

同濟大學

《电力电子与运动控制》课程设计报告



实验名称	双闭环直流调速系统中的限幅问题
------	-----------------

开课学期	2019-2020 学年第 2 学期
------	--------------------

学 院	电子与信息工程学院
-----	-----------

专 业	自动化
-----	-----

学生姓名	石卓凡
------	-----

学 号	1751051
-----	---------

报告摘要

本报告的研究对象是转速、电流双闭环控制的直流调速系统，研究主题是 ASR 和 ACR 的限幅问题，研究方法是软件仿真，仿真工具是 MATLAB Simulink。研究的目的是为今后的双闭环直流调速系统的仿真提供参考。本课程的教材着重讨论了 ASR 和 ACR 在起动过程中的状态变化，以及 ASR 和 ACR 的参数整定方法（工程设计法），但是并没有强调 ASR 和 ACR 具体的限幅方式。

报告主要讨论采用不同的限幅值以及限幅方案时，ASR 和 ACR 的状态对于调速结果的影响。报告中，ASR 和 ACR 均采用 PI 调节器。基于教材仿真实验中的电机模型，讨论了四种可以在 Simulink 中实现的限幅方式，并通过进行一系列的对比观察，分析了不同限幅值、不同限幅方案下发生不同现象的原因，并得到了 ASR 和 ACR 合理的限幅方案、限幅值，以及其他一些相关的结论。

需要说明的是，本报告是从 Simulink 仿真的角度来讨论不同的限幅方式的实现，并对比不同的限幅方式，而不是讨论硬件上的限幅方式的实现。但是，仿真上不同的限幅方式的确可以用不同的硬件方式来实现。由于篇幅原因，限幅的硬件实现不是报告所要讨论的。

Keywords: 双闭环直流调速系统，限幅方案，限幅值，PI 调节器，仿真实现。

Contents

- 0. 引言：电机模型的搭建与仿真证明 3
- 1. ACR 和 ASR 均为 PI 调节器时的限幅问题 4
 - 1.1 ACR 和 ASR 的四种可能限幅方案 4
 - 1.2 ACR 的限幅值设置 6
 - 1.3 ACR 的限幅方案 12
 - 1.4 ASR 的限幅值设置 14
 - 1.5 ASR 的限幅方案 16
 - 1.5.1 ASR 的第一二种限幅方案 17
 - 1.5.2 ASR 的第三四种限幅方案 21
- 2. 实验结论 26

0. 引言：电机模型的搭建

仿真实验环境：Windows 10，MATLAB R2020a Simulink

为了仿真和原理分析的合理性，本报告采用的研究对象是教材《电力拖动自动控制系统——运动控制系统》第 3.4 节的直流电动机模型。

直流电动机的参数为：额定电压 $U_N = 400V$ ，额定电流 $I_{dN} = 52.2A$ ，额定转速 $n_N = 2610r/min$ ，反电动势系数 $C_e = 0.1459V \cdot min/r$ ，允许过载倍数 $\lambda = 1.5$ ；PWM 变换器开关频率 $f = 8kHz$ ，放大系数 $K_s = 107.6$ ；电枢回路总电阻 $R = 0.368\Omega$ ；电枢回路电磁时间常数 $T_l = 0.0144s$ ，电力拖动系统机电时间常数 $T_m = 0.18s$ ；额定转速时的给定电压 $U_n^* = 10V$ ，

因此转速反馈系数设置为 $\alpha = \frac{U_n^*}{n_N} = \frac{10}{2610} \approx 0.00383V \cdot min/r$ 。

教材第 3.4 节和第 4.5 节针对此电机模型分别进行了转速闭环和双闭环的 Simulink 仿真，用 Universal Bridge 等 Blocks 分别搭建并封装了 PWM 模块、H 桥等部分。但是，为了更加直观地分析 ASR 和 ACR 对双闭环系统的影响，本报告采用如图 0-1 所示的动态结构图直接搭建仿真模型，这种实际动态结构经常用于工程设计法设计 ASR 和 ACR 的场合。

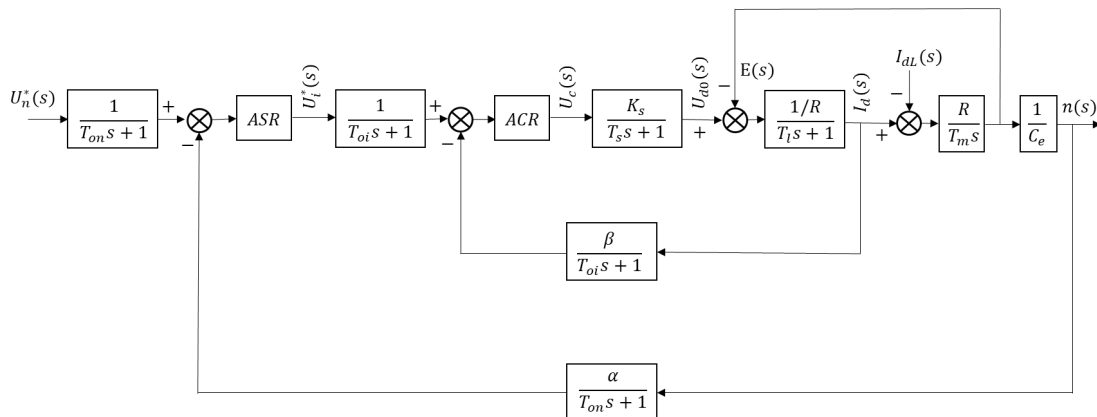


图 0-1 双闭环调速系统的动态结构图（工程设计法时）

工程设计法不是本报告的内容，这里直接利用教材第 4.3.4 节工程设计法设计的 ASR 和 ACR 进行仿真。教材例题 4-1 和 4-3 的 ACR 和 ASR 均为 PI 调节器，其传递函数分别为：

$$W_{ACR}(s) = 0.771 + \frac{53.542}{s}, \quad W_{ASR}(s) = 135.97 + \frac{2589.9}{s}$$

同时，依据例题，图 0-1 中的其他参数分别设置为

$$T_{on} = 0.01s, T_{oi} = 0.000125s, T_s = 0.000125s, \beta = \frac{U_{im}^*}{\lambda I_{dN}} \approx 0.1277V/A$$

由此，可得双闭环调速系统的 Simulink 仿真模型如图 0-2 所示。

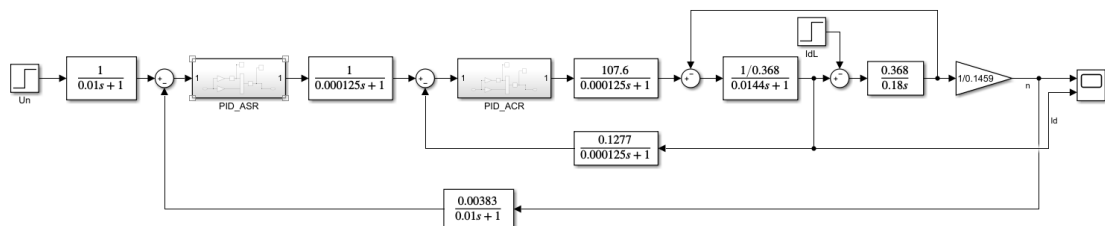


图 0-2 主要研究对象：双 PI 调节器时双闭环系统的 Simulink 仿真模型

该模型保存为 PID_ASR_PID_ACR.slx，其中阶跃 U_n 和 I_{dL} 的终值分别设置为 10 和 52.2，两个子系统 PID_ASR 和 PID_ACR 的结构（限幅方式）就是下一节将要讨论的内容。

1. ACR 和 ASR 均为 PI 调节器时的限幅问题

本节将以图 0-2 的仿真模型为基准，分别探究 ACR 和 ASR 的结构对双闭环直流调速系统的起动调速效果的影响。由于 ACR 和 ASR 均已被确定为 PI 调节器，且 PI 参数均已由工程设计法确定，因此本节实际上就是在讨论 ACR 和 ASR 中的限幅值和限幅方式的影响。

本节将会先给出对于 ACR 和 ASR 可能的四种限幅方案；之后，将开始讨论 ACR 的限幅值和限幅方式对系统起动调速性能的影响，并得到模型中 ACR 的一个合理的限幅值和限幅方式；在此基础上，将会接着讨论 ASR 的限幅值和限幅方式对起动调速的影响，并得到 ASR 的一个合理的限幅值和限幅方式。

1.1 ACR 和 ASR 的四种可能限幅方案

由于 ACR 和 ASR 均为 PI 调节器，二者都存在积分环节，因此必须为 ACR 和 ASR 设置饱和和限幅，以防止调速过程中出现的过大电流和过高转速损害电气设备和机械设备，造成安全隐患和经济损失。

Simulink 中 ACR 和 ASR 仿真的四种限幅方案如下：

- (1) 利用 Simulink 自带的 PID Controller 模拟 PI 调节器、Block Parameters 中的 Output Saturation 设置输出限幅，如图 1-1-1(a), (b)所示。

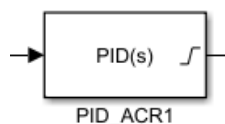
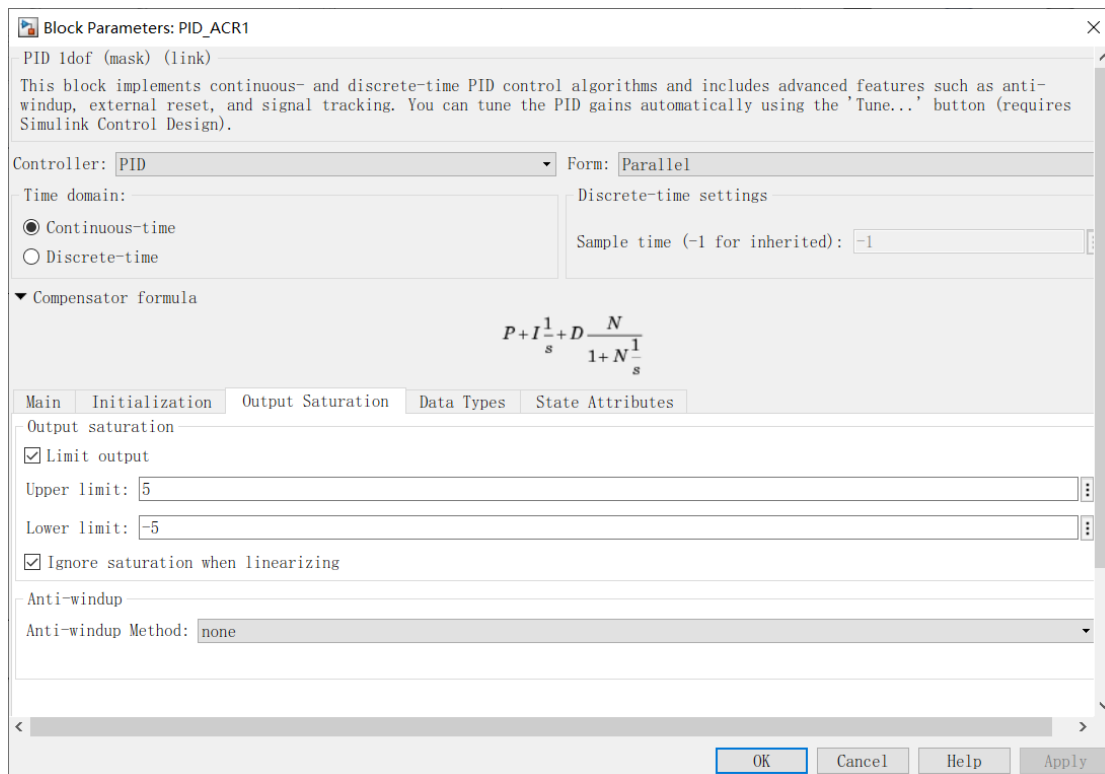


