

单元机组协调系统的模型预测控制

刘桂莲, 张新昌, 张长庚, 朱翠丽

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 单元机组中的锅炉-汽轮机协调系统, 具有滞后、耦合、时变以及模型不确定性等特点。针对该协调过程, 设计了一种预测控制策略, 它利用预测模型与滚动优化策略, 减小了模型不确定性、时变以及滞后等因素的影响。最后通过 300 MW 单元机组协调控制系统的仿真实验, 验证了所设计控制算法的性能。结果表明在机组工况发生变化或受到干扰时, 被控系统具有快速的负荷适应性、良好的抗扰能力和很强的鲁棒性, 是一种具有实用价值的单元机组协调控制方法。

关键词: 模型预测控制; 多变量; 单元机组; 滚动优化

Model predictive coordination control system for power unit

LIU Gui-lian, ZHANG Xin-chang, ZHANG Chang-geng, ZHU Cui-li

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: Power unit boiler-turbine coordination system has some characteristics, such as delay, coupling, time-varying and model uncertainty. This paper designs a model predictive control strategy for the coordination process. It uses predictive model and the receding horizon optimal principle to reduce the effects of model uncertainty, time-varying and delay. Finally 300 MW power unit coordinated control system simulation experiment results show that the control system has fast load adaptability, disturbance rejection capability and robustness with the power unit condition changing and disturbance. The designed algorithm is a practical power unit coordination control method.

Key words: model predictive control; multivariable; power units; receding horizon optimal principle

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)10-0041-05

0 引言

单元机组中的锅炉-汽轮机协调控制系统是现代电站自动化系统中的重要组成单元, 它是联系发电机组与电网的纽带, 同时协调发电机组运行过程中的能量供需。因此, 该协调控制问题一直是理论研究者和工程技术人员关注的焦点^[1-3]。

近些年来, 电网容量增加使发电机组的容量也增大, 同时也提高了用户对机组安全性和反应速度的要求。因此需要设计先进的协调控制策略, 以提高机组整体性能, 并指导燃烧控制、汽温控制、给水控制等子系统以更稳定的方式运行。但是单元机组协调系统不仅要解决之间存在动态特性差异, 而且是一个多变量耦合系统; 随着机组运行时间的推移, 该系统的动、静态特性也会发生显著变化; 另外, 在机组运行过程中还存在大量的不确定干扰: 如磨煤机启停、煤质变化、吹灰过程等。综上所述, 单元机组协调系统具有耦合性、大滞后、慢时变以

及模型不确定性等特点, 因此该协调控制问题是过程控制界的一个难题^[4-6]。

对于单元机组的协调控制系统, 传统的控制方法很难取得满意的控制效果, 而模型预测控制^[5-6] (Model Predictive Control, MPC)方法应用预测模型、在线滚动优化^[7]与反馈自校正策略, 可以有效克服系统的非线性、不确定性、时变、滞后以及干扰等因素的影响, 并成为一种重要的先进控制策略, 被广泛应用于复杂工业过程中^[8-9]。鉴于上述原因, 本文设计了一种单元机组协调系统的离散模型预测控制器 (Discrete-time Model Predictive Controller, DMPC)。具体而言, 首先通过单元机组协调系统的线性化模型, 求得了其预测模型。然后采用有限时域的滚动优化方法, 有效解决了单元机组协调系统的模型不确定性、时变、滞后等问题。最后, 本文设计的单元机组协调控制系统进行了仿真测试, 结果表明该控制系统能够有效提高协调控制系统的负荷跟随能力。

