

一种新型最速控制技术：原理和应用

石上瑶^{1†}, 李 军², 刘兆华^{3,4}, 刘家豪³, 陈鹏云⁵

(1. 中北大学 软件学院, 山西 太原 030051; 2. 广东电网有限责任公司 电力科学研究院, 广东 广州 510080;

3. 中北大学 机械工程学院, 山西 太原 030051; 4. 山西电子科技学院 信创产业学院, 山西 临汾 041000;

5. 中北大学 航空宇航学院, 山西 太原 030051)

摘要: 在实际的控制工程领域中, 传统的比例-积分-微分(PID)控制仍然占主导地位. 一阶惯性滤波器(FOIF)是构建PID结构的基础. 加速型工程最速比例-积分(AEFPI)控制器则是以加速型工程最速跟踪滤波器(AEFTF)为基础构造的, 然而, 对于AEFPI的全面研究和分析还缺乏. 本文提出了FOIF原型的问题, 并通过研究和分析最速跟踪滤波器机理与物理缺陷、工程化重构加速型工程最速滤波器输出跟踪输入特性、频域滤波特性以及所构造的AEFPI控制器的控制性能等方面, 从技术角度揭示了低通滤波器属性对所构造控制器性能具有决定作用. 通过数学计算分析、仿真实验验证以及现有工程实践结合, 说明了这种AEFPI控制器具备显著反馈控制性能.

关键词: 工程化重构问题; 加速型工程最速跟踪滤波器; 加速型工程最速比例-积分; 新型最速控制技术; 直角三角窗

引用格式: 石上瑶, 李军, 刘兆华, 等. 一种新型最速控制技术: 原理和应用. 控制理论与应用, 2024, 41(8): 1408 – 1416

DOI: 10.7641/CTA.2024.30187

A novel fastest control technology: principles and applications

SHI Shang-yao^{1†}, LI Jun², LIU Zhao-hua^{3,4}, LIU Jia-hao³, CHEN Peng-yun⁵

(1. School of Software, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China;

2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd, Guangzhou Guangdong 510080, China;

3. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China;

4. College of Information and Innovation Industry,

Shanxi University of Electronic Science and Technology, Linfen Shanxi 041000, China;

5. School of Aeronautics and Astronautics, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China)

Abstract: In the practical field of control engineering, the traditional proportional integral-differential (PID) control remains dominant. The first-order inertial filter (FOIF) serves as the foundation for the PID structure. The accelerated engineering fastest proportion-integration (AEFPI) controller is based on the accelerated engineering fastest tracking filter (AEFTF). However, there is a lack of comprehensive research and analysis on “AEFPI” controller. This paper found a prototype problem for FOIF, investigates and analyzes the mechanism and physical defects of the fastest tracking filter. It also explores its output tracking input characteristics in engineering reconstruction, its frequency domain filtering characteristics, and the control performance of the constructed accelerated engineering fastest proportional-integral controller. From a technical perspective, it is revealed that properties associated with low-pass filters play a decisive role in determining performance outcomes for this constructed controller. Through mathematical calculations, simulation experiments verification, and existing engineering practices, it has been proven that this accelerated engineering fastest proportional integral controller exhibits remarkable feedback control performance.

Key words: engineering reconstruction problem; accelerated engineering fastest tracking filter; accelerated engineering fastest proportional-integral; novel fastest control technology; right triangle window

Citation: SHI Shangyao, LI Jun, LIU Zhaohua, et al. A novel fastest control technology: principles and applications. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(8): 1408 – 1416

收稿日期: 2023-04-04; 录用日期: 2024-03-18.

†通信作者. E-mail: peter.shi@nuc.edu.cn; Tel.: +86 18980505627.

本文责任编辑: 黄攀峰.

国家自然科学基金项目(51909245, 62003314), 山西省重点研发计划项目(202202020101001), 山西省基础研究计划项目(202103021224187, 20210302124010, 20210302123050)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51909245, 62003314), the Key R&D Plan of Shanxi Province (202202020101001) and the Basic Research Programs of Shanxi Province (202103021224187, 202103021240010, 20210302123050).

1 引言

作为基本信号处理器件^[1],滤波器在通信^[1]、航空航天^[1]、仪器仪表^[2]、工业控制^[3]等领域有广泛的运用.滤波器包括低通滤波器(low pass filters, LPF)^[3-5]、带通滤波器^[6]等.LPF的基本用途是滤除低通带宽以外的噪声干扰.LPF包括有一阶惯性滤波器(first order inertial filter, FOIF)^[3]、窗函数滤波器^[4]、分数阶LPF^[5]等.窗函数包括有矩形窗(rectangular window, RW)^[4]、三角窗^[7]、汉宁窗^[8]等.

理想低通滤波器是一种滤波矩形系数(filter rectangle coefficient, FRC)^[9]为1的滤波器,在低通带宽内增益为1,在低通带宽外增益为0,理想低通滤波器在实时滤波中不可实现.

研究表明,LPF是控制器构造的重要基础,例如比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制器基于FOIF构造^[10-12].任正云等^[13]将矩形窗滤波器用于构造一种组合积分控制器.在工程实践中,工程研究人员发明出一种直角三角窗(right triangle window, RTW)函数^[14],基于RTW函数构造出一种加速型最速跟踪滤波器(acceleration fastest tracking filter, AFTF)^[15].

在工业控制领域,考伦德和史蒂芬森在1936年发明的PID控制器依旧作为首选基础控制器,这反映出控制理论研究与控制工程应用存在着一定的差距^[16].文献[3]指出,“在PID控制中,一个看不见的严重缺陷,即常规积分控制跟踪常值扰动的效率不高的问题已被揭示”.PID控制中的积分器是一种常规积分器^[16].

FOIF是基于典型指数型跟踪滤波机制,文献[15]指出,“PID控制代表了一种指数型控制机制”;研究表明,决定常规积分器跟踪常值扰动效率不高的本质在于构造常规积分器背后的FOIF的滤波机制;基于控制技术的现实需要,需要产生出能够取代现有PID控制的新型基础控制技术;而FOIF存在输出跟踪输入的效率不高的问题,因此,要想实现取代PID控制,需要从LPF的角度突破FOIF背后的指数型跟踪滤波机制.

