

磁悬浮列车工作原理

陈述人：郑文琛

pb02011062

(一) 应用背景

- 1922

Hermann Kemper提出
电磁悬浮原理

- 1970's,工业化发展

→ 要求提高运输能力

轮轨极限速度



$V \leq 350 \text{ km/h}$

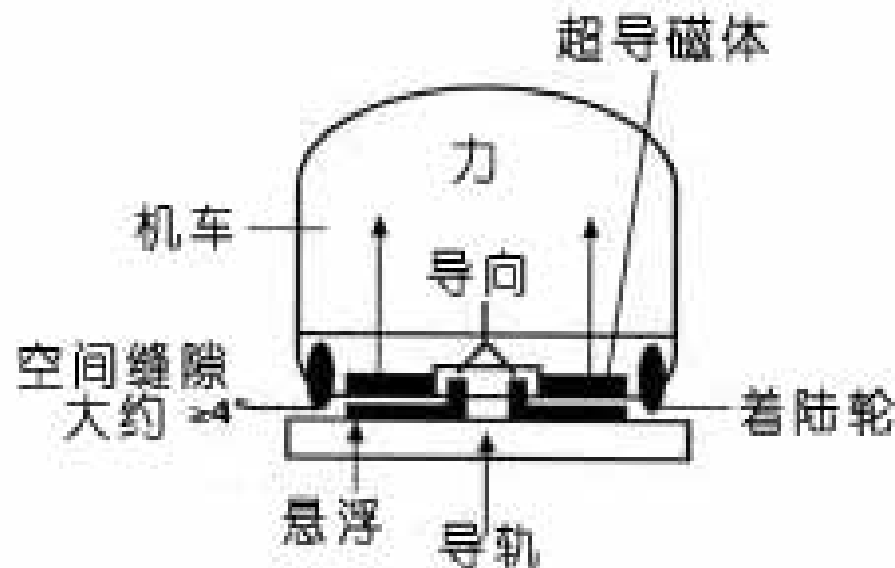
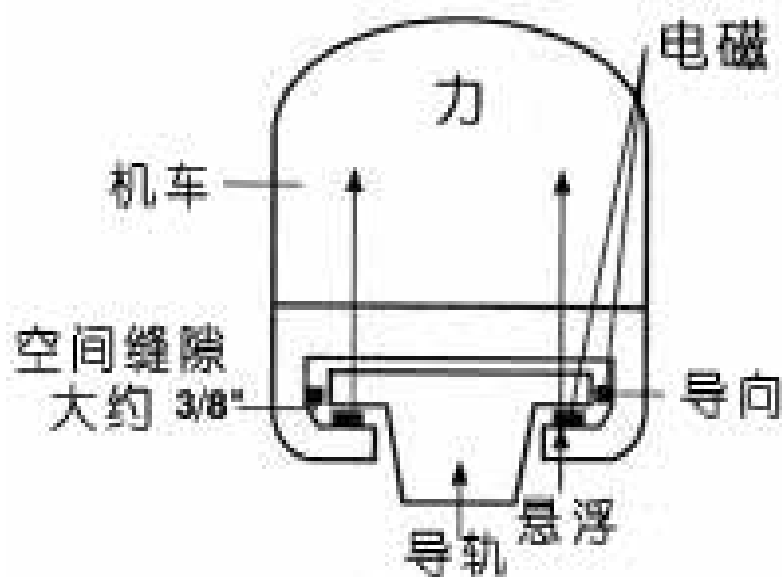
非接触式运输系统



磁悬浮列车



(二) 磁悬浮系统类型



- 电磁悬浮系统 (Electro Magnetic System): 依靠在机车上的电磁铁和导轨上的铁磁轨道相互吸引产生悬浮, 属吸力悬浮系统, 并主要应用于德国常导磁悬浮列车系列.(左图)
- 电力悬浮系统 (Electro Dynamic System): 将磁铁使用在运动的机车上以在导轨上产生感应电流, 进而产生电磁斥力以支撑和导向列车. 属斥力悬浮系统, 并主要应用于日本超导磁悬浮列车系列.(右图)

