

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.03.022

基于 ISO 26262 标准的电控柴油机 扭矩监控策略研究*

赵俊鹏,周文华*,梁 恒

(浙江大学 能源工程学系,浙江 杭州 310027)

摘要: 为了有效限制发动机功能失效时的扭矩输出以使车辆处于安全状态,通过对 ISO26262 道路车辆功能安全标准中产品研发流程的研究,对发动机扭矩增加进行了危险分析和风险评估,设定了其安全目标,并设计了扭矩监控策略。采用 Matlab/Simulink 工具链,根据发动机的喷油控制值、轨压和转速建立了实际扭矩计算模型,并根据加速踏板位置和发动机转速冗余信号建立了安全限制扭矩计算模型,用于监控和限制发动机的扭矩输出。模型离线仿真结果及台架试验结果表明,发动机加速的过程中实际扭矩与输出扭矩基本一致,扭矩限制模块故障时该控制策略能准确识别非驾驶员需求的扭矩增加,触发 ICO 并将发动机设置为跛行回家模式,能准确计算和限制发动机的输出扭矩,满足扭矩的功能安全需求。

关键词: ISO26262; 功能安全; 扭矩监控; 扭矩限制; 柴油机

中图分类号: TH39; TP273; U463; TK421.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)03-0367-06

Diesel torque monitoring strategy based on ISO 26262

ZHAO Jun-peng, ZHOU Wen-hua, LIANG Heng

(Department of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to effectively limit the torque output of engine in function failure condition, the hazard analysis and risk assessment on diesel engine torque increase were carried out, and the safety goals were set, through the research on the product development process in ISO/DIS 26262. The actual torque calculation model based on the fuel injection control value, rail pressure and engine speed was designed to monitor the output torque, and the permitted torque calculation model was designed according to accelerator pedal position and engine speed redundant signals to limit the output torque, using Matlab/Simulink toolset. The model off-line simulation and bench test results indicate that the calculated actual torque is basically consistent with the output torque during the acceleration process of the engine, the non-driver demand torque increase is identified accurately during the failure of torque limitation module, then the injection cut off (ICO) is triggered and the engine is set to limp home. The output torque calculation and limitation accuracy can meet the functional safety requirement of engine torque.

Key words: ISO26262; functional safety; torque monitoring; torque limitation; diesel

0 引 言

安全是汽车研发中的关键要素之一,随着汽车电子在汽车设计中的应用越来越广泛,汽车电子产品的系统失效、部件失效等安全问题日益严峻,如何避免功能失效引发人身伤害事故或将危险事故发生的可能降

到可接受的程度成为汽车系统设计的一大挑战^[1-2]。为了有效限制发动机功能失效时的扭矩输出以使车辆处于安全状态,在车辆行驶过程中需对发动机的输出扭矩进行监控和限制,因此扭矩监控算法是提高车辆安全性的关键技术之一。

本研究通过 ISO 26262 道路车辆功能安全标准在

收稿日期:2013-12-04

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2011BAE22B05)

作者简介:赵俊鹏(1988-),男,河南许昌人,主要从事发动机电子控制技术方面的研究。E-mail:zhaojunpeng1988@126.com

通信联系人:周文华,男,副教授,硕士生导师。E-mail:zhouwh999@126.com

概念阶段分析可能存在的安全风险并设定安全目标,确定产品研发中每个项目元素的功能安全需求;在产品研发过程中采用满足技术安全规范的 V 模型,并提供满足功能安全需求的有效措施。本研究基于 ISO 26262 标准对发动机扭矩输出进行分析,在基于模型的开发模式下,利用 Matlab/ Simulink 工具完成发动机实际扭矩和安全限制扭矩比较监控策略的开发,并通过 RTW Embedded Coder 工具箱实现模型自动代码生成并编译下载到控制器^[3],该监控策略能准确识别到非驾驶员需求的扭矩增加,并有效限制发动机的扭矩输出,能够保证车辆处于安全状态。

1 扭矩监控策略的概念设计

1.1 ISO 26262 标准内容简介

ISO 26262 是从电子、电气及可编程控制器功能安全标准 IEC 61508 派生出来的,主要定位在汽车行业中特定的电气器件、电子设备、可编程电子器件等专门用于汽车领域的器件,旨在提高汽车电子、电气产品功能安全的国际标准^[4]。其主要提供了汽车生命周期(管理、研发、生产、运行、服务、拆解)和生命周期中必要的改装活动;提供了决定风险等级的具体风险评估方法(汽车安全综合等级 ASILs);通过使用 ASILs 方法来确定获得可接受的残余风险的必要安全需求;提供了确保获得足够的和可接受的安全等级的有效性和确定性措施。

