

基于时间尺度的一类典型高阶系统的二阶线性自抗扰控制

郭 瑞 胡鹏程 樊亚敏

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院 葫芦岛 125105)

摘 要 高阶系统由于其本身的性质,使得控制它变得很困难。为了控制一类典型的可用传递函数描述的高阶对象,用二阶线性自抗扰(LADRC)控制器对高阶系统进行参数整定。将已整定好的高阶系统作为基准系统,通过时间尺度概念将基准系统参数转换为需要控制的新的参数,使得新系统具有基准系统的响应特性。该方法能方便、快捷地算出新系统的参数,通过仿真证明了该方法的可行性,具有广泛的参考价值。

关键词 时间尺度,二阶线性自抗扰,高阶系统,基准系统

中图分类号 TP13 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.10.006

Second Order Linear Active Disturbance Rejection Control for a Class of Typical High Order System Based on Time Scale

GUO Rui HU Peng-cheng FAN Ya-min

(College of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract Higher order system is difficult to control due to its own nature. In order to control a class of typical high order objects which can be described by transfer function, the second-order linear active disturbance rejection (LADRC) controller was used to set the parameters of high order system. The adjusted high-order system will act as the benchmark system. The parameters of benchmark system are converted to parameters of new high order system by using the conception of time scale, making the new system have the response characteristics of benchmark system. This method can calculate the parameters of the new system conveniently and quickly. The simulation result proves that it is feasible and has a wide range of reference values.

Keywords Time scale, Second order linear active disturbance rejection control (LADRC), High order system, Benchmark system

1 引言

自抗扰控制(ADRC)是韩京清研究员^[1,2]在 20 世纪 90 年代提出的一种不依赖于被控对象精确模型,并且在未知非线性不确定性扰动作用下都能保证控制精度的控制方法。其核心思想在于:根据控制输入和系统输出选择简单的积分串联型,并把系统中不同于串联型的视为扰动,通过扩张状态观测器实时估计并补偿,使得系统具有较好的控制性能。近年来其广泛应用于各类工业生产过程,包括大型火电机组、风力发电、永磁电机等,在航天领域也有了很大的发展^[3-6]。

对于高阶自抗扰,由于它的参数太多,整定十分困难,并且系统超过四阶,参数继承性将得不到保证。文献[7]给出了新的思路,用简单的柔化环节实现对 TD 的优化,通过串联相同参数的 ESO 达到控制的目的,极大减少了整定工作量。高志强^[8]提出的线性自抗扰(LADRC)利用“带宽”确定线性扩张状态观测器的参数,只有两个参数需调节,该方法简单、方便且容易实现。文献[9]提出的三阶 ADRC 参数整定法使其具有更广泛的适用范围,并且具有简单的整定过程,能应用到

高阶系统、低阶系统、时滞系统等对象中去检测控制性能。文献[10-12]对线性扩张状态观测器及其高阶形式的性能进行了分析,为 ADRC 应用研究中的 ESO 的选取提供了有效的理论指导与实践参考。

本文针对文献[9]每次都需要知道系统的调节时间这个缺点提出了基于时间尺度的高阶系统的自抗扰控制。用二阶线性自抗扰整定好一个高阶系统的参数,然后将整定好参数的系统作为基准系统,通过时间尺度将基准系统的参数转换为新的高阶系统自抗扰参数,使得系统具有与基准系统相似的响应。

2 自抗扰控制

自抗扰控制主要包括 3 个部分:跟踪微分器(TD),安排过渡过程并给出此过程的微分信号;扩张状态观测器(ESO),给出对象状态变量估计值和总扰动估计值;非线性状态误差反馈(NLSEF),TD 与 ESO 产生的状态变量估计值之间的误差进行非线性组合,形成控制量。二阶自抗扰控制表达式如式(1)所示。

到稿日期:2015-09-08 返修日期:2015-11-21

郭 瑞(1974—),女,副教授,硕士生导师,主要研究领域为计算机自动化技术、控制理论与信号处理,E-mail:545461944@qq.com;胡鹏程(1989—),男,硕士生,主要研究领域为自抗扰控制。

