



# 电动力绳系推进系统降轨销毁空间碎片研究

电动力绳系推进技术

汪卫

[wweibit@163.com](mailto:wweibit@163.com)



导电绳放置在近地轨道运行时，绳子切割地球磁场线，产生感应电动势，绳系一端发射电子，一端收集电子，形成闭合回路产生电流，与地球磁场发生作用时，产生洛伦兹力，该力可用来脱轨空间碎片或提升航天器轨道。

- 发电机模式：势能转换为电能，可用于降轨
- 发动机模式：电能转换为势能，可用于升轨



Figure: EDT 系统的原理示意图



- 1 研究背景
- 2 电动力绳系推进技术
- 3 EDT 技术可行性分析
- 4 电动力绳降轨模型
- 5 化学火箭发动机推进系统的降轨计算
- 6 电动力绳系降轨性能分析
- 7 结论





- 1 研究背景
  - 空间碎片现状
  - 空间碎片的危害
  - 电动力绳系的应用前景
- 2 电动力绳系推进技术
- 3 EDT 技术可行性分析
- 4 电动力绳降轨模型
- 5 化学火箭发动机推进系统的降轨计算
- 6 电动力绳系降轨性能分析
- 7 结论





1957 年至今, 已有 20 多个国家和国际组织先后进行了 4800 多次航天发射与飞行, 送入空间的物体超过 6000 个, 其中仍有大约三分之一遗留在空间沿轨道飞行, 其他的因丧失功能而变成了空间垃圾。同时, 已发生过 240 余次在轨航天器或火箭载体爆炸/撞击 ( 破碎 ) 事件, 产生了数量众多的空间垃圾。



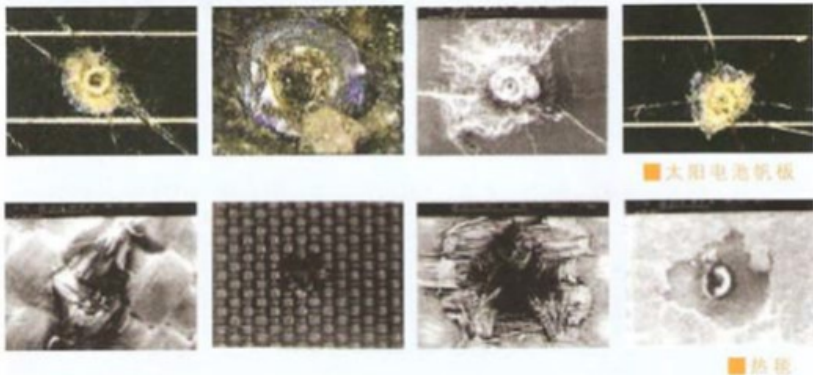
太空垃圾随着时间的推移而增多, 会产生一条环绕地球的碎片带

危 !

在近地轨道, 若其数量达到饱和状态, 则意味着碎片与卫星相碰概率增大, 甚至有可能由于碰撞而发生连锁反应, 使得轨道资源成为废墟



- 意外解体和有意自毁产生长期存在的碎片
- 运载火箭轨道级和航天器运行过程中有意分离的碎片
- 碰撞和连锁碰撞产生的碎片





电动力绳系清除太空垃圾具有可行性，且重要一点成本较低，具体应用：

- 在未来的卫星平台或火箭第三级加装一种小型的 EDT 系统，在卫星寿命结束或第三级脱落后，加速报废卫星进入销毁轨道，从而控制未来在轨垃圾的数量
- 发展电绳系推进技术与非合作目标捕获技术相结合的卫星平台，它通过捕获在轨垃圾、碎片后，通过电绳系推进变轨，将碎片“搬运”至地球销毁轨道，然后再通过电绳系推进该卫星平台又升轨回到原先轨道，再执行下一次的捕获销毁任务

