

磁阻式旋转变压器信号绕组阻抗匹配分析

宋雪雷¹, 王永兴^{1,2}

(1. 中国科学院 电工研究所, 北京 100190 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100190)

摘要: 针对磁阻式旋转变压器的输出信号电压不满足数字式解码芯片所要求的输入电压范围问题, 该文对磁阻式旋转变压器的信号绕组进行了阻抗匹配分析。首先建立了信号绕组的 PSpice 等效电路模型, 然后仔细分析了信号绕组的电感参数、电阻参数及输出信号的滤波电容参数对输出电压幅值的影响, 最后通过对实际应用的磁阻式旋转变压器的测试验证了分析方法与分析结果的正确性和可行性。

关键词: 磁阻式旋转变压器; 阻抗匹配; 数字式旋变解码芯片

中图分类号: TM 383.2 TM 301.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-6848(2011)02-0009-04

Analysis on Impedance Matching of Signal Windings of Variable-reluctance Resolver

SONG Xuelei¹, WANG Yongxing²

(1. Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 China)

Abstract The output signal voltage of the variable-reluctance resolver does not satisfy the input voltage requirements of the resolver-to-digital converter; this paper analyzed the impedance matching of the output signal windings of the variable-reluctance resolver. Firstly built the equivalent PSpice circuit model of the output signal windings was built; then analyzed the influence of inductance parameter, resistor parameter and filter capacitor parameter on the output signal voltage; and finally the correctness and feasibility of the proposed analysis method were verified through the test experiments on the practical resolver.

Key words variable-reluctance resolver; impedance matching; resolver-to-digital converter

0 引言

高性能的电机控制需要精确的转子位置信号检测。在诸多转子位置检测元件种类中, 新型的磁阻式旋转变压器由于具有结构简单、工作可靠、体积小等优点, 在电机控制领域得到了广泛应用^[1-3]。旋转变压器的输出信号是模拟信号, 在数字化电机控制中需要将其转换成数字信号。

专用数字式旋变解码芯片的出现使得旋转变压器的应用更加方便和简单化^[4-5]。然而这些芯片对输入的模拟信号都有电压范围要求, 比如 AD2S1200 要求输入的正弦和余弦信号的峰峰值为 3.24 V ~ 3.96 V, 输入电压过高可能会烧坏芯片, 过低则会影响转换精度和控制性能。如果不经分析计算直接将旋变的输出信号接到解码芯片上, 输出信号很

可能会超出解码芯片建议的工作电压范围, 这主要是因为: 旋转变压器激磁绕组与信号绕组之间的变比是在信号绕组开路的情况下测得的, 实际使用时信号绕组的电感参数、电阻参数以及用于滤除输出信号噪声干扰的滤波电容参数都会对其产生比较大的影响。

因此, 本文针对磁阻式旋转变压信号绕组的阻抗匹配问题进行了深入分析, 旨在为磁阻式旋转变压器的使用及其解码电路的设计提供借鉴依据。

1 信号绕组的 PSpice 模型

与绕线式旋转变压器不同, 磁阻式旋转变压器的激磁绕组和信号绕组均固定在定子上, 仅通过转子凸极效应产生具有正弦轨迹的气隙磁导, 从而在信号绕组上感应出正、余弦信号。图 1 为磁阻式旋

收稿日期: 2010-03-10

作者简介: 宋雪雷 (1979), 男, 博士, 研究方向为电机驱动与控制、电动汽车技术。

转变压器的结构示意图。

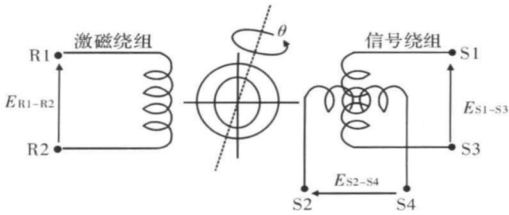


图 1 磁阻式旋转变压器结构示意图

磁阻式旋转变压器的激磁绕组与正、余弦信号绕组的端电压分别为：

$$E_{R1-R2} = E \sin \omega t \quad (1)$$

$$E_{S1-S3} = kE \sin \omega t \quad (2)$$

$$E_{S2-S4} = kE \sin \omega t \sin(p\theta) \quad (3)$$

式中， k 为信号绕组与激磁绕组变比； θ 为轴角； ω 为激磁角频率； p 为极对数； E 为正弦激磁信号幅值； t 为时间。

根据式 (1) ~ (3) 在 PSpice 软件中建立的信号绕组的等效电路仿真模型见图 2 所示。其中， L_s 、 R_s 分别为信号绕组的电感、电阻（可通过阻抗分析仪测得）， C 为滤波电容， R_L 旋变解码芯片输入阻抗； K 为信号绕组与激磁绕组的变比。图 3 为信号绕组仿真输出信号波形。

