

柴油机燃油系统电液复合调速器动态特性 数学建模

曲志林¹,赵永超²,杨军¹,白云^{3*}

1. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061; 2. 潍柴重机股份有限公司, 山东 潍坊 261108;

3. 燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066000

摘要:为提高柴油机在负载变化时的转速稳定性及工作效率,针对某柴油机燃油系统电液复合调速器的动态特性进行数学建模;将电液复合调速器组成划分为机械调速部分、气动调速部分、动力输出油缸部分、缓冲活塞和喷嘴挡扳阀部分,分析其工作原理;根据各部分具体受力分别对五大部分的关键部件建立数学模型,分别得到该电液复合调速器传动部分、调速系统 Y_1 和调速系统 Y_2 的传递函数方框图,为电液复合调速器的性能分析和设计开发提供理论参考。

关键词:柴油机;燃油系统;电液复合调速器;数学建模;方框图

中图分类号:TK421.4

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)01-0038-07

引用格式:曲志林,赵永超,杨军,等. 柴油机燃油系统电液复合调速器动态特性数学建模[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(1): 38-44.

QU Zhilin, ZHAO Yongchao, YANG Jun, et al. Dynamic characteristics mathematical modeling of electro-hydraulic compound governor of fuel system for diesel engines [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(1): 38-44.

0 引言

柴油机作为大型运输设备的动力系统,具有良好的动力性和经济性^[1-3],在交通运输行业具有不可或缺的地位^[4-5]。但柴油机在实际工作时,受到负载变化的影响,转速会发生突发性的变化,严重影响柴油机性能,降低其工作效率^[6-7]。快速且有效地保证柴油机工作时转速的稳定性是柴油机在交通运输行业应用中亟需解决的问题^[8-10]。柴油机燃油系统电液复合调速器可以根据柴油机的工作状态精确控制柴油机的燃油喷射时间和喷射量,从而控制柴油机转速,确保柴油机在各种工况下都能高效、稳定地运行。Nanaware 等^[11]利用 Simulink 建立了水轮机调速器系统模型,研究了受负荷变化等干扰时发电机调节系统的动态响应性。Yao 等^[12]建立 UG-25+调速器的数学模型,分析了伺服阀的阻尼比、固有频率等主要参数对调速系统动态特性的影响。黄庆宏等^[13]针对 PG-PL 调速器建立动态方程并分析了其动态特性。陈坚^[14]根据调速器的工作原理和轮机模拟器训练目的,建立 UG-8 调速器的数学模型,将仿真结果与台架试验进行对比,验证了该模型可用于分析和预测柴油机调速器在不同工况下的稳态和动态性能。

现有研究多是基于机械式调速器和电子调速器,鲜有针对电液复合调速器动态特性进行的数学建

收稿日期:2025-01-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52271334);河北省自然科学基金项目(E2024203088)

第一作者简介:曲志林(1992—),男,山东省莱州人,工学硕士,工程师,主要研究方向为柴油机燃料喷射技术,E-mail:nws1001@sina.cn。

* 通信作者简介:白云(1987—),男,满族,哈尔滨人,工学博士,副教授,博士生导师,主要研究方向为发动机燃料喷射技术,E-mail:baiyun@ysu.edu.cn。

模。本文中针对目前最先进的电液复合调速器,基于电液复合调速器工作原理,建立其关键部件的数学模型和传递函数方框图,为电液复合调速器动态特性分析以及设计开发提供理论参考。

1 电液复合调速器组成及工作原理

某电液复合调速器主要由手动调速模块、气动调速模块、喷嘴挡板阀模块、机械调速模块、缓冲活塞模块、动力输出油缸模块及各杠杆组成,如图1所示。电液复合调速器在工作时,由柴油机转轴驱动机械调速模块运转,液压泵分别将油液输送至喷嘴挡板阀和气动调速模块,喷嘴挡板阀的油液流入机械调速部分控制先导阀柱塞。缓冲活塞通过动态补偿机制对先导阀柱塞位置进行闭环修正并联动控制动力输出油缸。动力输出油缸调节机械调速部分的调速弹簧并控制喷嘴挡板阀的油压平衡状态。气动调速模块和手动调速模块协同控制机械调速部分的速度设置活塞,形成多级协调机制。整套系统通过机械-液压-气动三者的复合反馈控制网络,实现对柴油机转速的动态补偿与稳态保持,确保不同工况下动力输出的稳定性与响应精度。