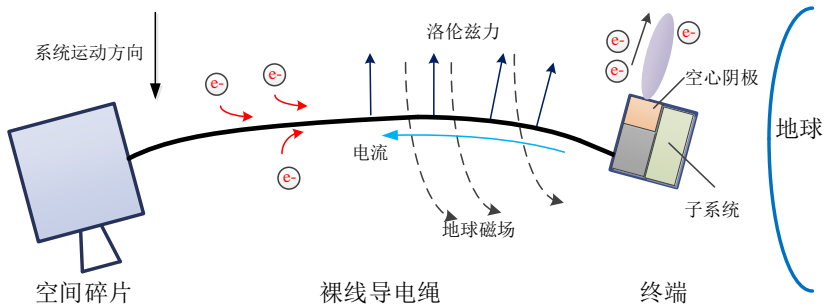




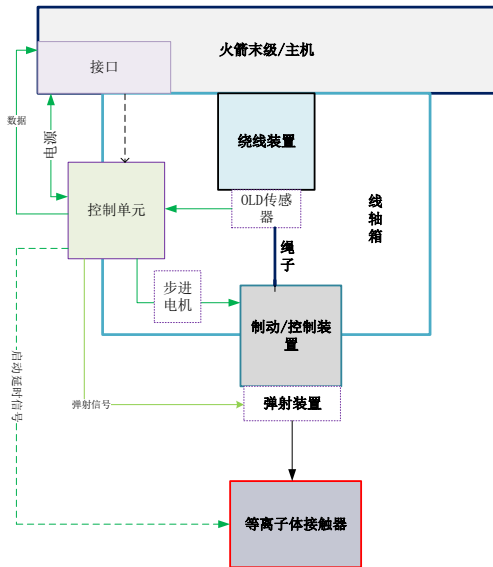
- 1 研究背景
- 2 电动力绳系推进技术
  - EDT 系统架构
  - 各组件简介
- 3 EDT 技术可行性分析
- 4 电动力绳降轨模型
- 5 化学火箭发动机推进系统的降轨计算
- 6 电动力绳系降轨性能分析
- 7 结论







- 电子收集装置
- 电子释放装置
- 导电系绳



## 主要模块

- 储线模块
- 制动控制模块
- 接触器模块

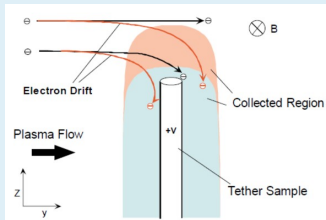


## 球形结构



- 吸收电子效率低；
- 系统质量大

## 裸绳结构

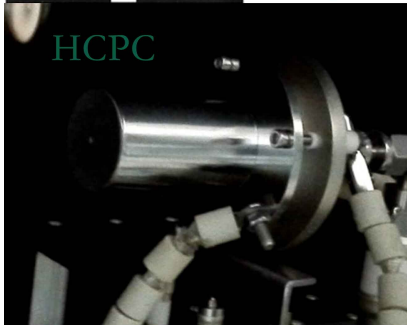
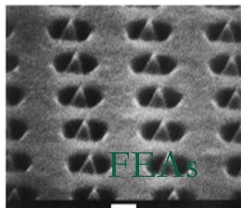


- 收集电子效率高；
- 系统总质量小；
- Sanmartin 提出把导电绳裸露部分自身作为阳极收集电子。



## 三大结构

- 热极电子枪 ( TC );
- 场发射阵列 ( FEAs );
- 空心阴极等离子体接触器 ( HCPC )

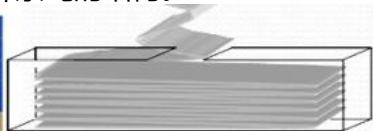




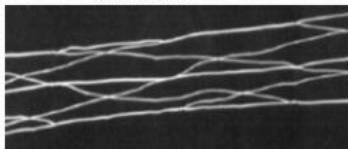
导电绳子电动力绳系的核心部件，空间电动力绳系因生存环境复杂需要对绳系的强度、抗干扰能力等有较高的要求，因此学者们提出了多种系绳的结构。