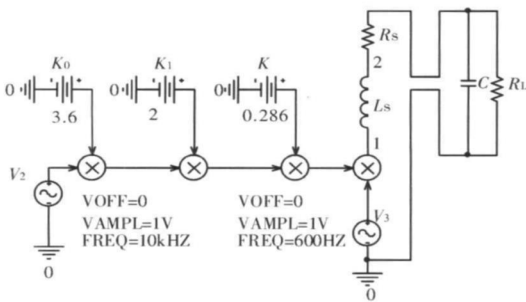


图 2 信号绕组等效电路仿真模型

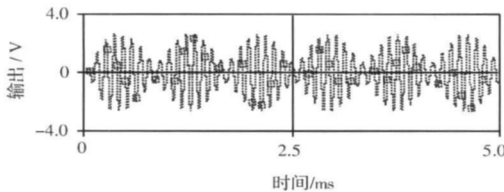


图 3 信号绕组仿真输出信号

2 信号绕组阻抗匹配分析

2.1 理论分析

由图 3 可以看出，信号绕组的端电压是调幅波，其载波频率等于激磁频率，调制频率与转子轴角频

率和极对数有关，最大峰峰值与激磁电压峰峰值、变比以及输出回路阻抗有关。由图 2 可知，信号绕组的电感、电阻参数与滤波电容以及解码芯片的输入阻抗构成了一个谐振回路，其等效阻抗为：

$$Z = R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C} \parallel R_L \quad (4)$$

因此，信号绕组的电流为：

$$i = \frac{u}{Z} = \frac{u}{R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C} \parallel R_L} = \frac{u(1 + j\omega R_L C)}{(1 + j\omega R_L C)(R_s + j\omega L_s) + R_L} \quad (5)$$

式中， u 为信号绕组空载端电压最大峰峰值。则构成回路时端电压最大峰峰值 u_0 为：

$$u_0 = i \left[\frac{1}{j\omega C} \parallel R_L \right] = \frac{u(1 + j\omega R_L C)}{(1 + j\omega R_L C)(R_s + j\omega L_s) + R_L} \cdot \frac{R_L}{1 + j\omega R_L C} = \frac{u}{(1/R_L + j\omega C)(R_s + j\omega L_s) + 1} \quad (6)$$

$$u_0 = i \left[\frac{1}{j\omega C} \parallel R_L \right] = \frac{u(1 + j\omega R_L C)}{(1 + j\omega R_L C)(R_s + j\omega L_s) + R_L} \cdot \frac{R_L}{1 + j\omega R_L C} = \frac{u}{(1/R_L + j\omega C)(R_s + j\omega L_s) + 1} \quad (7)$$

由于 R_L 很大、 $1/R_L$ 很小，可以忽略，因此

$$\frac{u_0}{u} = \frac{1}{(1/R_L + j\omega C)(R_s + j\omega L_s) + 1} \approx \frac{1}{(1 - \omega^2 L_s C) + j\omega R_s C} \quad (8)$$

$$\left| \frac{u_0}{u} \right| = \frac{1}{\sqrt{(R_s R_L + 1 - \omega^2 L_s C)^2 + \omega^2 (L_s R_L + R_s C)^2}} \approx \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 L_s C)^2 + \omega^2 R_s^2 C^2}} \quad (9)$$

式中 $\omega = 2\pi f$ 为激磁频率。由式 (8) 分析可得：

(1) 保持 C 、 R_s 、 R_L 不变，因为 R_L 很大，忽略 R_L 的影响，当 $\frac{1}{\sqrt{L_s C}} \geq 2\pi f$ 时，随着 L_s 的增大，

$\left| \frac{u_0}{u} \right|$ 逐渐增大，即输出信号的最大峰峰值增大；当

$\frac{1}{\sqrt{L_s C}} < 2\pi f$ 时，随着 L_s 的增大， $\left| \frac{u_0}{u} \right|$ 逐渐减小，即输出信号的最大峰峰值减小；

(2) 保持 C 、 L_s 、 R_L 不变，随着 R_s 的增大，

$\left| \frac{u_0}{u} \right|$ 逐渐减小，即输出信号的最大峰峰值减小；

(3) 保持 L_s 、 R_s 、 R_L 不变, 因为 R_L 很大, 忽略 R_L 的影响, 当 $C \leq \frac{L_s}{\omega^2 L_s^2 + R_s^2}$ 时, 随着 C 的增大,

$\left| \frac{u_0}{u} \right|$ 逐渐增大, 即输出信号的最大峰峰值增大; 当

$C > \frac{L_s}{\omega^2 L_s^2 + R_s^2}$ 时, 随着 C 的增大, $\left| \frac{u_0}{u} \right|$ 逐渐减小,

