

基于联合仿真的辅助电源电磁兼容性研究

王丙元, 柯雄飞

(中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300)

摘要: 以降低机载静止变流机辅助电源的传导电磁干扰为背景, 为提高辅助电源受到电磁干扰时仿真的真实度, 搭建了基于 Pspice 与 Simulink 联合仿真的辅助电源电磁兼容模型; 该模型结合 simulink 在控制策略设计、实现方面的优势和 Pspice 在电子元器件精确仿真方面的优势, 可以直接方便地验证设计阶段地电磁兼容方案, 并在此基础上提出了一种结合控制策略与传统电磁干扰滤波器地噪声抑制有效方法; 从原理分析得到精确模型到联合仿真得出结论, 对于辅助电源 EMC 设计及噪声干扰问题的解决具有实际的指导意义。

关键词: 电磁干扰; 随机脉宽调制; EMI 滤波器; pspice-simulink 联合仿真; 电磁兼容

Research on Electromagnetic Compatibility of Auxiliary Power Supply Based on Co-simulation

WANG Bingyuan, KE Xiongfei

(College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to reduce the conducted electromagnetic interference (EMI) in the auxiliary power supply of a airborne station-ary converter, and to improve the simulation effect when the auxiliary power supply is subjected to electromagnetic interference, an electromagnetic compatibility (EMC) model of the auxiliary power supply based on the co-simulation of Pspice and Simulink is built. The model combines the advantages of Simulink in the design and implementation of control strategies and that of Pspice in the accurate simulation of electronic components, which can directly and easily verify the EMC scheme in the design stage, on this basis, a noise suppression effective method of combining control strategies with traditional EMI filters is proposed. The accurate model is obtained from the principle analysis to the conclusion of the co-simulation, it has a practical guidance for the auxiliary power supply EMC design and solution of noise interference problem.

Keywords: EMI; random pulse width modulation; EMI filter; pspice and simulink co-simulation; EMC

0 引言

机载静变流机是飞机应急电源的重要设备, 当飞机飞行中主电源发生故障时, 为飞机上的设备提供电能, 需要高可靠性和安全性。目前, 反激电源因为结构简易、便于控制、体积小通常作为机载静变流机的辅助电源, 在机载静变流机中为整个系统提供控制能源。而随着电力电子技术的发展, 各种电子元器件的开关频率与速度逐渐提高, 辅助电源的功率开关在高速通断时会产生较高的 du/dt 和 di/dt , 这些电压电流尖峰会通过电路中的寄生参数与耦合效应在线路中形成电磁干扰 (EMI, electromagnetic interference)^[1-7], 从而对相邻设备的电气性能产生负面影响。设备的电磁兼容性 (EMC, electromagnetic compatibility) 是指电气设备在电磁环境中正常运行符合要求并不对周围的电磁环境中任何设备产生无法忍受的电磁干扰的能力, 因此电磁兼容性是确保电力电子等电气设备安全可靠运行的关键, 为防止电磁干扰, 国际电工委员会针对电气设备

电磁兼容性制定了严苛的限制标准。但目前 EMC 实验室的造价昂贵, 绝大部分的 EMC 检测设备需要依赖进口, 导致工程中需要承担较高的第三方 EMC 测试费用, 多次测试过程会延缓设计交付时间, 而因初期设计不符合电磁兼容标准而进行的后期的“整改”更是将导致设计成本大幅增加。因此, 电源设计初级阶段电磁兼容性设计占据着越来越重要的位置。

国际组织把电磁干扰分为辐射干扰与传导干扰, 通过电磁发射限制与测量等诸多规定进行区分, 辐射发射一般规定在 30 MHz 以上的频段, 传导发射一般规定在 150~30 MHz 的频段内。电磁干扰的三要素分别是干扰源、传播路径和受扰体, 那么抑制电磁干扰的基本方法通常也是针对这三点, 即降低干扰源头的发射值、阻断电磁干扰的传播路径和增强受扰体接受电磁干扰的抗扰强度。而对于辅助电源而言, 传导干扰往往比辐射干扰更易发生且产生的危害更大。目前, 针对日益严重的电源传导电磁干扰的问题, 研究学者们提出了很多解决方案。主要是针对三要素

收稿日期: 2022-12-04; 修回日期: 2023-01-09。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1333102)。

作者简介: 王丙元(1968-), 男, 教授, 硕士研究生导师。

引用格式: 王丙元, 柯雄飞. 基于联合仿真的辅助电源电磁兼容性研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(9): 220-227.

的前两点即削弱传导干扰源头的发射和阻断干扰传导路径两大类。基于干扰源头抑制的常规方式是对功率开关控制策略的调整, 文献 [8] 讨论了一种优化功率开关通断的开环栅极控制, 与传统的栅极控制器通过增加栅极电阻抑制 EMI 会导致导通损耗的做法相比, 开环栅极驱动器可以通过独立的控制导通的 dv/dt 和 di/dt 降低电磁干扰并且优化导通损耗。文献 [9] 采用两次调制载波来削弱 PWM 的周期性, 从而解决固定周期导致的峰值能量过于集中的问题。文献 [10] 将空间矢量 PWM (SVPWM) 与随机脉宽调制 (RPWM) 相结合, 提出了增大对奇数阶噪声抑制效果的方法。阻断传导干扰路径一般采用 EMI 滤波器^[11-14]的方案, 文献 [15] 通过阻抗测试仪得到共模电感和差模电容各频段的精准阻抗值进而得到噪声源阻抗, 在考虑噪声源阻抗的情况下优化了 EMI 滤波器的设计过程, 使 EMI 抑制的效果整体提高。文献 [16] 利用压电效应进行滤波设计, 抑制电磁干扰的同时增加了滤波频率选择的机会。但是, 由于基于控制策略和基于参数设计 EMI 滤波器抑制噪声的两种方案着重点不同, 单一仿真软件难以做到同时兼顾, 因此很少有文献去研究二者结合下开关电源的电磁兼容预设计情况。