ISO 26262 分别从概念阶段、产品研发和开始生产以后 3 个方面对产品的整个生命周期进行了规范和要求,从而使得产品在各个生命周期都比较完善地考虑了其安全功能,产品研发流程如图 1 所示。

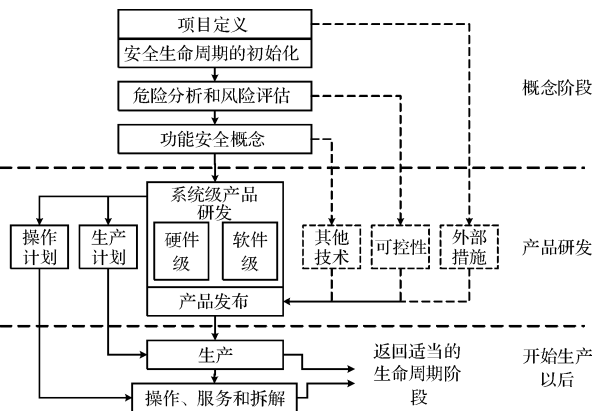


图 1 ISO 26262 产品研发流程

1.2 功能安全需求分析及安全目标设定

柴油发动机扭矩传递路径如图 2 所示,喷油系统喷射的燃油经发动机系统转化为扭矩,然后经传动系

统输出到车轮^[5]。基于扭矩的控制算法除了需要考虑保证发动机正常运转的扭矩外,还需要考虑各种附件(如空调、交流发电机等)的额外扭矩以及各种扭矩限制等^[6-7],基于扭矩的控制策略流程图如图 3 所示。其分为两部分:一部分是指示扭矩计算;另一部分是指示扭矩的输出。需求扭矩包括汽车上所有动力装置的扭矩需求,这些需求通过 CAN 总线传给发动机 ECU 或者由 ECU 根据传感器信号计算获得,ECU 对所有这些需求扭矩进行协调,并计算当前发动机工况下的发动机损失扭矩,得到发动机需要输出的总扭矩即指示扭矩。第 2 部分是具体的执行器输出,对于柴油发动机就是要转变成喷油控制信号。

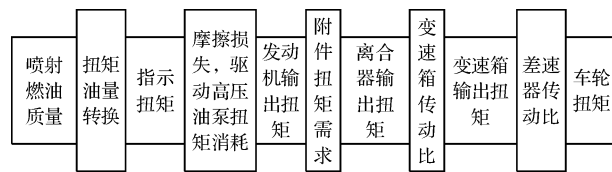


图 2 发动机扭矩传递路径

需求扭矩直接影响供油系统的喷油控制值,最终影响了发动机的输出扭矩大小。根据 ISO 26262 标准中的 ASILs 方法对非驾驶员需求的扭矩增加进行危险分析和风险评估如下:非驾驶员需求的扭矩增加可能对驾驶员或其他交通参与人员造成危及生命的伤害或致命伤害,故设定严重性等级为 S3;在操作条件下暴露于危险中的可能性低,设定可能性等级为 E2;当该风险发生时,驾驶员可以采取急收油门和紧急制动等措施避免伤害,其可控性为正常可控,故设定可控性等级为 C2。根据以上 3 个参数的分级,查 ASIL 等级表可得非驾驶员需求的扭矩增加相应的 ASIL 等级为 A^[8-10]。

