

doi: 10.7690/bgzdh.2013.05.020

基于小波变换的二阶传感器故障诊断研究

王道梦, 任章

(北京航空航天大学飞行器控制一体化技术重点实验室, 北京 100191)

摘要: 针对难以直接检测实际航空工业过程中的传感器故障问题, 提出一种基于小波变换的传感器故障诊断方法。采用连续小波变换对传感器故障进行检测, 准确定位故障发生时刻, 并对比不同小波基函数的处理效果, 对几种典型的传感器故障进行诊断。选取二阶传感器作为仿真对象, 利用 Matlab/Simulink 搭建模型进行仿真实验。仿真结果验证了该方法的准确性。

关键词: 传感器故障诊断; 小波变换; 建模仿真

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Research on Second Order Sensor Fault Diagnosis Based on Wavelet Transform

Wang Xiaomeng, Ren Zhang

(Science & Technology on Aircraft Control Laboratory, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Focusing on the difficulty of directly detecting sensor fault in actual aerospace industrial processing, propose a kind of sensor fault diagnosis method based on wavelet transform. Firstly, detect sensor fault by continuous wavelet transform to posit fault time accurately. Then, make a contrast about the processing consequences of different wavelet basis function and diagnose some typical kinds of sensor fault. Finally, establish a second order sensor model to verify control performance through Matlab/Simulink. The results of modeling and simulation show that the method is feasible and reasonable.

Key words: sensor fault diagnosis; wavelet transform; modeling and simulation

0 引言

当航天科技系统中的传感器发生故障时, 如果能通过传感器故障检测和诊断系统对故障进行检测、分析并做出补救措施, 保证传感器和系统的正常运行, 将具有重大的现实意义。按照目前认可度较高的故障检测分类方法, 传感器故障诊断可分为 3 大类: 基于解析模型的方法、基于知识的方法和基于信号处理的方法, 具体诊断方法有硬件冗余法、解析冗余法、卡尔曼滤波器方法、神经网络观测器组方法以及基于小波分析的方法等^[1-3]。笔者针对实际工况中难以建立诊断对象的解析数学模型的情况, 结合已有基于时频分析方法的故障诊断经验, 尝试将时频分析方法引入传感器故障诊断领域, 基于仿真原始待检测信号, 验证这一方法在传感器故障检测中应用的可行性及其特点。

1 时频分析方法基础理论

在实际工程应用情况下, 多数待处理信号为非平稳信号。该类信号的特点是其统计量为时变函数。显而易见, 对这一类信号, 仅了解单纯时域或频域的全局特性是远远不够的, 还需要掌握信号频谱随时间变化的情况。时频分析的基本思想是利用时间

和频率的联合函数, 同时描述信号在不同时间和频率的能量密度和强度。利用时间和频率的联合函数来表示信号称为信号的时频表示。

连续小波变换 (continuous wavelet transform) 定义为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} dx \quad (1)$$

其中: a 为对应于频率信息的缩放因子; b 为对应于时空信息的平移因子; $\overline{\psi(x)}$ 为 $\psi(x)$ 的复共轭。

与三角函数 $\sin x$ 和 $\cos x$ 可以缩放构成函数空间的基底 $\{\sin nx, \cos nx\}$ 类似, 由基本小波 $\psi(x)$ 通过缩放和平移而构成的连续小波序列

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (2)$$

也可构成函数空间的基底, 在小波变换中充当被处理信号的观测窗口。由此可见, 基本小波 $\psi(x)$ 应满足下列条件:

1) 绝对可积且平方可积, 即

$$\psi \in L^1 \cap L^2 \quad (3)$$

2) 正负部分相抵, 即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) dx = 0 \quad (\hat{\psi}(0)=0) \quad (4)$$

收稿日期: 2012-11-05; 修回日期: 2012-12-19

基金项目: 国家科技部创新方法资助项目 (2009IM021700)

作者简介: 王道梦 (1988—), 女, 北京人, 在读硕士, 从事导航、制导与控制研究。

3) 满足允许条件, (广义积分收敛) 即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (5)$$

连续小波变换是线性的, 并且具有平移不变性, 伸缩共变性, 自相似性等性质。其中应重点关注的是冗余性。在连续小波变换中存在信息表述的冗余度, 一方面其恢复原信号的重构公式不唯一; 另一方面其函数空间的基底 $\psi_{a,b}(x)$ 有正交小波、非正交小波和双正交小波等多种可能^[4]。