在电力系统,工程研究人员发明出一种工程最速跟踪滤波器(engineering fastest tracking filter, EFTF)^[16]和加速型工程最速跟踪滤波器(acceleration EFTF, AEFTF)^[15],并构造出工程最速控制器(engineering fastest controller, EFC)^[16]和加速型工程最速比例-积分(acceleration engineering fastest proportional-integral, AEFPI)^[15]控制器,目前在某省火电机组的技改商业项目中已得到广泛应用^[15-16].

文中变量、参数、函数的表达均是唯一的,可以相互引用.为了表述简洁,文中如无特别说明,时间、时间常数的单位是s,加速度的单位是 s^{-2} ,频率 ω 的单位

是rad/s,相位、相位裕度的单位是($^{\circ}$),比例增益的单位为无量纲,阶次的单位为无量纲,常用对数20lg的单位为dB.

2 最速跟踪滤波与物理缺陷

LPF主要存在相位滞后的问题,最速跟踪滤波技术可解决LPF输出最速跟踪输入的问题,能够有效提高所应用载体的某种关键性能,例如微分性能、反馈控制性能等.

2.1 最速跟踪滤波

窗函数滤波代表了(线性)最速跟踪滤波,所谓最速跟踪,就是在窗口时间内,输出最速的跟踪到输入,区别仅在于输出跟踪输入的加速度上有所区别.(零加速型)最速跟踪滤波的原型是RW函数,加速型最速跟踪滤波的原型是RTW函数.

RW函数与RTW函数表达为

$$\begin{cases} f_{RW}(s) = 1 - e^{-T_W s}, \\ f_{RTW}(s) = \frac{1}{T_W s} - \frac{1}{T_W s} e^{-T_W s} - e^{-T_W s}, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f_{RW}(s)$, $f_{RTW}(s)$ 分别为RW函数、RTW函数的传递函数, T_W 为窗口时间长度.

出于对比的需要,FOIF原型是一种实际微分器(actual differentiator, AD)^[17],为

$$f_{AD}(s) = f_{FOIF}(s) T_D s = \frac{T_D s}{1 + T_{FOIF} s}, \quad (2)$$

式中: $f_{AD}(s)$, T_D 分别为实际微分器的传递函数、时间常数, $f_{FOIF}(s)$, T_{FOIF} 分别为FOIF的传递函数、时间常数.

输入单位阶跃,其中在 $T_W = T_{FOIF} = T_D = 10$ s,得到RW函数过程输出 $PV_{RW}(t)$, RTW函数过程输出 $PV_{RTW}(t)$ 、实际微分器过程输出 $PV_{AD}(t)$,如图1所示.

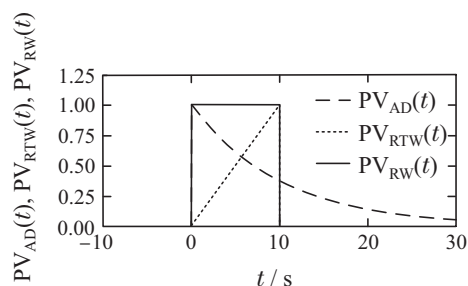


图1 实际微分器、RTW函数、RW函数过程输出特性示意图

Fig. 1 The diagram of process output characteristic of actual differentiator and right triangle window and rectangular window

如图1所示,在 $t > 0$ s, $PV_{AD}(t)$ 输出速率为负. t 在 0 s- 10 s 区间, $PV_{RTW}(t)$ 输出速率为正, $PV_{RW}(t)$ 输出速率为零. 这表明了实际微分器与RTW函数、RW函数的性质不同.

最速跟踪滤波器、AFTF为

$$\begin{cases} f_{\text{FTF}}(s) = \frac{1 - e^{-T_{\text{FTF}}s}}{T_{\text{FTF}}s}, \\ f_{\text{RTW}}(s) = \frac{2}{T_{\text{AFTF}}s} \left(\frac{1 - e^{-T_{\text{AFTF}}s}}{T_{\text{AFTF}}s} - e^{-T_{\text{AFTF}}s} \right), \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f_{\text{FTF}}(s)$, T_{FTF} 分别为最速跟踪滤波器的传递函数、时间常数, $f_{\text{AFTF}}(s)$, T_{AFTF} 分别为AFTF的传递函数、时间常数.

输入单位阶跃, 得到最速跟踪滤波器过程输出 $\text{PV}_{\text{FTF}}(t)$ 、加速型最速跟踪滤波器过程输出 $\text{PV}_{\text{AFTF}}(t)$ 为

$$\begin{cases} \text{PV}_{\text{FTF}}(t) = \begin{cases} \frac{t}{T_{\text{FTF}}}, & t \leq T_{\text{FTF}}, \\ 1, & t > T_{\text{FTF}}, \end{cases} \\ \text{PV}_{\text{AFTF}}(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} a_{\text{PV}} t^2, & t \leq T_{\text{AFTF}}, \\ 1, & t > T_{\text{AFTF}}, \end{cases} \\ a_{\text{PV}} = \frac{2}{T_{\text{AFTF}}^2}, \end{cases} \quad (4)$$

式中 a_{PV} 为AFTF输出的加速度.

输入单位阶跃, 其中在 $T_{\text{FTF}} = T_{\text{AFTF}} = 100$ s, 得 $\text{PV}_{\text{FTF}}(T)$, $\text{PV}_{\text{AFTF}}(T)$, 如图2所示.

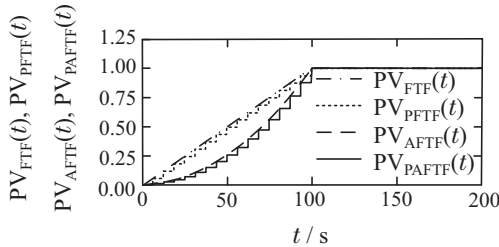


图2 FTF, PFTF, AFTF, PAFTF的过程输出特性示意图

Fig. 2 The diagram of process output characteristic of FTF, PFTF, AFTF and PAFTF

2.2 窗函数滤波器的物理缺陷

窗函数滤波器的共性缺点表现在计算量较大, 例如在每一个离散间隔, 需要对窗口长度内的序列进行一次累加平均计算. 工程应用需要控制器结构简单, 在一些系统, 如分散控制系统^[18], 按照给出的窗函数滤波器的拉普拉斯函数, 通过功能块构造控制器, 但是所构造出的控制器却存在常值观测的累积误差的问题.