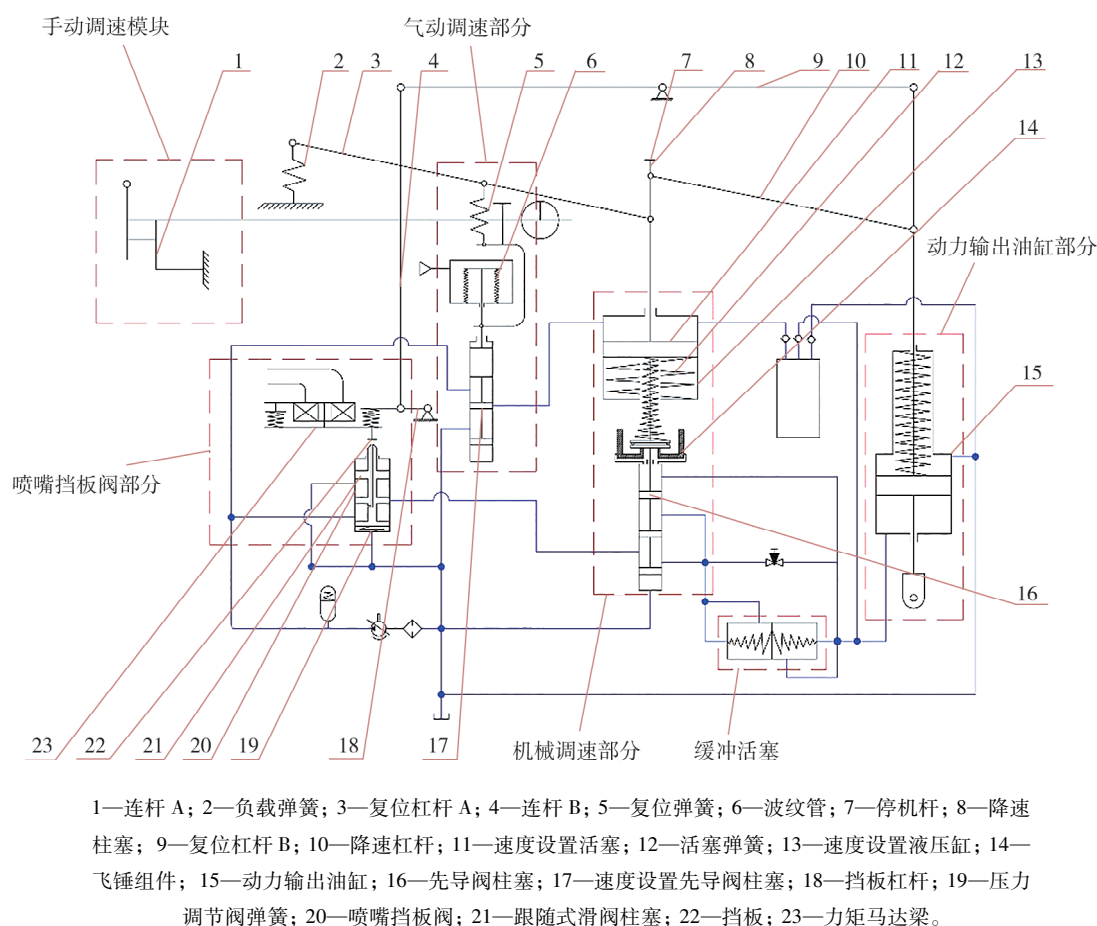


图1 某电液复合调速器结构组成意图

2 电液复合调速器关键部件数学模型

分析机械调速模块、气动调速模块、动力输出油缸模块、缓冲活塞模块和喷嘴挡板阀模块的受力情况,建立关键部件的数学模型。

2.1 机械调速模块

机械调速模块包括速度设置活塞、飞锤组件和先导阀柱塞。根据各部件受力状态,速度设置活塞的

动态方程为:

$$F''_{10} = m_7 g + \Delta_{p2} A_4 - F'_9 - F'_{15} - m_7 \frac{d^2 \Delta_{z3}}{dt^2} - F'_{s1} - B_g \frac{d\Delta_{z3}}{dt}, \quad (1)$$

