

# 基于人工鱼群算法的水库优化调度研究

王正初<sup>1</sup>, 周慕逊<sup>2</sup>, 李军<sup>1</sup>, 孙宝军<sup>1</sup>

(1. 台州学院机电工程学院, 浙江 台州 318000; 2. 台州学院信息与电子工程学院, 浙江 台州 317000)

**摘要:** 针对当前各种启发式算法, 如遗传算法(GA), 粒子群算法(PSO), 模拟退火算法(SA)等在求解水库优化调度中的不足, 提出了将新型的集群智能算法-人工鱼群算法AFSA(Artificial Fish School Algorithm)用于求解水库优化调度问题。该算法通过模拟鱼群的一些基本行为, 如捕食、聚群、追尾, 来求解问题的最优解。根据水库优化调度问题的情况及数学模型, 给出了基于人工鱼群算法的水库优化调度的求解策略, 详细讨论了求解步骤, 最后给出了实验仿真结果。结果表明该算法具有较强的局部搜索能力, 同时也有更高的搜索效率, 与其它方法相比, 该算法能够找到更优解, 验证了该算法的可行性和有效性。

**关键词:** 优化调度; 人工鱼群算法; 水库; 动物自治体

## Research in reservoir operation optimization based on artificial fish swarm algorithm

WANG Zheng-chu<sup>1</sup>, ZHOU Mu-xun<sup>2</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, SUN Bao-jun<sup>1</sup>

(1.College of Mechanical Engineer, Taizhou College, Taizhou 318000,China;

(2.College of Information and Electronic Engineering, Taizhou College, Taizhou 317000,China)

**Abstract:** To reservoir operation optimization problem, people tried to find the precise method for result with many heuristic algorithms, such as Genetic algorithm (GA), Simulated Annealing algorithm (SA), Particle Swarm Optimization (PSO), etc. But these algorithms have some flaws at the moment. This paper puts forward Artificial Fish Swarm Algorithm (AFSA) for Reservoir operation optimization. The algorithm searches best result through simulating fish's basic action, such as prey, swarm and follow. To the problem of reservoir operation optimization, it discusses the solving strategy based on AFSA. According to the mathematic model, the detailed steps are put forward. At last, by calculations of the example and comparison with other algorithms, it proves the algorithm has much stronger ability of local search and better search efficiency. It also can find better solution. It certifies that this method is feasible and valid.

**Key words:** operation optimization; artificial fish swarm algorithm (AFSA); reservoir; animats

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)21-0043-04

## 0 引言

水电站水库优化调度就是使水库按最优的调度方式进行蓄水、用水和泄水, 以避免因水库运行管理不当而造成的损失, 或将这种损失减少到最低限度, 使水电站在整个调度期内取得最大的经济效益<sup>[1,2]</sup>。水电站水库调度问题是NP完全问题<sup>[3]</sup>, 也是个含有线性和非线性约束, 目标函数呈非线性的动态最优控制问题, 迭代难以收敛, 处理起来非常复杂。目前, 求解这一问题的算法有很多, 如动态规划法(DP)<sup>[4]</sup>, 离散微分动态规划方法(DDDP)<sup>[5]</sup>, 逐步优化法(POA)、遗传算法(GA)、模拟退火算法(SAA)和粒子群算法(POS)等<sup>[6,7]</sup>。上述算法都能有效地

对水电站优化运行开展研究。但是, DP法求解时, 计算速度会随着计算精度的提高而下降, 存在出现“维数灾”问题; 遗传算法求解时, 容易出现早熟、局部收敛的现象。人工鱼群算法AFSA(Artificial Fish School Algorithm)是一种基于模拟鱼群行为的随机搜索优化算法, 主要利用了鱼的觅食、聚群和追尾等行为<sup>[8]</sup>, 从构造单条鱼的底层行为做起, 通过鱼群中各个体的局部寻优达到全局最优值在群体中突现出来的目的。

本文尝试将人工鱼群算法引入到单个水库进行优化调度计算中来, 建立合理的数学模型, 提出了人工鱼群算法的实现方法, 编制了基于Matlab语言的优化计算程序。仿真实例表明该方法是有有效可

