



高速磁浮安全制动能力计算方法研究

秦 强, 张 朋, 于青松, 李 凯

(中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062)

摘 要: 涡流制动电磁铁设计及安全制动能力的研究是保障常导高速磁浮车辆安全停车的关键。尽管涡流制动技术已有长期研究基础, 但涉及车辆实际运行中速度、电磁气隙等动态参数变化的制动能力计算方法仍属学术与工程交叉难点, 相关文献较少。因此, 文章提出一种常导高速磁浮安全制动能力计算方法。首先, 利用 COMSOL 软件建立二维有限元模型, 仿真分析不同速度 (0~600 km/h) 和不同电磁气隙 (3~14 mm) 下的涡流电磁力特性, 获取切向阻力与法向吸力曲线, 并结合气隙变化机制拟合复合力曲线。然后, 通过 COMSOL 与 Excel 联合仿真, 对数据进行筛选与分段拟合, 构建单电磁铁复合力曲线。在此基础上, 建立安全制动力计算模型, 综合考虑涡流制动、空气阻力、直线发电机阻力、滑橇制动及摩擦阻力等因素, 忽略随机扰动, 得出全速度域内的复合安全制动力曲线。最后, 采用分段求和法计算制动距离, 避免非线性误差, 最终得出初速度 600 km/h 下的安全制动停车距离为 7 980 m, 平均减速度为 1.705 m/s², 满足设计要求。进一步地, 基于 COMSOL App Builder 与 Excel 联动功能, 开发了“安全制动设计-仿真-计算一体化软件”, 实现参数调整、自动仿真、数据处理与结果显示等功能, 显著降低使用门槛, 助力非专业仿真人员完成系统设计与验证。

关键词: 常导高速磁浮; 安全制动; 涡流制动电磁铁; 制动能力计算; 一体化软件; 轨道不平顺; 有限元法

中图分类号: U237; U266.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2026)02-0191-07

0 引言

常导高速磁浮是一种利用常导电磁体产生的电磁力实现悬浮和推进的交通工具, 具有高速、低噪声、爬坡能力强等优点, 成为现代高速交通系统的重要发展方向。

常导高速磁浮安全制动功能由涡流制动电磁铁装置实现, 因此涡流系统制动力以及安全制动能力的相关研究和设计成为保障磁浮车辆安全运行的关键。针对涡流制动技术的研究早在上个世纪就已经广泛开展, 研究内容主要围绕涡流电磁场特性分析、涡流制动力计算以及涡流制动控制方法展开^[1-2]。近年来, 借助有限元仿真及数值计算等软件, 学者进一步开展了关于

涡流制动力计算、涡流制动参数控制及电磁力特性曲线求解等方向的研究^[3-6]。常导高速磁浮安全制动能力的计算研究需要以涡流制动力的研究为前提, 同时考虑车辆实际安全制动过程中车辆速度、电磁气隙 (涡流制动电磁铁与侧向轨道感应板的距离) 等关键参数的变化。整个制动能力计算的过程一方面涉及涡流制动技术研究, 另一方面涉及车辆安全制动系统设计, 是学术领域和车辆系统设计的交叉口, 故鲜有文献探究制动能力计算的方法。

本文将探究一种常导高速磁浮安全制动能力计算方法。首先, 使用 COMSOL 软件进行有限元仿真, 计算安全制动过程中涡流制动电磁铁在不同速度等级和不同电磁气隙条件下对应的涡流电磁力; 然后, 结合车辆安全制动过程中影响制动力的其他因素, 拟合车

基金项目: 中国中车十年培育项目(2025CGY009)

通信作者: 李 凯, 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事磁浮交通系统集成方面的研究; E-mail: likai3.ck@crrecg.cc

引用格式: 秦强, 张朋, 于青松, 等. 高速磁浮安全制动能力计算方法研究[J]. 机车电传动, 2026(2): 191-197.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.021.

Citation: QIN Qiang, ZHANG Peng, YU Qingsong, et al. Research on a computational method of safety braking capacity for high-speed maglev vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2026(2): 191-197.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.021.