图 1-1-1 (a) 利用 PID Controller 仿真 PI 调节器

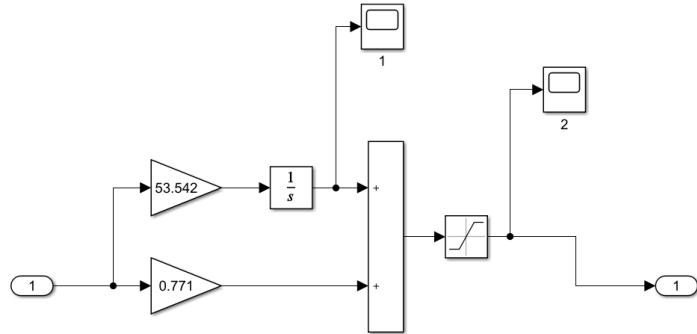


(b) PID Controller 中可以设置输出限幅

- (2) 用子系统封装 PI 调节器，仅在子系统的输出端口前利用 Saturation 对输出限幅，如图 1-1-2(a), (b)所示。



图 1-1-2 (a) 子系统封装 PI 调节器



(b) 仅在 PI 调节器输出前设置限幅

(3) 用子系统封装 PI 调节器，在积分环节后、子系统的输出前均利用 Saturation 对输出限幅，如图 1-1-3 所示。

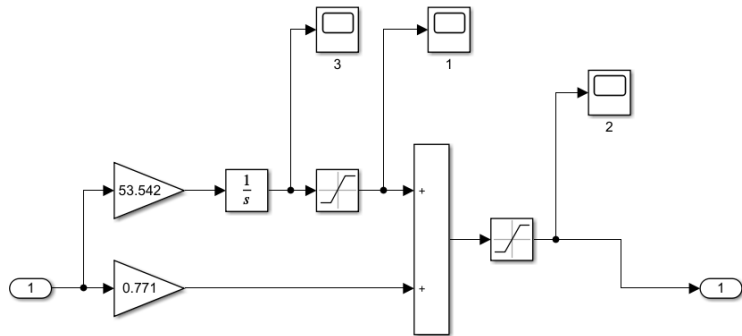


图 1-1-3 积分环节后、PI 调节器输出前均设置限幅

(4) 用子系统封装 PI 调节器，积分环节设置限制积分、子系统的输出前利用 Saturation 对输出限幅，如图 1-1-4 所示。

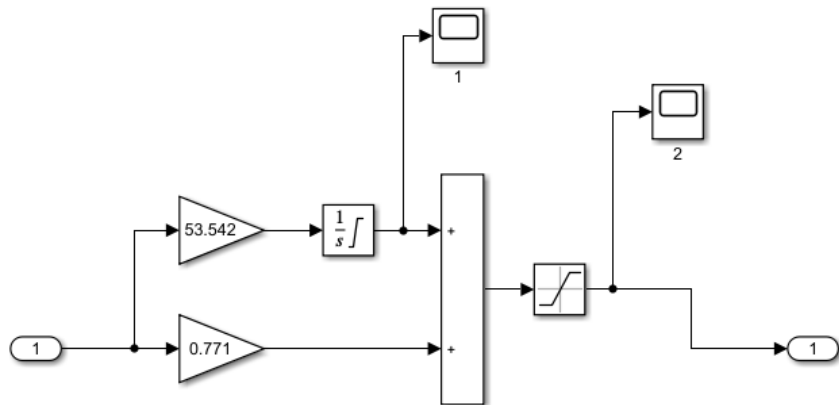


图 1-1-4 积分环节限制积分、PI 调节器输出均设置限幅

由¹/_s积分环节的 help 信息知，限制积分起到限量积分器的作用。当输出达到界限时，积分操作将关闭以防止积分饱和。

需要提前说明的是，事实上网络上的大量例程在用 PI 调节器作为 ACR 和 ASR 时，都

一致采用的是第四种限幅方式。但是目前据我所知，还没有文章解释过采取这种限幅方式的原因。实际上，针对图 0-2 的仿真模型，我已利用第四种限幅方式证明了这种限幅方式的可行性。为了达到控制变量的实验要求，排除其他干扰因素，在接下来的讨论中，第四种限幅方式将会默认为一种合理的限幅方法被经常用到。

除此之外，为了方便讨论，之后当采用第三种或第四种限幅方式时，总是将积分器的限幅值和 PI 调节器总输出限幅值设置成一致，如均设置为 $\pm 10V$ 。

1.2 ACR 的限幅值设置

本小节的仿真模型保存在 ACR_Saturation_01_05_2_3_5_None.slx 文件中。

本小节讨论 ACR 的限幅值设置，通过观察 ACR 限幅值不同时电机的起动调速能力，得到 ACR 可设置的合适的限幅值。为了排除其他干扰因素，在如图 0-2 所示的仿真模型的基础上，ASR 采取第四种限幅方式，且限幅值设置为 $U_{im}^* = \pm 10V$ ；ACR 也采取第四种限幅方式；之后除特殊情况外，电机均设置为满载起动， $I_{dL} = 52.2A$ ，给定电压 $U_n^* = 10V$ ，不再重复。

- (1) 如图 1-2-1，当 ACR 不设置限幅（相当于设置限幅值为 $\pm\infty$ ）时，示波器 1 和 2 的图像分别如图 1-2-2，1-2-3 所示。

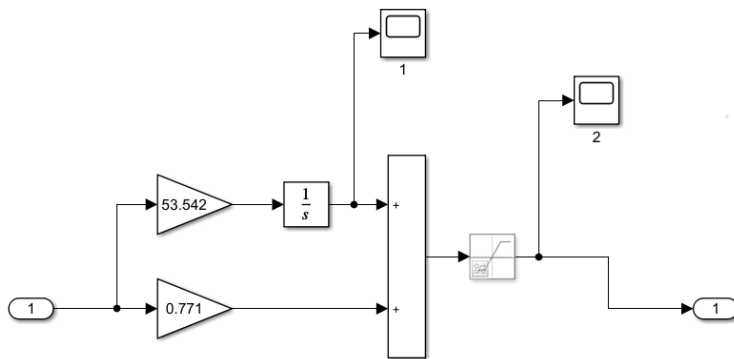


图 1-2-1 ACR 不限幅

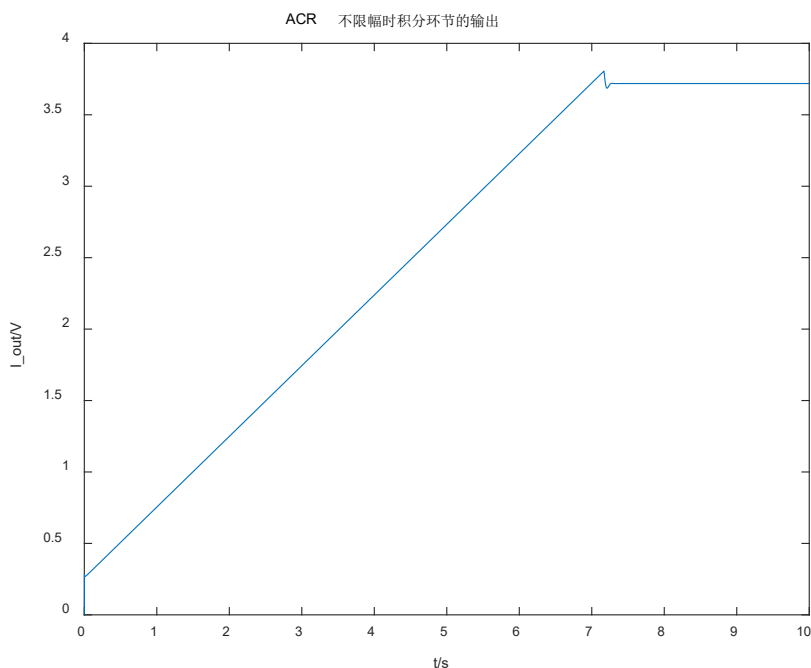


图 1-2-2 ACR 不限幅时积分环节的输出

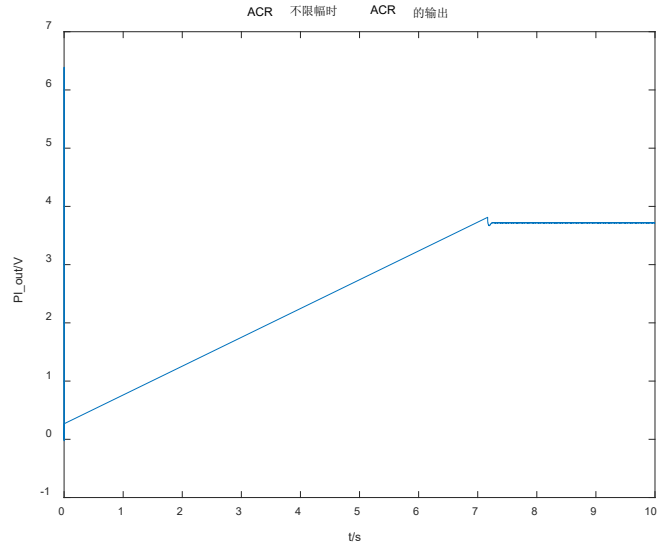


图 1-2-3 ACR 不限幅时 ACR 的输出

此时，系统的输出转速 n 如图 1-2-4 所示。由图 1-2-4 和图 1-2-5 可知，电机转速在线性上升结束后经历了一个很小的超调，之后稳定在 $2611r/min$ 。事实上，由图 1-2-6 可知，电机转速稳定在约 $2610.966r/min$ ，这与

$$n = \frac{U_n^*}{\alpha} = \frac{10}{0.00383} \approx 2610.966057r/min$$

在误差范围内可以被认为是一致的，因此造成电机无法稳定在 $2610r/min$ 的原因是转速反馈系数 α 存在误差，实际上在误差允许的范围内可以认为，电机已经实现了无静差调速。

电机转速约在 $t = 7.196s$ 达到峰值 $2617r/min$ ，此时超调量约为 $M_p \approx 0.23\%$ ，调节时间约为 $T_s \approx 7.25s$ 。

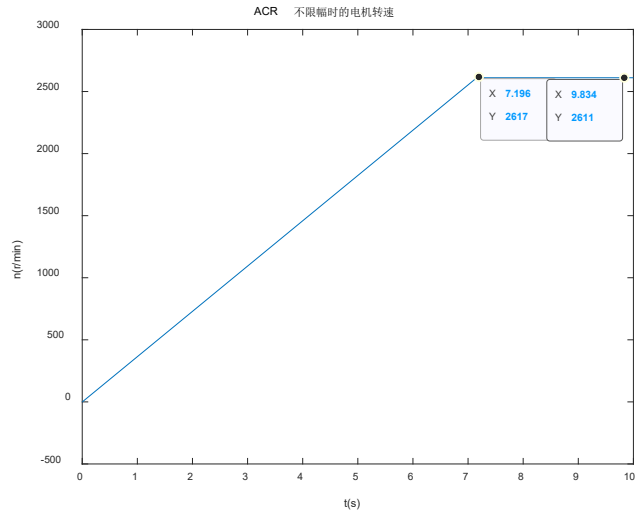


图 1-2-4 ACR 不限幅时的电机转速

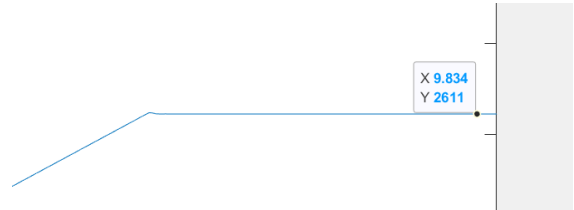


图 1-2-5 ACR 不限幅时的电机转速（放大截图）

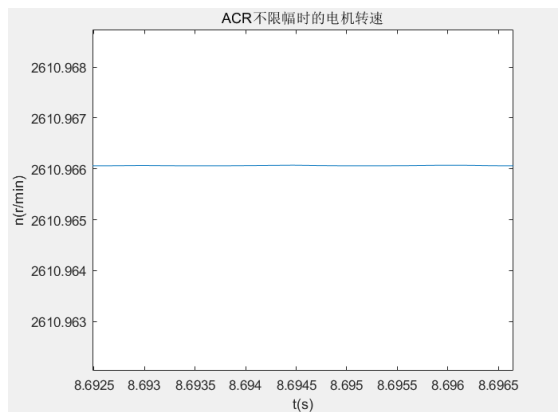


图 1-2-6 ACR 不限幅时的电机转速（放大截图）

系统的电枢电流 I_d 如图 1-2-7 所示。起动时，电枢电流在极短时间内达到一个峰值，然后立刻下降至 $78.24A$ ，在 $t = 7.1s$ 左右，电流迅速下降，经历一个极小值最后达到 $I_{dN} = 52.2A$ 。

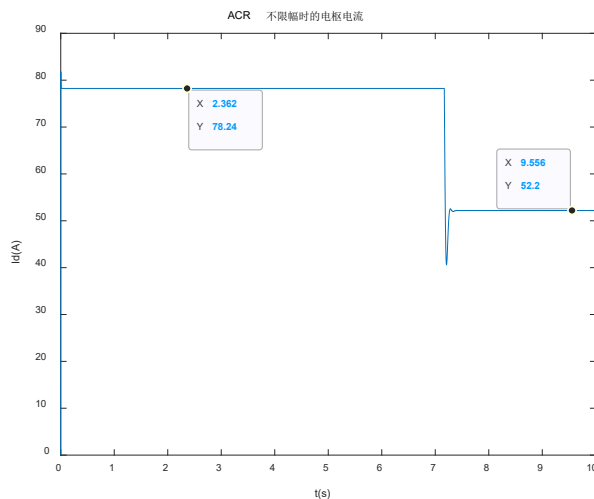


图 1-2-7 ACR 不限幅时的电枢电流

恒流升速阶段，电枢电流的恒定值 $78.24A$ 略小于 $I_{dm} = \lambda I_{dN} = 1.5 \times 52.2 = 78.3A$ ，这也是符合电流闭环系统无法做到抗扰无静差的特点的。

综上所述，当 ACR 不限幅时，电机经历了电流上升阶段、恒流升速阶段以及转速调节阶段，最终实现了双闭环的无静差调速。超调量很小，调节时间 $T_s \approx 7.25s$ 。

- (2) ACR 限幅值为 $\pm 5V$ 时，积分器的限幅输出和 PI 调节器的限幅输出分别如图 1-2-8 和图 1-2-9 所示。相比于无限幅时，此时 ACR 的输出在一开始达到饱和，但是随着 ACR 迅速退出饱和，ACR 之后的输出跟无限幅时没有区别。

