

非最小相位系统控制器的优化设计¹⁾

王 凌 李文峰 郑大钟

(清华大学自动化系 北京 100084)

(E-mail: wangling@mail. tsinghua. edu. cn)

摘 要 抑制非最小相位系统的右半平面零点所造成的负调至今仍是个开放问题. 以同时抑制非最小相位系统的超调、负调和调整时间为目的, 合理融合遗传算法的并行搜索结构和模拟退火的可控性概率突跳, 提出了设计一类 PID 控制器的混合优化策略. 基于典型系统的数值仿真验证了混合策略的有效性和对系统的适应性, 以及所设计控制器的优越性.

关键词 非最小相位系统, PID, 混合策略

中图分类号 TP18

Optimal Design of Controllers for Non-Minimum Phase Systems

WANG Ling LI Wen-Feng ZHENG Da-Zhong

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

(E-mail: wangling@mail. tsinghua. edu. cn)

Abstract It is still an open problem to eliminate the undershoot caused by zeros in the right-half plane of non-minimum phase systems (NMPS). To decrease overshoot, undershoot and settling time of NMPS simultaneously, this paper reasonably combines the parallel search structure of genetic algorithm with the controllable jumping property of simulated annealing to propose a hybrid strategy for designing a class of PID controller. Numerical simulations based on typical systems demonstrate the effectiveness and the adaptability of the hybrid strategy on NMPS, as well as the superiority of the designed controller.

Key words Non-minimum phase system, PID, hybrid strategy

1 引言

非最小相位系统(Non-Minimum Phase Systems, NMPS)在控制工程中普遍存在, 如水轮机系统、锅炉汽包水位控制系统等^{1~7}. 由于 NMPS 中右半平面零点的存在, 系统的阶跃

1) 国家自然科学基金(60204008)资助

Supported by the National Natural Science Foundation of P. R. China(60204008)

收稿日期 2001-06-08 收修改稿日期 2002-03-05

Received June 8, 2001; in revised form March 5, 2002

响应存在负调,这对工业控制造成很大影响,如何消除负调至今仍为一个开放问题^[6].基于经典控制理论的设计大都局限于线性控制器^[1~3],难以做到同时抑制负调、超调和调整时间.近年来,基于频域理论的推理和优化方法^[4]、基于模糊控制器的设计方法^[5]、基于遗传算法的模糊 PID 控制器^[6]和神经网络^[7]得到了研究.尽管负调得到一定程度的抑制,但设计中需要建立知识库或经验规则,额外引入的模糊模块或神经元模块将增加系统的复杂性,从而增加实际操作的难度.近年来,遗传算法(Genetic Algorithm, GA)^[8]在控制工程中受到广泛重视,本文合理结合 GA 的并行搜索结构和模拟退火(Simulated Annealing, SA)^[9]的可控性概率突跳,提出一种高效的混合策略以避免 GA 易早熟收敛的弱点,并用于 NMPS 的一类 PID 控制器的设计.基于典型 NMPS 系统和水轮机系统的数值仿真验证混合策略的有效性和对系统的适应性,以及所设计控制器的优越性.

2 问题描述

非最小相位系统是指在右半平面(Right-Hand Plane, RHP)存在零点或极点的系统,本文仅考虑零点位于 RHP 的情况.由于 RHP 零点的存在,除发生超调现象外,系统响应还会出现负调.具体而言,若系统存在奇数个 RHP 零点,系统的阶跃响应首先将走向设定值的反方面再返回,从而引起负调;若存在偶数个 RHP 零点,系统的阶跃响应在跟随设定值方向一段时间后将走向设定值的反方面然后返回,从而引起负调.鉴于负调对许多工程场合的严重影响,控制系统除抑制传统的超调和调整时间外,还要尽量抑制负调,而同时做到这一点通常很困难.

PID 控制器具有结构简单、容易实现、参数物理意义明确等优点,为工程界所熟悉,至今仍得到广泛应用(几乎占 90%).传统 PID 算式可描述为 $u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$, 其中 $e(t)$ 为系统误差, $u(t)$ 为控制器输出, K_p , T_i 和 T_d 分别为比例、积分和微分参数.所谓 PID 整定,就是基于某种控制目标确定上述三参数的最佳值.传统的工程整定法大都是经验方法,如 Ziegler-Nichols 公式,引起的超调量和调整时间较大.为了抑制这些因素,可以对参与比例作用的设定值进行加权 $b \in (0, 1)$ ^[2], 即 $u(t) = K_p [br(t) - y(t)] +$