式中: F''_{10} 为复位杠杆 A 对速度设置活塞的作用力, m_7 为速度设置活塞的质量, g 为自由落体加速度, Δ_{p2} 为速度设置活塞下端液压油压力的变化, A_4 为速度设置活塞上端液压油作用面积, F'_9 为活塞弹簧弹力, F'_{15} 为降速柱塞对速度设置活塞的反作用力, Δ_{z3} 为非平衡位置时速度设置活塞向下的位移, F'_{s1} 为降速柱塞对速度设置活塞的摩擦力, B_g 为速度设置活塞黏性阻尼系数, t 为时间。

与速度设置活塞相连的复位杠杆 A 的动态方程为:

$$F_{13} L_7 \cos \alpha_2 = -m_5 g L_9 \cos \alpha_2 - F_{12} L_6 \cos \alpha_2 + F_{10} L_5 \cos \alpha_2, \quad (2)$$

式中: F_{13} 为负载弹簧对复位杠杆 A 的弹力, L_7 为负载弹簧沿复位杠杆 A 方向到复位杠杆 A 与可调枢轴支架接触处的距离, α_2 为复位杠杆 A 与水平方向的夹角, m_5 为复位杠杆 A 的质量, L_9 为复位杠杆 A 的重心沿复位杠杆 A 方向到复位杠杆 A 与可调枢轴支架接触处的距离, F_{12} 为复位弹簧对复位杠杆 A 的弹力, L_6 为可调枢轴与复位杠杆 A 接触点到复位弹簧的距离, F_{10} 为速度设置活塞对复位杠杆 A 右端的力, L_5 为可调枢轴与复位杠杆 A 接触点到复位杠杆 A 右端的距离。

飞锤对推力轴承的支持力

$$F_7 = \frac{\omega^2}{r_0 \cos \alpha} [(J_x - J_y) \sin 2\alpha + 2J_{xy} \cos 2\alpha + 2m_0 r_0 (y_c \cos \alpha - x_c \sin \alpha)], \quad (3)$$

式中: ω 为飞锤转动角速度, r_0 为飞锤支点和回转轴的距离, α 为飞锤转动角度, J_x 为飞锤对 x 轴的转动惯量, J_y 为飞锤对 y 轴的转动惯量, J_{xy} 为飞锤的离心转动惯量, m_0 为飞锤的质量, y_c 为飞锤重心到 x 轴的距离, x_c 为飞锤重心到 y 轴的距离。

先导阀柱塞向上的位移 $\Delta_{z1} \approx r_0 \sin \alpha$, 由此推导可得:

$$\Delta_{z1} = \frac{\omega^2 \sin \alpha [(J_x - J_y) \sin 2\alpha + 2J_{xy} \cos 2\alpha]}{F_7 \cos \alpha - 2m_0 \omega^2 (y_c \cos \alpha - x_c \sin \alpha)}. \quad (4)$$

2.2 气动调速模块

根据气动调速模块受力情况, 气动调速模块的动态方程为:

$$\Delta_p A_p = k_r (\Delta_{s1} + \Delta_{z5}) + k_p \Delta_{s1} - m_{11} g + m_{11} \frac{d^2 \Delta_{s1}}{dt^2} + B_1 \frac{d\Delta_{s1}}{dt}, \quad (5)$$

式中: Δ_p 为波纹管上的气压变化, A_p 为波纹管面积, k_r 为复位弹簧的刚度, Δ_{s1} 为速度设置先导阀柱塞的位移变化, Δ_{z5} 为复位弹簧处复位杠杆 A 的位移变化, k_p 为波纹管的刚度, m_{11} 为气动调速模块的总质量, B_1 为速度设置先导阀柱塞的黏性阻尼系数。

2.3 动力输出油缸模块

动力输出油缸模块包括动力输出油缸、与动力输出油缸相连的降速拉杆和复位杠杆 B, 根据各部件受力情况, 动力输出油缸的动态方程为:

$$F'_4 = F_L - m_1 \frac{d^2 \Delta_z}{dt^2} - B_c \frac{d\Delta_z}{dt} + \Delta_{p1} A_s - F_1 - m_1 g - F_2, \quad (6)$$

式中: F'_4 为复位杠杆 B 作用于尾杆的力, 竖直向下; F_L 为外界负载力; m_1 为动力活塞与活塞杆的总质量; Δ_z 为动力活塞的位移; B_c 为动力活塞的黏性阻尼系数; Δ_{p1} 为动力活塞下模块液压油的压力变化; A_s 为动力活塞作用面积; F_1 为动力活塞上模块弹簧对活塞的弹力, $F_1 = k_1 \Delta_z$, 其中, k_1 为动力活塞上部弹簧刚度; F_2 为降速拉杆作用于尾杆的力, 假设竖直向下。