2 仿真实例

综合常见传感器的一般特性, 考虑到实际工况中的复杂情况以及计算机仿真的局限性, 笔者选用的传感器模型为二阶传感器, 可看作是带保护套管式热电偶测温环节^[5]。仿真实验在 Matlab7.8 环境下实现。实验基于以下假设:

1) 系统工作正常, 即传感器出现故障仅限于系统正常工作状态。

2) 故障诊断是针对系统的某一工况而言, 并非讨论系统的全部动态过程。

2.1 利用连续小波变换进行传感器故障诊断

笔者用系统参数突变来模拟传感器的突变故障, 其传递函数设定为

$$G(s) = \frac{cs + d}{s^2 + as + b} \quad (6)$$

故障发生前, 系统参数为: $a=7$, $b=21$, $c=1$, $d=10$ 。故障发生后, $c=7$, $d=19$, 其他参数不变。输入 $r(t)$ 采用分段平稳的均匀分布随机信号, 其均值在 $t=100$ s 时由 1.0 突变为 10.0。扰动信号 $e(t)$ 采用方差为 0.5 的高斯噪声。 $t=200$ s 时系统发生故障^[6]。

分别设置传感器输入信号有跳变、传感器发生故障的系统(以下称故障系统)和传感器输入信号有跳变、传感器未发生故障的系统(以下称正常系统), 采样时间设为 0.01 s, 运行仿真程序, 并对所得信号进行消噪处理, 如图 1 和图 2 所示。

进行消噪处理后的信号明显地去除了噪声所引起的干扰, 信号图像更为清晰、光滑^[7]。图 1 所示故障系统, 在 $t=100$ s 之前输入信号与输出信号的走势基本相同, 在 $t=100$ s 时输入信号和输出信号同时发生跳变, $t=200$ s 时, 输入信号无明显变化, 输出信号有明显跳变。图 2 所示正常系统, 在 $t=100$ s 之前输入信号与输出信号的走势基本相同, 在 $t=100$ s 时输入信号和输出信号同时发生跳变, 之后输入

信号与输出信号的走势基本相同。

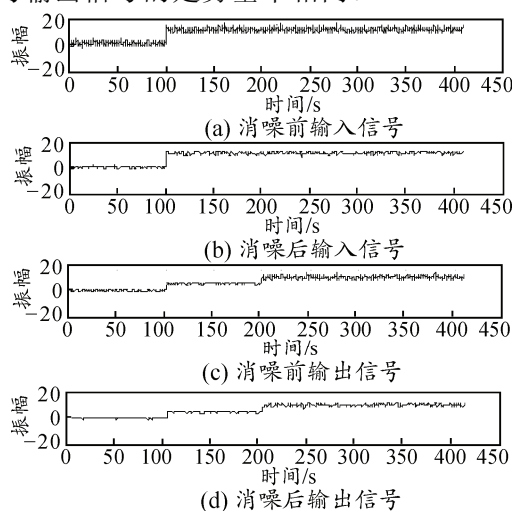


图 1 故障系统输入输出信号

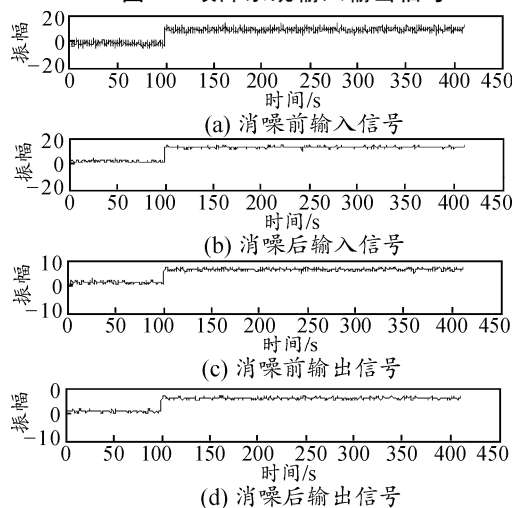


图 2 正常系统输入输出信号

根据消噪后所得的输出信号, 选用 db3 小波进行诊断, 对待检测信号做 5 层分解, 采样时间为 0.01 s。将 2 个系统的输入输出信号消噪处理后进行故障诊断, 如图 3 和图 4 所示。

由图 3、图 4 可以看出, 极值图可检测出故障发生点 $t=200$ s。2 种系统的输入输出信号虽然均存在跳变, 但是由小波变换图像可知, 在 $t=200$ s 时的跳变才是真正由传感器故障所引起的, 其余信号跳变是由于输入信号跳变所致, 属系统正常工作范围。