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

二阶 ADRC 结构如图 1 所示。

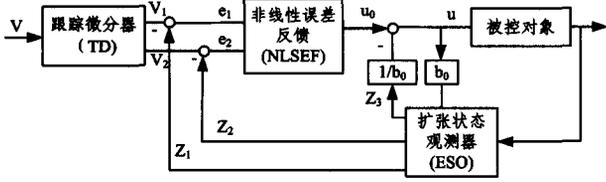


图 1 自抗扰控制结构图

1) TD 的离散表达式为:

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + T v_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + T fh \\ fh = fhan(v_1 - v, x_2, r, h) \end{cases} \quad (2)$$

其中, 参数 r, h 需要整定。

2) ESO 的表达式为:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - k_1 fal(e, \alpha_{01}, \delta) \\ \dot{z}_2 = z_3 - k_2 fal(e, \alpha_{02}, \delta) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -k_3 fal(e, \alpha_{03}, \delta) \end{cases} \quad (3)$$

$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta \\ e/\delta^{1-\alpha}, & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\alpha_{01} = 1, \alpha_{02} = 0.5, \alpha_{03} = 0.25, \delta$ 可取固定值 0.1, 参数 b_0, k_1, k_2, k_3 需要整定。

3) NLSEF 的结构为:

$$u_0 = \beta_1 fal(e_1, \alpha_1, \delta) + \beta_2 fal(e_2, \alpha_2, \delta) \quad (5)$$

其中, $\alpha_1 = 0.75, \alpha_2 = 1.75, \delta = 0.1$, 参数 β_1, β_2 需要整定。

3 二阶系统的时间尺度

时间尺度是韩京清提出用来衡量不同系统对象响应快慢的一个标准, 二阶系统定义^[14]如下。

定义 1 对于一般二阶系统 $\ddot{x} = f(x, \dot{x}, t)$, 记

$$M = \max_{|x| \leq q_1, |\dot{x}| \leq q_2} |f(x, \dot{x}, t)|$$

其中 q_1, q_2 是系统工作范围的适当常数, 定义系统的时间尺度为:

$$p = \frac{1}{\sqrt{M}} \quad (6)$$

在实际工程中, 二阶振荡环节是一种常见的受控对象, 其表达式为:

$$G(s) = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (7)$$

根据文献[13]可知时间尺度为:

$$p = \frac{1}{\sqrt{M}} = \frac{1}{\omega_n \sqrt{|k|}} \quad (8)$$

ADRC 补偿后形成的二阶纯积分系统 k/s^2 可以用上面的思路, 于是得到时间尺度为:

$$p = \frac{1}{\sqrt{k}}, k > 0 \quad (9)$$

4 基于时间尺度的高阶自抗扰控制

对于一类能用传递函数表示的高阶系统, 用文献[9]提出

的方法虽然能得出系统的控制参数, 但是由于每次整定都需要知道系统调节时间, 需要逐步调整 b_0 的值, 比较复杂, 因此可以将时间尺度概念运用到二阶线性自抗扰控制上, 这样大大地降低了类似系统调整参数的复杂性。该方法具体操作如下。

对于一个二阶线性自抗扰系统, 其系统框图如图 2 所示。

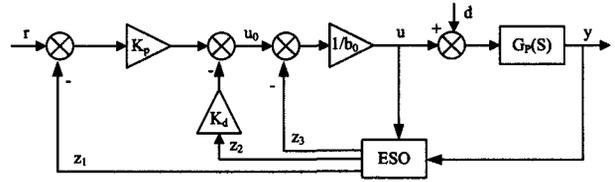


图 2 二阶线性自抗扰控制系统

其中, $G_p(s)$ 是被控对象, r 为设定值, d 是扰动, k_p, k_d, b_0 是控制器参数, ESO 的形式为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1 (y - z_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 + \beta_2 (y - z_1) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = \beta_3 (y - z_1) \end{cases} \quad (10)$$