即输出信号的最大峰峰值减小;

(4) 保持 L_s 、 R_s 、 C 不变, 随着 R_L 的增大, $\left| \frac{u_0}{u} \right|$ 逐渐增大, 即输出信号的最大峰峰值增大;

(5) 忽略 R_L 的影响, 当 $\frac{1}{\sqrt{LC}} < 2\pi f$ 时, 要保证

$\left| \frac{u_0}{u} \right|$ 恒定, 随着 L 的增大, C 逐渐减小;

(6) 忽略 R_L 的影响, 当 $\frac{1}{\sqrt{LC}} < 2\pi f$ 时, $\left| \frac{u_0}{u} \right|$ 最大, 即输出信号的峰峰值最大, 此时为谐振频率点。

2.2 仿真分析

由上述分析可知, 磁阻式旋转变压器信号绕组的电感、电阻参数与滤波电容构成了一个谐振电路。对于特定的磁阻式旋转变压器, 其电感、电阻参数是一定的, 为了使得信号绕组的端电压满足数字式解码芯片要求的电压范围, 滤波电容的选择至关重要, 其容值必须与信号绕组的阻抗匹配。若容值选择不合适, 严重情况下可能使谐振频率接近激磁频率, 从而使得信号绕组端电压远远超过解码芯片所要求的输入电压范围, 最终影响位置检测精度甚至烧毁解码芯片。

为此, 需要分析滤波电容与旋转变压器电感、电阻参数之间的关系。以数字式解码芯片 AD2S1200 为例, 其要求的输入电压范围为 3.24 V ~ 3.96 V。这里, 设定信号绕组端电压最大峰峰值为 3.6 V, 在满足这一输出电压要求条件下, 通过图 2 所示仿真模型, 分析信号绕组电感、电阻参数与滤波电容之间关系。图 4 所示为信号绕组的电阻分别为 50 Ω 、80 Ω 、100 Ω 、120 Ω 、150 Ω 和 200 Ω 时滤波电容与电感参数之间的关系; 图 5 所示为滤波电容与信号绕组电感、电阻参数之间的关系 MAP 图。图 4 和图 5 的结果均满足信号绕组端电压最大峰峰值为 3.6 V 的条件。

由图 4 图 5 可以看出, 在保证信号绕组输出电压最大峰峰值恒定不变的条件下, 滤波电容大小受信号绕组的电感参数影响比较大, 而受电阻参数影响不是很大。另外对特定的磁阻式旋转变压器, 可

以先通过阻抗分析仪获得其信号绕组的电感、电阻参数, 然后根据图 5 选择合适的滤波电容参数, 从而使得信号绕组的端电压满足数字式解码芯片的输入电压范围要求。

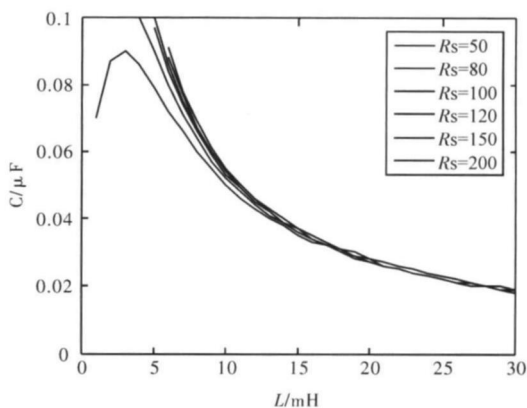


图 4 特定电阻下信号绕组电感与滤波电容关系

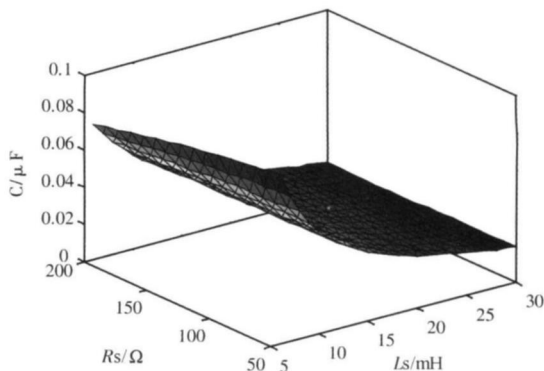


图 5 信号绕组电感、电阻参数与滤波电容关系

3 实验验证

为验证上述分析结果的正确性, 对两个在永磁同步电机控制系统中使用的磁阻式旋转变压器进行了测试实验。通过阻抗分析仪获得的两个旋转变压器的参数为: ①旋转变压器 1: 激磁绕组 $L_s = 0.9254$ mH、 $R_s = 19.98$ Ω , 信号绕组 $L_s = 9.509$ mH、 $R_s = 102.42$ Ω , 变比为 0.286 ②旋转变压器 2: 激磁绕组 $L_s = 9.584$ mH、 $R_s = 103.25$ Ω , 信号绕组 $L_s = 21.528$ mH、 $R_s = 162.57$ Ω , 变比为 0.286

