

汽车电子机械助力制动系统主动增压控制策略分析

周小静

(重庆工商大学派斯学院 重庆 401520)

摘要: 汽车电子机械助力制动通过电动机来提供助力, 要求汽车电子机械助力制动系统具有主动压力控制功能, 以三步法控制理论作为基础, 制定出主动增压控制策略, 可以满足压力控制的效性和实时性要求。本文先对汽车电子机械助力制动系统分析, 并提出主动增压控制策略, 最后通过仿真试验和硬件试验对控制效果进行验证, 可供相关人员参考。

关键词: 汽车电子机械; 助力制动; 主动增压控制

0 引言

当前, 更多的智能化技术应用于汽车领域, 使得汽车驾驶与制动不再依赖于驾驶人员, 可以确保驾驶的安全和操控的准确性。汽车制动系统设计需要结合不同驾驶人员的特点, 满足不同驾驶要求。电子机械助力制动由电动机来提供助力, 做到实时主动制动压力控制, 由底层执行器来进行再生制动, 助力比具有较好的可调性能, 可以满足驾驶人员对制动脚感的需要, 同时也提供失效备份功能来确保驾驶安全。为确保电子机械助力系统与智能汽车进行很好匹配, 需要提出汽车电子机械助力控制策略, 加强主动增压控制算法的研究, 满足汽车智能化发展要求。

1 汽车电子机械助力制动系统分析

1.1 电子机械助力器

汽车电子机械助力制动系统是把人力与电机力采用反馈盘进行耦合, 再输出至液压负载中。针对主动增压系统来讲, 人力并没能发挥作用, 系统输入的是电机力, 反馈盘并没有出现形变, 可以对系统模型进行简化, 而液压负载多采用 PV 特性进行简化处理。在主动增压的实际实施过程中, 可以不考虑反馈盘变形, 将助力阀与反馈盘作为整体, 转动质量可转变为平动质量, 具体如图 1 所示。

按照动能守恒, 简化处理后的等效质量表达式为:

$$\frac{1}{2}m_E v^2 = \frac{1}{2}(J_1 + J_2)\omega_1^2 + \frac{1}{2}(J_3 + J_4)\omega_2^2 + \frac{1}{2}(m_1 + m_2 + m_3)v^2$$

$$\omega_2 = \omega_1 / i$$

$$v = \frac{w_2}{2\pi} S = \frac{w_1}{2\pi i} S \quad (1)$$

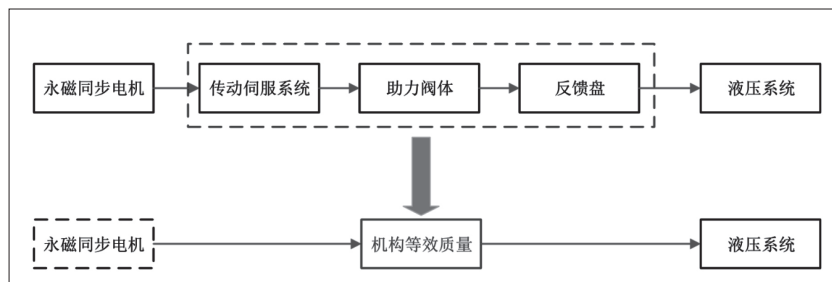


图1 系统简化模型示意图

式中: m_E —系统等效平动质量;

J_1 、 J_2 、 J_3 、 J_4 —电机、小齿轮、大齿轮和丝杠轴螺母的转动惯量;

m_1 、 m_2 和 m_3 —丝杠轴、助力阀体和反馈盘的质量;

ω_1 、 ω_2 —电机和大齿轮的角速度;

v —丝杠轴平动速度;

i —减速比;

s —丝杠导程。

1.2 液压系统

液压系统压力、速度和主缸推杆位移、速度等有着直接联系, 可通过 PV 特性进行简化, 不同速度情况下的 PV 特性不尽相同。获取到系统 PV 特性后, 可通过曲线拟合得到主缸压力与主缸推杆位移间的关系式, 但不同速度相应的方程参数也有所不同。不同主缸推动速度条件下, 液压制动位移与压力为正相关性。将主缸推杆速度为 80mm/s 去程 PV 特性进行曲线拟合处理, 二次方程可体现出液体特性, 表达式为:

$$p = ax^2 + bx + c + d\dot{x} \quad (2)$$

式中: P —主缸压力;

x —推杆位移;

a 、 b 、 c 、 d —拟合参数。

2 主动增压控制策略

对制动系统进行简化处理以后,系统可视为电机、等效平动质量及液压负载的耦合体,主动增压通过对电机发出控制信号,经过等效质量传至液压系统。控制可划分为压力环、位移环和电流环三个不同的部分,压力环为前馈与反馈结合的控制方式,这样可以得到期望位移,而位移环为三步法来计算出期望电流值,电流环采用双 PI 控制,可以计算出电机电压。