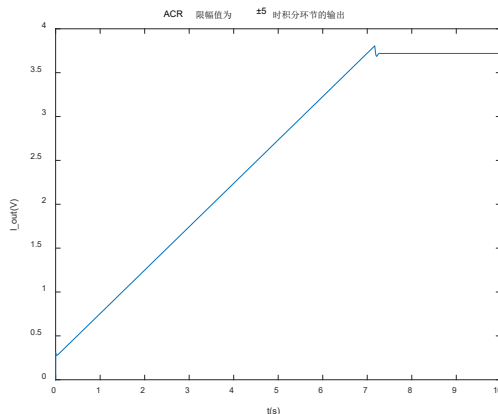


图 1-2-8 ACR 限幅值为 $\pm 5V$ 时积分环节的输出

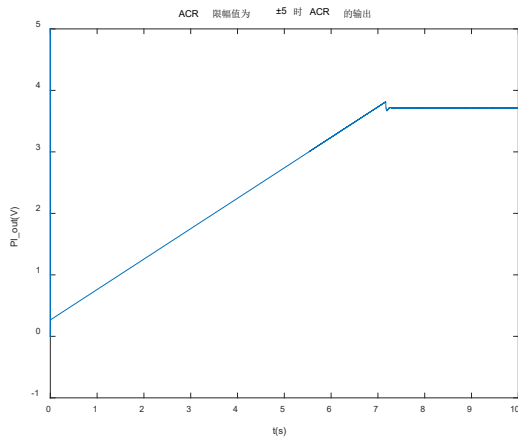


图 1-2-9 ACR 限幅值为 $\pm 5V$ 时 ACR 的输出

此时，系统的输出转速 n 如图 1-2-10 所示。由图 1-2-10 可知，电机转速在线性上升结束后经历了一个很小的超调，之后稳定在 $2611r/min$ ，电机实现了无静差调速。电机转速约在 $t = 7.203s$ 达到峰值 $2617r/min$ ，此时超调量约为 $M_p \approx 0.23\%$ ，调节时间约为 $T_s \approx 7.25s$ 。

系统的电枢电流 I_d 如图 1-2-11 所示。起动时，电枢电流在极短时间内达到一个峰值，然后立刻下降至 $78.24A$ ，在 $t = 7.1s$ 左右，电流迅速下降，经历一个极小值最后达到 $I_{dN} = 52.2A$ 。

综上所述，当 ACR 限幅值取 $\pm 5V$ 时，电机实现了无静差调速。超调量很小，调节时间 $T_s \approx 7.25s$ ，并且电机的起动表现跟 ACR 不限幅时的表现几乎完全一致，很难看出差别。

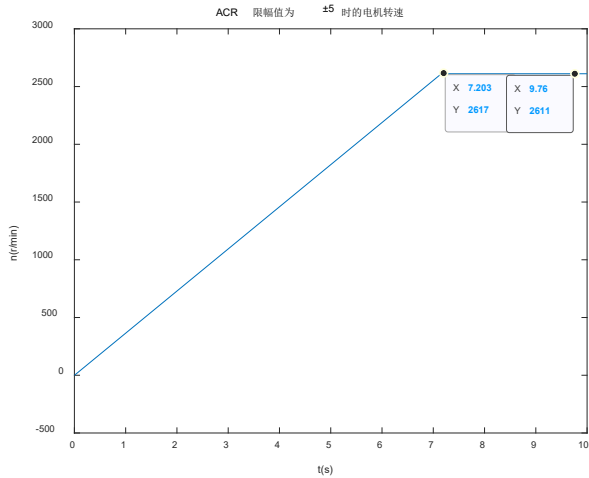


图 1-2-10 ACR 限幅值为 $\pm 5V$ 时的电机转速

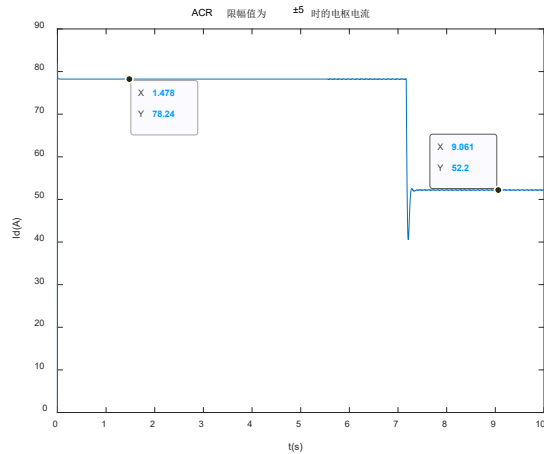
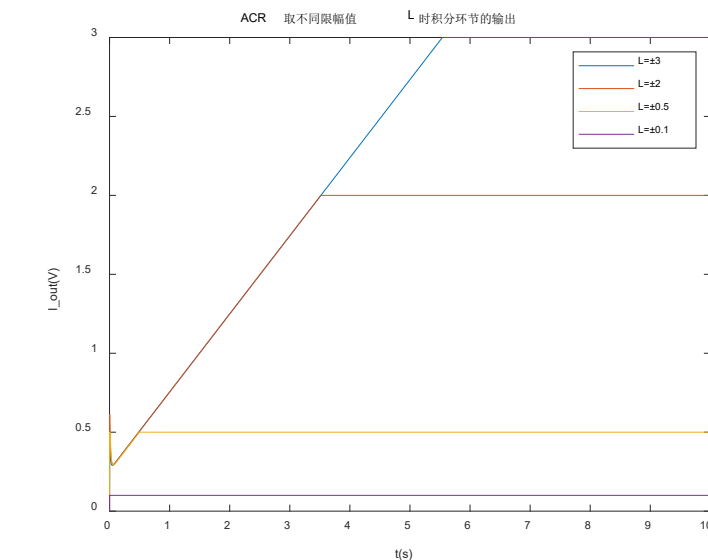
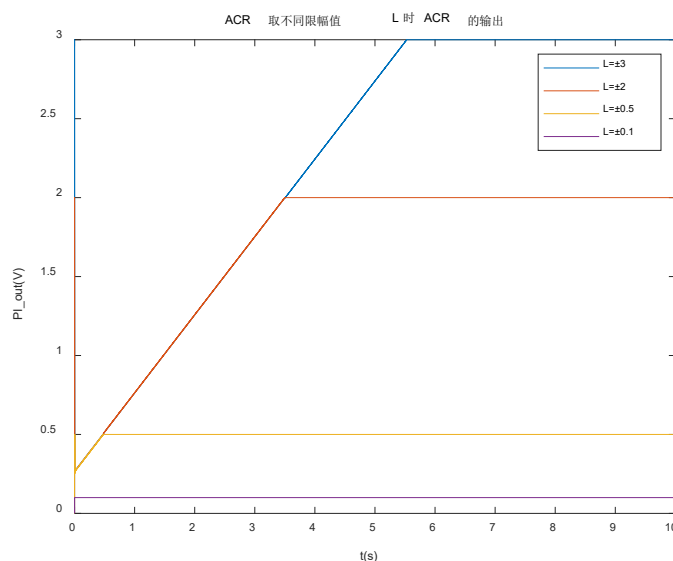


图 1-2-11 ACR 限幅值为 $\pm 5V$ 时的电枢电流

- (3) ACR 限幅值分别为 $\pm 3V, \pm 2V, \pm 0.5V, \pm 0.1V$ 时, 积分器的限幅输出和 PI 调节器的限幅输出分别如图 1-2-12 和图 1-2-13 所示。由图可知, 当 ACR 限幅值取以上四个值时, ACR 最终都会达到饱和。


 图 1-2-12 ACR 限幅值为 $\pm 3, 2, 0.5, 0.1V$ 时积分环节的输出

 图 1-2-13 ACR 限幅值为 $\pm 3, 2, 0.5, 0.1V$ 时 ACR 的输出

系统的输出转速 n 和电枢电流 I_a 分别如图 1-2-14 和图 1-2-15 所示。

当 ACR 的限幅值取为 $\pm 3V$ 时, 虽然调节时间变短, 但是电机已无法达到额定转速 $n_N = 2610r/min$, 电枢电流的变化显示电机仍然经历了电流上升阶段、恒流升速阶段以及转速调节阶段, 电枢电流的稳定值也是 $I_{dN} = 52.2A$;

随着 ACR 的限幅值越来越小, 调节时间越来越短, 电机最终达到稳定时的转速也在不断下降, 但是电枢电流仍然经历了相同的三个阶段并达到额定值;

当限幅值取为 $\pm 0.1V$ 时, 电机已经完全无法启动了, 电枢电流没有经历相同的三个阶段, 而是迅速上升并稳定在额定值 $52.2A$ 。

综上所述, 当 ACR 限幅值取 $\pm 3V$ 或者更低的值时, 电机已无法启动到额定转速, 并且限幅值越低, 稳定转速越小, 甚至无法启动; 但是电枢电流仍然可以达到额定值 I_{dN} 。

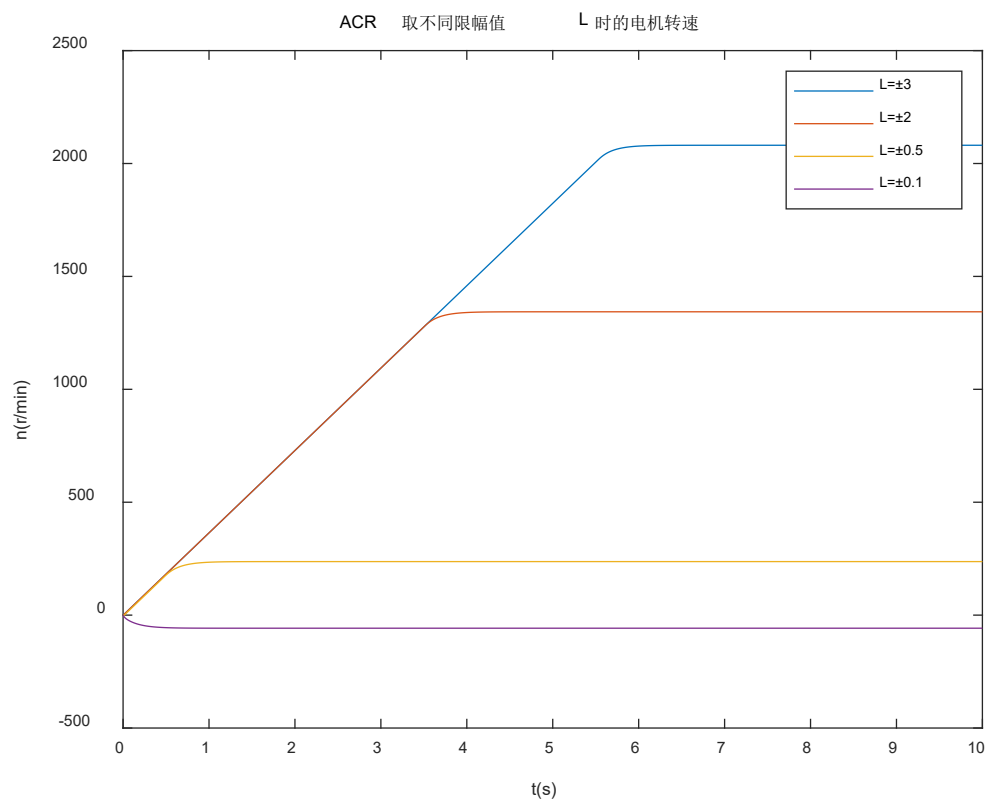


图 1-2-14 ACR 限幅值为 $\pm 3, 2, 0.5, 0.1V$ 时的电机转速

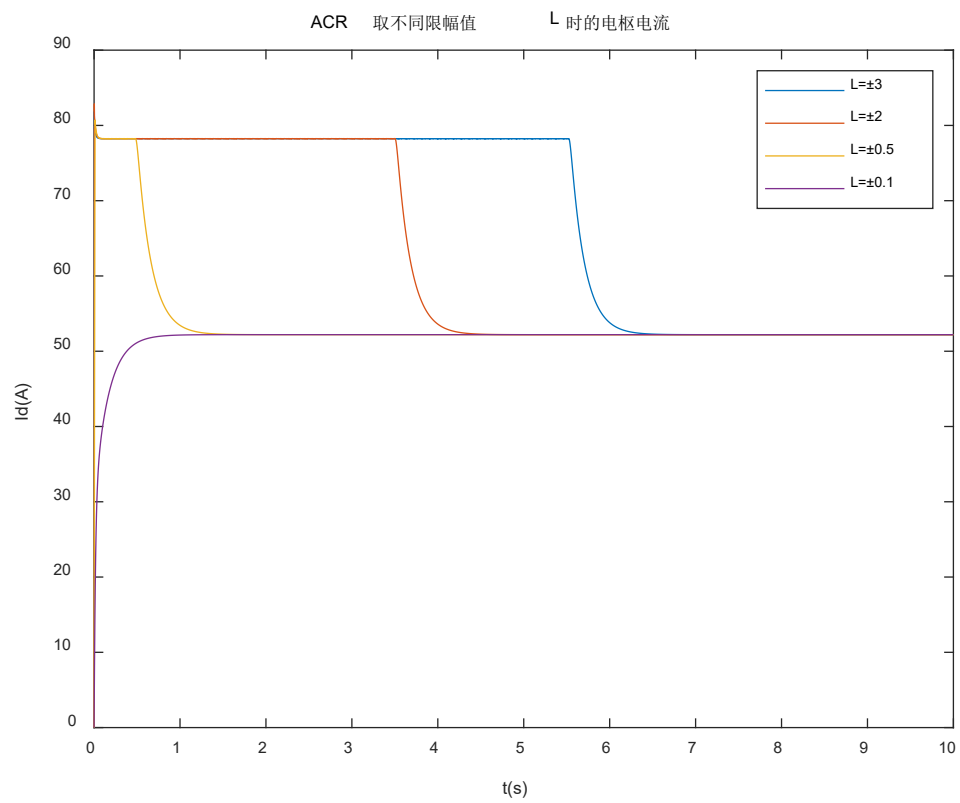


图 1-2-15 ACR 限幅值为 $\pm 3, 2, 0.5, 0.1V$ 时的电枢电流

(分析和结论)