行的。

## 1 水电站水库优化调度概述及数学模型

小水电站根据入库的流量过程,以发电引用流量为决策变量,以水电站在一年内发电量最大为目标,从而建立单水库年长期优化调度问题的数学模型。优化调度的数学模型包括目标函数和约束条件两部分。

将调度周期按月划分为  $T$  阶段,以  $t$  代表阶段变量,则  $t=1,2,\dots,T$ 。取每个阶段的水库蓄水量  $V$  为状态变量,  $V_t$  为  $t$  时段初的蓄水状态,  $V_{t+1}$  为  $t$  时段末、也是  $t+1$  时段初的蓄水状态;取水电站发电引用流量  $Q_t(V_t)$  为决策变量;水量平衡方程为

$$V_{t+1} = V_t + [Q_{ri} - Q_t(V_t)]\Delta t \quad (1)$$

式中:  $Q_{ri}$  为时段  $t$  的入库流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $\Delta t$  为时段秒数。入库径流为确定性描述,即假定某一确定时段  $t$  相应的径流量  $Q_{ri}$  是一确定值。

优化调度的目标:在调度周期内,水电站发电量最大。设  $Q_t$ ,  $H_t$  分别表示水库在  $t$  时段的发电引用流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) 和水库的水头 ( $\text{m}$ ),  $\Delta t$  为一个时段的秒数,  $A$  为水库的出力系数,则目标函数为

$$E = \max \sum_t A Q_t H_t \Delta t \quad (2)$$

约束条件主要包括:

发电流量限制:

$$Q_{t,\min} \leq Q_t \leq Q_{t,\max} \quad (3)$$

水库水量限制:

$$V_{t,\min} \leq V_t \leq V_{t,\max} \quad (4)$$

电站出力限制:

$$N_{\min} \leq A Q_t H_t \leq N_{\max} \quad (5)$$

水量平衡方程式:

$$V_{t+1} = V_t + [Q_{ri} - Q_t(V_t)]\Delta t \quad (6)$$

式中:  $V_t$ ,  $V_{t,\min}$ ,  $V_{t,\max}$  分别为水库在  $t$  时段的库容及其允许的最小、最大值;  $Q_t$ ,  $Q_{t,\min}$ ,  $Q_{t,\max}$  分别为水库在  $t$  时段的发电流量及其允许的最小、最大值,  $N_{\min}$ ,  $N_{\max}$  分别为水电站最小出力和最大出力。

## 2 人工鱼群算法

人工鱼群算法是一种新型的基于集群智能 SI (Swarm Intelligence) 优化算法<sup>[8-10]</sup>。它的基本思想是:在一片水域中,鱼往往能自行或尾随其它鱼找到营养物质多的地方,因而鱼生存数目最多的地方一般就是本水域中营养物质最多的地方。人工鱼群算法就是根据这一特点,通过模拟鱼群的各种行为动作,结合动物自制体模式 (animate), 来对问

题进行优化。鱼群算法可表示如下:

$$X_v = X + \text{Visual} \cdot \text{rand}() \cdot \text{active}() \quad (7)$$

$$X_{\text{next}} = \frac{X_v - X}{\|X_v - X\|} \cdot \text{Step} \cdot \text{rand}() \quad (8)$$

其中:  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  表示人工鱼当前的状态,  $X_v = (x_1^v, x_2^v, \dots, x_n^v)$  表示在视野范围内的一个状态,  $X_{\text{next}}$  表示下一步的状态。Visual 表示人工鱼感知距离, Step 表示人工鱼的最大移动步长, active() 表示鱼群的一种行为动作, rand() 表示一个随机数。鱼类的行为大致有以下四种:

### 1) 捕食行为

鱼在水中随机、自由地游动,当发现食物时,则会向着食物逐渐增多的方向快速游去。在优化过程中,鱼群根据当前所在的状态,在视野范围内,经过有限次的试探 try\_number, 寻找更优的状态,如果没有找到更优的解,则执行随机游动行为。