在控制器设计中, 超前观测是控制器的基本组成部分之一, 通过对一些系统的逆变换构造出高性能的超前观测是一种常用的方式, 窗函数滤波器的共性问题包含纯滞后^[18], 而纯滞后的超前观测在物理上不成立, 这就造成了窗函数滤波器的物理缺陷, 无法直接利用窗函数滤波器构造出高性能的超前观测器.

因此, 为克服窗函数滤波器的物理缺陷, 需要进行工程化重构^[20].

3 工程化重构问题

为克服窗函数滤波器的物理缺陷, 需要进行工程化重构, 一种工程化实现^[20]. 工程化重构不是简单化处理, 例如将AFTF简化为一阶惯性滤波器, 在性质上回到FOIF.

3.1 串级纯滞后单元近似方法

对于最速跟踪滤波器、AFTF, 首先采用一种串级纯滞后单元近似, 得到近似最速跟踪滤波器(proximate FTF, PFTF)、近似加速型最速跟踪滤波器(proximate AFTF, PAFTF), 为

$$\begin{cases} f_{\text{PFTF}}(s) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (e^{-\frac{T_{\text{FTF}}}{n}s})^i, \\ f_{\text{PAFTF}}(s) = \frac{1}{\sum_{l=1}^{l=n} (2l-1)} \sum_{i=1}^{i=n} (2i-1) (e^{-\frac{T_{\text{FTF}}}{n}s})^i, \end{cases} \quad (5)$$

式中: $f_{\text{PFTF}}(s)$, $f_{\text{PAFTF}}(s)$ 分别为PFTF, PAFTF的传递函数, n 为纯滞后单元的串级数或阶次. 工程上 n 取值不能无限大, 文中默认 $n = 16$.

在 $T_{\text{FTF}} = T_{\text{AFTF}} = 100$ s, 输入单位阶跃, 得到PFTF过程输出 $\text{PV}_{\text{PFTF}}(T)$, PAFTF过程输出 $\text{PV}_{\text{PAFTF}}(T)$, 如图2所示.

3.2 惯性组合滤波器重构方法

在串级纯滞后单元基础上, 采用串级一阶惯性滤波器替换串级纯滞后单元, 简称为惯性组合滤波器(inertial combined filter, ICF)^[16]重构方法. 得到EFTF, AEFTF为

$$\begin{cases} f_{\text{EFTF}}(s) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (1 + \frac{T_{\text{EFTF}}}{n}s)^{-i}, \\ f_{\text{AEFTF}}(s) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (2i-1) (1 + \frac{T_{\text{AEFTF}}}{n}s)^{-i}}{\sum_{l=1}^{l=n} (2l-1)}, \end{cases} \quad (6)$$

式中: $f_{\text{EFTF}}(s)$ 和 T_{EFTF} 分别为EFTF的传递函数和时间常数, $f_{\text{AEFTF}}(s)$ 和 T_{AEFTF} 分别为AEFTF的传递函数和时间常数.

从工程的角度, 文献[15]对式(6)给出的AEFTF进行了某种简化, 为

$$f_{\text{AEFTF}}(s) = \frac{1}{\sum_{l=1}^{l=n} l} \sum_{i=1}^{i=n} i (1 + \frac{T_{\text{AEFTF}}}{n}s)^{-i}. \quad (7)$$

出于继承的关系, 文中的AEFTF均指式(7)给出的AEFTF.

从 $T_{\text{FOIF}} = T_{\text{FTF}} = T_{\text{EFTF}} = T_{\text{AFTF}} = T_{\text{AEFTF}} =$

100 s, 得到FOIF过程输出 $PV_{FOIF}(t)$, EFTF过程输出 $PV_{EFTF}(T)$, AEFTF过程输出 $PV_{AEFTF}(T)$, 如图3所示。

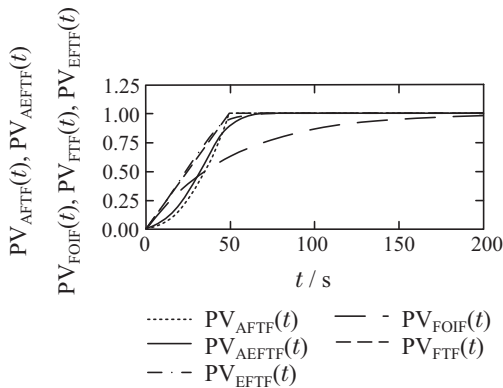


图 3 FOIF, FTF, EFTF, AFTF, AEFTF过程输出特性示意图
Fig. 3 The diagram of process output characteristic of FOIF, FTF, EFTF, AFTF and AEFTF

图3可见, 相对 FOIF, EFTF和AFTF 显著提高了输出跟踪输入的性能, EFTF 和 AEFTF 较好地继承了最速跟踪滤波器、AFTF的特征。

4 加速型工程最速跟踪滤波器频率特性

系统频率特性的分析是一种基本的分析。

EFTF, FOIF频率特性函数为

$$\begin{aligned} F_{EFTF}(j\omega) &= G_{EFTF}(\omega)e^{P_{EFTF}(\omega)}, \\ F_{FOIF}(j\omega) &= G_{FOIF}(\omega)e^{P_{FOIF}(\omega)}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $F_{EFTF}(j\omega)$, $G_{EFTF}(\omega)$, $P_{EFTF}(\omega)$ 分别为 EFTF 的频域函数、幅频增益、相频相位, ω 为正弦频率, $F_{FOIF}(j\omega)$, $G_{FOIF}(\omega)$, $P_{FOIF}(\omega)$ 分别为 FOIF 的频域函数、幅频增益、相频相位。

