

文章编号:1005-0523(2019)01-0025-08

磁悬浮列车动力学研究方法综述

肖乾, 许旭, 陈光圆

(华东交通大学运载工具与装备教育部重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要:在轨道交通领域中,磁悬浮列车的行驶方式不同于平常列车,它不再受限于传统轮轨接触式的行驶方式,可借助电磁力克服重力,脱离地面,实现了列车与轨道之间无接触的导向和悬浮。作为当前最为先进的运输方式,磁悬浮列车无疑成为各国着力研究的重要科技领域,为了提高行驶的安全性和改善行驶的平顺性,国内外学者针对磁悬浮列车相关动力学问题开展了大量研究,在理论分析、数值仿真等方面取得了重要成果。针对已有的成果,阐述了磁悬浮列车在动力学建模、动力学特性研究和悬浮控制等方面的研究现状及成果,并且对进一步的研究提出了建议和展望。

关键词:磁悬浮列车;动力学建模;动力学研究;悬浮控制

中图分类号:U292

文献标志码:A

因为轨道的电磁力作用,磁悬浮列车悬浮在轮轨之上,行驶过程中不和轮轨发生接触,所以只受到空气阻力的影响。随着科技的发展,磁悬浮列车的最高时速可以达到 500 km 以上,与高速轮轨列车相比而言,速度有了极大的提升,在长途旅行中更具优越性。磁悬浮列车在环保、安全和低能耗等方面也有明显优势:因为只存在空气阻力的影响,在相同工况下,与当今最领先的轮轨列车、汽车和飞机等运输方式相比,磁悬浮列车耗能最少;因为行驶时不与轨道产生摩擦接触,所以磁悬浮列车行驶时产生的振动较小,由此产生的噪音较低;由于电力驱动磁悬浮列车运行,因此存在的污染很小,对生态环境造成的破坏同样很小。

磁悬浮列车要想实现高速行驶,需要对其进行长期的试验检验,以保证列车行驶的安全性和稳定性。磁悬浮列车在行驶时,对运行轨道、路线的平整度和路基下沉量都有很高的标准要求,以保证安全的轮轨悬浮间隙。为了提高磁悬浮列车行驶的安全性,改善列车行驶的平顺性,磁悬浮列车的相关动力学研究工作也表现得尤为重要,而动力学建模和仿真分析是其中尤为重要的技术手段。磁悬浮列车在带来科技便利的同时,仍然有很多的科技难题需要攻克和解决,因此对于磁悬浮列车而言,将传统的动力学问题研究拓展到与行驶相关的一切因素和领域,全面而深入地开展磁悬浮列车系统的动力学研究,已经逐步成为科研趋势。现今关于磁悬浮列车相关动力学的研究,虽然国内外学者取得了巨大的进展,但是这些方法仍存在各自的不足和缺陷,目前还难以使得系统安全高效地运行。鉴于上述存在的问题,本文基于国内外学者取得的科研成果,针对磁悬浮列车在动力学建模、动力学特性研究和悬浮控制等方面进行了相对完整的整理阐述,并且对进一步的研究提出了建议。

1 磁悬浮列车的动力学建模方法研究

罗芳和张昆仑^[1]计算和分析电磁铁电磁力时,未考虑气隙及附近磁场沿长度方向,将悬浮力、横向力及侧滚力矩分别与长度大致看成线性关系,且 U 型电磁铁为细长形,根据这些因素建立了简化的二维模型进

收稿日期:2018-04-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51565013);江西省杰出青年人才资助计划项(20171BCB23058);西南交通大学牵引动力国家重点实验室开放课题(TPL1407)

作者简介:肖乾(1977—),男,教授,博士,研究方向为轮轨关系。

行计算,如图1所示,模拟仿真发现在磁悬浮列车的行驶过程中,导向稳定性会受到相对较大的影响。二维模型有其局限性,所以在计算分析电磁力时仍然需要深入而全面的研究,三维空间研究更为直观,且反映各方向的受力及变化更为具体。