三步控制以 PID 算法为基础,是基于模型的控制方法,可应用于线性和非线性系统,主要有三个控制部分:

(1) 稳态控制律,该控制来自于 Map 表,通过给定输入信号,等控制系统稳定以后获取到输出信号。Map 表标定出对应关系,在进行控制模型高驻场时,将当前测量值进行查表后获取到控制输出值。

(2) 参考动态前馈控制律,因为制助系统具有较强非线性特点,受到拟合参数摄动和外部扰动等因素的影响,只采用稳定控制律无法达到控制需要,实际应用中采用加前馈或反馈的补偿方式。

(3) 误差反馈控制律,由于存在建模误差和外部扰动等因素影响,只采用类稳态及参考动态前馈并不能有效达到控制需要,也不能保证具有良好的鲁棒性,为确保控制输出可以达到期望数值,通过提升控制系统鲁棒性来进行偏差调整,通过加入误差反馈环节来实现。类稳态和参考动态前馈可使参数远低于传统 PID,可有效提升系统鲁棒性。

为确保主动增压控制可以及时建压,需要通过弱磁控制的策略来实现对电机的转速、转矩的控制。电动机在电压和电流约束下达到一定转速并输出功率,主动增压要求电动机转速尽量大来缩短建压时间。转速超过额定转速时,电机感应电动势超过输入电压会突破系统限制,而电动机运行转速不可以超过额定转速,则需要通过弱磁控制电机高速运行。弱磁控制是通过减弱电子磁链来提升电动机运行速度,也可以给直轴负电流来进行弱磁,多采用给定直轴负电流来实现,工程实践中采用电压调节来进行控制。对电动机定子矢量电压进行控制,确保逆变器可以运行于最大电压,随着电机运行速度的增加,定子矢量电压也在不断变大,电压值大于直流母线电压时,电压调节器会发出控制电机弱磁 d 轴的负向命令,用于削弱气隙磁场来提升电动机转速,如果运行速度超过期望值,定子矢量电压会达到平衡状态,电动机会适当提升转速而达到期望值,矢量电压会达到平衡状态,电压调节原理如图 2 所示。

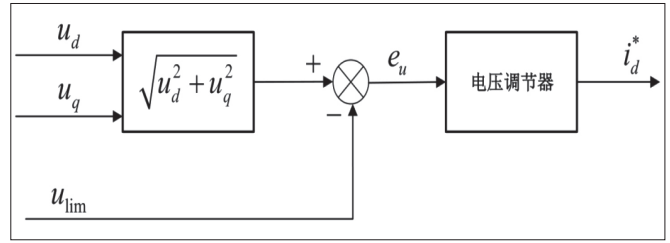


图2 弱磁控制原理图

电压调节器采用 PI 方式,计算出定子电压与直流母线电压差值后再用于控制 d 轴负向电流,通过弱磁控制和电流约束方式省去速度控制器,来对 d、q 轴进行电流约束,d 轴电流约束由具体情况确定,电机运行速度越大则约束值越小。为矢量控制方式,电动机运行速度低则位于恒转矩区域,弱磁并不能起到相应的作用,d 轴电流值为 0,可以不考虑耦合项也不需要补偿。而电动机运行速度快,电动机为恒功率区域,d 轴电流不等于 0,耦合项会对电流环产生一定程度的干扰,需要对该项进行补偿。

压力环控制是对主缸期望压力与实际压力差值进行计算来确定出电机位移值,由前馈和反馈两部分构成,具体如图 3 所示。

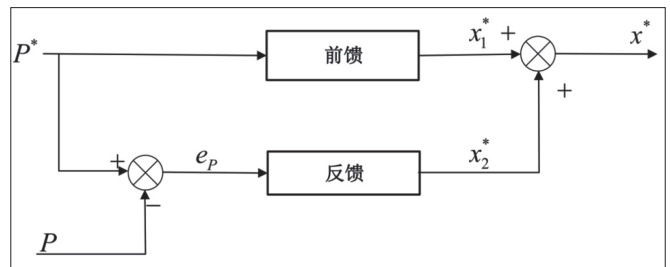


图3 压力环控制原理图

电动机期望位移值 \$x_1^*\$ 计算公式为:

$$x_1^* = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a(c - P^*)}}{2a} \quad (3)$$

式中: \$P^*\$—期望压力值。

不同运行速度条件下产生的参数摄动会产生一定的干扰,但控制对干扰具有鲁棒性,对压力环进行简化时将前馈微分项参数 \$d\$ 设置为 0。反馈为 PI 方式来获取到期望压力与实际压力差算得 \$x_2^*\$。为进一步提升压力环鲁棒性,可通过设置门限值来调整前馈与反馈,这样可以减小 PI 参数来降低反馈部分负担,反馈计算表达式为:

$$x_2^* = k_p(P^* - P) + k_i \int_0^t (P^* - P) dt \quad (4)$$

式中: \$P^*\$—期望压力值;