AEFTF频域函数为

$$F_{AEFTF}(j\omega) = G_{AEFTF}(\omega)e^{P_{AEFTF}(\omega)}, \quad (9)$$

式中 $F_{AEFTF}(j\omega)$, $G_{AEFTF}(\omega)$, $P_{AEFTF}(\omega)$ 分别为 AEF-TF 的频域函数、幅频增益、相频相位, 其中从 $T_{EFTF} = T_{AEFTF} = T_{FOIF} = 100$ s, 得到3种滤波器的幅频增益、相频相位特性, 如图4-5所示。

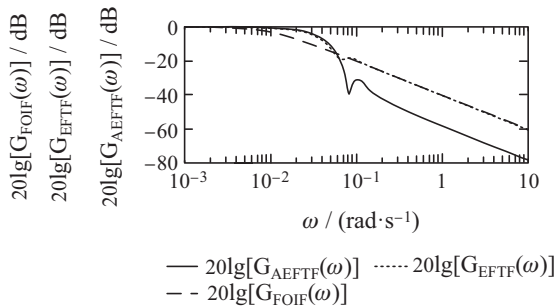


图 4 AEFTF, EFTF, FOIF幅频增益特性示意图

Fig. 4 The diagram of amplitude frequency characteristic with AEFTF, EFTF and FOIF

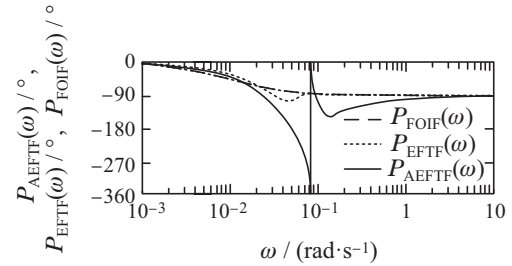


图 5 AEFTF, EFTF, FIOF相频相位特性示意图

Fig. 5 The diagram of phase frequency characteristic with AEFTF, EFTF and FOIF

用 ω_{-3dB} 表达幅频增益衰减到-3 dB的频率带宽, 用 ω_{-20dB} 表达幅频增益衰减到-20 dB的频率带宽, 用 $\omega_{-20dB} : \omega_{-3dB}$ 表达FRC. 根据表1, 从FRC看, EFTF 优于FOIF, AEFTF优于EFTF.

表 1 滤波矩形系数

Table 1 Filter rectangle coefficient

滤波器	ω_{-3dB}	ω_{-20dB}	$\omega_{-20dB} : \omega_{-3dB}$
FOIF	0.01	0.09949	9.949
EFTF	0.02420	0.10553	4.360
AEFTF	0.02707	0.06584	2.432

EFTF, AEFTF的重要特性还表现在: 高频幅频衰减特性为-20 dB/10倍频程, 高频相位趋于-90°, 高频特性趋于一阶。

EFTF, AEFTF可用于过程信号滤波^[16], 构造最速微分器^[21]等多个领域。

5 加速型工程最速比例-积分控制器

AEFPI控制器属于工程最速控制器的范畴, 在工程实践中, 大量应用的是AEFPI控制器, 之后的内容主要针对AEFPI控制器。

5.1 PI控制器结构

PI结构, 如图6所示。

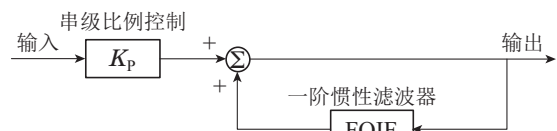


图 6 PI控制器结构示意图

Fig. 6 The diagram of Proportional-Integral controller

PI为

$$\begin{cases} f_{PI}(s) = K_P \frac{1}{1 - f_{FOIF}(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right), \\ T_I = T_{FOIF}, \end{cases} \quad (10)$$

式中: $f_{PI}(s)$ 为PI的传递函数, K_P 为串级比例增益, T_I 为积分时间常数。

5.2 加速型工程最速比例-积分控制器结构

AEFPI控制器结构,如图7所示.

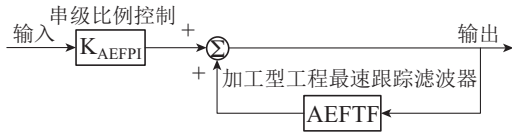


图7 AEFPI控制器结构示意图

Fig. 7 The diagram of AEFPI

AEFPI控制器为

$$\begin{cases} f_{AEFPI}(s) = K_{AEFPI}(1 + f_{AEFI}(s)), \\ f_{AEFI}(s) = \frac{f_{AEFTF}(s)}{1 - f_{AEFTF}(s)}, \\ T_{AEFI} = T_{AEFTF}, \end{cases} \quad (11)$$

式中: $f_{AEFPI}(s)$, K_{AEFPI} 分别为AEFPI控制器的传递函数、串级比例增益, $f_{AEFI}(s)$, T_{AEFI} 分别为加速型工程最速积分器的传递函数、时间常数.

5.3 相对零频率增益

在积分常数相同时,采用相对零频率增益(relative zero frequency gain, RZFG)来衡量加速型工程最速积分器相对常规积分器的效率.加速型工程最速积分器、常规积分器频域函数为

$$\begin{cases} F_{AEFI}(j\omega) = \frac{F_{AEFTF}(j\omega)}{1 - F_{AEFTF}(j\omega)}, \\ F_{CI}(j\omega) = \frac{1}{T_I j\omega}, \\ RZFG_{AEFI:CI} = \frac{F_{AEFI}(j\omega)}{F_{CI}(j\omega)} \Big|_{\omega \rightarrow 0} = 1.4545, \end{cases} \quad (12)$$

式中: $F_{AEFI}(j\omega)$ 为加速型工程最速积分器的频域函数, $F_{CI}(j\omega)$ 为常规积分器的频域函数.

根据式(12),在 $T_{AEFI} = T_I$, 当 ω 趋于0, 则加速型工程最速积分器的相对RZFG是常规积分器的1.4545倍.

5.4 仿真控制系统

出于性能计算的目的,定义控制系统如图8所示.

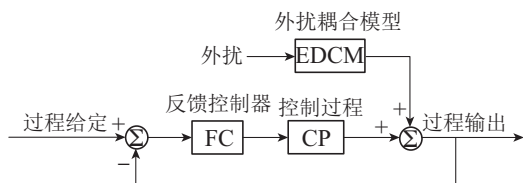


图8 控制系统示意图

Fig. 8 The diagram of control system

在图8中,反馈控制器具体为PI, AEFPI控制器,外扰通过外扰耦合模型(external disturbance coupling

model, EDCM)直接耦合到控制过程(control process, CP)的输出端即过程输出中.外扰采用斜坡函数(ramp function, RF)^[16],其中RF长度为2000 s, RF速率为 $10^{-3} s^{-1}$.