可以得到控制率:

$$u_0 = k_p (r - z_1) - k_d z_2 \quad (11)$$

又根据文献[8]可得到:

$$k_p = \omega_c^2, k_d = 2\omega_c \quad (12)$$

其中, ω_c 是控制带宽, ω_o 是观测带宽, 并推出:

$$\beta_1 = 3\omega_o, \beta_2 = 3\omega_o^2, \beta_3 = k\beta_2 \quad (13)$$

据此慢慢调整 b_0 的值, 使得系统具有不错的响应特性。通过二阶线性自抗扰整定出来的系统称作基准系统 S_1 , 其时间尺度为 p_1 。当需要得到一个新的类似高阶系统 S_2 的控制参数时, 可以将它与基准系统 S_1 进行基于时间尺度的参数转换, 由 S_2 的时间尺度 $p_2 = 1/\sqrt{b_2}$ 可以推出与 S_1 进行时间尺度转换的尺度:

$$t_1/t_2 = p_1/p_2 = h \quad (14)$$

高阶系统 S_1, S_2 的二阶线性控制 ESO 和控制率如下。

$$S_1: \begin{cases} e_{11} = r - z_{11}, e_{12} = -z_{12} \\ e_{01} = z_{11} - y_1 \\ \dot{z}_{11} = z_{12} \beta_{11} (y - z_{11}) \\ \dot{z}_{12} = z_{13} + \beta_{12} (y - z_{11}) + b_1 u_1 \\ \dot{z}_{13} = \beta_{13} (y - z_{11}) \\ u_{10} = k_{p1} (r - z_{11}) - k_{d1} z_{12} \\ u_1 = (u_{10} - z_{13})/b_1 \end{cases} \quad (15)$$

$$S_2: \begin{cases} e_{21} = r - z_{21}, e_{22} = -z_{22} \\ e_{02} = z_{21} - y_2 \\ \dot{z}_{21} = z_{22} \beta_{21} (y - z_{21}) \\ \dot{z}_{22} = z_{23} + \beta_{22} (y - z_{21}) + b_2 u_2 \\ \dot{z}_{23} = \beta_{23} (y - z_{21}) \\ u_{20} = k_{p2} (r - z_{21}) - k_{d2} z_{22} \\ u_2 = (u_{20} - z_{23})/b_2 \end{cases} \quad (16)$$

为使 S_2 的响应特性与 S_1 的一致, 令 $z_{11} = z_{21}$, 有

$$z_{22} = \dot{z}_{21} = \frac{dz_{11}}{dt_2} = \frac{dz_{11}}{dt_1} \frac{dt_1}{dt_2} = h \dot{z}_{11} = h z_{12}$$

同理, 可求出:

$$z_{23} = z_{22} = h^2 z_{12} = h^2 z_{13}, \dot{z}_{23} = h^3 \dot{z}_{13}$$

整理得出参数之间的关系:

$$\begin{aligned} x_{11} &= x_{21}, h x_{12} = x_{22}, h^2 x_{13} = x_{23} \\ h \dot{x}_{11} &= \dot{x}_{21}, h^2 \dot{x}_{12} = \dot{x}_{22}, h^3 \dot{x}_{13} = \dot{x}_{23} \end{aligned} \quad (17)$$

并且 $e_{21} = e_{11}, e_{22} = h e_{12}, e_{23} = e_{01}$, 为将 S_2 改造为以 u_{20} 为输入、 S_1 的输出为输出的二阶积分串联系统, 时间尺度为 $p_1 = 1/\sqrt{b_2/h^2}$, 转换得出 S_2 的参数如式(18):

$$\begin{aligned} \beta_{21} &= h \beta_{11}, \beta_{22} = h^2 \beta_{12}, \beta_{23} = h^3 \beta_{13} \\ k_{p2} &= k_{p1}, k_{d2} = 1/h k_{d1}, b_2 = h^2 b_1 \end{aligned} \quad (18)$$