1 单元机组模型等效变换

单元机组特性实质上是非线性模型, 对于这种非本质非线性, 常用的方法是首先将该非线性模型在多个工作点进行小偏差线性化, 然后利用线性系统理论来分析对象特性。但由于模型参数的时变性使该方法得到的模型存在一定不确定性。由参考文献[10]可知, 某个固定负荷工作点的单元机组特性可以用式(1)所示数学模型来描述。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_T(s) \\ \Delta N(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{pb}(s) & G_{pu}(s) \\ G_{nb}(s) & G_{nu}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta B(s) \\ \Delta \mu(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $\Delta P_T(s)$ 与 $\Delta N(s)$ 分别为机前压力 $\delta p_t(t) \in \mathbb{R}$ 和机组的输出功率 $\delta n(t) \in \mathbb{R}$ 的拉普拉斯(Laplace)变换, 且为单元机组的输出量; $\Delta B(s)$ 和 $\Delta \mu(s)$ 分别为燃料的燃烧率 $\Delta b(t) \in \mathbb{R}$ 与汽轮机调节阀开度 $\delta \mu(t) \in \mathbb{R}$ 的拉普拉斯(Laplace)变换, 为单元机组的输入控制量。根据单元机组实际运行特点, 本文取采样周期为 10 s, 且定义单元机组离散系统的输入输出量分别为

$$\mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} \Delta B(k) \\ \Delta \mu(k) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y}(k) = \begin{bmatrix} \Delta P_T(k) \\ \Delta N(k) \end{bmatrix}$$

在此基础上, 求得单元机组连续模型式(1)的脉冲传递函数模型, 进一步, 可得其最小实现为

$$\Sigma_1: \begin{cases} \mathbf{x}_m(k+1) = A_m \mathbf{x}_m(k) + B_m \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k+1) = C_m \mathbf{x}_m(k+1) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $A_m \in \mathbb{R}^{n \times n}$; $\mathbf{x}_m \in \mathbb{R}^n$; $B_m \in \mathbb{R}^{n \times 2}$; $C_m \in \mathbb{R}^{2 \times n}$, 定义 n_{ij} 为式(1)中每个传递函数的阶次, 则 $n = \sum_{i,j} n_{ij}$, 最小实现的状态量为

$$\mathbf{x}_m = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n]^T$$

定义状态增量向量为

$$\Delta \mathbf{x}_m(k) = \mathbf{x}_m(k) - \mathbf{x}_m(k-1) \quad (3)$$

控制增量为

$$\Delta \mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1) \quad (4)$$

将状态增量向量式(3)和控制增量式(4)代入能控标准型式(2)可得

$$\Delta \mathbf{x}_m(k+1) = A_m \Delta \mathbf{x}_m(k) + B_m \Delta \mathbf{u}(k) \quad (5)$$

然后定义单元机组的扩展状态量为

$$\bar{\mathbf{x}}(k) = [\Delta \mathbf{x}_m^T(k) \quad \mathbf{y}^T(k)]^T \in \mathbb{R}^{n+1} \quad (6)$$

最后将扩展状态量 $\bar{\mathbf{x}}(k)$ 和控制增量 $\Delta \mathbf{u}(k)$, 分别作为单元机组增广模型 Σ_2 的状态量和控制量, 而

仍选择机前压力 $\Delta P_T(k)$ 和机组的输出功率 $\Delta N(k)$ 作为输出量。由式(5)、式(6)可得, 单元机组增广模型 Σ_2 的状态空间方程为

$$\Sigma_2: \begin{cases} \bar{\mathbf{x}}(k+1) = A \bar{\mathbf{x}}(k) + B \Delta \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k+1) = C \bar{\mathbf{x}}(k+1) \end{cases} \quad (7)$$

其中: $A = \begin{bmatrix} A_m & \mathbf{0}_{n \times 2} \\ C_m A_m & I_2 \end{bmatrix}$; $B = \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix}$; $C = [\mathbf{0}_{n \times 2}^T \quad I_2]$;