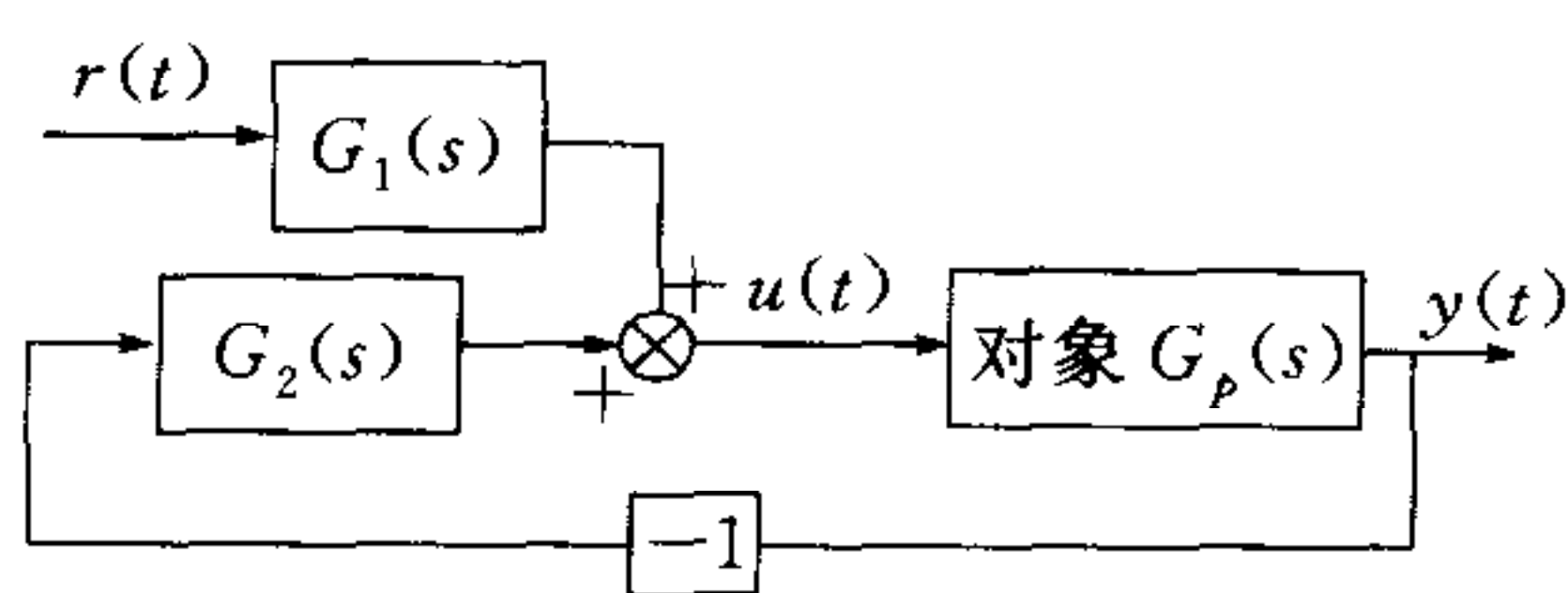


图 1 改进 PID 控制系统的结构图
Fig. 1 Structure of the improved PID control system

$K_p \left[\frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$, 从而转化为如图 1 所示的一类 PID 控制器,其中 $G_1(s) = K_p \left(b + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right)$, $G_2(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right)$, $e(t) = r(t) - y(t)$.显然,此类控制器的设计实际上就是四参数的寻优问题.

3 混合优化策略

基于生物进化论的遗传算法利用选择、交叉和变异算子,基于一组状态进行随机优化.然而大量研究表明,GA 易产生早熟收敛,并对参数和操作有严重的依赖性.为了提高优化性能,本文将具有概率突跳特性的 SA 与 GA 相结合,提出下述混合优化策略:

- 1) 初始化种群,确定初温;

- 2) 评价当前种群中各个体;
- 3) 若算法终止准则满足,则输出结果;否则进行以下步骤;
- 4) 进行 GA 的选择、交叉和变异;
- 5) 对各个体进行 SA 的概率性搜索;
- 6) 若 SA 抽样准则满足,则进行退温操作并转步骤 2);否则转步骤 5)。

这种混合策略具有以下优点^[10,11]:1) 基于适者生存的群体进化机制与基于概率突跳的物理退火机制相融合,有利于丰富搜索行为,增强全局和局部意义下的搜索能力和效率;2) GA 并行化搜索结构使传统串行搜索的 SA 成为并行结构,有利于增强 SA 的优化能力;3) 多种搜索操作相结合,复制保留当前种群中的优良个体,交叉使后代继承父代的优良模式,变异增强种群多样性,高温下的 SA 操作有利于状态的全局大范围迁移,低温下的 SA 操作有利于状态的局部小范围趋化性移动,从而可丰富优化过程中的邻域搜索结构,增强算法在解空间中的探索能力和效率;4) 由于复制对当前种群外的解空间无探索能力,交叉对“畸形”种群的进化能力有限,小概率变异很难增加种群的多样性,而 SA 一般需要较长的优化过程,利用 SA 控制初温来控制初始搜索行为,控制温度的高低来控制突跳能力的强弱,控制降温速率来控制突跳能力的下降幅度,控制抽样次数来控制各温度下搜索能力,两者结合则使两者的搜索行为相互补充.因此,基于优化机制、结构和行为的结合,混合策略将具有更好的优化能力、效率和可靠性.下面就 NMPS 的控制器设计,对算法进行具体设计.

4 算法设计

1) 编码. 鉴于 PID 控制器的设计实质上是多维函数优化问题,在此采用实数编码,避免二进制编码巨大的计算量和存储量,以及精度对串长的依赖性.

2) 目标函数. 为了均衡考虑对负调、超调和调整时间的抑制,目标函数设计为 $f = f_1 + c \cdot f_2$, 其中 $f_1 = \int_{\tau}^{\infty} t |e(t)| dt$ 和 $f_2 = |\min(y(t))|$ 分别为用于强调抑制超调与调整时间的绝对误差矩积分(ITAE)和用以强调抑制负调的系统负调的绝对值, c 为加权因子用于强调对负调抑制的重要性.

3) 初始化. 随机产生初始种群,并令初始种群中最差状态(目标值为 f_w)相对最优状态(目标值为 f_b)的接受概率为 p_r ,从而由式 $t_0 = -(f_w - f_b) / \ln p_r$ 确定初温.

4) 选择和交叉. 为了避免 GA 的比例选择对适配值函数的依赖性,直接基于目标函数进行选择,即首先将各个体按目标值由大到小进行排列,以概率 $2k / [P_s(1 + P_s)]$ 选择第 k 号个体与当前种群中的最优个体进行算术交叉,即
$$\begin{cases} x'_1 = \alpha \cdot x_1 + (1 - \alpha) \cdot x_2 \\ x'_2 = \alpha \cdot x_2 + (1 - \alpha) \cdot x_1 \end{cases}$$
 其中 x_1, x_2

为父代, x'_1, x'_2 为后代, $\alpha \in (0, 1)$ 为随机数,并重复 $P_s/2$ 次,其中 P_s 为种群大小,然后采用整体替换策略.

5) 变异和 SA 状态发生器. 由于 SA 的概率突跳可避免陷入局部极小,因此将变异改为概率 1 的趋化性搜索,SA 状态发生器视为概率可控的变异,且两者均采用附加扰动方式,即 $x' = x + \eta \cdot \xi$, 其中 ξ 为满足正态分布的随机扰动, η 为尺度参数.

6) SA 接受函数和退温函数. SA 状态接受函数采用最常用方式 $\min\{1, \exp(-\Delta/t)\} > \text{random}[0, 1]$, 式中 t 为温度参数, Δ 为新旧状态目标值的差,并采用保优策略避免遗失最优

解. 采用指数退温策略, 即 $t_k = \lambda \cdot t_{k-1}, 0 < \lambda < 1$, 它通常能在优化度和优化效率间起到较好的折衷效果.

7) 抽样准则和终止准则. 为了兼顾优化性能和效率, 采用 L_1 步固定抽样策略, 若最优解在连续 L_2 步退温均保持不变则近似认为收敛.