P —实际压力。

电动机期望位移值为:

$$x^* = x_1^* + x_2^* \quad (5)$$

3 控制策略验证与分析

3.1 仿真验证与分析

采用 Matlab 平台对主动增压控制进行仿真, 架构由液压制动、电动机、电子机械助力器和控制策略构成。控制策略有命令层和执行层, 命令层也就是压力环, 通过前馈和反馈构成, 计算 P^* 与 P 差值来计算出电动机位移值 x^* , 执行层是通过电位实际位移值与期望位移值差值进行控制, 为三步法控制思想。中层为三步法控制, 输入为电动机期望位移值 x^* 、实际位移值 x 、系统负载、系统摩擦, 通过类稳态控制、参考动态前馈控制和误差反馈控制, 计算出电动机 q 轴期望电流值 i_q^* 。底层采用永磁同步电机控制, 输入为电动机期望电流值 i_q^* 与实际值 i_q 、 i_d , 将 PI 电流控制和弱磁控制作为前提, 输出为 u_q 、 u_d , 进行坐标变换后得到电机模型。主动增压控制参数中, $k_{p_pre}=0.4$ 、 $k_{i_pre}=4$ 、 $k_0=455$ 、 $k_1=25.5$ 、 $k_2=0.45$ 、 $k_{p_fw}=0.3$ 、 $k_{i_fw}=1$, 为了对主动增压控有效性进行验证, 采用离线仿真来对不同工况条件下压力跟随情况进行评价。

3.1.1 阶跃工况

设置好连续阶跃期望值, 实际压力跟随情况主要是不同阶跃期望值压力信号条件下, 实际压力值可以更好地跟随期望值, 具有较好的响应速度、静压和超调量, 响应时间低于 0.3ms, 超调量低于 0.3MPa, 静压低于 0.2MPa。

3.1.2 斜坡工况

斜坡工况下的实际压力跟随。期望压力值于 0.5s 由 0MPa 不断提升至 10MPa, 持续时间为 0.5s, 再采用相同速度由 10MPa 降至 0MPa。整个跟随过程中, 实际压力值可以很好地跟随, 误差值比较低, 超调量不大于 0.5MPa, 精度控制精度不小于 95%。

3.1.3 正弦工况

在正弦工况条件下, 为确保期望压力值以正弦方式进行改变, 并获取到正数部分, 压力值为设置为 10MPa, 实际压力有着很好的跟随效果, 不存在明显的迟滞现象, 该跟随过程误差值不大于 0.3MPa。

3.2 硬件验证与分析

主动增压制动控制通过永磁同步电机来实现, 不再采用电动缸和力传感器器件, 控制算法由传感器提供主缸压力信号、电动机角度信号等, 从而计算出 PWM 脉冲信号, 再驱动电机来输出力矩。驱动器采用 RapidPro, 最大驱动电流为 30A, 压力最高可达到 5MPa, 响应时间较慢。在阶跃工况、斜坡工况和正弦工况下, 压力跟随效果较好。主缸压力可以准确跟随目标压力, 不存在较大的误差和明显的迟滞, 压力抖动误差不大于 0.1MPa, 部分地方实际压力值无法达到目标值, 整体压力跟随效果较好。三步法主动增压控制可以更为准确地对主缸压力进行控制, 具有很好的控制实时性。

4 结语

综上所述, 汽车电子机械助力制动系统采用主动增压控制, 要对液压负载特性进行分析, 结合不同速度条件下的特性来建立起方程。再根据主动增压的特性来对系统进行简化处理, 转动质量转变为平动质量, 通过建立等效方程来确定出控制策略, 确定出执行层和命令层, 对确定性给控制系统带来的影响进行分析。本文通过仿真试验和硬件试验对控制效果进行了验证, 表明控制具有较好的有效性和实时性。

参考文献:

- [1] 陆永结. 新能源汽车电子助力制动系统及新型踏板解耦控制探究[J]. 新型工业化, 2022, 12(02): 113-115.
- [2] 刘晓辉, 于良耀, 郑晟, 等. 基于电子助力器的冗余防抱死制动算法研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(01): 82-93.
- [3] 姜波波. 电动汽车制动系统现状及对策[J]. 南方农机, 2021, 52(24): 144-147.
- [4] 张洪生, 姜志伟. HEV 制动能量回收控制策略研究[J]. 重型汽车, 2021(06): 33-34.
- [5] 王晨. 纯电动汽车 EHB-电机复合制动系统控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [6] 张荣林. 面向智能汽车的线控制动系统主动制动控制与应用[D]. 长春: 吉林大学, 2021.