为了有效且准确地找到悬浮和导向稳定性的影响因素,鲍佳^[2]先利用 SIMPACK 建立了简化悬浮系统的三维模型,克服了二维模型研究分析的局限性,然后考虑刚性车体、刚性轨道有激扰的模型,最后建立刚性车体、弹性轨道梁和悬浮导向控制系统的综合模型,由于悬浮、导向稳定性和车轨耦合振动的问题存在,所以在数学建模的基础上,分析了磁悬浮列车悬浮控制方法,将控制规律应用于该多体模型,但该模型仿真并未考虑外部因素的影响。为了使得磁悬浮列车的运行状况模拟仿真更加贴近现实,李人宪^[3]等采用两方程紊流模型,模拟粘性、定常不可压缩紊态流场,建立了 1:20 的三维模型,用来模拟磁悬浮列车的外部流场,并且为了节省时间和工作量,建立了具有相同的流线型外形的列车模型,发现车下空气隙的大小对气动升力的影响较大,即对悬浮稳定性影响较大,但研究分析工作量大,需要投入大量人力和物力。Howel J P^[4]在研究磁悬浮列车对侧风响应时,同样注意到了外部环境的影响,因此通过可变宽度和速度的侧风阵列建立模型,分别针对平坦轨道的 EDS 方案和轨道高架的 EMS 系统,进行了对应的研究分析。邓永权^[5]选择忽略角运动,且不考虑其带来的影响,将整个悬浮系统近似认为是单磁铁悬浮控制系统,在车轨耦合模型上考虑二次悬挂的影响,借助 SIMPACK 软件将梁模块和控制模块建立弹性梁模型和控制模型,并依此建立车轨耦合模型铅垂方向上的简化模型,并进行简化分析动力学问题,但研究仅局限于问题的局部,忽略了对系统整体动力学问题研究的完整认识。针对这个问题,Li L^[6]利用有限元软件模拟仿真建立了磁悬浮列车的悬浮模型,对磁悬浮列车悬浮系统的固有振动频率进行了测试,分析了列车和钢轨的强度、模态及相互作用,通过调整二次悬挂的频率、阻尼控制系统的频率和阻尼轨道的频率等系统的基本参数,进行了更为细致全面的分析研究。

磁悬浮列车转向架结构相对复杂,采用解析方法进行直接计算焊接结构效果不佳,而且如果直接依照图纸建立有限元模型,则会导致工作量规模更为庞大,为了有效研究磁悬浮列车转向架及其转向能力,杨磊和赵志苏^[7]对原结构进行了适当的简化,忽略不重要区域的小孔及小尺寸结构,借用三维造型软件建立实体模型,再将该模型导入有限元软件中,并按照力学特性进行必要的处理,建立离散化的有限元模型,依照静力等效的原则对多个工作状态的载荷进行了分析计算,但此研究仅仅局限于研究带转向机构的磁悬浮列车。由于摆式悬架磁悬浮列车与带转向机构的磁悬浮列车不同,只靠几何方程和静力等效的方式得到列车的转向特性是不够全面完善的,结合动力的平衡方程进行研究是非常有必要的,因此赵志苏^[8]建立了相应摆式悬架模型,对高速磁悬浮列车的转向特性进行了针对性的研究,发现求解得出的作用在摆杆上的力和它的位移,是解决转向特性问题的关键。为了更深入研究磁悬浮列车转向能力的影响因素,王汝宁^[9]将高速磁悬浮列车的结构分为上、中、下3层,上层为车体,下层为走行部,中层为摆式结构的二次系,建立了对应的简化模型,并分别探究了导向电磁铁长度、摆杆的摆动范围与拉力和相邻转向架对搭接电磁铁的挤压与拉伸3个主要因素对转向能力的影响,提出了不改变列车摆式结构、车辆不搭接电磁铁和稍微缩短转向架与导向电磁铁长度的改进方案。国内外学者针对磁悬浮动力学建模问题取得了较多的研究成果,但在数值模型的计算精度方面还存在许多亟待解决的问题。因此,为了提高实验中转向架研究模型的模拟精度,Watanabe K^[10]以某列车车体 1/12 尺度模型为研究对象,用六轴平行连杆运动部件模拟建成,模拟仿真了转

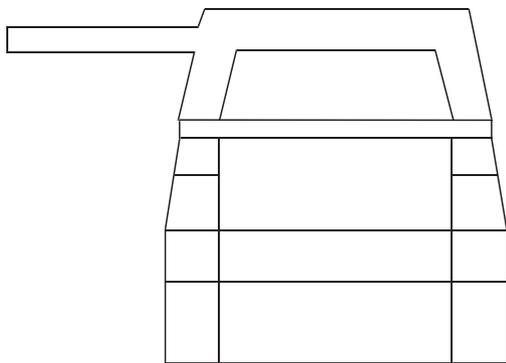


图1 磁悬浮列车悬浮电磁铁与轨道的二维模型图
Fig.1 Two-dimensional model of levitation electromagnet and track of maglev vehicle

