

微特电机控制器的电磁兼容改善设计^{*}

黄 其¹, 郭航城², 罗 玲¹, 李凡考²

(1. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072;

2. 贵州航天林泉电机有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘 要: 微特电机广泛应用在日常生活设备和工业驱动系统中, 各国对电子设备提出了相应的电磁兼容标准。针对一款出口欧洲的微特电机系统, 其传导干扰、辐射干扰均超过欧洲 EN55032 标准, 在安装尺寸固定条件下, 根据电机的控制原理和结构, 对其进行传导干扰、辐射干扰改善设计。从理论上分析控制器的电磁干扰和耦合途径, 通过傅里叶变换分类出共模电流和差模电流的成分, 采用调整驱动电阻和开关频率、增加 RC 吸收电路来削弱干扰源, 通过接地滤波来抑制传播途径 2 种方法来降低电磁干扰。试验结果显示, 加滤波电路可以降低传导干扰, 加 RC 吸收电路可以降低辐射干扰。

关键词: 微电机; 电磁兼容; EN55032; 共模电流; 滤波电路; RC 吸收电路

中图分类号: TM 384 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)06-0038-08

doi: 10.12177/emca.2020.037

Electromagnetic Compatibility Improvement Design of Micro Motor Controller^{*}

HUANG Qi¹, GUO Hangcheng², LUO Ling¹, LI Fankao²

(1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Guizhou Linquan Motor Co., Ltd. of CASIC, Guiyang 550081, China)

Abstract: Micro motors are widely used in daily life equipment and industrial drive systems. Various countries have proposed corresponding electromagnetic compatibility standards for electronic equipment. The conducted interference and radiated interference of a micro motor system exported to Europe exceed the EN55032 standard. According to the control principle and structure of the motor, it is re-designed to improve the conducted interference and radiated interference under the condition of fixed installation size. The electromagnetic interference source and propagation path of the controller are theoretically analyzed. The components of common mode current and differential mode current are classified by Fourier transform. The interference source is weakened by adjusting the driving resistance and switching frequency and adding the RC absorption circuit, and the propagation of electromagnetic interference is suppressed through ground filtering, so that the electromagnetic interference is reduced. Experimental results show that adding filter circuit can reduce conducted interference, and adding RC absorption circuit can reduce radiated interference.

Key words: micro motor; electromagnetic compatibility; EN55032; common mode current; filter circuit; RC absorption circuit

0 引 言

微特电机具有结构紧凑、体积小、控制方便等

特点, 广泛应用在日常生活设备和工业驱动系统中。例如, 一辆汽车安装的各类微特电机多达 30 台, 应用于雨刷机构、车窗升降机构、座位调整

收稿日期: 2020-02-13; 收到修改稿日期: 2020-04-16

^{*} 基金项目: 贵阳市高新技术产业支持项目(GXCX-2017-012)

作者简介: 黄 其(1986—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为新能源汽车电机设计、驱动控制和测试。

机构、反光镜调整机构、空调风量控制、自动车门等^[1]。随着应用环境对微特电机的技术要求不断提高(效率、速度精度、响应时间等方面),越来越多微特电机采用永磁体励磁,由专用控制器驱动电机按照预定指令运转,并实现电流、转速双闭环控制。但是,设备内部的电子控制模块数量增多,控制模块之间相互干扰的机会增大,严重时会导致某些控制器无法正常工作,因此要求各电子控制模块达到行业相关的电磁兼容(EMC)标准。

EMC 是指电子、电气设备或系统在预期的电磁环境中,按设计要求正常工作的能力,主要包括电磁干扰(EMI)和电磁抗扰度(EMS)^[2]。国际上多个组织开展了 EMC 技术研究,相继发布了一些标准或规范性文件。中国 EMC 标准一般引自国际标准,包括国际无线电干扰特别委员会(CISPR)出版物、国际电工委员会(IEC)标准、国际电信联盟(ITU)有关建议等^[3]。EMC 标准规定了测试内容和方法,并给出相关参考指标。为了使电子产品满足 EMC 标准,国内外学者展开了许多研究,主要分为 3 类:电子产品的电磁干扰模型、降低电磁干扰源的能量、减少干扰信号的传播途径。其中,建模方法主要有扩散方程近似解析解、扩散方程拉普拉斯解、集总电荷模型法、数值解等^[4]。

