

文章编号: 1000-7709(2017)03-0094-04

基于多目标粒子群的抽水蓄能电站 输水管径多目标优化研究

胡 锡, 曾 江, 黄海颖

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 针对抽水蓄能电站在传统的输水系统管径设计过程中仅考虑经济因素, 而缺乏对其他因素如能耗、环境相容性的考量的不足, 结合惠州某抽水蓄能电站在建设期及运行期的实际情况, 分别提出了以总投资最小和总能耗最小为目标函数的输水管径模型, 同时引入了多目标粒子群算法, 综合考虑投资和能耗对管径的影响, 对输水系统管径进行多目标优化, 并利用模糊隶属度函数来辅助确定满意度最高的最优管径。实例计算结果表明, 经过多目标优化以后的输水系统管径比单一考虑经济因素的管径更科学、全面, 可为类似工程提供参考。

关键词: 多目标粒子群; 帕累托最优前沿; 输水管径模型; 模糊隶属度函数

中图分类号: TV743

文献标志码: A

1 引言

抽水蓄能电站的输水、引水管道管径大小对整个电站的投资影响巨大, 同时也在很大程度上决定了电站运行过程中的水头损失, 进而影响电站的综合效率。目前, 在设计抽水蓄能电站的输水管径时, 决策者往往更关注经济因素^[1], 而较少考虑其他因素如能耗、生态、地区经济等, 缺乏全面性。粒子群算法(PSO)是一种新型优化算法, 但在处理多目标问题时易收敛于局部最优。为避免此问题, 引入多目标粒子群算法, 该算法主要通过目标函数来影响粒子的变化轨迹, 使各粒子在迭代过程中能够移向解区域中不同的解^[2]。为综合考虑输水管径在电站建设、运行期的各个影响因素, 建立了相应的多目标管径模型, 同时结合多目标粒子群算法, 寻找到最优管径。研究成果可为输水管径设计提供指导。

2 基于总投资最小的输水系统最优管径建模

在建立总投资目标函数前, 首先根据实际情况做出以下基本假定: ①不同的输水系统管径大

小均可满足电站运行调节的要求, 忽略管径变化对其影响。②将输水管道作为一个整体考虑, 忽略调压装置及其他附属设施的影响^[3]。

综合考虑输水系统在建设期的投资和电站运行期产生的费用, 包括开挖费用、电能损失费用等, 再结合当地的综合单价, 可得总投资与输水管径之间的关系式:

$$C_i = J_i h(D) \quad (1)$$

式中, C_i 为单项费用; J_i 为单项综合单价; $h(D)$ 为单项损耗总量与输水管径之间的关系式; D 为管径。

因此, 得到目标函数 $f(D)$ 为:

$$f(D) = \min(\sum C_i) = \min[\sum J_i h(D)] \quad (2)$$

约束条件如下: ①流速限制条件。输水管道在设计过程中会根据实际情况规定最大、最小引水流量 Q_{\max} 、 Q_{\min} , 进而要求管径内流速 V 应在最大、最小流速 V_{\max} 、 V_{\min} 之间, 由此可得由流速控制的管径上下限:

$$\sqrt{\frac{4Q_{\min}}{\pi V_{\max}}} = D_{\min}^V \leq D \leq D_{\max}^V = \sqrt{\frac{4Q_{\max}}{\pi V_{\min}}} \quad (3)$$

②施工技术条件。由于实际施工条件和机械设备的限制, 输水系统管径不能做到任意大小, 输水系统管径应满足:

收稿日期: 2016-06-28, 修回日期: 2016-07-29

作者简介: 胡锡(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量与节能, E-mail: 1054497408@qq.com