为了解决上述问题, 本文采用 Pspice-Simulink 联合仿真方法, Pspice 能够建立精准的元器件电路模型, Simulink 能够方便且直观的构建控制系统。利用这两个软件建立的电磁兼容联合仿真模型, 既可以对电路中元器件的寄生参数在高频情况下进行仿真分析, 又可以施加控制策略, 通过交互式仿真得到二者结合下的电磁噪声频谱, 为电源电磁兼容预设计提供直接且精准的依据, 并且在此基础上利用联合仿真模型提出了控制策略结合传统 EMI 滤波器噪声抑制方案, 该方案在降低传统 EMI 滤波器体积下拥有更优秀的噪声抑制效果, 为实际工程中 EMI 滤波器的设计提供了一定的借鉴。

1 联合仿真

1.1 辅助电源 pspice 模型

反激电源的电路拓扑如图 1 所示。当开关管导通时, 输入电压加到了原边匝数为 N_1 的绕组上, 原边的电感电流线性增长, 电流磁化的能量储存在变压器原边中, 副边由于产生的感应电动势使副边二极管截止, 没有电流流过。开关管断开时, 上个导通阶段储存的能量必须要有释放的回路, 此时的感应电动势使副边二极管导通, 变压器储存的电磁能量向负载端释放, 副边电流逐渐减小。整个工作

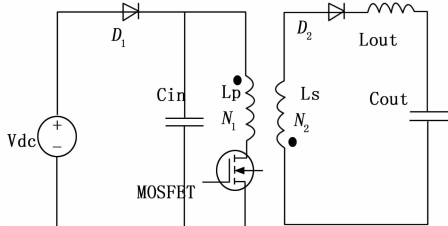


图 1 辅助电源电路拓扑

过程中, 变压器起到了储能电感的作用。

由上述辅助电源能量传递原理可知, 变压器是用来储存与传递电磁能量的重要器件, 初级回路与次级回路之间传递电磁能量的同时其寄生电容也为电磁干扰提供了耦合路径, 因此变压器的寄生参数在对电磁干扰进行建模分析时必须给予充分考虑。由于双绕组变压器是单输入输出且采用是单层密绕的拓扑结构, 因此可假设原副边绕组为平行极板, 如图 2 (a) 所示, 该结构的寄生电容总值计算如式 (1) 所示^[17]:

$$C_o = \epsilon_o \cdot \epsilon_r \cdot \frac{s}{d} \quad (1)$$

式中, ϵ_o 为真空介电常数, ϵ_r 为相对介电常数, s 为原副边线圈等效为平行极板的面积, d 为两个线圈之间绝缘间隔与空隙之和。

用寄生总电容去等效变压器绕组间的电容, 只能是作为预估参考。为了提升仿真的精准性, 本文采用变压器六电容模型^[18], 如图 2 (b) 所示, 其中 Co1—Co4 是绕组间电容, Co5—Co6 是绕组内电容。即利用集中电容替代各个绕组之间或内部的寄生电容, 由于寄生电容与集总电容所产生的电磁能量是完全相等, 把两者电磁能量表达式进行对比即可求出各个所需的集总电容数值。

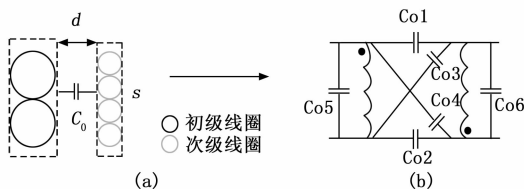


图 2 变压器寄生电容与集总电容

除此之外, 辅助电源中的 MOSFET 高速的开关会产生较大的电压尖峰和电流尖峰, 从而激励功率电路中的寄生元件导致传导发射, 因此为了研究辅助电源的电磁干扰问题, 同样有必要对其各个元件进行精确建模, 辅助电源中元器件可分为有源元件和无源元件, 有源元件主要是功率开关与二极管, 前者由于导通时产生浪涌电流与关断时剩余电磁能量在自身阻容元件上的叠加产生电压尖峰脉冲信号; 后者是极短关断时间内恢复电流的变化引起较大的电磁干扰。图 2 是二极管和功率开关的高频模型, Rd 、 Rg 、 Rs 、 Cgd 、 Cgs 、 Cds 分别为功率开关寄生电阻与电容, Cj 是二极管的结电容, 为了对这些高频寄生参数的准确提取以建立半导体器件开关的精准模拟, 本文根据生产厂家给出参数在基于实际物理结构上建立的准确 Pspice 仿真模型。

无源器件实际参数可以先通过阻抗分析仪测得, 再经过设置的寄生参数进行拟合, 使拟合曲线接近阻抗分析仪的实际曲线, 从而达到替代的效果。实际中为了对产生的电磁干扰进行测量, 需要利用线性阻抗稳定网络 (LISN, line impedance stabilization network), 其主要的作用是为受到干扰设备的电源线与参考地线之间提供稳定的阻抗值,

