

基于模拟PID的电子调速器控制设计

曹钰¹, 周琴², 李胜², 李亚洲², 徐茂²

1. 重庆财经职业学院, 重庆 402160; 2. 重庆红江机械有限责任公司, 重庆 402160

摘要:为解决传统机械调速器难以满足现代柴油机性能需求的问题,通过运算放大器构建比例积分微分(proportion integration differentiation, PID)电路,集成转速采集模块、转速设定模块、PID调速模块和功率放大模块,设计一种基于模拟PID控制的多功能无差式电子调速控制器,采用硬件电路实现启动油量控制、怠速/额定工况切换及PID参数独立调节,并结合突加、突卸负载工况台架试验验证调速器控制性能。台架试验结果表明:突加、突卸负载工况下转速波动率不大于0.2%,稳态调速率为0,瞬态调速率小于7%,突加、突卸负载工况的稳定时间约为6~7 s,性能满足二级调速性能指标,该控制器结构简洁、抗干扰强,具有一定的工程应用价值。

关键词: PID; 柴油机; 多功能复用; 电子调速器; 控制器

中图分类号: TM571

文献标志码: A

文章编号: 1673-6397(2025)05-0084-08

引用格式: 曹钰, 周琴, 李胜, 等. 基于模拟PID的电子调速器控制设计[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(5): 84-91.

CAO Yu, ZHOU Qin, LI Sheng, et al. Design of electronic speed controller based on analog PID[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(5): 84-91.

0 引言

随着环境污染问题的日益严峻,国家对船用柴油机性能提出了更高的要求,传统机械式调速器已难以满足船用柴油机调速精度的要求。电子调速器具有响应速度快、控制精度高、参数调整灵活、易于实现智能化控制及可集成排放控制系统等优势,可显著提高柴油机的燃油经济性、排放水平、运行稳定性及动态响应性。近年来,为了满足日益严格的排放标准要求,电子调速器技术已广泛应用于船用柴油机调速领域,成为柴油机控制领域的研究热点^[1]。

比例积分微分(proportion integration differentiation, PID)控制是一种广泛应用于工业自动化、机器人、航空航天等领域的经典反馈算法,该方法通过实时调节系统输出,使被控对象(如温度、速度、位置等)快速、稳定地达到预设目标,同时抑制外部干扰和系统不确定性。其中,比例因数可根据当前偏差线性调整输出,响应快,但可能引起稳态误差或超调;积分因数通过累积历史偏差消除稳态偏差,提高系统稳态精度,但可能降低响应速度;微分因数可预测偏差变化趋势,通过阻尼作用减少超调,提高系统稳定性。PID算法结构简单,参数物理意义明确,参数整定(如Ziegler-Nichols)方法成熟,无需精确数学模型即可实现有效控制,成为工程实践的首选控制方案。但PID算法在高度非线性、强耦合或大滞后系统中的应用可能受限,需要与模糊控制、神经网络等智能算法结合使用。

近年来, PID算法在动力机械领域持续优化改进。在汽车电子领域,自适应PID通过在线调整积分时间常数解决进气扰动问题,实现了发动机怠速控制,但需额外配置压力传感器;在船舶动力系统中, PID算法与神经网络结合,利用长、短期记忆(long short-term memory, LSTM)网络预测主机负载突变,可有效

收稿日期: 2025-03-18

基金项目: 重庆市永川区科学技术局技术创新与应用发展专项面上项目(2024yc-cxfz30081)

第一作者简介: 曹钰(1988—),男,湖南衡山人,高级工程师,主要研究方向为内燃机电子控制, E-mail: 380551477@qq.com。

降低瞬态调速率,但需搭载高性能微控制单元(micro controller unit, MCU);在工业控制领域,双自由度PID控制器通过前馈补偿提高燃气轮机调速响应,阶跃响应时间较传统PID控制器大幅缩短,但电路复杂度显著增加。

数字式PID凭借高精度和可编程性的优势在工程实践中获得广泛应用,但需要借助MCU实现控制功能,存在硬件成本高、电磁兼容性差等问题^[2],目前关于数字PID的研究多聚焦于算法改进,对硬件架构创新的关注较少;模糊PID能提高系统动态性能,但算法复杂,难以在低成本场景推广使用^[3];模拟PID调速器虽具备抗干扰强、成本低的优势,但功能单一(如缺乏怠速/额定工况切换、参数调节不便),难以满足柴油机多工况需求^[4],因此在不影响模拟PID电子调速器优势的前提下,提高功能的多样性,成为提高柴油机调速性能的关键。

本文中提出一种多功能复用无差式模拟PID电子调速控制器,该控制器以运算放大器、比较器、三极管、二极管为核心组成模拟PID运算单元,利用模拟电路集成起动力量设定、怠速/额定工况切换、PID调节等功能,在保留模拟式调速控制器稳定性的同时,解决数字式调速控制器成本高、抗干扰性差的问题。