### 2) 聚群行为

鱼群在进化过程为了保证自身的生存和躲避危害会自然地聚集成群。鱼群在进行聚群行为时,遵守两个规则:1)、尽量向临近伙伴的中心移动。2) 避免过分拥挤。对于第 1 条,人工鱼根据当前的状态,在视野范围内寻找伙伴及其中心,然后判断中心位置的取值是否比当前状态更好,如果更好,就向中心位置行动一步,否则执行觅食行为。对于第 2 条,通过设立拥挤度因子  $\delta$  (式 (9) 所定义) 来实现,当中心处的拥挤度大于  $\delta$ , 则鱼将执行觅食行为。这样可以避免因为所有的鱼都陷入局部极小值,当然,这同时也会减缓收敛的速度。

$$\delta = 1 / \alpha n_{\max} \quad (0 < \alpha < 1) \quad (9)$$

式中:  $\alpha$  表示接近极值的水平,  $n_{\max}$  表示期望在该领域内聚集的最大人工鱼的数目。如希望在接近极值 90% 水平内不超过 10 个人工鱼聚集, 则  $\delta = 1 / (0.9 \times 10) \approx 0.11$ 。

### 3) 追尾行为

当鱼群中的一条或几条鱼发现食物时,其临近的伙伴会尾随其快速到达食物点。人工鱼找到视野范围内最优状态的伙伴,然后向其移动一步。如果没有找到,则执行随机游动行为。

### 4) 随机游动行为

算法中还设计了一个公告板,用以记录最优人工鱼个体状态及该人工鱼位置的食物浓度值。每条人工鱼在行动一次后就将自身当前状态与公告板进行比较,如果优于公告板就用自身状态取代公告板状态。

对人工鱼当前所处的环境进行评价,即模拟执

行聚群、追尾行为, 然后选择行动后食物浓度值较大的动作来执行, 缺省行为方式为觅食行为。

### 3 水电站水库优化调度的求解策略

用人工鱼群算法求解水库优化调度问题, 可按如下步骤进行:

1) 设置人工鱼群的群体规模  $N$ , 最大迭代次数  $G_{\max}$ , 人工鱼的感知距离  $Visual$ , 人工鱼的最大移动步长  $Step$ , 拥挤度因子  $\delta$ , 惩罚函数  $k$  等参数。

2) 当前迭代次数  $G=0$ , 随机生成一定数量的人工鱼个体, 形成初始鱼群。人工鱼的表示方法为  $Q=(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ , 其中  $Q_t$  代表第  $t$  个月的发电流量。

3) 计算初始鱼群各人工鱼个体当前位置的食物浓度值, 并比较大小, 取  $FC$  为最大值者进入公告板, 保存其状态及  $FC$  值。食物浓度具体的计算方法如下:

a) 根据状态转移方程  $V_{t+1} = V_t + [Q_n - Q_t(V_t)]\Delta t$  各时段的库容, 若库容  $V_{t+1}$  不满足要求, 重新调整  $Q_t$ ;

b) 插值法计算各个时段的水位  $Z_t$ ;

c) 根据  $H_t = (Z_t + Z_{t+1})/2 - llevel$  计算各个时段的水头;

d) 根据  $Q_{\max}(i)(Q_{\max}(i)) = N_{\max}(N_{\max})/(9.81 \cdot H(i) \cdot \eta)$  流量  $Q_i$  的范围;

e) 计算食物浓度  $FC = f = \sum H_t Q_t \Delta t - k \Delta Q$ , 其中,  $k$  为惩罚函数,  $k > 0$ , 在优化过程中, 可以动态调整

$$\Delta Q = \sum_{i=1}^T \max\{(Q_t - Q_{t,\max}), \max(0, Q_{t,\min} - Q_t)\}$$

4) 各人工鱼分别模拟执行追尾行为、聚群行为; 选择行动后  $FC$  值较大者的行为实际执行, 缺省行为方式为觅食行为。

5) 各人工鱼每行动一次后, 检验自身状态与公告板状态, 如果优于公告板状态, 则以自身状态取而代之。

6) 中止条件判断。判断  $G$  是否已达到预置的最大迭代次数  $G_{\max}$ , 若是, 则输出计算结果(即公告板的值), 否则,  $G=G+1$ , 转步骤 4)。