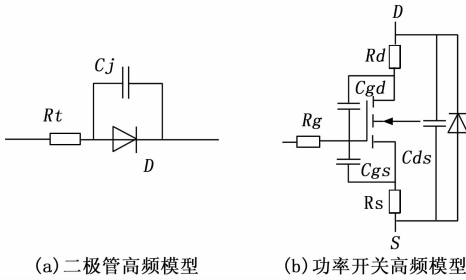


图 3 有源器件高频模型

这样可以为电磁干扰信号提供测量的端口。图 4 为加入了 LISN 的辅助电源完整的电磁兼容模型。

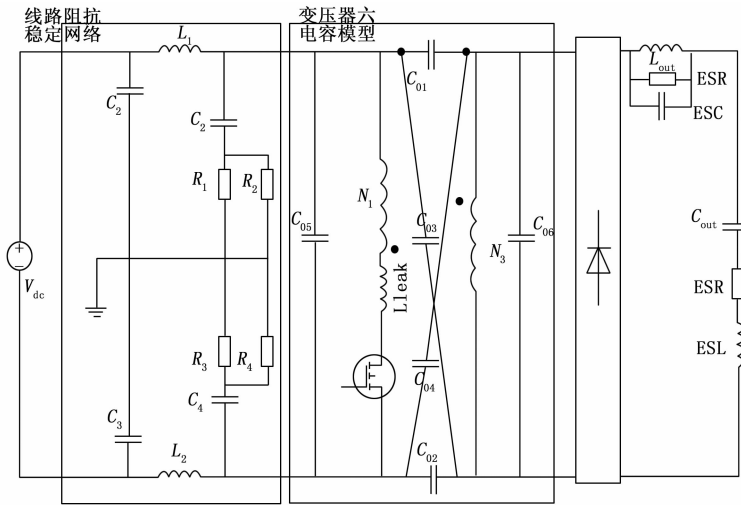


图 4 辅助电源电磁兼容模型

1.2 Simulink 控制策略

1.2.1 随机脉宽调制抑制电磁干扰的基本原理

传统 PWM 通过高频率载波与低频率调制波比较产生固定周期脉宽的开关函数，如图 (5) 所示。当常规载波的恒定周期信号转为随机变量时即为随机脉宽调制方式。

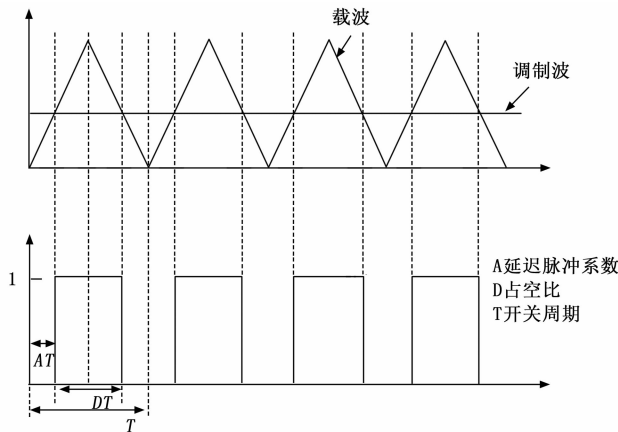


图 5 PWM 产生原理

PWM 脉冲是由一系列的固定周期的矩形脉冲信号组成，脉冲信号的中点为载波周期的中点。假设 x 时刻对应

矩形脉冲 $f_x(t-t_x)$ 如式 (2)：

$$f_x(t-t_x) = \begin{cases} 1 & -\frac{1}{2}D(t_x)T_x \leq t-t_x \leq \frac{1}{2}D(t_x)T_x \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (2)$$

则整个脉冲函数可以表示为：

$$F(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{x=1}^N f_x(t-t_x) \quad (3)$$

对 $f_x(t-t_x)$ 函数进行傅里叶变换，以及利用傅里叶变化叠加的性质可以得到脉冲函数的傅里叶变换对 $F(\omega)$ ，将固定 PWM 开关周期改成随机变量的周期，再引入利于分析随机脉宽调制的功率谱密度函数后可以得到固定脉宽调制的功率谱密度和随机脉宽调制的功率谱密度^[19]记为式 (4) 与式 (5)：

$$S_p(\omega) = \frac{1}{T_g} |F(\omega)|^2 \sum_{x=1}^{\infty} \delta\left[\omega - \frac{2\pi x}{T_g}\right] \quad (4)$$

$$S_p(\omega, T_g) = \frac{1}{E[T_g]} \left\{ E[|F(\omega)|^2] + 2RE \left[\frac{E[F^*(\omega)] \cdot E[F(\omega)e^{j\omega T_x}]}{1 - E[e^{j\omega T_x}]} \right] \right\} \quad (5)$$

$$E[S_p(\omega, T_g)] = \int_{T_x - \Delta T}^{T_x + \Delta T} F_x[T_{\text{random}}] \cdot S_p(\omega, T_g) dT_g \quad (6)$$

其中： $E[\cdot]$ 代表的是数学期望， T_g 是固定 PWM 的周期。 ΔT 是开关周期的上下限， $F_x[T_{\text{random}}]$ 是随机开关周期变量的概率密度函数。

由固定脉宽调制的功率谱密度函数可知冲激函数是导致高次谐波出现在开关频率以及其倍频处的原因。又由式 (6) 可知随机脉宽调制的功率谱密度是由 $F_x[T_{\text{random}}]$ 决定的，因此利用随机脉宽调制技术可以使频谱能量分布更均匀降低频谱峰值达到抑制噪声的目的。

1.2.2 应用于辅助电源的随机脉宽技术

随机脉宽调制种类是根据图 5 中三个调制参数 (A , D , T) 来定义的，三个调制参数可以随机变化即脉冲在一个开关周期内的位置和开关的频率是独立可变的，因此主流的随机脉宽调制方案可分为两种：随机脉冲位置 (RP-PM, random pulse position modulation) 和随机开关频率调制 (RCFM, random carrier frequency modulation)，其中，随机开关频率 (RCFM) 调制是 RPWM 中抑制电磁干扰最广泛且有效的方法。静止变频器的辅助电源是 DCDC 变换器，为了稳定的直流输出电压，占空比就需要维持相对的恒定，也就是调制参数 D 要保证不变或者是在一段时间内平均值位置恒定。然而，一般的随机开关频率调制是按照固定时钟切换频率进行切换，这种随意的切换会使切换后的混合载波出现时序问题进而导致输出电压发生畸变。基于以上三点，本文采用固定频率选择的预设载波^[20]随机开关频率调制技术。

固定频率选预设载波需要解决的问题如图 6 所示，频

率分别为 f_1 和 f_2 的两条载波, 如果在 t_1 时刻切换, 前后两条载波的相位不同步致使相位衔接出现误差; 与之相反的 t_2 时刻切换前后相位处于同步时态, 不会产生相位误差。

