

# 一种新型的基于 ADRC 的电池充电系统的控制方法

曾纬和 易欣 袁铭敏 王梓丞 李欣  
(国网北京市电力公司客服中心)

**摘要:** 电池充电过程中,其特性在较大范围内发生变换,传统的控制方法会引起充电系统的效率、稳定性、动态特性等的衰减。针对这些问题,提出了一种应用于电动汽车充电系统的新型自抗扰(ADRC)控制方法,通过采用 ADRC 控制,结合 NPID 控制策略,在系统中引入扩张状态观测器,观测系统的输出状态及扰动,通过状态观测器扰动补偿,保证系统输出的稳定性,同时在控制器中引入 NPID 控制,从而最大程度消除过度的暂态和强干扰性。本研究将 ADRC 控制与 NPID 控制策略相结合,形成一种新型复合型 ADRC 控制,保证了充电系统在宽范围工况下的稳定高效运行。

**关键词:** 充电系统; ADRC; NPID; 鲁棒性; 瞬态性能

## 0 引言

当前世界一次能源的日益枯竭以及生态环境的日渐恶化,如何合理高效利用绿色能源、实现低碳生活已经成为现代电气工程领域的一个十分重要的研究方向。由于电动汽车的电驱动特性,其能量来自各种储能元件,避免了其对汽油、天然气等燃料的依赖,可以实现 CO<sub>2</sub> 的低排放甚至零排放,因此充电设施的完善成为实现整个产业绿色健康持续发展的重要保障<sup>[1]</sup>。

大功率的充电系统常采用电力电子装置,而电力电子设备作为强非线性系统,随着工作状态的变化,稳态工作点会随之变化,目前最为成熟的基于“平均法”的线性建模与控制方法将有所局限,系统往往会出现振荡以及不稳定现象,同时动力电池在充电过程中电压也会不断变化,对于采用大功率电力电子装置

的时变、强非线性充电系统,通过局部线性化方法获得的 PID 控制器在面对参数时变及非线性系统时,系统往往会出现振荡以及不稳定现象<sup>[2]</sup>。

针对这些问题,滑模控制<sup>[3]</sup>、鲁棒控制<sup>[4]</sup>以及自适应控制<sup>[5]</sup>被相继提出并应用于电器设备中,但类似的控制方法对于被控对象数学模型的准确性有着很大的依赖性,目前来说这些控制方法在线性系统所取得的成果较多,而时变非线性系统则成果偏少。对此,韩京清教授首先提出了一种新型非线性控制 ADRC (Active Disturbance Rejection Control),由于强鲁棒性以及不依赖系统模型的特点,不断有人将其应用到电气领域中。自抗扰控制技术作为非线性控制策略,将充电系统不确定的参数动态特性以及未知扰动作为被控对象的扩张状态,设计扩张状态观测器来估计影响系统稳定

输出的总扰动，进而进行过程补偿，使闭环系统达到稳定<sup>[6]</sup>。综合 ADRC 优良的控制性能，将其引入充电系统研究领域就成了很自然的选择。

### 1 传统 ADRC 控制原理

一般而言，自抗扰控制（ADRC）器由三个部分组成，分别是非线性跟踪微分器（TD）、扩张状态观测器（ESO）和非线性状态误差反馈控制律（NLSEF），其原理图如图 1 所示。首先，TD 用来实现对系统输入信号的快速无超调跟踪；其次自抗扰控制器把系统自身模型的不确定性当作系统的内扰，将内扰和系统的外扰一起看作整个系统的扰动，不区分内扰和外扰而直接检测它们的综合作用来作为系统的总扰动，通过 ESO 对系统的状态和扰动分别进行估计。ESO 把有未知外扰的非线性不确定对象用 NLSEF 引入反馈调控，最后充分利用获得扰动分量的补偿作用，得到快速平稳的输出效果<sup>[7]</sup>。这种控制方法不依赖于描述对象的具体数学模型和外扰的具体形式，因此它既能补偿系统内部参数及模型的扰动，也能有效地抑制外扰，所以称该控制器为“自抗扰控制器”，它具有很好的鲁棒性。自抗扰控制器的具体原理简述：利用 TD 和 ESO 分别处理参考输入和系统输出，并选择适当的状态误差的非线性组合获得系统的 NLSEF，从而得到控制器的输出量。