### 4 算例分析

利用上述模型求解方法, 用 Matlab 语言编程对单个水库的优化调度算例进行求解(详细数据参考文献[1])。算法的参数如下: 人工鱼群规模  $N=20$ , 移动步长  $Step=8$ , 视野范围  $Visual=25$ ,  $try\_number=10$ , 拥挤度  $\delta=0.618$ , 最大迭代次数为 50 代。将算法随机运行 20 次。

1) 表1显示了基于鱼群算法的最优仿真结果。图1显示了历代适应值(最大适应值、最小适应值和平均适应值)的变化曲线, 图2和图3每个月的发电量和水库水位。由图1可以看出, 人工鱼群算法在较短时间内能找到较好的解, 说明人工鱼群算法用在水库优化调度问题是可行的。这需要说明一下, 随机运行20次, 可能每次运行过程和结果都不一定相同, 但运行的过程大致相同, 结果也一定是在这解的附近, 而且是一个满意解。

2) 对于上述算例, 同样采用模拟退火算法SA(Simulated Annealing)求解, 起始温度  $T=10$ , 终止温度  $T_0=0.1$ , 退火速度  $\alpha=0.87$ , 种群规模也是20。将模拟退火算法也随机运行20次, 所得的发电量情况如表2。从表中可以看出, 对于该问题, 人工鱼群算法所得结果(最大值、最小值和平均值)都要比模拟退火算法要好, 前者的搜索效率要高于后者。

3) 基于多种算法的结果比较。表3显示了在同一模型下的基于多种算法的最优结果比较。其中的几种启发式算法所得结果都要比标准算法要好。而且本文所采用人工鱼群算法所得结果比遗传算法的结果还多了  $9.5 \times 10^5$  kWh。

表1 仿真结果

Tab.1 Simulating result

时段 /月	入库流量 /( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	水库水位 /m	水头 /m	发电流量 /( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
1月初		210		
1	2.58	213.27	109.13	1.547 5
2	6.89	225.44	116.85	1.195 2
3	11.7	236.95	128.7	3.918 5
4	16.4	235.97	133.96	15.106
5	17.3	236.56	133.77	19.012
6	19.3	237.04	134.3	18.555
7	10.1	232.36	132.2	13.543
8	5.56	236.12	131.74	1.225 4
9	4.35	235.99	133.55	6.394 8
10	3.39	227.77	129.38	9.004 3
11	2.65	224.65	123.71	4.432 3
12	1.97	210.28	114.96	8.176 4

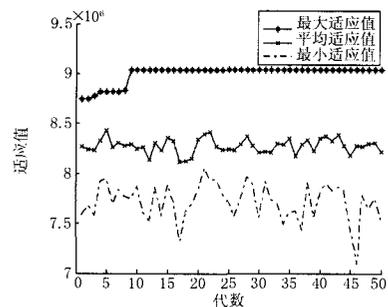


图1 历代适应值变化曲线

Fig.1 Change curve of every generation fitness

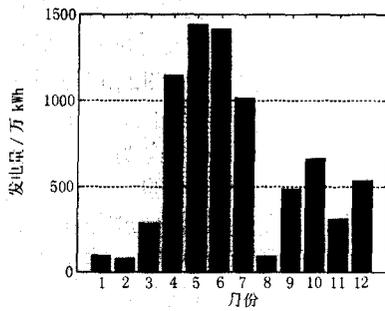


图2 月发电量情况

Fig.2 Power generation monthly

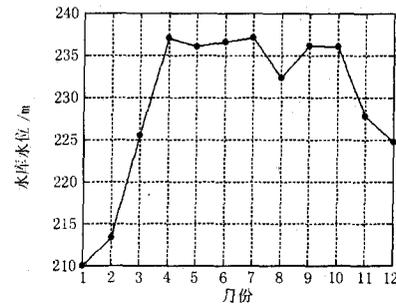


图3 每月水库水位

Fig.3 Reservoir level monthly

表2 随机运行20次所得最优发电量

Tab.2 20 Random optimum power generation

	发电量/10 <sup>7</sup> kWh 的分布比较										最大值	最小值	平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
AFSA	7.387	7.457	7.359	7.434	7.458	7.508	7.368	7.424	7.397	7.364	7.533	7.345	7.427
	7.533	7.426	7.357	7.429	7.488	7.396	7.436	7.345	7.473	7.492			
SA	7.270	7.280	7.401	7.335	7.263	7.327	7.280	7.238	7.347	7.254	7.412	7.238	7.323
	7.412	7.344	7.389	7.308	7.243	7.377	7.405	7.359	7.319	7.298			