电子产品除了要满足 EMC 标准要求之外,还需要考虑产品的效率、成本和安装体积,在设计时要综合考虑各种因素。例如,要提高永磁电机的效率,可以提高功率因数、减少谐波电流,实际中常采用有源滤波装置或者功率因数校正技术,虽然消除了谐波和谐波引发的 EMC 问题,但可能会带来新的 EMC 问题^[5]。因为有源滤波装置和功率因数校正技术采用了高开关频率的功率半导体器件,所以增加了高频 EMI 发射。

本文针对一款出口欧洲的散热风机作 EMC 改善设计,其控制器安装空间已经限定,且无接地线和金属屏蔽壳。首先介绍风机控制器的原理结构,然后分析控制器的电磁干扰源头和抑制方法,最后通过样机试验检验 EMC 的改善方法。

1 微特电机控制器控制原理

散热风机采用外转子永磁电机,扇叶固定在电机的外转子上,控制器与电机的定子铁心采用

一体化设计,如图 1 所示。外框支架采用金属材料(外表涂有绝缘漆、没有接地),定子铁心采用硅钢片材料,转子采用铁氧体永磁材料,扇叶采用高强度塑料。永磁电机控制器的安装面积和高度均受限定,电机额定参数:电压 48 V、功率 200 W、4 对磁极、转速 10 500 r/min。散热风机引出 4 根接线:电源正极、负极、调速信号线、速度反馈线。

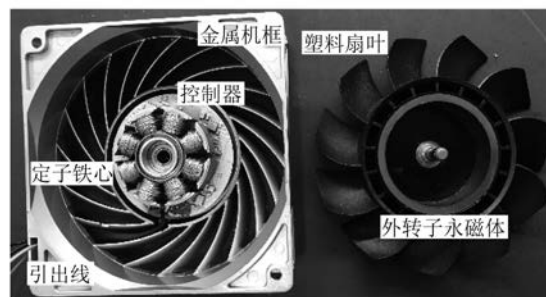


图 1 散热风机结构

1.1 硬件结构

永磁电机可以采用方波控制和正弦波控制 2 种控制方式。采用方波控制算法实现简单,但存在换相转矩脉动,电机噪声较大。采用正弦波控制,运行平稳、噪声低,但控制算法较复杂。因为散热风机对噪声指标要求较高,所以采用正弦波控制方式,其控制器主要由单片机、驱动电路、三相逆变器、电源变换电路、防反接电路、控制器母线电压/电流检测电路等模块组成,如图 2 所示。三相逆变器由 6 个 MOSFET 开关管(内含反并联二极管)和驱动电路组成,在母线负极串联 1 个 MOSFET 管构成防反接电路;三相逆变器输出连接永磁电机的三相绕组,采用电阻分压法检测母线电压,通过检测精密电阻上的压降来测量母线电流,以实现电流闭环和保护功能^[6]。

电机控制器采用专用电机控制芯片 FU6861,该芯片是一款双核处理器,集成高速 8051 内核和电机控制处理内核,主频 24 MHz,芯片内部集成电源变换 LDO、功率器件驱动器 predriver、内置 VREF 参考和 4 路模拟比较器、8 通道 12 bit 高速 ADC,芯片还具有单周期 16×16 位乘法器、32/32 位除法器(16 个时钟周期),及永磁同步电机(PMSM)磁场定向控制(FOC)硬件运算器,具备 SPI、I²C、UART 等多种通信功能,适用于永磁电机空间矢量脉宽调制(SVPWM)控制。