定义CP和EDCM为

$$\begin{cases} f_{CP} = \frac{1}{(1 + 50s)^6}, \\ f_{EDCM} = \frac{1}{(1 + 50s)^2}, \end{cases} \quad (13)$$

式中: $f_{CP}(s)$ 为CP的传递函数, $f_{EDCM}(s)$ 为外扰耦合模型的传递函数.

5.5 开环系统分析

PI控制器开环系统(open loop system, OLS)频域函数为

$$\begin{cases} F_{PI:OLS}(j\omega) = F_{PI}(j\omega)F_{CP}(j\omega) = \\ G_{PI:OLS}(\omega)e^{P_{PI:OLS}(\omega)}, \\ PM_{PI:OLS} = 180 + P_{PI:OLS}(\omega), \\ G_{PI:OLS}(\omega)=1 \\ AM_{PI:OLS} = G_{PI:OLS}(\omega), \\ P_{PI:OLS}(\omega)=-180 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $F_{PI:OLS}(j\omega)$ 为PI开环系统频域函数, $F_{PI}(j\omega)$ 为PI的频域函数, $F_{CP}(j\omega)$ 为控制过程的频域函数, $G_{PI:OLS}(\omega)$, $P_{PI:OLS}(\omega)$ 分别为PI开环系统幅频增益、相频相位, $PM_{PI:OLS}$, $AM_{PI:OLS}$ 分别为PI开环系统的相位稳定裕度、幅值稳定裕度.

AEFPI控制器开环系统频域函数为

$$\begin{cases} F_{AEFPI:OLS}(j\omega) = F_{AEFPI}(j\omega)F_{CP}(j\omega) = \\ G_{AEFPI:OLS}(\omega)e^{P_{AEFPI:OLS}(\omega)}, \\ PM_{AEFPI:OLS} = 180 + P_{AEFPI:OLS}(\omega), \\ G_{AEFPI:OLS}(\omega)=1 \\ AM_{AEFPI:OLS} = G_{AEFPI:OLS}(\omega), \\ P_{AEFPI:OLS}(\omega)=-180 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $F_{AEFPI:OLS}(j\omega)$ 为AEFPI控制器的开环系统频域函数, $F_{AEFPI}(j\omega)$ 为AEFPI控制器的频域函数, $G_{AEFPI:OLS}(\omega)$, $P_{AEFPI:OLS}(\omega)$ 分别为AEFPI控制器开环系统幅频增益、相频相位, $PM_{AEFPI:OLS}$, $AM_{AEFPI:OLS}$ 分别为AEFPI控制器开环系统的相位稳定裕度、幅值稳定裕度.

在临界稳定^[22],即开环系统相位稳定裕度为 0° , 开环系统幅值稳定裕度为0 dB, 得到两种控制器的临界稳定参数搜索结果,如图9所示.根据图9,得到A组PI, AEFPI控制器参数,如表2所示.根据A组PI、工程最速比例-积分控制器参数,得到两种控制器的开环系统幅频增益特性的对比结果,如图10所示.

图10给出的结果代表了PI, AEFPI控制器的上限控制性能.根据图10,在给出的频率范围, $G_{AEFPI:OLS}(\omega)$ 比 $G_{PI:OLS}(\omega)$ 高出2.496 dB即1.333倍.这是相对PI,

AEFPI控制器能够显著提高反馈控制性能的理论依据。

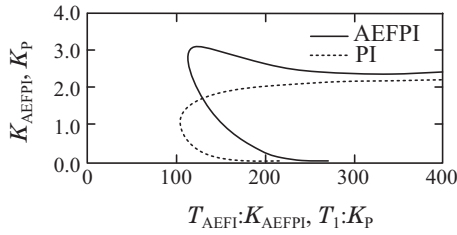


图 9 AEFPI, PI临界稳定参数搜索结果示意图

Fig. 9 The diagram of search results of critical stability parameters of AEFPI and PI

表 2 A组PI, AEFPI参数

Table 2 Group A parameters of PI and AEFPI

控制方法	$T_I : K_P$ 最低值/s	K_P	T_I/s
PI	105.96	1.039	110
控制方法	$T_{AEFPI} : K_{AEFPI}$ 最低值/s	K_{AEFPI}	T_{AEFPI}/s
AEFPI	115.61	2.769	320.1

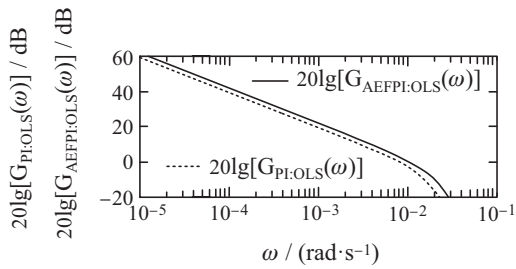


图 10 AEFPI, PI开环系统幅频特性示意图

Fig. 10 The diagram of amplitude frequency characteristics of AEFPI and PI open-loop system

5.6 闭环系统仿真

实际系统需要有一定的稳定裕度, 文中将开环系统幅频增益、相频相位用于获取AEFPI控制器、PI参数, 设置参数搜索条件为: 在开环系统幅频增益为0.5时, 满足开环系统相频相位为 -135° , 属于一种相对稳定裕度. 得到两种控制器的参数的搜索结果, 如图11所示。

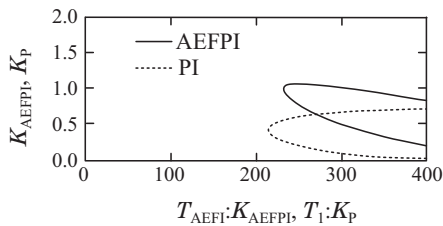


图 11 AEFPI, PI参数搜索结果示意图

Fig. 11 The diagram of parameter search results of AEFPI and PI

根据图11, 得到B组PI, AEFPI控制器参数, 如表3所示。

表 3 B组PI, AEFPI参数

Table 3 Group B parameters of PI and AEFPI

控制方法	$T_I : K_P$ 最低值/s	K_P	T_I/s
PI	429.1	0.419	179.8
控制方法	$T_{AEFI} : K_{AEFPI}$ 最低值/s	K_{AEFPI}	T_{AEFI}/s
AEFPI	465.9	0.994	463.1