由故障系统输出信号经过小波变换方法处理后结果可见, 相比于传统傅里叶变换只能检测出原始信号包含的频率值大小, 却不能确定频率突变点的位置, 通过对小波变换得到的 5 层高频系数重构图形进行分析处理, 可以清楚地确定突变点的位置, 且第 1 层分解的 d1 高频系数重构图像和第 2 层分解的 d2 高频系数重构图像的清晰度和分辨率明显优于第 3~5 层分解的高频系数重构图像。

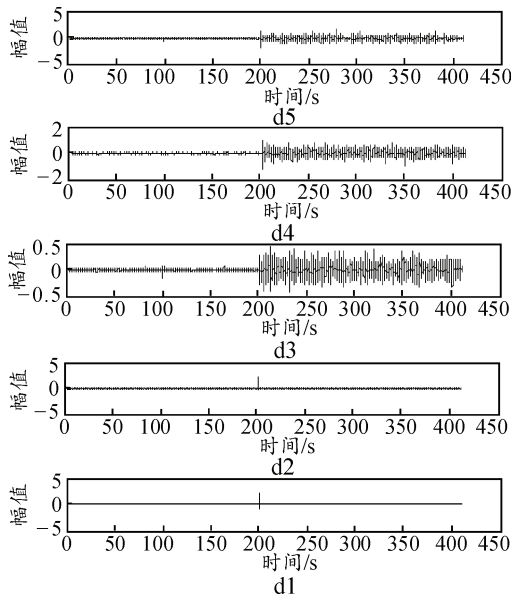


图 3 故障系统输出信号

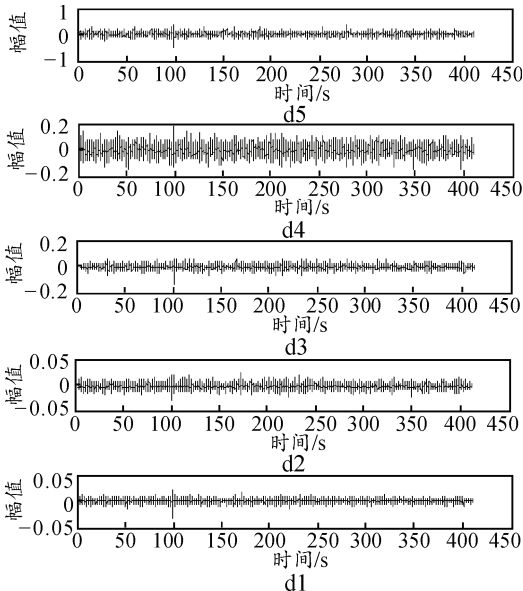


图 4 正常系统输出信号

通过以上实验及相关分析处理可以看出，选用适当小波基函数对传感器输入输出信号进行处理后可以有效辨识出传感器故障发生点，说明使用连续小波变换进行传感器故障诊断是正确可行的。

另一方面，应选择何种小波基函数进行小波变换并无通用标准，使用其他 2 种小波基函数对故障系统输出信号做小波变换，结果如图 5 和图 6 所示。

由图 5 可见，使用 Haar 小波得到的效果较不理想，通过变换虽能看出信号发生了跳变，但故障发生点定位比较模糊，且 Haar 小波对于由传感器输入信号导致的输出信号跳变与由传感器参数突变故障导致的输出信号跳变不能够有效辨识，检测结果不佳。由图 6 可见，sym7 小波所得第 1~3 层高频系