通讯作者: 曾江(1972-), 男, 博士、副教授、硕导, 研究方向为电能质量与节能, E-mail: 499281580@qq.com

$$D_{\min}^{s1} \leq D \leq D_{\max}^{s2} \quad (4)$$

式中, D_{\min}^{s1} 、 D_{\max}^{s2} 分别为实际施工技术条件限制下输水管径的最小值和最大值。

目前,最小管径一般要求在 1.8 m 以上,根据电站实际投运情况,最大管径可达 14 m。

3 基于总能耗最小的输水系统最优管径建模

将建设期输水系统建设的耗电量和耗油量及运行期电能损失折合成标准煤,可建立以建设期输水系统建设能耗和运行期电能损失能耗之和最小为目标的目标函数,即:

$$\min f(D) = a_1 N_1 + a_2 N_2 + a_3 N_3 + a_3 N_4 = \sum_{i=1}^n (a_1 b_i x_i + a_2 c_i x_i + a_3 d_i x_i) + a_3 N_4 \quad (5)$$

其中 $N_4 = 9.81 Q_1 \Delta h_1 \eta_1 T_1 + 9.81 Q_2 \Delta h_2 \eta_2 T_2$ 式中, N_1 、 N_2 分别为建设输水系统时的耗柴油量、耗汽油量; N_3 为建设输水系统时的耗电量; N_4 为运行期内输水系统的损耗电量; a_1 、 a_2 、 a_3 分别为耗柴油量、耗汽油量和耗电量折算为标准煤时的系数,分别为 1.457、0.147 1、0.123; x_i 为土方明挖、石方明挖、石方洞挖及井挖、固结灌浆、回填灌浆、帷幕灌浆、砼、锚杆等工序 i 的消耗量; b_i 、 c_i 分别为主要工程量 x_i 所对应的单位工程量的耗柴油量和耗汽油量; d_i 为建设期主要工程量 x_i 对应的单位工程量的耗电量; Q_1 、 Q_2 分别为发电工况和抽水工况下的单机流量; Δh_1 、 Δh_2 分别为发电工况和抽水工况下的水头损失; η_1 、 η_2 分别为发电工况和抽水工况下的效率系数,一般为 80%~95%; T_1 、 T_2 分别为电站运行期内发电工况和抽水工况下的总运行小时数。

4 基于帕累托最优的输水系统管径多目标优化研究

基于总投资最小、总能耗最小的输水系统管径大小的研究是关于输水系统的单目标优化问题,对于输水系统来说,总投资最小、总能耗最小的目标之间可能存在矛盾,因此需通过优化算法来分析不同的目标函数,尽可能使得两者都达到最优^[4]。基于总投资和总能耗最小的多目标优化函数为:

$$\min f(D) = \{f_1(D), f_2(D)\} \quad (6)$$

同时考虑相应的约束条件后,利用多目标粒子群算法进行优化计算,具体步骤见图 1。图 1

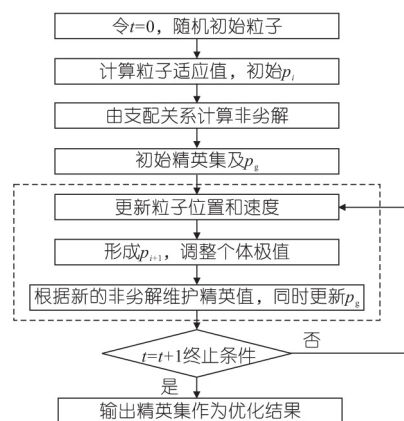


图 1 多目标 PSO 算法步骤

Fig. 1 Steps of multi-objects PSO algorithm

中, t 为循环次数; p_i 为个体极值; p_g 为全局极值。所得精英集即为输水系统管径多目标优化的帕累托最优前沿^[5]。

为从帕累托最优前沿中得到一个满意度最高的解,采用模糊隶属度函数 u_i 量化分析^[6],即:

$$u_i = \begin{cases} 1 & f_i \leq f_i^{\min} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & f_i^{\min} < f_i < f_i^{\max} \\ 0 & f_i \geq f_i^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中, f_i 为第 i 个粒子的目标适应度值; f_i^{\max} 、 f_i^{\min} 分别为适应度函数的最大值和最小值。