1 模拟式电子调速控制器

1.1 结构

本文中设计的模拟式电子调速控制器主要由电源模块、转速采集模块、转速设定模块、PID调速模块以及功率放大模块组成。电源模块为其余模块提供所需工作电压;转速采集模块采集外部转速信号,将其转换成电压信号后与转速设定模块提供的设定电压进行偏差计算,计算后的偏差信号经PID调速模块及功率放大模块后,输出相应的电流信号控制执行器调节柴油机循环供油量,从而调节柴油机转速,使柴油机在稳定转速下工作。模拟式电子调速控制器结构组成如图1所示。

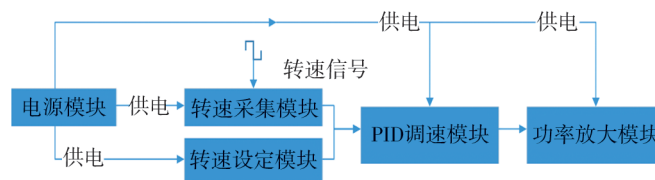


图1 模拟式电子调速控制器结构组成

各模块功能与交互逻辑为:1)电源模块基于TPS5310开关电源芯片,将24V电压转为双路输出的 ± 12 V电压(纹波电压不大于50mV),为运算放大器、比较器等元器件提供稳定电压;2)转速采集模块通过LM2917频率/电压转换电路,将磁电式传感器输入的转速脉冲信号转换为直流电压信号,转换相对误差为 $-0.5\% \sim +0.5\%$;3)转速设定模块采用双路可调电位计与积分切换电路,实现怠速/额定工况的无扰切换,通过积分电路中的积分时间常数调节切换时间为0.5~5.0s;4)PID调速模块基于运算放大器搭建比例-积分-微分三通路,支持参数独立调节,比例增益为0.5~5.0,积分时间常数为0.1~2.0s,微分时间常数为0.05~0.50s;5)功率放大模块采用金属氧化物半导体场效应晶体管(metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET)与功率电阻,构成电压/电流转换电路,输出电流为0~1A,可实现对电磁式执行器的驱动^[5-6]。

传统的单功能模拟PID将柴油机单个工况控制设计成一个单独模块,当涉及多个工况控制时(如怠速/额定工况切换),需要增加相似工况控制模块。本文中提出的多功能复用无差式模拟PID电子调速控制器结构通过硬件复用技术(通过转速设定模块的积分切换电路),可实现将同一硬件(如积分切换电路)重复用于怠速和额定两种工况控制,从而精简电路结构。相比单功能模拟PID设计,参考物料清单表(bill of materials, BOM),元件数至少减少30%,印制电路板(printed circuit board, PCB)面积缩小22%。

1.2 功能

电子调速控制器在基础调速功能上,通过纯模拟电路实现起动力量自适应调节、无差式稳态调节、抗饱和保护及紧急停机等扩展功能,具体功能如下。1)电子调速器设定起动转速阈值及对应的起动力量激活阈值,通过可调电阻自适应调节起动力量,当实际转速高于起动转速阈值时,控制器控制执行器运行到

起动油量位置(即油泵齿条调节到相应的油量位置),确保柴油机可靠点火;柴油机转速稳定后,实际转速超过起动成功转速时,油量控制自动切换至 PID 闭环控制,避免人工干预。2)基于积分通路,无差式稳态调节可消除静差,试验表明,采用积分通路时稳态转速波动率不大于 0.2%,较模糊 PID(转速波动率为 0.5%)控制精度提高 60%。3)抗饱和和保护功能限制积分输出幅值,防止执行器超调导致积分饱和。4)通过外部开关触发比较器可实现紧急停机,即在 10 ms 内强制拉低 PID 输出电压,直至输出为 0,符合安全标准。

相比数字式调速器,本文中设计的控制器通过全硬件逻辑实现各项控制功能,无需软件参与,实时性显著提高,根据文献[7]要求开展电压为 4 kV 的浪涌冲击抗扰度测试,测试结果表明抗电磁干扰能力符合要求,可用于船舶、矿山等高干扰场景,且硬件成本降低约 40%。

1.3 原理

基本 PID 调节器有 2 个输入量(被调量、设定量)和 1 个输出(控制执行机构动作的输出指令),对于电子调速器,被调量是柴油机实际转速,设定量为目标转速,输出指令为控制执行器加、减油动作的电流信号^[2]。模拟式电子调速器 PID 调速是对柴油机目标转速和实际转速之间的输入偏差进行 PID 运算,基于 PID 控制算法的模拟式电子调速器调速原理如图 2 所示。

