

基于PID控制的直流电机转速稳定性优化研究

何胜林

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘要】：直流电机由于结构简单、调速范围宽、控制精度高，被广泛地应用在工业自动化、智能装备、交通运输等各个领域。转速稳定性属于直流电机工作性能的关键参数，它同设备的工作精度以及使用寿命有着关联。传统的PID控制虽然结构简单、响应快、容易实现，但是在实际运行中由于受到负载扰动、参数漂移、非线性等因素的影响，不能同时达到动态响应和稳态精度的要求，造成转速波动大。本文针对直流电机转速控制稳定性问题，对传统的PID控制进行深入分析，提出了一种基于参数自整定的PID优化控制方法，用模糊控制原理实现PID参数的实时自适应调节，克服了传统PID参数整定繁琐、抗干扰能力差的缺点。

【关键词】：直流电机；PID控制；转速稳定；参数自整定

DOI:10.12417/3041-0630.26.05.049

工业生产、智能装备中直流电机属于动力执行元件，转速稳定决定着设备运行质量、工作效率。无论是机床加工中精密的进给运动，还是智能机器人准确的定位，还是新能源设备动力的输出，都对直流电机转速的稳定性有很高的要求。转速一有大波动，加工精度就会下降，电机磨损也会变大，设备寿命也会变短，严重时还会造成安全事故。本文根据传统PID控制的不足之处，设计出模糊自适应PID优化控制方法，并用仿真和实验的方法来验证该方法对直流电机转速稳定性提高的效果，为工业领域直流电机转速控制的改进提供理论依据和实践借鉴。

1 直流电机数学模型

直流电机的转速控制实质上就是通过调节电枢电压或者电流来改变电磁转矩，从而达到转速精确控制的目的。为了方便控制策略的设计，需要建立直流电机的简化数学模型。忽略电枢反应、磁饱和等次要因素，直流电机的电枢回路方程、电磁转矩方程和机械运动方程如下所示。

$$\text{电枢回路方程: } La(dia/dt)+Raia+Ke\omega = Va$$

$$\text{电磁转矩方程: } Te=Ktia$$

$$\text{机械运动方程: } J(d\omega/dt)+B\omega = Te-TL$$

电枢电感 La 、电枢电阻 Ra 、电枢电流 ia 、反电动势系数 Ke 、电机角速度 ω 、电枢电压 Va 、转矩系数 Kt 、转动惯量 J 、阻尼系数 B 、电磁转矩 Te 、负载转矩 TL 。

由上式可知，直流电机转速 ω 与电枢电压 Va 、负载转矩 TL 有关，负载扰动、电枢参数变化都会引起转速波动。因此设计出有效的闭环控制策略来抑制扰动因素的影响，是提高转速稳定性的重要途径。

2 PID 控制优化方案设计

(1) 优化思路：针对传统PID控制的不足，本文提出模

糊自适应PID优化控制策略，主要思想就是把模糊控制和传统的PID控制结合起来，利用模糊控制的自适应性，根据转速偏差 e 和偏差变化率 ec 的变化，不断调整PID控制器的 Kp 、 Ti 、 Td 参数，使控制器一直保持在最佳的工作状态。模糊自适应PID控制的核心思想就是通过传感器采集电机的实际转速，计算出转速偏差 e 和偏差变化率 ec ；把 e 和 ec 作为模糊控制器的输入量，经过模糊化、模糊推理、解模糊化处理，输出PID参数的调整量 ΔKp 、 ΔTi 、 ΔTd ；将调整量与初始PID参数叠加，得到实时优化后的PID参数，驱动直流电机运行，实现转速的精准稳定控制。

(2) 模糊控制器设计：模糊控制器是二维输入、三维输出的结构，输入量是转速偏差 e 和偏差变化率 ec ，输出量是PID参数调整量 ΔKp 、 ΔTi 、 ΔTd 。首先对 e 、 ec 、 ΔKp 、 ΔTi 、 ΔTd 等实际取值范围进行模糊化处理，划分成模糊论域，分成负大、负中、负小、零、正小、正中、正大七个模糊等级，用NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB来表示。根据直流电机转速控制的实际工况，确定 e 的论域为 $[-50,50]r/min$ ， ec 的论域为 $[-10,10]r/(min \cdot s)$ ， ΔKp 的论域为 $[-2,2]$ ， ΔTi 的论域为 $[-1,1]$ ， ΔTd 的论域为 $[-0.5,0.5]$ 。

转速偏差 e 反映给定转速与实际转速的差值，是控制误差的核心指标；偏差变化率 ec 反映误差的动态变化趋势，预判转速波动走向，二者的数学表达式为：

$$e = \omega^* - \omega$$

$$ec = \frac{de}{dt} = \frac{d(\omega^* - \omega)}{dt}$$

式中： ω^* 为直流电机给定目标转速，单位 r/min ； ω 为电机实时实际转速，单位 r/min ； t 为控制时间，单位 s 。

输出量为PID参数的动态调整量，调整后的最终PID参数满足以下整定公式，其中 Kp 、 ΔKp 、 ΔTi 、 ΔTd

为常规 PID 初始整定参数:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ T_i = T_{i0} + \Delta T_i \\ T_d = T_{d0} + \Delta T_d \end{cases}$$