与动力输出油缸相连的降速拉杆的动态方程为:

$$F'_2 L_4 \cos \alpha_1 = -F'_{14} L_3 \cos \alpha_1 + m_4 g L_8 \cos \alpha_1, \quad (7)$$

式中: F'_2 为尾杆对降速拉杆右端的力, L_4 为降速拉杆的长度, α_1 为降速拉杆与水平方向的夹角, F'_{14} 为降速柱塞对降速凸轮的力, L_3 为降速拉杆左端与降速凸轮连接处到降速凸轮右端的距离, m_4 为降速拉杆与降

速凸轮的总质量, L_8 为降速拉杆左端与降速凸轮连接处沿降速拉杆方向到降速拉杆与降速凸轮整体重心的距离。

与动力输出油缸相连的降速拉杆和复位杠杆 B 的动态方程为:

$$F_4 b - F_5 a - m_8 g \left(\frac{a+b}{2} - a \right) = 0, \quad (8)$$

式中: F_4 为复位杠杆 B 右端连接处受力, 竖直向上; F_5 为复位杠杆 B 左端连接处受力, 竖直向上; m_8 为复位杠杆 B 的质量; a 为复位杠杆 B 左端到固定铰支座的距离; b 为复位杠杆 B 右端到固定铰支座的距离。

2.4 缓冲活塞模块

根据缓冲活塞受力情况, 得到缓冲活塞的动态方程为:

$$k_B \Delta_y = (\Delta_{p_B} - \Delta_{p_A}) A_B - m_3 \frac{d^2 \Delta_y}{dt^2} - B_f \frac{d\Delta_y}{dt}, \quad (9)$$

式中: k_B 为缓冲活塞两侧弹簧的总刚度, Δ_y 为缓冲活塞的位移变化, Δ_{p_A} 为油管 A 的油压变化, Δ_{p_B} 为油管 B 的油压变化, A_B 为缓冲活塞的面积, m_3 为缓冲活塞质量, B_f 为缓冲活塞黏性阻尼系数。

2.5 喷嘴挡板阀模块

喷嘴挡板阀模块包括力矩马达梁、喷嘴挡板阀以及与挡板相连的挡板杠杆和连杆 B。根据各部件受力情况, 力矩马达梁的动态方程为:

$$F_6 f - F_s e + F_Q l - F_3' f = 0, \quad (10)$$

式中: F_6 为力矩马达梁左端弹簧弹力, $F_6 = k_4 \Delta_s$, 其中, k_4 为力矩马达梁左端弹簧刚度, Δ_s 为力矩马达梁的位移; F_s 为力矩马达梁受到的电磁力; F_Q 为喷嘴处液压油对挡板的冲击力; F_3' 为力矩马达梁右端弹簧弹力; f 为电磁铁与力矩马达梁连接点至力矩马达梁左、右端的距离; e 为电磁铁与力矩马达梁连接点至电磁力合力的距离; l 为电磁铁与力矩马达梁连接点至喷嘴冲击力的距离。

喷嘴挡板阀的动态方程为:

$$A_1 \rho y = \sqrt{\frac{p_s}{\rho}} [C_{dc} A_c - C_{df} \pi D_f (y_{f0} + y_f)] - C_{dl} A_{s0} \sqrt{\frac{2}{\rho}} (p_s - p_1), \quad (11)$$

式中: A_1 为跟随式滑阀柱塞上端面积, ρ 为液压油密度, y 为跟随式滑阀柱塞位移, p_s 为液压油供油入口压力, C_{dc} 为限流孔流量系数, A_c 为限流孔流通面积, C_{df} 为喷嘴孔流量系数, D_f 为喷嘴孔直径, y_{f0} 为平衡状态下挡板距喷嘴的距离, y_f 为挡板偏移位移, C_{dl} 为出口流量系数, A_{s0} 为出口流通面积, p_1 为出口液压油压力。

喷嘴挡板阀中, 挡板的偏移位移与跟随式滑阀柱塞位移间的函数关系为:

$$y = \sqrt{\frac{p_s}{\rho^3}} \frac{C_{dc} A_c - C_{df} \pi D_f (y_{f0} + y_f)}{A_1}. \quad (12)$$