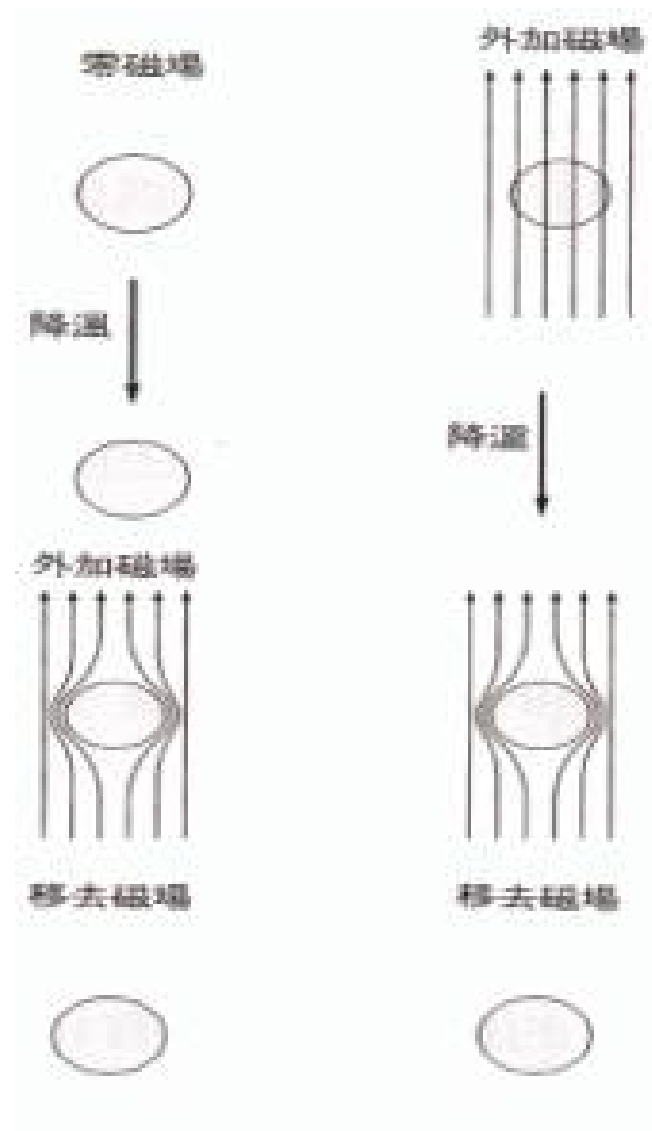
(三)工作原理

磁悬浮列车大体可分为三个部分:

1. 悬浮系统:主要依靠轨道底部线圈和车载电磁铁之间产生电动斥力来实现.
2. 导向系统:主要依赖于轨道侧壁线圈和车载电磁铁相互作用来实现.
3. 动力系统:根据Maxwell电磁场动力学理论,采用直线电机作为动力系统,并借助于在运行过程中产生电磁推力来推动和维持列车运行.