数重构图像均能准确定位出故障发生点，且图像清晰度较 db3 小波更佳。

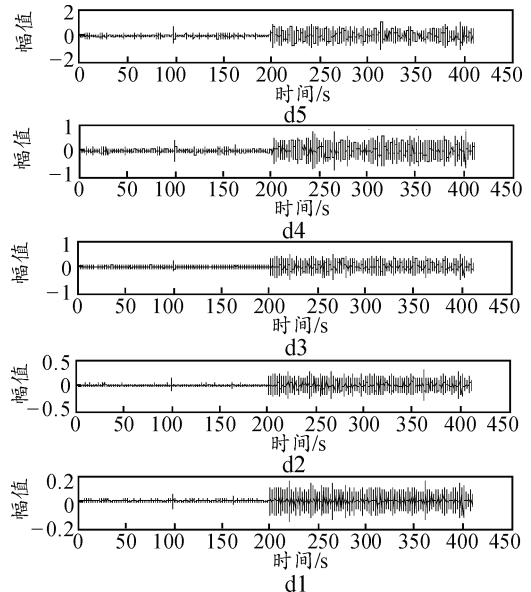


图 5 使用 Haar 小波处理后的输出信号

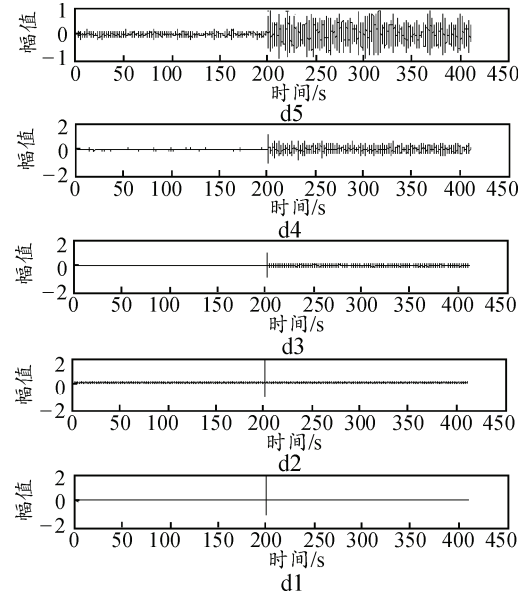


图 6 使用 sym7 小波处理后的输出信号

事实上，如何选择小波函数没有统一理论标准，但是小波变换的小波系数为如何选择小波函数提供了依据。更重要的是根据信号处理的目的是决定尺度的大小。如果小波变换仅仅要反映信号整体的近似特性，往往应选用尺度较大的小波；当需要反映信号细节上的变换时则应选用尺度较小的小波。

2.2 利用连续小波变换进行常见传感器故障诊断

本节将选取几种典型故障进行仿真，验证利用小波变换进行不同类型的传感器故障诊断是否可行，假设前提与上文相同，为模拟出传感器不同故障类型，将对输出信号作相应调整。正常运行时系

统参数为: $a = 7, b = 21, c = 1, d = 10$ 。输入 $r(t)$ 采用分段平稳的均匀分布随机信号, 其均值在 $t = 100\text{ s}$ 时由 1.0 突变为 10.0。扰动信号 $e(t)$ 采用方差为 0.5 的高斯噪声。 $t = 100\text{ s}$ 时系统发生故障。

1) 冲击故障。

传感器发生冲击故障是由电源和地线中存在随机干扰等引起的。模拟冲击故障的方法是在原有输出信号上加上一脉冲信号。设定该脉冲信号幅度为 3, 周期为 10 s, 脉冲宽度为信号周期的 5%, 采样时间为 0.001 s。