$\mathbf{0}_{n \times 2}$ 为 n 行 2 列零矩阵; I_2 为 2×2 单位阵。

值得说明的是, 单元机组实际控制量为 $\mathbf{u}(k)$, 而增广模型 Σ_2 的控制输入量为控制增量 $\Delta \mathbf{u}(k)$, 因此增广模型 Σ_2 相当于在单元机组模型 Σ_1 中嵌入了积分环节, 由自动控制理论可知, 积分环节具有减小系统稳态误差的作用, 因此本文基于该单元机组模型设计的 DMPC 控制器可使机前压力与输出功率较好地跟踪给定输入, 减小跟踪误差。

2 DMPC 控制器设计

本文设计的 DMPC 单元机组控制系统结构如图 1 所示, 可看出 DMPC 控制器由柔化轨迹、预测模型和滚动优化三个环节组成。该控制器利用预测模型的预测作用以及有限时域的滚动优化策略, 能够有效地克服单元机组系统的不确定性、时变、非线性及外界干扰等因素的影响, 从而达到预期控制目标, 并使单元机组控制系统具有良好的鲁棒性与稳定性^[11]。

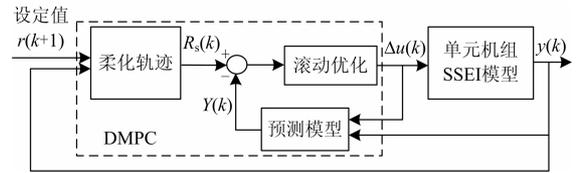


图 1 DMPC 单元机组控制系统结构

Fig. 1 Construction of control system for power unit

单元机组控制器的设计目标是, 使机前压力与输出功率沿着合理的轨迹到达设定值 $r(k)$, 本文的柔化轨迹由式(8)产生。

$$y_d(k+1) = cy(k) + (1-c)r(k+1) \quad (8)$$

其中: $y_d(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的柔化轨迹; $y(k)$ 为当前时刻的姿态通道输出值; $0 \leq c \leq 1$ 为柔化因子, 描述了输出量在柔化轨迹中所占的比例。通常情况下, 单元机组的控制周期远小于系统的自动运行时间, 因此本文设计每个预测步长内 N_p 个控制周期的控制目标完全相同, 即预测步长内的柔化轨迹为

$$R_s(k) = [y_d(k+1) \quad y_d(k+2) \quad \cdots \quad y_d(k+N_p)]^T = \bar{R}_s y_d(k+1)$$

其中, 向量 $\bar{R}_s = \overbrace{[1 \quad 1 \quad \cdots \quad 1]^T}^{N_p}$ 。

选择 DMPC 单元机组控制器的预测步长为 N_p , 控制步长为 N_c , 满足 $N_c \leq N_p$ 。对于单元机组模型式(7), 定义预测模型的控制增量向量为

$$\Delta U(k) = [\Delta u^T(k) \quad \Delta u^T(k+1) \quad \cdots \quad \Delta u^T(k+N_c-1)]^T \quad (9)$$

预测输出向量为

$$Y(k) = [y^T(k+1|k) \quad y^T(k+2|k) \quad \cdots \quad y^T(k+N_p|k)]^T \quad (10)$$

结合单元机组模型式(7)、式(9)以及式(10)的向量定义, 可得单元机组的预测模型为

$$Y(k) = F\bar{x}(k) + \Phi\Delta U(k) \quad (11)$$

其中, 矩阵 F 与 Φ 分别为

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} CB & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \cdots & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ CAB & CB & \cdots & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & \cdots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix}$$

本文将预测模型输出作为反馈, 构成单元机组闭环控制系统。该反馈方法考虑了当前 k 时刻的控制量对系统未来时刻的影响, 增强了系统的鲁棒性, 因此, 本文设计当前 k 时刻的优化目标函数 $J(k)$ 为

$$J(k) = (R_s(k) - Y(k))^T Q (R_s(k) - Y(k)) + \Delta U^T(k) R \Delta U(k) \quad (12)$$