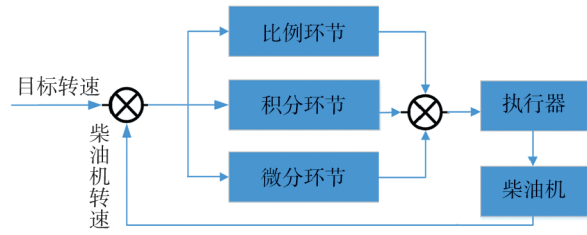


图 2 模拟式电子调速器 PID 调速原理图

基于 PID 算法计算控制器到执行器的输出参数

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

式中: $e(t)$ 为柴油机目标转速与实际转速之间的输入偏差,r/min; K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例因数、积分因数和微分因数; t 为运行时间,s。

由式(1)可知:输入偏差为 0,比例因数不起作用;积分环节将累积的偏差叠加到原有系统上以抵消系统造成的静差,即消除系统稳定后的输入偏差;微分信号反映了偏差信号的变化规律,根据偏差信号的变化进行超前调节,使系统快速响应。

2 硬件电路设计

2.1 转速采集模块

转速采集模块电路原理图如图 3 所示。采用 LM2917 芯片单路频率/电压转换器构建转速采集模块,转换器内集成电荷泵和比较器,实现高精度频率/电压转换,使采集的输入转速范围增大;输入级通过低通滤波电路,抑制高频噪声,电荷泵输出电流经积分电路处理后生成线性电压。转速采集范围与电容器 C22 和电阻器 R25 相关,转速采集模块输出电压

$$U_{out} = f_{IN} U_{cc} R_{25} C_{22}, \quad (2)$$

式中: U_{cc} 为芯片供电电压, $U_{cc} = 12\text{ V}$; f_{IN} 为信号输入频率,Hz; R_{25} 为电阻器 R25 的电阻, Ω ; C_{22} 为电容器 C22 的电容, μF 。

采用霍尔传感器与分压电路结合的传统转速采集模块需对信号多级放大与滤波,硬件设计比较复杂,为避免工作温度为 $-40 \sim 85\text{ }^\circ\text{C}$ 时对积分时间常数的影响,本文中的转速采集模块积分常数电容选用

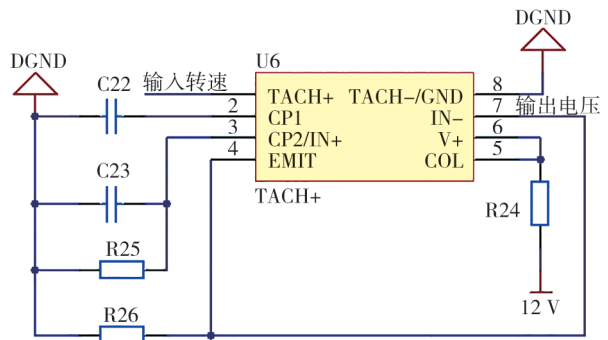


图 3 转速采集模块电路原理图

NP0 材质,温漂系数为 $\pm 30 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。相比传统转速采集模块,外围元件减少了 40%。

2.2 起动油量设定

2.2.1 电路设计

起动油量控制模块采用双比较器阈值检测与切换技术,实现柴油机起动阶段的燃油供给闭环控制。起动油量设定电路原理如图 4 所示。

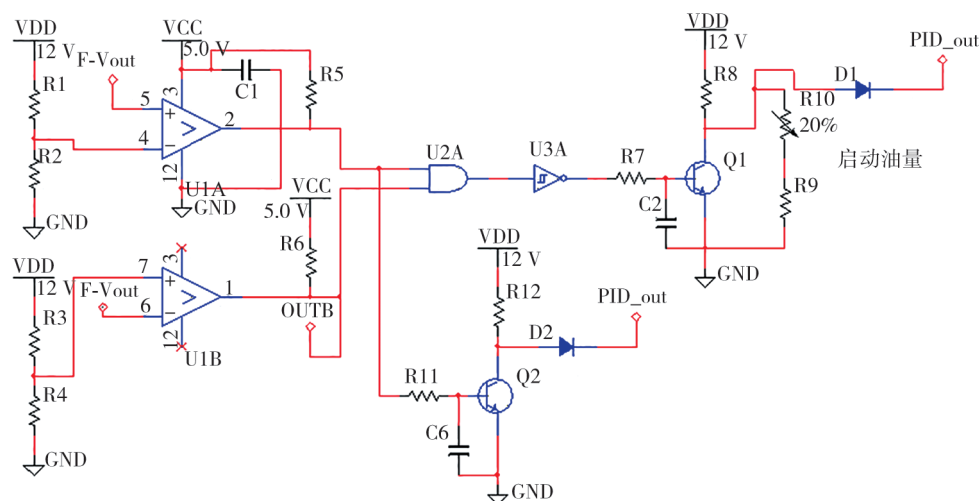


图4 起动油量设定电路原理图

电路由 LM393 双比较器、可调电位计及逻辑控制电路构成,各电路功能为:1) 阈值检测电路通过电阻器 R1、R2 分压电路设定起动油量激活阈值,当频率/电压转换器输出的转速电压小于起动转速阈值电压时,比较器 U1A 输出低电压,触发起动油量控制模式,控制器控制执行器运动到起动油量。2) 起动成功判定电路通过电阻器 R3、R4 分压电路设定起动成功阈值,当频率/电压转换器输出的转速电压大于起动成功转速电压时,比较器 U1B 输出高电压,驱动 MOSFET 切断起动油量电路,切换至 PID 闭环控制。3) 起动油量设定电路采用精密多圈可变电阻器 R10 调节起动供油量,输出电压对应的执行器行程为 0~100%。利用二极管 D1 实现 PID 输出与起动油量输出的独立切换,减少 PID 输出与起动油量的相互干扰^[8]。