表3 水库优化调度结果比较

Tab.3 Comparison of results of reservoir operation optimization

算法	发电量/kWh	比常规优化的增长幅度
常规调度 <sup>[1]</sup>	6.310×10 <sup>7</sup>	
随机法动态规划 <sup>[1]</sup>	6.420×10 <sup>7</sup>	1.74%
遗传算法 <sup>[1]</sup>	7.438×10 <sup>7</sup>	17.9%
模拟退火算法	7.412×10 <sup>7</sup>	17.5%
人工鱼群算法	7.533×10 <sup>7</sup>	19.4%

## 5 结论

人工鱼群算法作为一种新型基于集群智能的随机搜索优化算法。它通过并行运算寻优，可以用来解决一些非凸、非线性及离散的优化问题。本文将其应用到水库优化调度中来，算例仿真试验结果表明 AFSA 鲁棒性强、搜索效率较高、全局收敛性好，用于水库优化调度是有效可行的。如何将人工鱼群算法和其他启发式方法混合使用，以进一步提高搜索效率，这将是下一阶段的研究工作。

## 参考文献

[1] 罗云霞, 周慕逊, 王万良. 基于遗传模拟退火算法的水库优化调度[J]. 华北水利水电学院学报, 2004, 25(3): 20-22.  
 LUO Yun-xia, ZHOU Mu-xun, WANG Wan-liang. Single Reservoir Optimal Operation Based on Genetic Algorithms and Simulated Annealing[J]. Journal of North China of Water Conservancy and Hydroelectric Power,

2004, 25(3): 20-22.

[2] 王万良, 周慕逊, 管秋, 等. 基于遗传算法的小水电站优化调度方法的研究与实践[J]. 水利发电学报, 2005, 24(3): 6-10.  
 WANG Wan-liang, ZHOU Mu-xun, GUAN Qiu, et al. Research and Practice of Optimum Operation Method Based on Genetic Algorithm for Small Hydropower Stations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(3): 6-10.

[3] 周培德. 算法设计与分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.  
 ZHOU Pei-de. Design and Analysis of Algorithms[M]. Beijing: China Machine Press, 1996.

[4] 武鹏林, 霍德敏. 水利计算与水库调度[M]. 北京: 地震出版社, 2000.  
 WU Peng-lin, HUO De-min. Water Conservancy Calculation and Reservoir Operation[M]. Beijing: Earthquake Publishing Press, 2000.

[5] 徐鼎甲, 张玉山. 混联水电站群实时联合优化调度[J]. 水力发电学报, 2001, (3): 68-74.  
 XU Ding-jia, ZHANG Yu-shan. Real-time Uniting-optimum Operation for the Large Scale Hydroelectric Power System[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2001, 3: 68-74.

[6] 马广文, 王黎. 遗传算法在水电站优化调度中的应用[J]. 水科学进展, 1997, 18(3): 275-280.  
 MA Guang-wen, WANG Li. Application of a Genetic Algorithm to Optimal Operation of Hydropower Station[J]. Advances in Water Science, 1997, 18(3): 275-280.