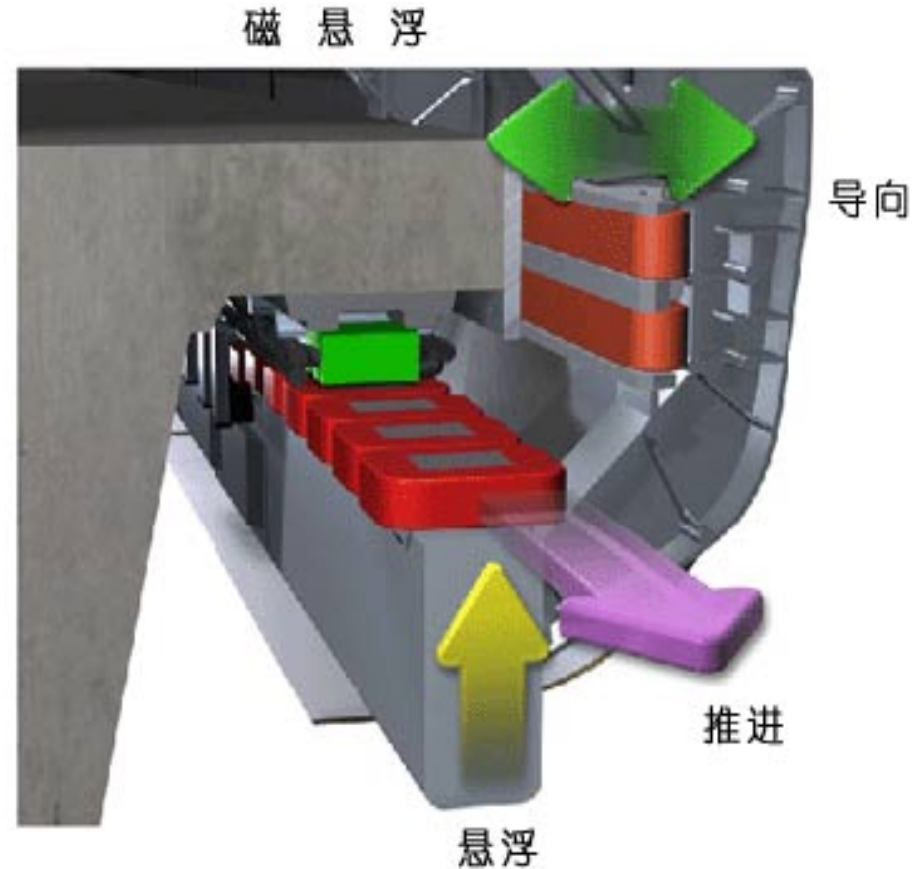
1. 悬浮系统

- Meissner效应: 当金属处在超导状态时, 超导体表面产生感应电流, 进而产生附加磁场与外部磁场抵消, 内部的磁感应强度为零. 此时附加场和外部场相作用产生的电磁斥力可以将超导体悬起.
- 超导体的两个重要特性: 零电阻和抗磁性。



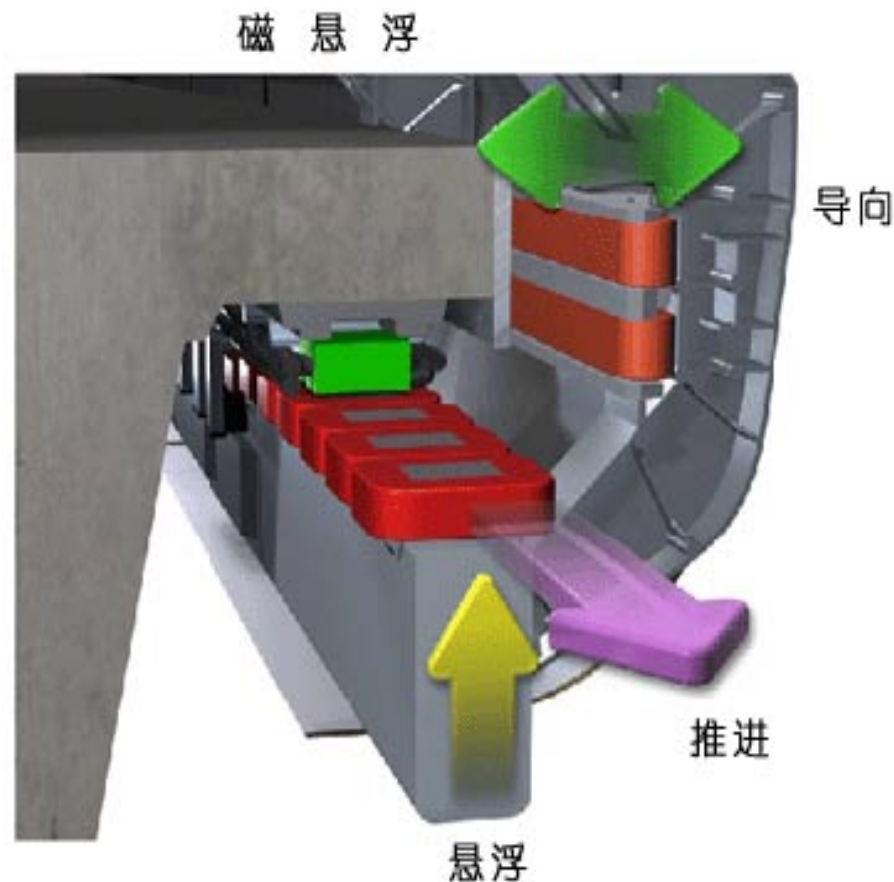
实际模型

- ◆在列车每节车厢两侧底侧,装载有6~8个超导磁体,并通过液氮作为冷却系统.
- ◆当列车起到或进站时,列车依靠车轮行驶,随着列车加速,导轨线圈通电,根据Meissner效应,车与轨之间产生电动斥力,(数量级为 10^3N/m^2)从而实现悬浮.