当 $u_i = 0$ 时表示对某个目标函数值完全不满意,当 $u_i = 1$ 时表示对某个目标函数值完全满意。帕累托最优前沿中每个解的满意度的量化表达式^[7]为:

$$u^k = \sum_{i=1}^m u_i^k / \left(\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^m u_i^k \right) \quad (8)$$

式中, u^k 为标准化满意度值; u_i^k 为根据模糊隶属度函数计算的满意度值; M 为帕累托集中解的数量; m 为待优化目标函数的数量。

5 案例

以惠州市某抽水蓄能电站为例,验证本文方法的可行性。

5.1 总投资最小

根据该电站的可研报告,比较输水系统主管直径分别为 8.0、8.3、8.5、9.0 m 四种方案下的电站总投资。假设电站全部机组满负荷运行,计算其发电和抽水工况下的水头损失,进而计算得到不同管径方案下对应的总投资。取电能销售价格为 0.55 元/(kW·h)、抽水用电价格为 0.20 元/(kW·h)。运行期间的费用按照最小年费法折现,折现率为 10%,期限为 50 年。由此计算得

到的各方案总投资(费用现值),见表 1。

表 1 各管径方案总投资(费用现值)

Tab. 1 Total costs of each project with different aqueduct diameters (present cost)

方案	水头损失/m		年发电量 ($10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$)	年耗电量 ($10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$)	费用现值 /万元
	发电工况	抽水工况			
1	22.24	14.43	40.44	51.90	9 875.099
2	20.13	13.06	40.73	52.01	6 649.306
3	18.49	11.99	40.94	52.09	5 896.528
4	16.87	10.93	41.17	52.16	5 952.679

为简化计算过程,便于直观反映输水管径与总投资的关系,对表 1 中的管径大小和费用现值(即总投资)进行拟合,得到拟合函数 $f_1(D) = 8\,668.66D^2 - 151\,210.8D + 664\,712.06$ 。方案 1~4 的拟合误差分别为 0.56%、-2.96%、2.81%、-0.40%,拟合精度较高,满足工程要求。

综上所述,基于总投资最小的惠州市某抽水蓄能电站输水系统管径大小的目标函数为 $\min f_1(D) = 8\,668.66D^2 - 151\,210.8D + 664\,712.06$ 。且当该电站输水系统管径大小为 8.72 m 时,电站输水系统总投资最小,为 5 304.90 万元。

5.2 总能耗最小

抽水蓄能电站在运行期间的能耗损失可通过水头损失来体现。首先根据该抽水蓄能电站各机组运行时间和水头损失系数计算得到不同管径方案下的运行期能耗损失,且假定运行期电站每年发电工况和抽水工况的运行小时数不变,为了便于与总投资模型比较,按运行 50 年计算,结果见表 2。

表 2 综合水头损失和运行期损失能耗表

Tab. 2 Comprehensive head loss and energy loss during operation period

管径 /m	综合水头损失系数		综合水头损失/m		综合水头损失功率/MW		运行期损失能耗 /万吨标准煤
	发电 工况	抽水 工况	发电 工况	抽水 工况	发电 工况	抽水 工况	
8.0	382.95	380.52	13.88	10.40	17.52	10.58	29.81
8.3	350.86	348.44	13.23	9.91	16.41	9.91	27.92
8.5	327.34	325.13	12.81	9.60	15.66	9.46	26.64
9.0	304.57	302.34	12.41	9.30	14.95	9.03	25.43

根据局部和沿程水头损失的计算公式,可假设输水系统在运行期因水头损失而产生的能耗函数为 $W_2 = k_1 D^{-4} + k_2 D^{-5.333\,3} + k_3 (k_1, k_2, k_3 \text{ 均为系数})$ 。同理,根据表 2 的数据进行拟合,可得电站输水系统在运行期因水头损失而产生的能耗函数为 $W_2 = a_3 N_4 = -241\,727.92D^{-4} + 3\,739\,838.25D^{-5.333\,3} + 31.80$ 。