当 ACR 限幅值为 $\pm 5V$ 时, 由图 1-2-9 知, ACR 的限幅输出在约 $t = 7.2s$ 到达峰值, 之后便稳定在约 $3.8V < 5V$, 即 ACR 的输出 U_c 始终未达到限幅值。因此, 此时系统之所以能实现无静差调速, 是因为 ACR 始终不饱和, 电流环能保持电流调节作用, 保证了电枢电流 I_d 的恒定, 使得恒流升速阶段中, 转速能够在 U_c 升至 $5V$ 前达到给定值 $n^* = 2610r/min$, 这符合双闭环直流调速系统起动过程的要求。

当限幅值为 $\pm 3V$ 时, 由图 1-2-13 知, ACR 的输出 U_c 在约 $t = 5.5s$ 时便达到 $3V$, 随即 ACR 进入饱和状态。由图 1-2-14 知, 转速 n 尚未达到给定值 n^* , 但是 ACR 已经饱和, 转速环和电流环均相当于开路, 因此 I_d 不再恒定并逐渐减小。因此 $t = 5.5s$ 时, 恒流升速阶段提前结束, 转速 n 未达到给定值 n^* , 无法实现无静差调速。

当限幅值更加小时, ACR 就会更快地达到饱和状态, 使得恒流升速阶段持续时间更短, 导致转速 n 的终值更小。当限幅值为 $\pm 0.1V$ 时, ACR 在 I_d 升至 I_{dL} 前就已饱和, 因此电机不会经历标准起动过程中的电流上升阶段和恒流升速阶段, 电机无法起动。

需要说明的是, ACR 不限幅时电机能实现无静差调速的现象符合理论分析, 但是不能表明 ACR 限幅是没有必要的。

由上述可知, 只要能保证在转速 n 达到给定值 n^* 之前, ACR 不饱和, 即 U_c 未达到限幅值, 那么就可以保证恒流升速阶段的正常结束, 从而实现电机起动的无静差调速。由图 1-2-3 可知, 能够实现无静差调速的最小限幅值约为 $3.7\sim 3.8V$, 这也符合理论推导: 当 ACR 采用最小限幅值并使电机最终达到额定转速的稳态工作时, 由于 ASR 和 ACR 都不饱和, 因此

$$U_c = \frac{U_{d0}}{K_s} = \frac{C_e n + I_d R}{K_s} = \frac{\frac{C_e U_n^*}{\alpha} + I_{dL} R}{K_s} = \frac{\frac{0.1459 \times 10}{0.00383} + 52.2 \times 0.368}{107.6} \approx 3.719V$$

因此理论上, 如图 0-2 所示的仿真模型中 ACR 的最低限幅值约为 $3.719V$; 对于其他直流电机, 也可以利用上述公式求出其对应的 ACR 最低限幅值。

1.3 ACR 的限幅方案

本小节的仿真模型保存在 ACR_4_Saturation.slx 文件中。

在第 1.2 节的基础上, 本节讨论 ACR 的限幅方案的择取。采用图 0-2 的仿真模型, ASR 取第四种限幅方案, 限幅值设置为 $\pm 10V$ 。

- (1) 当 ACR 限幅值取为 $\pm 5V$ 时, 分别采取四种限幅方案并绘制在同一幅图中, 则系统的输出转速 n 和电枢电流 I_d 分别如图 1-3-1 和图 1-3-2 所示。

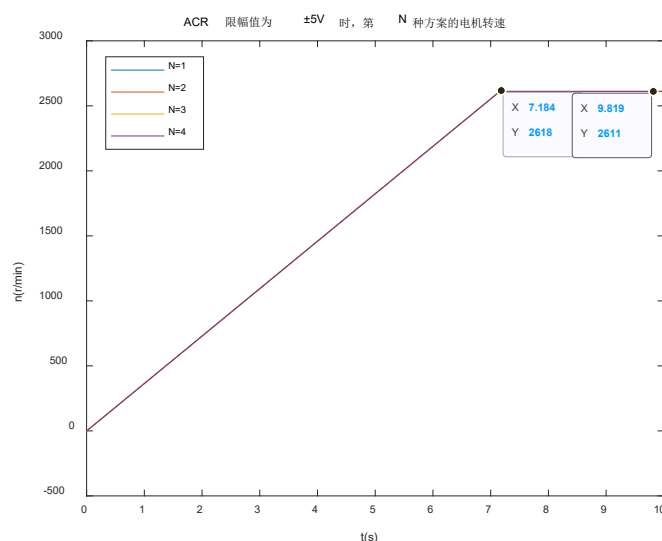


图 1-3-1 ACR 限幅值为±5V 时，第 N 种方案的电机转速

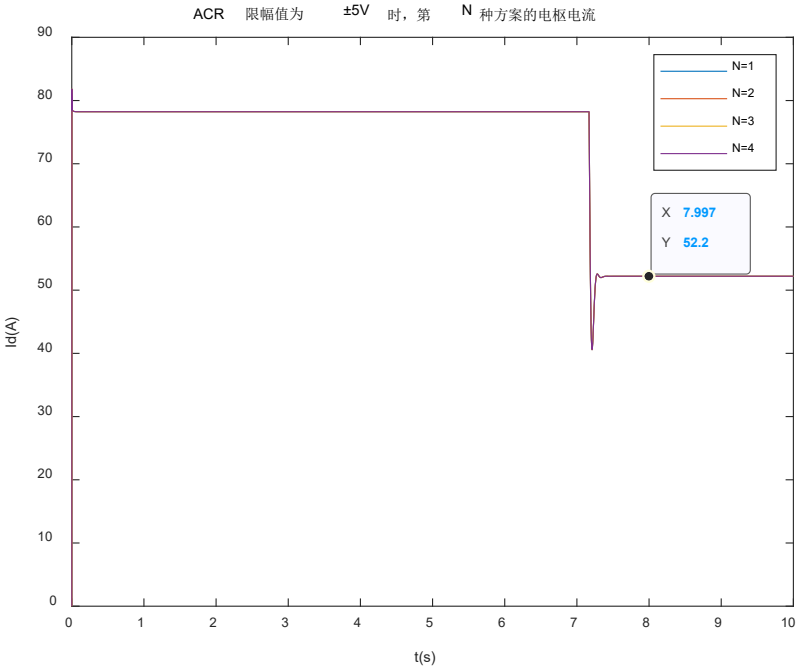


图 1-3-2 ACR 限幅值为±5V 时，第 N 种方案的电枢电流

由图可知,当 ACR 限幅值取为 $\pm 5V$ 时,四种限幅方案下系统的调速效果是完全相同的。电机转速约在 $t = 7.184s$ 达到峰值 $2618r/min$,超调量约为 $M_p \approx 0.27\%$;调节时间约为 $T_s \approx 7.25s$,最后稳定在 $2611r/min$,实现了无静差调速。起动时,电枢电流 I_d 在极短时间内达到一个峰值,然后立刻下降至 $78.24A$,在 $t = 7.1s$ 左右,电流迅速下降,经历一个极小值最后达到 $I_{dN} = 52.2A$ 。

(2) 当 ACR 限幅值取为 $\pm 3.8V$ 时,分别采取四种限幅方案并绘制在同一幅图中,则系统的输出转速 n 和电枢电流 I_d 分别如图 1-3-3 和图 1-3-4 所示。

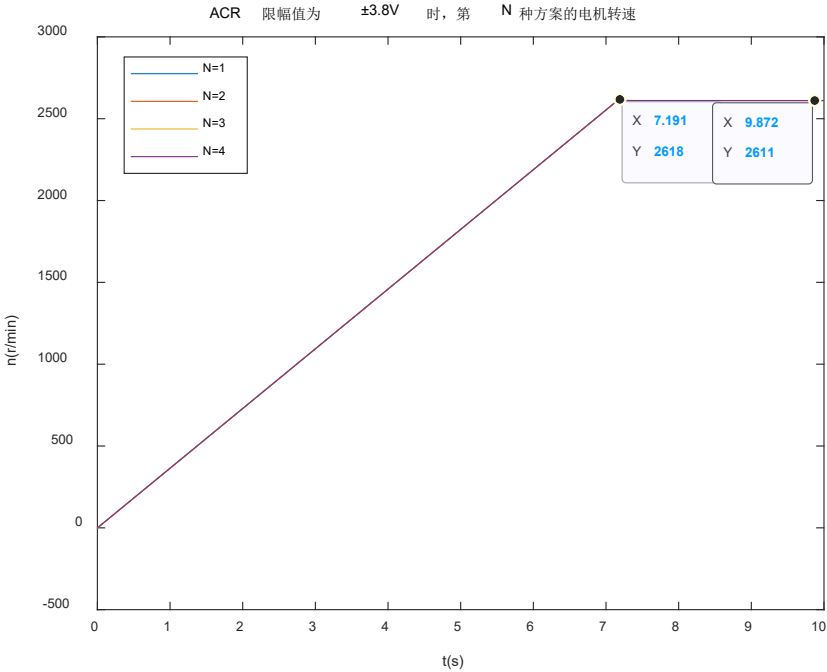
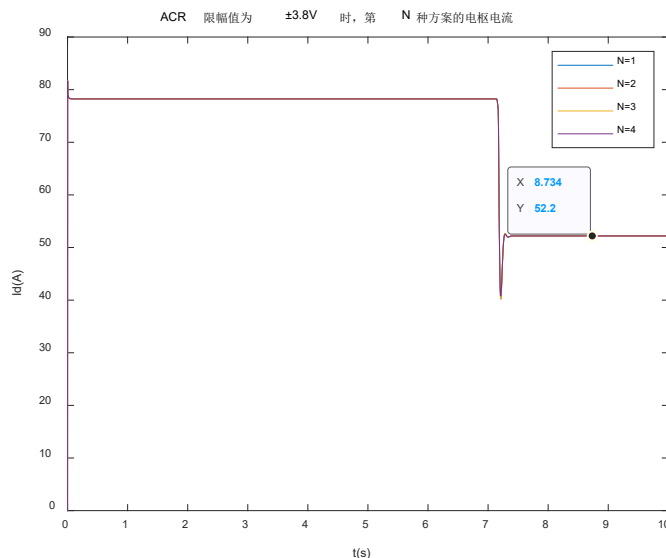


图 1-3-3 ACR 限幅值为±3.8V 时，第 N 种方案的电机转速


 图 1-3-4 ACR 限幅值为 $\pm 3.8V$ 时，第 N 种方案的电枢电流

由图可知，当 ACR 限幅值取为 $\pm 3.8V$ 时，四种限幅方案下系统的调速效果是完全相同的。电机转速约在 $t = 7.191s$ 达到峰值 $2618r/min$ ，超调量约为 $M_p \approx 0.27\%$ ；调节时间约为 $T_s \approx 7.25s$ ，最后稳定在 $2611r/min$ ，实现了无静差调速。起动时，电枢电流 I_d 也与图 1-3-2 完全一致，最终稳定在 $I_{dN} = 52.2A$ 。

（分析和结论）

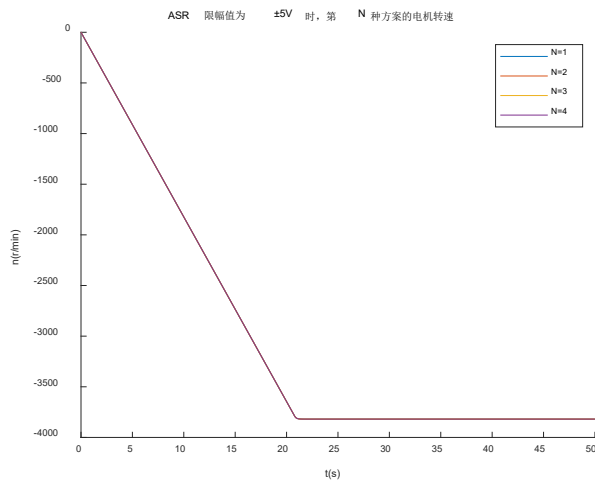
由于 ACR 在起动过程中要求始终不饱和，因此当 ASR 合理的情况下，只要保证 ACR 的限幅值高于最低限幅值，就可以保证在 ACR 达到饱和前，转速 n 能上升到给定值 n^* 。所以当 ACR 的限幅值设置合理时，无论采用四种限幅方案中的哪一种，都可以得到相同的起动调速效果，实现无静差调速。