2. 悬浮系统

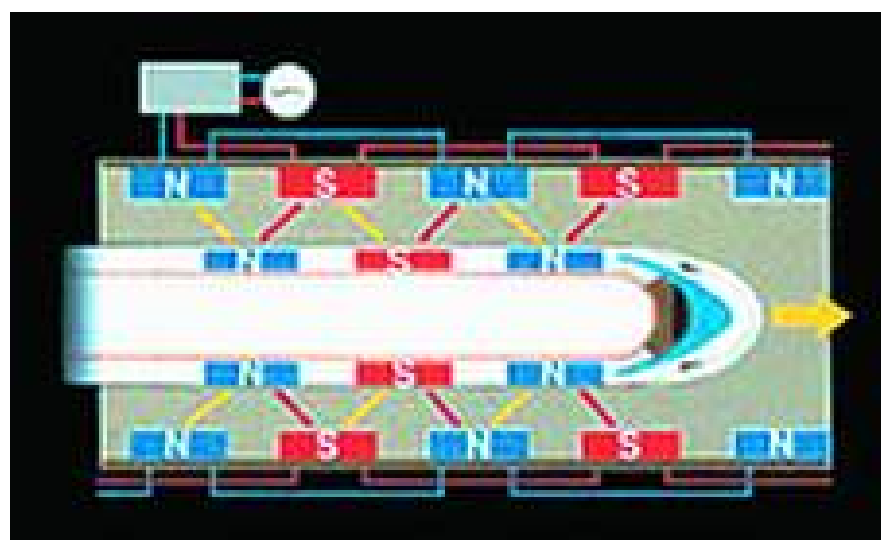
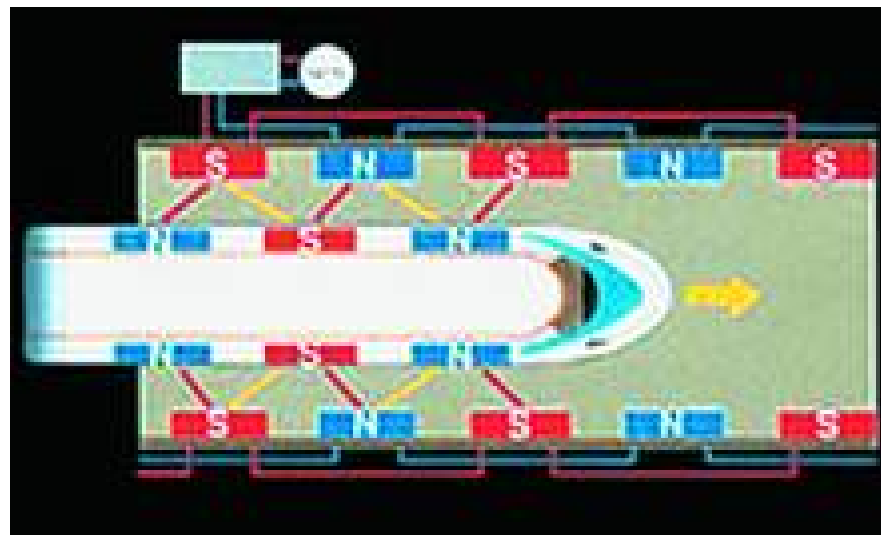
- ◆ 导向系统依靠轨道两侧的线圈,按照实际所需的横向倾角的大小,对线圈中的交变电流进行调节,进而提供所需的导向力.
- ◆ 假设转子受到扰动,偏离其参考位置,这时传感器检测出转子偏离参考点的位移,控制器将检测的位移变换成控制信号,然后功率放大器将信号转换成控制电流,并在执行磁铁中产生磁力,从而驱动转子返回到原来平衡位置。因此,不论转子受到哪个方向的扰动,转子始终能处于稳定的平衡状态。



