

基于盲反卷积去噪的机车走行部齿轮箱故障诊断

陈特放, 于天剑, 陈雅婷, 成 彦

(中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410075)

摘要: 为了有效地识别机车走行部的早期故障, 提高我国重载机车的运输能力, 以机车走行部齿轮箱为例, 在分析总结大量实际振动信号的基础上, 探讨了运用盲反卷积去噪的方法来提取机车齿轮的故障特征信息, 即采用傅里叶变换在送入滤波器中使振动信号变换为时域信号; 再对所有的盲信号进行盲源分离, 与 TSA (时间同步平均) 方法相比, 考虑了外界因素的影响, 尽量避免了预测和诊断误差; 通过对实际机车走行部齿轮振动信号的分析, 成功提取到故障特征信号, 阐述了该方法在机车走行部在线故障诊断系统中的应用, 不仅能满足在线监测和故障的实时性和可靠性的要求, 使机车在正常运行的时候, 同时显示出其可靠性、耐用性和高置信度性。

关键词: 机车故障诊断; 盲反卷积; 振动信号; 故障预测

Running Gear Gearbox Fault Diagnosis Based on Blind Deconvolution Denoising Locomotive

Chen Tefang, Yu Tianjian, Chen Yating, Cheng Shu

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In order to effectively identify early failures locomotive running gear to improve transport capacity of heavy-duty locomotives, locomotive running gear gearbox for example, summed up the basis of the analysis of a large number of actual vibration signals, discusses the use of blind deconvolution de-noising method for extracting characteristic information motorcycle gear, which uses Fourier transform filter manipulation in the vibration signal into time domain signal, and then all of the blind signal source separation, and TSA (time Synchronization average) compared to consider the impact of external factors, try to avoid the prediction and diagnosis errors. Through the analysis of the actual locomotive running gear vibration signals to extract the fault characteristic signal successfully, the method described in the locomotive running gear line fault diagnosis system application, not only meet the requirements of real-time and reliability of online monitoring and fault diagnosis so that the normal operation of the locomotive at the time, while showing its reliability, durability, and high degree of confidence.

Key words: locomotive fault diagnose; blind-deconvolution; vibration signal; predict failure

0 引言

由于机车通常在高速重载下运行, 走行部相对容易出现故障, 其振动信号异常复杂, 通常表现出非线性、非平稳特征, 因此对机车走行部齿轮箱进行监测诊断, 提取齿轮箱早期的微弱故障特征, 对于及时发现机车故障隐患, 避免重大事故发生具有重要意义。在故障诊断和故障预测当中, 齿轮的健康是典型的指标, 然而在机车运行当中, 振动信号往往有多个激励源, 寻找一个高效的、可靠的去噪算法是非常重要的, 现在广泛使用的消噪技术是同步时间平均 (TSA) 的方法^[1-4]。但由于旋转的齿轮是异步的, 在同一时间非常容易受外部随机干扰和噪声, 然而在频域内可能是一些噪声分量出现在频率轴上, 并且出现的噪声是频率的倍数^[5], 这样会更加增强 TSA 处理, 为了实现更好的信噪比和改善 TSA 数据的质量, 收集来自换能器的振动信号, 防止损坏的噪声和提取正确的特征值等问题^[6-7], 在本文中, 采用盲反卷积计划, 振动分析, 非线性投

影, 成本函数优化, 以及不断变化的操作系统以实现更好的信号优化, 以盲反卷积算法为基础理论, 并在提出的性能指标中详细讨论, 试验结果表明去噪方案的有效性。

1 去噪方案原理与设计

盲反卷积去噪结构如图 1 所示, 在此结构中非线性投影是基于在振动信号上分析的, 成本函数优化是关键的组成部分, 降噪方法首先是把测得的振动信号 $s(t)$, 经过傅里叶变换送入滤波器 $z(f)$ 中, 在频域中信号调制的估计值的倒数, 与测得的振动信号 $S(f)$, 经过卷积得到信号 $B(f)$, 该信号通过非线性投影得到 B_{nf} , B_{nf} 和 $B(f)$ 可以表示为 $E(f)$, 对其进行优化的方法是取 $E(f)$ 信号并得到极小值, 即 $\bar{B}_f - B(f)$ 可视为去噪, 经过逆傅里叶变换, 在时域内可以通过以下方法获得降噪后的信号。

