

# 中低速磁浮列车牵引性能研究

于青松

(中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春//正高级工程师)

**摘要** 中低速磁浮列车是磁浮交通系统的关键装备, 由于脱离了轮轨接触, 其牵引方式也与传统列车差别巨大。以 3 节编组中低速磁浮列车为例, 对该列车的运行阻力、牵引力、电制动力进行了计算分析, 根据计算结果对列车的牵引和电制动性能进行了评价, 并完成了列车的故障运行能力校核。

**关键词** 中低速磁浮列车; 牵引性能; 电制动性能

**中图分类号** U260.14<sup>+</sup>1; U237

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2022.02.019

## Study on Traction Performance of Medium-low Speed Maglev Vehicles

YU Qingsong

**Abstract** Medium-low speed maglev train is the key equipment of maglev transportation system, its traction mode is very different from traditional trains due to the disengagement from wheel rail contact. In this paper, based on a three marshalling medium-low speed maglev train, the train running resistance, traction force and electric braking force are analyzed and calculated. Then, according to the calculation result, the traction and electrical braking performance of the train are evaluated, the fault operation capability check of the train is completed.

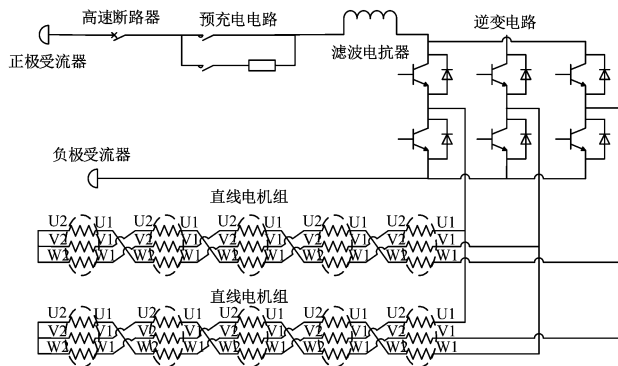
**Key words** medium-low speed maglev vehicle; traction performance; electrical braking performance

**Author's address** National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

## 1 中低速磁浮列车牵引系统简述

中低速磁浮列车采用三轨受流、四轨回流的方式获取电能, 以直线异步电机作为牵引设备, 利用异步电机的行波磁场与地面感应板的感生磁场之间的相互作用作为动力, 实现列车的牵引和电制动<sup>[1]</sup>。列车从受流器汲取高压电能, 经高速断路器、预充电电路、电抗器后, 送入牵引逆变器; 直流电能经逆变后转化为电压和频率均可调节的交流电能, 输出至直线电机三相绕组上, 产生行波磁场。

每套交流电传动系统由 1 台牵引逆变器和 10 台直线电机构成, 且 10 台电机采用 5 串 2 并的连接方式<sup>[2]</sup>。其拓扑结构如图 1 所示。



注: U1、V1、W1、U2、V2、W2 代表 3 组绕组的接线端子。

图 1 中低速磁浮列车牵引系统拓扑图

Fig.1 Traction topology of medium-low speed maglev train

## 2 中低速磁浮列车阻力计算

磁浮列车由于没有轮轨接触, 列车的阻力构成也与传统列车差别较大。目前的研究结果表明, 中低速磁浮列车在平直轨道上运行时的阻力主要由 3 部分构成, 分别是空气阻力、电磁阻力和接触阻力<sup>[3]</sup>。空气阻力主要与列车断面、车头形状、编组形式等因素有关; 电磁阻力受 F 轨中的涡流影响较大; 接触阻力主要是指列车受流器与接触轨的摩擦阻力, 该阻力一般为定值, 且其在总阻力中占比较小<sup>[4]</sup>。

本文牵引计算所用的阻力是根据目前中低速磁浮列车研究领域较为常用的阻力公式求得的。其中, 空气阻力  $D_a$  (单位为 N) 为:

$$D_a = (1.652 + 0.572 n) v^2 \quad (1)$$

式中:

$n$ ——列车编组数量, 节;

$v$ ——列车运行速度, m/s。

电磁阻力  $D_m$  (单位为 N) 为:

$$\begin{cases} D_m = 3.354 W_v, 0 < v < 5.6 \text{ m/s 时} \\ D_m = (18.220 + 0.074 v) W, v > 5.6 \text{ m/s 时} \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$W$ ——列车质量,t。

接触阻力  $D_c$  为:

$$D_c = f k \quad (3)$$

式中:

$f$ ——受流器与接触轨的摩擦阻力,一般计算取值为 20 N/台;