根据各项工程的能耗指标,可计算得到不同管径方案下抽水蓄能电站建设期的总能耗,结果

见表 3。对表 3 中的数据进行拟合,得到电站输

表 3 施工工程量及建设期输水系统施工总能耗

Tab. 3 Work amount and total energy consumption of water conveyance system construction

主要工程	工程量			
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
土方明挖/ m^3	840 167	840 167	840 167	840 167
石方明挖/ m^3	182 157	182 157	182 157	182 157
石方洞挖/ m^3	821 256	884 005.1	927 121	1 039 402
砼/ m^3	419 466.4	435 196.3	445 683	471 899.6
喷砼/ m^3	14 572.24	15 118.69	15 483	16 393.76
钢筋/t	24 311.6	25 223.29	25 831.08	27 350.56
固结灌浆/m	168 866.8	175 199.3	179 421	201 150.2
回填灌浆/ m^2	94 332.9	101 540.5	106 493	119 390.1
接触灌浆/m	6 516	6 516	6 516	6 516
锚杆/根	21 392	22 194.2	22 729	24 066
建设期能耗/万吨标准煤	1.235 7	1.281 5	1.312 4	1.397 5

水系统在建设期的能耗函数为 $W_1 = 0.015D^2 - 0.1D + 1.08$ 。方案 1~4 下运行期和建设期拟合函数总误差分别为 0.14%、-0.55%、0.55%、-0.11%。可见,拟合误差很小,说明建立的能耗函数符合实际情况。

电站输水系统能耗主要由建设期施工能耗和运行期输水系统水头损失能耗组成。综上所述,基于总能耗最小的输水系统管径的目标函数为 $\min f_2(D) = -241\,727.92D^{-4} + 3\,739\,838.25D^{-5.333\,3} + 0.015D^2 - 0.1D + 32.88$ 。据此计算可得,当输水系统管径为 9.6 m 时,电站输水系统总能耗最小,为 26.43 万吨标准煤,其中建设期的能耗为 1.5 万吨标准煤,运行期的能耗为 24.922 4 万吨标准煤。

对比总能耗和总投资最小的管径函数发现,两者随管径大小变化的趋势类似。管径由小变大并向最优值靠近的过程中,总能耗和总投资均以较快速度下降,而当管径增大至超过最优管径后,两者均以一较平缓的速度增加。这表明两种模型均可行,可在理论上得到一个最优管径。基于总能耗最小得到的最优管径较基于总投资最小得到的最优管径偏大。分析发现,由于抽水蓄能电站的运行期较长,一般设计年限约 50 年,因此运行期对总能耗和总投资的影响更大。在总投资计算模型中,运行期的投资根据当前年的投资额按照一个固定比率,通过最小年费法计算得到,相当于投资额按固定利率每年增加,而在总能耗模型中,运行期每年的能耗不变。因此,运行期对总投资模型的影响更大。而最优管径是使建设期和运行期的量达到平衡的一个结果,管径偏大则建设期投资和能耗会增加而运行期的会降低,因此基于总投资最优的管径偏小,以减少运行期的巨大损失,基于总能耗的最优管径则偏大。

5.3 多目标优化

基于总投资和总能耗最小的多目标优化函数为 $\min f(D) = \{f_1(D), f_2(D)\}$, 利用 Matlab 编写多目标粒子群优化算法进行计算, 得到输水系统管径多目标优化的帕累托最优前沿, 见图 2。进一步根据模糊隶属度函数计算得到最优折衷解, 有 $D = 9.26$, $f_1(D) = 7\,790$, $f_2(D) = 26.53$, 即当输水系统管道直径达到 9.26 m 时, 满意度最高, 其总投资为 7 790 万元, 总能耗为 26.53 万吨标准煤。