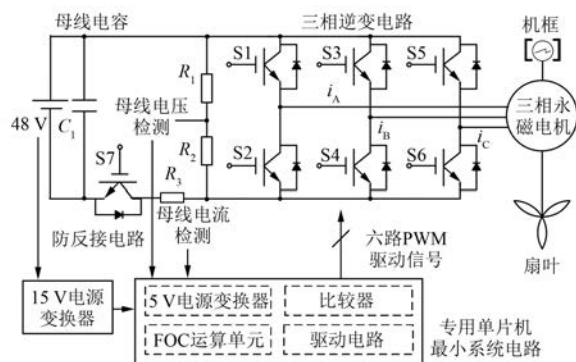


图2 正弦波风机控制器原理图

1.2 软件结构

为了降低电机控制器的材料成本, PMSM采

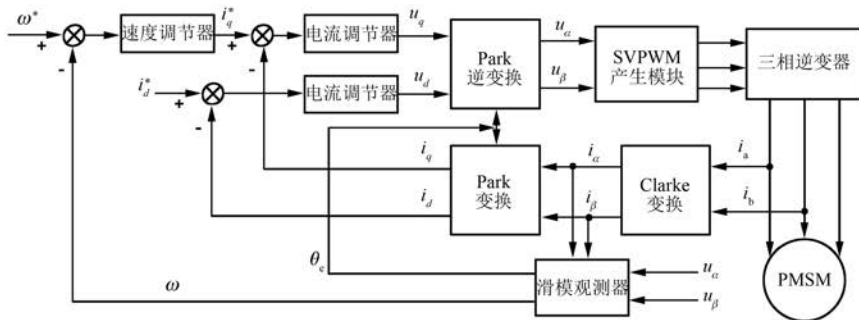


图3 无位置传感器正弦波控制原理图

2 微特电机控制器电磁干扰分析

电磁干扰模型由3部分组成:干扰源、传播途径、敏感设备^[7]。现实中所有的电子设备均会接收到外部电磁干扰,大部分电磁干扰是通过瞬态传导被接收,其他则是通过射频辐射被接收。

2.1 干扰源

微特电机控制器中既有来自元器件本身的固有噪声(热噪、散粒噪声、接触噪声和爆米花噪声)、放电噪声、电磁感应噪声,还有半导体器件在开关过程中电压或电流变化引起的噪声^[8]。引起电磁干扰主要是半导体器件在开关过程中产生的噪声。微特电机控制器中半导体器件主要有二极管、三极管、MOSFET或IGBT,大部分半导体器件应用在逆变电路中。逆变器结构如图4所示。图4中, $R_1 \sim R_6$ 为驱动电阻,旁边反向并联二极管是为了提高开关管的关断速度; $S1 \sim S6$ 为6个MOSFET开关管,其内部均有1个反并联的二极

用无位置传感器正弦波控制方式,其控制原理如图3所示。通过电阻检测到的母线电压和母线电流,根据电流时序推算出电机的相电流 i_a 和 i_b ,通过滑模观测器估算转子位置角度 θ_e 和实时转速 ω 。实时转速和参考转速 ω^* 经过速度调节器得到 i_q^* ;基速以下 $i_d^* = 0$,基速以上增加 i_d^* 进行弱磁调速。再由2个相电流经过Clarke变换和Park变换得到实时 d 轴电流 i_d 和 q 轴电流 i_q ,分别对 i_d 和 i_q 电流进行闭环控制,得到 d 轴电压 u_d 和 q 轴电压 u_q ,再经过Park逆变换得到 u_α 和 u_β ,最后由控制芯片的SVPWM算法得到三相逆变器驱动信号,控制永磁电机运转^[7],逆变器的开关频率为20 kHz。

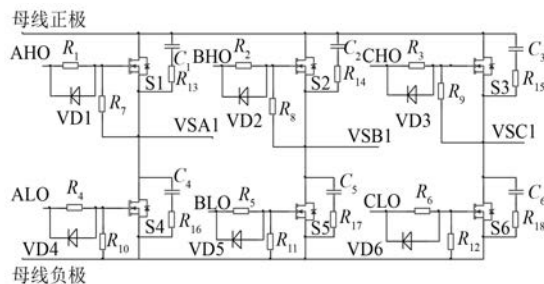


图4 逆变器结构

管,同时开关管两端并联1个电阻电容、吸收电路;AHO、ALO分别表示逆变器A相的上桥臂 $S1$ 、下桥臂 $S4$ 的驱动信号,VSA1为A相桥臂的输出端,连接电机的A相绕组,B、C相的符号定义类似。这些半导体器件在开关过程中电流、电压的变化率很大(du/dt 或 di/dt 高达10 kV/ μ s、10 kA/ μ s的速度进行切换,频率最高可达几百kHz),通过线路或元器件的寄生电感或寄生电容,引起传导和辐射(主要是近场)电磁干扰。

PMSM 闭环控制主要采用脉冲宽度调制 (PWM) 技术,通过控制占空比或调制比来调节电压、电流,然而 PWM 脉冲波形含有丰富的高频成分,会产生较强的电磁干扰。同时,随着逆变器的关频率提高,半导体器件的开关噪声增大。