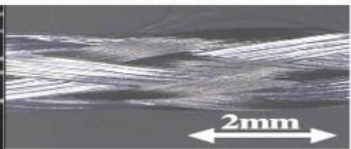
a) 双线结构



a) 带状结构



c) 网状结构



d) 麻花结构



- 1 研究背景
- 2 电动力绳系推进技术
- 3 EDT 技术可行性分析
  - EDT 在轨实验验证
  - 国外 EDT 项目
- 4 电动力绳降轨模型
- 5 化学火箭发动机推进系统的降轨计算
- 6 电动力绳系降轨性能分析
- 7 结论

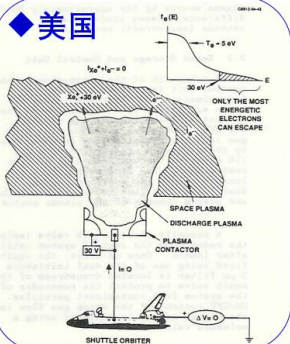




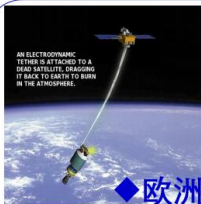
研究机构	发射日期	项目名称	绳子长度	主要研究	成功与否	备注
NASA	1966	Gemini 11	0.036	人造重力	是	旋转保持 0.15rpm
NASA	1966	Gemini 12	0.44	重力梯度稳定	是	人工手动控制
NASA/ISAS	1985	Charge-2	0.426	电子的收集与发射	是	
NASA/ISAS	1992	CHARGE - 2B	0.4	电子的收集与发射	是	
CSA	1989	Oedipus-A	0.959	等离子体研究	是	
CSA	1995	Oedipus-C	1.174	等离子体研究	——	
NASA/ISAS	1992	TSS-1	0.26	电动力及电流产生	否	绳子被卡住
NASA/ISAS	1996	TSS-1R	19.6	力及电流产生	大部分是	绳子后来被碎片隔断
NASA	1993	PMG	0.5	电流和推力特性	是	7 个小时的飞行
NASA	1993	SEDS-1	20	绳系选择, 切断控制	是	绳子后被切断
NASA	1994	SEDS-2	19.7	绳系的控制、伸展	是	
NRL	1996	TiPS	4	绳系的生存能力及稳定性	是	
NASA	2005	ProSEDS	19	电动力对废弃卫星降轨	任务取消	空间站安全取消
ESA	1997	YES	35	旋转、再轨	否	轨道选择不当
ESA	2007	YES2	31.7	航天器的精确再轨	大部分是	过度绳系展开
NRO	1998	ATeX	0.02 of 6.2	稳定性和存活率	否	S/W 阻止展开
TUI/IDC	2007	MAST	1	动力学数据采集	否	没有展开
JAXA	2010	T-REX	0.3	带绳展开、HCPC 及 OML	验证大部分是	亚轨道运行成功
JAXA	2017	HTV6	0.7	空间碎片离轨	失败	释放机构出错



## ◆美国



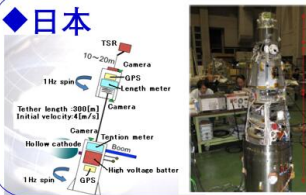
## 等离子体接触器系统



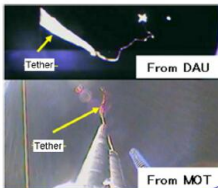
## ◆欧洲



## ◆日本



- TSR
- DAU
  - S-TLM antenna
  - Tether BOX
  - GPS antenna
  - MOT
  - Hollow cathode
  - Boom
  - Space potential measurement probe
  - High voltage battery







国内目前并没有开展关于空间电动力绳系的在轨实验。

- 主要集中在动力学和模拟仿真阶段；
- 南京航空航天大学利用气浮平台实验；
- 北京理工大学进行核心部件空心阴极等离子体接触器的地面试验，研究实际空心阴极的实际放电特性，研制模型样机，搭建总体释放实验平台。