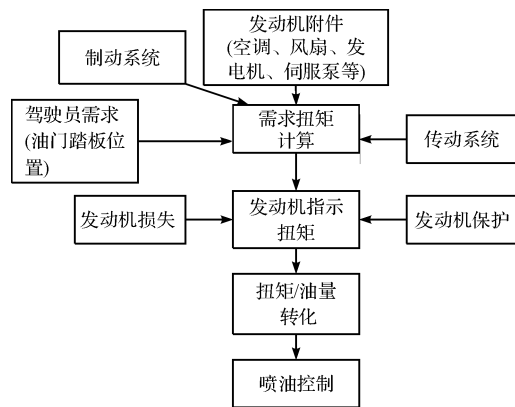


图 3 基于扭矩的控制策略流程图

根据以上分析,本研究设定扭矩输出的安全目标为限制发动机的输出扭矩小于相应工况下的安全限制扭矩。笔者将该安全目标分配到软件级产品研发,需

要设计发动机输出扭矩的监控策略,用于监控发动机输出扭矩,并与该工况下的安全限制扭矩比较,根据比较结果做出相应的响应。

2 扭矩监控策略

在基于扭矩的发动机控制策略中,通过大量的实验结合一定的试验方法学建立发动机的转速、轨压和喷油控制与输出扭矩间的关系^[11],通过扭矩油量转换将计算所得的需求扭矩转换为喷油控制信号,即喷射类型、喷油始点和喷油持续时间,以控制发动机的扭矩输出。扭矩监控策略则根据喷射类型、喷油始点和喷油持续时间等控制值逆向计算发动机的输出扭矩,整体方案流程图如图 4 所示。

该方案根据加速踏板位置和发动机转速冗余信号等计算安全限制扭矩,与发动机扭矩控制策略中的系统性能限制扭矩进行比较,在两者中取最小值,用于限制需求扭矩小于安全限制扭矩;同时将实际扭矩和安全限制扭矩比较,根据比较结果作出相应的响应,以使车辆处于安全状态。因此,安全限制扭矩和实际扭矩的计算模型是扭矩监控策略的核心,下面将进行详细说明。

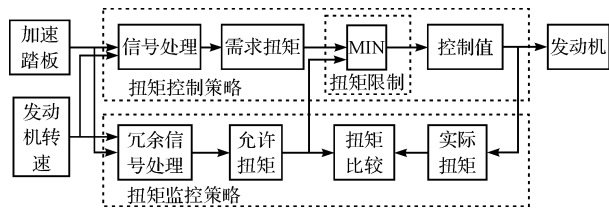


图 4 扭矩监控策略整体方案流程图

2.1 安全限制扭矩的计算模型

安全限制扭矩的计算是根据当前工况下的驾驶员需求扭矩、发动机及传动系统扭矩损失和外部扭矩需求等计算允许输出的发动机指示扭矩,计算流程如图 5 所示。车轮扭矩包括系统根据加速踏板位置和发动机转速冗余信号计算所得的驾驶员需求扭矩与驾驶员辅助系统消耗扭矩,同时考虑附件及传动系统损失扭矩和外部扭矩需求,通过协调扭矩需求和计算附件补偿获得离合器扭矩和用于计算指示扭矩的附件损失扭矩。系统根据离合器扭矩、车辆附件损失扭矩、发动机损失扭矩以及调速器和主动阻尼器协调扭矩需求,获得当前工况下发动机允许输出的指示扭矩,即安全限制扭矩。

计算所得的安全限制扭矩用于扭矩限制和扭矩比较。在扭矩限制中,当扭矩控制策略中计算所得的需求扭矩大于安全限制扭矩时,本研究采用安全限制扭矩进行扭矩油量转换获得油量控制值,从而限制发动

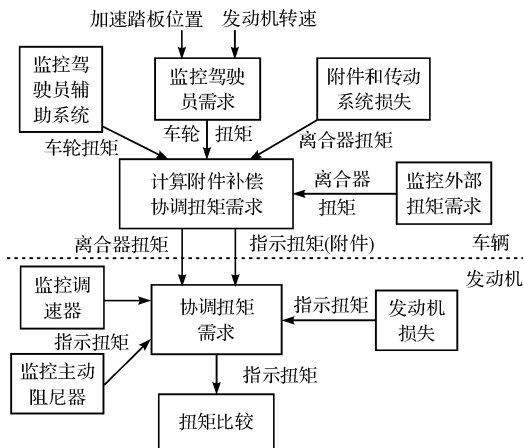


图 5 安全限制扭矩计算流程图

机的扭矩输出,达到保护驾驶员安全的目的。

2.2 实际扭矩的计算模型

实际扭矩的计算是基于扭矩的发动机喷油控制值计算的逆过程,计算流程如图 6 所示。系统根据喷油控制值、轨压和转速计算燃油质量,并对燃油质量进行修正;然后对燃油质量进行轨压波动修正;根据运行模式计算与扭矩相关的燃油质量;最后根据扭矩相关的燃油质量计算发动机的指示扭矩,即实际扭矩。