辆安全制动力曲线。利用 COMSOL 和 Excel 的联合仿真功能在 Excel 中计算车辆安全制动距离；最后，基于 COMSOL 的 App Builder 功能开发了安全制动能力计算软件界面，使本文探究的方法能更好地为制动系统设计人员使用。

1 涡流制动电磁力仿真

1.1 涡流电磁铁的结构与原理

图 1 为某项目涡流制动电磁铁的三维图，其主要由磨耗板、背箱、磁极等部件组成，安装于两悬浮架之间，左右两侧安装各一个，为适应悬浮架之间的横向、纵向和垂向的偏移，其设置了横向铰接、纵向铰接和垂向支撑。每侧的涡流制动电磁铁由 12 个磁极组成，磁极极性呈“N-S-N-S”交替排布，沿车体前进方向排布，磁极极距 168 mm，每个磁极匝数为 390，磁极表面安装有铜材料的磨耗板。

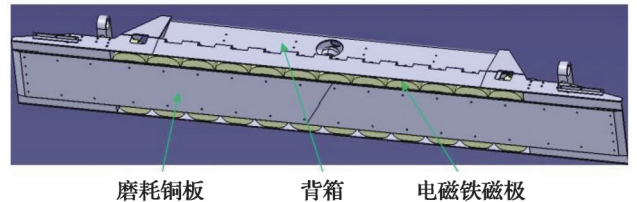


图 1 涡流制动电磁铁
Fig. 1 Eddy-current braking electromagnet

涡流制动电磁铁横向铰接通过两个横向球铰结构与构架相连，其横向球铰结构如图 2 所示，由三角形连接板、球铰和两个预紧弹簧组成，使得列车正常运行时气隙值保持最大气隙，实施安全制动时可通过预紧弹簧的压缩变形使气隙发生变化，在磨耗板与侧向导轨贴合时气隙值为最小。

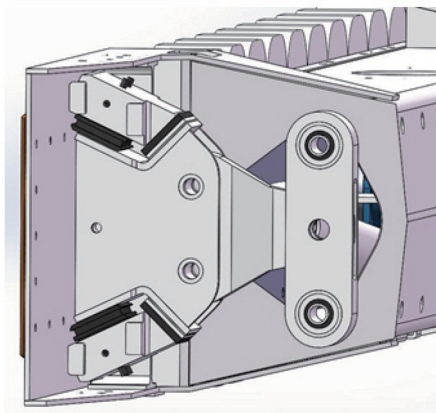


图 2 涡流制动电磁铁横向铰接
Fig. 2 Laterally articulated eddy-current braking electromagnets

常导高速磁浮列车安全制动级位共计 8 级，励磁电流依次为 0 A、8.8 A、17.6 A、26.4 A、37.2 A、44.0 A、52.8 A、61.5 A，本文对安全制动能力进行探讨，选取最大安全制动等级进行研究。涡流制动原理即为运动

的金属板在电磁场中感生涡电流，根据楞次定律，运动金属板的前端（远离磁极的一端）将产生与原磁场方向相同的涡电流，运动金属板的后端（靠近磁极的一端）将产生与原磁场方向相反的涡电流，两者的共同作用导致了涡流制动力的产生。涡流制动当过程中列车静止时，对涡流制动电磁铁线圈励磁后，涡流制动电磁铁与涡流感应板间产生的磁场，使得涡流制动电磁铁受到垂直于涡流感应板的电磁力。当列车运动时，对涡流制动电磁铁线圈励磁后，涡流制动电磁铁相对涡流感应板做相对运动，涡流感应板切割气隙磁场导致其表面感应出涡流，涡流产生的磁场与原磁场叠加后，引起磁场畸变。因此，涡流制动器受到的电磁力，其可分解为两个方向的力：一个为与列车运动方向相反方向的切向阻力，另一个为与涡流感应板垂直方向的法向吸引力。切向阻力使车辆运行速度降低，法向吸引力使磨耗板靠近涡流感应板。

1.2 涡流制动电磁铁复合力计算

本文建立二维电磁铁及涡流感应板有限元模型，可变仿真参数见表 1，其他参数均采用某项目涡流制动装置实际数值，本文不做具体讨论。基于 COMSOL 多物理场耦合方法，本文通过参数化建模和变量扫描等工具，模拟安全制动过程中车辆速度和电磁气隙变化对电磁力的影响，求解不同条件下涡流制动电磁铁与侧向轨道间沿车辆运行方向的切向阻力（后文简称“切向阻力”）和涡流制动电磁铁与侧向轨道间垂直于车辆运行方向的法向吸引力（后文简称“法向吸力”）。