- 在轨道实验验证了绳系中电流、洛伦兹力的产生的可行性；
- 应用具有可靠性（ Tips 实验，在轨服役 10 年），基本原理和实验上的可行性；
- 几次重大的失败的在轨试验是由于机械结构设计上存在缺陷，而不是基本理论的错误；
- 目前尚未有降轨销毁碎片的成功案例，日本的 HIV6 实验由于释放机构设计缺陷而失败。

▶ 在轨实验统计表





- 1 研究背景
- 2 电动力绳系推进技术
- 3 EDT 技术可行性分析
- 4 电动力绳降轨模型**
- 5 化学火箭发动机推进系统的降轨计算
- 6 电动力绳系降轨性能分析
- 7 结论





在仿真中，EDT 系统假设为二力杆刚体绕地球运动，计算变轨过程使用了相对二体运动轨道计算原理：

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{\mu}{r^3}\mathbf{r} + \frac{\mathbf{F}}{m_2}$$

式中， $\ddot{\mathbf{r}}$  为系统在地心惯性坐标系中的加速度矢量， $r$  为卫星到地心的距离， $\mu$  为地球引力常数， $F$  表示作用在系统上的摄动力，这里仅考虑洛伦兹力和大气阻力。





裸线绳系收集的理论很多，其中目前公认较好的描述该现象的理论是轨道限制理论（简称 OML 理论）。可由 OML 理论推导出电力绳系上绳长为  $l$  的电流变化率：

$$\frac{dI}{dl} = \begin{cases} \frac{eN_e p}{\pi} \sqrt{\frac{2e\Delta V}{m_e}} & V_t - V_p > 0 \\ -\frac{eN_i p}{\pi} \sqrt{\frac{-2e\Delta V}{m_i}} & V_t - V_p < 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中， $e$  为电子电荷， $N_e$  为电子密度， $l$  为系绳的周长， $V_t$  为系绳上的电势， $V_p$  为空间等离子体电势， $m_e$  为电子的质量。





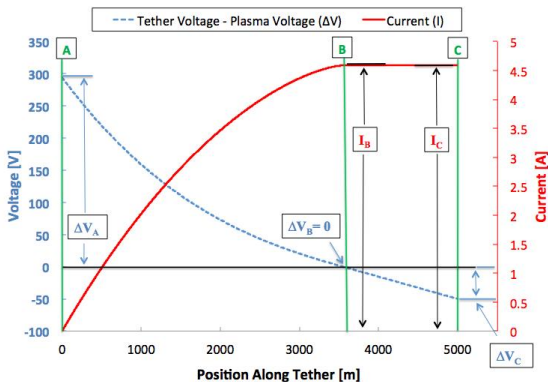
系绳上的电势沿一段长度的绳子变化可由式给出：

$$\frac{dV_t}{dy} = \frac{I}{\sigma S}$$

$$\frac{dV_p}{dy} + E_m = 0$$

$$\frac{d\Delta V}{dy} = \frac{dV_t}{dy} - \frac{dV_p}{dy}$$

$\sigma$  绳子材料的导电率， $S$  为绳子的截面面积。 $E_m$  为绳子的感应电场强度。





为了求解式中方程组，可由边界条件：

$$\begin{cases} V_t|_{y=0} = V_A \\ I|_{y=0} = 0 \\ V_p|_{y=0} = 0 \end{cases}$$

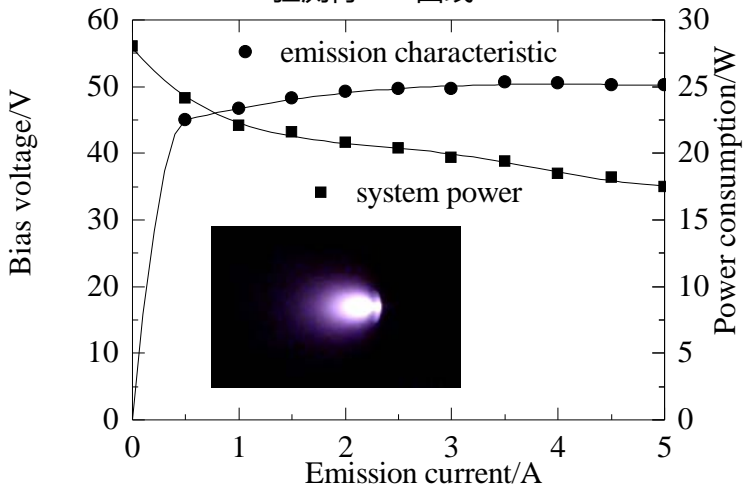
$$\begin{cases} V_t|_{l=l} = V_p|_{l=l} - V_C \\ V_p|_{l=l} = E_m l \\ I|_{l=l} = I_C \end{cases}$$