2 系统设计

振动信号是从列车的变速器变速箱上提取出来, 由于齿轮数过多, 我们以经典的 5 齿轮进行研究^[8-9], 如图 2 所示, 下面分析一个假设的理想系统, 加速度传感器被安装在固定的点上, 该位置 $\theta = 0$ 。所观察到的齿轮振幅大时, 则齿轮接近传感器, 小时则远, 假设只有一个齿轮, 然后在振动具有最大幅

收稿日期: 2013-11-12; 修回日期: 2014-01-20。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61273158)。

作者简介: 陈特放(1957-), 男, 湖南长沙人, 博士, 教授, 主要从事电力机车与故障诊断、电气工程及其自动化方向的研究。

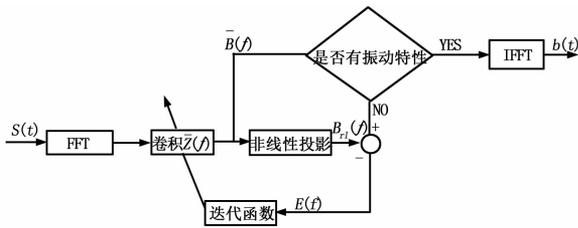


图 1 盲反卷积去噪方案

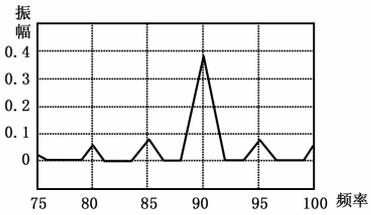


图 3 $Nt=87$ 和 $p=5$ 时信号的频谱

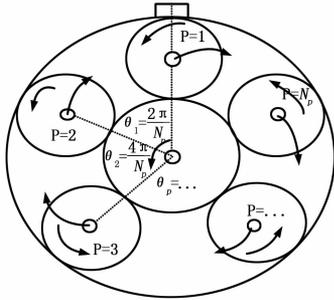


图 2 一个齿轮的系统配置

值的时候，此时 $\theta = 0, 2\pi, 4\pi$ ，同样信号具有最小振幅的时候是在 $\theta = \pi, 3\pi, \dots$ ，在理想状态下，齿轮 $N=5$ 个的齿轮均匀转动，并假定你转动频率为 f^s 后，此 t 时刻与齿轮的相位是

$$\theta_p = 2\pi \left(f^s t + \frac{p-1}{N_p} \right) \quad (1)$$

这种情况下，齿轮的调制信号 p 在时域内可写为：

$$a_p(t) = \sum_{n=-N}^N \alpha_n \cos(n\theta_p) \quad (2)$$

式中， N 是谐波数量， α_n 是调制信号频率为 $n f^s$ 的振幅，在理想情况下，所有的齿轮产生信号具有相同的幅值，但相位不同，由于齿轮的速度正比于角速度，齿合振动频率出现为 $N_i f^s$ ，另外在频域中，其振动信号具有谐波振幅为 β_m ，则振动齿轮 p 产生的信号可以表示为：

$$b_p(t) = \sum_{m=1}^M \beta_m \sin(mN_i \theta_p) \quad (3)$$

然而，静态加速度计下其振动信号 p 作为齿轮源信号与振动信号的合成，可以给定为：

$$y_p(t) = a_p(t)b_p(t) = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=-N}^N \alpha_n \beta_m \sin((mN_i + n)\theta_p) \quad (4)$$

当有一个以上的振动信号时，用加速度计所观察到的振动信号则是所有信号的叠加：

$$y(t) = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{m=1}^M \sum_{n=-N}^N \alpha_n \beta_m \sin((mN_i + n)\theta_p) = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{m=1}^M \sum_{n=-N}^N \alpha_n \beta_m \sin\left(2\pi(p-1) \frac{mN_i + n}{N_p}\right) \quad (5)$$

如式 (1) 所示，对于任何整数 k 满足 $\sin(2k\pi + \theta) = \sin\theta$ ，如式 (5) 所示， $mN_i + n$ 是否为 N_p 的倍数，若不能整除则有余数为 γ ，振动信号在不同齿轮所均匀分布的角度为 $2\gamma\pi/N_p$ ，在 $N_p=5$ 的情况下表示其是否为 N_p 整数的叠加图，其中 $\xi_{p,m,n}$ 是在 $1 \leq p \leq 5$ 情况下的频率分量^[10-11]，