5 数值仿真与分析

为验证混合策略所设计控制器的性能, 对以下非最小相位对象进行了仿真研究.

对象 1: $G_{p_1}(s) = \frac{-s+2}{s^2+2s+2}$, 存在一实数非最小相位零点 2, 极点为 $-1 \pm i$.

对象 2: $G_{p_2}(s) = \frac{s^2-4s+6}{s^3+6s^2+8s+6}$, 存在两共轭非最小相位零点 $2 \pm \sqrt{2}i$, 极点为 -4.5251 和 $-0.7374 \pm 0.8844i$.

对象 3: $G_{p_3}(s) = \frac{s^2-7s+6}{s^3+6s^2+8s+6}$, 存在两实数非最小相位零点 1 和 6, 极点为 -4.5251 和 $-0.7374 \pm 0.8844i$.

对象 4: $G_{p_4}(s) = \frac{s^2-7s+6}{s^3+4.8s^2+6.4s+6}$, 零点同对象 3, 极点为 $-0.6756 \pm 1.1328i$ 和 -3.4487 .

取 $P_s = 20, \lambda = 0.8, p_r = 0.1, L_1 = L_2 = 30, \eta = 0.1, c = 1000$, 对原开环对象和加控制器的闭环系统进行阶跃响应的比较, 20 次随机仿真的性能统计数据如表 1 所示, 搜索得到的控制器参数如表 2 所示, 图 2~5 分别是对上述 4 个对象的典型仿真结果.

表 1 性能统计数据

Table 1 Statistical performance data

| 对象 | 负调(%) | | 超调(%) | |
|------|-------|------|-------|------|
| | 开环系统 | 受控系统 | 开环系统 | 受控系统 |
| 对象 1 | 14.56 | 2.34 | 4.95 | 0.64 |
| 对象 2 | 6.22 | 1.44 | 7.61 | 1.45 |
| 对象 3 | 29.81 | 7.79 | 9.36 | 0.93 |
| 对象 4 | 36.8 | 8.66 | 20.32 | 0.63 |

表 2 控制器参数

Table 2 Controller parameters

| 对象 | b | K_p | K_p/T_i | $K_p T_d$ |
|------|--------|--------|-----------|-----------|
| 对象 1 | 0.5540 | 0.1700 | 0.3989 | 0.0085 |
| 对象 2 | 0.5042 | 0.3389 | 0.3682 | 0.1871 |
| 对象 3 | 0.4685 | 0.1985 | 0.2629 | 0.0829 |
| 对象 4 | 0.5676 | 0.0869 | 0.2480 | 0.0466 |