2.2 传播途径分析

电磁干扰耦合途径是指把电磁能量从干扰源耦合到敏感设备,并使其产生响应的通路或媒介。耦合途径分为传导耦合与辐射耦合。

传导耦合在干扰源与敏感设备之间存在完整的电路连接,电磁干扰通过连接电路从干扰源传输至敏感设备。根据电磁噪声耦合的特点,传导耦合可分为直接传导耦合、公共阻抗耦合和转移阻抗耦合 3 种^[9]。直接传导耦合是指电磁噪声直接通过导线、电阻、电容、电感或变压器等实际或寄生元件耦合到敏感设备。公共阻抗传导耦合是指电磁噪声通过印刷板电路中的 PCB 导线或机壳接地线、设备的公共安全接地线以及接地网络中的公共地阻抗产生干扰耦合到敏感设备。转移阻抗耦合是指电磁噪声不是直接传送至被干扰对象,而是通过转移阻抗,将噪声电流(或电压)转变为敏感设备的干扰电压(或电流)。

辐射耦合是指电磁噪声的能量以电磁场能量的形式向空间辐射传播,耦合到被敏感设备。辐射耦合基于天线原理,当导线的长度与波长相等时,会产生电磁波。微特电机的绕组与机壳、绕组与控制回路、散热器对控制回路之间等均构成天线。根据电磁噪声的频率、电磁干扰源与被干扰设备(电路)的距离,辐射耦合可分为远场耦合和近场耦合。微特电机控制器系统的辐射耦合主要是近场耦合。

2.3 电磁干扰的耦合模式

电磁干扰根据电流的流动路径不同分为差模干扰电流和共模干扰电流,如图 5 所示。电磁干扰耦合模式可分为传导差模耦合、传导共模耦合、辐射差模耦合和辐射共模耦合。在同一导体中可能同时存在着共模耦合和差模耦合。

微特电机控制器中的电流从电源正极出发,流经控制回路后到达负极。在电源线或者信号线中流过的电流与其回流线中流过大小相等、方向相反的电流被称之为差模电流^[10]。对于交流电源而言,在相线与中线之间流通的电流为差模电

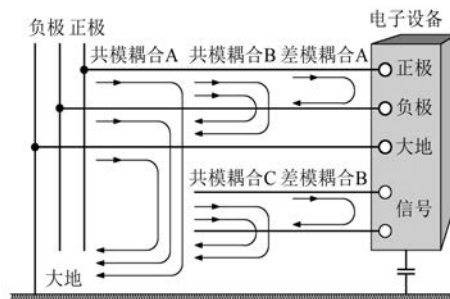


图5 共模耦合与差模耦合

流,电流从相线出发经过中线返回源端。对于直流电源,在电路的电源正极与电源负极之间流通的电流是差模电流。对于信号电路,在信号线与信号地线之间的流通的电流是差模电流。

共模电流主要是由电路中各点对地电位变化产生的位移电流形成的。永磁电机的同一绕组匝与匝之间、层与层之间、各相绕组之间以及定子铁心与各绕组之间均存在寄生电容,逆变器的功率半导体器件工作时的电压变化率很高,与寄生电容相互作用形成位移电流并流入地线中,形成共模电流。共模电流会引起电动机绕组电压畸变,产生电压过冲,严重时将导致电动机绕组的绝缘破坏。

2.4 测试方法

EMC 的传导、辐射发射测量用于验证产品在指定的频率范围内是否符合传导、辐射发射规定的限定值。

2.4.1 传导发射测量

CISPR 标准和国标要求传导发射的测试频率范围为 150 kHz ~ 30 MHz,外部电源与被测设备(EUT)的电源引线之间要串联线性阻抗稳定网络(LISN),频谱分析仪接收机与 LISN 相连,产品通电工作在额定工况下,在屏蔽室内完成产品的传导发射测量。传导测试接线图如图 6 所示。LISN 主要作用是提供干净的直流或交流电源,阻拦被测设备的干扰传递到电源,并保持特定的阻抗特性^[11]。

2.4.2 辐射发射测量

图 7 所示为根据 CISPR16 及 EN55032 标准要求的辐射发射测试布置图。被测产品和天线均置于半电波暗室内部,辐射发射测试时,被测产品固定在桌子上并在转台上旋转,以便天线找到最