运行程序得到输入输出信号并进行消噪处理后所得结果如图 7 所示。

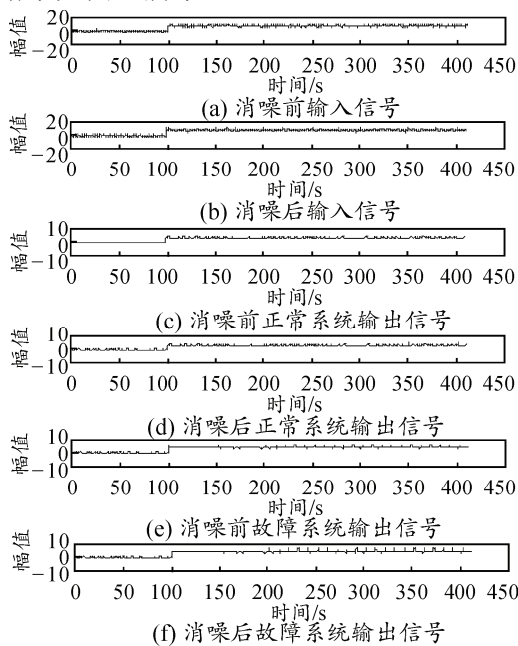


图 7 冲击故障系统输入输出信号及消噪处理后的信号

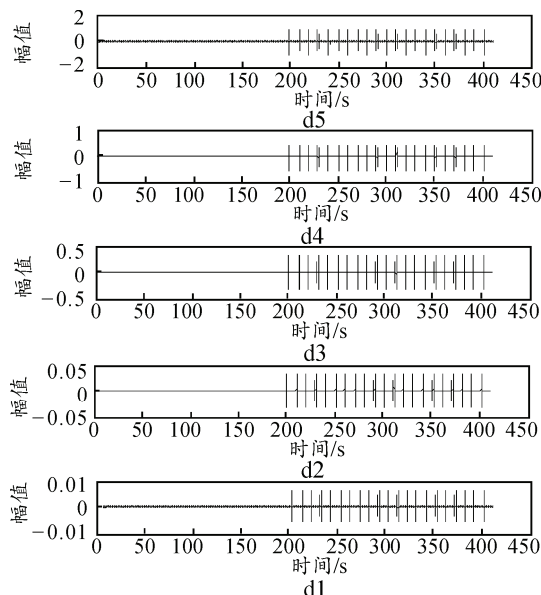


图 8 利用 sym7 小波函数变换后的系统输出信号

使用连续小波变换对上述传感器故障时输出信号进行处理, 小波基函数为 sym7 小波, 采样时间为 0.001 s, 结果如图 8 所示。

由图 8 可以清楚地看到, 自 $t = 200\text{ s}$ 开始, 信号出现了周期性跳变, 与实验初始时设定的模拟冲击干扰的周期性脉冲信号的频率相吻合, 准确定位了冲击干扰故障的故障发生点。

2) 短路故障。

传感器发生短路故障是由污染引起的桥路腐蚀、线路短接等引起的。模拟短路故障的方法是使原有输出信号为零。采样时间为 0.001 s。

运行程序得到输入输出信号并进行消噪处理后所得结果如图 9 所示。

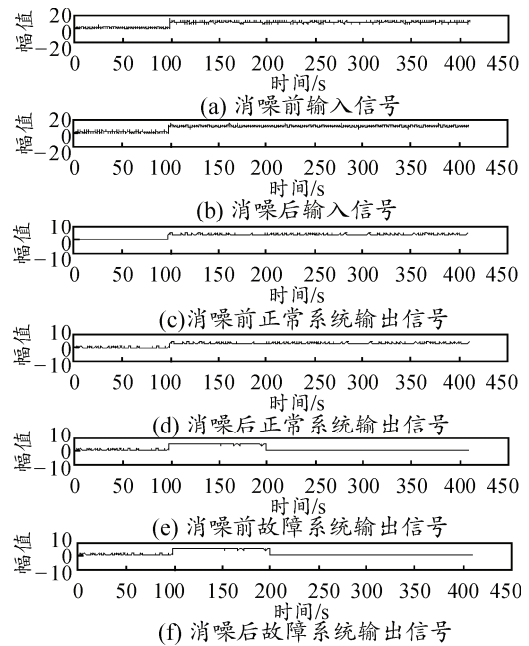


图 9 短路故障系统输入输出信号及消噪处理后的信号

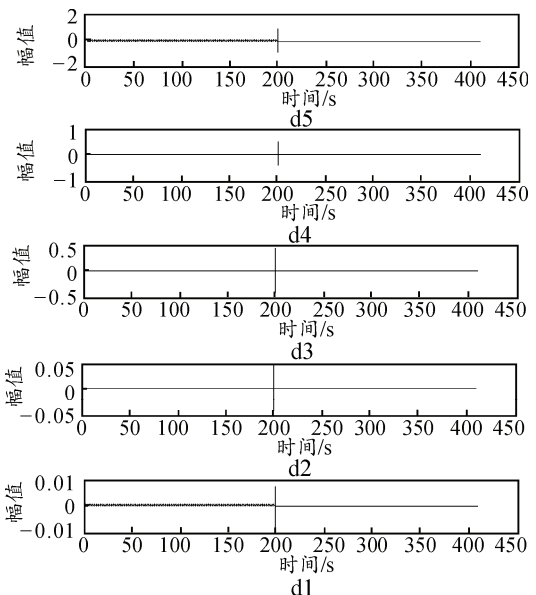


图 10 利用 sym7 小波函数变换后的系统输出信号

使用连续小波变换对上述传感器故障时输出信号进行处理，小波基函数为 sym7 小波，采样时间为 0.001 s，结果如图 10 所示。

由图 10 可知，经过对输入输出信号处理后，噪声干扰降到最低。极值在故障点的突变很好地说明了传感器有短路故障发生，与实验初始时设定完全相符，且时域定位准确清晰。

笔者选取了较为典型的常见传感器故障类型进行仿真并使用小波变换方法进行故障诊断，均得到了比较理想的诊断结果。由于篇幅所限，其余类型的传感器故障类型的故障诊断仿真结果不再列出。

