

汽车线控制动系统关键执行部件设计与性能研究

盖彦青 刘 玲

鄂尔多斯职业学院, 内蒙古自治区 鄂尔多斯市 017000

[摘要]线控制动技术是实现汽车智能化、电动化的重要组成部分,正在逐步替代传统的机械式制动系统。电子机械制动系统是以电机作为动力源,通过传动装置给制动盘施加夹紧力使车辆减速,由于省去了大量的油管路,便于实现主动制动以及与纵向动力学控制系统的结合。而电子液压制动系统则是用电控元件代替传统制动系统的真空助力器,利用电机作为动力源,由电控单元及各种传感器来完成制动力大小的控制。对于线控制动系统中的主要执行部分进行相关工作,如电机的选择、制动执行机构的设计、可靠性和冗余设计等,都是提高整个系统性能的关键所在。通过对制动系统进行动力学建模,研究制动过程以及在极端情况下执行元件的工作情况可以对系统的改进起到指导作用。

[关键词]线控制动; 执行部件; 电子机械制动

DOI: 10.33142/sca.v9i6.19807

中图分类号: U463.5

文献标识码: A

Design and Performance Research of Key Execution Components in Automotive Wire Controlled Braking System

GAI Yanqing, LIU Ling

Ordos Vocational College, Ordos, Inner Mongolia, 017000, China

Abstract: Wire controlled braking technology is an important component of realizing the intelligence and electrification of automobiles, and is gradually replacing traditional mechanical braking systems. The electronic mechanical braking system is powered by an electric motor and applies clamping force to the brake disc through a transmission device to slow down the vehicle. Due to the elimination of a large amount of oil pipelines, it is easy to achieve active braking and integration with the longitudinal dynamics control system. The electronic hydraulic brake system replaces the vacuum booster of the traditional brake system with electronic control components, using an electric motor as the power source, and controlling the braking force through an electronic control unit and various sensors. The key to improving the performance of the entire system is to carry out related work on the main execution parts of the wire controlled braking system, such as motor selection, brake actuator design, reliability and redundancy design. By modeling the dynamics of the braking system, studying the braking process and the working conditions of the executing components in extreme situations can provide guidance for system improvement.

Keywords: wire controlled braking; execution components; electronic mechanical braking

引言

汽车产业正在朝电动化、智能化发展,传统的制动系统采用真空助力器,不能适应主动制动、能量回收的需求。线控制动系统体积小、反应快、精度高,适合作为无人驾驶的执行元件。它的主要特点是制动踏板与制动器之间没有机械或者液压连接,用电信号传递驾驶员的制动意图。线控制动分为电子液压制动和电子机械制动两种类型。电子机械制动才是真正的线控制动,结构简单、反应灵敏;而电子液压制动保留了液压部分,在电子助力失效的情况下可以作为备用制动,两者的主要区别是:电子机械制动

彻底取消制动液以及液压管路,执行机构安装在车轮附近;电子液压制动是用电机驱动主缸建压,然后由液压管路将制动力传至各车轮。它是线控制动系统的最重要部分,包括电机构成、传动件、压力控制装置以及各种传感器等,它的好坏直接影响到响应性和准确性,在本文中从总体介绍、主要设计思想、性能评估几个方面进行探讨,供实际工作借鉴。

1 线控制动系统概述与关键执行部件构成分析

线控制动起源于航空电传飞行控制系统,其主要特点是制动踏板与执行机构分离。通过电信号传递驾驶员的制

动意图,传感器检测踏板位置,电控单元计算出应施加的制动力。目前的发展趋势是从最初的防抱死制动系统、车身稳定控制系统再到后来的电子液压制动、电子机械制动的进步。电子液压制动保留传统的液压系统,在电子助力失效的情况下仍可作为应急措施使用;而电子机械制动去掉了所有的液压管路,每一个车轮都单独进行制动操作。在线控制动的结构方面,主要包括信号输入模块、电控模块以及执行器三个部分,其优点就是反应迅速、精确并且容易实现能量回收等功能。主要执行件包括驱动电机、传动机构、压力调节装置以及传感器等,分为动力部分、传动部分和传感反馈三大部分。电机驱动一般采用永磁同步电机,压力调节在电子液压制动上表现为电机带动主缸建立压力,在电子机械制动上则是通过传动机构产生制动力,传感反馈用于给控制器提供当前状态信息。