其中第一项的目标是减小跟踪误差, 且误差系数矩阵 $Q = \text{diag}(q_1, q_2, \dots, q_{N_p})$ 为正定矩阵; 第二项是对控制向量 $\Delta U(k)$ 的约束, 其权值系数矩阵

$R = \overbrace{(r_w I_2, r_w I_2, \dots, r_w I_2)}^{N_c}$ 为半正定矩阵。当 $r_w = 0$ 时, 说明单元机组控制器的设计原则只是减小跟踪误差, 而不考虑 $\Delta U(k)$ 的大小; 当 $r_w > 0$ 时, 则说明控制器的设计过程在减小闭环系统跟踪误差的同时, 也在一定程度上抑制了控制增量的剧烈变化。

函数 $J(k)$ 取得最小值时, 应满足条件 $\partial J(k)/\partial \Delta U(k) = 0$, 将预测模型式(11)代入式(12)的优化目标函数, 可得最优控制解 $\Delta U(k)$ 为

$$\Delta U(k) = (\Phi^T Q \Phi + R)^{-1} \Phi^T Q (R_s(k) - F\bar{x}(k)) \quad (13)$$

其中式(13)描述的控制向量 $\Delta U(k)$ 包含了整个控制时域内的 N_c 个控制增量 $\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+N_c-1)$ 。根据滚动时域控制原则, 我们只取

向量 $\Delta U(k)$ 的第一个分量 $\Delta u(k)$, 作为单元机组模型式(7)当前 k 时刻的控制增量, 未来时刻的控制增量可利用将来的系统信息得到更准确的解。因此对于单元机组模型式(7), 当前 k 时刻的控制增量为

$$\Delta u(k) = [I_2 \quad \overbrace{\mathbf{0}_{2 \times 2} \quad \cdots \quad \mathbf{0}_{2 \times 2}}^{N_c-1}] \Delta U(k) \quad (14)$$

进一步, 根据单元机组控制增量 $\Delta u(k)$ 的定义, 可得系统当前 k 时刻的 DMPC 控制量为

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (15)$$

其中, $u(k-1)$ 为 DMPC 控制器第 $k-1$ 时刻的控制量。

本文在设计单元机组 DMPC 控制器时, 均假设单元机组协调系统从零时刻开始响应。若系统在 k_0 时刻对给定输入信号进行跟踪响应时, 则首先通过时间平移变换 $k' = k - k_0$, 将开始响应时刻转换至新时间坐标系的零时刻。也就是说本文中控制算法分析与设计的所有时刻 k , 均需修改为新时间坐标系的时刻 k' 。

3 仿真结果

为了验证所设计的单元机组模型预测控制算法性能, 本文基于如下仿真模型进行了计算机仿真。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_T \\ \Delta N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.124(205s+1)}{(128s+1)^2(11.7s+1)} & \frac{-0.139}{70s+1} \\ \frac{2.069(311s+1)}{(149s+1)^2(22.4s+1)} & \frac{4.665s(99s+1)}{(582s^2+50s+1)(4.1s+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta B \\ \Delta \mu \end{bmatrix}$$

经过仔细调试, 选择下面一组控制器参数:

$$c = 0.1, N_p = 20, N_c = 5, R = \text{diag}[1, 2]$$

应用该控制器参数对下面两种情况进行了仿真测试。

第一种情况为主蒸汽压力定值不变, 负荷指令为单位阶跃变化, 此时相应的负荷、压力响应曲线为图 2 所示, 控制器输出曲线如图 3 所示。仿真结果表明, 系统能够稳定而快速地跟随负荷指令的变化, 对压力的影响非常小, 同时, 燃料量控制器和主蒸汽调节阀控制器的输出变化平稳, 没有大的波动和突变, 在实际应用中不会导致执行器频繁动作或卡涩, 对提高系统的抗干扰能力也非常有利。