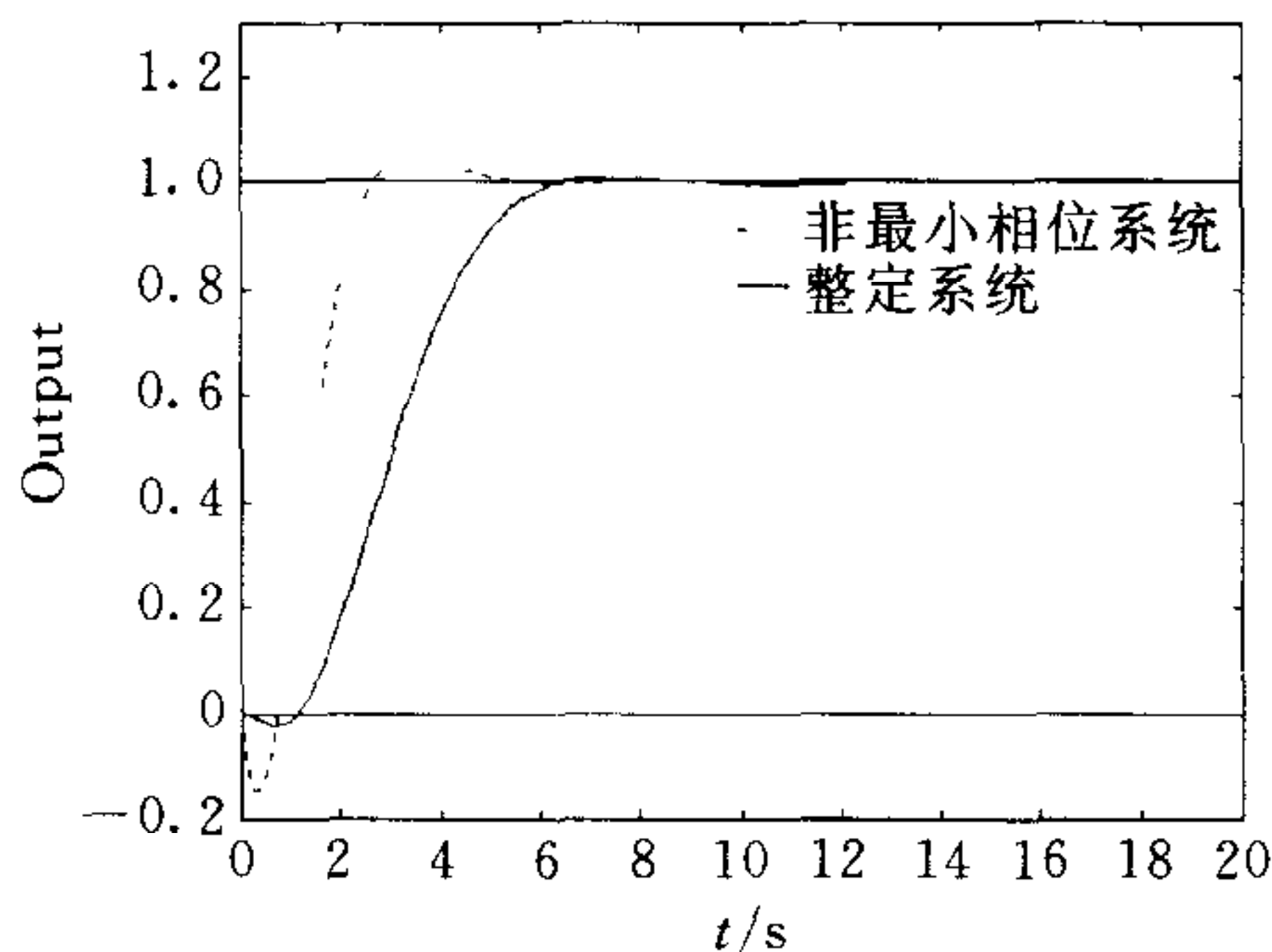


图 2 对象 1 的开环和闭环阶跃响应
Fig. 2 Open-loop and Close-loop step responses for plant 1

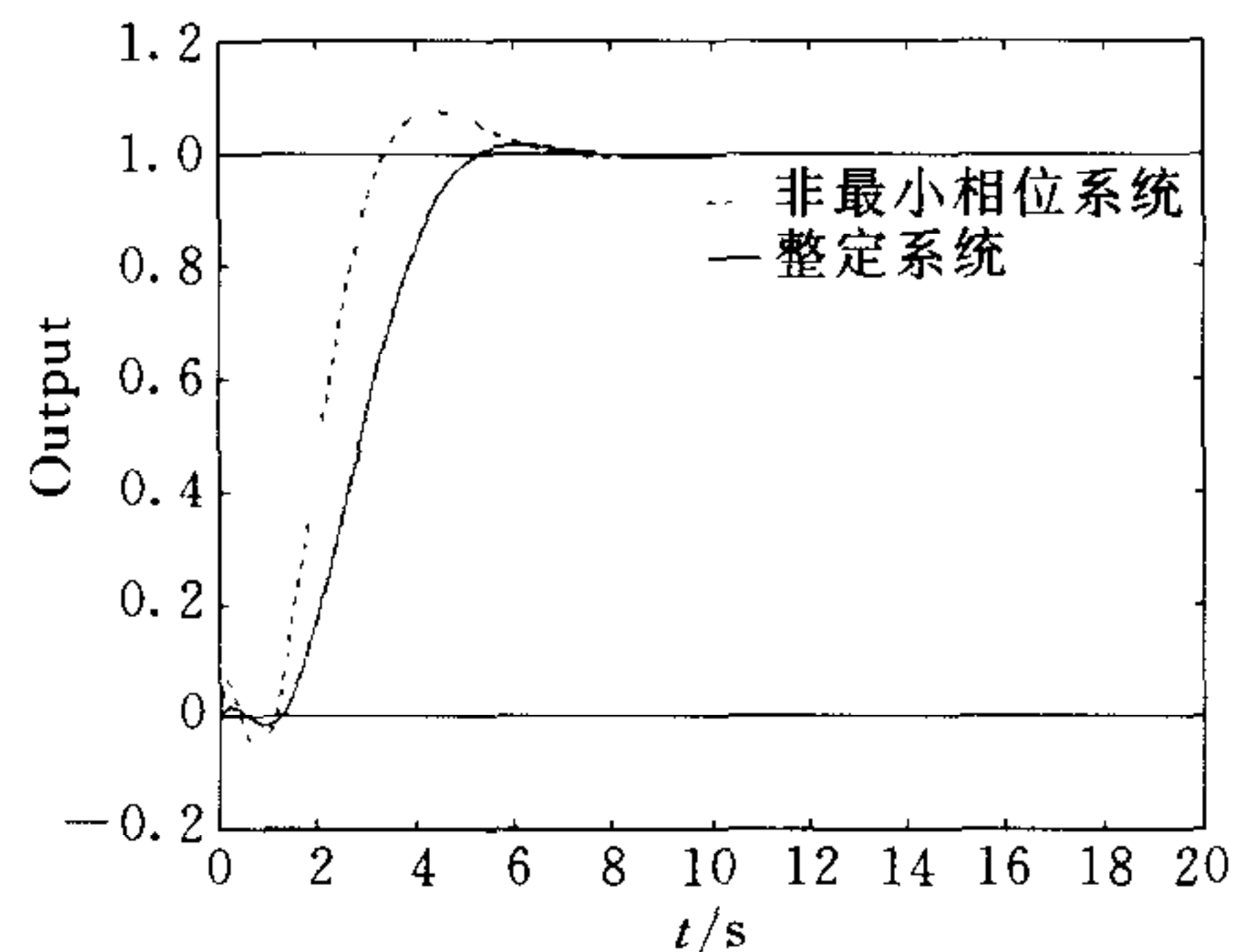


图 3 对象 2 的开环和闭环阶跃响应
Fig. 3 Open-loop and Close-loop step responses for plant 2

最后对非最小相位的水轮机系统^[12]进行研究,将混合策略与传统的 Z-N 方法设计的控制器作比较.水轮机系统的控制对象为 $\frac{1}{1+t_y s} \cdot \frac{1-t_w s}{1+0.5t_w s} \cdot \frac{1}{a+t_a s}$,其中 $t_w=0.8, a=0.2, t_a=0.96$.取 $c=100$,其它参数同前.当 $t_y=0$ 时闭环阶跃响应曲线如图 6 所示;当 $t_y=0.2$ 时(对象结构变化)的闭环阶跃响应曲线如图 7 所示;图 8 显示了系统对时变设定值的跟踪响应.