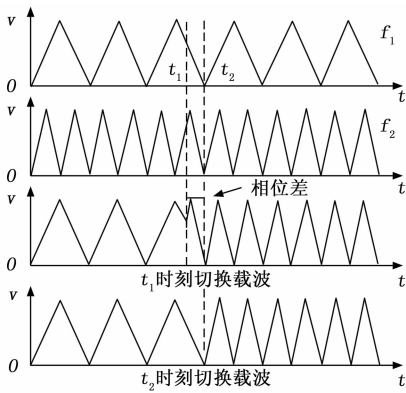


图 6 频率选择对预设载波切换的影响

为了避免输出波形畸变问题, 即让载波切换时刻始终保持再类似 t_2 时刻, 载波切换频率与切换前后两条载波频率三者之间需要遵循式 (7) 的关系, 在满足式 (7) 的前提下, 应尽量选择最高的载波切换频率, 以此获得高次谐波幅值较低的频谱同时输出电压的波形也不会产生畸变, 达到辅助电源设计的目的。

$$\frac{|f_i - f_j|}{f_i} = N \quad (7)$$

式中, f_i 与 f_j 是自由选取的载波频率, f_i 是随机数产生的频率, N 为自然数。

1.2.3 Simulink 控制策略具体实现

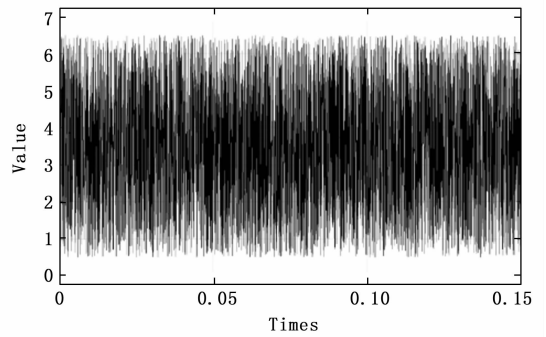
随机脉宽调制其实现的关键在于随机数的产生, Pspice 可以通过电路模拟仿真功能实现传统的 PWM 调制, 但却难以用模拟电路生成随机数。而 Simulink 具有强大的理论计算能力, 利用相关的算法, 便可以轻松实现随机脉宽调制等控制策略, 从而进行控制策略的研究。根据前文的分析与式 (6) 可知, 预设载波切换生成的混合载波分布越均匀即产生的随机序列越均匀扩频效果越好, 噪声抑制效果也越显著, 作为 Simulink 内置的梅森旋转生成均匀随机数模块可以满足这一要求, MT 随机数序列生成原理如式 (8) 所示。

$$y_{n+k} = y_{m+k} \oplus (y_k^u | y_{k+l}^l)A \quad (8)$$

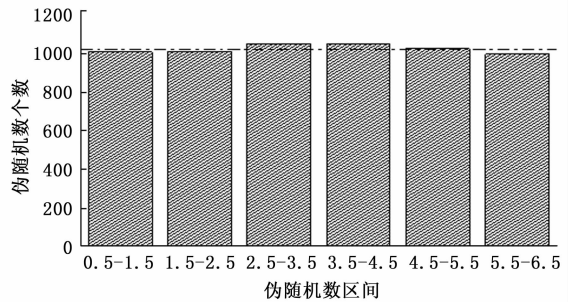
其中: y^j 为随机序列中的第 i 个元素, n 为随机序列序列个数, 并且 $1 \leq m < n$; A 是矩阵, $y_k^u | y_{k+l}^l$ 表示 y 的前 u 位与 y 的后 l 位相结合。

为了验证均匀随机数模块生成随机序列的效果, 本文利用 MT 模块产生 6 000 个伪随机数, 生成的随机数序列的仿真效果图与分布区间统计如图 (7) 所示, 从图中可以看到伪随机数均匀分布到给定的区间内, 表明了该模块具有良好的均匀分布特性。

实施的随机脉宽调制基本原理图如图 8 所示, 预设多个不同频率的三角载波信号, 基于均匀随机数模块生成的输出 (随机提供整数“1”或“2”或“3”……), 随机载



(a) 伪随机数仿真效果图



(b) 伪随机数区间分布图

图 7 均匀随机数模块生成伪随机分布图

波选择器选择多个载波中的一个。因此, 选择器输出端的载波波形是输入端多个载波波形的混合, 该波形在比较器中与调制信号进行比较, 以获取所需的随机脉宽信号, 同时这个方案可以通过调整随机数产生频率以及增加三角波发生器数量即增加预设载波数量来改变随机脉宽调制的随机性, 使得频谱分布更均匀。

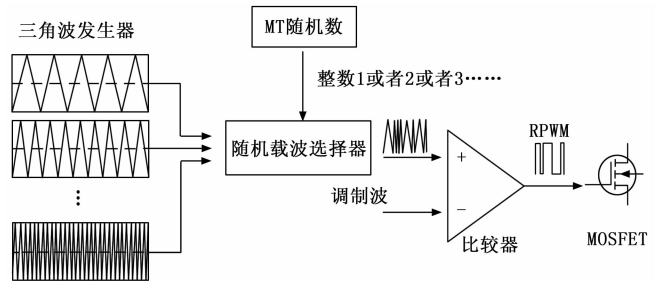


图 8 RCFM 调制策略

1.3 Pspice-Simulink 联合仿真

Pspice 是电力电子模拟仿真中最为常用的仿真引擎, 其简洁性与专业性是工业界一流的水准, 能够提供最新的电子元器件的数据及电路模块支持, 借助 Pspice 能够很好的完成辅助电源的模拟高频电路的搭建和功能验证工作, 还可以通过其自带的模型编辑器将无源器件寄生参数导入为 Pspice 模型以供模拟电路仿真使用。Simulink 是 Matlab 的扩展程序, 具有可视化数据处理模块, 可以方便快捷的搭建前文提到的控制策略动态系统模型。

本文采用的联合仿真平台是将静止变流机辅助电源电磁兼容模型分为 Pspice 原理电路模块-SLPS 接口-Simulink

控制与显示模块三个部分, Pspice 原理电路模块建立模拟电路子工程, 在保证寄生参数准确的前提下对其进行调整校验完成降压功能, SLPS 接口实现了 Simulink 平台与 Pspice 底层仿真引擎的协同运行, 确保数据能够完成交互, Simulink 控制模块实现控制策略, 将其整合到电子设计自动化的工作环境中, 显示模块用到了 Simulink 的频谱分析仪, 通过对 Pspice 中 LISN 电阻的电压参数进行运算提取后接入到频谱分析仪中从而获取所需的噪声频谱。联合仿真具体流程如图 9 所示。