柴油机在不同环境温度时的起动油量存在差异(若环境温度低,需加大起动油量),应根据实际起动需求自行调整油量,保证柴油机顺利起动。起动方法为:在控制器操作面板上逆时针旋转 R10 增大起动供油量,结合万用表测量控制器输出电流(输出电流控制范围为 100~400 mA)。

2.2.2 电路优化

为有效解决起动模式与正常运行模式临界切换时的抖动、温度漂移及响应速度慢等问题,进行电路设计优化:1) 迟滞特性设计。在比较器 U1A 反馈回路增设电阻器 R5,可产生 50 mV 的迟滞电压,有效避免转速临界点抖动导致的起动模式与正常运行模式的频繁切换;试验结果表明,该设计使两种模式的切换稳定性提高 82%。2) 温度补偿设计。分压电阻器选用精度为 $\pm 1\%$ 的金属膜电阻器,温漂系数不大于 $50 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,确保工作温度($-30 \sim 105 \text{ } ^\circ\text{C}$)阈值漂移率为 $-1.5\% \sim 1.5\%$ 。3) 快速切换响应。两种模式的切换时间小于 $1 \text{ } \mu\text{s}$,比传统继电器的响应速度提高 3 个数量级。台架测试结果表明,从起动模式切换至 PID 控制的过渡时间不大于 20 ms,无燃油供给突变现象。

相比数字式起动,本文中设计的起动油量电路通过纯硬件电路实现多阈值检测、起动模式与正常运行模式的切换,避免了数字式起动软件扫描周期产生的延迟(数字式起动典型延迟时间为 100 ms)^[9],在柴油机冷起动试验中首次点火成功率从 78%提高至 95%。

2.3 怠速/额定工况设定

2.3.1 电路设计

怠速/额定工况双模切换模块采用积分型无扰切换技术,通过硬件电路实现柴油机多工况平滑过渡,

怠速/额定工况设定电路原理如图 5 所示。

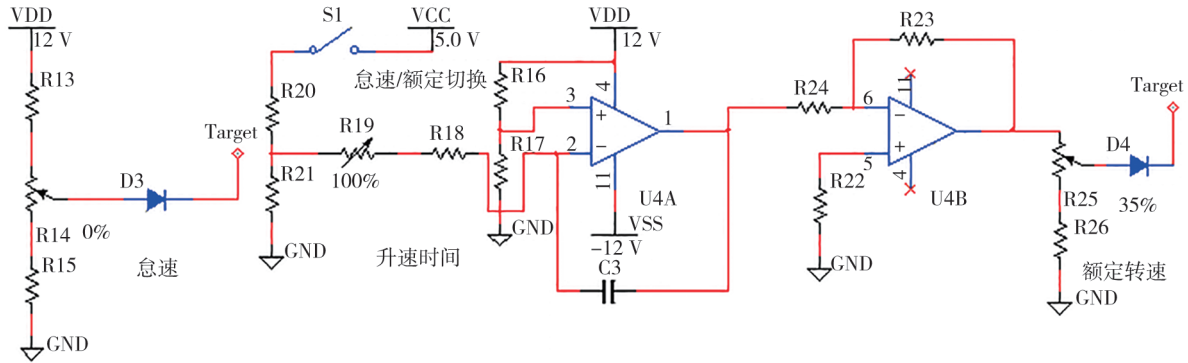


图 5 怠速/额定工况设定电路原理图

电路由双路可调基准源、积分缓冲电路及电压跟随电路构成,具体设计为:1)基准源生成。怠速工况基准电压由电阻器 R13、R15 及精密可变电阻器 R14 构成分压电路,调节电压为 1.5~3.0 V;额定工况基准电压通过可变电阻器 R25 线性设定,调节电压为 3~5 V;TL431 稳压芯片保持基准电压稳定,温漂系数不大于 $4 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。2)积分缓冲电路。当开关 S1 闭合时,运算放大器 U4A 与可变电阻器 R19(电阻为 10~100 k Ω)、电容器 C3 构成时间常数可调的一阶积分电路,通过调节 R19 电阻值,可调整渐变切换时间为 0.5~5.0 s,避免阶跃信号导致执行器产生信号冲击。3)电压跟随设计。采用高精度运算放大器构建缓冲级,输出阻抗小于 1 Ω ,确保设定电压在长线传输中衰减率小于 0.1%。