2 关键执行部件核心设计研究

2.1 执行部件设计原则与技术要求

线控制动关键执行机构设计有三个目标:响应快,在几毫秒内完成从接收到指令到产生制动力整个过程;控制准确,制动力大小直接影响制动平顺度,非线性部分可通过设计及控制进行补偿;可靠性和安全性,要有一定的容错率,重要部件有备用方案。从技术上讲,最大夹紧力要大于等于整车满载状态下制动要求(以大于等于 0.8g 减速率考虑),间隙消除时间小于等于 100ms,压力控制精度为 $\pm 0.1\text{MPa}$,还要能够承受一定温度变化以及较高振动条件下的工作要求。

2.2 电机参数匹配与结构优化设计

驱动电机是线控制动执行部件的动力来源,而电机的选择关系到整个系统的性能。电子机械制动系统利用电机作为驱动力,再由传动机构传递给制动盘产生制动力,因此对于电机的要求较高,不仅要满足转矩密度大、响应快、可调性强等条件,还要价格合理。永磁同步电机由于其高转矩密度、高效率以及优秀的动态性能,在线控制动执行电机中被广泛采用。电机参数匹配主要是要明确电机的额定转矩、峰值扭矩以及工作转速区间。根据车辆的相关参数以及法律法规的要求来决定整个电子机械制动系统的总制动能力,这就要求对两个主要的指标即最大夹紧力和间隙消除时间进行设计。最大夹紧力取决于制动所需的制动力矩以及制动器的有效半径,在考虑到传动机构减速比的情况下求解电机所要输出的转矩。而间隙消除时间对电机的要求是在空载情况下能够迅速做出反应,这就需要电机具有较高的空载转速以及较小的转动惯量。从结构上进行优化设计,对于执行电机而言其轴向尺寸受到轮边布置

的空间限制,因此要采用扁平化的设计思路;绕组可以采用集中式的绕组来增加槽满率;磁路可以采用优化永磁体排布的方式来增大气隙磁密。另外从散热的角度考虑这也是电机需要改进的一个方面,因为执行电机在长期制动的状态下容易出现堵转现象,线圈中的电流不断流通会导致大量的热量产生,严重时会造成电机损坏。使用液体冷却或者相变材料帮助散热可以提高电机的热容量以及运行时间。

2.3 执行部件可靠性与冗余设计

线控制动系统取消了制动踏板与执行机构间的机械连接,这对线控制动系统的可靠性和安全性提出更高的要求。线控制动系统出现故障后果严重,所以需要有备份的制动系统来应对这些故障,这也是实现 L3 以上自动驾驶所必需的前提条件。执行机构的可靠性和冗余度要从三个方面考虑:即电气冗余、机械冗余以及控制冗余。在电气冗余上,使用双绕组或者双三相绕组作为驱动电机,在一个绕组或与其对应的驱动器发生故障的情况下另一个绕组仍可以产生足够的制动力矩。而在控制器中则采用双微控制器,两个微控制器分别由不同的电源供电并进行各自的操作,然后相互比较得出最终的结果。传感器冗余对于提高执行机构可靠性具有重要作用,如制动轮缸压力传感器、电机位置传感器等重要信号均使用两套传感器,对这两个信号的一致性进行监控可以及早发现其中某个传感器出现异常并切换到另一个正常的传感器上。从机械冗余角度考虑,电子液压制动系统仍然保留有液压回路,在电子助力失灵的情况下,驾驶员可以手动踩下制动踏板产生制动力。而电子液压制动系统保留传统成熟液压部分,当电子助力无法工作时仍可以使用该部分作为后备制动,保证车辆安全性。而对于电子机械制动来说,其机械冗余需要多个执行机构共同完成,一般为前轮电子液压制动、后轮电子机械制动方式,如果一个执行机构出现问题另外一个还可以继续正常工作,从而有足够的制动力使汽车停下来。

2.4 执行部件热管理与耐久性设计

执行机构散热对整个系统长时间制动性能至关重要,在电子机械制动系统中,电机堵转是最大的热源,当电机堵转时,电流在绕组内流动而不能产生任何机械功,所有电功率都转变为热量,会使电机温度快速升高,若此时电流过大,则会将线圈绕组烧坏,造成电子机械制动系统故障从而影响行车安全性,因此需要进行有效的热管理措施来防止这种情况发生。热管理方法主要有自然冷却和主动热管理两种方式,自然冷却主要是通过改进电机外壳散热