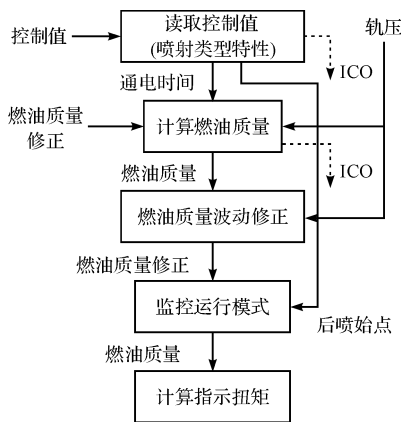


图 6 实际扭矩计算流程图

具体计算过程如下:

首先,系统与发动机转速同步读取扭矩控制策略中的喷油控制值,并根据喷射类型判断喷油始点是否合理,如果不合理则可能造成非驾驶员需求的扭矩增加,通过触发 ICO 设置发动机为“跛行回家”能有效限制发动机的扭矩输出,使车辆处于安全状态。

然后,系统根据喷射时间和当前轨压查燃油体积 MAP 图得到喷射燃油体积,并对其进行修正(包括油量调整和零油量自学习修正等,修正前对零油量标定值进行合理性校验,即将标定值与轨压相关的特性曲线进行比较,如果不合理则喷油量有可能偏大,造成非驾驶员需求的扭矩增加,此时延时触发 ICO,以限制扭

矩的增加,使车辆处于安全状态),以标准的燃油密度作为应用参数,计算得到燃油质量。

此外,该计算模型还对燃油质量进行了轨压波动修正,主要对先导喷射 Pi1、预喷射 Pi2 和主喷射 MI1 的喷射燃油质量进行压力波动修正。修正燃油质量与共轨压力 p 、喷射燃油质量 q 和上一次喷射的间隔相关。

对运行模式监控的目的是确定每次喷射与扭矩的相关性,从而计算与扭矩相关的燃油质量,计算模型如图 7 所示。远后喷射 Pol1 与扭矩不相关,先导喷射 Pi1、预喷射 Pi2 和主喷射 MI1 与扭矩 100% 相关,后喷射 Pol2 的效率与喷射时间、后喷射与主喷射的时间间隔、后喷射始点和喷射燃油质量、共轨压力相关。后

喷射始点对后喷射效率的影响因子根据发动机转速 MoFESpd_nEng 和后喷射始点 MoFInjDat_phiPol2 查 MAP 得到;后喷射燃油质量 MoFQntCor_qPol2 对后喷射效率的影响因子通过查表得到;后喷射与主喷射的时间间隔 MoFMode_tiMI1Pol2 对后喷射效率的影响因子根据该时间间隔和主喷射燃油质量 MoFQntCor_qMI1 查 MAP 得到;共轨压力 MoFRailP_p 对后喷射效率的影响因子通过查表得到;这 4 个影响因子乘积即为后喷射的效率因子 MoFMode_facPol2Eff_mp。经燃油质量修正和轨压波动修正后的先导喷射 Pi1、预喷射 Pi2 和主喷射 MI1 燃油质量,加后喷射 Pol2 燃油质量与其效率因子的乘积,得到与扭矩相关的喷射燃油质量 MoFMode_qSetUnBal,用于计算发动机指示扭矩。