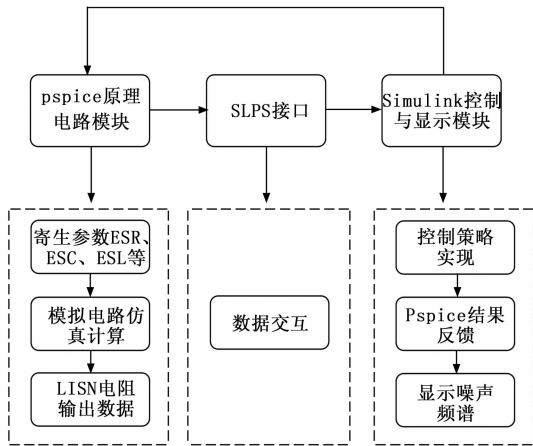


图 9 联合仿真流程

2 试验结果

2.1 联合仿真实验平台

在 Pspice 软件中搭建辅助电源 EMI 仿真电路, 部分电

路参数如下: 输入电压为直流 28 V; 输出电压为 15 V; 输出功率为 15 W; 开关频率为 40 kHz; 变压器原边电感分 209 uH; 副边电感为 30 uH; 原副边匝数比为 9: 2; 漏感取原边电感值得 5%, 为 10.45 uH, 分布电容 C01~C06 数值分别为 26 pf、26 pf、13 pf、13 pf、-13 pf、-13 pf。功率开关型号为 IRF221, 二极管的型号为 MUR405, 其他电路元件具体寄生参数如表 1, 辅助电源 Pspice 电磁兼容模型如图 10。

表 1 寄生参数

参数	数值
R_g/Ω	35
R_d/Ω	0.275 7
R_s/Ω	0.205 5
C_{gs}/pF	388.7
C_{gd}/pF	48.8
C_{ds}/pF	65
R_t/Ω	0.069 03
C_j/pF	128.7

Simulink 与 Pspice 之间 SLPS 接口数据交互取决于仿真的步长, Simulink 仿真步长取值一般比 Pspice 步长略大, 与此同时, 步长过大会导致波形失真, 步长过小又会导致仿真的时间呈指数增加, 考虑仿真精度需要, 本文采取混合步长的设置。在搭建完上述 Pspice 模型后, 通过传输接口将 LISN 的电阻测量端获得电磁干扰时域电压信号引入到 Simulink 频谱分析仪模块进行傅里分析得到电磁干扰噪声频谱, 整体联合仿真平台如图 11 所示。

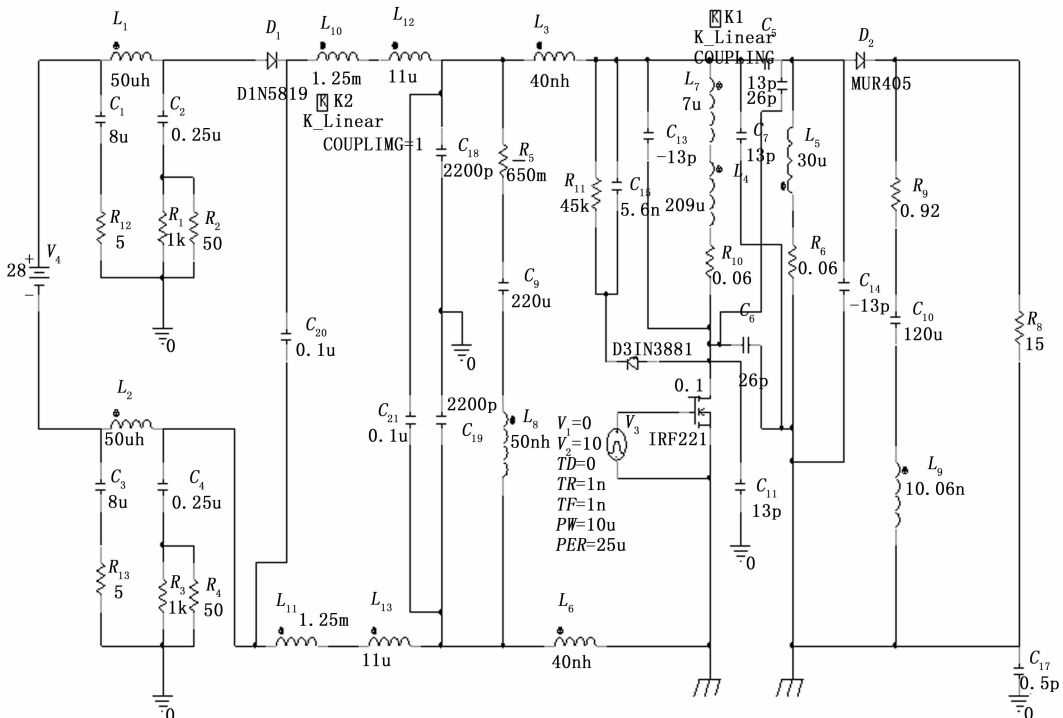


图 10 辅助电源 Pspice 电磁兼容模型

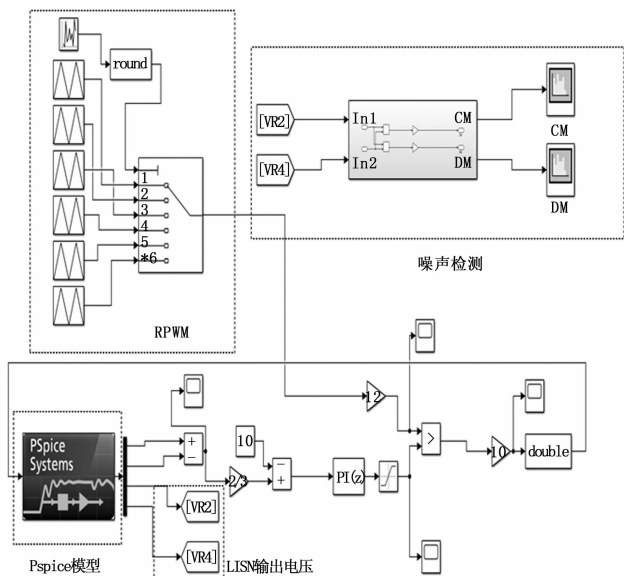


图 11 联合仿真平台

2.2 PWM 与 RPWM 的噪声频谱

本文选取 CISPR 22B 作为电磁兼容限制标准, 所有噪声的测量频段为 0.15 kHz~30 MHz, 首先对传统的 PWM 调制进行仿真得到的电磁干扰噪声频谱如图 12 所示。