5 仿真实例

一类一维波动扩散方程拟合成的高阶系统 S_1 如下:

$$G_{p1} = \frac{1}{(1.73s+1)^8} \quad (19)$$

使用二阶线性自抗扰控制法对它进行控制, 设定 $\bar{t}_s = 30s, \omega_c = 0.33, \omega_0 = 1.26, k_{p1} = 0.1, k_{d1} = 0.66, \beta_{11} = 3.78, \beta_{12} = 4.76, \beta_{13} = 2.0, r = 1, b_1 = 0.0018$, 此时时间尺度为 $p_1 = 1.73$, 得到的仿真图如图 3 所示。

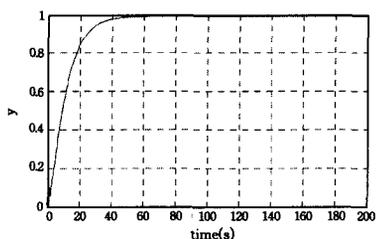


图 3 S_1 闭环系统仿真图

以 S_1 为基准系统, 对于类似的高阶系统 S_2 :

$$G_{p2} = \frac{1}{(2.3s+1.4)^8} \quad (20)$$

若直接使用基准系统 S_1 的参数, 可得到图 4, 由图 4 可知新系统 S_2 的响应可能会不满足设计要求。

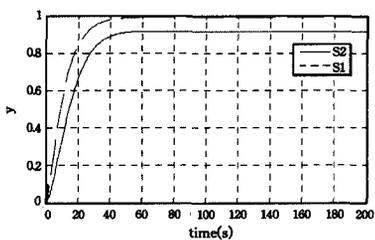


图 4 S_2 在使用 S_1 参数时的仿真图

S_2 的时间尺度为 $p_2 = 2.3$, 与 S_1 进行时间尺度转换得 $p_1/p_2 = h_{12} = 0.752$, 由式(18)得 S_2 的参数: $r = 1, k_{p2} = 0.1, k_{d2} = 0.878, b_2 = 0.001; \beta_{21} = 2.84, \beta_{22} = 2.69, \beta_{23} = 0.85$ 。

由此, 得出 S_2 与 S_1 的仿真图形, 如图 5 所示, 可以看出, S_2 的输出响应与 S_1 的几乎一致。

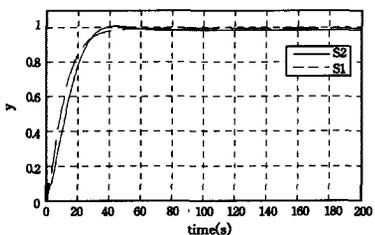


图 5 时间尺度转换后 S_2 与 S_1 的仿真图

对于类似的系统 S_3 , 其结构如下:

$$G_{p3} = \frac{1}{(2.56s+1.83)^8} \quad (21)$$

同样地, 如果直接使用基准系统 S_1 的参数, S_3 仿真结果如图 6 所示, 由图 6 可知新系统 S_3 的响应可能会不满足设计要求。

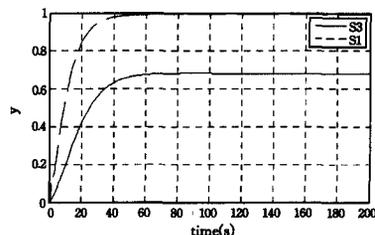


图 6 S_3 在使用 S_1 参数时的仿真图

时间尺度为 $p_3 = 2.56$, 同理与 S_1 进行时间尺度转换得 $p_1/p_3 = h_{13} = 0.676$, S_3 参数为 $r = 1, k_{p3} = 0.1, k_{d3} = 0.976, b_3 = 0.0008; \beta_{31} = 2.555, \beta_{32} = 2.175, \beta_{33} = 0.618$ 。