$k$ ——全列受流器数量,台。

以 3 节编组中低速磁浮列车为例,其在不同载荷条件的质量如表 1 所示。

表 1 不同载荷条件下 3 节编组中低速磁浮列车的质量

Tab.1 Quality of 3 marshalling medium-low speed maglev train under different load conditions

| 工况  | 列车质量/t |
|-----|--------|
| AW0 | 75.00  |
| AW2 | 94.32  |
| AW3 | 105.00 |

注:AW0 为空载;AW2 为满座 + 6 人/m<sup>2</sup>,系额定载荷;AW3 为满座 + 9 人/m<sup>2</sup>,系超常载荷。

根据式(1)一式(3)以及表 1,求得不同载荷条件下列车在平直轨道上运行时的阻力曲线如图 2 所示。

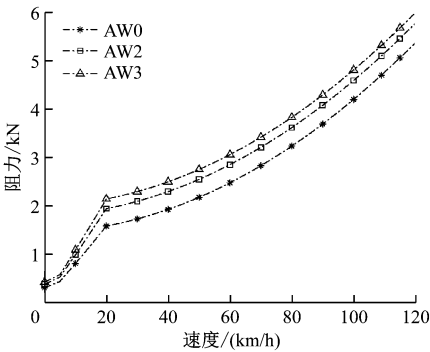


图 2 不同载荷条件下磁浮列车在平直轨道上运行时的阻力曲线

Fig.2 Maglev train running resistance curves on straight line under different load conditions

### 3 中低速磁浮列车牵引及电制动能力设计

#### 3.1 列车动力性能指标要求

对于设计速度为 120 km/h 的中低速磁浮列车,根据列车的承载能力,通常 AW2 载荷条件下的动力性能指标不低于表 2 的要求<sup>[5]</sup>。

表 2 设计速度为 120 km/h 的中低速磁浮列车动力性能指标要求

Tab.2 Dynamic performance index requirements of a medium-low speed maglev train with design speed 120 km/h

| 运行工况 | 列车运行速度/(km/h) | 平均加速度或减速度/(m/s <sup>2</sup> ) |
|------|---------------|-------------------------------|
| 牵引   | 0 ~ 35        | ≥1.0                          |
|      | 0 ~ 80        | ≥0.7                          |
|      | 0 ~ 120       | ≥0.3                          |
| 常用制动 | 120 ~ 0       | ≥1.1                          |

#### 3.2 列车牵引特性设计

根据列车的动力性能要求,考虑列车运行的实际情况,经过多次迭代计算后,确定列车的牵引特性。列车在 AW2 或 AW3、接触网压 DC 1 500 V、定转子额定气隙 13 mm 的条件(以下简为“额定状态”)下,其最大起动牵引力  $F_{st2}$  为 111.7 kN;恒转矩区列车运行速度范围为 0 ~ 45 km/h;自然特性区列车运行速度范围为 45 ~ 120 km/h,自然特性区起始点列车牵引力约为 106.2 kN;单台牵引电机的最大牵引功率约为 46 kW,最大牵引电流约为 431 A。

中低速磁浮列车牵引系统按列车载荷从 AW0 到 AW2 条件下的牵引力大小进行自动调整,使列车在不同载荷条件下始终保持起动加速度基本不变。AW3 条件下列车的牵引特性与 AW2 时一致。

#### 3.3 列车电制动特性设计

同样地,根据列车的减速性能要求,为了最大限度地利用电制动,尽可能地将恒制动力起始点后移。结合异步直线电机过载能力强的特点,最终设定的转折点的列车运行速度为 105 km/h,远大于牵引工况下的 45 km/h。这是因为电制动过程中逆变器的输出侧电压不受列车牵引系统供电电压的限制,故可发挥该系统的能力,使其实现一定程度的提升。最终确定列车额定状态下的最大电制动力  $F_{b2}$  为 110.8 kN,自然特性区列车运行速度范围为 120 ~ 105 km/h,恒电制动区列车运行速度范围为 105 ~ 8 km/h,单台牵引电机最大电制动功率约为 110 kW,单台牵引电机最大制动电流约为 430 A。