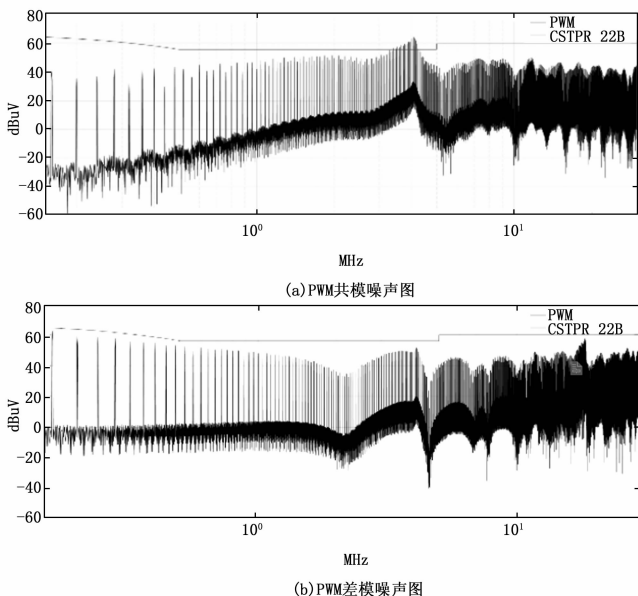


图 12 固定脉宽调制噪声频谱

从图中可以看到低频段差模噪声高于共模噪声, 且在 4 MHz 处频谱都出现了较大噪声尖峰, 这正是寄生电路元件 (如变压器漏感、输入输出电容、以及变压器电容) 引起额外的电压峰值与振铃, 该频率通常在 3 MHz 到 12 MHz 之间, 噪声频谱波形显示的数值与辅助电源实际情况有较小的偏差但基本一致, 验证了本文提出的辅助电源电磁兼容联合仿真模型的准确性, 证明了该联合仿真方法的可行性。

将固定频率选择的预设载波随机开关频率调制控制策略加入到联合仿真模型中, RPWM 调制后的噪声频谱图如图 13 所示。

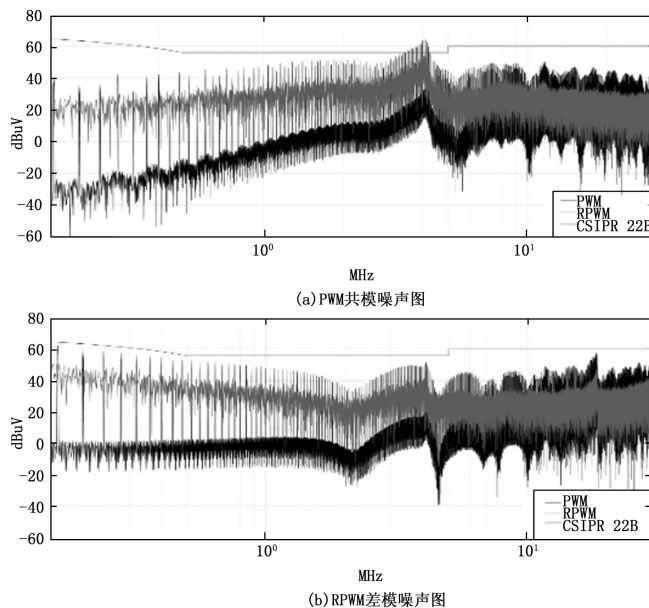


图 13 随机脉宽调制噪声频谱

由图可知, 原本集中在 PWM 调制开关频率或者开关频率倍频处的谐波在改换成 RPWM 调制后均匀分散在频谱尖峰之间, 4.04 MHz 处共模噪声峰值降低了 8.34 dBuV, 其他共模高频谐波降低数值在 9~14 dBuV。160 kHz 处差模噪声降低了 8.98 dBuV, 其他差模高频谐波降低的数值在 9~11 dBuV。

2.3 基于联合仿真的新方法的提出

随机脉宽调制的 EMI 抑制效果受限于噪声总值, 尤其在噪声峰值大且分布密度高的频带内表现不佳, 图 13 已经体现出这种趋势。无源电磁干扰滤波器是解决变换器中电磁干扰最常用的方法, 其 EMI 抑制效果与电感数值成正比, 但是过大的电感值会带来额外的体积、重量和成本。而控制策略与无源电磁干扰滤波器结合, 提供了在不改变硬件的情况下减少无源滤波器体积的可能性, 并且本文的联合仿真工具也为此方案提供了验证平台。

共模 (差模) EMI 无源滤波器实质上是对共模 (差模) 回路使用共模扼流圈 (差模电感) 结合共模电容 (差模电容) 达到低通滤波的效果来抑制噪声, 滤波器设计中通常用插入损耗 (IL) 来描述在连接无源滤波器前后从噪声源头传出的功率与负载功率的比值, 插损的数值取决于滤波器选用器件的参数, 插损数值越大, EMI 降低的效果越好。无源电磁干扰滤波器的参数设计可以由图 12 的噪声频谱图定位需要削弱的谐波频率、衰减需求得到的截止频率、选定的滤波器电容参数三者结合求出, 具体的参数关系式如式 (9)~(10) 所示。

$$f_{cm} = \min(f_s \times 10^{-V/40}) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{2L_{CM}C_y}} \quad (9)$$

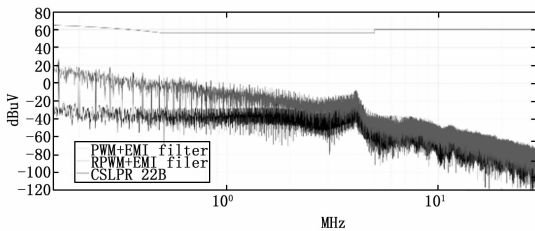
$$f_{\text{cdm}} = \min(f_s \times 10^{-V_s/60}) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{2L_{DM}C_x^2R_{\text{dml,LSN}}}} \quad (10)$$