2.3.2 电路优化

为提高系统的抗干扰能力、关键参数长期稳定性及响应性,进行硬件优化设计:1)抗扰动设计。在积分电路前端加入电阻电容(resistor capacitor, RC)低通滤波器,可将频率为 10 kHz 的电磁干扰的信号强度至少衰减 30 dB,实测工况切换过程中电压波动率小于 0.05%。2)提高参数稳定性。为保障怠速/额定工况切换 2 000 次后时间常数漂移率小于 1%,积分电容器 C3 选用聚丙烯材质,电容偏差为 $\pm 2\%$,介电吸收效应小于 0.05%。对比 RC 参数温漂补偿方案^[6],该设计硬件成本降低 60%。

台架试验结果表明:怠速/额定工况切换时转速超调量小于 2%,过渡过程无油量突变现象。振动测试结果表明:设定电压波动为 -10~10 mV,可满足船舶辅机抗冲击工况需求。相比传统数字式脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)渐变方案,本文中设计的通过纯模拟电路实现切换功能,响应延迟时间从 20 ms 缩短至 μs 级,且无需软件干预。

2.4 PID 调节

2.4.1 电路设计

PID 运算模块采用三通路独立调节架构,通过分立元件、运算放大器实现参数解耦控制, PID 调节电路原理如图 6 所示。电路由偏差生成、比例放大、积分运算及微分补偿四部分构成:1)偏差生成电路。采用双运算放大器 U5A、U5B 的差分结构,支持正、反向控制模式切换,输入信号经可变电阻器 R27、R30 电路进行电压匹配。2)比例通路。采用运算放大器 U6A 构成反相放大器,调节比例增益为 0.5~5.0,通过多圈可变电阻器 R36 实现精细调节,运算放大器 U6A 输出端电压 $U_{c,1}$ 与偏差信号 $e(t)$ 、电阻器 R35 的电阻 R_{35} 、电阻器 R36 的电阻 R_{36} 有关, $U_{c,1} = e(t) R_{35} / R_{36}$ 。3)积分通路。采用运算放大器 U6B 搭建米勒积分器,时间常数由电阻器 R38 的电阻 R_{38} 、电容器 C4 的电容 C_4 决定,积分时间常数为 0.1~2.0 s,运算放大器 U6B 输出端电压 $U_{c,2} = \int_0^t e(t) dt / (R_{38} C_4)$ 。4)微分通路。由运算放大器 U6C 组成有源微分器,通过电阻器 R43、电容器 C5 分压电路调节积分时间常数为 0.05~0.50 s,前端加入截止频率为 1 kHz 的低通滤波,抑制高频噪声干扰,运算放大器 U6C 输出端电压 $U_{c,3} = R_{43} C_5 de(t) / dt$ 。

PID 调节电路输出电压 $U_{c,1} = U_{c,1} + U_{c,2} + U_{c,3}$ 。

由图 4、6 可知:当柴油机转速小于起动成功转速时,电压比较器 U1B 输出电压端口输出高电压, PID

调节电路输出电压被拉低,此时PID调节电路输出电压由起动油量设定电路确定,PID调节电路不参与工作;当柴油机转速大于起动成功转速时,柴油机起动成功,起动油量设定电压为0,此时PID调节电路输出电压由PID调节电路确定,从而控制执行器调节油量。