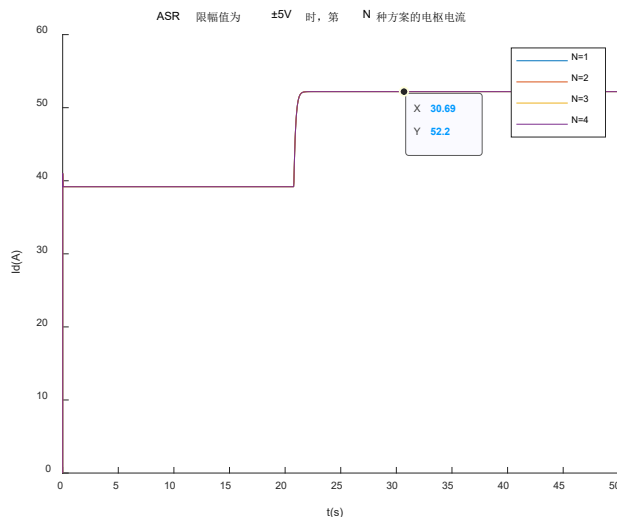
1.4 ASR 的限幅值设置

在第 1.3 节的基础上，讨论 ASR 的限幅问题。为了排除其他干扰因素，ACR 将始终采用第四种调速方案，并且限幅值设置为 $\pm 5V$ 。

本节讨论 ASR 的限幅值对起动调速效果的影响。

在 ASR_4_Saturation_5.slx 文件中，对 ASR 分别采用四种限幅方案，限幅值均设置为 $\pm 5V$ 。系统的输出转速 n 和电枢电流 I_d 分别如图 1-4-1 和图 1-4-2 所示。


 图 1-4-1 ASR 限幅值为 $\pm 5V$ 时，第 N 种方案的电机转速


 图 1-4-2 ASR 限幅值为 $\pm 5V$ 时，第 N 种方案的电枢电流

(分析和结论)

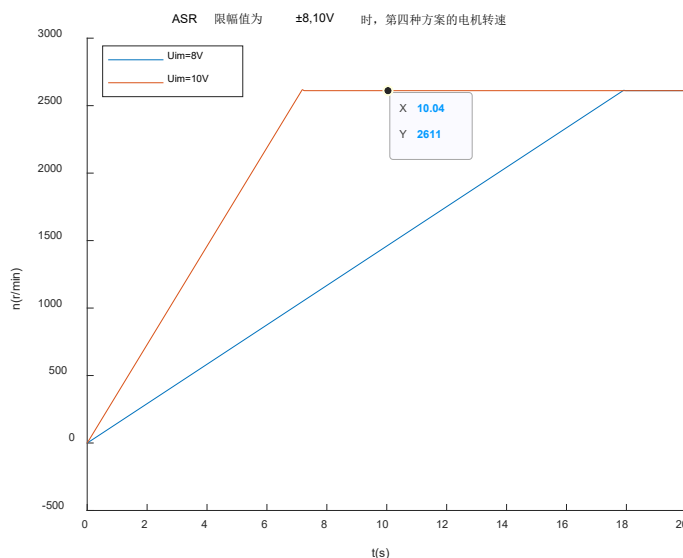
由图可知，当 ASR 限幅值取为 $\pm 5V$ 时，四种限幅方案下电机均不能起动。原因是 ASR 的限幅值过低，导致恒流升速阶段的电枢电流 $I_d \approx I_{dm} < I_{dL} = 52.2A$ ，如图 1-4-2 所示。因此对于 ASR 的限幅值，电机是否能起动的关键是看恒流升速阶段的电枢电流 I_d 是否大于 I_{dL} ，此时 $I_d = U_{im}^*/\beta$ ，其中 U_{im}^* 就是 ASR 的限幅值。

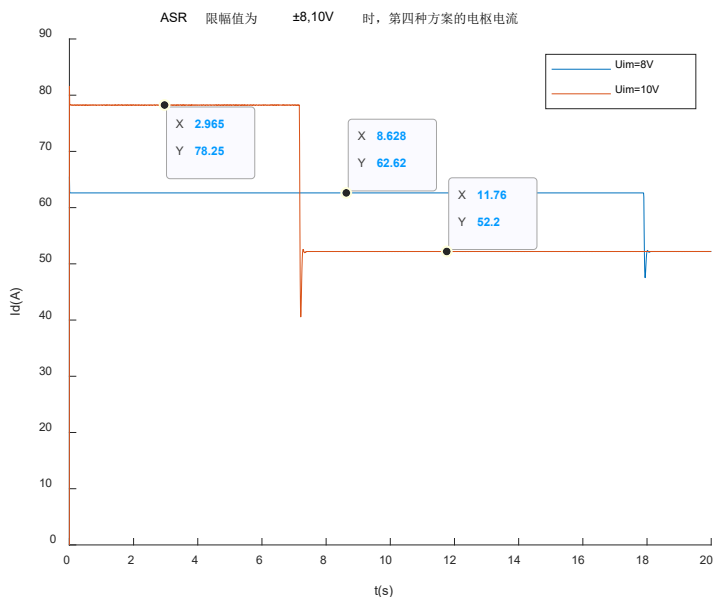
所以，ASR 的最小限幅值 $U_{immin}^* = \beta I_{dL} = 0.1277 \times 52.2 = 6.66594V$ ；同时，ASR 的最大限幅值 $U_{imax}^* = \beta \lambda I_{dL} = 0.1277 \times 1.5 \times 52.2 = 9.99891V \approx 10V$ 。

电机起动过程中，为了尽可能快地上升到给定转速 n^* ，恒流升速阶段的电枢电流 I_d 应尽可能大，因此 ASR 的限幅值 U_{im}^* 只取 $U_{immin}^* \approx 6.67V$ 是不合理的；但是 ASR 的限幅值 U_{im}^* 不能超过 $U_{imax}^* \approx 10V$ ，否则恒流升速阶段的电枢电流 I_d 就又可能超过电机允许的最大过载电流 λI_{dL} ，造成设备的损坏。故：

$$U_{immin}^* = \beta I_{dL} < U_{im}^* \leq U_{imax}^* = \beta \lambda I_{dL}, \quad U_{imbest}^* = U_{imax}^*$$

在 ASR_4_Saturation_8.slx 和 ASR_4_Saturation_10.slx 文件中，对于第四种限幅方案，限幅值分别取 $\pm 8V$ 和 $\pm 10V$ ，输出转速 n 和电枢电流 I_d 分别如图 1-4-3 和图 1-4-4 所示。


 图 1-4-3 ASR 限幅值为 $\pm 8, 10V$ 时，第四种方案的电机转速


 图 1-4-4 ASR 限幅值为 $\pm 8, 10V$ 时，第四种方案的电枢电流

由图可知，当限幅值分别取为 $\pm 8V$ 和 $\pm 10V$ 时，二者都可以实现无静差调速，但是前者的调节时间 $T_s \approx 18s$ 远长于后者 $T_s \approx 7.2s$ ，原因是在恒流升速阶段时，前者的电枢电流也小于后者。这是因为：

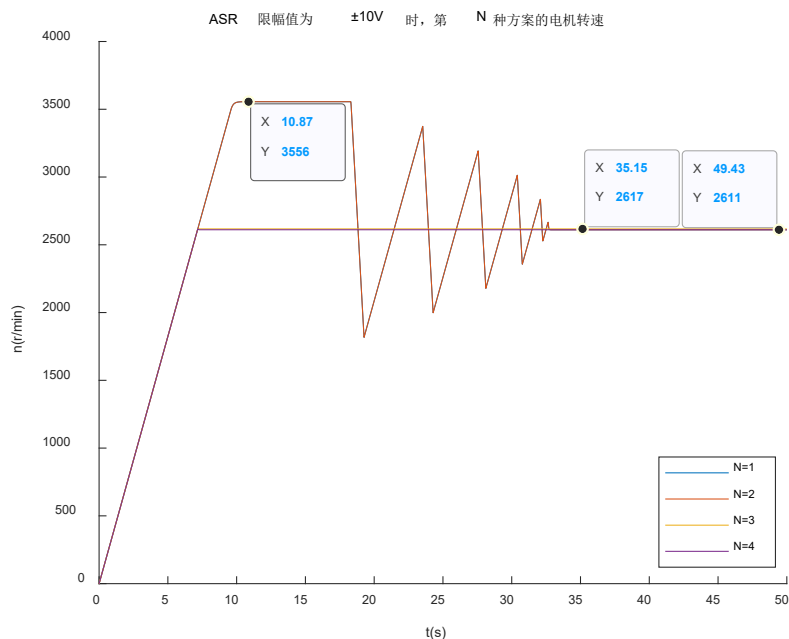
$$I_{dm_8V} = \frac{U_{im_8V}}{\beta} = \frac{8}{0.1277} \approx 62.65A, \quad I_{dm_10V} = \frac{U_{im_10V}}{\beta} = \frac{10}{0.1277} \approx 78.31A$$

而恒流升速阶段 I_d 略小于 I_{dm} ，因此，图 1-4-3 和图 1-4-4 是符合先前的分析的。

1.5 ASR 的限幅方案

在第 1.4 节的基础上，对 ASR 的四种限幅方案进行对比。ACR 选择第四种限幅方案，限幅值取 $\pm 5V$ ；ASR 限幅值取 $\pm 10V$ 。模型保存在 ASR_4_Saturation_10.slx 文件中。

四种限幅方案下的输出转速 n 和电枢电流 I_d 分别如图 1-5-1 和图 1-5-2 所示。


 图 1-5-1 ASR 限幅值为 $\pm 10V$ 时，第 N 种方案的电机转速

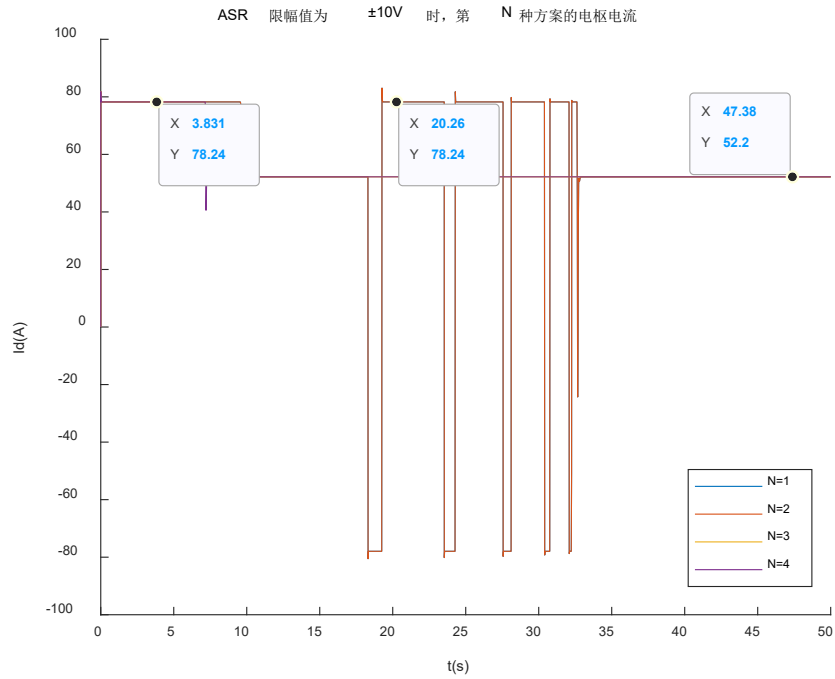


图 1-5-2 ASR 限幅值为 $\pm 10V$ 时, 第 N 种方案的电枢电流

由图可知, 不同于 ACR 在 1.3 节的结论, 当 ASR 限幅值满足要求时, 四种限幅方案中只有第四种能够实现合理的、较为理想的无静差调速。

第一二种限幅方案下, 转速首先上升并稳定在一个远高于额定转速的数值, 然后经历剧烈的上下振荡, 最后实现无静差调速, 电流经历多次正相和反相的恒流阶段, 最终才达到额定电流值;

第三种限幅方案下, 转速终值略高于额定值, 未实现无静差调速, 但电流达到了额定值;

第四种方案下, 转速存在微小超调 $M_p \approx 0.27\%$ 、较短的调节时间 $T_s \approx 7.25s$, 并实现了无静差调速, 电流达到了额定值。