3.动力推进系统

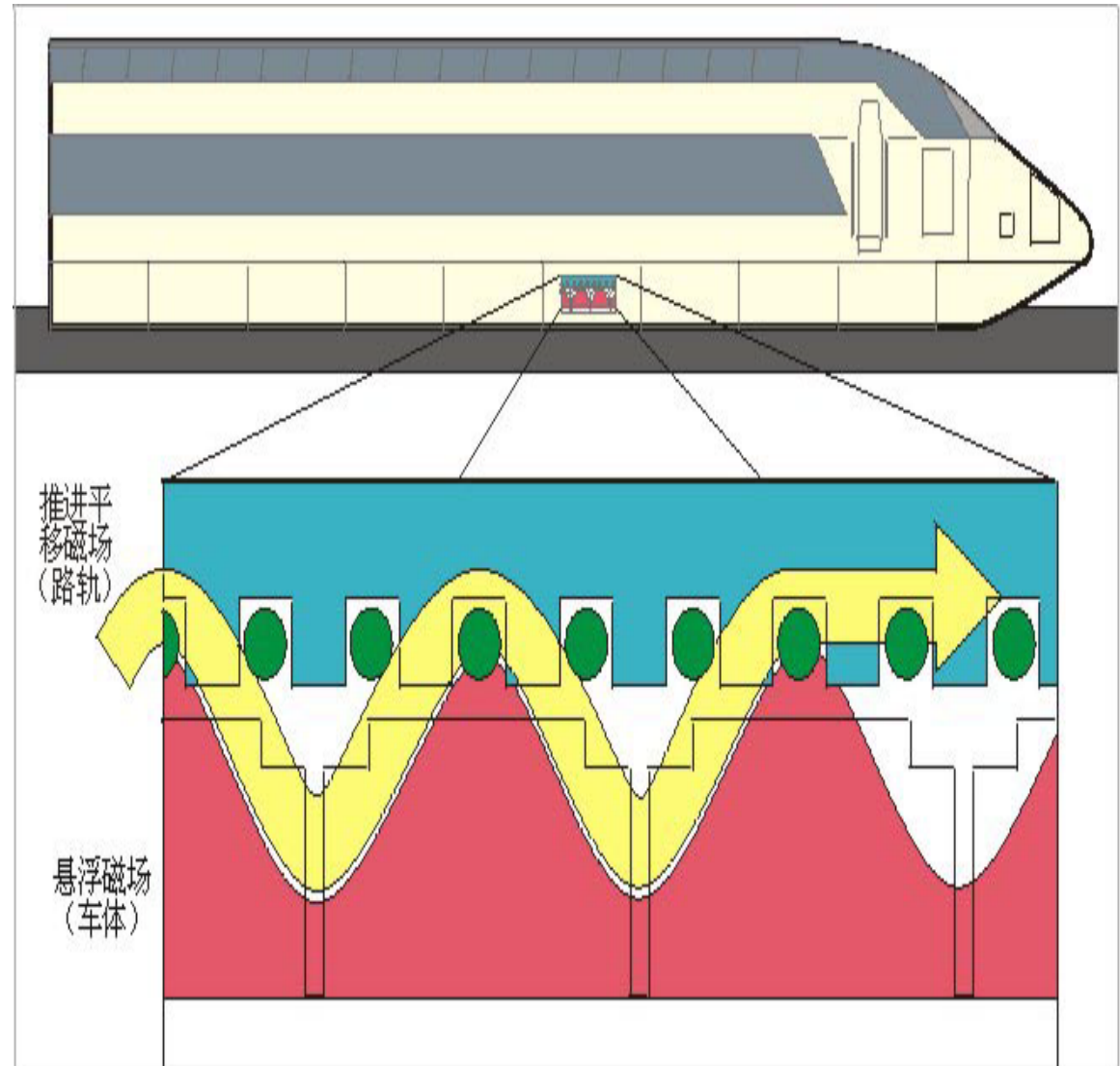
- 直观模拟:轨道两侧装有线圈, 交流电使线圈变为电磁体, 它与列车上的磁铁相互作用。列车行驶时, 车头的磁铁 (N极) 被轨道上靠前一点的电磁体 (S极) 所吸引, 同时被轨道上稍后一点的电磁体 (N极) 所排斥, 使列车前进。然后在线圈里流动的电流反向, 其结果就是原来那个S极线圈, 现在变为N极线圈了, 反之亦然。