由此, 得出 S_3 与 S_1 的系统仿真图, 如图 7 所示。

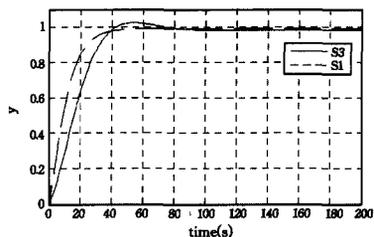


图 7 时间尺度转换后 S_3 与 S_1 的仿真图

结束语 本文提出了一种基于时间尺度的高阶系统自抗扰控制方法, 根据二阶线性自抗扰控制方法整定出一个高阶系统的参数, 并将这个高阶系统作为基准系统, 然后通过时间尺度转换得到新的被控系统的参数。通过对一典型八阶系统进行仿真对比, 验证了该方法的可行性。

参考文献

- [1] Han Jing-qing. From PID technology to "active disturbance rejection control Technology" [J]. Control Engineering, 2002, 9 (3): 13-18 (in Chinese)
韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制技术”[J]. 控制工程, 2002, 9 (3): 13-18
- [2] 韩京清. 自抗扰控制技术——估计补偿不确定因素的控制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008
- [3] Guan Zhi-min. Application Research of active disturbance rejection control technology in the control system of large thermal power plant. [D]. Hebei: North China Electric Power University, 2009 (in Chinese)
管志敏. 自抗扰控制在大型火电机组控制系统中的应用研究 [D]. 河北: 华北电力大学, 2009
- [4] Zhang De, Mei Sheng-wei, Liu Feng, et al. Power Oscillation Damping Controller Based on Active Disturbance Rejection Control Technique for DFIG-Based Wind Turbine Generators [C] // Proc of the 2014 26th Chinese Control and Decision Conf. Denver: IEEE, 2014: 2749-2752
- [5] Liu Li-ying. Application of linear active disturbance rejection control strategy in induction motor speed control system. [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010 (in Chinese)

(下转第 52 页)

- [7] Fishwick P A. Neural network models in simulation; a comparison with traditional modeling approaches [C]//Proceedings of the 21st Conference on Winter Simulation. ACM, 1989, 702-709
- [8] Zhang G P. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model [J]. *Neurocomputing*, 2003, 50: 159-175
- [9] Denton J W. How good are neural networks for causal forecasting [J]. *The Journal of Business Forecasting*, 1995, 14(2): 17-20
- [10] Markham I S, Rakes T R. The effect of sample size and variability of data on the comparative performance of artificial neural networks and regression [J]. *Computers & Operations Research*, 1998, 25(4): 251-263
- [11] Balabin R M, Lomakina E I. Support vector machine regression (SVR/LS-SVM)—an alternative to neural networks (ANN) for analytical chemistry? Comparison of nonlinear methods on near infrared (NIR) spectroscopy data [J]. *Analyst*, 2011, 136(8): 1703-1712
- [12] Taskaya T, Casey M C. A comparative study of autoregressive neural network hybrids [J]. *Neural Networks*, 2005, 18(5): 781-789
- [13] Higon M, Evgeniou T. To combine or not to combine; selecting among forecasts and their combinations [J]. *International Journal of Forecasting*, 2005, 21(1): 15-24
- [14] Terui N, Van D HK. Combined forecasts from linear and nonlinear time series models [J]. *International Journal of Forecasting*, 2002, 18(3): 421-438
- [15] Perrone M P, Cooper L N. When networks disagree: Ensemble methods for hybrid neural networks [R]. Brown Univ Providence RI Inst for Brain and Neural System, 1992
- [16] Matias R. An experimental study on software aging and rejuvenation in web servers [C]//30th Annual International Computer Software and Applications Conference. IEEE, 2006: 189-196
- [17] Moura Silva L, Alonso J, Silva P, Torres J. Using virtualization to improve software rejuvenation [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2009, 58(11): 1525-1538
- [18] Zhao J, Trivedi K S, Wang Y B, et al. Evaluation of software performance affected by aging [C]//2010 IEEE Second International Workshop on Software Aging and Rejuvenation. IEEE, 2010: 1-6
- [19] Matias R, Costa B E, Macedo A. Monitoring memory-related software aging: An exploratory study [C]//2012 IEEE 23rd International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops. IEEE, 2012: 247-252
- [20] Li L, Vaidyanathan K, Trivedi K S. An approach for estimation of software aging in a web server [C]//2002 International Symposium on Empirical Software Engineering. IEEE, 2002: 91-100
- [21] Yan Yong-quan, Guo Ping. Predicting resource consumption in a Web server using ARIMA model [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2014, 4(4): 502-510
- [22] El-Shishiny H, Sobhy Deraz S, Badreddin OB. Mining software aging: A neural network approach [C]//IEEE Symposium on Computers and Communications. Marrakech, Morocco: IEEE, 2008: 182-187
- [23] Avritzer A, Weyuker E. Monitoring Smoothly Degrading Systems for Increased Dependability [J]. *Empirical Software Eng. J.*, 1997, 2(1): 59-77