以下对四种限幅方案的调速效果进行分析, 解释发生图 1-5-1 和图 1-5-2 的原因。

1.5.1 ASR 的第一二种限幅方案

第一二种限幅方案的输出转速 n 和电枢电流 I_d 如图 1-5-3 和图 1-5-4 所示。

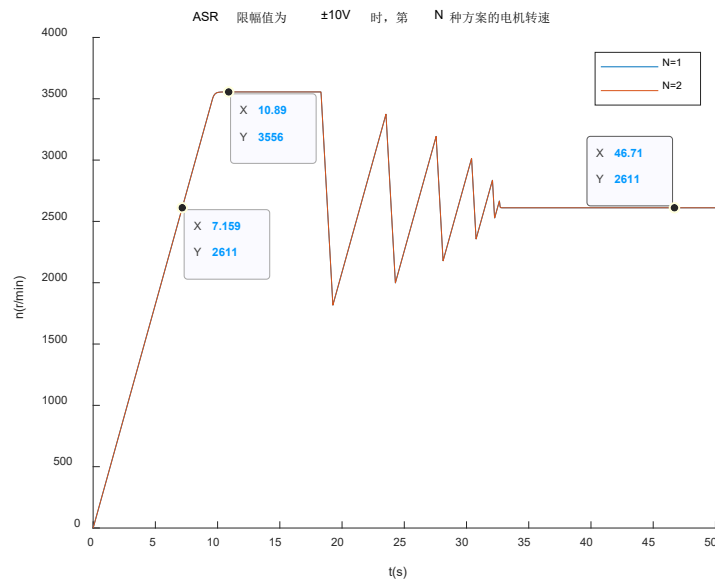


图 1-5-3 ASR 限幅值为 $\pm 10V$ 时，第一二种方案的电机转速

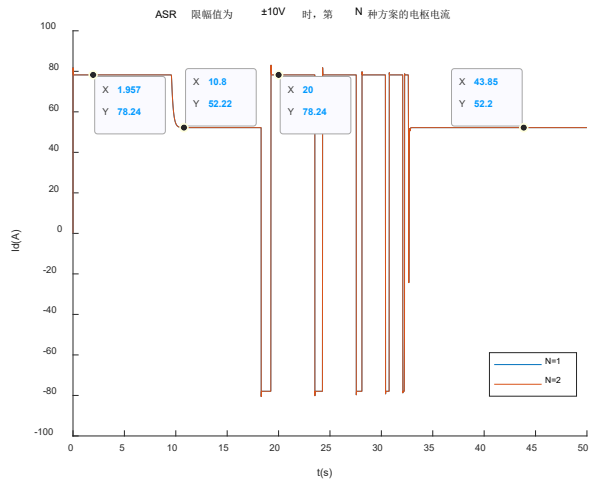


图 1-5-4 ASR 限幅值为 $\pm 10V$ 时，第一二种方案的电枢电流

由图知，转速 n 经历恒流升速阶段上升至 $n_m = 3556r/min$ （远大于 $n^* = 2610.966r/min$ ）；在 $t = 10.2 \sim 18.3s$ 期间，转速 n 恒定于 n_m ，电枢电流 I_d 下降并稳定于给定值 $I_{dL} = 52.2A$ ；在 $t = 18.3s$ ，转速 n 开始激烈地在 $n^* = 2610.966r/min$ 上下振荡，振荡周期越来越短、振幅越来越小，最终在约 $t = 32.87s$ ，转速 n 达到给定值；转速振荡时，电流 I_d 也反复跳跃于 $78.24A$ 和 $-77.95A$ ，最终在约 $t = 33s$ 回到 $I_{dL} = 52.2A$ 。

由于第一种和第二种限幅方案的效果完全相同，因此研究第二种限幅方案即可。

为什么转速 n 会超过 $n^* = 2610.966r/min$ 继续上升？

如图 1-5-5，观察 ASR 中示波器 1 和 2 的图像，如图 1-5-6 和图 1-5-7 所示。

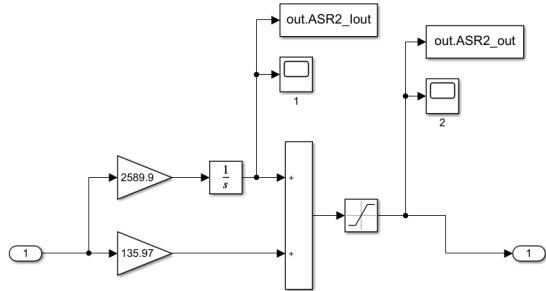


图 1-5-5 ASR 的第二种限幅方案

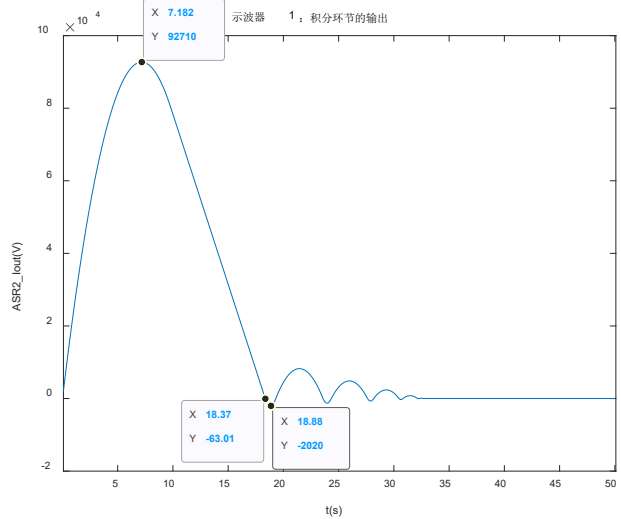


图 1-5-6 示波器 1：积分环节的输出

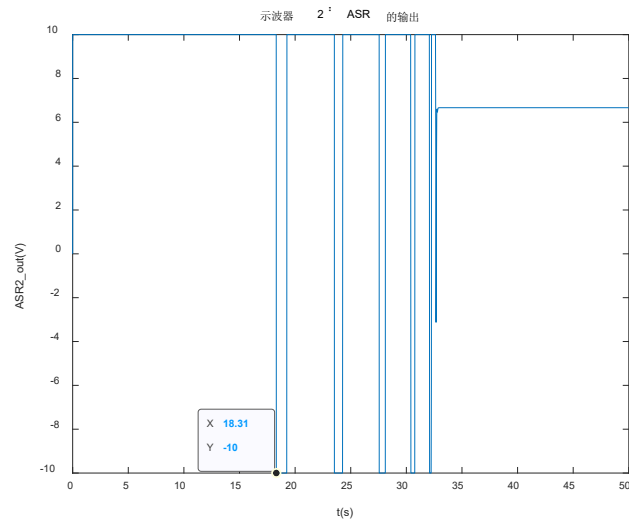


图 1-5-7 示波器 2: ASR 的输出

以上两幅图可以反映 ASR 在起动过程中的状态。电机起动后，当转速 $n < n^*$ 时，由图 1-5-7 知，ASR 迅速进入深度饱和，但是图 1-5-6 显示，ASR 的积分器仍然在积分。在 $t = 7.15s$ 前后， $n = n^*$ ，随即 n 超过给定值 n^* ，ASR 输入变为负数。因此在 $t = 7.182s$ 前后，ASR 开始退饱和，示波器 1 的图像开始下降；但是由于 ASR 处于深度饱和状态，因此 ASR 无法迅速退出饱和，使得直到 $t \approx 18.3s$ 之前， U_i^* 始终保持在 $U_{im}^* = 10V$ 而无法下降，因此 I_d 下降得比较缓慢并始终大于 $I_{dL} = 52.2A$ ，因此转速 n 继续上升，直至达到 $n_m = 3556r/min$ 。

为什么转速 n 达到 $n_m = 3556r/min$ 后暂时恒定，然后开始激烈地上下振荡？

如图 1-5-8，观察 ACR 中示波器 1 和 2 的图像，如图 1-5-9 和图 1-5-10 所示。

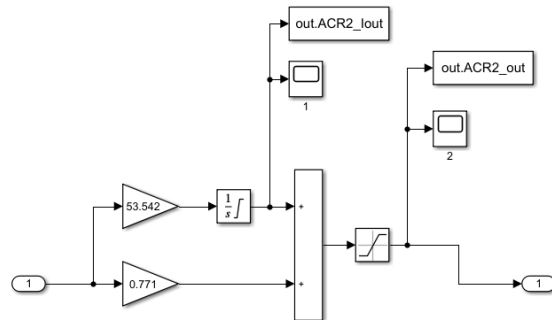


图 1-5-8 ACR 封装

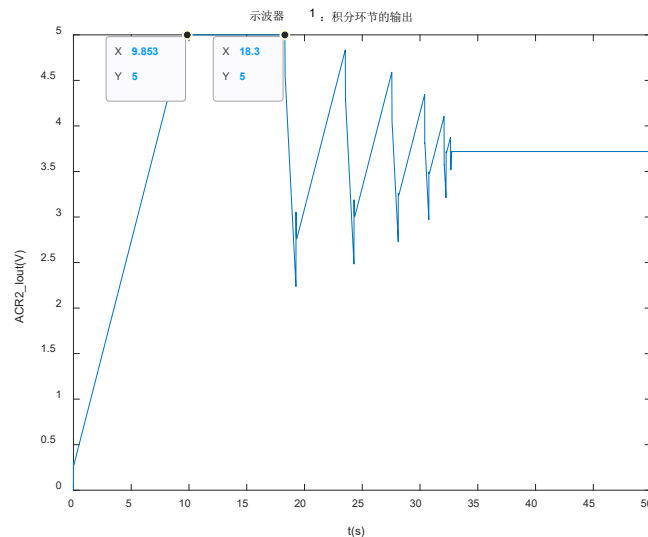


图 1-5-9 示波器 1: ACR 积分环节的输

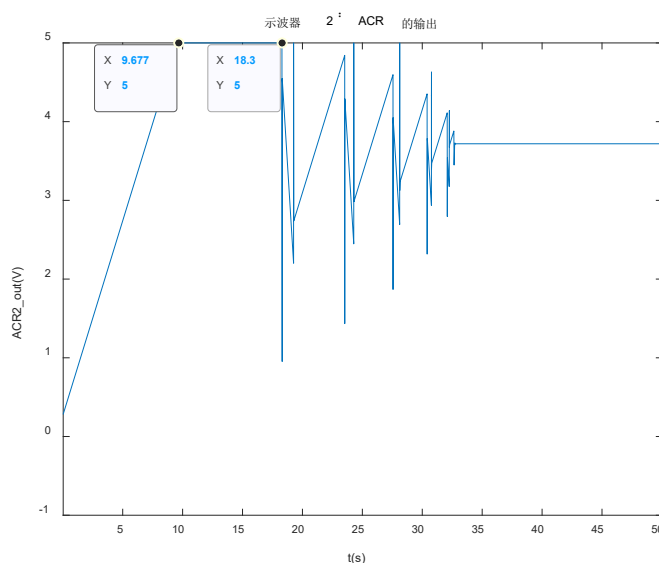


图 1-5-10 示波器 2: ACR 的输出

以上两幅图可以反映 ACR 的状态。由图可知：

在 $t = 9.7s$ 前后，ACR 也到达积分饱和，恒流升速阶段结束。由图 1-5-3 知，也正是在 $t = 9.7s$ 前后， n 不再上升，而是恒定在 $n_m = 3556r/min$ ，电枢电流 I_d 也逐渐下降到给定值 $I_{dL} = 52.2A$ 。

这段时间内，ASR 还在退饱和。ASR 积分环节的输出最终在 $t \approx 18.3s$ 下降到 $10V$ 以内，因此转速环又重新发挥调节作用。同时，由于仍有 $n > n^*$ ，因此 ASR 输出下降，并迅速下降到负限幅值 $-10V$ ，即也是在 $t \approx 18.31s$ ，ASR 再次进入深度饱和状态，转速环再次“开环”；由于此时 ASR 输出为负，ACR 输入为负，故在 $t = 18.3s$ 前后，ACR 也开始退饱和，使得电枢电流 I_d 在 $t = 18.3s$ 前后迅速下降至负值，转速 n 也在 $t \approx 18.3s$ 开始陡降至 n^* ；

由于惯性， n 继续下降使 $n < n^*$ ，因此 ASR 输入重新为正，ASR 开始退饱和，随后 ASR 输出由负变正并继续增大，并在 $t = 19s$ 前后重新饱和，转速环再次“开环”；ASR 输出为正，使得 ACR 输入为正，ACR 输出重新增大， n 和 I_d 重新增大，电机再次进入恒流升速阶段；

如此往复，表现为图 1-5-3 和图 1-5-4 的图像。

此外，由图 1-5-10 知，ACR 在 $t = 20s$ 后始终不饱和，因此 $t = 20s$ 后的转速 n 一直不会恒定在某一数值，而是保持上下振荡，直至稳定于给定值 n^* 。

为什么 $t = 18.3s$ 后转速 n 的振幅越来越小，最后稳定？

在 $t = 18.3s$ 后的每一次恒流升速、恒流降速阶段中，转速 n 的初始速度与给定值 n^* 之间的差值越来越小。

起动后的第一次恒流升速阶段中，转速从 $n \approx 0$ 开始线性增长，因此当 n 第一次升到给定值 n^* 时，ASR 的饱和程度非常深，ASR 需要花费更多的时间才能退出饱和，这个时间约为 $18.3 - 7.182 = 11.118s$ 。

第二次恒流升速阶段中，转速 n 的初始速度在 $1800 \sim 2000r/min$ 之间，和给定值 $n^* = 2611r/min$ 之间的差值减小了，因此 n 升至 n^* 时，ASR 的饱和程度没有第一次那么深，ASR 能更快地退出饱和，使得 n 能更早地开始下降。如此反复，表现为 n 的振荡幅度越来越小，最终稳定于给定值 n^* 。

(结论)

由于第一种和第二种限幅方案下输出的 n 和 I_d 的图像完全一致，因此可以认为，这两种限幅方案实际上是等价的。

对比第 1.3 节的 ACR 的结论，以上对 ASR 的限幅方案的分析说明：只要保证 ACR 的限幅值足够，因此四种限幅方式都是可取的，因为 ACR 在起动阶段本身就是始终不饱和；但是由于 ASR 在起动阶段要经历饱和状态，因此不仅限幅值不能太小（否则电机无法起动），而且也不能采用第一种和第二种限幅方案。