片设计或者使用导热灌封料填充定子与壳体之间的空隙以增加散热能力。主动热保护是根据温度监控以及电流限制来实施,在执行元件温度过高情况下,主动减少制动力矩请求次数或者限制最大制动力矩输出以避免发生过热。耐久性要求执行元件寿命不低于整车寿命。制动驱动系统中传动部件如滚珠丝杠、齿轮减速器等要对其耐磨性做评价。运动转换装置将电机转动转化为对制动片施加压力,而这对接触面之间的磨损程度又直接影响到制动力大小。表面强化、固体润滑涂层等都是提高传动部件寿命的方法。

3 系统性能分析与仿真研究

3.1 制动系统动力学模型建立

制动系统动力学建模是其性能评价的基础,线控制动系统动力学模型由三部分组成:电机电磁模型、传动机构动力学模型和制动器力学模型。其中电机电磁模型用永磁同步电机电压方程和转矩方程表示,在旋转坐标系下,定子电压方程反映电流和电压的关系,而电磁转矩方程是电流和产生的转矩的关系。对电子机械制动执行机构所用驱动电机的控制方案进行了探讨,即永磁同步电机矢量控制的方法,包括坐标变换、空间矢量脉宽调制等。传动机构将电机转动变成制动片移动。滚珠丝杠是一种常见的传动部件,滚珠丝杠的动力学模型包括滚珠丝杠转动惯量、阻尼系数以及轴向刚度等;制动器的力学模型刻画的是刹车片与制动盘之间的作用力,这个作用力与传动系统的轴向输出力成正比关系,但是由于摩擦系数、制动盘热膨胀等原因导致其具有非线性特性。执行器的非线性和慢时变参数摄动下的鲁棒控制问题是电子机械制动系统所面临的难题。

3.2 制动响应性能分析

制动响应性能是衡量线控制动系统的重要参数,响应时间为自发出制动请求到制动力上升至目标值 90%所经历的时间。电子机械制动系统具有良好的电流跟随能力,相比传统的方案其响应速度更快。而造成响应迟缓的原因主要有三个方面:电机电气时间常数、传动机构的间隙消

除时间和控制器本身的延迟。提高供电电压可以减小电气时间常数,进行预压可以减小传动间隙,使用高性能的微处理器以及优化算法都可以减小控制延迟。制动力的增长可以分为三个过程:第一阶段是间隙消除期间电机空载转动,在第二阶段中当接触后随着电机转矩增大制动力也迅速增大,在第三阶段中制动力逐渐接近期望值并且维持在一个恒定水平上。多阶段闭环控制方法根据不同阶段使用不同的控制量值,在实现较快响应的情况下不会出现较大超调以及振动现象。

3.3 极端工况下执行部件性能研究

极端工况有紧急制动、长下坡连续制动以及低温环境等。紧急制动对执行机构需要在最短的时间内提供最大的制动力,这对电机峰值转矩以及控制器响应速度要求较高。比如自适应巡航或自动紧急制动等纵向动力学控制都需要执行机构能够迅速建立压力,在紧急制动情况下,执行机构需要在 150ms 内达到最大制动力,比一般制动快一半以上。长下坡连续制动对执行部件散热能力提出挑战。在持续制动期间,制动盘和制动片之间摩擦会产生大量的热量,这些热量会传递给执行部件造成电机过热或者润滑脂失效等问题。利用热-结构耦合仿真可以得到执行机构受到热载荷后其工作特性变化趋势,从而为热防护提供参考;低温环境下对执行机构影响主要表现在润滑脂黏度过大以及电池供电能力降低两个方面;集成式制动系统需要能够承受较大温差范围工作条件,而永磁同步电机模型中也应考虑到温度对于磁链的影响;另外,在低温条件下由于执行机构摩擦力矩增大,因此电机要产生足够大的驱动力矩去克服这个阻力矩所以这就要求在设计电机时要预留一定裕度。