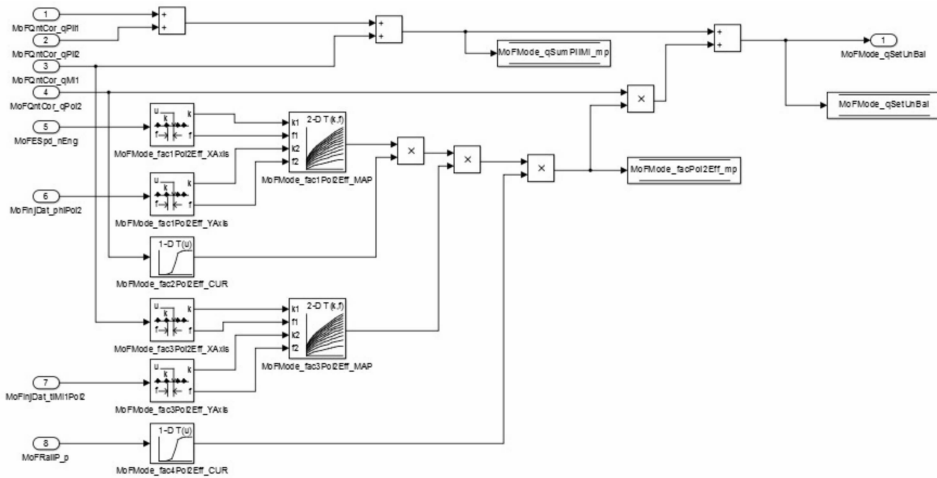


图 7 基于运行模式的扭矩相关燃油质量计算结构图

最后,系统根据发动机转速和扭矩相关的喷射燃油质量查扭矩油量转换 MAP 图得到发动机的指示扭矩,即发动机的实际扭矩。

本研究采用 Matlab/Simulink 工具完成上述扭矩监控策略的建模,在快速原型阶段监控策略采用浮点运算,然后通过 Matlab/Fixed Point 工具箱进行数据定标,将浮点运算转化为目标 ECU 支持的定点运算,由于缺少第三方工具的支持,本研究利用 RTW Embedded Corder 工具箱实现自动代码生成,最后在集成编译环境中完成编译链接并下载到目标 ECU 以验证扭矩监控策略。

3 模型仿真及试验验证

为验证扭矩监控策略中实际扭矩计算的准确性和扭矩限制的有效性,本研究进行了模型仿真,并在发动机试验台架上进行了相关试验验证,该试验过程采用德国 Vector 公司的 CANape 标定软件建立监控和标定平台。试验用柴油机型号为 4F20TCI,型式为直列、增

压中冷,缸径为 84 mm,活塞行程为 90 mm,排量为 1.995 L,标定功率为 75 kW(3 600 r/min),标定扭矩为 223 N·m(2 500 r/min)。

3.1 模型仿真

开发过程中,在模型建立完之后,本研究根据由实验室多年的台架试验数据所制成的 MAP 图,提取该控制策略所需要的数据填入到模型中。同时结合发动机实际工作状况和建立完成的控制模型,近似给出输入量模拟信号,通过 Simulink 离线仿真功能,可得出安全限制扭矩和实际扭矩信号。发动机转速上升过程中的实际扭矩和安全限制扭矩仿真结果如图 8 所示。

3.2 实际扭矩计算

发动机转速从稳定怠速转速 800 r/min 上升到 1 700 r/min、2 300 r/min、3 100 r/min 和 3 850 r/min 时实际扭矩与输出扭矩曲线如图 9 所示,发动机的输出扭矩通过电涡流测功器测得。在发动机转速上升的过程中,需求扭矩增加;发动机转速稳定以后,需求扭矩