表 1 电磁力仿真可变参数
Table 1 Variables for electromagnetic force simulation

参数名称	参数值
电磁气隙/mm	3~14
轨道磨耗板厚度/mm	0~3
车辆行驶速度/(km·h ⁻¹)	0~600

影响电磁气隙的因素有两个：一是涡流制动电磁铁的横向位移；当法向吸力大于涡流制动电磁铁装置的横向预紧弹簧的预紧力时，涡流制动电磁铁会沿横向接近侧向轨道，从而使电磁气隙产生变化^[6]。同时，涡流制动电磁铁的磨耗板有 3 mm 的可用磨耗量，涡流制动电磁铁全新零磨耗时的气隙会比全磨耗时大 3 mm。表 2 为两种不同因素对应的电磁气隙数值。

表 2 涡流制动电磁铁不同状态对应电磁气隙值
Table 2 Electromagnetic air gaps of eddy-current braking electromagnets under different states

横向位移状况	mm	
	零磨耗磨耗板	全磨耗磨耗板
无横向位移	14	14
与轨道接触	6	3

图3和图4分别为3种典型电磁气隙下, 施加最大制动级位时, 单个涡流制动电磁铁在制动过程中提供的切向阻力和法向吸力。

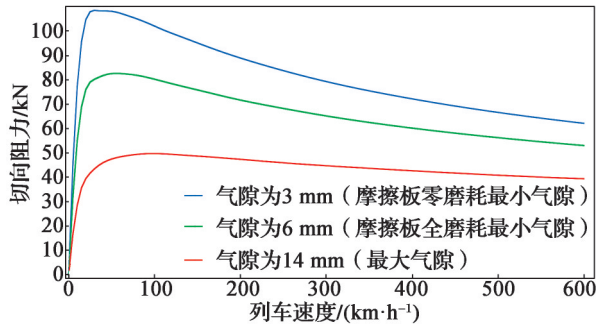


图3 不同气隙下的切向阻力曲线

Fig. 3 Tangential drag curve under different air gaps

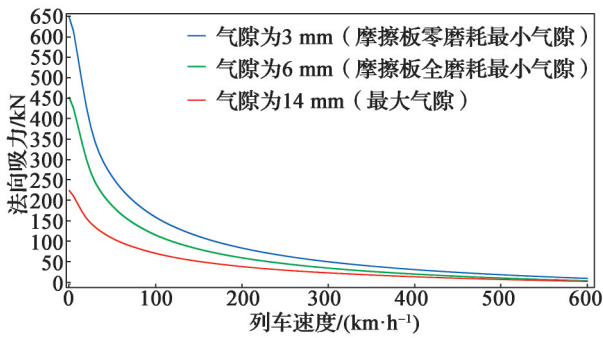


图4 不同气隙下的法向吸力曲线

Fig. 4 Normal attraction curve under different air gaps

涡流制动电磁铁法向弹簧预紧力为20 kN, 故当法向吸力大于20 kN时, 涡流制动装置沿法向靠近轨道, 电磁气隙从14 mm开始变小。在涡流制动电磁铁磨擦板零磨耗情况下, 当法向吸力大于等于42 kN时, 涡流制动装置贴紧侧向轨道摩擦面, 电磁气隙达到最小6 mm, 此后涡流制动器工作于接触摩擦状态。在涡流制动电磁铁磨擦板全磨耗情况下, 当法向吸力大于等于50 kN时, 涡流制动装置贴紧侧向轨道摩擦面, 电磁气隙达到最小3 mm, 此后涡流制动器工作于接触摩擦状态。后续制动能力计算方法相关讨论中, 默认涡流制动电磁铁磨擦板为零磨耗状态, 制动级位为最大级位。

研究团队使用COMSOL与Excel的联合仿真功能, 将仿真结果数据导入Excel并根据以上规则筛选出不同速度对应的切向阻力和法向吸力数据。再将数据送回COMSOL进行分段拟合, 得出单电磁铁复合切向阻力 $F_c(v)$ 变化曲线、复合法向吸力 $F_n(v)$ 变化曲线分别如图5和图6所示。