$N_i = 87$ 和 $N_p = 5$ 的情况下的信号频谱如图 3 所示，在这里该注意的是我们在加入破坏性的频率分量则会产生非对称的边带的一阶谐波，频谱的波峰未出现在 $n=0$ ，但在 $n=3$ 和 $n=2$ 中的最大频率幅值出现的频率最接近齿轮的频率。

在频域和以前的振动分析研究结果表明，在一个理想系统中，就是齿轮室是频率的倍数，然后可以将其傅里叶变换写成：

$$Y(f) = f_{nl}(\gamma_{m,n}(mN_i + n)f^s) \quad (6)$$

$\gamma_{m,n}$ 为频谱幅值的大小， f_{nl} 是其非线性投影，

$$f_{nl} = \begin{cases} 1, & \text{如果 } mN_i + n \text{ 是 } N_p \text{ 的倍数} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

从前面的分析系统振动行为，可以进行以下的假设和盲反卷积方法：(1) 只存在齿轮数是频率的倍数的边带齿轮；(2) 对于每个边带 (m, n) 的相位取决于齿轮的角度 $\theta_p(mN_i + n)$ ；(3) 振幅调制信号 $a(t)$ 是单调递减函数的最大值，直到它到达另一侧的最小值。

3 盲反卷积去噪计划

从齿轮箱的振动分析我们知道振动信号是由多个信号所组成的，为了简化模型这样一个复杂的信号被定义为：

$$s(t) = a(t)b(t) + n(t) \quad (8)$$

其中： $s(t)$ 为测试的振动信号， $b(t)$ 是无噪声的未调制的振动信号， $a(t)$ 是调制信号， $n(t)$ 是累积的加性噪声，此时，在系统中，调制信号 $a(t)$ 的本身受噪声的影响，让 $\hat{a}(t)$ 表示理想情况下无噪声信号， $n_u(t)$ 这个信号中为所引入的噪声，因此可以表示为：

$$a(t) = \hat{a}(t) + n_u(t) \quad (9)$$

因此式 (8) 可以表示为

$$s(t) = (\hat{a}(t) + n_u(t))b(t) + n(t) = \hat{a}(t)b(t) + \hat{n}(t) \quad (10)$$

其中： $\hat{n}(t) = n_u(t)b(t) + n(t)$ 包含了系统中所有的噪声信号，另一方面 $\hat{a}(t)$ 表示相乘系统中的噪声，一个去噪的目标就是需找一个相对应的去噪的方法要收回未知的振动信号 $b(t)$ ，从 $s(t)$ 的给定的部分信息噪音的来源和振动信号的特点，典型方法是找到 $\hat{a}(t)$ ，其中： $\hat{z}(t) = \frac{1}{\hat{a}(t)}$ ，则

$$b(t) = (s(t) - \hat{n}(t)) \hat{z}(t) = s(t) \hat{z}(t) - \hat{n}(t) \hat{z}(t) \quad (11)$$

但是在此中， $\hat{n}(t)$ ， $\hat{a}(t)$ 是不合适的， $\hat{z}(t)$ 也是不可用的，为了解决此问题，我们提出一个迭代去噪方案 $\bar{z}(t)$ ，一个粗略估计的逆调制信号，对 $s(t)$ 再给一个无噪声振动信号 $\bar{b}(t)$ ，会有 $\bar{b}(t) = s(t) \bar{z}(t)$ ，如果调制信号 $\hat{a}(t)$ 是真实可用

的, 那么理想的振动信号可以获得 $\bar{b}(t)$ 的一个子空间与已经的振动信号, 得到 $b_m(t)$, 这种非线性投影可以移除所有组件当中的粗糙估计 $\bar{b}(t)$, 再进行一个迭代这些结果直接的误差最小化, 然后提炼 $\bar{b}(t)$ 和 $b_m(t)$ 两个信号,

$$\min \|e(t)\| = \min \|\bar{b}(t) - b_m(t)\| \quad (12)$$

以前的研究结果的是旋转设备振动信号的光谱特性, 因此, 由频域卷积定理可知, 测得的振动信号在时域上的积等同于两个信号在频域中的卷积, 所以式 (10) 在频域内可以写为