1.5.2 ASR 的第三四种限幅方案

第三四种限幅方案的输出转速 n 如图 1-5-11 和图 1-5-12 所示。

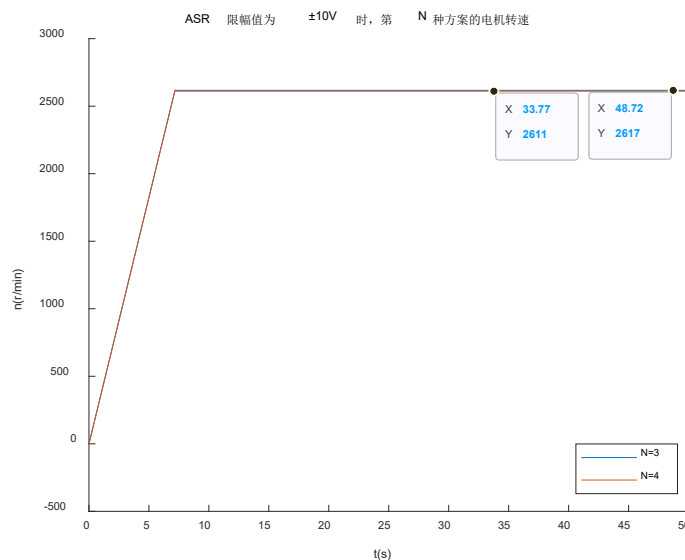


图 1-5-11 ASR 限幅值为 $\pm 10V$ 时，第三四种方案的电机转速

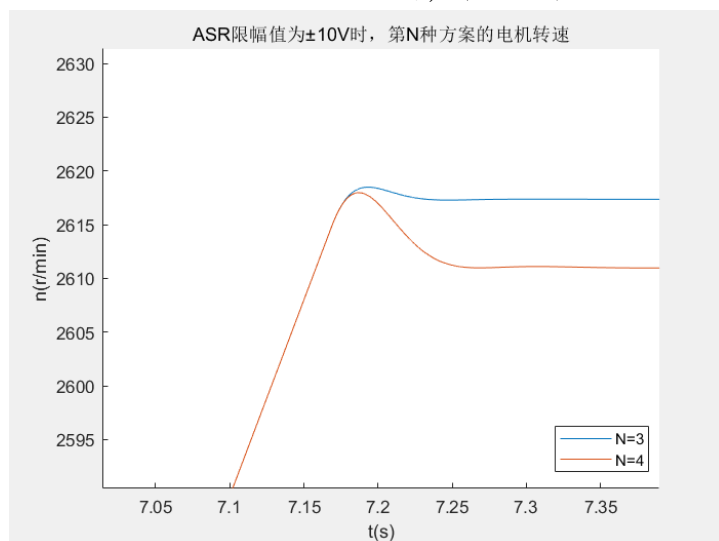


图 1-5-12 第三四种方案的电机转速（放大截图）

第三种方案下，电机转速的调节时间和超调量 ($T_s = 7.22s, M_p \approx 0.08\%$) 都要略小于第四种方案 ($T_s = 7.25s, M_p \approx 0.27\%$)，但是由于稳定时 $n = 2617r/min$ ，因此它无法实现无静差调速。

第三四种限幅方案的电枢电流 I_a 如图 1-5-13 和图 1-5-14 所示。对应于较小的超调量，转速调节阶段中第三种限幅方案下的电流的负超调也小于第四种方案。两种方案的电枢电流最终都稳定于 $I_{dL} = 52.2A$ 。

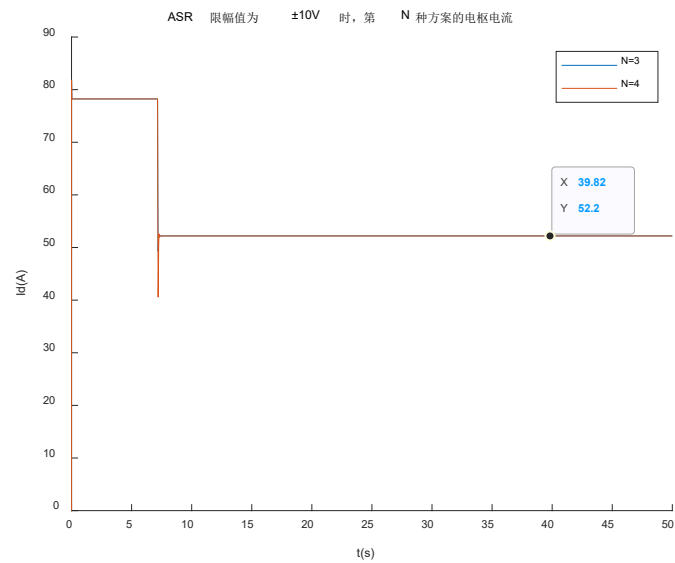


图 1-5-13 ASR 限幅值为 $\pm 10V$ 时, 第三四种方案的电枢电流

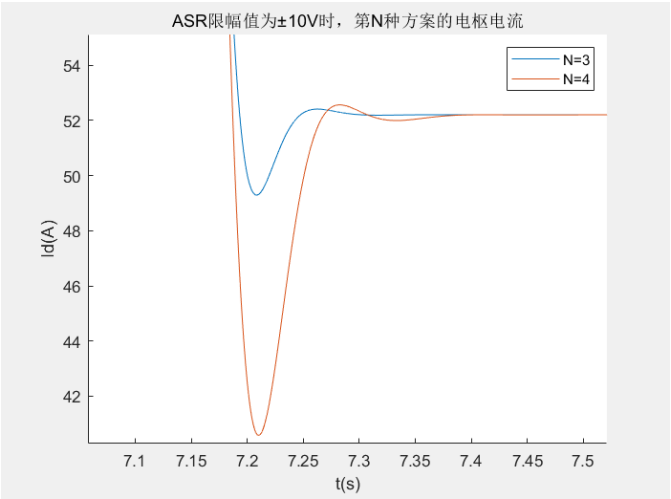


图 1-5-14 第三四种方案的电枢电流 (放大截图)

为什么第三种方案下无法实现电机的无静差调速?

首先检查第三四种方案下 ACR 的状态, 如图 1-5-15 所示。

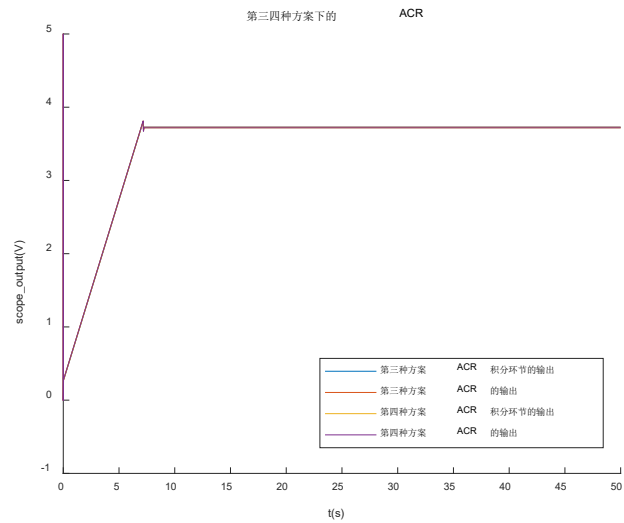


图 1-5-15 第三四种方案下的 ACR

由图可知，在电机起动后的整个调速过程中，第三四种方案下的 ACR 均保持不饱和状态。因此 ACR 符合起动要求，它不是造成第三种方案下调速存在静差的原因。

再观察第三四种方案下 ASR 的状态。第三四种方案下的 ASR 如图 1-5-16 所示。

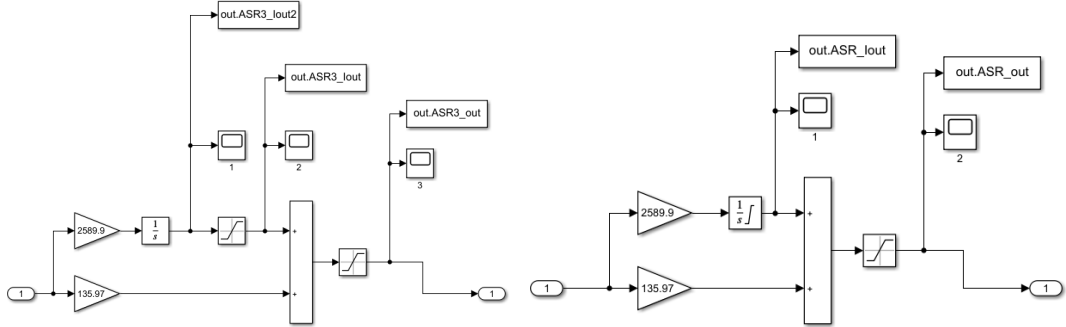


图 1-5-16 ASR（左：第三种方案；右：第四种方案）

第三种方案下，ASR 示波器 1 的图像如图 1-5-17 所示；第三种方案下示波器 2、3 的图像以及第四种方案下 ASR 示波器 1、2 的图像均如图 1-5-18 所示。

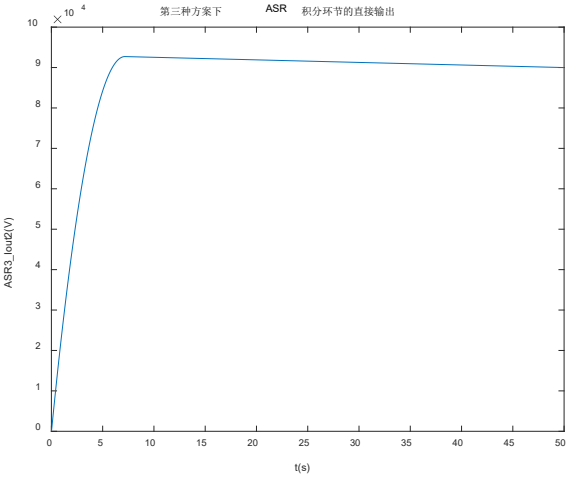


图 1-5-17 第三种方案下 ASR 中示波器 1 的输出

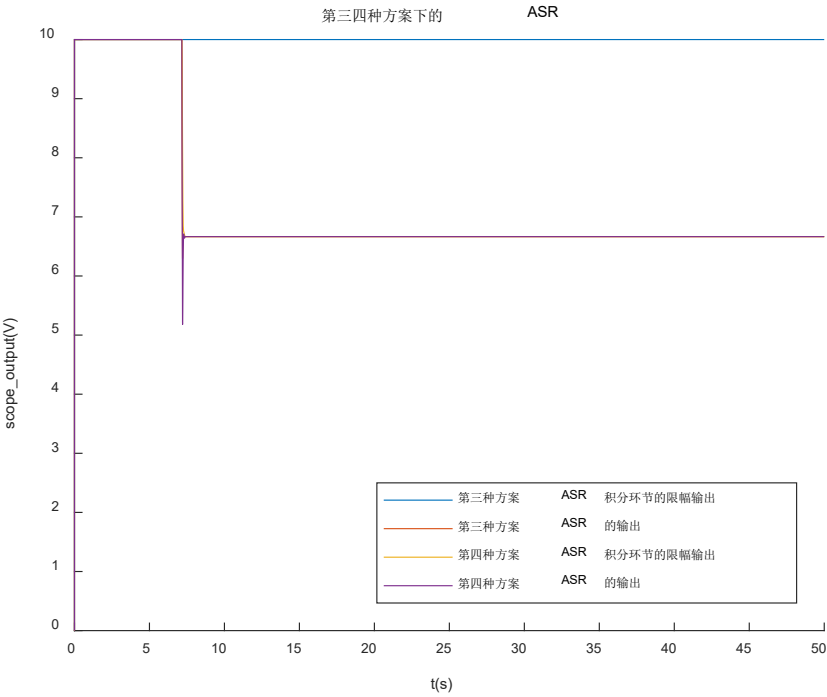


图 1-5-18 第三四种方案下 ASR 的若干输出

由此可知，第三种限幅方案下无法实现无静差调速的原因正是 ASR 的积分环节的限幅方式。在第三种限幅方案中，ASR 积分环节的限幅是通过积分环节之后的一个独立环节实现的，因此它只能限制积分环节的输出，无法阻止其继续积分，使得积分环节最终进入深度饱和；在第四种限幅方案中，ASR 积分环节的限幅是通过积分环节自带的限制积分功能实现的，因此只要积分环节的输出达到限幅值 $\pm 10V$ ，积分环节就立刻停止积分。因此一旦转速 n 出现超调使 ASR 输入为负，ASR 积分环节能立刻退出饱和状态，使得 ASR 恢复比例积分的调节作用，保证了对转速 n 的无静差控制。