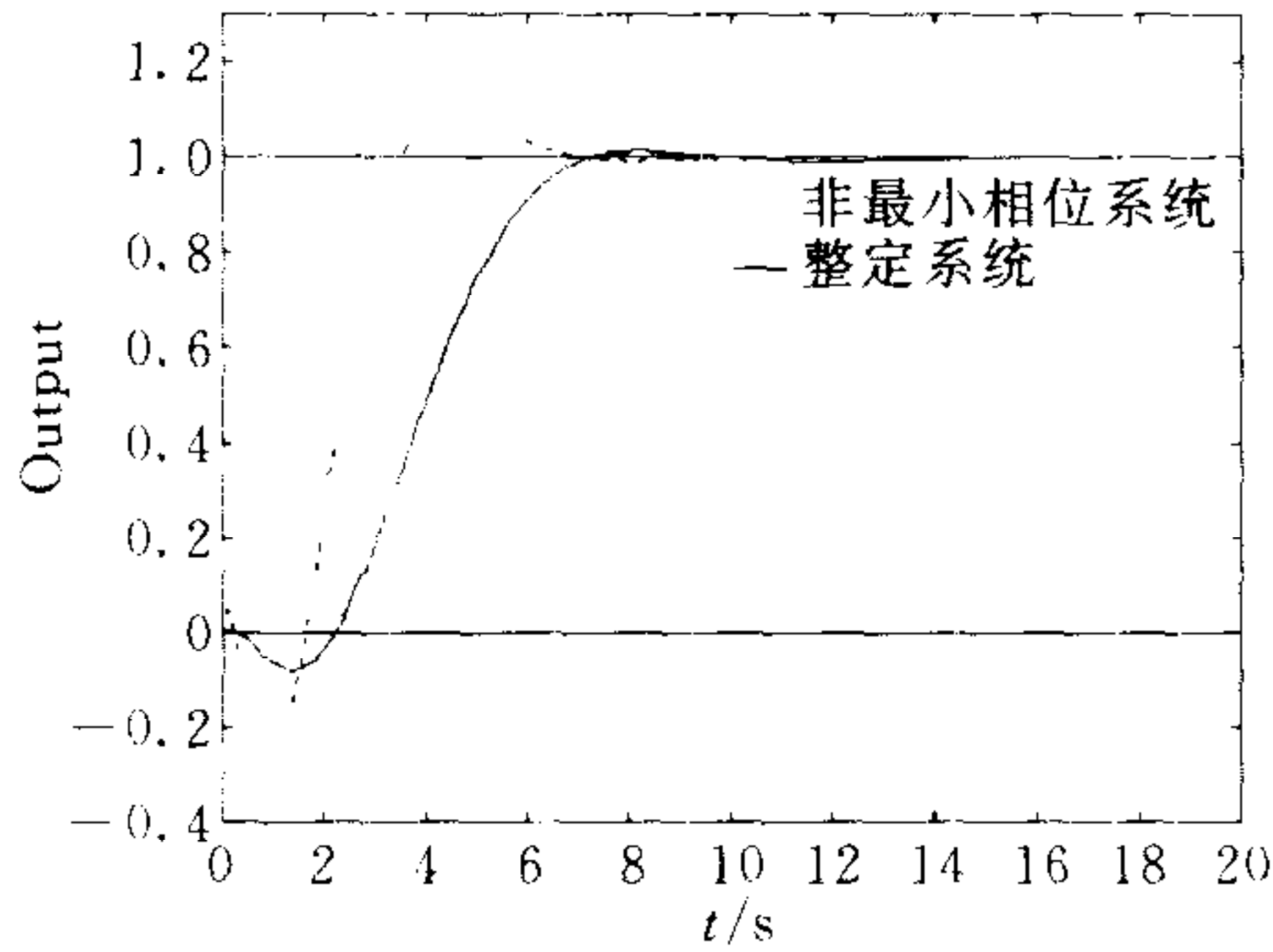


图 4 对象 3 的开环和闭环阶跃响应
Fig. 4 Open-loop and closed-loop step responses for plant 3

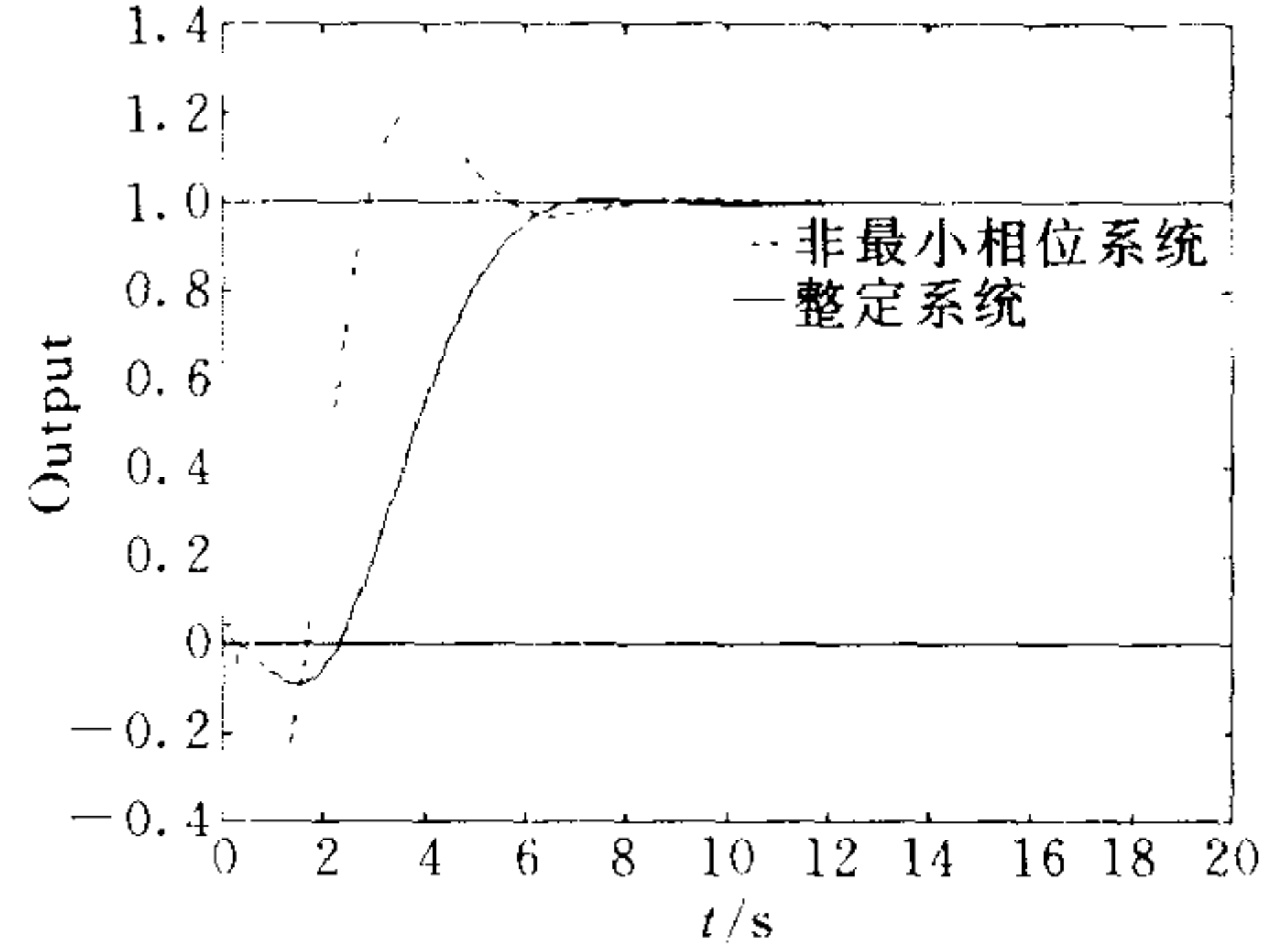


图 5 对象 4 的开环和闭环阶跃响应