第二种情况为负荷指令不变, 主蒸汽压力为单位阶跃变化, 图 4 则描述了此时负荷和压力的响应过程, 而图 5 为控制量曲线。从该结果可看出, 系统在快速响应压力定值变化的同时, 基本保持了负荷输出的稳定。快速的压力设定点跟随可以确保机组在滑压方式下的稳定运行, 提高机组运行的经济性。

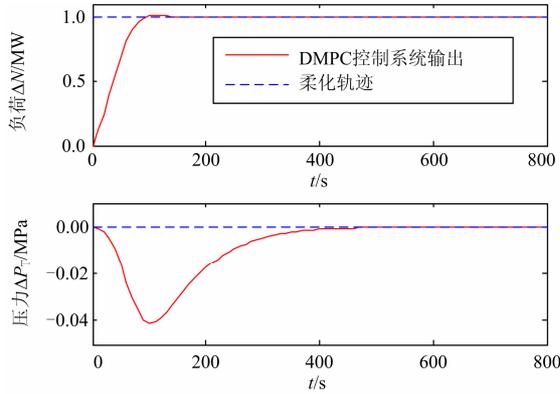


图 2 负荷定值扰动时响应曲线

Fig. 2 Response curves of load settings disturbance

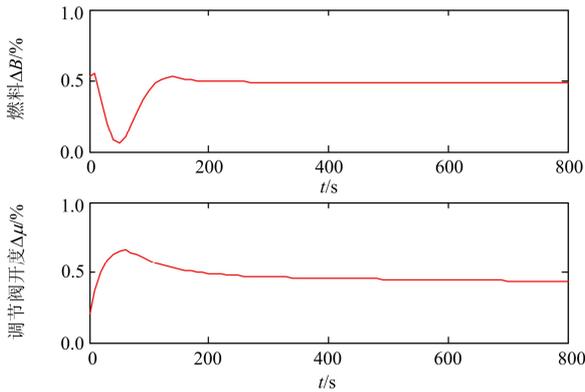


图 3 负荷定值扰动时控制器输出曲线

Fig. 3 Controller output curves of load settings disturbance

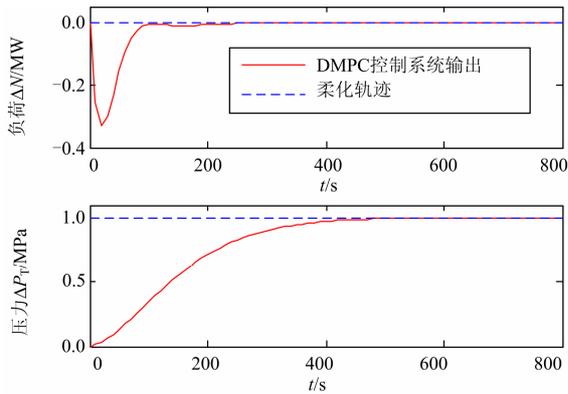


图 4 压力定值扰动时响应曲线

Fig. 4 Response curves of pressure settings disturbance

4 结论

针对单元机组的协调控制系统这种复杂的多输入多输出受控对象，本文设计了一种模型预测控制策略，实现了锅炉-汽轮机的负荷和机前压力的协调控制。然后本文以某 300 MW 单元机组为例，对所设计的协调控制系统进行了仿真测试，结果表明

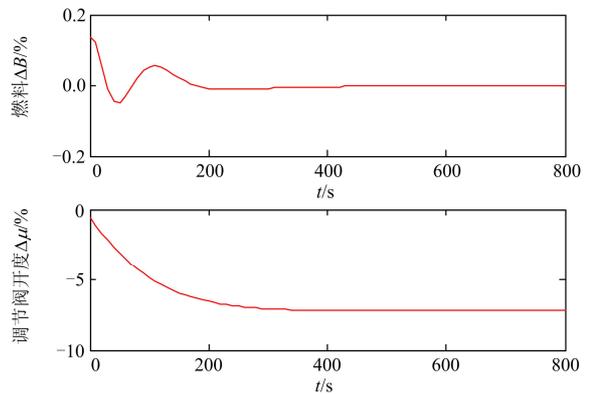


图 5 压力定值扰动时控制器输出曲线

Fig. 5 Controller output curves of pressure settings disturbance

本文设计的控制系统，具有控制方法简单，精度高等优点。尤其在存在干扰和模型摄动情况下，模型预测控制方法仍然对协调过程实施有效控制，有效提高了协调控制系统的负荷跟随能力。