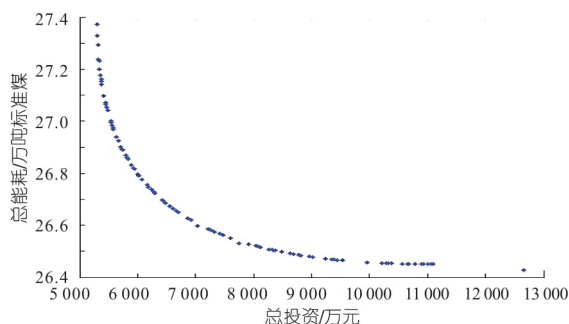


图 2 输水系统管径多目标优化的帕累托最优前沿

Fig. 2 Pareto optimal front of multi-objectives optimization of water supply pipe diameter

最优折衷解综合考虑了总投资和总能耗两方面的影响。总能耗模型在运行期的损耗每年固定不变, 总投资模型在运行期的投资每年增加, 而运行期的损耗主要通过水头损失来反映。在实际抽水蓄能电站运行过程中, 每年水头损失造成的损耗量相对平稳, 可能增加也可能减少, 因此相对而言总能耗模型更符合实际情况, 更合理, 通过多目标优化后得到的结果也更偏向于基于总能耗模型得到的最优管径。

Multi-objectives Optimization of Water Supply Pipe Diameter in Pumped Storage Power Station Based on MOPSO

HU Xi, ZENG Jiang, HUANG Hai-ying

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In the design of pipe diameter of water delivery system in pumped storage power station, only economic factor were considered while other factors (power consumption and environmental compatibility) were ignored. Considering the actual situation of a certain pumped storage power station in Huizhou City during construction and operation period, the article came up with the pipe diameter models by minimizing the total investment and total power consumption. In the meantime, multi-objective PSO was applied to optimize the pipe diameter of water delivery system. Fuzzy membership function was used to determine optimal pipe diameter with the highest satisfaction degree. The result shows that the pipe diameter of water delivery system by multi-objective optimization is more reasonable and comprehensive, and provides a new study way for similar projects.

Key words: MOPSO; Pareto front; water supply pipe diameter model; fuzzy membership function

6 结论

a. 通过建立基于总投资和总能耗最小为目标的管径模型, 使得管径大小的确定更全面、合理。

b. 引入了多目标粒子群优化算法, 结合模糊隶属度函数对输水管径进行多目标优化研究, 有效防止了在多目标情况下管径大小决策的盲目性。

参考文献:

- [1] 王志国. 抽水蓄能电站输水系统经济管径比较研究 [C]//抽水蓄能电站工程建设文集. 北京, 2004.
- [2] 赵磊. 基于粒子群算法求解多目标函数优化问题 [C]//第二十一届中国(天津) 2007 IT、网络、信息技术、电子、仪器仪表创新学术会议论文集. 天津, 2007.
- [3] 刘斌. 抽水蓄能电站引水系统经济直径的探讨 [J]. 武汉大学学报:工学版, 2002, 35(4): 60-63.
- [4] 薛洪波, 伦淑娴. 粒子群算法在多目标优化中的应用综述 [J]. 渤海大学学报:自然科学版, 2009, 30(3): 265-269.
- [5] 刘衍民. 粒子群算法的研究及应用 [D]. 济南: 山东师范大学, 2011.
- [6] 苏鹏, 刘天琪, 赵国波, 等. 基于改进粒子群算法的节能调度下多目标负荷最优分配 [J]. 电网技术, 2009, 33(5): 48-53.
- [7] 姜素华, 吴耀武, 熊信银. 基于多目标微粒群算法的电力系统无功优化研究 [C]//中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十三届学术年会论文汇编. 合肥, 2007.