Fig. 5 Open-loop and closed-loop step responses for plant 4

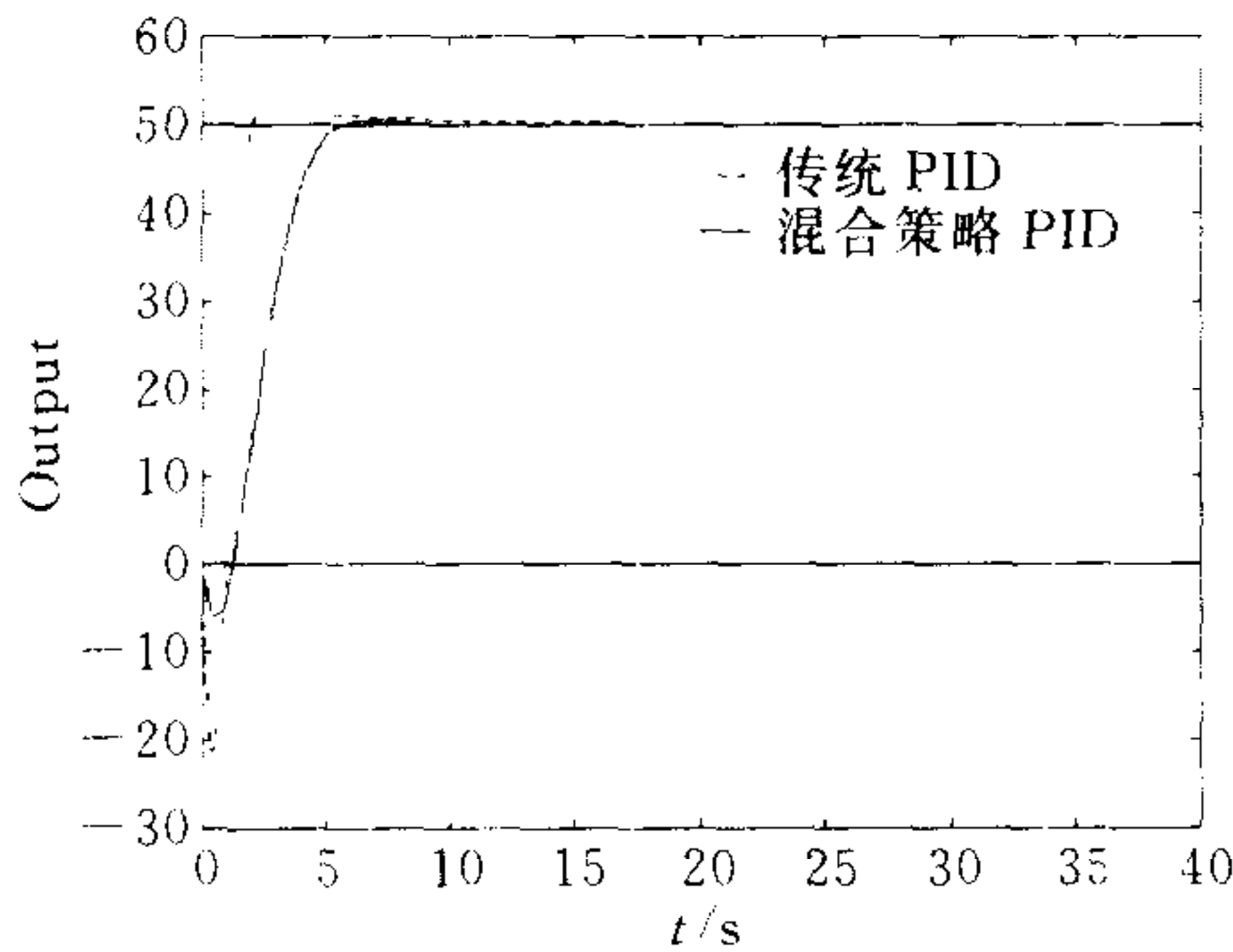


图 6 水轮机系统阶跃响应曲线($t_y=0$)
Fig. 6 Step response curve for water turbines system ($t_y=0$)