1.3 安全制动力计算

常导高速磁浮车辆在由初速度600 km/h制动的过程中, 会受到涡流制动电磁铁法向阻力 F_E 、涡流制动装置与侧向轨道接触后的摩擦阻力 F_F 、空气阻力 F_A 、直线发电机引起的运行阻力 F_M 、滑橇制动力 F_W 以及其

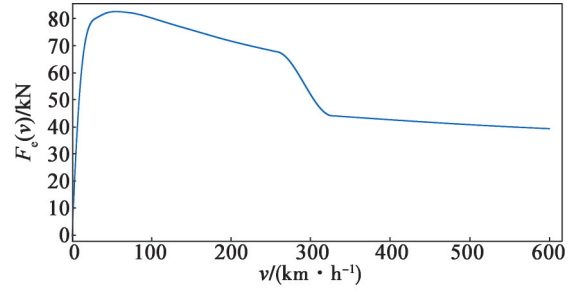


图5 单电磁铁复合切向阻力曲线

Fig. 5 Composite tangential drag curve of a single electromagnet

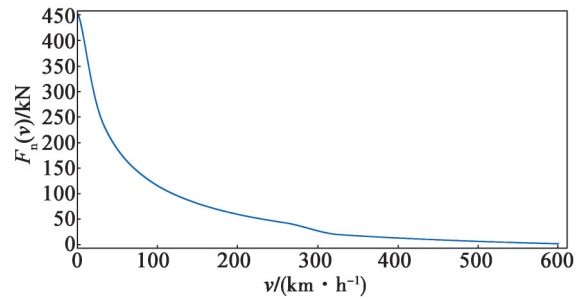


图6 不同气隙下的法向吸力曲线

Fig. 6 Composite normal attraction curve under different air gaps

他随机扰动因素 F_c 等的作用, 具体计算如下:

①空气阻力 F_A 的计算。

F_A 的计算公式^[11]为

$$F_A = 4.16 \times v^2 \times 10^{-3} \text{ kN} \quad (1)$$

式中: v 为车辆速度。

②直线发电机引起的运行阻力 F_M 的计算。

F_M 的计算公式为

$$F_M = \begin{cases} 0 \text{ kN}, & v < 28 \text{ m/s} \\ n \times 3.4 \text{ kN}, & 28 \text{ m/s} \leq v < 60 \text{ m/s} \\ n \times 200/v \text{ kN}, & v \geq 60 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2)$$

式中: v 为车辆速度; n 为车辆编组数。

③滑橇制动力 F_W 的计算。

F_W 的计算公式为

$$F_W = \mu_w \times M \times g \times 0.001 \text{ kN} \quad (3)$$

式中: M 为车辆总质量; μ_w 为滑橇与轨道间的摩擦因数; g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 。

④涡流制动装置与侧向轨道接触后的摩擦阻力 F_F 的计算。

F_F 的计算公式为

$$F_F = \mu_f \times F_n \quad (4)$$

式中: μ_f 为涡流制动装置磨擦板与侧向轨道间的摩擦因数; F_n 为涡流制动电磁铁与侧向轨道间的法向吸力。

本文的安全制动能力计算研究, 默认轨道处于平直干燥状态, 故将随机扰动因素 F_c 忽略不计。

在常导高速磁浮车辆安全制动过程中, 当车辆速度小于10 km/h时, 车辆会切断涡流制动装置供电, 同

时降落车辆使滑橇与下方轨道接触以施加滑橇制动。基于以上控制逻辑,可得出车辆安全制动力 F_s 的公式为

$$F_s = \begin{cases} F_A + F_M + F_W, & 0 < v \leq 10 \text{ km/h} \\ F_E + F_F + F_A + F_M, & 10 < v \leq 600 \text{ km/h} \end{cases} \quad (5)$$