将B组PI, AEFPI控制器参数用于仿真, 过程给定为单位阶跃, 在 $t > 3000$ s加入RF. 得到PI控制的过程输出 $PV_{PI}(t)$ 、AEFPI控制器控制的过程输出 $PV_{AEFPI}(t)$ 的仿真结果, 如图12所示。

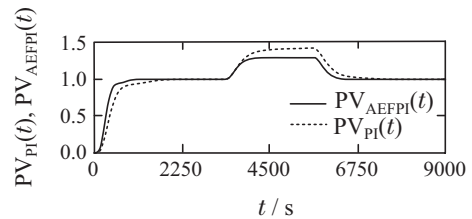


图 12 PI, AEFPI闭环系统过程输出示意图

Fig. 12 The diagram of PI and AEFPI closed-loop system process output

5.7 主要性能指标分析

根据图12, 得到AEFPI控制器、PI控制的主要性能指标, 如表4所示。

在工程上, 调节时间是指过程进入到小于5%偏差的时间, 相对PI, AEFPI控制器的调节性能提高了84.5%。根据图12, 得到AEFPI控制器和PI抑制外扰的主要性能指标, 如表5所示。

表 4 AEFPI, PI控制的主要性能指标

Table 4 Main performance index of control of AEFPI and PI

控制方法	第1峰值	第2峰值	过程超调	调节时间/s
PI	1	1	0	1020
AEFPI	1	1	0	553

表 5 AEFPI, PI抑制外扰的主要性能指标

Table 5 Main performance index of disturbance rejection of AEFPI and PI

控制方法	RF 期间最大偏差
PI	0.427
AEFPI	0.299

用RF期间的最大偏差衡量外扰抑制性能, 相对PI, AEFPI控制器的外扰抑制性能提高了42.8%。

对闭环系统仿真结果总结如下:

1) 采用RF期间最大偏差衡量AEFPI控制器、PI的外扰抑制性能具有直观性, 直观的对比结果已经能够判断性能的优劣了。

2) 在两种控制方法的对比上,采用凑试法、工程法进行对比仅有某种工程上的参考意义,对比结果可能存在人为因素的干预,因此对比结果不能作为理论依据。

3) 在相对稳定裕度相同条件下的对比,没有人为因素的干预,对比结果具有理论依据,真实反映了AEFPI控制器、PI的控制性能,根据表2-3给出的定量对比结果,得出基本结论,在闭环系统控制性能上,AEFPI控制器显著优于PI。

4) 从技术角度揭示出LPF性质决定了所构造控制器性能的一种客观规律,AEFTF和AEFPI控制器是客观实践的发明,背后的科学原理仍需进一步探索。

5) 相对PI控制,AEFPI控制器在提高反馈控制性能上有实质性进步。

6 加速型工程最速比例-积分控制器参数工程整定

之前的PI,AEFPI分控制器参数整定采用了数学最优法。在实际工程中,准确的数学模型难以获取,数学最优法难以采用。

在AEFPI控制器参数整定上,文献[16]提出了一种基于ZN模型(Ziegler-Nichols model, ZNM)的工程法^[23],简称ZNM法。

根据之前给出的CP,得到ZNM与AEFPI控制器参数为

$$\begin{cases} f_{ZNM}(s) = K_{ZN} \frac{1 - e^{-T_{ZN}s}}{T_{ZN}s} e^{-\tau_{ZN}s}, \\ f_{ZNM:CP}(s) = \frac{1 - e^{-290s}}{290s} e^{-148s}, \\ K_{AEFPI} = \frac{1}{K_{ZN}} = 1, \\ T_{AEFI} = \tau_{ZN} + T_{ZN} = 438, \end{cases} \quad (16)$$

式中: $f_{ZNM}(s)$, K_{ZN} , T_{ZN} , τ_{ZN} 分别为ZNM的传递函数、增益、时间常数和纯滞后常数。 $f_{ZNM:CP}(s)$ 为CP的ZNM传递函数。

根据式(16)给出的工程最速比例-积分控制器参数,得到的仿真结果如图13所示。

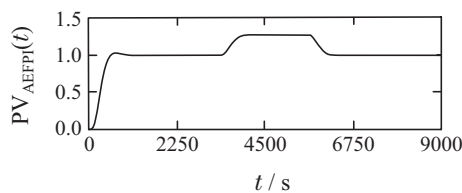


图13 PI, AEFPI闭环系统过程输出示意图

Fig. 13 The diagram of AEFPI closed-loop system process output

根据图13,得到过程超调为4.3%,调节时间为460s,斜坡函数期间最大偏差为0.274。

7 装甲车火炮跟瞄控制系统的仿真验证

随着现代战争的需求,武器性能的不断提高,传统的PID控制技术已经难以满足对先进武器的控制需求,如控制的精确度、抗扰度的要求等。AEFPI控制器在本质上突破了PI控制能力的上限,将AEFPI控制器引入武器控制系统具有重要现实意义。

具体以现代装甲车的火炮跟瞄控制系统为例,主要包括水平方位跟随控制、垂直仰角度跟随控制。以某水平方位角度跟随控制为例,经测试得到过程模型为

$$f_P = \frac{13.8e^{-0.006s}}{(1 + 0.018s)(1 + 0.032s)(1 + 0.052s)}, \quad (17)$$

式中 $f_P(s)$ 为过程模型的传递函数。

在临界稳定,得到两种控制器的参数搜索结果,如图14所示。

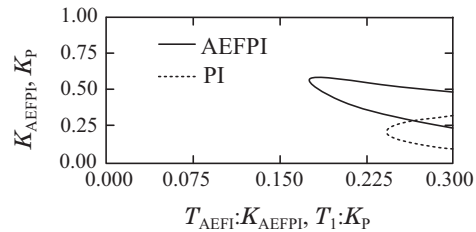


图14 AEFPI, PI临界稳定参数搜索结果示意图

Fig. 14 The diagram of search results of critical stability parameters of AEFPI and PI