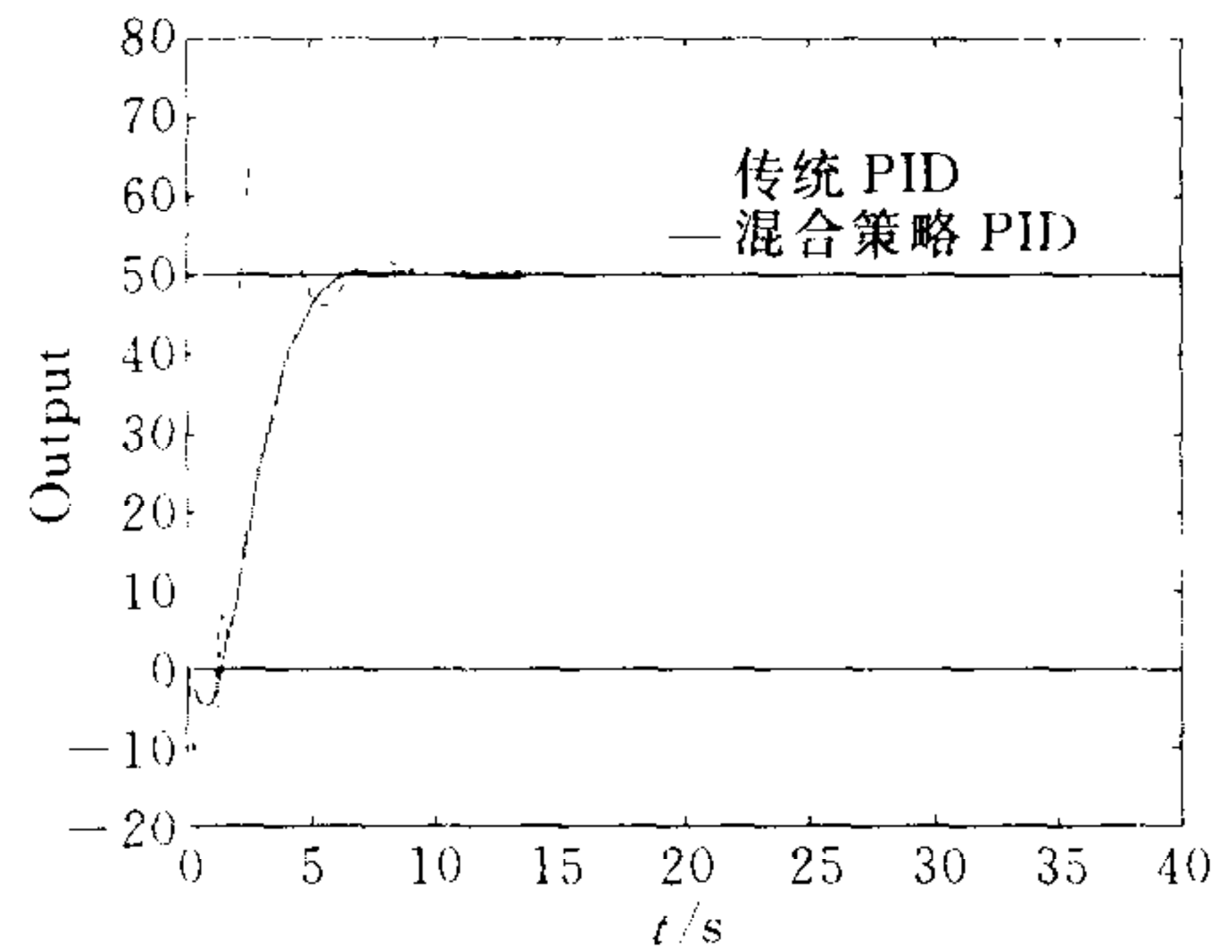


图 7 水轮机系统阶跃响应曲线($t_y=0.2$)
Fig. 7 Step response curve for water turbines system ($t_y=0.2$)

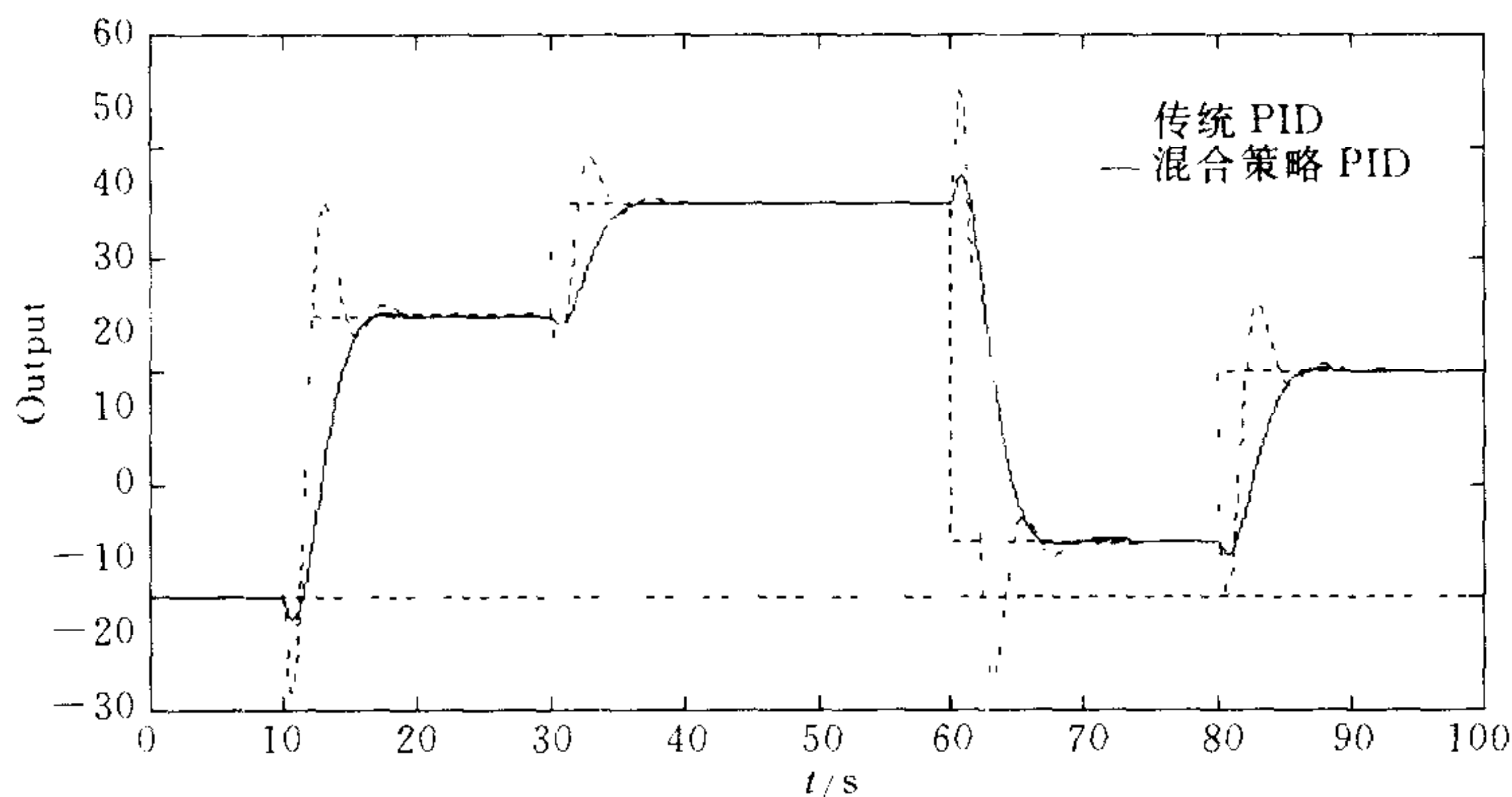


图 8 设定值时变的水轮机控制系统响应曲线
Fig. 8 Time-varied set point based response curve for water turbines system

6 结论

基于仿真结果,可归纳出如下结论:

1) 混合策略本身具有较强的优化能力,对随机初始条件具有一定的鲁棒性(不同实验所得的控制器性能几乎相同),优化过程较快(在 PII450 计算机上平均设计时间约百秒);

2) 仿真曲线清楚地表明了 RHP 零点对系统的影响,而混合策略所设计的控制器具有较好的控制品质,具体表现为负调和超调同时得到大幅度抑制(对象 1 至对象 4 的负调较开环系统平均缩小约 75%,超调较开环系统平均缩小约 85%),调整时间也有所下降,其性能明显优于传统的 Z-N 方法;

3) 基于混合策略的控制器设计方法对 NMPS 系统有一定的适应性,无论是极点发生变化(如对象 3 与对象 4),或对象结构发生变化(水轮机系统),所设计的控制器均能够取得良好的控制品质;

4) 即使在设定值时变的情况下,混合策略设计的控制器也能够使系统具有良好的设定值动态跟踪能力,负调和超调均能抑制得很小.