向架运动以及二次悬挂装置工作的状态,结果减少了车辆的振动,有效且精确地探究了磁悬浮列车的转向能力。

研究磁悬浮列车动力学振动响应时,针对列车车体起伏、侧移、俯仰、偏航、侧滚五种行驶状态,胡嘉琪^[11]分别建立了二级悬浮 5 自由度和多自由度两种磁悬浮列车-弹性轨道耦合控制系统动力学模型,利用数值方法对比分析了不同运行速度和不同初始干扰对系统稳定性的影响。考虑到磁悬浮列车存在结构体构型复杂和体积较大的问题。王旭^[12]利用 CATIA 建立模型时,不考虑次要结构的影响,依照列车几何模型的拓扑性质和材料分布的对称性的特殊性质,建立了面对称有限元模型,全部构件独立建模并通过“钉连接”方式连接成结构整体,采用弹性梁和刚性梁混合简化建模,通过动力学特征方程的求解和有限元软件的分析,结果得到该仿真模型的低阶模态频率和模态振型。但以上建模研究仅限于自身部件的影响,Yau J D^[13]则考虑到磁悬浮列车行驶时迎风荷载的影响,利用软件建立了磁悬浮列车的悬浮模型,将一系列简单的梁模拟为导轨单元,具有相同的跨度和磁悬浮车辆作为一个刚性车体支撑的悬浮力,采用基于 Ziegler-Nicholas(Z-N)方法的机载 PID(比例-积分-导数)控制器来控制悬浮力,实现磁悬浮车辆-导轨系统的交互动力学,利用数字仿真技术,在时域/空间域内,利用数字仿真技术,对运行的磁悬浮车辆进行迎风荷载作用,有效地考虑了车辆速度的运动效应和随机气流速度场的空间相关性,同时考虑悬浮力的运动依赖性质和湍流气流的非保守特性,且采用迭代方法计算磁悬浮车辆-导轨耦合系统在风作用下的交互响应,全面准确地研究了气动效应对磁悬浮列车振动响应的作用。

武建军和杨文伟^[14]对磁悬浮列车/非线性弹性轨道系统的动力学特性进行了研究,将车体近似看成两部分,一部分是由车厢构成的一级悬浮体,另一部分是由磁轮构成的二级悬浮体,仅考虑竖直方向自由度,并依此完成了动力学建模,采取数值方法分析了三车体磁悬浮列车系统和单车体系统对应的动力学行为,分别给出了轨道的动力响应,并将不同的动力响应结果进行了相互对比研究。为了简化磁悬浮列车模型的计算,Zhang L^[15]采用导轨刚性化的方法,建立了车-轨耦合的动力学模型,用特征根法分析研究了系统的稳定性和具有时滞和速度反馈信号的悬架系统的动力学特性,并给出了对车辆与导轨之间的动力响应和振动进行抑制的措施,虽然该动力学建模分析方法更为有效地分析了悬架系统的动力学特性,但是仿真模型的精度仍有待提高,以完善动力学特性的相关研究。

在国内外学者的深入研究下,磁悬浮列车的动力学建模方法有了极大的发展,并且逐步形成一套系统而全面的研究方法。贺光^[16]将车体、悬浮模块等部件看作刚体,将空气弹簧、机械导向机构等看作质量为零的连接部件,而仅仅考虑其对力和力矩的传递作用,将列车系统的机械结构看成刚体部件和二次悬挂系统,分别建模:首先,分析磁悬浮列车的车体和悬浮模块的空间受力情况,通过建立刚体运动坐标系,推导了刚体平动加速度和绕质心转动的角速度和角加速度;在此基础上,利用牛顿-欧拉法给出悬浮模块、车体或者其他部件的运动方程;其次,分析了机械导向机构的作用模型,获得了磁悬浮列车导向力的传递关系,建立了机械导向机构对车体、悬浮模块和其余部件的约束方程;通过消除理想约束力,得到了关于独立变量的动力学方程;最后,将空气弹簧等效为弹簧-阻尼系统,给出了二系悬挂力的计算公式,将对刚体部件和二次悬挂系统建立的动力学方程联立,最终得到了中速磁悬浮列车机械结构的动力学模型,借助有限元仿真软件建立仿真模型,用于动力学特性研究。

如图 2 所示,以该典型的磁悬浮列车模型为例,该模型由 1 个车体和 6 个悬浮架子系统组成。其中,悬浮架子系统有 1 个构架、2 个悬浮电磁铁和 2 个导向电磁铁,每个电磁铁上有 4 个加速度传感器,电磁铁和构架之间有一系悬挂,车体和构架之间有二系悬挂,模型共计 114 个自由度。

建立的磁悬浮列车模型里,吊杆、悬浮架、导向与制动电磁铁、牵引电磁铁、牵引销、车体和左与右摇枕等,由 2 个 C 形悬浮弓组成的。在磁浮车辆悬浮架建模的过程中,由中梁中间位置将 1 个悬浮架划分成 2 个刚体结构,2 个刚体之间通过 1 个力元来连接,那么因为 2 个刚体之间存在的扭转运动,可以考虑完整悬浮架的扭转,力元能够产生对应的扭矩作用,那么最终可以根据有限元法求解出扭转刚度。依照图 3 的拓扑关系,完成了对应的磁悬浮车辆的整车模型的建立,见图 2。