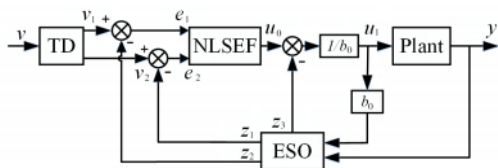


图 1 传统型 ADRC 理论框图

### 2 优化型自抗扰控制原理

通过对充电系统进行扩张，设计扩张状态观测器，观测系统输出状态并估计影响充电系统输出的总

扰动，通过过程补偿，抵消扰动干扰，由被控对象系统特性设计控制器的控制参数，根据非线性 PID 控制思想，构造 NPID（Nonlinear Proportional Integral Derivative）控制函数，使得控制回路在面对较低的误差信号时，可以选择有限的高增益，保证快速性；在面对大误差信号情况时，选择低增益，抑制超调。这个算法很容易消除过度的暂态和强干扰性，保证所研究的充电系统具有较好的稳定性与动态性能。其控制框图如图 2 所示，微分跟踪器 TD 跟踪电压参考量，引入过渡过程，减小初始超调量，将输出跟踪量和状态扩张观测器的  $z_1$  和  $z_2$  输出量送入 NPID 控制器中，进行误差调整，随后由扩张观测器  $z_3$  进行扰动补偿，最终输出控制信号。

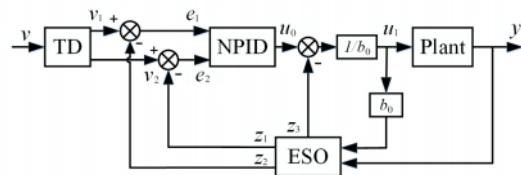


图 2 优化型 ADRC 理论框图

### 3 ESO 状态观测器设计

对于非线性系统进行扰动扩张，设计扩张扰动的扩张状态观测器，观测外界不确定干扰以及充电系统电压不稳情况下产生的输出影响，将其归结为总扰动，通过控制系统总扰动补偿，抵消干扰，实现充电系统稳定输出。

对于二阶系统：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

观测器可对状态  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  进行很好的跟踪，如果把非线性函数  $f(x_1, x_2)$  扩充成新的状态  $x_2(t)$ ，令  $x_3(t) = f(x_1(t), x_2(t))$ ，记  $\dot{x}_3(t) = \varphi(t)$ ，则原系统可以扩张成一个新的控制系统：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu \\ \dot{x}_3 = \varphi(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $x_1, x_2$  为系统状态;  $y$  为系统输出;  $u$  为最终控制量。  $\omega(t)$  记为外扰,  $f[x_1, x_2, \omega(t), t]$  为系统总扰动, 对被扩张的系统建立状态观测器:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 \text{fal}(e, 0.5, \delta) \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 \text{fal}(e, 0.25, \delta) + bu \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $e$  为系统电压输出  $y$  与观测器观测电压输出值  $z_1$  的误差, 通过误差调整, 保证观测器观测的准确性;  $z_2$  为观测器对系统输出微分的跟踪量;  $z_3$  则为扩张状态观测器的扰动观测量, 即系统的扰动估计值;  $\text{fal}$  为非线性函数。

状态扩张观测器通过观测两个输入值: 系统电压输出值和控制量, 输出三个观测值。式中,  $z_1$  和  $z_2$  参与到 NPID 控制中;  $z_3$  则用在扰动补偿中, 补偿系统的总扰动量。