(上接第 42 页)

- 刘丽英. 线性自抗扰控制策略在异步电机调速系统中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2010
- [6] Kang Ying, Li Dong-hai, Lao Da-zhong. Performance comparison between active disturbance rejection control and Sliding mode control in spacecraft attitude [J]. *Control theory and applications*, 2013, 30(12): 1623-1629 (in Chinese)
- 康莹, 李东海, 老大中. 航天器姿态的自抗扰控制与滑模控制的性能比较[J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(12): 1623-1629
- [7] Liu Xiang, Li Dong-hai, Jiang Xue-zhi, et al. Application of self immunity controller in high order systems [J]. *Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition)*, 2001, 41(6): 95-99 (in Chinese)
- 刘翔, 李东海, 姜学智, 等. 自抗扰控制器在高阶系统中应用的仿真[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2001, 41(6): 95-99
- [8] Gao Z Q. Scaling and Bandwidth-Parameterization Based Controller Tuning [C]//Proc of the 2003 American Control Conf. Denver: IEEE, 2003: 4989-4989-4996
- [9] Chen Xing. Parameter tuning method for the active disturbance rejection controller and its application in thermal engineering. [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008 (in Chinese)
- 陈星. 自抗扰控制器参数整定方法及其在热工过程中的应用 [D]. 北京: 清华大学, 2008
- [10] Shao Xing-ling, Wang Hong-lun. Performance analysis of linear extended state observer [J]. *Control and Decision*, 2015, 30(5): 815-822 (in Chinese)
- 绍星灵, 王宏伦. 线性扩张状态观测器及其高阶形式的性能分析 [J]. *控制与决策*, 2015, 30(5): 815-822
- [11] Zhang Jiao, Yang Xu, Liu Yuan-xiang, et al. Performance evaluation of high order linear active disturbance rejection controller [J]. *Control and Decision*, 2015, 30(7): 1162-1170 (in Chinese)
- 张皎, 杨旭, 刘源翔, 等. 高阶线性自抗扰控制器的性能评估 [J]. *控制与决策*, 2015, 30(7): 1162-1170
- [12] Duan Hui-da, Tian Yan-tao, Li Jin-song, et al. Cascade of a class of high order nonlinear systems [J]. *Control and Decision*, 2012, 27(2): 216-220 (in Chinese)
- 段慧达, 田彦涛, 李津淞, 等. 一类高阶非线性系统的级联自抗扰控制 [J]. *控制与决策*, 2012, 27(2): 216-220
- [13] Li Shu-qing, Zhang Sheng-xiu, Liu Yi-nan, et al. Parameters of the anti disturbance controller. based on system time scale [J]. *Control Theory and Applications*, 2012, 29(1): 125-129 (in Chinese)
- 李述清, 张胜修, 刘毅男, 等. 根据系统时间尺度整定自抗扰控制器参数 [J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(1): 125-129
- [14] Shao Li-wei, Liao Xiao-zhong, Zhang Yu-he. Parameter tuning of based on time scale for induction motor [J]. *Control Theory and Application*, 2008, 25(2): 205-209 (in Chinese)
- 邵立伟, 廖晓钟, 张宇河. 基于时间尺度的感应电机自抗扰控制器的参数整定 [J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(2): 205-209