$$S(f) = \hat{A}(f) * B(f) + \hat{N}(f) \quad (13)$$

其中: $*$ 为卷积运算符, $S(f), \hat{A}(f), B(f)$ 和 $\hat{N}(f)$ 分别为 $s(t), \hat{a}(t), b(t)$ 和 $\hat{n}(t)$ 经过傅里叶变化所得到的量, 所以在频域当中的目标为 $B(f)$ 改写上面式子为 $\bar{B}(f) = S(f) * \bar{Z}(f)$, 同样 $\bar{B}(f)$ 和 $\bar{Z}(f)$ 是 $\bar{b}(t)$ 和 $\bar{z}(t)$ 经过傅里叶变换所得到的, 通过 $\bar{B}(f)$ 的非线性投影而得到 $B_m(f)$ 在频域内我们可以将 $\bar{B}(f)$ 和 $B_m(f)$ 的差异最小化,

$$\min \|E(f)\| = \min \|\bar{B}(f) - B_m(f)\| \quad (14)$$

在式 (14) 中, 通过迭代提取 $\bar{Z}(f)$, 当它达到最小值时 $\bar{Z}(f)$ 收敛于 $Z(f)$, 所以在式 (13) 中可以用 $Z(f)$ 代替 $\bar{Z}(f)$, 对于 $B(f)$ 为一个好的估计值, 即

$$B(f) = S(f) * Z(f) \quad (15)$$

最后到时域转换回恢复无噪声振动信号

$$b(t) = F^{-1}B(f) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i2\pi ft} B(f) df \quad (16)$$

要想解决这个问题还需加附加的假设: (1) $Z(f)$ 存在且 $\sum Z(f) < \infty$; (2) 调制信号 $\hat{a}(t) > 0$ 且它的逆也为正, 因此其经过傅里叶变换后 $Z(f)$ 具有直流分量, 由于有前面两个假设, 故能耗函数可定义为:

$$J = \sum_{f \in D_{sup}} [B(f) - B_m(f)]^2 + (1 - \sum Z(f))^2 \quad (17)$$

D_{sup} 是包含了主要振动信号的频率范围, 由于存在谐波并把谐波集中在一个窗口来定义临界频率, 所有这些窗口都在 D_{sup} 内, 在式 (17) 中假设 (1) 和 (2) 将用于第二项中用来避免全零的逆滤波器 $Z(f)$, 可以使误差最小化, 此外, 用迭代的方法来解决问题有更快的收敛速度^[12-14]。

4 试验结果

随着不断变化的控制变速箱这种方式, 变速箱安装在地面测试床上, 在不同的扭矩水平振动数据在不同的扭矩水平和不同的裂纹来采集测试周期长度, 扭矩从 20%~40%, 最后增加到 100%, 然后降低到 20% 进入下一个周期。实际裂纹增长是随着周期的变大而逐渐变长我们可以获得裂纹长度的生长的曲线如图 4 所示。

在对实时的车体的信号进行去噪的试验当中, 我们分别在盲反卷积情况和 TSA 非同步时间序列的情况下得到的信噪比如图 5 所示。

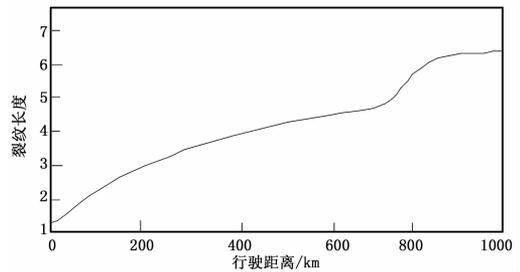


图 4 裂纹长度的增长

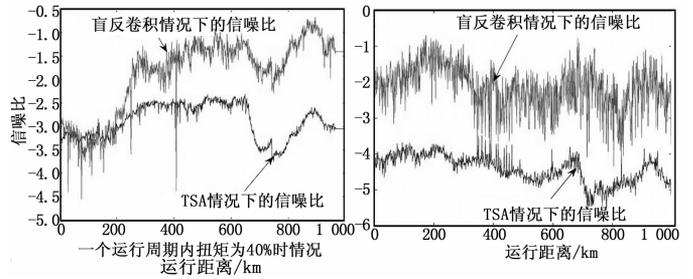


图 5 分别在扭矩为 40% 和 100% 情况下的信噪比

我们分别对上述图中对其在扭矩 40% 和 100% 情况下进行消噪, 本文得到的消噪结构如图 6 (a) 所示, TSA 同步时间序列分析得到的如图 6 (b) 所示。