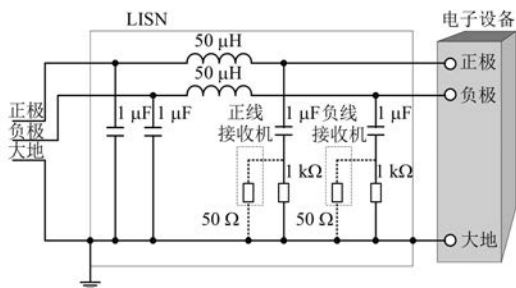


图6 传导测试接线图

大的辐射点。天线是辐射发射测试的传感器,辐射发射测试频率范围从几十 kHz 到几十 GHz。在 30~300 MHz 频率范围内,通常采用偶极与双锥天线;300 MHz~1 GHz 采用偶极、对数周期及对数螺旋天线;1~40 GHz 采用喇叭口天线^[12]。辐射信号由接收天线接收后,通过电缆传到电波暗室外的接收机。

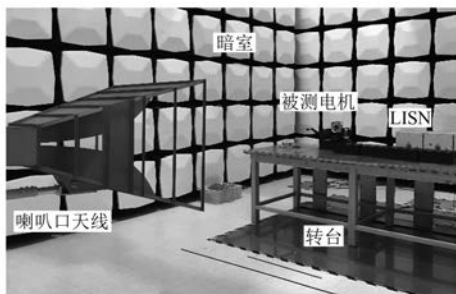


图7 辐射测试平台

3 EMC 改善方法

微特电机控制器的 EMC 改善方法主要分为:抑制干扰源的发射;切断传播途径或减弱传播能量,同时提高抗干扰能力。

3.1 抑制干扰源发射

3.1.1 调节驱动电阻

微特电机控制器的电磁干扰主要是由逆变器的开关管(如 IGBT 或 MOSFET)在开关过程中电流、电压的突然变化产生的,因此可以采用减缓开关管在开关过程中电流、电压的变化速率来减少干扰信号的能量。增大控制芯片和开关管门级之间的驱动电阻,减缓驱动电流的变化速率,从而减慢开关管的开关速度,即减缓开通相绕组电流的上升速度。但是,降低开关管的开通速度会增加开关损耗,在上、下桥臂开关管之间死区时间固定

的情况下,继续减小开关速度会导致开关管的关断电流与开通电流出现重合,逆变器的上、下桥臂开关管直通,电源短路出现大电流而烧毁开关管,如图 8 所示。为了防止上、下桥臂开关管直通,可以采用增大上、下桥臂开关管之间的死区时间^[13],让关断相绕组的电流降到零后再让开通相绕组通电,但这种方法会降低电源的使用效率。另一种方法是在驱动电阻旁边反向并联二极管,如图 5 所示。这样可以保证半导体器件开通时较慢,而关断时较快。

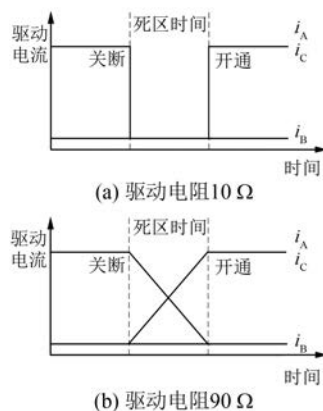


图8 不同驱动电阻的驱动电流波形

3.1.2 加 RC 吸收电路

在开关管两端并联 RC 吸收电路,也可以减缓开关管在开关期间的电压变化速度。该方法可以有效降低开关管在开关期间造成的电压尖峰,以降低高频噪声发射。此时驱动电阻选择较小阻值,开关管的损耗可以降低,但是需要多增加 6 个电阻和 6 个电容,导致成本上升。

3.1.3 调节开关频率

电磁干扰是由逆变器的开关管在开关过程中产生的,因此可以通过减少开关管的开关频率来减少逆变器的在单位时间的电磁干扰发射能量。但是,为了保证 PMSM 电流波形的正弦度,通常要求开关频率(载波频率)是电流频率的 20 倍以上。

电机转速与频率关系为:

$$n = 60f/p \quad (1)$$

式中: n 为电机转速; f 为电流频率; p 为极对数。

根据式(1)可知电流频率为 700 Hz,因此开关频率需超过 14 kHz。该频率属于人耳所能识别的声音频率,为了避免对人们生活带来噪声,需要

开关频率都在超声波频率以上,但开关频率提高会增大开关损耗,因此开关频率设定需要综合考虑,通常微特电机逆变器的开关频率设为 20 kHz。

为了减少逆变器固定开关频率信号产生电磁干扰,可以采用频率抖动技术,让逆变器的开关频率随着转速不断变化^[14-15],如图 9 所示。高频开关信号的谐波成分不会叠加在固定开关频率的整数倍上,从而减少了传导和辐射干扰。该方法是通过分散干扰能量来减少干扰,实施过程中需要修改每个 PWM 控制寄存器的参数,对处理芯片的性能要求较高,一般应用在无刷直流电机控制中。