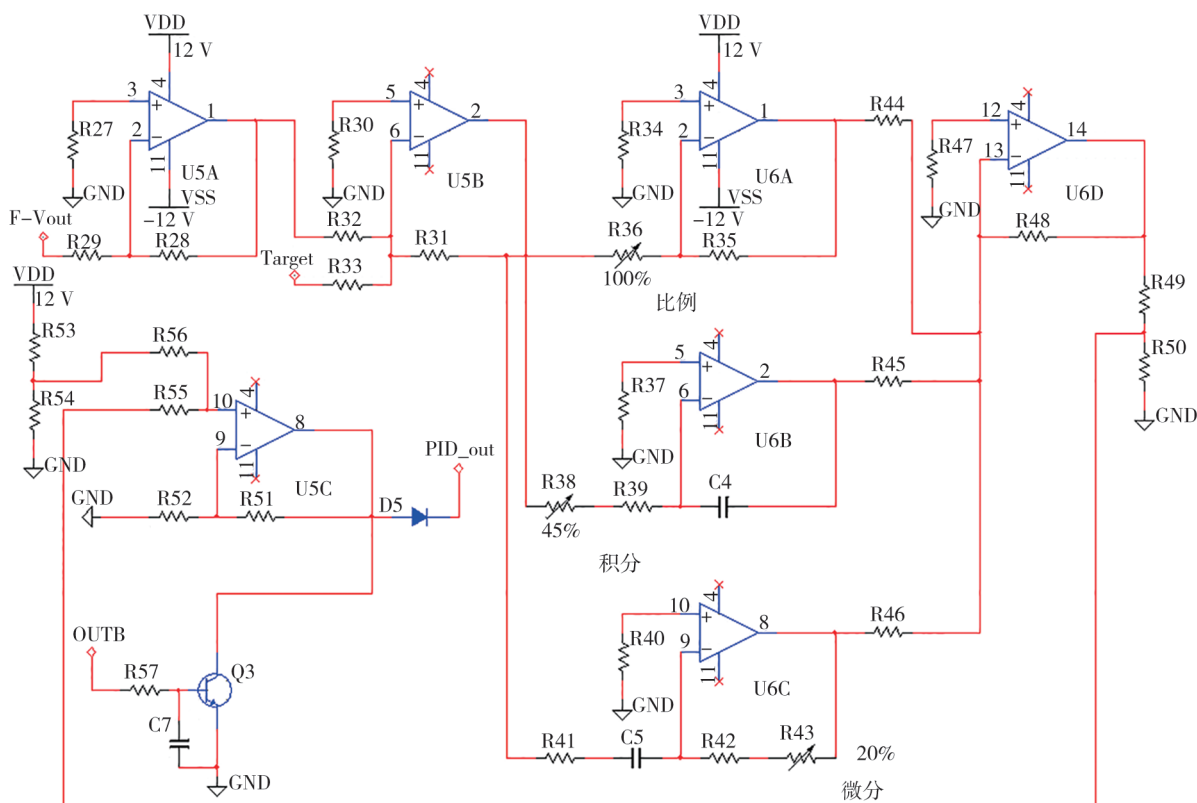


图6 PID调节电路原理图

2.4.2 电路优化

为抑制积分饱和、克服温漂影响并优化动态响应特性,电路优化措施为:1)抗积分饱和改进。积分电容器C4并联光耦隔离开关,当执行器达到极限位置时自动复位,试验测试结果显示,突卸负载工况下该执行器复位时间减少了42%。2)温度漂移抑制。选用温漂系数为 $6.7 \times 10^{-9} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 的低温漂运算放大器,配合铜-康铜热电偶补偿电路,使工作温度为 $-40 \sim 85 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,PID参数漂移率为 $-1.5\% \sim 1.5\%$ 。3)动态响应提高。微分通路增设可调零点补偿电路,提高相位裕度,阶跃响应过冲量由12%降至4%。

对比数字PID方案^[8],该设计通过硬件参数解耦实现三通路独立微调,PID调节效率提高3倍;在快速温变试验中,精度波动为 $-0.3\% \sim 0.3\%$,满足舰船动力系统严格的环境要求。

2.4.3 PID整定

当执行器油量控制进入PID调节阶段后,由可变电阻器R36、R38和R43对执行器控制进行PID调节快速整定,具体步骤为:1)柴油机起动前,先将可变电阻器R36调整到中间电阻,R38和R43逆时针调整到最小电阻;2)柴油机起动成功后,逆时针调整R36直到柴油机转速出现轻度振荡;3)顺时针调整R36直到振荡消失,然后顺时针调整R38以消除转速稳态误差;4)在调整R38的过程中如出现转速振荡现象,顺时针调整R36直至振荡消失;5)当柴油机转速出现超调现象时,可顺时针调整R43抑制超调,但应避免大幅度顺时针调整,防止微分噪声过大,导致转速振荡。

2.5 功率放大

2.5.1 电路设计

PID调节电路输出信号不能直接驱动执行机构,需要经过专门的功率放大电路将其转化成对应控制信号。功率驱动模块采用线性电压-电流转换架构,实现电流为 $0 \sim 1 \text{ A}$ 时的精准输出,功率放大电路原理

图如图 7 所示。

电路由功率 MOSFET、电流采样电路及负反馈补偿电路构成,主要包括:1) 核心驱动单元。选用 IRF540N 增强型 MOSFET,搭配运算放大器构建电流源,PID 调节电路输出电压转化成电流信号,电流由电阻器 R63、R61 和功率电阻器 R62 决定。2) 负反馈补偿。通过 R61、电容器 C8 的电路形成相位超前补偿,消除 MOSFET 极点的相位滞后,拓宽系统频率带宽。3) 多级缓冲设计。在运算放大器输出端采用多级功率管串联结构,最大驱动电流可达 5 A,并确保在 1 ms 内完成执行器全行程响应^[9-10]。