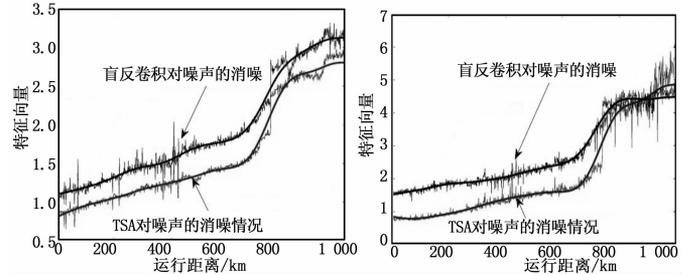


图 6 扭矩为 40% (a) 和 100% (b) 情况下的均值百分比

我们可以直观地看到 D-N 方法在去噪方面要强于 TSA 方法, 不论是在对平滑的信号的处理还是对有毛刺的特征向量, 随着裂纹的发展, 操作条件的偏离, 在这种情况下从不同的振动信号的叠加而得到加强的破坏性信号的叠加, 在较小的 RMC 下也会有很多毛刺。虽然盲反卷积去噪显示出了对信噪比的明显改善, 但是对于改善其精度之间的映射功能和实际裂纹扩展, 我们引入下面的指标, 其中一个重要指标为精确的度量相对应的信号分散体的归一化, 也称之为百分比平均差值 (PMD)。

$$PMD(x, \bar{x}) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|x_i - \bar{x}_i|}{\bar{x}_i}}{l_x} \times 100 \quad (18)$$

式中, l_x 为其数量, x_i 为是平滑的特征向量。 \bar{x}_i 是由尖锐的特征向量。在故障的预测和检测算法中, 提取特征值被作为测量输入的, 因此性能指标和检测阈值和精度的预测其使用寿命是密切相关的, 一个精确的 PMD 特性都应该有一个很小的值近乎为 0。在不同相关系数和 PMD 为这两个特征在不同的扭矩水平, 如表 1 所示。

表 1 百分比平均偏差与相关系数

转矩	20%		40%		100%	
	TSA	D-A	TSA	D-A	TSA	D-A
信噪比 (%)	1.12	1.84	4.85	3.31	5.65	2.90
百分比平均偏差 (%)	1.05	0.96	1.19	0.93	3.05	0.80

在表中可以看出 D-N 方法的去噪明显强于 TSA 去噪方案，不论是信噪比和百分比平均值都要强于同步时间序列的方法，但是表中指出在 20% 情况下 D-N 算法的方法要低于 TSA 方法，这是由于非线性投影去噪是取决于振动光谱的分析，并且平时的应用当中一般都会在中高扭矩的情况下运行车辆，此例显示了更可靠的性能在高扭矩水平。

5 结论

振动信号的质量是和这些数据来进行故障诊断和预测是密切相关的，故障预警的实施需要一些高质量的数据来进行试验，数据的特点和信号提取往往被干扰和噪声所掩盖掉，本文的盲反卷积去噪计划的开发是从变速箱上获取振动信号，而去噪计划使用一个递归过滤技术的一个成本函数最小化，用来改善振动信号的信噪比，然后用特征提取的方法去除噪声数据，从数据的准确度和精度方面于 TSA 去噪方法进行比较，信噪比和性能指标的试验结果表明盲反卷积去噪比常规去噪更有效率，这样的信号处理技术明显降低了故障检测阈值，提高了诊断和预警的技术，在高速列车当中，盲反卷积去噪计划时很实用的方法之一，它可以应用到各种系统中，特别是在非线性系统中的开发有很大的研究价值。

参考文献

[1] Peled R, Braun S, Zacksenhouse M. A blind deconvolution separation of multiple sources, with application to bearing diagnostics [J]. Mech. Syst. Signal Process, 2005, 19: 1181-1195.