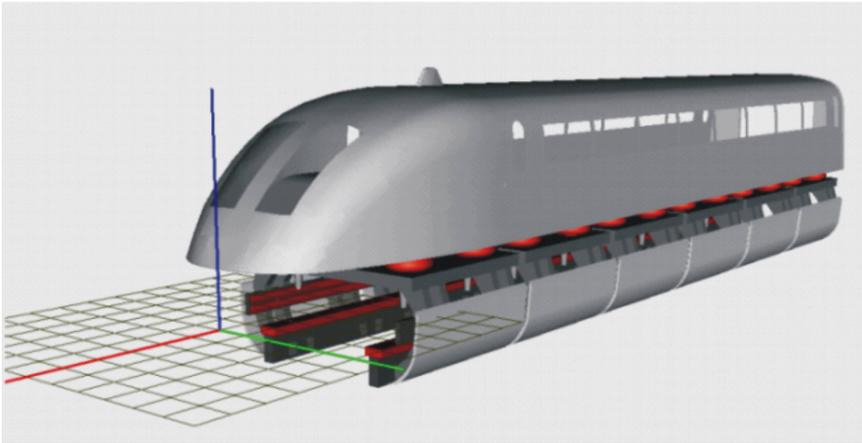


图2 磁悬浮列车模型

Fig.2 Maglev train model

以常导电磁吸引悬浮 EMS 方式为例,如图 3,车辆悬浮靠的是安装在车体上的电磁铁和轨道铁轨之间的吸引力。EMS 采用“T”导轨,车辆环抱导轨行驶。目前,磁悬浮列车是由多个二系空气弹簧共同支撑着车厢质量,并且由悬浮架作为媒介,将负载力传递到每个单磁铁悬浮系统上。如图 4 所示,其中 $x_m(t)$ 为悬浮间隙; N_m 为电磁铁线圈匝数; A_m 为电磁铁有效磁极面积; $i_m(t)$ 是电磁铁线圈中的电流和 $u_m(t)$ 是电磁铁线圈中的电压; m 为车辆的负载和自身重量。

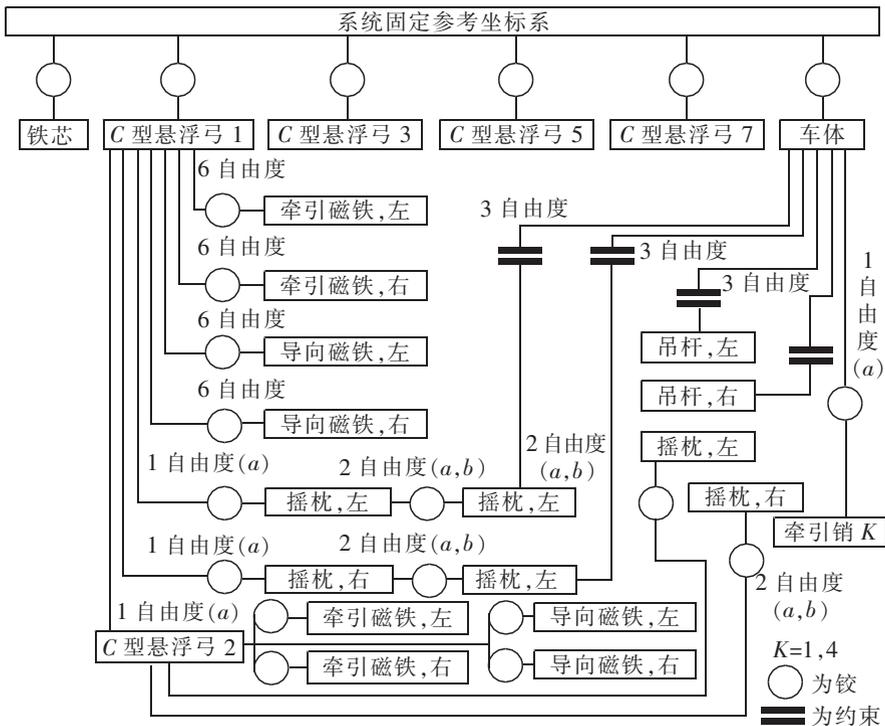


图3 磁悬浮车辆拓扑关系

Fig.3 Topological relationship of maglev vehicles

上面所述为分析研究动力学问题的最为基本的系统建模方法,分析各部件受力情况,推导车体平动加速度、绕质心转动的角速度及角加速度,明确导向力的传递方式,得出各部件的约束方程及动力学方程,并给出二系悬挂力的计算公式。但磁悬浮列车是一个处于多变环境、受到多耦合系统共同作用影响的多机电系统,磁悬浮列车动力学问题的基础是研究磁轨之间的关系。Zeng Y^[7]等人根据运动方程,建立了动态模型,简化模拟了磁悬浮条件下的车辆/导轨耦合振动,并以此粗略研究了磁浮系统的动态响应。考虑到复杂