列车牵引系统按列车载荷对 AW0 到 AW2 条件下的电制动力大小进行自动调整,超过 AW2 载荷时,按照 AW2 载荷发挥,电制动不足部分由液压制动补充。

根据计算分析,得到整车牵引力/电制动力特性曲线,如图 3 所示。

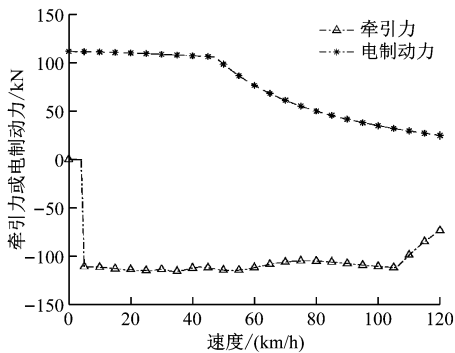


图3 中低速磁浮列车整车牵引力-电制动力特性曲线

Fig.3 Traction and electrical braking force characteristic curves of medium-low speed maglev train

3.4 列车牵引及制动能力校核

根据上述列车牵引力/电制动力特性曲线,在平直轨道、额定状态下,列车在各运行速度范围内的平均加速度和减速度,如表3所示。

由表3可知,列车各运行速度范围内的加速性能指标均满足表2的要求;列车仅靠电制动可满足运行速度为120~8 km/h时的平均减速度不小于

1.1 m/s<sup>2</sup>的要求;列车运行速度为8~0 km/h范围内需要液压制动介入,以满足列车全速域范围内制动减速度不小于1.1 m/s<sup>2</sup>的要求。

表3 中低速磁浮列车在平直轨道、额定状态下的平均加/减速度

| Tab.3 Average acceleration and deceleration of medium-low speed maglev train on straight line under rated state |               |                               |
|---|---------------|-------------------------------|
| 工况  | 列车运行速度/(km/h) | 平均加速度或减速度/(m/s <sup>2</sup> ) |
| 牵引  | 0~35          | 1.052                         |
|   | 0~80          | 0.879                         |
|   | 0~120         | 0.544                         |
| 电制动   | 120~8         | 1.108                         |

4 列车的故障运行与救援能力

为了应对列车运行过程中可能出现的各种故障,需分工况对列车的故障运行与救援能力进行核算。根据3节列车牵引与电制动能力设计结果,得出结论见表4。

表4 列车故障运行与救援能力校核结果

Tab.4 Check results of train fault operation and rescue capability

| 故障工况 | 所属能力     | 工况描述                              | 列车起动加速度/(m/s <sup>2</sup> ) | 评价  |
|------|----------|-----------------------------------|-----------------------------|---|
| 1    | 列车故障运行能力 | AW3;坡道坡度为6%;全列丧失1/3动力             | 0.116                       | 起动加速度大于0时,列车可在最大坡道上起动,且运行至下一站清客后回库维修      |
| 2    | 列车故障运行能力 | AW3;坡道为6%;悬浮失效,牵引未失效;释放支撑轮        | 1.010                       | 起动加速度大于0.083时,列车可在最大坡道上起动,且运行至下一站清客后回库维修  |
| 3    | 列车救援能力   | AW3,坡道为6%;悬浮未失效,牵引失效;由另1列空载列车进行救援 | -0.065                      | 起动加速度小于0时,在正常模式下,另一列相同空载列车无法救援故障列车        |
| 4    | 列车救援能力   | AW3;坡道为平直状态;悬浮、牵引均失效;由另1列空载列车进行救援 | 0.498                       | 起动加速度大于0.083时,在正常模式下,另一列相同空载列车可救援故障列车回库维修 |

由于故障工况3无法实现列车的救援,为了提升列车的救援能力,列车牵引系统增设高加速模式。在高加速模式下,列车利用牵引系统的短时过载能力,最大限度地提升其牵引力<sup>[6]</sup>,以实现车辆的坡道起动。高加速模式下列车的牵引力特性曲线,如图4所示。

由图4可知,在该模式下,列车的起动牵引力设定为121 kN。据此对故障工况3重新进行核算,其起动加速度约为0.084 3 m/s<sup>2</sup>,满足列车实现救援的条件要求。

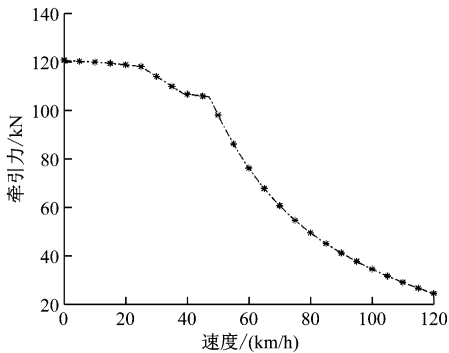


图4 列车在高加速模式下的牵引力特性曲线

Fig.4 Traction force characteristics curve of train in high accelerating mode