这样, 列车由于电磁极性的转换而得以持续向前奔驰。



直线电机

- **直线同步电机:**其初级绕组沿轨道铺设,次级绕组安装在车体上,在初级绕组中通入三相交流电,气隙中产生平移磁场,该磁场切割次级导体,产生电磁感应,诱发磁场,该磁场与原有平移磁场方向相反,最终在路轨和车体间产生电磁推力.



数学模拟(一)

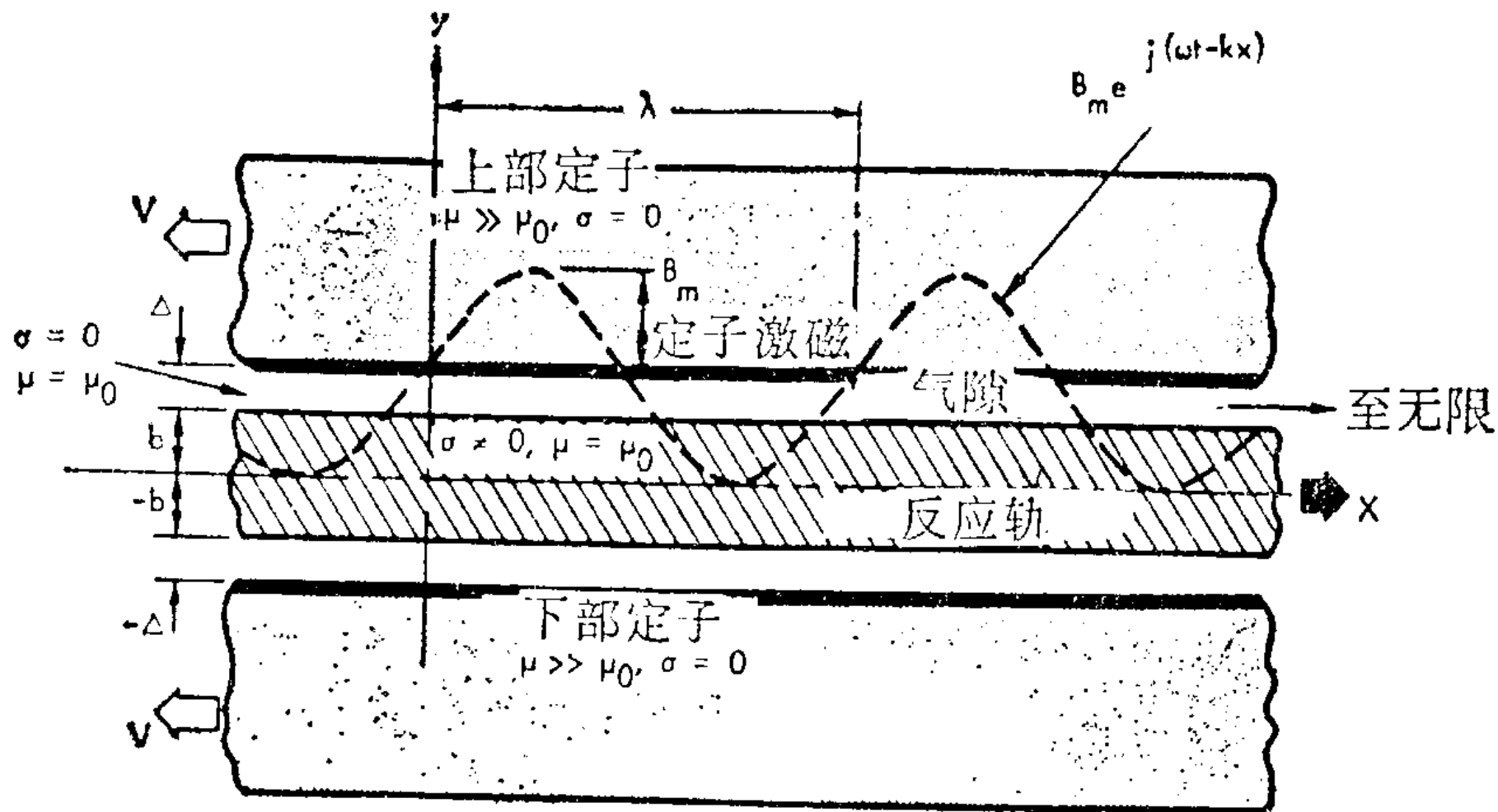


图 3 直线电动机的准一度模拟

数学模拟(二)

Maxwell方程组: $\nabla \cdot B = 0$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times B = \mu_0(j_0 + \frac{\partial D}{\partial t})$$

空间介质条件: $j_0 = \sigma(E + v \times B)$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = 0 \quad (\text{低频})$$



$$\nabla^2 A = \mu_0 \sigma \left[\frac{\partial A}{\partial t} - v \times (\nabla \times A) \right] \quad (1)$$

数学模拟(三)

1. 定子绕组电流与转子感应电流的组合效应在定子表面产生磁场:

$$B = B_m \exp\{i(kx - \omega t)\} \hat{y}$$

其中: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\omega = 2\pi f$, B_m 为峰值, k 为波数, ω 为移动磁场的角频率

2. 转子板或反应轨内部: $A_1 = A_{m1} \exp\{i(kx - \omega t)\} \hat{z}$

$$(1) \Rightarrow \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} - k^2 A_1 = i\mu_0 \sigma (\omega - kvx) A_1$$