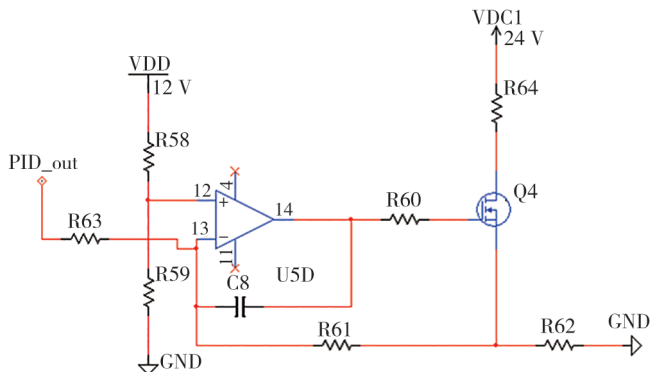


图 7 功率放大电路原理图

2.5.2 电路优化

为提供可靠的过流保护、抑制输出电流热漂移并增强系统电磁抗干扰能力,电路优化措施为:1) 动态限流保护。增设比较器电路实时监测电阻器 R62 的压降,当电流大于 1.2 A 时触发保护,切断 MOSFET 栅极驱动,试验结果表明,该设计可将短路故障响应时间减小至 15 μs ,较传统保险丝方案,响应速度提高了 3 个数量级。2) 热稳定性提高。在 MOSFET 散热器嵌入负温度系数(negative temperature coefficient, NTC)热敏电阻,配合运算放大器构成温度-电流补偿环,使工作温度为 $-40 \sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,输出电流漂移率为 $-0.8\% \sim +0.8\%$ 。3) 电磁兼容优化。采用星型接地拓扑,功率地与信号地通过电阻为 $10\text{ }\Omega$ 、功率为 1 W 的电阻器隔离,结合磁珠滤除频率大于 100 MHz 的电磁干扰。

对比 PWM 驱动方案^[11],该设计方案降低执行器振动噪声,在电流为 0.5 A 时,控制精度提高至 $\pm 0.5\%$,模块整体效率达 85%,满足文献[12]的防护标准连续运行要求^[13]。

3 试验验证

将本文中设计的模拟 PID 电子调速器控制器适配某型号电液复合式调速器在 TMW III 调速器电动试验台上进行配机试验,采用突加、突卸负载试验,测试调速器在柴油机负荷突变时的动态响应性能,验证转速波动率、恢复时间、瞬态调速率、稳态调速率等是否满足设计要求。

试验设定柴油机转速为 1 470 r/min。在空载运行一段时间后,突加满载负荷后再突卸负荷,使柴油机再次空载运行。试验前,调节调速器负荷匹配,使满载时调速器输出轴对应表盘指示处为第 8 格(表盘满量程为 10 格);空载时调速器输出轴对应表盘指示处为第 2 格。柴油机突加突卸负荷时转速响应曲线如图 8 所示。由图 8 可知:设计的调速器稳态转速曲线平稳,转速波动率不大于 0.2%,突加负荷的稳定时间约为 6~7 s,瞬态调速率为 6.8%,稳态调速率偏差为 0,超调量小于 4%。试验结果表明设计的电子调速控制器的各项性能指标满足文献[14]中规定的二级调速性能指标,整体性能符合设计要求。

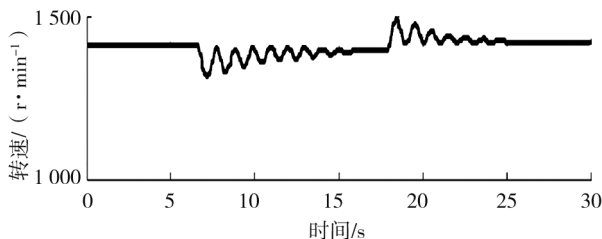


图 8 柴油机突加突卸负荷转速响应曲线

4 结论

基于模拟 PID 调速,设计了一款柴油机多功能无差式电子调速控制器,阐述其结构组成、功能、原理

及硬件电路设计,结合某型号电液复合式调速器进行试验台模拟配机试验,主要结论如下。

1)设计的控制器采用硬件复用式模拟PID架构,通过积分切换电路与双比较器阈值检测技术,在单套硬件平台上实现了怠速/额定工况双模切换、起动油量自适应控制等复合功能。相比传统单功能模拟PID方案,设计的控制器元件数量减少,硬件成本降低,且无需软件算法支持,电磁兼容性通过4 kV浪涌测试。

2)基于运算放大器构建的无差式PID调节电路,利用积分通路硬件自校正特性,在台架试验中使转速波动率不大于0.2%,稳态调速率偏差为0,稳态调速精度提高,可适用于船舶电站等对转速稳定性要求严格的场景。

3)基于模拟PID调速的柴油机电子调速控制器在突加突卸负荷的动态性能试验测试中,瞬态调速率为6.8%,稳定时间为6.7 s,超调量小于4%,验证了微分通路相位补偿设计的有效性,满足舰船辅机快速调频需求。

4)模拟PID电子控制器采用纯硬件参数整定方法,通过协同调节可变电阻器,可完成PID参数快速匹配。该方法较数字式离线整定效率有所提高,适合矿山机械等现场调试场景;较复合控制策略可实现无差调节,避免了软件算法延迟,且稳态调速率为0,更适合可靠性要求高的工业场景。

参考文献:

- [1] 张邵平,文李明,周秀亚.单喷嘴挡板电液阀关键参数正交试验优化设计[J].液压气动与密封,2024,44(9):123-128.
- [2] 曾辉,杨瑜,张小娅,等.大动态高线性度射频功率控制方法研究[J].电子信息对抗技术,2025,40(2):85-89.
- [3] 王云鹤.浅析潜油电泵智能控制系统对油田生产效率与经济效益的提升[J].中国设备工程,2025(5):28-30.
- [4] 项勇兵.4190型船用中速柴油机电控调速系统仿真[D].厦门:集美大学,2015.
- [5] 张静宇,仝瑶瑶,高志刚.基于PID算法的消防车自动稳压控制系统设计[J].工程机械,2025,56(3):8-13.
- [6] 陈晓勇,张太祥,王新乐,等.浅谈水电厂调速系统建模参数辨识试验[J].水电自动化与大坝监测,2013,37(1):4-8.
- [7] 全国电磁兼容标准化技术委员会.电磁兼容 试验和测量技术 浪涌(冲击)抗扰度试验:GB/T 17626.5—2019[S].北京:中国标准出版社,2019.
- [8] 王波.西门子SCL结构化控制语言编程应用与实现[J].工业控制计算机,2025,38(2):157-158.
- [9] 朱镇,张勤博,张宏伟,等.油电混合-机液复合动力传动系统模式切换协调控制[J].西安交通大学学报,2025,59(6):185-197.
- [10] 刘成全,徐腾飞,戚兴军.挖掘机发动机启动停止控制电路的智能化设计研究[J].工程机械与维修,2024(12):16-17.
- [11] 郭盛军.便携式蓄电池交流阻抗检测装置硬件平台设计[D].北京:北京交通大学,2023.
- [12] 全国电气安全标准化技术委员会.外壳防护等级(IP代码):GB/T 4208—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [13] 马红.GB/T 4208—2017《外壳防护等级(IP代码)》标准解读与应用[J].中国标准化,2020(增刊1):213-218.
- [14] 全国船用机械标准化技术委员会.船用柴油机调速系统技术要求和试验方法:GB/T 3475—2025[S].北京:中国标准出版社,2025.

Design of electronic speed controller based on analog PID

CAO Yu¹, ZHOU Qin², LI Sheng², LI Yazhou², XU Mao²

1. Chongqing College of Finance and Economics, Chongqing 402160, China;

2. Chongqing Hongjiang Machinery Co., Ltd., Chongqing 402160, China

Abstract: In order to solve the problem that the traditional mechanical governor can hardly meet the performance
(下转第99页)

transmission error of the electric drive axle of heavy-duty vehicles, a model of a two-stage gear reduction system for a certain electric drive axle is established based on the analysis software. The tooth profile modification and tooth direction modification are combined to minimize the fluctuation of transmission error and the contact stress on the tooth surface as the optimization goal, and the modification parameters such as involute slope, involute convexity, tooth direction slope, and tooth direction convexity of the first and second stage reduction active gears are determined, and the simulation analysis is carried for verification. The results show that the modification parameters of the first and second stage reduction active gears are determined by the multi-objective optimization method, with the involute slopes being 1.82 and 2.33 μm , the involute convexities being 2.01 and 0.15 μm , the tooth direction slopes being 0.704 and $-3.200 \mu\text{m}$, and the tooth direction convexities being 0.185 and 0.443 μm , respectively. The simulation analysis of the modified gear shows that the maximum reduction of the peak-to-peak transmission error is 82.5%, the maximum reduction of the maximum contact stress on the tooth surface is 18.8%, and the maximum reduction of the load per unit length is 21.4%. The stress and load distribution on the modified tooth surface are more uniform, which effectively reduces the vibration and noise of the gear meshing in the transmission system.

Keywords: electric drive axle; transmission error; gear modification; multi-objective optimization

(责任编辑:胡晓燕)

·····
(上接第 91 页)

requirements of modern diesel engines, a proportional integration differentiation (PID) circuit is constructed through operational amplifiers. The circuit includes speed setting module, PID speed regulation module and power amplification module, a multi-functional zero difference electronic governor controller based on analog PID control is designed. Hardware circuit is used to realize the control of starting oil quantity, the switching of idle/rated working condition and the independent adjustment of PID parameters. The test bench test combined with sudden load and sudden unloading working condition verifies the speed regulator control performance. The test bench results show that the speed fluctuation rate is not more than 0.2% under the sudden load and sudden unloading working condition, the steady-state speed regulation rate is 0, the transient speed regulation rate is less than 7%, and stable time of the sudden negative load working condition is about 6 ~ 7 s, and the performance meets the secondary speed regulation performance index. The controller has a simple structure and anti-interference ability, and has certain engineering application value.

Keywords: PID; diesel engine; multi-functional reuse; electronic governor; controller

(责任编辑:胡晓燕)