式中， $V_A$  为绳子  $AC$  的  $A$  端电势， $V_C$  为绳子  $AC$  的  $C$  端电势，即等效于电离子接触器发射端的电势  $I_C$  为发射电流。





$V_C$  为绳子  $AC$  的  $C$  端电势，该边界条件可由实际的 HCPC 实验测得 I-V 曲线：







- 电动力绳系在地磁场中运动时，产生感应出电动势

$$E_m = V_r \times B$$

- 绳索与周围电离层相互耦合产生电流：

$$I = \frac{E}{R}$$

- 导电绳在电磁场中运动，产生洛伦兹力：

$$F = \int_0^l I dl \times B$$

估算：同步轨道上， $v = 7.5\text{km/s}$ ， $B = 20\mu\text{T}$ ，产生  $E = 15\text{V/m}$ ，  
电流  $I = 10 - 20\text{A}$ ，洛伦兹力  $F = 0.5 - 1\text{N}$



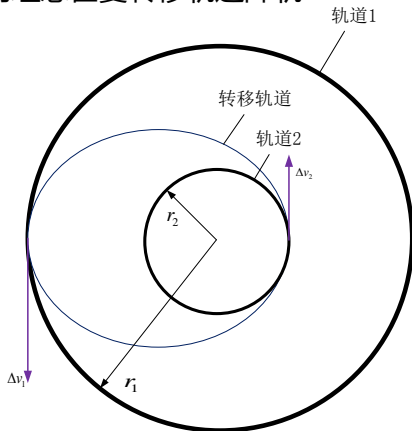


- 1 研究背景
- 2 电动力绳系推进技术
- 3 EDT 技术可行性分析
- 4 电动力绳降轨模型
- 5 化学火箭发动机推进系统的降轨计算**
- 6 电动力绳系降轨性能分析
- 7 结论





采用传统的固体火箭发动机推进计算方法，参照轨道动力学二体运动模型，采用理想霍曼转移轨道降轨





- 两次变轨速度增量：

$$\Delta v_1 = \sqrt{\frac{\mu}{r_2}} \left( \sqrt{\frac{2r_1}{r_1 + r_2}} - 1 \right)$$

$$\Delta v_2 = \sqrt{\frac{\mu}{r_1}} \left( 1 - \sqrt{\frac{2r_1}{r_1 + r_2}} \right)$$

- 由开普勒第三定律可得变轨时间：

$$\Delta t = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4\pi^2 a_H^3}{\mu}} = \pi \sqrt{\frac{(r_1 + r_2)^3}{g\mu}}$$

- 化学推进系统的推进剂的质量：

$$M_p = \frac{(\Delta v_1 + \Delta v_2)m}{I_{sp}}$$





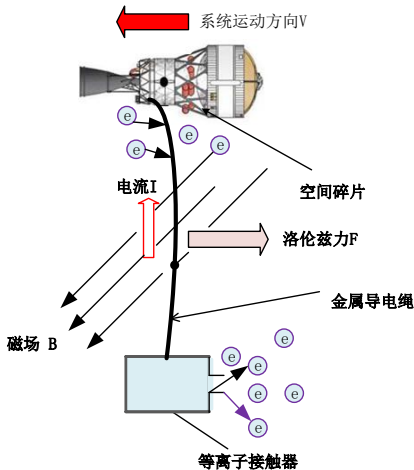
- 1 研究背景
- 2 电动力绳系推进技术
- 3 EDT 技术可行性分析
- 4 电动力绳降轨模型
- 5 化学火箭发动机推进系统的降轨计算
- 6 电动力绳系降轨性能分析**
  - 仿真条件设定
  - 降轨空间碎片参数设定
  - 性能分析
  - 与化学推进剂降轨的比较