[2] Onel I Y, Benbouzid M. Induction motor bearing failure detection (上接第 1724 页)

单片机控制 HMC274 的衰减量，输入到 AD8362 的射频信号减小到 3.5 V 以下，图 6 中，在 +13~43 dB 范围内，输出电压趋近于临近 3.5 V 的一条直线，此时的射频信号功率真值应当为单片机 P2 口控制的衰减量与 AD8362 输出电压对应功率真值的和，可由单片机数据处理得到。

5 结论

本设计中，笔者将数字衰减器 HMC274 及功率-电压转换芯片 AD8362 相结合，以单片机 STC12C5A60S2 为主控芯片，设计了一款新型的宽量程射频信号功率真值检测系统，并利用 GSM 短信模块实现了远程和近程的检测。通过实际检测，用 Origin7.5 软件进行了数据拟合和结果分析，测量结果精确，满足设计要求，实现了预期的宽量程功率真值的检测。

参考文献

[1] 沙占友. 功率测量技术及其应用 [J]. 电源技术应用, 2006, 9 (7): 56-59.

[2] 陈冶金, 孟文, 徐正平, 等. GSM 模块在汽车远程控制预热器

and diagnosis; Park and concordia transform approaches comparative study [J]. IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 2008, 13 (2): 257-262, Apr. 2008.

[3] Djeziri M, Merzouki R, Bouamama B, et al. Robust fault diagnosis by using bond graph approach [J]. IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 2007, 12 (6): 599-611.

[4] Cade I, Keogh P, Sahinkaya M. Fault identification in rotor/magnetic bearing systems using discrete time wavelet coefficients [J]. IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 2005, 10 (6): 648-657.

[5] 曾刚. 滚动轴承微弱故障信号检测方法研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2010.

[6] 苏文胜. 滚动轴承振动信号处理及特征提取方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.

[7] Orchard M. A particle filtering-based framework for on-line fault diagnosis and failure prognosis [D]. Georgia Inst. Technol., Atlanta, GA, Nov. 2007.

[8] Wu B, Saxena A, Khawaja T, et al. An approach to fault diagnosis of helicopter planetary gears [A]. Proc. AUTOTESTCON [C], San Antonio, TX, 2004, 475-481.

[9] Ayers G R, Dainty J C. Iterative blind deconvolution method and its applications [J]. Opt. Lett., 1988, 13 (7): 547-549.

[10] 程军圣, 杨宇, 于德介. 局部均值分解方法及其在齿轮故障诊断中的应用 [J]. 振动工程学报, 2009, 22 (1): 76-84.

[11] 沈英才, 刘朝英, 宋雪玲. 计算机测量控制系统的自诊断方法 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 11, 1043-1044, 1063.

[12] 朱大奇, 于盛林. 基于知识的故障诊断方法综述 [J]. 安徽工业大学学报 (自然科学版), 2002, 19 (3): 76-79.

[13] 秦岭, 杨君. 小波包分析在旋转机械故障诊断中的应用 [J]. 电子工程师, 2006, 32 (1) 48.50.

[14] Ayers G R, Dainty J C. Iterative blind deconvolution method and its applications [J]. Opt. Lett., 1988, 13 (7): 547-549.

[15] Antoni J. Blind separation of vibration components: Principles and demonstrations [J]. Mech. Syst. Signal Process, 2005, 19 (1): 1166-1180.

中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (4): 907-909.

[3] 周平, 胡永红. 基于 ATmega 1280 接收机功率检测控制器的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (10): 1436-1438.

[4] 毕宁强, 朱瑞祥. 基于 TC35i 的土壤信息远程监测系统 [J]. 农机化研究, 2012, 3 (3): 187-190.

[5] 徐君, 王雪梅. 基于 AVR 的机载应答机射频功率探测模块设计 [J]. 测控技术, 2011, 30 (12): 1-3.

[6] 王卫东. 高频电子电路 (第 2 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.

[7] 王化祥, 张淑英. 传感器原理及应用 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2007.

[8] 胡革. 中频功率在线监测研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2006.

[9] 朱君豪. 高频衰减器的设计与制作 [J]. 军事通信技术, 1987, 3 (23): 75-78.

[10] 廖成芳, 陈迪平, 李学军, 等. 带自适应控制的直放站线性功率放大器 [J]. 微计算机信息, 2008, 24 (5-2): 291-292.

[11] 姬翠翠, 朱华, 江炜. 基于 Matlab 和 Origin 实现测力传感器的静态标定 [J]. 传感器与微系统, 2007, 26 (12): 106-108.