(下转第 50 页 continued on page 50)

输出导纳和电压缓慢下降。当电压超过 ULTC 的保护区电压 20 s 后, 变压器分接头动作;

4) 阶段 4 重新恢复 SVC 备用区域: 随着变压器分接头的动作, SVC 输出导纳由 0.22 变为 0.14 p.u., 回到稳态区域, SVC 控制器由浮动电压控制变为稳态电压控制。

#### 4 对上述方法的改进

上述 SVC 控制策略提高了系统的无功备用容量, 但增加了有载调压器分接头的动作次数。在电力系统中, 频繁的分接头动作会对电压波形产生波动, 从而降低电能质量。因此需要对系统做进一步的调整。

系统中电压变化与负荷变化密切相关, 因此, 我们可以根据日负荷曲线, 实现 SVC 控制。

实际应用中将负荷曲线按小时简化成阶梯状曲线, 即将一天划分为  $N=24$  个时段。求取日平均负荷  $Q_{avr}$ , 根据各个时刻负荷状况进行判断  $Q_i (1 < i < 24)$ :

若  $Q_i < (1 - \alpha) Q_{avr}$  或者  $Q_i > (1 + \alpha) Q_{avr}$  时 ( $0 < \alpha < 1$ ), 则通过低通滤波器进行浮动电压控制, 否则不经过低通滤波器, 直接进行电压控制。

#### 5 结论

使用双 SVC 斜率, 以及稳态电压控制和浮动电压控制相结合的新型 SVC 控制策略具有以下优点:

1) 提出了 SVC 无功备用的概念, 使得 SVC 处理连续电压变化时, 仍能较快响应电压变化;

2) 在稳态电压控制区域内, 使 SVC 能控制较大的电压变化且在浮动电压控制范围内, 仍能提供较大的无功电流;

3) 低通滤波器的设计, 实现了从稳态电压控制与浮动电压控制的转变。

通过改进后, 实现了不同响应时间的 SVC 与 ULTC 的配合, 并大大减少了变压器分接头的动作次数, 满足了无功备用要求。对于不同的电力系统特性, 控制参数需要进行优化。

#### 参考文献

- [1] 王兆安, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] Paserba J, Leonard D J, Miller N W, et al. Lauby and F.P. Sener Coordination of a Distribution Level Continuously Controlled Compensation Device With Existing Substation Equipment for Long Term Var Management[J]. IEEE, 1994(5): 1034-1040.
- [3] Son K M, Moon K S, Lee S K, et al. Coordination of an SVC with a ULTC Reserving Compensation Margin for Emergency Control[J]. IEEE, 2000, 1193-1198.

收稿日期: 2007-04-17;

修回日期: 2007-05-15

作者简介:

张勇(1982-), 男, 硕士研究生, 从事继电保护方面的研究; E-mail: zyxczyxc@163.com

厉吉文(1962-), 男, 教授, 从事电力系统自动化、电压无功自动控制、电压无功优化及继电保护等方面的研究;

程新功(1976-), 男, 副教授, 从事电力运行与控制的研究。

(上接第 46 页 continued from page 46)

- [7] 李崇浩, 纪昌明, 李文武. 改进微粒群算法及其在水库优化调度中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2005, (2): 54-56.

LI Chong-hao, JI Chang-ming, LI Wen-wu. Modified Particle Swarm Algorithm and Its Application in Reservoir Operation Optimization[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005, (2): 54-56.

- [8] 李晓磊. 一种新型的智能优化方法——人工鱼群算法[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.

LI Xiao-lei. A New Intelligent Optimization Method—Artificial Fish School Algorithm[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.

- [9] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, (11): 32-38.

LI Xiao-lei, SHAO Zhi-jiang, QIAN Ji-xin. An Optimizing Method Based on Autonomous Animals:

Fish-swarm Algorithm [J]. Systems Engineering-theory & Practice, 2002, (11): 32-38.

- [10] 李晓磊, 钱积新. 基于分解协调的人工鱼群优化算法研究[J]. 电路与系统学报, 2003, 8(1): 1-6.

LI Xiao-lei, QIAN Ji-xin. Studies on Artificial Fish Swarm Optimization Algorithm based on Decomposition and Coordination Techniques[J]. Journal of Circuits and Systems, 2003, 8(1): 1-6.

收稿日期: 2006-09-19;

修回日期: 2006-11-25

作者简介:

王正初(1979-), 男, 硕士, 研究方向为优化算法、智能 CAD/CAM; E-mail: wangzc@tzc.edu.cn

周慕逊(1979-), 男, 硕士, 研究方向为水电站优化调度及自动化;

李军(1966-), 男, 副教授, 研究方向为智能 CAD、电机控制。