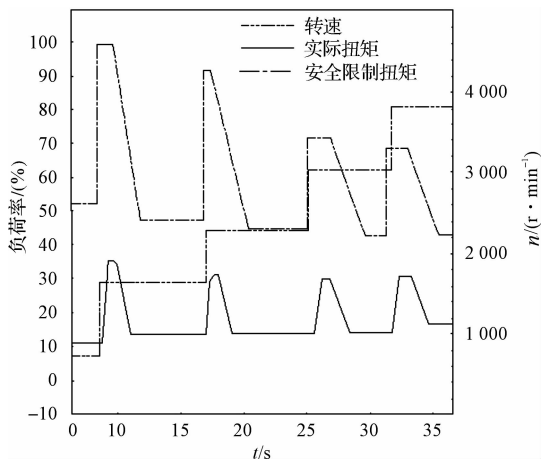


图8 加速过程中的实际扭矩与安全限制扭矩仿真

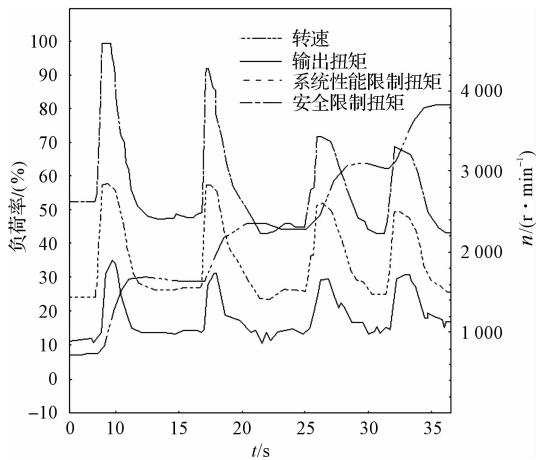


图10 加速过程中的扭矩限制曲线

稳定,此时发动机负荷率为13.5%。实际扭矩比输出扭矩偏小,这可能是扭矩损失、计算模型和标定参数造成的,而这些误差是可以接受的。

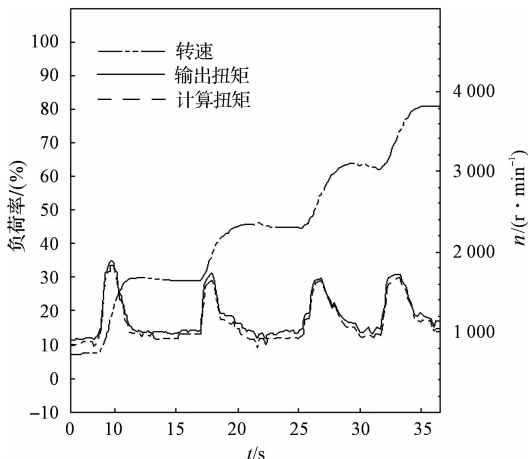


图9 加速过程中的实际扭矩与输出扭矩曲线

3.3 扭矩限制

发动机的扭矩限制包括扭矩控制策略中的系统性能限制扭矩和扭矩监控策略中的安全限制扭矩。系统性能限制扭矩为系统故障扭矩、发动机突增限制扭矩、机械保护扭矩和车辆性能限制扭矩四者中的最小值,当出现系统故障时用于协调发动机的指示扭矩限制。在发动机试验台架上,发动机从稳定怠速800 r/min逐步加速到1700 r/min、2300 r/min、3100 r/min和3850 r/min过程中的系统性能限制扭矩、安全限制扭矩和输出扭矩曲线如图10所示。从图10中可以看出,安全限制扭矩大于系统性能限制扭矩,在发动机正常运行的过程中其输出扭矩小于系统性能限制扭矩,安全限制扭矩能有效地限制发动机的最大输出扭矩。

3.4 故障响应

为了模拟扭矩限制失效的故障,在发动机转速由

2300 r/min加速到3100 r/min的过程中,本研究通过CANape标定系统手动设置需求扭矩为167 N·m,大于该工况下的安全限制扭矩156 N·m。试验结果如图11所示,当输出扭矩大于安全限制扭矩时,系统输出扭矩急剧下降,此后维持负荷率10%和转速1100 r/min,即跛行回家设定的工况。分析结果表明当实际扭矩大于安全限制扭矩时,系统触发ICO并将其设置为跛行回家模式,扭矩监控策略能有效限制发动机的扭矩输出,满足扭矩的功能安全需求。

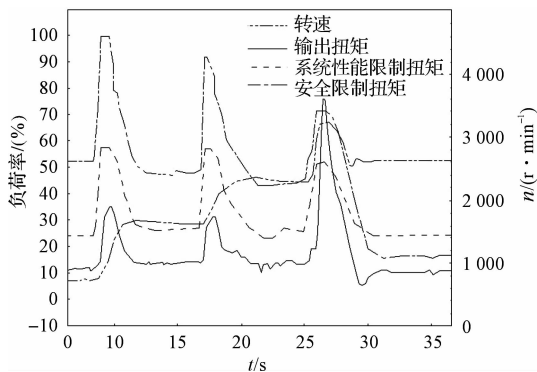


图11 扭矩限制故障时的扭矩限制曲线

4 结束语

本研究针对ISO 26262道路车辆功能安全标准的要求,对发动机的输出扭矩进行危险分析和风险评估,并设定其安全目标;采用Matlab/Simulink及RTW Embedded Coder工具箱完成发动机输出扭矩和需求扭矩比较监控策略建模及代码自动生成。

研究表明:该扭矩监控策略能准确识别非驾驶员需求的扭矩增加并限制发动机的扭矩输出,实现设定的安全目标。由于试验条件的限制,该扭矩监控策略针对发动机和传动系统进行了标定和验证,还需对驾驶员辅助系统和附件等车辆相关的扭矩需求进行

标定和试验验证,以完善扭矩监控策略,这是下一步的研究重点。

参考文献 (References):