的动态模型能够产生些许的误差影响, Yang Y B^[18]则简化了磁轨模型的建立, 将磁悬浮列车理想化为一排 2D 刚性梁, 将导轨模拟为一系列由刚性桥墩支撑的简单梁, 并嵌入弹性半空间, 以便于分析磁悬浮列车在桥墩支撑的高架导轨上的动态响应。在前人简化研究的基础上, 刘洁^[19]研究车-轨耦合动力学问题时, 分别建立了磁浮车辆、桥梁和电磁铁系统的计算模型, 将轨道不平顺作随机激励, 采用刚体动力学方法建立车辆的子系统模型, 用有限元方法模拟仿真桥梁子系统模型, 将对应的电磁悬浮力作为 2 个子系统之间的媒介, 并且 2 个子系统当作一个耦合体系, 针对磁浮车辆和桥梁 2 个子系统建立运动方程, 借助数值分析方法来研究车桥系统的动力响应特性。

磁悬浮列车沿轨道梁运动时系统的动态响应是一个复杂的多点激励耦合振动过程, 黎松奇^[20]建立了车-轨耦合模型, 以悬浮间隙当作激励, 改变悬浮控制参数的变化, 采用数值仿真的方式, 研究车体-轨道在运动过程中的复杂动力学行为, 并且轨道梁仍然采用 B-E 方程, 当车体反复经同一段轨道梁后, 取车头处车体和悬浮架的位移衡量整节列车的振动情况, 取轨道中心点处的振动情况来衡量轨道的动态性能。李小珍^[21]、洪沁焯^[22]和刘德军^[23]等人, 采用相似的方法来建立耦合振动模型, 选择耦合部件的刚度、部件竖向动挠度、荷载加载频率和运行速度等作为随机激励, 通过改变各激励变化参数, 从而针对磁浮车辆的动力学响应进行分析。

2 磁悬浮动力学特性研究

2.1 磁悬浮列车振动性能研究

磁浮列车垂向动力学研究除了能够指导车辆结构参数的优化设计, 还可以通过对车辆的随机振动的研究来衡量车辆运行的安全性和平稳性。刘德军^[23]通过仿真分析磁浮车辆-控制器-桥梁系统耦合振动模型, 苏斌^[24]则分析磁悬浮列车-轨道梁竖向耦合振动模型, 均发现了列车提高行驶速度的过程中, 车辆的竖向加速度增加, 且该方向的振动也随之提高, 该结论得到了一致认可。洪沁焯^[22]研究分析了车-桥竖向耦合振动, 验证了动力响应随车速提高呈增大趋势的结论, 并且通过实验, 进一步研究发现了车-桥耦合振动随运行时间增大而增大, 收缩徐变对桥梁竖向加速度有一定影响, 且对桥梁竖向动挠度影响很小, 对车体竖向动位移和加速度影响较大, 对悬浮架竖向动位移和竖向加速度有一定影响。鉴于磁悬浮列车是一个多体耦合系统, 其耦合振动带来的影响也不容忽视, 黎松奇^[25]分析了当列车经过轨道变坡点时, 车-轨主要参数对于振动的影响, 提出采用竖曲线式轨道坡道可减小磁浮系统通过时的振动, 并且可通过调节系统的其他参数来抑制系统的振动。为了更为细致地研究耦合振动的影响因素, 李小珍和王党雄等^[26]则研究分析了 F 轨对其响应的影响, 发现适当提高 F 轨的竖向刚度, 桥梁和车体的竖向动力响应值可减小。而且在此基础之上, 李小珍进一步仿真建立并分析了中低速磁浮列车-低置梁系统竖向耦合振动模型, 对比了不同参数给低置梁竖向动力响应带来的影响, 磁浮列车荷载加载频率较高时易与低置梁自振频率产生共振效应, 可通过增大底板刚度和路基厚度来抑制振动。磁悬浮列车通过道岔时产生共振带来了很大的影响, 因此 Yang Q K^[27]通过动态在线测量振动频率时, 发现可提高道岔刚度以消除共振。李晓龙^[28]研究分析 PEMS 型低进磁悬浮单点模型时, 发现可以通过设置非线性饱和环节和动态调整饱和阈值, 从而抑制车-轨耦合振动来使系统稳定。