所述观测器进行离散化, 得到离散系统:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ z_1 = z_1 + h(z_2 - \beta_1 e) \\ z_2 = z_2 + h(z_3 - \beta_2 \text{fal}(e, 0.5, \delta)) \\ z_3 = z_3 - h\beta_3 \text{fal}(e, 0.25, \delta) \end{cases} \quad (4)$$

#### 4 NPID 控制率设计

作为最早期发展起来的控制方法, PID 算法简单、鲁棒性好、可靠性高, 用于可建立精确数学模型的确定性控制系统中, 但由于其基于平均线性化的建模方法使得其作为线性控制策略无法满足目前的强非线性系统的最优控制, 同时纯线性的 PID 控制器具有快速性与稳定性之间的矛盾性<sup>[8]</sup>。但作为目前使用最广泛的控制策略, 在兼顾 PID 控制用途广泛、适应性强的优势情况下使用非线性 PID 控制很有意义。

传统 PID 控制通过比例、积分和微分三个环节线

性组合来对系统进行误差调控, 即:

$$u(s) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d de(t) / dt \quad (5)$$

由于传统 PID 控制中固定的控制参数, 导致其线性控制过程中受到数学模型的限制, 无法随被控对象系统状态做出相应调整, 导致传统 PID 在实际控制中存在输出稳定性和动态性能之间的矛盾性。同时传统 PID 在电子元件控制过程中面对参考给定突变时, 由于输出无法跳变, 致使实际控制过程会产生很大的超调, 影响输出品质。

而本研究中的非线性 PID 在面对较低的误差信号时, 可以自动选择有限的高增益, 保证快速性; 在面对大误差信号情况时, 自动选择低增益, 抑制超调。同时 ADRC 控制中 TD 会自动引入过渡过程, 柔化参考给定突变过程, 有效削减突变过程的大超调。因此这种新型算法可以很容易消除过度的暂态和强干扰性。

本研究非线性 PID 控制律的表现形式:

$$u = K_p G_p(e) + K_i \int G_i(e) dt + K_d G_d(-\dot{y}, \delta_d) \quad (6)$$

对于 NPID 的比例控制环节, 比例系数  $K_p$  可提高系统响应速度, 但很容易产生超调。想要实现既快速又稳定调节的目的, 就必须在远离稳定值时, 比例系数的绝对值足够大, 而在稳定值附近时, 比例系数的绝对值又应该足够小。

对于 NPID 的积分控制环节, 其主要目的是用来消除系统稳态误差。如果其系数过大会降低动态响应速度。所以, 面对大误差输入时, 需要  $K_i$  自动变小, 以避免系统产生震荡, 有利于减小超调量; 而在输入误差信号偏小时, 需要自动增大  $K_i$ , 以尽快消除系统的静态误差。

对于 NPID 的微分控制环节, 微分系数  $K_d$  可以抑制超调量, 能起到提前校正系统的作用, 但是同时会使系统产生震荡。为了削减这种动态矛盾性, 在微分环节微分偏差符号与比例环节误差符号相同时, 为

保证快速性， $K_d$  应逐渐减小；偏差的符号变反时，增大  $K_d$ ，从而可以增大反向控制作用以减小超调。

基于上述控制原理，NPID 基于比例积分微分项的具体非线性控制率可以设计为：

比例控制项：

$$K_p \times G_p(e) \quad (7)$$

$$G_p(e) = \begin{cases} K_{p2} \times e + (K_{p1} - K_{p2}) \times \delta_p \times \text{sign}(e) & |e| > \delta_p \\ K_{p1} \times e & |e| \leq \delta_p \end{cases}$$

积分控制项：

$$\begin{cases} K_i \times \int G_i(e) dt & G_i(e) \times e \geq 0 \\ K_i \times 0 & G_i(e) \times e < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$G_i(e) = \begin{cases} K_{i2} \times e + (K_{i1} - K_{i2}) \times \delta_i \times \text{sign}(e) & |e| > \delta_i \\ K_{i1} \times e & |e| \leq \delta_i \end{cases}$$