当挡板向下运动, 跟随式滑阀柱塞向下移动时, 其动态方程为:

$$p_s A_{e1} - p_c A_1 - B_2 \frac{dy}{dt} - m_{12} \frac{d^2 y}{dt^2} = 0, \quad (13)$$

式中: A_{e1} 为跟随式滑阀柱塞下端面的面积, p_c 为控制腔内液压油压力, B_2 为跟随式滑阀柱塞运动黏性阻尼系数, m_{12} 为跟随式滑阀柱塞的质量。

喷嘴挡板阀中, 压力调节阀的动态方程^[15]为:

$$p_s A_3 - k x_1 - B_3 \frac{dy_1}{dt} - m_{13} \frac{d^2 y_1}{dt^2} = 0, \quad (14)$$

式中: A_3 为压力调节阀有效承压面积, k 为压力调节阀弹簧刚度, x_1 为压力调节阀弹簧压缩量, B_3 为压力调节阀运动黏性阻尼系数, y_1 为压力调节阀位移, m_{13} 为压力调节阀的质量。

连杆 B 的动态方程为:

$$F_5'' - F_5' - m_9 g = 0, \quad (15)$$

式中: F_5' 为复位杠杆 B 左端对连接杆的反作用力, 竖直向下; m_9 为连杆 B 的质量; F_5'' 为挡板杠杆对连杆 B 的力。

挡板杠杆的动态方程为:

$$(F_5' + m_9 g)d + m_{10}gd - F_3(c + d) = 0, \quad (16)$$

式中: F_3 为力矩马达梁右端弹簧弹力, $F_3 = k_3 \Delta_x$, 且 $F_3' = F_3$, 其中, k_3 为力矩马达梁右端弹簧刚度; Δ_x 为力矩马达梁右端弹簧形变; m_{10} 为挡板杠杆质量; c 为挡板杠杆左端到结点处的距离; d 为结点到固定铰支座的距离。

3 电液复合调速器系统传递函数方框图

由该电液复合调速器的工作原理和各关键部件的动态方程, 可得出其传递函数方框图。为便于区分, 将整个调速系统分为传动部分、调速部分 Y_1 和调速部分 Y_2 三部分。

3.1 传动部分传递函数方框图

传动部分由动力输出油缸、复位杠杆 B、连杆 C、挡板杠杆和力矩马达梁组成, 将各部分传递函数方框图连接, 得到传动部分的传递函数方框图如图 2 所示。

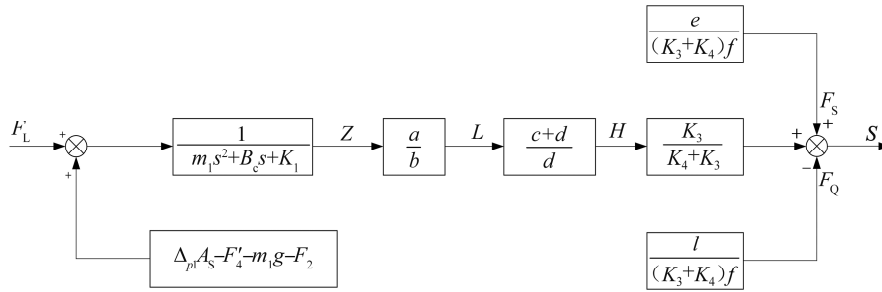


图 2 传动部分传递函数方框图

3.2 调速部分 Y_1 传递函数方框图

调速部分 Y_1 由动力输出油缸、降速拉杆、停机杆部分、降速柱塞、先导阀柱塞和缓冲活塞组成, 将各部分传递函数方框图连接, 得到调速部分 Y_1 的传递函数方框图如图 3 所示。