2.2 磁悬浮列车稳定性研究

磁悬浮列车运行的稳定性是对整个磁浮系统的最基本的要求, 只有良好的稳定性才能保证磁悬浮列车

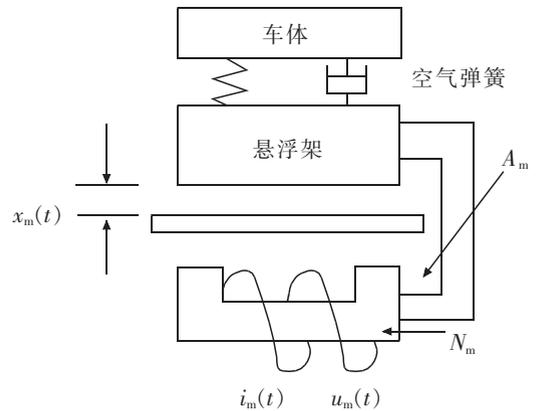


图 4 磁悬浮列车悬浮系统结构

Fig.4 Suspension system structure of maglev train

的研究和运用前景,也是验证车辆行驶安全性和舒适性的重要前提。磁悬浮列车在运行过程中,不单单制动会影响列车运行的稳定性,而且列车的转向架和走行机构等部件的性能同样影响着列车运行的稳定性,同时运行过程中还受到气动效应的影响。吴开洪和崔建昆^[29]仿真建立并分析了磁悬浮列车转向架模型,发现进行直线加速行驶时,转向架不仅仅受到悬浮磁铁的作用力,还会受到牵引磁铁的作用力,转向架垂向变形的绝对值最大,从而影响了车身的稳定性。宗凌潇^[30]则分析了走行机构过曲线的受力与约束情况和解耦能力,发现可以选择合适的牵引杆的连接刚度和空气弹簧的阻尼值以保证车辆运行的稳定性。Xu J^[31]选择更为细致角度进行研究,基于 Bi-2223/Ag 带的研制,针对绝缘、稳定、电流引导、固定和冷却四种条件进行了分析,发现系统工作状态稳定。由于磁悬浮列车可以进行大范围高精度的微运动,以适合应用在精密加工和超精密测量领域,那么,陈永波^[32]利用了振动波谱分析装置,对电磁力波形进行了谐波分析,发现优化的动子结构,可以有效减小直线电机电磁力波动,提高磁悬浮运动平台的控制精度以保证系统的稳定性。李颢豪和杨明智^[33]等人则基于非定常 $N-S$ 方程、三维可压缩和 $k-\epsilon$ 湍流模型,探究了磁悬浮列车、声屏障及电缆的气动效应,发现随着声屏障高度的提高,声屏障内侧布置的电缆盒所受纵向冲击载荷会增大,稳定性受到的影响较大。

磁悬浮列车系统在正常运行条件,不同工况下均能保持良好的行驶能力,以及碰到一些非正常工况时,仍能保持磁悬浮系统运行的整体稳定性,列车行驶的安全性同样是稳定性的保证。制动结构装置在保证列车行驶的稳定性和安全性方面,起着关键的作用,因此良好的制动效能是保证车辆行驶安全性的第一步。马吉恩^[34]利用反向激励实现制动系统的简单复位,借助永久磁铁的磁力增强摩擦制动效果和涡流流式制动控制效果,实现了制动的良好效能及其稳定性能。运行工况对车辆制动效能的影响较大,黎松奇^[35]等人在不同车-轨条件下仿真分析了车辆上坡过程中的动力学行为,发现车辆速度和悬浮控制系统时滞都会影响车辆上下坡道时的安全性,采用缓和曲线,则有助于减小列车受到的冲击,以保持稳定的行驶能力。Zeng J^[36]从列车磁悬浮列车自身角度出发,研究了转向机构、车身倾斜控制法和列车的弯曲性能,发现了控制系统在车体倾斜性能和安全方面有着较大的作用。Sang U P^[37]发现选择合适的滑动频率是可以获得良好的运行性能,且保证磁悬浮系统的安全性和稳定性。为了更加精确地了解磁悬浮列车运行的稳定性,姚媛^[38]用 STAMP 研究了高速磁浮列控系统功能安全的步骤,用 STPA 方法研究了高速磁浮列控系统的最大速度曲线监控作用,对当前停车点控制层、超速防护层和操作员停车点设置层进行了研究,确定了分层次的系统危险因素及子系统的安全约束。

3 磁悬浮列车悬浮控制研究

鉴于磁悬浮列车动力学特性研究中存在不足与缺陷,国内外学者对此开展了优化设计、提出了新的悬浮控制或者改善悬浮控制参数以完善和优化磁悬浮列车的相关动力学特性研究。

黎松奇^[39]根据逆系统的非线性反馈控制方法,基于逆系统反馈线性化和鲁棒伺服控制,设计出组合控制器,采用 Matlab 数值仿真证明了当系统受到较大扰动时,该控制器仍然能维持稳定性。张德伟^[40]提高控制转差频率,次级电导率选择 $(3.4 \pm 0.4) \times 10^7$ S/m,把硅钢片作为背铁,推力提高了 10%左右,法向力增加了 100 N,对电机特性有很大的提高。基于磁浮列车单点悬浮模型,李晓龙^[41]使用电流-位置双环设计方法得到可稳定悬浮的控制算法,进一步提出了一种基于搜索极大椭球的控制参数优化方法,通过仿真和试验均验证了优化后的控制效果,为进一步提高悬浮系统稳定性,改善动力学特性奠定了理论参考。张新华^[42]提高磁场基波磁密值的大小且减小磁场畸变,新型磁钢阵列产生的磁场保证了更小的谐波畸变率、更高的基波磁通密度和更相近的基波磁通密度幅值,提出 MLPMPM 小角度偏航状态下电流补偿方案和相位校正方案,而且借助有限元仿真确认了该方案的准确性和实用性。为了探索磁浮列车的精确动态响应,验证控制器的有效性,Li J H^[43]指出了应考虑固有非线性、内部耦合和传感器与执行器之间的不对中以及外部干扰等问题,对应建立了基于磁浮模块数学模型的反馈线性化控制器,而且,为了减弱外部干扰的影响,Li J H 还提出了建立干扰观测器,并利用输入到状态稳定性理论研究了估计误差的变化。