式中: K_p 为比例系数, T_i 为积分时间常数, T_d 为微分时间常数; ΔK_p 、 ΔT_i 、 ΔT_d 为模糊控制器输出的参数修正量。

(3) 优化后 PID 控制流程: 经过优化的模糊自适应 PID 控制流程为, 1) 初始化系统参数, 直流电机参数、PID 初始参数 K_{p0} 、 T_{i0} 、 T_{d0} , 模糊控制器的论域和隶属函数; 2) 采集电机实际转速 ω , 求转速偏差 $e = \omega_r - \omega$ 和偏差变化率 $ec = de/dt$; 3) 将 e 和 ec 做模糊化处理, 得到模糊输入量; 4) 根据模糊推理规则进行模糊推理, 得到 ΔK_p 、 ΔT_i 、 ΔT_d ; 5) 计算实时 PID 参数: $K_p = K_{p0} + \Delta K_p$, $T_i = T_{i0} + \Delta T_i$, $T_d = T_{d0} + \Delta T_d$; 6) 根据 PID 控制算法计算输出控制量 $u(t)$, 调节电枢电压, 控制电机转速; 7) 重复步骤 2-6, 实现转速的闭环自适应控制, 直到转速稳定在给定值附近。

3 仿真与实验验证

(1) 仿真实验验证: 为验证优化方案的有效性, 采用 MATLAB/Simulink 搭建直流电机转速控制仿真模型, 分别对传统 PID 控制和模糊自适应 PID 控制进行仿真对比。仿真参数设置如下: 直流电机电枢电阻 $R_a = 0.5 \Omega$, 电枢电感 $L_a = 0.002H$, 反电动势系数 $K_e = 0.1V \cdot s/rad$, 转矩系数 $K_t = 0.1N \cdot m/A$, 转动惯量 $J = 0.01kg \cdot m^2$, 阻尼系数 $B = 0.05N \cdot m \cdot s/rad$; 转速给定值 $\omega_r = 1500r/min$, 负载转矩 T_L 在 0.1s 时由 $0.5N \cdot m$ 突变至 $1.0N \cdot m$, 模拟负载扰动。仿真结果显示, 经过改进的模糊自适应 PID 控制器可以很好地改善系统的动态响应速度、抗干扰性, 减小转速超调量和稳态误差, 提高转速稳定性。

(2) 实物实验验证: 为了检验优化方案的效果, 设计直流电机转速控制实物实验平台。实验平台由直流电机、STM32 控制器、转速传感器、功率驱动模块、负载模块组成。直流电机选用额定电压 24V、额定转速 1500r/min 的直流有刷电机; 转速传感器用光电编码器, 精度为 1000 线, 实时采集电机转速; STM32 控制器是核心控制单元, 完成 PID 控制算法和模糊推理算法的运行; 功率驱动模块用 L298N 芯片, 接收到控制器输出的信号后调节电枢电压; 负载模块用磁粉制动器来调节

负载转矩。实验分为两组, 分别用传统 PID 控制和模糊自适应 PID 控制, 实验条件与仿真相同, 转速给定值为 1500r/min, 0.1s 时负载转矩从 $0.5N \cdot m$ 突然变为 $1.0N \cdot m$, 记录两组实验转速变化曲线和稳态误差。根据实验结果可知, 传统的 PID 控制组在负载突然变化之后, 转速从原来的 1380r/min 降低到 1492r/min, 波动范围是 $\pm 8r/min$; 而模糊自适应 PID 控制组在负载突然变化之后, 转速很快就从 1475r/min 降到稳态, 稳态转速为 1498r/min, 波动范围是 $\pm 2r/min$ 。

表 1 具体实验结果

控制算法类型	负载突变前稳态转速(r/min)	负载突变后稳态转速(r/min)	转速波动范围(r/min)	核心性能表现
传统 PID 控制	1492	1380	± 8	负载突增后转速骤降, 响应恢复速度慢, 稳态误差偏大, 转速波动幅度明显, 抗负载干扰能力较弱
模糊自适应 PID 控制	1495	1498	± 2	负载突增后转速快速回落至稳态, 稳态转速接近给定值, 波动幅度极小, 抗干扰能力强, 控制精度显著提升

4 结论

传统 PID 控制由于参数固定, 不能适应负载扰动、参数漂移等工况的变化, 造成转速波动大、稳态误差大, 不能满足高精度转速控制的要求。模糊自适应 PID 控制把模糊控制同传统 PID 控制结合起来, 依靠对转速偏差及偏差变化率的即时反应来调节 PID 参数, 从而明显改善了系统的自适应水平和抗干扰性能。仿真和实验结果表明, 改进的控制策略比传统的 PID 控制方法转速超调量下降了 75%以上, 调节时间缩短了 50%以上, 稳态转速误差减少了 75%以上, 直流电机转速稳定性得到了很大的提高。

参考文献:

[1] 王文政, 钟亮民, 杨明鑫, 等. 电力消防机器人无刷直流电机转速自抗扰控制算法[J]. 微电机, 2025, 58(09): 31-37.
 [2] 赵美蓉, 张鑫鑫, 黄银国, 等. 陀螺电机转速稳定性对寻北影响及其稳速控制[J]. 纳米技术与精密工程, 2016, 14(02): 81-86.
 [3] 陈斌, 穆平安, 朱轩轩. 基于纹波电流的电机转速稳定性测试[J]. 信息技术, 2015, (06): 146-149.