式中: v 为车辆速度。

根据以上公式,在COMSOL中定义相关公式函数,拟合求解出各分力及安全制动力 $F_s(v)$ 的曲线,如图7所示。

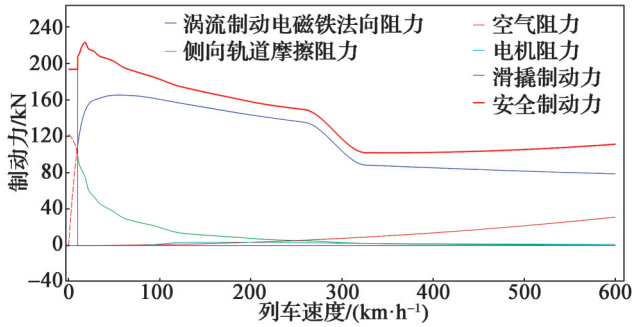


图7 安全制动复合力曲线图

Fig. 7 Composite safety braking force curve

1.4 安全制动距离计算

安全制动力 $F_s(v)$ 曲线是表示车辆速度与安全制动力大小的对应关系一组数据,因为 $F_s(v)$ 曲线的高度非线性,使用该数据拟合出的函数表达式与实际安全制动力的函数差距极大,故本文使用分段求解的方法计算车辆安全制动距离 S_s 。

车辆进行制动时,从速度 v_n 减速到速度 v_{n-1} 过程中行驶的分段制动距离 S_n 如式(6)所示。

$$S_n = \frac{(v_n^2 - v_{n-1}^2) \times M}{f_n + f_{n-1}} \quad (6)$$

式中: M 为车辆总质量; f_n 为数据中速度 v_n 对应的安全制动力值。

将分段制动距离求和就得到安全制动距离 S_s ,如式(7)。

$$S_s = \sum S_n \quad (7)$$

根据文献[15]国家标准,可计算得出常导高速磁浮车辆安全制动停车距离 S_{ST} 、安全制动平均减速度 $\bar{a}_s$ 和安全制动停车时间 t_s ,具体如式(8)~式(10)所示。

$$S_{ST} = S_s + t_e \times v_B \quad (8)$$

$$\bar{a}_s = \frac{v_B^2}{2 \times S_{ST}} \quad (9)$$

$$t_s = (2 \times S_{ST} / \bar{a}_s)^{1/2} \quad (10)$$

式中: t_e 为制动响应时间; v_B 为施加安全制动车辆运行速度。

计算得到安全制动停车距离 S_{ST} 为7 980 m,安全制动平均减速度 $\bar{a}_s$ 为1.705 m/s²,安全制动能力满足车辆性能需求。

2 安全制动设计-仿真-计算一体化软件设计

COMSOL与Excel的联动功能可以将COMSOL的仿真模型和结果数据导入到Excel中进行参数修改和数据处理,也可以将Excel处理过的数据读取到COMSOL中,进行数据拟合和图形化显示。COMOSL的App Builder模块支持用户基于已有的仿真模型定制开发和维护仿真软件,并可以将软件部署分享给团队成员使用。本文基于以上方法研究开发了安全制动设计-仿真-计算一体化软件。

2.1 仿真数据的规范化处理

将安全制动仿真结果数据进行规范化处理的目的是有两个:一是为了能使用Excel的宏函数功能,基于导入数据,自动完成安全制动能力计算;二是为了软件COMSOL可以自动读取安全制动计算的结果并做图形化显示处理。

本文涉及的数据规范化处理方法如下:

①将安全制动力 $F_s(v)$ 的曲线数据导入到Excel的工作表(sheet)中。数据分两列:第一列(N1)是列车运行速度,第二列(N2)是车辆速度对应的安全制动力值。

②新建一列数据,定义为分段制动距离(N3)。在该列单元格内编写使用N1、N2数据计算对应分段制动距离的公式。

③新建一列数据,定义为安全制动距离(N4)。在该列单元格内编写使用N3数据计算对应制动初速度下安全制动距离的公式。

④新建一列数据,定义为安全制动停车距离(N5)。在该列单元格内编写使用N4数据计算对应制动初速度下安全停车距离的公式。

⑤新建一列数据,定义为安全制动平均减速度(N6)。在该列单元格内编写使用N5数据计算对应制动初速度下安全制动平均减速度的公式。

⑥新建一列数据,定义为安全制动停车时间(N7)。在该列单元格内编写使用N5、N6数据计算对应制动初速度下安全制动停车时间的公式。

2.2 安全制动一体化软件设计

本文从制动系统设计、仿真和计算3个重要角度出发研究设计的安全制动一体化软件界面如图8所示,其主要功能如下:

①通过可视窗口界面,对涡流制动电磁铁有限元模型中影响安全制动能力的关键参数进行修改,具体参数包括电磁铁线圈匝数、电磁铁线圈电流、电磁铁线圈个数、电磁铁极距、电磁铁与制动板间气隙大小等。

②修改参数后,通过软件可以进行仿真模型网格

自动重新划分并一键开始涡流制动有限元仿真。

③仿真计算结束后,安全制动能力计算相关结果会直接显示在界面左下方,具体结果信息包括安全制动平均减速度、安全制动停车时间和安全制动停车距离。

④在仿真数据后处理阶段,可以通过右侧的图形窗口,查看仿真结果云图及曲线,具体内容包括涡流磁场分布图、切向力曲线、法向力曲线、复合制动力曲线和安全制动能力计算结果曲线图。

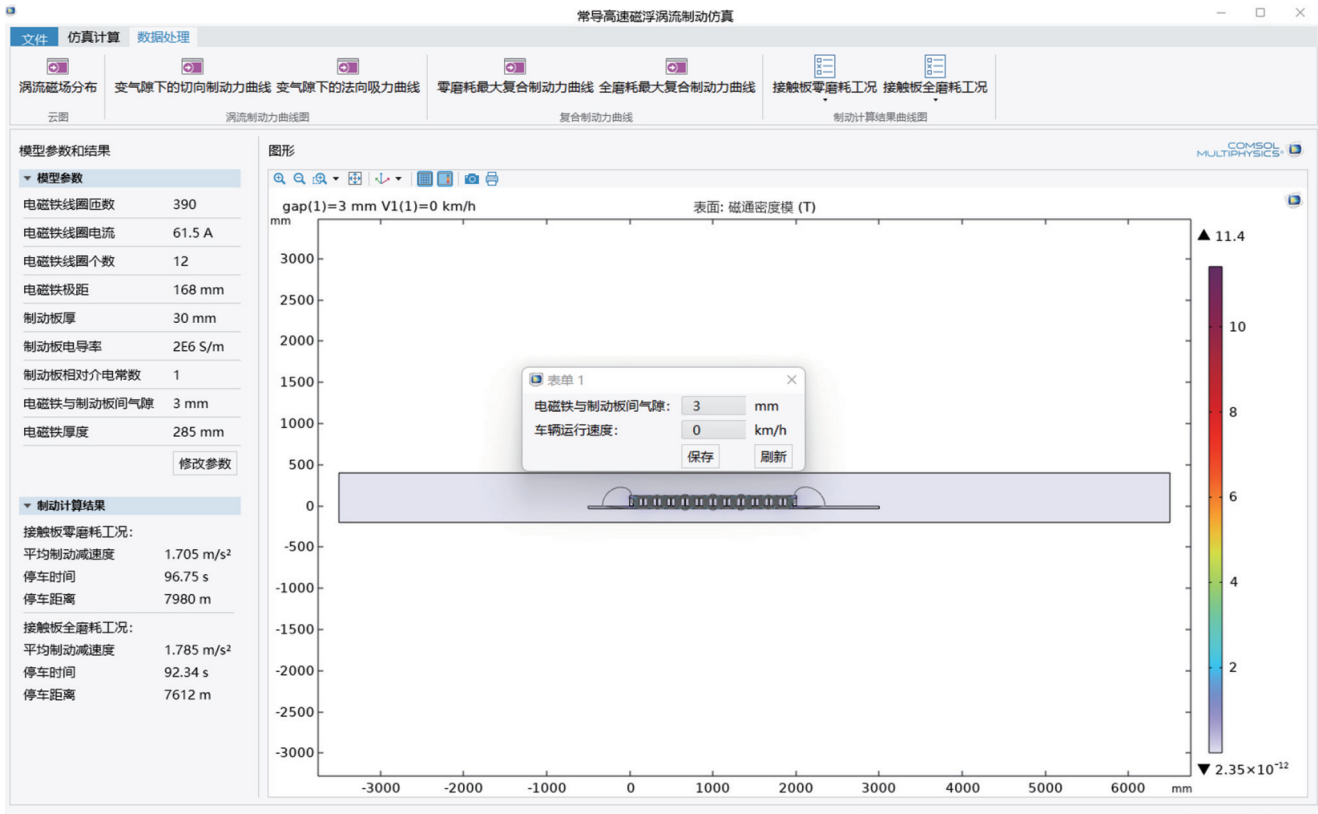


图8 安全制动一体化软件界面

Fig. 8 Interface of safety braking integrated software

安全制动一体化软件的设计充分考虑了制动系统技术人员在设计过程中遇到的困难,能让无任何仿真基础的制动设计人员专注于设计参数的确定,也能让没有制动系统设计基础的仿真试验人员直观地了解模型的安全制动能力并与试验数据做对比研究。