由图 1-5-18 可知，第四种限幅方案下 ASR 的积分环节在恒流升速阶段结束后 ($t = 7.2s$ 前后) 就立刻退出了饱和状态；但在第三种限幅方式下，电机转速 n 在达到恒定值 $n \approx 2617r/min$ 后，由于存在略大于给定值 n^* 的静差，因此 ASR 的输入为负值，使得 ASR 开始退饱和。如图 1-5-17 所示，这表现为 ASR 积分环节的直接输出在不断下降。但是，由于 ASR 的积分环节早已深度饱和，因此 ASR 始终无法退出饱和状态，这表现为图 1-5-18 中，第三种限幅方案下 ASR 的积分环节在恒流升速阶段结束后始终无法退出饱和，维持输出在 $10V$ 。

此外，在 $t \approx 7.2s$ 后，虽然 ASR 的积分环节始终无法退出饱和，但是 ASR 整体已经退出饱和，这表现为 ASR 的输出已经下降到 $U_i = 6.666V < U_{im} = 10V$ ，因此在 $t \approx 7.2s$ 后，ASR 的比例环节恢复了对转速 n 的调节作用，以减小 n 的静差，但是 ASR 的积分环节不再起调节作用。此时 ASR 相当于一个比例调节器，因此它无法消除静差。

但是理论上，第三种限幅方案最终也能实现无静差。虽然 ASR 积分环节的退饱和速度很慢，但是只要积分环节退出饱和，ASR 就可以恢复 PI 调节作用，在积分环节的参与下，就可以实现无静差调速。

但是这种方案下，积分环节想要退出饱和所需的时间过长，相比于第四种限幅方式，第三种限幅方案想要实现无静差所需的时间就更长，这已经失去了意义。

(抗扰动能力的对比)

如图 1-5-19 所示，在 $t = 20s$ 时增加 $20A$ 的负载扰动。

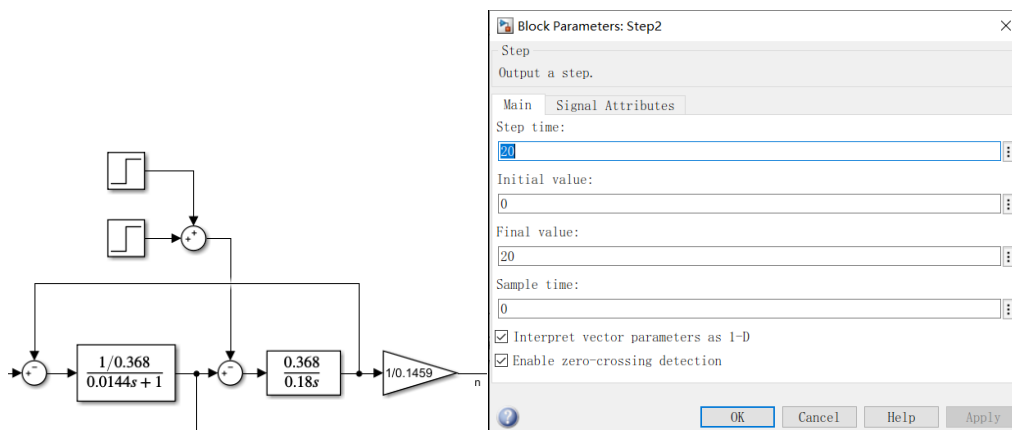


图 1-5-19 增加扰动负载

第三四种限幅方式下的输出转速 n 和电枢电流 I_d 分别如图 1-5-20 和图 1-5-21 所示。

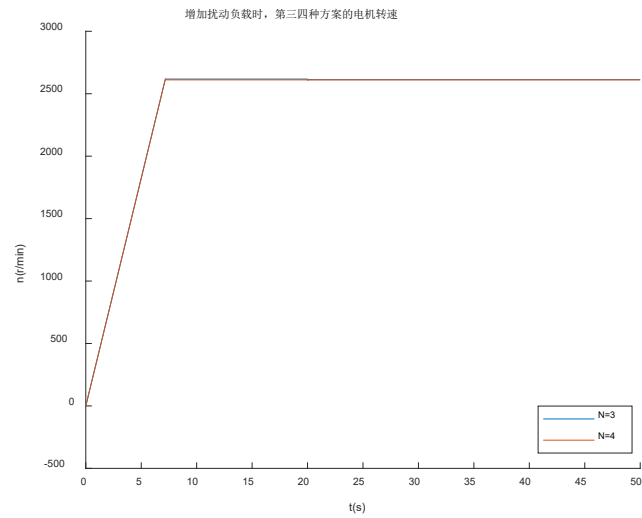


图 1-5-20 增加扰动负载时，第三四种方案的电机转速

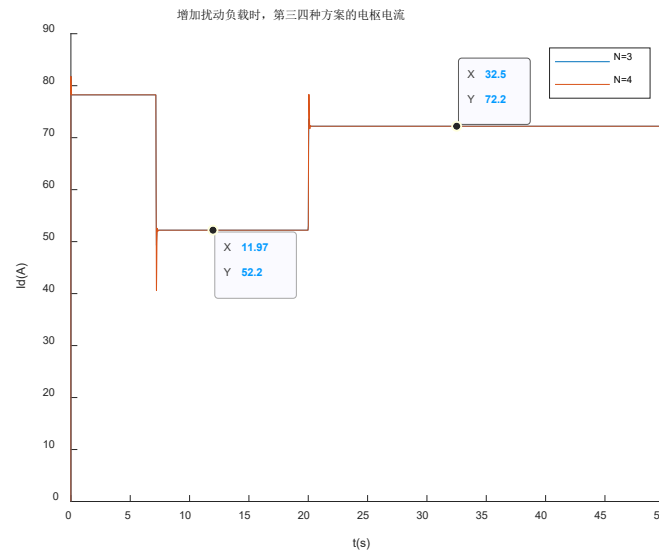


图 1-5-21 增加扰动负载时，第三四种方案的电枢电流

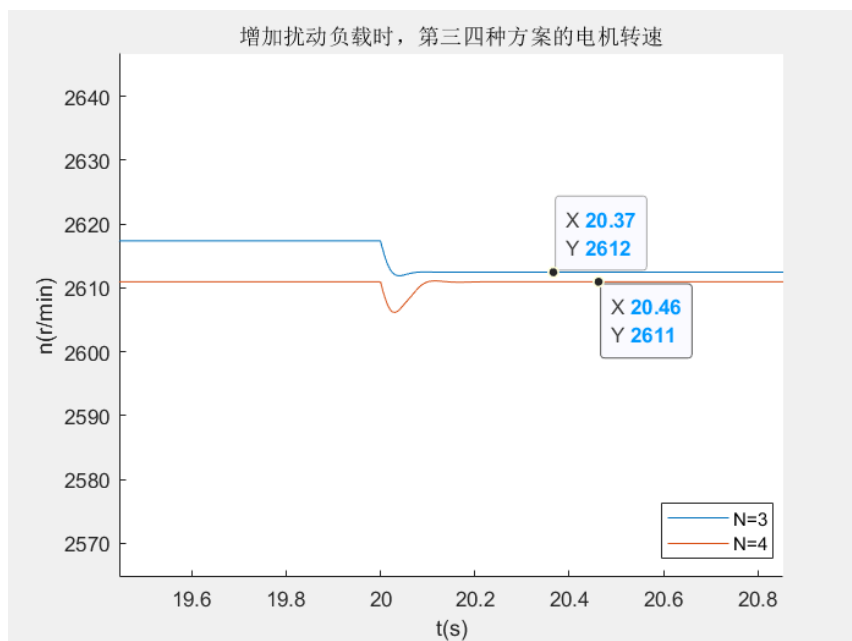


图 1-5-22 增加扰动负载时，第三四种方案的电枢电流（放大截图）

由图 1-5-21 和 1-5-22 知，在第三种限幅方式下，当加入扰动负载后， I_d 终值为 $52.2 + 20 = 72.2A$ ；但是，电机无法使转速恢复原来的 $n = 2617.3683r/min$ ，而是变为 $2612.464r/min$ 。因此，第三种限幅方式下，系统不具有抗扰动能力，是不可取的限幅方式。

第四种限幅方式下，当加入扰动负载后， I_d 终值为 $52.2 + 20 = 72.2A$ ；同时，电机能迅速恢复原来的转速 $n = 2611r/min$ ，因此第四种限幅方式拥有很好的抗扰动能力。

第三种限幅方案下不具有抗扰动能力的原因还是，由于 ASR 的积分环节始终无法退出饱和，因此 ASR 实质上是一个比例调节器，使得它的调节能力大幅下降，这表现为它无法消除静差、也不具有良好的抗扰动能力；第四种限幅方案下，ASR 恢复了比例积分调节的作用，这使得系统可以消除静差，并表现出良好的抗扰动能力。

2. 实验结论

通过以上的对比分析和仿真结果，本报告得出了 ACR 和 ASR 合理的限幅方式和限幅值、以及它们对电机启动的影响。

实验结论如下：

1. 只要限幅值设置得合理，ACR 能够接受任何一种限幅方式，这是因为 ACR 在启动过程中不会进入饱和状态；
2. ACR 的最小限幅值可以通过以下公式确定：

$$U_c = \frac{\frac{C_e U_n^*}{\alpha} + I_{dL} R}{K_s}$$

3. ASR 要求既要设置合理的限幅值，也要采取合理的限幅方式。由四种限幅方式的对比知，只有第四种限幅方式是合理的，因为它既能够消除静差、实现无静差调速，又能保证良好的抗扰动能力，符合电机调速的要求；
4. ASR 的限幅值 U_{im}^* 可以通过以下公式确定：

$$U_{im_{min}}^* = \beta I_{dL} < U_{im}^* \leq U_{im_{max}}^* = \beta \lambda I_{dL}, \quad U_{im_{best}}^* = U_{im_{max}}^*$$

5. 第一种和第二种调速方式在效果上是等价的，这可能是因为它们在 Simulink 中的原理是相同的，但是要证明这一点需要查看 Simulink 的源代码，鉴于本报告的篇幅，我对此不作讨论。这两种限幅方式由于过早地使 ASR 进入深度饱和状态，导致 ACR 也会在第一次恒流升速阶段进入饱和状态，这不符合 ACR 在启动中的要求，并且会使电机经历严重超调、激烈振荡、长调节时间，这是在实际生产中不允许发生的，因此这两种限幅方式是不可取的；
6. 第三种限幅方式虽然具有与第四种限幅方式相同的调节时间，但是它不能实现无静差调速，这是由于 ASR 在调速过程中会进入深度饱和，使得 ASR 在恒流升速阶段结束后失去积分调节的能力，这使它只能靠比例调节作用来减小转速 n 的静差，但无法消除静差，从这个方面来讲，这种限幅方式不适合用在对于转速有严格、精准要求的场合；
7. 从抗扰动的能力方面评价，第三种限幅方式不具有理想的抗扰动能力，无法在扰动加入后使电机恢复原来的转速，这同样是由于 ASR 的积分环节始终无法退出深度饱和状态，使得 ASR 只能通过比例调节作用抵抗扰动带来的转速变化，这使得它的抗扰动能力大打折扣，不理想的抗扰动能力使得这种限幅方式不适合实际的工业生产场合；
8. ASR 的限幅值设置得过低时，电机完全无法启动；但是只要 ASR 的限幅值能使电机启动，并且 ASR 采取第四种限幅方式（默认 ACR 是设置合理的），那么电机最终是肯定可以实现无静差调度的，这是因为 n 的终值是由给定电压和转速反馈增益决定的。只是限幅值越小，转速的调节时间越长，这是因为限幅值的减小会使恒流升速阶段的 I_d 减小，

导致转速的线性增速减慢；

9. 第四种限幅方式是四种方式中最合理的，它能实现电机的无静差调速，并且具有良好的抗扰动能力。

需要再次进行说明的是，本实验采用的 ASR 和 ACR 均是 PI 调节器，其参数由工程设计法整定而得，报告的仿真实验从侧面证明了工程设计法的合理性，但更多的是讨论了限幅方案和限幅值的选择原则。

限幅的择取原则的重要性是我个人在进行仿真实验中注意到的，一般我们更多地讨论 ASR 和 ACR 参数的整定（通常是工程设计法），但是很多时候忽略了 ASR 和 ACR 的限幅问题，因为限幅问题只有在仿真和实际实践中才容易被注意到。

最后，关于 ASR 和 ACR 采用 PI 调节器时的限幅问题在教材第五章 P109 页也有略微的提及，但是没有进行深入的讨论。课本中同样指出，位置式算法必须同时设积分限幅和输出限幅，缺一不可；若没有积分限幅，积分项可能很大，将产生较大的退饱和超调，加大退饱和的持续时间；位置式算法在设置限幅值时，遵循“积分器限幅值小于或等于总输出限幅值”的原则，一般将积分器的限幅值与总输出限幅值设置成一致。

课本上的这些结论和我在报告中得出的结论是相同的，课本和我的报告都强调了积分限幅的重要性，并且我在实验中同样采取的是“积分器限幅值等于总输出限幅值”的原则；但是，我的报告更加具体地对比了几种限幅方式的调速效果，并且解释了其中的原理和其他一些现象。

此外，课本虽然提及了积分限幅，但是没有明确指出积分限幅的方式，因为从 Simulink 的仿真可知，积分限幅可以采取本报告中的第三种或第四种限幅方法，而它们的效果是存在较大区别的，本报告中对积分限幅的选取和调速原理作了进一步的讨论和分析。因此，从某种程度上，我的这份报告可以看作是教材的一个延申。