微分控制项：

$$K_d \times G_d(-\dot{y}, \delta_d) \quad (9)$$

$$G_d(-\dot{y}) = \begin{cases} K_{d2} \times (-\dot{y}) + (K_{d1} - K_{d2}) \times \delta_d \times \text{sign}(-\dot{y}) & |\dot{y}| > \delta_d \\ K_{d1} \times (-\dot{y}) & |\dot{y}| \leq \delta_d \end{cases}$$

### 5 仿真结果

图 3 位为加入阶跃干扰时，传统 PID 和优化型 ADRC 控制策略输出响应比较，图 4 为参考给定出现突变时传统 PID 和优化型 ADRC 控制策略输出响应比较。可以明显看出，在响应初期 ADRC 无论是在超调抑制还是瞬态性能方面均优于 PID 控制。在加入阶跃扰动后，ADRC 在短时间内实现平稳输出，同时系统超调明显优于 PID 控制。

在加入参考突变后，ADRC 控制以最快的速度调整

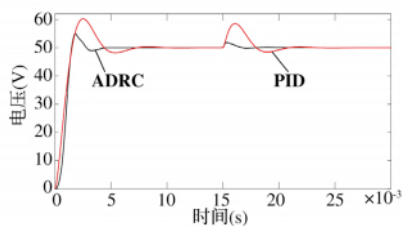


图 3 参考给定突变，输出效果比较

输出状态，在系统瞬态调整和稳定性方面实现了双优。

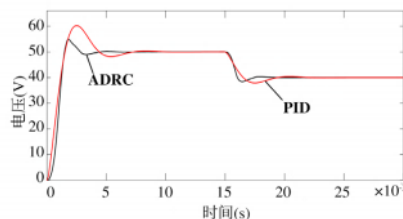


图 4 参考给定突变，输出效果比较

### 6 结束语

针对传统的基于局部线性化 PID 控制，在传统强鲁棒性 ADRC 控制的基础上，提出一种新型复合型 ADRC 控制算法，进行了输入参考和阶跃扰动仿真测试。仿真结果表明，所设计控制器具有较强抗干扰性，系统较高的鲁棒性和瞬态性能，很大程度地改善传统 PID 稳定性与瞬态性能的矛盾性。

### 参考文献

- [1] 唐荣鑫. 关于纯电动汽车问题分析及优化研究 [J]. 汽车电器, 2023 (11): 21-22, 26.
- [2] Gao Z, Huang Y, Han J. An alternative paradigm for control system design[C]. Decision and Control, 2001. Proceedings of the, IEEE Conference on. IEEE, 2001: 4578-4585.
- [3] 张世欣, 皇金锋, 杨艺. 基于平坦理论的直流微电网双向 DC-DC 变换器改进滑模自抗扰控制 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51 (5): 107-116.
- [4] 张圆圆, 龚仁喜, 刘剑锋. 三相交错并联 DC-DC 变换器的模糊高阶滑模控制 [J]. 控制理论与应用, 2023, 40 (3): 565-573.

(下转第 36 页)

(上接第 31 页)

- [5] 李浩东, 肖伸平, 余锦. 基于自适应 PSO 的微电网双向 DC-DC 变换器前馈自抗扰控制 [J]. 电机与控制应用, 2023, 50 (2): 73-81.
- [6] 韦为, 吴艳, 李芳, 等. 基于改进自抗扰的四旋翼无人机轨迹跟踪控制 [J]. 电工电能新技术, 2023, 42 (5): 1-13.
- [7] 吴丹, 侯利民, 王巍, 等. 基于滑模自抗扰控制的开关磁阻电机调速系统 [J]. 制造业自动化, 2023, 45 (1): 135-139.
- [8] 陈旭, 杨振波. 基于非线性 PID 的列车速度控制 [J]. 现代信息技术, 2021, 5 (8): 38-41.

**(收稿日期: 2023-12-29)**