3 结束语

本文主要围绕常导高速磁浮车辆安全制动能力计算的方法进行研究探讨,主要成果包括:

①提出了一种涡流电磁铁切向力和法向力的仿真计算方法,解决了制动过程中间隙变化带来的计算难题。

②建立了常导高速磁浮车辆安全制动全过程的复合安全制动力求解模型,实现了从制动力到停车距离的全流程计算,验证了本文研究的涡流制动装置的制动能力符合车辆设计要求。

③基于COMSOL和Excel联合仿真功能,研究设计了一套仿真数据规范化处理方法。该方法可实现将COMSOL仿真数据按规范化格式自动导出到Excel,再

利用Excel预设的宏函数自动处理仿真数据并将其回送给COMSOL。

④基于COMSOL App Builder模块,结合以上研究成果,完成安全制动设计-仿真-计算一体化软件设计开发。利用此软件可以完成常导高速磁浮车辆涡流制动电磁铁的设计、仿真及安全制动能力计算工作。

常导高速磁浮车辆的安全制动能力计算与传统轨道车辆制动能力计算不同,需要将制动系统专业能力与有限元仿真能力相结合;而大多数制动系统设计人员均不具备或缺少相关有限元仿真的能力。本文通过迭代式的研究探索,最终设计出了可供无任何有限元仿真基础的系统设计人员使用的安全制动能力计算软件,打通了常导高速涡流制动电磁铁的设计与安全制动能力仿真验证的壁垒。

参考文献:

[1] TSUCHIMOT M, MIYA K, YAMASHITA A, et al. An analysis of eddy currents and Lorenz force of thin plates under moving magnets[J]. IEEE transactions on magnetics, 1992, 28(2): 1434-1437.