3 结论

小波变换故障诊断方法简单、快速、诊断精度高、诊断效果显著、对系统模型依赖度较低，局部化特性较好。仿真结果证明：该方法避免了抽取对象数学模型，直接利用信号模型，适用性强，对于常见传感器故障类型均可以做出诊断，准确发现故

障发生点，总体效果良好，但不同小波基函数的应用范围存在差异，在实际使用时应注意根据具体工况做出正确选择。

参考文献：

[1] 常虹. 传感器故障诊断方法研究[D]. 北京：华北电力大学, 2002: 1-13.
 [2] Iman Izadi, Zhao Qing, Chen Tongwen. An H8 approach to fast rate fault detection for multirate sampled-data systems[J]. J of Process Control, 2006, 16(6):651-658.
 [3] R.Ismann. Supervision. Fault-detection and fault-diganosis methods introduction[J]. Control Eng. Practice, 1997, 5(5): 639-652.
 [4] 周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京：清华大学出版社, 2000: 53-58.
 [5] 王化祥, 张淑英. 传感器原理及应用[M]. 天津：天津大学出版社, 2006: 17-21.
 [6] 黄治军. 基于小波分析的传感器故障诊断研究[D]. 西安：西北工业大学, 2004: 13-30.
 [7] 尹健华, 廖继旺, 刘云芳. 基于小波变换的噪声消除算法研究[J]. 现代电子技术, 2007: 144-146.

(上接第 70 页)

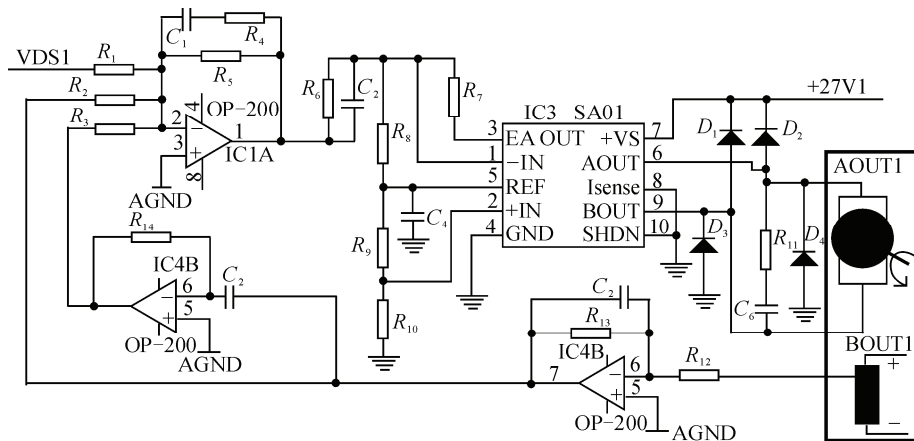


图 7 舵机控制器电路原理

4 结束语

笔者在分析了典型无人驾驶旋翼机主桨盘操纵舵机的性能技术指标的基础上，设计了一种能用于旋翼机桨盘控制的线性伺服舵机及其控制器，建立了舵机伺服控制回路的数学模型，对舵机控制回路特性进行了仿真验证，研制了舵机及其控制器，并将所研制的舵机装置安装在某型无人驾驶旋翼机上试验验证。试验和试飞结果表明，所设计和研制的桨盘伺服舵机能够满足旋翼机对舵机的各项要求。

参考文献：

[1] 王焕瑾, 高正. 自转旋翼机的历史、特点和优势[J]. 直

升机技术, 2001(3): 22-28.
 [2] J. Gordon Leishman. Development of the Autogiro:a Technical Perspective.Journal of Aircraft[J]. 2004, 41(4): 765-781.
 [3] 胡木, 李春涛. 无人机在线航路规划技术研究及其工程实现[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(3): 14.
 [4] 周小庆. 高速无人机电动舵机控制器的设计与实现[D]. 浙江: 浙江大学, 2010.
 [5] 覃媛媛. 无人机双余度电动舵机控制技术的研究与应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
 [6] 姚俊, 曾凡菊. 电动舵机控制系统的电流环设计[J]. 沈阳理工大学学报, 2012, 29(4): 11-14.
 [7] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
 [8] 李丰. 模拟电子技术基础[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2007.