参考文献

- [1] LI Shao-yuan, LIU Hong-bo, CAI Wen-jian, et al. A new coordinated control strategy for boiler-turbine system of coal-fired power plant[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2005, 13(6): 943-954.
- [2] 周念成, 付鹏武, 王强钢, 等. 基于模型预测控制的两区域互联电网 AGC 系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 40(22): 46-51.
ZHOU Nian-cheng, FU Peng-wu, WANG Qiang-gang, et al. Research on AGC of two area interconnected power system based on MPC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 40(22): 46-51.
- [3] 房方, 谭文, 刘吉臻. 机炉协调系统的非线性输出跟踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 147-151.
FANG Fang, TAN Wen, LIU Ji-zhen. Nonlinear output tracking control for the coordinated system of boiler-turbine units[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 147-151.
- [4] 曾德良, 刘吉臻. 汽包锅炉的动态模型结构与负荷/压力增量预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 75-79.
ZENG De-liang, LIU Ji-zhen. Drum boiler dynamic model and load/pressure increment predict model[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(12): 75-79.
- [5] 周念成, 付鹏武, 王强钢, 等. 基于模型预测控制的两区域互联电网 AGC 系统研究[J]. 电力系统保护与控制

- 制, 2012, 40(22): 46-51.
- ZHOU Nian-cheng, FU Peng-wu, WANG Qiang-gang, et al. Research on AGC of two area interconnected power system based on MPC[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 46-51.
- [6] 肖智宏, 庄博, 韩柳. 基于非线性预测控制算法的发电机励磁与快速汽门协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 55-58.
- XIAO Zhi-hong, ZHUANG Bo, HAN Liu. Coordinated control of excitation and fast valve based on nonlinear prediction algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 55-58.
- [7] 王爽, 谢敏, 刘明波. 可行性恢复算法求解模型预测长期电压稳定控制问题[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 63-69.
- WANG Shuang, XIE Min, LIU Ming-bo. Feasibility restoration algorithm for solving model predictive long-term voltage stability control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 63-69.
- [8] 曹程杰, 莫岳平, 刘洁. 基于 Matlab 模块化模型的水轮发电机组仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 68-71.
- CAO Cheng-jie, MO Yue-ping, LIU Jie. Research of hydrogenerating units based on modularized model of Matlab[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 68-71.
- [9] 吴云亮, 孙元章, 徐箭, 等. 基于多变量广义预测理论的互联电力系统负荷频率协调控制体系[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 101-107.
- WU Yun-liang, SUN Yuan-zhang, XU Jian, et al. Coordinated load-frequency control system in interconnected power system based on multivariable generalized predictive control theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 101-107.
- [10] 房方. 单元机组协调控制系统的先进控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.
- FANG Fang. Research on advanced control of coordinated control system for power units[D]. Beijing: North China Electric University, 2005.
- [11] WANG L P. Model predictive control system design and implementation using MATLAB[M]. Springer, 2009.
-
- 收稿日期: 2013-06-27; 修回日期: 2013-10-24
- 作者简介:
- 刘桂莲(1978-), 女, 本科, 工程师, 从事分布式能源与微电网设计工作; E-mail: 13523283245@163.com
- 张新昌(1962-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化设备的开发与管理;
- 张长庚(1982-), 男, 本科, 助理工程师, 从事信息系统设计工作。