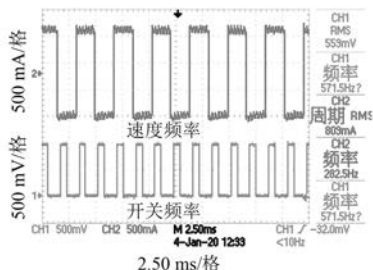


图 9 频率抖动技术

3.1.4 减少 PCB 上的环路

控制器 PCB 上相邻的印制线之间存在互感和耦合电容,当信号电压或电流随时间快速变化时,PCB 上的快速变化的电流回路,其作用相当于小回路天线,会向外进行电磁场辐射。辐射的电场强度与回路中电流的大小、回路的面积、电流的频率的二次方成正比。因此,在对控制器 PCB 布板时应尽可能的减小各环路电流的面积。

3.2 切断耦合途径

通过切断耦合途径来减小电磁干扰的方法主要包括接地、屏蔽和滤波技术。其中,接地、屏蔽与控制器 PCB 布局紧密相连,不合理的布局布线和接地系统将为产生发射和接收外部干扰提供通道。

3.2.1 接地

微特电机控制器的电路分为控制电路(弱电)和功率电路(强电)。控制电路需要采集功率电路的电压、电流、频率等信号,经过主控芯片的算法处理后,发出控制信号到功率电路。控制电路的参考地称为信号地;功率电路的参考地称为功率地。当功率电路的电压远大于控

制电路时,为了防止功率电路对控制电路的冲击影响,信号地与功率地通过变压器或光耦实现电隔离,此时电机控制器有多个参考地;当功率电路的电压与控制电路的电压相差不大时,信号地与功率地可以通过 0 Ω 电阻或磁珠连在一起(该风机控制器采用 0 Ω 电阻连接),此时电机控制器只有一个参考地。根据参考地的个数不同,接地可分为单点接地、多点接地、混合接地和浮空接地^[16]。

EMC 设计中接地不是单指大地(大地的电动势为零,具有零电阻和零电抗的特点),此时的参考地是指给电流提供一个低阻抗路径的返回路径,使干扰电压足够低,从而降低发射噪声;同时降低拾取噪声,不影响该电路工作。在 PCB 设计时应保证参考地与大地之间的共模电压尽可能低,同时避免地线构成的大面积回路。

3.2.2 屏蔽

屏蔽是在良好的接地条件下,将电子设备产生的干扰终止于由良导体制成的屏蔽体内,同时阻拦外界电磁场对屏蔽体内电路的影响^[17]。屏蔽体通过涡流损耗吸收能量、表面反射能量、感应产生反向磁场抵消能量等 3 种方式来削弱干扰。屏蔽作用主要分为电场屏蔽、磁场屏蔽、电磁场屏蔽。采用封闭或半封闭金属体屏蔽电场,通常采用封闭或半封闭高导磁材料屏蔽磁场。屏蔽体根据结构不同可以分为完整屏蔽体屏蔽(屏蔽室或屏蔽盒等)、非完整屏蔽体屏蔽(带有孔洞、金属网、波导管、蜂窝结构等)、编织带屏蔽(屏蔽线和电缆等)。

3.2.3 滤波

电磁干扰滤波器是抑制传导干扰最有效的手段。滤波器是一个选频电路,允许某一特定频率的信号顺利通过,同时抑制其他频率的信号。根据选择通过信号的频率不同,滤波器可分为低通、高通、带通、带阻 4 种。电磁干扰滤波器大多采用低通滤波器,是因为电磁干扰大多是频率较高(大于 150 kHz)的信号。

电磁干扰滤波器与信号处理中的信号滤波器基本原理相同,但是电磁干扰滤波器对 L、C 元器件的性能要求不同。首先,需考虑失效模式,电容在损坏情况只能开路,不能出现短路。其次,要求承载的电压和电流范围大、损耗小。还要考虑元