- [2] 朱仙福, 张秀荣. 高速列车轨道涡流制动的制动力分析与计算[J]. 上海铁道大学学报, 1996(4): 5-12.
ZHU Xianfu, ZHANG Xiurong. Analysis and calculation of braking force on rail eddy current braking of high speed trains[J]. Journal of Shanghai tiedao university(natural science edition), 1996(4): 5-12.
- [3] 孙为民, 张跃明, 吴兵波. 电涡流缓速器制动力矩计算的新方法[J]. 现代机械, 2005(4): 21-22.
SUN Weimin, ZHANG Yueming, WU Bingbo. A new calculation method of brake torque for eddy current retarder[J]. Modern machinery, 2005(4): 21-22.
- [4] 郭其一, 陈鹏, 骆廷勇, 等. 基于解析法的涡流制动电磁机理研究[J]. 机车电传动, 2006(1): 30-32.
GUO Qiyi, CHEN Peng, LUO Tingyong, et al. Study on electromagnetic mechanism in eddy current brake (ECB) based on analytical method[J]. Electric drive for locomotives, 2006(1): 30-32.
- [5] 骆廷勇. 高速磁悬浮列车安全制动控制技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
LUO Tingyong. Research on safety braking control of high-speed maglev trains[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [6] 龙鑫林. 高速磁浮列车的涡流制动控制研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
LONG Xinlin. Research on eddy current braking control of high-speed maglev trains[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- [7] 顾磊磊, 吕宝佳, 丁福焰. 轨道涡流制动研究方法分析[J]. 铁道机车车辆, 2013, 33(1): 5-8.
GU Leilei, LYU Baojia, DING Fuyan. Analysis of the research methods of rail eddy current brake[J]. Railway locomotive & car, 2013, 33(1): 5-8.
- [8] 李辉, 詹普亚, 丁福焰, 等. 线性涡流制动的制动力特性仿真分析[J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(6): 25-27.
LI Hui, ZHAN Puya, DING Fuyan, et al. Simulation and analysis of braking force characteristics of linear eddy current braking[J]. Railway locomotive & car, 2015, 35(6): 25-27.
- [9] CHO S, LIU H, AHN H, et al. Eddy current brake with a two-layer structure: calculation and characterization of braking performance[J]. IEEE transactions on magnetics, 2017, 53(11): 1-5.
- [10] 薛锐锋, 倪文波, 闫一凡. 磁浮列车涡流制动电磁力特性曲线的求解研究[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(6): 68-72.
XUE Ruifeng, NI Wenbo, YAN Yifan. Study on solution of electromagnetic force characteristic curve of eddy current braking of maglev train[J]. Railway locomotive & car, 2020, 40(6): 68-72.
- [11] 王明星, 陈萍, 杨昌锋, 等. 高速磁浮列车涡流制动力仿真分析[J]. 机车电传动, 2020(6): 47-50.
WANG Mingxing, CHEN Ping, YANG Changfeng, et al. Simulation analysis on eddy current braking force of high-speed maglev train[J]. Electric drive for locomotives, 2020 (6): 47-50.
- [12] 袁文琦, 王明星, 杨磊, 等. 高速磁浮列车涡流制动力研究[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(1): 88-93.
YUAN Wenqi, WANG Mingxing, YANG Lei, et al. Research on eddy current braking force of high speed maglev train[J]. Railway locomotive & car, 2020, 40(1): 88-93.
- [13] 徐磊, 刘赛赛. 高速列车线性涡流制动参数特性仿真分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(7): 82-86.
XU Lei, LIU Saisai. Parametric characteristic simulation analysis of high-speed train linear eddy current brake[J]. Urban mass transit, 2023, 26(7): 82-86.
- [14] 邓楚燕, 刘帅. 常导高速磁浮列车涡流制动力快速计算方法研究[J]. 微电机, 2025, 58(1): 72-76.
DENG Chuyan, LIU Shuai. Research on the fast calculation method of eddy current braking force for normal conductive high-speed maglev train[J]. Micromotors, 2025, 58(1): 72-76.
- [15] BS EN 13452-1:2003 Railway applications-Braking-Mass transit brake systems-Part 1: Performance requirements[S].

Research on a computational method of safety braking capacity for high-speed maglev vehicles

QIN Qiang, ZHANG Peng, YU Qingsong, LI Kai

(CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: The design of eddy-current braking electromagnets and the assessment of their safety braking capability are critical to ensuring safe stopping of normal-conducting (NC) high-speed maglev vehicles. Although extensive research has laid a foundation for eddy-current braking technology, computational methods for braking capability that account for dynamic operating variables such as vehicle speed and electromagnetic air gap remain an interdisciplinary challenge at the intersection of academic research and engineering practice, and relevant literature is scarce. To address this gap, this paper proposes a method to compute safety braking capability of NC high-speed maglev vehicles. Using COMSOL software, a two-dimensional finite element model was established to simulate and analyze eddy-current electromagnetic force characteristics over speeds from 0 to 600 km/h and electromagnetic air gaps from 3 to 14 mm. The simulations produced tangential drag and normal attraction curves; composite force curves were obtained by fitting based on the air gap variation mechanism. Through co-simulation using COMSOL and Excel, the data were filtered and piecewise fitted, to construct composite force curves for a single electromagnet. Building upon these results, a safety braking force model was established, which incorporates factors such as eddy-current braking force, aerodynamic drag, linear generator drag, skid braking force, and friction drag, and neglects stochastic disturbances, and composite safety braking force curves across the full speed range were obtained. The safety braking distance was computed using a piecewise summation method to avoid nonlinear errors, yielding 7 980 m for an initial speed of 600 km/h and an average deceleration of 1.705 m/s². These results meet the design requirements. Furthermore, leveraging the linkage function between COMSOL app builder and Excel, a safety braking design, simulation, and computation integrated software tool was developed. This software enables multiple functions, including parameter adjustment, automated simulation, data processing, and result visualization, and supports non-specialists in simulation design and verification with ease.

Keywords: NC high-speed maglev vehicles; safety braking; eddy-current braking electromagnet; braking capability computation; integrated software; track irregularity; finite element method

收稿日期: 2026-02-27

责任编辑: 钟 锋