根据图14,得到D组PI和AEFPI控制器参数,如表6所示。

表6 D组PI, AEFPI参数

Table 6 Group D parameters of PI and AEFPI

控制方法	$T_I : K_P$ 最低值/s	K_P	T_I/s
PI	0.2387	0.2057	0.0491
控制方法	$T_{AEFI} : K_{AEFPI}$ 最低值/s	K_{AEFPI}	T_{AEFI}/s
AEFPI	0.1745	0.5621	0.0981

根据D组PI, AEFPI控制器参数,得到两种控制器的开环系统幅频增益特性的对比结果,如图15所示。

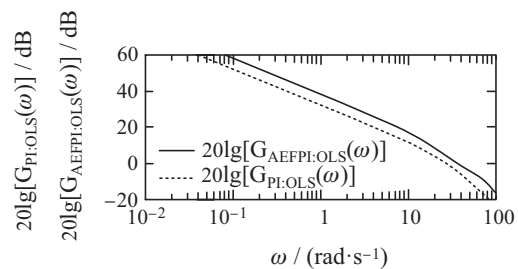


图15 AEFPI, PI开环系统幅频特性示意图

Fig. 15 The diagram of amplitude frequency characteristics of AEFPI and PI open-loop system

图15所示,在给出频率范围, $G_{AEFPI:OLS}(\omega)$ 高出 $G_{PI:OLS}(\omega)$ 4.4 dB即1.66倍以上。

省略推导, 按照本文给出的参数搜索条件, 得到 E 组 PI 参数为

$$K_P = 0.04905, T_I = 0.0741 \text{ s.}$$

E 组 AEFPI 控制器参数为

$$K_{AEFPI} = 0.12324, T_{AEFI} = 0.1571 \text{ s.}$$

得到的仿真试验结果如图 16 所示。

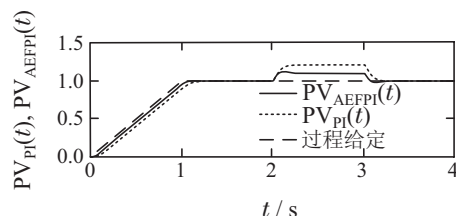


图 16 闭环系统过程输出示意图

Fig. 16 The diagram of closed-loop system process output

图 16 中, 外扰斜坡函数速率为 2 s^{-1} , 斜坡函数长度为 1 s . 过程给定为斜坡信号, 斜坡信号速率为 1 s^{-1} , 斜坡信号长度为 1 s .

根据图 16, $PV_{PI}(T)$ 上升到 0.95 的时间为 1.061 s , $PV_{AEFPI}(T)$ 为 1.0 s , 相对 PI, AEFPI 控制器跟踪斜坡信号的时间减小了 0.061 s . 在 RF 期间, PI 最大偏差为 0.218 , AEFPI 控制器为 0.128 , 相对 PI, AEFPI 控制器外扰抑制性能提高了 70.3% . 基本评价, AEFPI 控制器突破了 PI 控制能力的上限。

8 结语

本文针对 AEFTF 的原型、物理缺陷、工程化重构、跟踪特性、频率特性、AEFPI 控制器控制性能等进行全面研究与分析, 得到以下结论:

1) AEFTF (包括 EFTF) 和 AEFPI 控制器 (包括 EFC) 是滤波机制、控制机制上的一种原始创新, 在控制工程领域有重要意义。

2) AEFTF (包括 EFTF) 是一种滤波特性优良的新型线性滤波技术, 可显著提高输出跟踪输入的性能, 可应用于过程信号滤波、积分器和微分器构造、高性能超前观测器构造、高性能控制器构造等方面。

3) AEFPI 控制器 (包括 EFC) 代表了新的控制机制的诞生. 根据所给出的理论依据, 得出 AEFPI 控制器在提高反馈控制性能上有实质性进步。

参考文献:

- [1] LUO Chuanyi, CHENG Guifen, FU Jiakai. *Control Engineering and Signal Processing*. Beijing: Chemistry Industry Press, 2004. (罗传翼, 程桂芬, 付家才. 控制工程与信号处理. 北京: 化学工业出版社, 2004.)
- [2] SUN Meixiang, CHEN Quanlin, LÜ Guowei, et al. Remote virtual instruments over the internet/intranet. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(9): 1400 – 1401. (孙美香, 陈泉林, 吕国伟, 等. 基于 Internet/Intranet 的远程虚拟仪器. 电子学报, 2002, 30(9): 1400 – 1401.)
- [3] LI Jun, HUANG Weijian, WAN Wenjun, et al. Research and application of a novel feedback controller. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(2): 411 – 422. (李军, 黄卫剑, 万文军, 等. 一种新型反馈控制器的研究与应用. 控制理论与应用, 2020, 37(2): 411 – 422.)
- [4] LI Jun, WANG Yuechao, LI Feng. A novel sinusoidal frequency measurement method based on precise calculation of initial phase of sequence and deconvolution sequence. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(10): 2370 – 2376. (李军, 王越超, 李锋. 一种基于序列和反褶序列精密初相位计算的新型正弦频率测量方法. 电子学报, 2016, 44(10): 2370 – 2376.)
- [5] HE Xue, HU Zhizhong. Research on optimal design of fractional order lowpass filters. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(1): 185 – 194. (何雪, 胡志忠. 分数阶低通滤波器的优化设计研究. 电子学报, 2022, 50(1): 185 – 194.)
- [6] LIU Qing, LIU Baoliang, ZHANG Dewei, et al. Design of miniaturized dual-layer substrate integrated waveguide bandpass filters in box-like coupling scheme. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(11): 2668 – 2677. (刘庆, 刘宝亮, 张德伟, 等. 小型化双层基片集成波导盒型耦合拓扑滤波器设计. 电子学报, 2022, 50(11): 2668 – 2677.)
- [7] KULSHRESHTHA T, DHAR A. Improved VLSI architecture for triangular windowed sliding DFT based on CORDIC algorithm MT. *IET Circuits, Devices & Systems*, 2019, 13(2): 251 – 258.
- [8] ZHANG Lanying, YUAN Sijie, CHEN Yuan. Research on pseudo code acquisition method in aerospace spread spectrum TT&C system. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(6): 1471 – 1476. (章兰英, 袁嗣杰, 陈源. 航天扩频测控系统中伪码捕获方法研究. 电子学报, 2011, 39(6): 1471 – 1476.)
- [9] WANG Yingji, MA Zhongkai, ZHANG Tao. Design of low rectangle coefficient and program-controlled narrow-band filter in NMR advanced detection. *Application of Electronic Technique*, 2015, 41(1): 68 – 70. (王应吉, 马中凯, 张涛. 核磁共振超前探测低矩形系数程控滤波器设计. 电子技术应用, 2015, 41(1): 68 – 70.)
- [10] LIU Guorong, ZHANG Yangming. Trajectory tracking of mobile robots based on fuzzy PID-P type iterative learning control. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(8): 1536 – 1541. (刘国荣, 张扬名. 移动机器人轨迹跟踪的模糊 PID-P 型迭代学习控制. 电子学报, 2013, 41(8): 1536 – 1541.)
- [11] ZENG Zhezhaohao, CHEN Zeyu. On control theory of PID and auto-coupling PID. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(12): 2654 – 2662. (曾喆超, 陈泽宇. 论 PID 与自耦 PID 控制理论方法. 控制理论与应用, 2020, 37(12): 2654 – 2662.)
- [12] WU Min, WANG Xiaolu, JIANG Yudong, et al. Collaborative temperature control of deep deterministic policy gradient and fuzzy PID. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(12): 2358 – 2365. (吴敏, 王晓璐, 姜玉东, 等. 深度确定性策略梯度与模糊 PID 的协同温度控制. 控制理论与应用, 2022, 39(12): 2358 – 2365.)
- [13] REN Zhengyun, ZHENG Da. Combined integral systems and their advanced control strategies in process industry. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(9): 1009 – 1013. (任正云, 郑达. 流程工业的组合积分系统及其先进控制. 控制理论与应用, 2009, 26(9): 1009 – 1013.)
- [14] LI Jun, CHEN Jinpan. Method, device and filter for constructing right-angle triangular window function. China, CN115981599A. 2023-02-06. (李军, 陈锦攀. 一种直角三角窗函数的构造方法、装置及滤波器. 中国, CN115981599A. 2023-02-06.)
- [15] LI Jun, HUANG Weijian, CHEN Jinpan, et al. An accelerated engineering fastest proportional integral controller to meet the needs of the development of new power system. *Guangdong Electric Power*,

- 2022, 35(7): 170 – 178.
(李军, 黄卫剑, 陈锦攀, 等. 一种适应新型电力系统的加速型工程最速比例积分控制器. 广东电力, 2022, 35(7): 170 – 178.)
- [16] LI Jun, HUANG Weijian, CHEN Jinpan, et al. Fastest controller adaptive to deep peak and fast frequency regulation for new power system. *Guangdong Electric Power*, 2021, 34(8): 110 – 119.
(李军, 黄卫剑, 陈锦攀, 等. 一种适应新型电力系统深度调峰快速调频的工程最速控制器. 广东电力, 2021, 34(8): 110 – 119.)
- [17] YE Zhi, LI Xiaobo, KANG Yi, et al. Design of actual differential PID controller used in FCS 165 field BUS control system. *Thermal Power Generation*, 2011, 40(8): 38 – 40.
(叶智, 李晓博, 康毅, 等. FCS165现场总线控制系统实际微分PID控制器的设计. 热力发电, 2011, 40(8): 38 – 40.)
- [18] QIN Dongdong. Application discussion of DCS thermal control system in thermal power plant. *The Journal of New Industrialization*, 2018, 8(11): 47 – 50.
(秦东东. DCS热控系统对火力发电厂的应用探讨. 新型工业化, 2018, 8(11): 47 – 50.)
- [19] WANG Lijun, LI Qing, TONG Chaonan, et al. Overview of active disturbance rejection control for systems with time-delay. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1521 – 1533.
(王丽君, 李擎, 童朝南, 等. 时滞系统的自抗扰控制综述. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1521 – 1533.)
- [20] GAO Shan, CHEN Zhibin, LI Yanfeng, et al. Research and engineering implementation of intelligent operation and maintenance system for telemetry equipment. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2023, 44(1): 48 – 56.
(高山, 陈志斌, 李彦峰, 等. 遥测装备智能运维系统的研究与工程化实现. 遥测遥控, 2023, 44(1): 48 – 56.)
- [21] LI Jun, CHEN Jinpan. *The invention relates to a method and a device for generating an acceleration type engineering speedest differentiator*. CHINA, CN115016254A. 2022-07-05.
(李军, 陈锦攀. 一种加速型工程最速微分器的生成方法及装置. 中国, CN115016254A. 2022-07-05.)
- [22] ZHANG Xudong, LEI Qianqian, ZHANG Fangling, et al. Analysis of minimum acceptable power consumption of the 3rd follow-the-leader-feedBack low pass filter. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(6): 1480 – 1486.
(张旭东, 雷倩倩, 张芳玲, 等. 3阶FLFB低通滤波器的最小可接受功耗分析. 电子学报, 2022, 50(6): 1480 – 1486.)
- [23] ZIEGLER J G, NICHOLS N B. Optimum setting for automatic controllers. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 1942, 64(8): 759 – 765.

作者简介:

石上瑶 正高级工程师, 主要研究方向为智能控制、数字孪生、人工智能, E-mail: peter.shi@nuc.edu.cn;

李 军 工程师, 主要从事计算机控制与通讯等试验研究工作, E-mail: lijun_87389@163.com;

刘兆华 副教授, 主要研究方向为系统辨识、自动控制, E-mail: lzhdhy@163.com;

刘家豪 硕士研究生, 主要研究方向为智能控制、数字孪生、人工智能, E-mail: 18734741789@163.com;

陈鹏云 副教授, 主要研究方向为无人系统自主智能技术、数字孪生等, E-mail: chenpengyun@nuc.edu.cn.