器件在失配状态时能保证在 0.15 ~ 30 MHz 范围内有正常的滤波性能。最后,要慎重考虑元器件的安装位置以及带来的寄生效应。

4 样机试验

4.1 产品 EMC 指标

该 PMSM 用于通信设备的散热系统,出口欧洲市场,EMC 性能必须满足欧标 EN55032 ClassB 标准,其传导、辐射指标如表 1 所示。

表 1 欧标 EN55032 ClassB 传导、辐射指标		
内容	频率范围/MHz	最大限值/dBμV
传导	0.15~0.50	66
	0.50~5	56
	5~30	60
辐射	20~230	30
	230~1 000	37

4.2 传导干扰电流测量

为了准确地分析电磁干扰噪声的特性,采用高频(300 MHz)示波器和高精度电流探头测试电子设备电源输入端的传导干扰电流,分离出差模电流分量和共模电流分量。共模、差模信号分离试验如图 10 所示。图 10(a)中,电子设备电源的正线和负线同时穿过电流探头 1,此时正、负线内流过的差模电流分量所产生的磁场互相抵消,电流探头测到的磁场是共模电流分量产生的磁场。在电流探头 2 中,电源正线直接穿过,电源负线在探头上绕一圈,此时正、负线内流过的共模电流分量所产生的磁场互相抵消,电流探头测到的磁场是差模电流分量产生的磁场^[18]。

按照上述方法测得 PMSM 控制器输入电流的共模分量和差模分量。利用高频示波器对共模、差模分量进行傅里叶分解,得到 2 种电流分量的噪声频谱,如图 11 所示。由图 11 可知,共模干扰噪声的幅度较大、在 150 ~ 300 kHz 频率段噪声最严重。差模干扰在 150 ~ 300 kHz 频率段幅度较小,没有大幅波动。

4.3 传导改善设计

根据前文对传导干扰电流的分析,电机控制器需要减少共模电流,最常用的方法是在控制器的电源输入端增加共模扼流圈(共模电感)和 Y 电容(共模电容),如图 12 所示。共模扼流圈是在

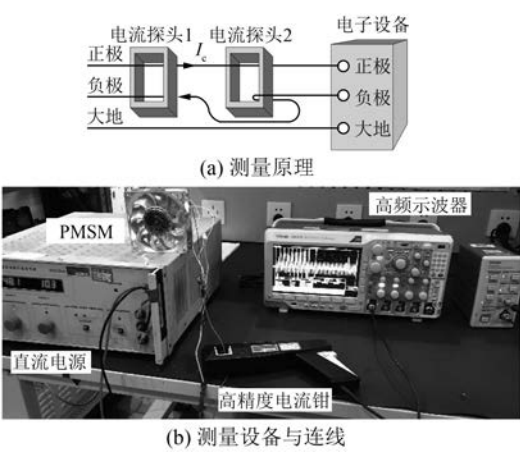


图 10 共模、差模信号分离试验

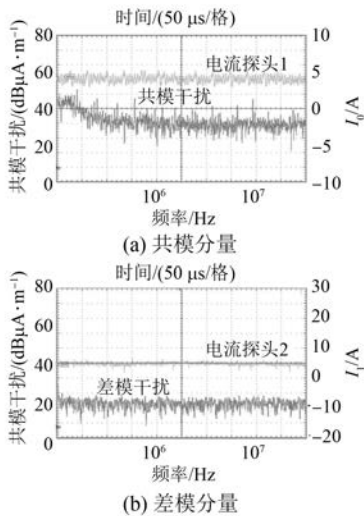


图 11 干扰电流频谱分析

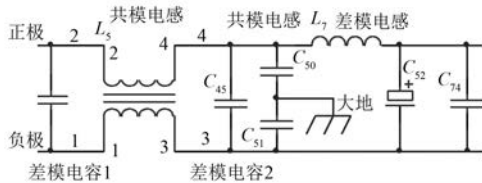


图 12 电源滤波电路

同一个闭合磁路磁心上缠绕 2 个相同的电感线圈,体积和安装面积太大,散热风机控制器的 PCB 上无法安装。因此,采用在电源正极和负极各增加 1 个共模(安规)电容。因为散热风机控制器没有连接大地,所以 2 个共模电感只接到金属机框上,同时在控制器电源输入端加入一个由差模电感 L_7 和差模电容 C_{45} 、 C_{74} 组成的 π 型滤波网络。