4 问题与展望

磁悬浮列车的研究尚在模拟仿真试验和尝试运营的初始阶段,本文基于近两年国内外学者针对磁悬浮列车在动力学方面的研究,借助各种动力学建模软件和有限元仿真软件,采用了建立动力学模型和有限元模拟仿真的方法,对动力学建模、动力学特性研究和悬浮控制等几个方面进行了研究分析,针对存在的问题和缺陷提出了优化改进和新的悬浮控制的方法。但是,因为研究领域、研究对象和分析标准的不同,最终分析得出的结果并不能完全符合实际情况,难以避免一些运行问题的发生,因此仍存在一些问题值得深入研究:

1) 进一步细化机械导向机构的动力学建模模拟仿真过程。机械导向机构结构较为复杂,是磁悬浮列车完成导向功能的主要部件,研究中将其作为质量为零的连接部件,并没有对其进行精确的动力学建模。因此,细化机械导向机构模型对进一步准确建立磁悬浮列车动力学模型的非常重要。

2) 高速行驶下的磁悬浮列车,不应该仅考虑受到稳态的风载荷的影响,还应该顾及突变风和脉动风对车辆动力学性能的影响。所以,应该对中速磁悬浮列车空气动力学方面进行更为详细的研究。

3) 应该进一步完善悬浮控制器的具体算法与策略。悬浮控制的效能是研究磁浮系统很重要的一部分。现有的 DSP 处理器运算速度可以承担更加复杂的各种现代控制算法运算,并保证算法的实时性。随着控制理论的发展,将新生的各种控制算法应用到磁浮系统中,验证其效果,将会是需要长期研究的方向。

4) 由于制动系统非常复杂,且受时间和研究水平的限制,可进一步对列车的再生制动做深入分析研究。且在对磁悬浮列车建模时,不能忽略制动系统泄漏的影响,因此仿真模型需要进一步完善,增加对备用制动装置性能的研究,且深入分析研究制动结构装置的故障智能检测功能。

参考文献:

- [1] 罗芳,张昆仑. 磁悬浮列车 U 型悬浮电磁铁电磁力的数值计算与分析[J]. 机车电传动,2002(3):32-34.
- [2] 鲍佳. 磁悬浮列车悬浮控制与动力学仿真[D]. 成都:西南交通大学,2003.
- [3] 李人宪,刘应清,翟婉明. 高速磁悬浮列车纵向及垂向气动力数值分析[J]. 中国铁道科学,2004,25(1):8-12.
- [4] HOWELL J P. Aerodynamic response of maglev train models to a crosswind gust[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics,1986,22(2-3):205-213.
- [5] 邓永权. 磁悬浮列车静悬稳定性与仿真分析[D]. 成都:西南交通大学,2005.
- [6] LI L,MENG G. Vehicle/steel guideway interaction when the maglev train is hovering[J]. Journal of Low Frequency Noise Vibration & Active Control,2008,27(2):135-145.
- [7] 杨磊,赵志苏. 磁悬浮列车转向架结构强度的有限元分析[J]. 机械,2004,31(2):13-15.
- [8] 赵志苏. 摆式悬架高速磁悬浮列车转向特性研究[J]. 机车电传动,2009(1):43-45.
- [9] 王汝宁,程虎,李云钢. 高速磁悬浮列车转向能力研究[J]. 机车电传动,2011(1):40-42.
- [10] WATANABE K,SUZUKI E,YONEZU T,et al. J1001-1-6 Simulation of vehicle dynamics using a maglev vehicle model experiment apparatus[C]// The Japan Society of Mechanical Engineers,2009:195-196.
- [11] 胡嘉琦. 磁悬浮列车的动力学响应及随机振动响应分析[D]. 兰州:兰州大学,2005.
- [12] 王旭,孙秦. 某型磁悬浮列车结构动力学有限元数值计算及优化分析[J]. 机械设计与制造,2007(5):42-43.
- [13] YAU J D. Aerodynamic vibrations of a maglev vehicle running on flexible guideways under oncoming wind actions[J]. Journal of Sound & Vibration,2010,329(10):1743-1759.
- [14] 武建军,杨文伟. EMS 磁悬浮列车/非线性弹性轨道系统的动力学特性[J]. 兰州大学学报:自科版,2006,42(1):120-126.