式中, f_{cm} 与 f_{cdm} 分别为共模差模截止频率, f_s 是需要削弱的谐波频率, V_s 是衰减需求, L_{CM} 、 C_y 与 L_{DM} 、 C_x 分别是共模与差模电感、电容, $R_{\text{dml,LSN}}$ 是差模电阻, 一般为 100 欧姆。

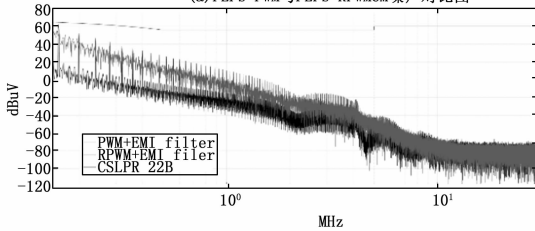
在联合仿真平台设置了 RPWM 结合无源电磁干扰滤波器与 PWM 结合无源电磁干扰滤波器的对比试验, EMI 滤波器参数如表 2, 频谱噪声对比图如图 (14) 所示。

表 2 PEFs 参数

参数	PWM+PEFs	RPWM+PEFs
C_y/pF	2 200	2 200
L_m/mH	1.25	0.6
$C_x/\mu\text{F}$	0.1	0.1
$L_m/\mu\text{H}$	22	7



(a) PEFs+PWM与PEFs+RPWMCM噪声对比图



(b) PEFs+PWM与PEFs+RPWM差模噪声对比图

图 14 EMI 噪声对比图

由图 11 可知, RPWM 加 EMI 滤波器方案相较于 PWM 加 EMI 滤波器方案有着更低噪声峰值, 相差数值分别为 3.56 dBuV 和 6.76 dBuV, 并且在相同甚至更优秀的 EMI 抑制效果下 RPWM 加 EMI 滤波器的方案拥有更小的共模与差模电感, 尤其能够显著减小共模 EMI 滤波器体积 (RPWM+EMI 比 PWM+EMI 共模电感数值减小 52%)。

3 结束语

本文以抑制机载静止变流机辅助电源电磁干扰为研究背景, 针对无法同时对传统滤波器结合控制策略仿真的问题, 提出了一种用于研究电磁噪声 Pspice-Simulink 联合仿真电磁兼容模型, 该模型考虑了器件的寄生参数以及干扰的耦合路径。在此基础上, 利用该模型将随机脉宽调制方案结合无源电磁干扰滤波器与传统固定脉宽调制结合无源电磁干扰滤波器进行对比。得到结论如下:

1) 对于机载静止变流机辅助电源, RPWM 加 EMI 滤波器的方案比 PWM 加 EMI 滤波器方案拥有更好的 EMI 抑制效果以及更小的 EMI 滤波器体积。

2) 试验采用了 Pspice-Simulink 联合仿真, 能够在利用 Pspice 建立精准电路模型基础上使用 Simulink 实现各种控制策略, 为电磁兼容设计提供一种自由度较高的方法。除此之外, 该方法还可以运用到其他领域的电磁兼容设计, 具有广阔的工程应用前景。

参考文献:

- [1] 何 杰, 刘钰山, 毕大强, 等. 开关变换器传导干扰抑制策略综述 [J]. 电工技术学报, 2022, 37 (6): 1455-1472.
- [2] 成 林, 欧 宏, 毕 闯, 等. 基于 SiC MOSFET 的同步 Buck 变换器电磁干扰噪声分析及预测 [J]. 电工技术学报, 2021, 36 (S2): 627-634, 643.
- [3] 江师齐, 王 卫, 王盼宝, 等. 一种结构对称型电磁集成电磁干扰滤波器分析与设计 [J]. 电工技术学报, 2022, 37 (22): 5826-5835.
- [4] 张 博, 徐 跃, 马英杰. 基于时域测试的传导骚扰分析系统 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (7): 91-96, 109.
- [5] 阎 成, 邓晓曼, 贾 霜, 等. 提升风洞测力数据采集系统电磁兼容能力初步研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (9): 28-31, 36.
- [6] 李 虹, 张冲默, 王作兴, 等. 高速列车供电系统电磁干扰形成机理与抑制方法综述 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (8): 3137-3154.
- [7] 李佳原, 文海兵, 张克涵, 等. 磁耦合无线电能传输系统电磁干扰抑制研究进展 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (20): 7387-7403.
- [8] HAN Y, LU H, LI Y, et al. Open-loop gate control for optimizing the turn-on transition of SiC MOSFETs [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 7 (2): 1126-1136.
- [9] HUANG J, LI K. Suppressing the Maximum EMI Spectral Peak Through Asynchronous Carriers in the Three-Phase Inverter With the Periodic CFM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 37 (4): 3702-3707.
- [10] HUANG Y, XU Y, ZHANG W, et al. Hybrid RPWM technique based on modified SVPWM to reduce the PWM acoustic noise [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34 (6): 5667-5674.
- [11] 叶 鑫, 陆子健, 刘艺涛. 基于交错多层结构的平面磁集成 LCL-EMI 滤波器设计与实现 [J/OL]. 电源学报: 1-10 [2022-12-03]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhTDCdPD66_gXaZhj2c8VPImyRlzdSGvxZCH2ySkyLRSm1e4nGxvR-Vq18ENIR&uniplatform=NZKPT
- [12] ZHANG Y, SHEN Z, JIANG D. An integrated EMI filter scheme for paralleled inverter with zero-CM PWM algorithm [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 9 (1): 716-726.
- [13] 陆子健, 叶 鑫, 刘艺涛. 基于交错多层结构平面磁集成 EMI 滤波器设计 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (13):

4706 - 4718.

[14] 江师齐, 王盼宝, 魏伟, 等. 基于柔性多层金属箔的单项全集成 EMI 滤波器建模、分析与设计 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (7): 2692 - 2706.