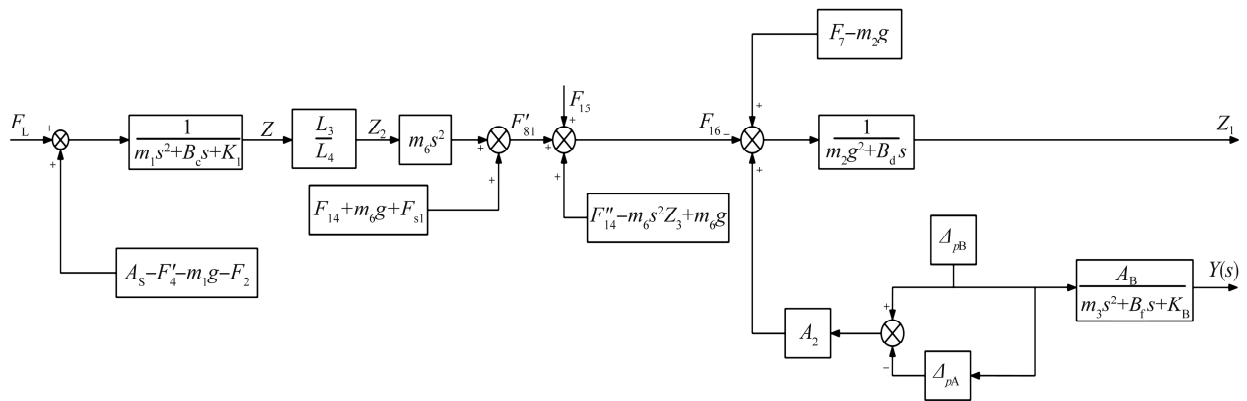


图 3 调速部分 A 传递函数方框图

3.3 调速部分 Y_2 传递函数方框图

调速部分 Y_2 由气动调速模块、复位杠杆 A 部分、速度设置活塞和速度设置液压缸组成, 将各部分传递函数方框图连接, 得到调速部分 Y_2 的传递函数方框图如图 4 所示。

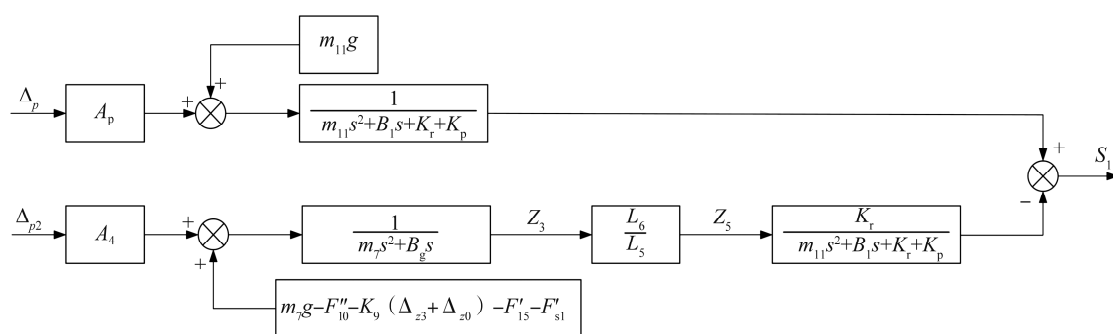


图4 调速部分B传递函数方框图

4 结束语

1) 分析了某柴油机燃油系统电液复合调速器组成及工作原理,将系统分为五大组成部分,其中机械调速部分包括速度设置活塞、飞锤组件和先导阀柱塞,动力输出油缸部分包括动力输出油缸、与动力输出油缸相连的降速拉杆和复位杠杆B,喷嘴挡板阀包括力矩马达梁、喷嘴挡板阀及与挡板相连的挡板杠杆和连杆B。

2) 建立了电液复合调速器速度设置活塞、与速度设置活塞相连的复位杠杆A、飞锤组件、先导阀柱塞位移、气动调速部分、动力输出油缸、与动力输出油缸相连的降速拉杆、与动力输出油缸相连的降速拉杆和复位杠杆B、缓冲活塞、力矩马达梁、喷嘴挡板阀、跟随式滑阀柱塞、压力调节阀、连杆B、挡板杠杆等关键部件的数学模型。

3) 根据推导得到的电液复合调速器各关键部件数学模型,分别绘制了其传动部分、调速部分 Y_1 和调速部分 Y_2 的传递函数方框图,为该型调速器的性能分析以及设计开发提供了重要的理论参考。

参考文献:

- [1] 汪会斌,余磊,樊士贡,等. 叉车柴油机加速工况声品质改进试验研究[J]. 内燃机与动力装置, 2024, 41(2): 34-39.
- [2] 朱成玮,余凯,金志伟,等. 生物乳化柴油对船用柴油机性能和排放影响的试验研究[J]. 山东交通学院学报, 2018, 26(2): 25-31.
- [3] 王晓宇,王正江,贾丹丹,等. 极寒条件下含氧燃料对柴油机冷起动特性的影响[J]. 内燃机学报, 2024, 42(1): 18-25.
- [4] 马标,张方戈,程晓章,等. 轻型柴油车还原性颗粒捕集器控制策略及排放试验研究[J]. 内燃机与动力装置, 2024, 41(5): 1-7.
- [5] 李健巍,孙志江,杨起,等. 非道路国四柴油机后处理系统加速耐久试验设计[J]. 内燃机与动力装置, 2024, 41(5): 58-63.
- [6] 姚崇,董璐,李瑞,等. 基于强化学习的柴油机调速算法研究[J]. 内燃机工程, 2024, 45(4): 71-80.
- [7] 颜鑫宇,张祥山,房征先,等. 转速和高压共轨燃油系统参数对共轨管压力波动的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2024, 41(4): 20-26.
- [8] 鹿盈盈,裴毅强,刘一泽,等. 转速对柴油机中负荷预混压燃燃烧和排放的影响[J]. 内燃机学报, 2022, 40(6): 495-503.
- [9] 陈月春,李素婷,王霞,等. 进气预热对柴油机低温启动性能影响的试验研究[J]. 山东交通学院学报, 2021, 29(2): 1-6.
- [10] 宋恩哲,宋体康,马骋,等. 基于模型参考自适应的柴油机转速控制研究[J]. 内燃机工程, 2022, 43(4): 57-64.
- [11] NANAWARE R, SAWANT S R, JADHAV B. Modeling of hydraulic turbine and governor for dynamic studies of HPP [C]//Proceedings of Foundation of Computer Science (FCS). New York, USA: FCS, 2013.
- [12] YAO C, SONG E Z, FAN L Y, et al. Modeling and simulation research of electro-hydraulic speed governing system of diesel engines[C]//Proceedings of International Conference on Electronics, Communications and Control. New York, USA: IEEE, 2011: 3812-3816.

- [13] 黄庆宏,侯小刚. PG-PL型调速器动态过程的数值分析[J]. 机械制造与自动化, 2004(6):112-116.
- [14] 陈坚. 船用发电柴油机调速器的数学建模和仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2018,30(3):937-942.
- [15] 李云松. 电液调速器性能仿真及分析技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009.

Dynamic characteristics mathematical modeling of electro-hydraulic compound governor of fuel system for diesel engines

QU Zhilin¹, ZHAO Yongchao², YANG Jun¹, BAI Yun^{3*}

1. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China; 2. Weichai Heavy Machinery Co., Ltd., Weifang 261108, China;

3. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China

Abstract: To improve the speed stability and working efficiency of diesel engines during load changes, a mathematical modeling study is conducted on the dynamic characteristics of an electro-hydraulic compound governor for a certain diesel engine fuel system. The composition and working principle of the electro-hydraulic compound governor for fuel system of a diesel engine are analyzed. It is divided into the mechanical speed regulating module, the pneumatic speed regulating module, the power output cylinder module, the buffer piston and the nozzle flapper valve module. According to the specific stress conditions of each part, the mathematical models of the key components of the five major module are established respectively. The transfer function block diagram of the transmission part, the speed control system Y_1 and the speed control system Y_2 of the electro-hydraulic compound governor are obtained by the mathematical model, which provide a theoretical reference for the performance analysis and design of the electro-hydraulic compound governor.

Keywords: diesel engines; fuel system; electro-hydraulic compound governor; mathematical modeling; block diagram

(责任编辑:臧发业)

.....

(上接第37页)

aims to achieve automated management under complex environmental conditions. In MATLAB-Simulink, a hybrid energy system model integrating a photovoltaic model and a lithium battery model are developed. The maximum power point tracking (MPPT) algorithm is employed to enhance the conversion efficiency of solar energy, while the proportional integral controller and the bi-directional DC/DC controller are utilized to optimize the conversion efficiency of solar energy. The effect of the photovoltaic power on the charging of the lithium battery under different irradiance is simulated and analyzed, and the responsiveness of the energy management strategy under specific environmental conditions is evaluated. The simulation results show that the system can charge the lithium battery when there is sufficient light, and discharge the lithium battery when there is weak light, according to the demand of electric vehicles. MPPT algorithm improves the utilization rate of solar energy under complex environmental conditions, the system is able to realize efficient energy management and improve the stability and robustness of the system.

Keywords: photovoltaic cell; lithium battery; irradiance; SOC; electric vehicle

(责任编辑:刘丽君)