- [15] ZHANG L, HUANG L, ZHANG Z. Stability and Hopf bifurcation of the maglev system with delayed position and speed feedback control[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2009, 57(1): 197–207.
- [16] 贺光. EMS型中速磁浮列车动力学建模与导向能力研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2016.
- [17] ZENG Y, WANG S, ZHANG K. A study of vertical coupling dynamics of EMS maglev train and guideway systems[J]. *Journal of the China Railway Society*, 1999, 21(2): 21–25.
- [18] YANG Y B, YAN J D. An iterative interacting method for dynamic analysis of the maglev train – guideway/foundation–soil system[J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(3): 1013–1024.
- [19] 刘洁. 磁悬浮列车–高架桥梁系统耦合动力问题研究[D]. 北京:北京交通大学, 2016.
- [20] 黎松奇, 张昆仑, 刘国清, 等. EMS型磁浮列车上下坡过程仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(1): 255–260.
- [21] 李小珍, 耿杰, 王党雄, 等. 中低速磁浮列车–低置梁系统竖向耦合振动研究[J]. *工程力学*, 2017, 34(12): 210–218.
- [22] 洪沁烨. 徐变及温度效应对中低速磁浮大跨连续梁车桥耦合振动的影响[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
- [23] 刘德军, 李小珍, 洪沁烨, 等. 中低速磁浮列车–大跨度连续梁耦合振动研究[J]. *铁道工程学报*, 2017, 34(9): 53–57.
- [24] 苏斌. 中低速磁浮列车作用下站房结构振动的理论与试验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
- [25] 黎松奇. EMS磁浮列车悬浮系统振动机理及抑制方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
- [26] 李小珍, 王党雄, 耿杰, 等. F轨对中低速磁浮列车–桥梁系统竖向耦合振动的影响研究[J]. *土木工程学报*, 2017(4): 101–110.
- [27] YANG Q K, CHENG X. Vibration characteristics analysis of maglev vehicle–switch [J]. *Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles*, 2016, 39(5): 63–66.
- [28] 李晓龙, 龙鑫林, 翟明达. 永磁电磁型低速磁悬浮车轨耦合振动抑制新方法[J]. *振动工程学报*, 2016, 29(4): 649–655.
- [29] 吴开洪, 崔建昆. 磁悬浮列车转向架的变形状态分析[J]. *现代机械*, 2017(1): 34–36.
- [30] 宗凌潇. 时速 140 km 新型中低速磁浮列车走行机构研究分析[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
- [31] XU J, GENG Q, LI Y, et al. Design, fabrication, and test of an HTS magnetic suspension experimental system[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26(6): 1–6.
- [32] 陈永波, 燕延, 王伟明, 等. 磁悬浮直线电机三维有限元分析及优化设计研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2017(1): 31–34.
- [33] 李颢豪, 杨明智, 孔学舟. 不同高度声屏障对磁浮列车气动效应影响研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(4): 819–826.
- [34] 马吉恩, 钟云龙, 方攸同, 等. 一种磁悬浮列车用混合型制动励磁结构: 中国, 20952374[P]. 2016–04–13.
- [35] 黎松奇, 张昆仑, 刘国清, 等. EMS型磁浮列车上下坡过程仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(1): 255–260.
- [36] ZENG J, LUO R. Dynamic curving simulation of tilting train (bogie, technical session)[C]// *International Symposium on Seed–Up and Service Technology for Railway and Maglev Systems: Stech. The Japan Society of Mechanical Engineers*, 2017, 350081: 1–6.
- [37] SANG U P, CHAN Y Z, PARK D Y, et al. A study on improvement of operation efficiency of magnetic levitation train using linear induction motor[J]. *International Journal of Railway*, 2016, 9(2): 41–45.
- [38] 姚媛. 高速磁浮列车速度曲线监控功能安全分析[D]. 北京:北京交通大学, 2016.
- [39] 黎松奇, 张昆仑, 刘国清, 等. 基于逆系统方法的磁浮列车非线性控制[J]. *控制工程*, 2017, 24(8): 1542–1546.
- [40] 张德伟. 中低速磁浮车用 LIM 次级对电机特性及控制参数的影响研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
- [41] 李晓龙, 翟明达, 郝阿明. 基于输出饱和条件的磁浮列车悬浮控制参数优化[J]. *国防科技大学学报*, 2017(4): 149–153.
- [42] 张新华. 动圈式磁悬浮永磁平面电机设计与控制研究[D]. 镇江:江苏大学, 2017.
- [43] LI J H, JIE L, GENG Z. A practical robust nonlinear controller for maglev levitation system[J]. *Journal of Central South University*, 2013, 20(11): 2991–3001.