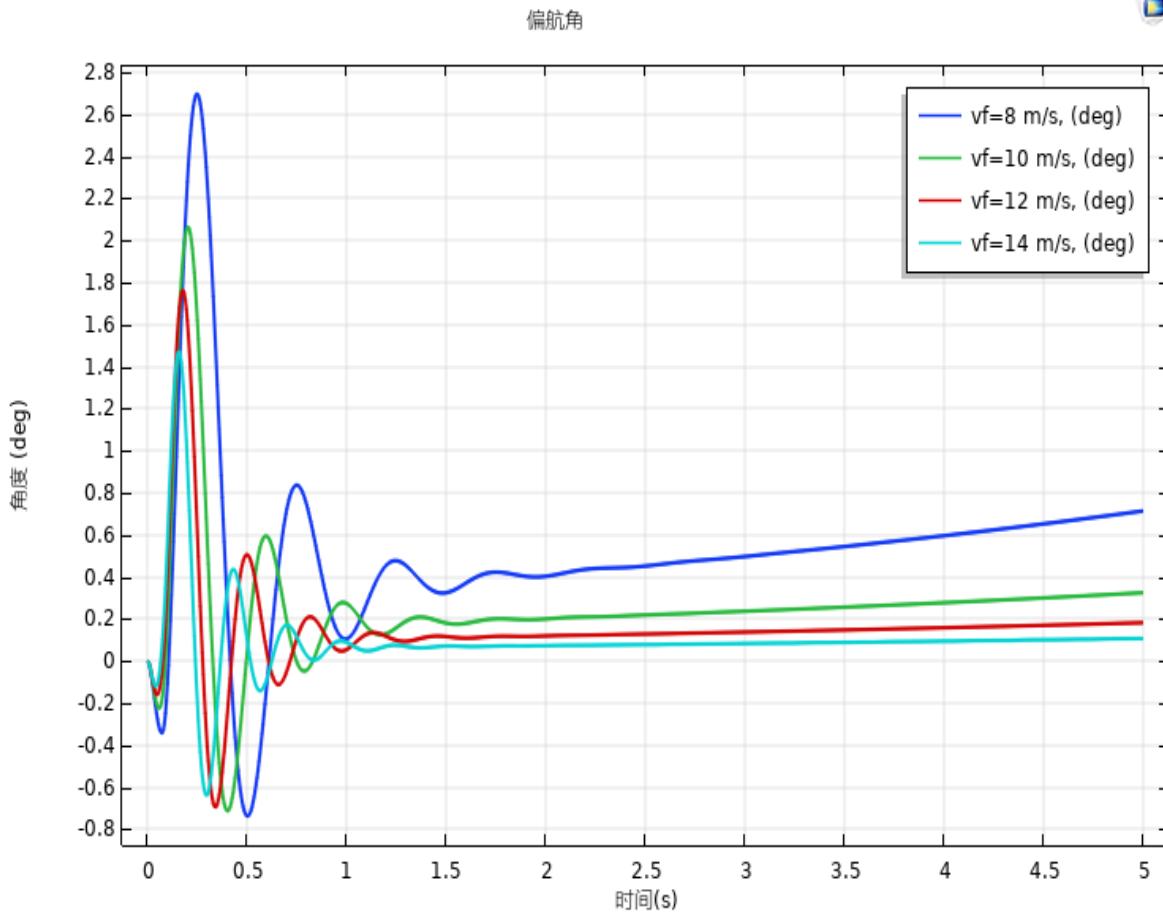


偏航速度



第三组：后框架质量10kg，干扰力60N





前叉倾角：

- 第一组：后框架质量为85kg，干扰力为500N，初速度4.6m/s
- 第二组：后框架质量10kg，干扰力60N，初速度3.6m/s
- （详情请见PDF）

重心位置：

第一组

- 控制变量：
- 后框架质量85kg，
- 重心位置的Z坐标为-0.9

第二组

- 控制变量：
- 后框架质量85kg，
- 重心位置的x坐标为0.3
- （详情请见PDF）

第五部分 任务分工

- 聂文恺、邱锦盛主要负责理论分析（研究模型）、搜集资料。
- 李懿轩、陈华辰主要进行虚拟样机模拟、对实验数据进行分析。
- （该分配方案根据现实情况灵活调整）

第六部分：参考文献

- 【1】 Timoshenko and Young, Advanced dynamics, McGraw-Hill Book Company, New York, 1948
- 【2】 <http://blog.sciencenet.cn/blog-39472-770407.html>
- 【3】 <http://cn.comsol.com/blogs/simulating-the-motion-of-a-self-stable-bicycle/>

• 谢谢欣赏