鉴于控制品质的改善,尤其是负调和超调的大幅度抑制,可以说混合策略是设计 NMPS 的控制器有效方法.

本文合理地融合 SA 和 GA,提出了设计非最小相位系统控制器的一种混合策略. 仿真结果验证了算法的有效性和所设计控制器的优越性. 对 MIMO 系统的探讨,以及与先进控制器的结合,将是下一步的研究工作.

References

- 1 Elliott H. Direct adaptive pole placement with application to nonminimum phase systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1982, **27**(3):720~721
- 2 Astrom K, Haggund T. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. New York: ISA, 1995
- 3 Astrom K. Direct methods for non-minimum phase systems. In: *Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*. NJ: Piscataway, 1980, 611~615
- 4 Li Dong-Hai, Wu Qi. Intelligent design methods of non-minimum phase control systems. *Control and Decision*, 1996, **11**(6): 633~637(in Chinese)
- 5 Wang Yin-Song, Shang Guo-Cai. A fuzzy control method for the nonminimum-phase systems. *Control and Decision*, 1999, **14**(1):51~55(in Chinese)
- 6 Li T, Shieh M. Design of a GA-based fuzzy PID controller for non-minimum phase systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, **111**(2):183~197
- 7 Park S, Park L, Park C H. A neuro-genetic controller for nonminimum phase systems. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1995, **6**(5):1297~1300
- 8 Michalewicz Z. *Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs*. Berlin: Springer-Verlag,1994
- 9 Kirkpatrick S, Gellatt C, Vecchi C. Optimization by simulated annealing. *Science*, 1983, **220**(4598): 671~680
- 10 Wang L, Zheng D Z. Study on a class of GASA hybrid strategy and its convergence behaviour. *Control and Decision*, 1998, **13**(6):672~675(in Chinese)
- 11 Wang L, Zheng D Z. An effective hybrid optimization strategy for job-shop scheduling problems. *Computers and Operations Research*, 2001, **28**(6):585~596
- 12 Liu L, Mao Z. Water turbines PID controller based on genetic algorithm. *Automation of Electric Power Systems*, 1997, **21**(12): 41~43(in Chinese)

王 凌 1999 年在清华大学自动化系获博士学位. 主要研究方向为智能优化算法理论与应用、生产调度、神经网络等.

(WANG Ling Received his Ph. D. degree at Department of Automation, Tsinghua University in 1999. His main research interests include intelligent optimization algorithms and theory, manufacturing scheduling, neural networks, etc.)

李文峰 2000 年毕业于清华大学自动化系. 主要研究方向为智能优化算法理论与应用、控制系统设计.

(LI Wen-Feng Received his B. S. degree at Department of Automation, Tsinghua University in 2000. His main research interests include intelligent optimization algorithms and theory, control system design.)

郑大钟 清华大学自动化系教授, 博士生导师. 主要研究方向为控制理论、DEDS、生产调度系统和 HDS 等.

(ZHENG Da-Zhong Professor of Department of Automation, Tsinghua University. His main research fields include control theory, DEDS, scheduling, HDS, etc.)

Call for Papers

IEEE 6th International Conference on Intelligent Transportation Systems

Shanghai, P. R. China, October 12~15, 2003

www.ieeeitsc.org or www.ieee.org/itsc/2003

The IEEE Intelligent Transportation Systems Council (ITSC) will sponsor its annual conference (IEEE ITSC 03) in Shanghai on basic research and application of leading advances in communications, computers, control, electronics and related technologies to Intelligent Transportation Systems (ITS). IEEE ITSC 03 is co-sponsored by the Intelligent Control and Systems Engineering Center, Institute of Automation of the Chinese Academy of Sciences. Major topics include, but not limited to:

PROGRAM TOPICS

| | |
|--|---------------------------------|
| Sensors (infrastructure & vehicle-based) | Reliability & Quality Assurance |
| Communications (side area & vehicle-to-roadside) | Imaging & Image Processing |
| Simulation (continuous, discrete, real-time) | Vehicle Control |
| Human-Computer Interfaces (displays, artificial speech) | Standards |
| Control (adaptive, fuzzy, cooperative neural networks, GA) | Traffic Theory in ITS |
| Decision Systems (expert systems, intelligent agents) | Routing & Route Guidance |
| Systems (engineering, architecture, evaluation) | Transit Applications |
| Information Systems (databases, data fusion, security) | Air Traffic Control |
| Computers (hardware, software) | Web Traffic |
| Technology Forecasting & Transfer | Navigation & Guidance System |
| System/Subsystem Electromagnetic Compatibility | Port and Terminal Automation |
| Signal Processing | |

Proposals for special sessions should be submitted to Prof. Wei-Hua Lin (weilin@sie.arizona.edu), and suggestions for tutorial and workshop are invited and should be forwarded to Dr. Yilin Zhao (y.zhao@ieee.org)

PAPER SUBMISSION

Complete manuscripts in PDF format must be electronically submitted for review no later than March 1, 2003 at the following address:

www.ieeeitsc.org

Submitted manuscripts should be six (6) pages in IEEE two-column format, including figures, tables, and references. A LaTeX style file and a Microsoft Word template are available from the IEEE web site (www.ieee.org/organizations/pubs/authors.htm). HOWEVER, submissions MUST be in PDF FORMAT.

In addition to the manuscript, a cover page should be sent that includes: (1) the title of the paper, (2) the name(s) of the author(s), (3) the technical categories, and (4) the name, mailing address, telephone and fax numbers, and email address of the corresponding author. Notification of acceptance is scheduled for May 15, 2003.

IMPORTANT DATES

| | |
|----------------------------|---------------|
| Paper submission deadline | March 1, 2003 |
| Notification of acceptance | May 15, 2003 |
| Camera-ready copy due | July 1, 2003 |