3. 在空气隙: $A_2 = A_{m2} \exp\{i(kx - \omega t)\} \hat{z}$

$$(1) \Rightarrow \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} - k^2 A_2 = 0$$

数学模拟(四)

电磁边界条件:

1. $y=0$ 转子板中心处: $B_{x1} = \frac{\partial A_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0$

2. $y=b$ 处的切向方向: $B_{x1} = B_{x2} \Rightarrow \frac{\partial A_1}{\partial y} \Big|_{y=b^-} = \frac{\partial A_2}{\partial y} \Big|_{y=b^+}$

3. $y=b$ 处的法向方向: $B_{y1} = B_{y2} \Rightarrow \frac{\partial A_1}{\partial x} \Big|_{y=b^-} = \frac{\partial A_2}{\partial x} \Big|_{y=b^+}$

4. $y=b+\Delta$ 处感应电流: $B_{y2} \Big|_{y=b+\Delta} = \exp\{i(kx - \omega t)\}$

数学模拟(五)

取近似条件: $b, \Delta \rightarrow 0$

则可以求得施加于转子每单位体积的切向力:

$$f_x = (j_0 \times B) \cdot \hat{x} = \frac{1}{2} \sigma S v_s B^2$$

初略计算:取铝电导率: $\sigma = 3.54 \times 10^7 \Omega / m$

转差率: $S = 0.1$

磁场同步速度: $V_s = 500 \text{ km/h}$

磁感应强度: $B = 8.0 \times 10^{-3} \text{ T}$

 $f_x = 15.7 \text{ KN}$

可见,列车单位体积受力的数量级为KN

数学模拟(六)