[15] 江师齐, 刘艺涛, 银杉, 等. 基于噪声源阻抗提取的单相逆变器电磁干扰滤波器的设计 [J]. 电工技术学报, 2019, 34 (17): 3552 - 3562.

[16] HUBERT F, DORSCH P, KUEBRICH D, et al. Piezoelectric EMI filter for switched-mode power supplies [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 36 (6): 6624 - 6643.

[17] ZHANG H, WANG S, LI Y, et al. Two-capacitor transform-

(上接第 212 页)

6 结束语

本文针对作战任务分析中的高度耦合任务分解及任务序列重新组合问题, 提出了基于聚类分析的自适应粒度解耦的任务分解算法。基于聚类分析的自适应粒度解耦算法初始进行初始粒度设置, 之后通过初始粒度对初始任务进行聚类分析。通过聚类分析算法分析之后得到初始耦合任务集, 之后对耦合任务集进行基于改进时间-耦合执行序列解耦算法解耦操作得到最终解耦任务集。对解耦任务集进行 jaccard 系数的计算并判定, 若 jaccard 系数小于设定阈值, 则粒度增加与重新解耦。

改进时间-耦合执行序列解耦算法是通过传入耦合任务集序列, 基于耦合任务集分割连通效应矩阵以及唯任务分割时间序列矩阵。然后通过对耦合任务集进行计算基于时间序列的优先级, 并将高优先级任务进行存储。从而达到解耦的效果, 最终, 得到解耦任务集的层次结构图。

最后进行仿真实验, 实验结果表明, 该解耦算法可以得到一个更加可行和更加优化的一个解耦耦合任务集。该算法针对任务集高度耦合的问题, 达到了基于粒度的任务集解耦并进行任务序列重构的效果。最终, 指挥员可以通过实际操作情况得到一个执行力度较好的任务链。

但是本文对实际情况的不确定性, 任务进度的不确定性, 任务影响因素的不确定性和任务的突发性等研究多有不足, 有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 赵晓晓, 肖玉杰, 马吟龙, 等. 基于深度学习的作战任务规划合理性分析 [J]. 指挥与控制学报, 2019, 5 (2): 153 - 8.
- [2] 刘光耀, 杨慧, 董文莉, 等. 面向任务规划的协同服务框架的研究与设计 [J]. 指挥与控制学报, 2019, 5 (3): 243 - 8.
- [3] 王雨琦, 王海强, 刘丹, 等. 基于并查集搜索的卫星任务规划方法 [J]. 指挥与控制学报, 2021, 7 (3): 269 - 74.
- [4] 周凌超. 基于改进模拟退火算法的导弹目标分配方法 [J]. 工业控制计算机, 2018, 31 (1): 95 - 7.
- [5] 闫玉铎. 应用改进遗传算法解决武器目标分配问题 [J]. 数字技术与应用, 2018, 36 (10): 128 - 31.

er winding capacitance models for common-mode EMI noise analysis in isolated DC - DC converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32 (11): 8458 - 8469.

[18] XIE L, RUAN X, YE Z. Equivalent noise source: An effective method for analyzing common-mode noise in isolated power converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63 (5): 2913 - 2924.

[19] 李辉, 吴正国. 采用随机脉宽调制技术降低电力有源滤波器开关谐波 [J]. 电工技术学报, 2010, 25 (8): 1 - 6.

[20] 王亭岭, 熊军华, 张瑾. 基于预设载波的随机开关频率调制方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39 (3): 355 - 360.

[6] 胡晓峰, 齐大伟. 智能决策问题探讨——从游戏博弈到作战指挥, 距离还有多远 [J]. 指挥与控制学报, 2020, 6 (4): 356 - 63.

[7] 杨世幸, 阳东升, 张维明, 等. 作战使命分解与任务建模方法 [J]. 火力与指挥控制, 2009, 34 (8): 24 - 9.

[8] 梁月乾, 张潇, 杨毅. 一种面向立体跨越耦合任务的无人集群协同任务规划技术 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17 (8): 773 - 778.

[9] 王梦娜, 王小明, 陈庆新, 等. 具有一般工期与返工的耦合设计任务评审策略分析 [J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26 (5): 1336 - 1344.

[10] 王志亮, 王云霞, 陆云. 耦合任务集执行序列优选理论与方法初探 [J]. 中国机械工程, 2011, 22 (12): 1444 - 9.

[11] 熊焕亮, 曾国荪. 可变结构的并行计算中任务粒度细化可扩展方法 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2016, 44 (10): 1636 - 44.

[12] 文永明, 石晓荣, 黄雪梅, 等. 一种无人机集群对抗多耦合任务智能决策方法 [J]. 宇航学报, 2021, 42 (4): 504 - 512.

[13] 包北方, 杨育, 李斐, 等. 产品定制协同开发任务分解模型 [J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20 (7): 1537 - 45.

[14] 刘春林. 耦合度计算的常见错误分析 [J]. 淮阴师范学院学报 (自然科学版), 2017, 16 (1): 18 - 22.

[15] 陈冬宇, 张汉鹏, 李伟军. 基于参数影响度的任务耦合度测量模型研究 [J]. 中国管理科学, 2012, 20 (S1): 184 - 90.

[16] 陈大川. 协同设计中任务分解与任务调度方法的研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2011.

[17] 王梦娜, 王小明, 陈庆新, 等. 具有一般工期与返工的耦合设计任务评审策略分析 [J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26 (5): 1336 - 44.

[18] 董涛, 刘付显, 杜菲菲, 等. 基于矩阵的作战任务建模及重组 [J]. 工程数学学报, 2013, 30 (5): 633 - 41.

[19] 朱燕, 王雅文, 朱家明, 等. 基于 K-均值聚类对任务定价的计量分析 [J]. 哈尔滨商业大学学报 (自然科学版), 2018, 34 (4): 483 - 6, 94.

[20] 田真真, 赵书良, 李文斌, 等. 基于耦合度量的多尺度聚类挖掘方法 [J]. 数据采集与处理, 2020, 35 (3): 549 - 62.

[21] 田启华, 黄超, 于海东, 等. 基于 AHP 的耦合任务集资源分配权重确定方法 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54 (21): 25 - 30, 94.