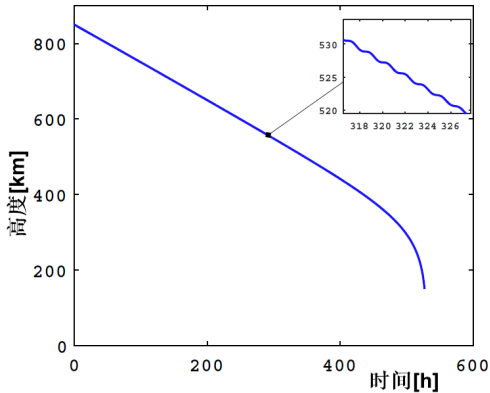




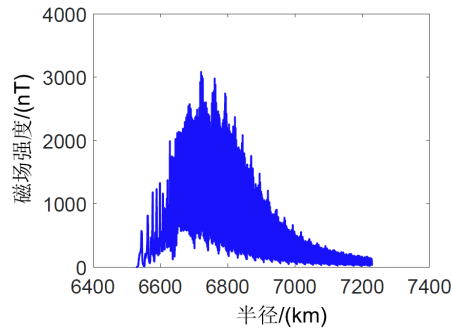
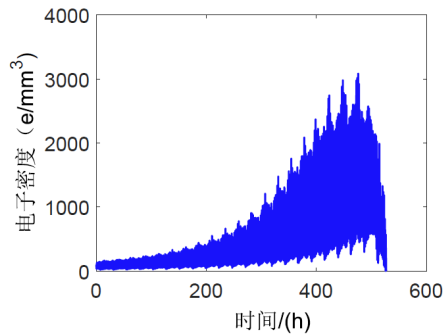
## 参数设定

- 轨道参数:  $0^\circ$  倾角, 高度 850km – 150km ;
- 导电绳参数: 铝质绳长度 5km, 直径 1mm;
- 地球环境模型: IRI(2007) 模型、IGRI2012, 低于 300km 的大气阻力模型
- 系统质量: 碎片质量 1000kg, EDT 系统质量约 114kg



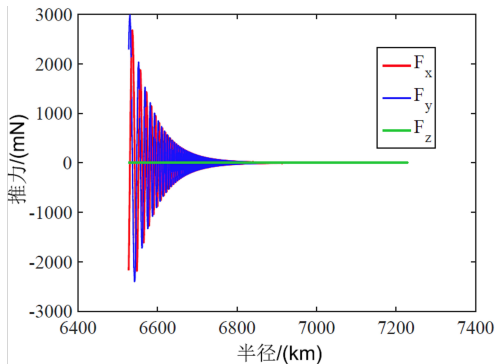


- 降轨消耗 527 小时，且在高度低于 300 公里处的降轨速度明显加快
- 在系统降轨过程中，系统出现振动，这和系统所受到的阻力是变化的有关。



推力的变化主要和地球磁场环境变化和等离子体密度相关。在磁场强度高和电子密度密集区，相应的推力越大。



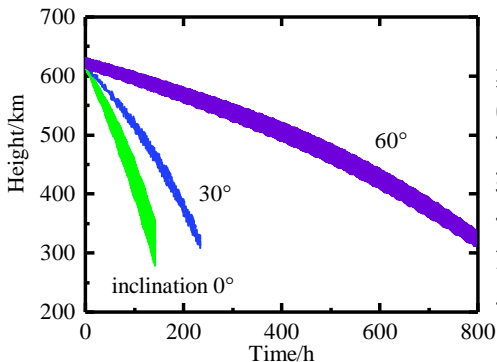


将其沿着惯性坐标系分解，容易知道  $F_y$  方向上的分解为 0，从图示可以看出，在  $F_x, F_y$  方向上力对称振荡，随着轨道高度的减小，效应更明显。