图 13 所示为散热风机控制器在加共模电容前后的传导干扰测试结果,在 150 kHz~5 MHz 频率段干扰幅值减少了 20 dB,改善效果明显。

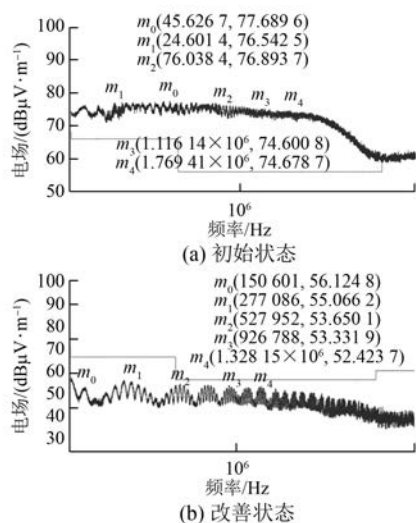


图 13 传导干扰试验波形

4.4 辐射改善设计——加 RC 吸收电路

由于散热风机的机壳没有连接大地,扇叶与 PMSM 转子的一体化设计,导致通过接地与屏蔽来减少辐射干扰的方法无法实现,因此只能采用抑制干扰源发射的方法。通过试验得出,增大开关频率,辐射干扰的波动减缓,幅值还是超标;在驱动电阻旁边反向并联二极管改善效果也不明显,因为开关管开通、关断时间很短(ns 级别),延缓时间最长增加了 50%,所以 du/dt 或 di/dt 难以实现数量级的减少。最有效的方法是开关管旁边

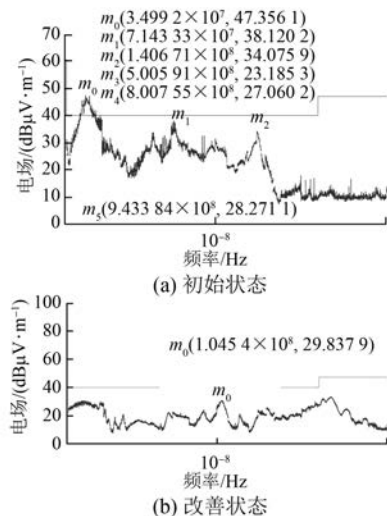


图 14 辐射干扰试验波形

并联 RC 吸收电路,驱动电路不变时,开关管按正常时序开通和关断,而开关管本身的电压和电流变化速度减慢,从而减少对外辐射干扰。图 14 所示为散热风机控制器在加 RC 吸收电路前后的辐射干扰测试结果。在 20~230 MHz 频率段,控制器初始状态有 2 段超标,改善设计后辐射值全部在限定值以下。

5 结 语

电子产品必须满足规定的 EMC 标准才能上市,逆变器是含有微特电机产品的主要干扰源,其开关管在开通和关断过程中产生电磁噪声。分离共模电流和差模电流可以为 EMC 改善设计提供方向,通常情况下接地、滤波、PCB 设计对改善传导干扰有效,接地和屏蔽对改善辐射干扰有效。但在不满足接地和屏蔽的条件下,可以采用抑制干扰源发射的方法。该 PMSM 控制器的 EMC 改善只增加了 2 个共模电容和 6 路 RC 吸收电路,无需增加 PCB 面积和安装高度,改善效果明显。

【参考文献】

- [1] 黄其,曹纪超,薛利昆,等.散热风机无位置传感器控制器设计[J].自动化与仪表,2020,35(2): 61.
- [2] 金亮,冯伟,寇晓斐,等.汽车电子风扇电机控制电路与主电路电磁兼容分析与优化[J].电工技术学报,2018,33(增刊2): 270.
- [3] VIDET A, MESSAOUDI M, IDIR N, et al. PWM strategy for the cancellation of common-mode voltage generated by three-phase back-to-back inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(4): 2675.
- [4] 黄其,陈翔,罗玲,等.电动汽车用永磁同步电机控制器设计[J].电机与控制应用,2019,46(10): 84.
- [5] 何欣宇,鲍鲁杰.基于 Ansoft Maxwell 的牵引电机电磁兼容仿真研究[J].变频器世界,2018(11): 101.
- [6] 黄其,罗玲,金良宽,等.轴向磁通永磁轮边电机设计与研究[J].电气工程学报,2019,14(4): 32.
- [7] PAUL C R.电磁兼容导论[M].闻映红,译.2版.北京:人民邮电出版社,2007.
- [8] NARAYANASAMY B, LUO F. A survey of active EMI filters for conducted EMI noise reduction in power electronic converters[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(6): 2040.

(下转第 87 页)