3.4 仿真结果与性能优化分析

利用所建立制动系统动力学模型,在联合仿真环境中对执行机构工作情况展开研究,选取不同类型工况,比较各种电机参数以及控制方法对应执行机构行为差异性如表 1 所示。

表 1 不同方案下的制动性能仿真结果

方案编号	电机峰值转矩 (N·m)	传动比	控制策略	响应时间 (ms)	稳态制动力 (N)	超调量 (%)	综合评价
方案 1	3.5	12:1	PID 控制	112	1850	8.2	基准方案
方案 2	3.8	12:1	PID 控制	98	1920	7.1	转矩提升有效
方案 3	3.5	14:1	PID 控制	105	1900	6.5	响应略慢,超调小
方案 4	3.8	14:1	滑模控制	92	1980	5.2	综合最优
方案 5	3.5	12:1	自抗扰控制	108	1860	4.8	超调抑制佳

仿真表明,电机峰值转矩由 $3.5\text{N}\cdot\text{m}$ 提高到 $3.8\text{N}\cdot\text{m}$ 可以使得响应时间降低约 12.5% 。基于自抗扰控制的压力环控制算法比 PID 控制对于不同的制动压力具有更好的鲁棒性和更快的跟随速度。方案 4 使用滑模控制以及优化传动比,响应时间为 92ms ,稳态制动力为 1980N ,超调量为 5.2% ,是所有方案中最佳的一种。传动比从原来的 $12:1$ 增大为 $14:1$ 虽然可以增加输出力,但是也相应地提高了对电机的速度要求从而影响响应时间。自抗扰控制在抑制超调上有着显著的优势,如方案 5 只存在较小的超调即 4.8% ,适用于对外部冲击较为敏感的应用场合。基于 Q 学习的控制方式有较好的控制性能,在低频段可提高整车舒适度。由仿真可知,对执行机构进行改进的方向是:电机最大转矩为 $3.8\text{N}\cdot\text{m}$,传动比在 $13:1\sim 14:1$ 之间,使用滑模控制或者自抗扰控制等。在热管理上要设置温度过高报警,在执行机构温度达到 120°C 以上时自动减少电流降低功率,保证在恶劣环境下整个系统的安全性。

4 结语

电子机械制动系统可以很好地满足汽车电动化及智能化发展需求,有广阔市场空间;而电子液压制动系统由于其成熟液压备份方案,在现阶段更具备商业化可能性。从执行机构角度来看,电机参数匹配是定义工作点基础,永磁同步电机因为其高转矩密度以及快速响应特点而被广泛采用。冗余设计(包括电气、控制、机械等方面)是实现产品化的必要条件。散热问题是需要考虑长时间制动情况下电机堵转问题。从性能评价角度来说,动力学模型可以较好地反映执行机构的工作情况;而通过各种极端情

况进行仿真研究也能够得到关于温度以及低温下影响的研究结果。优化电机转矩以及传动比以及采用先进的控制方法可以使响应时间小于 92ms ,线控制动目前处于由传统的电动液压制动到电动机械制动转变的时代,在高功率密度电机、功能安全等级的控制器等相关零部件逐渐完善的情况下,随着自动驾驶等级提高的需求,电子机械制动有望快速发展。

基金项目或课题:

(1)鄂尔多斯职业学院大学生科技创新基金项目《基于舒适驾乘的电动汽车研制》,项目编号 EJX1706。

(2)教育部“现代学徒制”试点汽车运用与维修技术专业项目,项目编号“教职成厅函〔2017〕35号”。

(3)鄂尔多斯职业学院科研基金项目《基于汽车制造中线束装配的智能化装配系统建设》项目编号 EJY1815。

[参考文献]

[1]陈齐平,王博文,李志玉,等.智能网联汽车线控制动技术发展现状综述[J].华东交通大学学报,2025,42(1):84-96.

[2]熊璐,李聪聪,卓桂荣,等.电子机械制动器构型及控制技术发展现状[J].汽车工程,2023,45(12):2187-2199.

[3]张奇祥,王金湘,张伊晗,等.智能电动汽车线控制动关键技术与研究进展[J].机械工程学报,2024,60(10):339-365.

作者简介:盖彦青(1970—)女,吉林长春人,鄂尔多斯职业学院教授,研究方向涵盖力学、机械工程、金属工艺学、汽车结构与原理、汽车性能测试与分析、汽车制造与维修工艺、故障诊断与检测、汽车技术服务及维修企业技术经济与运营管理。