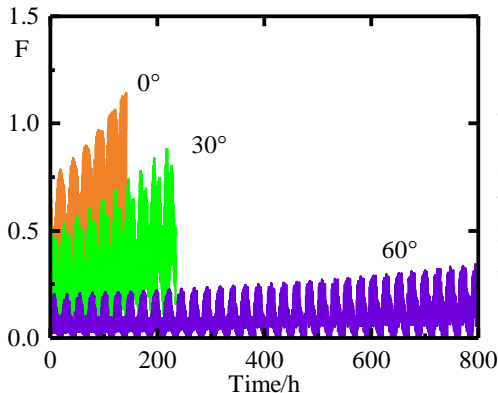


# 不同轨道倾角条件下的轨道高度的变化

34



案例计算轨道倾角分别为 $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  的降轨，为了节省计算机运行时间，变轨高度 600-200km 的变化，从图中可以看出低倾角的电动力绳降轨效果明显的多。



可以产生 N 级别的洛伦兹力，且随着轨道倾角的降低而增大。同时与地球磁场和等离子体密度的变化有些正相关。



在计算化学火箭发动机性能参数时，对于化学火箭发动机，推进剂质量与发动机质量比一般限制在 0.5 与 0.7 之间，同时一般姿轨控火箭发动机的比冲范围为  $250s - 300s$ 。选取比冲为  $270s$ ，并进行三组算例进行计算。

- 第一组算例轨道及系统参数：轨道高度 850km-150km;
- 第二组算例轨道及系统参数：轨道高度 700km-200km;
- 第三组算例轨道及系统参数：轨道高度 700km-400km;





## 第一组算例

比较项目	变轨时间 ( $h$ )	推进剂质量 ( $kg$ )	系统质量 ( $kg$ )	有效比冲 ( $s$ )
电力绳系统	527	0.013	113.8	27047
化学推进系统	0.79	159.8	267	270

## 第二组算例

比较项目	变轨时间 ( $h$ )	推进剂质量 ( $kg$ )	系统质量 ( $kg$ )	有效比冲 ( $s$ )
电力绳系统	375	0.013	113.8	29057
化学推进系统	0.78	104.5	174	270

## 第三组算例

比较项目	变轨时间 ( $h$ )	推进剂质量 ( $kg$ )	系统质量 ( $kg$ )	有效比冲 ( $s$ )
电力绳系统	276	0.013	113.8	30067
化学推进系统	0.80	91.6	151	270





- 化学推进降轨最显著特点所需时间少，电动力绳系降轨时间相对较长，对比于自然销毁，时间短；
- 电动力绳系的最大优点是所需推进剂量少，同样的任务，化学推进系统推进剂的质量是电动力绳系的 1000 多倍。随着降轨范围的增大，化学火箭发动机所需要的推进剂质量成倍增加，而电动绳系的所需要的推进剂（推进剂为氩气）几乎不变，推进系统的总质量随着轨道高度差的增大，系统的总质量显著增加，而电动力绳系的质量变化很小；
- 在化学推进取最佳有效比冲情况下，电动力绳的推进系统的有效比冲是化学推进的有效比冲的 100 多倍，也说明电动力绳系适合消耗工质少的情况下的长时间持续推进

▸ 降轨分析





- 1 研究背景
- 2 电动力绳系推进技术
- 3 EDT 技术可行性分析
- 4 电动力绳降轨模型
- 5 化学火箭发动机推进系统的降轨计算
- 6 电动力绳系降轨性能分析
- 7 结论





- 适合 LEO ( 1500km ) 近地轨道，推力与地球环境相关，在地球磁场，等离子体密度密集的区域，相应的降轨推力也越大；
- 降轨过程中，推力呈现振动形式，系统产生的推力足以在规定的时间内将大型空间碎片进行销毁；
- 化学推进需要消耗大量的推进剂，成本显著增加。电动力绳系推进系统虽然降轨与化学推进相比时间长，但系统质量小、推进剂消耗极少、有效比冲高。







**欢迎专家指导！**