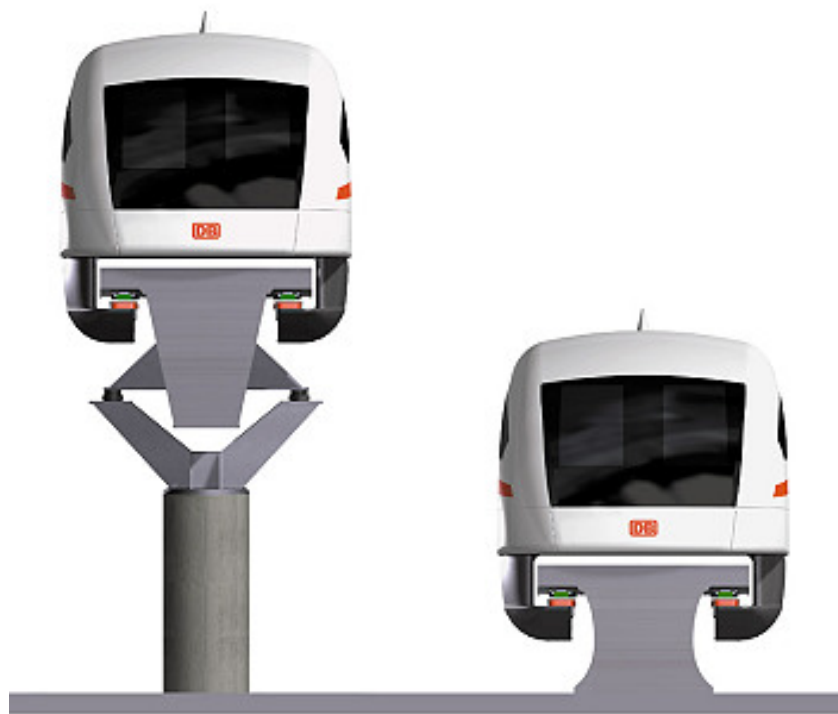
转子每单位体积的净输出功率为:

$$P_0 = \frac{1}{2} \sigma S (1 - S) v_s^2 B_m^2$$

初略计算: $P_0 = 19.7\text{kW}$

可见,转子单位体积净输出功率的数量级为kW

性能比较(一)

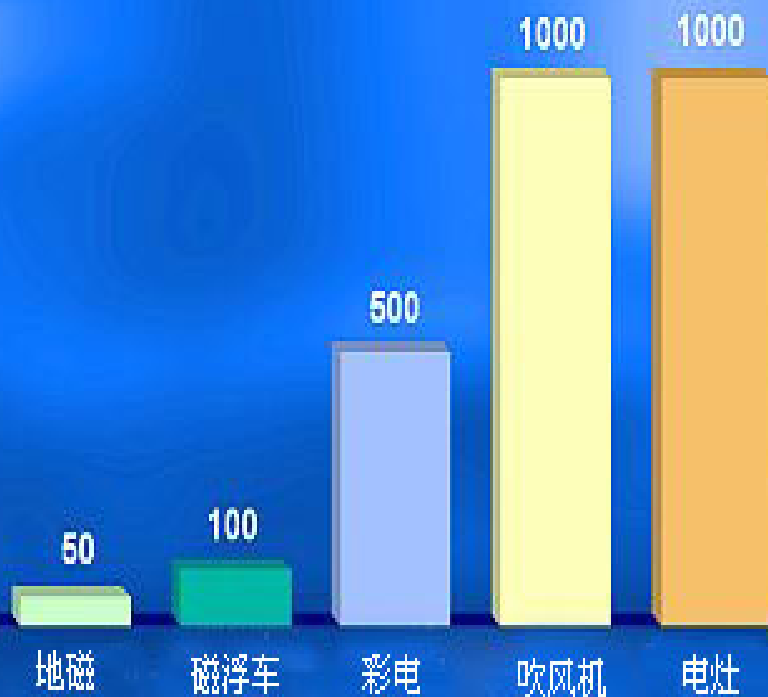


1.安全:
不会脱轨;
单向行驶, 不会相撞。

2.最大优势--高速

性能比较(二)

单位：pTesla (忒斯拉)



3. 电磁辐射小

列车驶过时，在25米的距离上测试的噪声分贝数dB (A)



4. 噪声小

性能比较(三)

1. 磁悬浮列车的悬浮高度为10~100mm，因此对线路的平整度、路基下沉量及道岔结构方面的要求要比普通列车高。
2. 磁悬浮列车的技术要求比普通列车要高得多。
3. 车载冷却系统重,且由于涡流效应,悬浮能耗较高。
4. 成本方面，维修保养以及能耗等费用较普通列车高。
5. 但总而言之，由于其高效的运输能力和优越性能,磁悬浮列车还会有很大空间;而对于我们这样一个地域辽阔,经济高速发展,但交通系统基础相对薄弱的国家而言,磁悬浮列车的研究开发具有十分重要的意义。