- [1] SCHUBOTZ H. Integrated safety planning according to ISO 26262[N]. SAE 2009-01-0755,2009.
- [2] 还宏生. 汽车设计中的安全要求及 ISO 26262 标准[J]. 汽车零部件,2012(10):41-43.
- [3] URSU C, BHAT, DAMODARAN R. Simulink Modeling for Vehicle Simulator Design[N]. SAE 2011-01-0746,2011.
- [4] ISO/FDIS std 26262-3, Road vehicles-Functional safety-Part3: Concept phase[S]. New York: International Organization for Standardization,2011.
- [5] 边晓婷. 高压共轨柴油机控制策略的研究[D]. 济南:山东大学能源与动力工程学院,2012.
- [6] 刘巨江. 基于模型的高压共轨柴油机扭矩算法研究[D].

杭州:浙江大学能源工程学院,2007.

- [7] HE Lin, LI Liang, YU Liang-yao, et al. A torque-based nonlinear predictive control approach of automotive powertrain by iterative optimization[J]. **Journal of Automobile Engineering**,2012,226(8):1016-1025.
- [8] 刘佳熙,郭 辉,李 君. 汽车电子电气系统的功能安全标准 ISO26262[J]. 上海汽车,2011(10):57-61.
- [9] 郭肖鹏,刘 飞,熊 璐,等. ISO 26262 标准下永磁同步电机故障对整车安全性的影响分析[J]. 汽车技术,2013(2):13-18.
- [10] CHRISTIAENS S, OGRZEWALLA J, PISCHINGER S. Functional safety for hybrid and electric vehicles [N]. SAE, 2012-01-0032,2012.
- [11] LIVSHIZ M, KAO Ming-hui, WILL N. Calibration Process of Powertrain Model for Engine Torque Control Development[N]. SAE, 2004-01-0902,2004.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

赵俊鹏,周文华,梁 恒. 基于 ISO 26262 标准的电控柴油机扭矩监控策略研究[J]. 机电工程,2014,31(3):367-372.

ZHAO Jun-peng, ZHOU Wen-hua, LIANG Heng. Diesel torque monitoring strategy based on ISO 26262[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(3):367-372.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 360 页)

4 结束语

该综合测试台设计实用可靠,且兼顾了设计成本与测试效率。试验台架的设计具有可扩展性,且试验台新增多路阀某些特殊性能的检测,有助于对新开发研制的多路阀产品进行全面检测认证;通过位移、力等传感器的合理运用,改善了原有测试系统人为获取试验数据存在较大误差这一现象,同时为自动化控制提供了良好的技术支持。

参考文献 (References):

- [1] 曾定荣. 多路阀综合试验台系统设计及试验研究[D]. 杭州:浙江大学机械工程学院,2010.
- [2] 全国液压气动标准化技术委员会. JB/T8729. 1-1998 液压多路换向阀技术条件[S]. 北京:中国标准出版社,1998.
- [3] 全国液压气动标准化技术委员会. JB/T8729. 2-1998 液压多路换向阀试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,1998.

- [4] 张圣峰,徐 兵,刘 伟,等. LUDV 多路阀中节流阀的仿真分析[J]. 机电工程,2011,28(9):1036-1039.
- [5] 张勤辉. 液压综合实验台的研究与开发[J]. 煤矿机械,2010,31(2):119-122.
- [6] 雷天觉. 新编液压工程手册[M]. 北京:北京理工大学出版社,1998.
- [7] 曾亿山,李文新,夏永胜. 液压缸综合性能检测试验台液压系统的研究开发[J]. 煤矿机械,2008,29(8):97-99.
- [8] 张利斌,赵 强,姚继英. 装药设备液压系统的维护方法[J]. 兵工自动化,2013,32(1):48-51.
- [9] 陈建长,王福山,孟祥富,等. 液压多路换向阀试验过程工作油口控制[J]. 工程机械,2010,41(10):53-56.
- [10] XU Bing, LIU Ying-jie, YANG Hua-yong. Simulation study of the novel valve arrangement used in hydraulic control system[C]// The Sixth International Fluid Power Conference, Dresden, Germany,2008, Workshop, Group B,2008:139-14.
- [11] 严继东,张 凤,牟吉平. 多功能综合液压试验台的研制与开发[J]. 流体传动与控制,2005,10(3):16-18.

[编辑:洪炜娜]