实验中, 激磁信号的频率为 10 kHz, 峰峰值为 14.4 V。图 6 和图 7 分别为两个磁阻式旋转变压器的测试结果: 信号绕组端电压最大峰峰值与滤波电容的关系曲线。

由图 6 和图 7 可以看出, 当信号绕组端电压最大峰峰值在一定电压区域范围 (2.5 V ~ 5 V) 内时, 两个旋转变压器的测试结果与仿真结果基本吻合, 而这个电压区域范围正好涵盖了 AD2S1200 所要求

的输入电压范围。因此，该测试结果可以验证本文分析方法与分析结果的正确性、可行性以及在工程开发中的实用性。

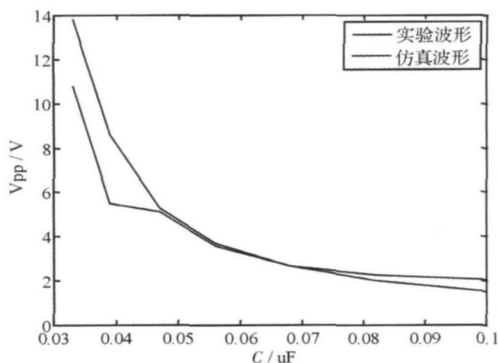


图6 旋转变压器1测试结果

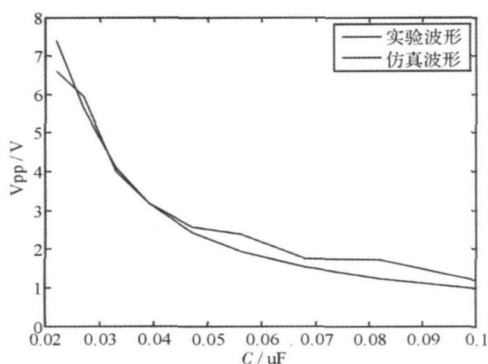


图7 旋转变压器2测试结果

4 结 论

本文通过对磁阻式旋转变压器信号绕组的等效电路建模及阻抗匹配分析，解决了在实际工程应用中信号绕组端电压最大峰峰值不满足数字式解码芯片输入电压范围要求的问题，并给出了一种适应不同磁阻式旋转变压器信号绕组阻抗的滤波电容容值参数的选择方法。最后通过对两个在永磁同步电机控制系统中使用的磁阻式旋转变压器的测试验证了本文分析方法与分析结果的正确性和可行性。本文的研究工作对磁阻式旋转变压器解码电路的工程的设计开发具有一定借鉴和参考意义。

参考文献

- [1] 王文中, 陈阳生. 磁阻式旋转变压器励磁谐波分析 [J]. 微电机, 2009, 42(6): 8-10
- [2] 李文韬, 黄苏融. 车用电机系统磁阻式旋变转子设计与分析 [J]. 电机与控制应用, 2008, 35(5): 6-10
- [3] 强曼君. 磁阻式多极旋转变压器的误差分析 [J]. 微特电机, 2000(1): 9-11.
- [4] 崔军, 温旭辉, 张立伟. 新型永磁同步电机控制用旋转变压器/数字转换器及其应用 [J]. 电气传动, 2005, 35(11): 11-14
- [5] 罗德荣, 周成, 黄科元, 等. 基于 AD2S1200 的旋变接口电路设计及信号处理 [J]. 电力电子技术, 2008, 42(8): 68-70.

(上接第 8 页)

单元的瞬态电磁场计算模型，TR08 磁浮列车直线电机瞬态电磁场的分析结果与相关文献的报道相符，验证了计算模型的正确性。此外，本文的计算结果也可对我国磁悬浮列车的运行和控制提供相应的参数依据。

参考文献

- [1] 王桂荣, 韦巍, 屠旭永. EMS 型磁浮列车驱动力和悬浮力的计算新方法 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(3): 441-444

- [2] 潘孟春, 陈棣湘. 常导高速磁悬浮列车电磁场的分析与测量 [J]. 铁道学报, 2004, 26(4): 126-128
- [3] 金志颖, 杨仕友. EMS 型磁悬浮列车电磁系统动态电磁场的有限元分析及其悬浮力与牵引力特性的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 133-137
- [4] 陈棣湘. 常导型高速磁悬浮列车电磁系统的研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005
- [5] 卢琴芬. 直线同步电机的特性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [6] 李庆雷, 王先逵. 永磁同步直线电机推力及垂直力的有限元计算 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(5): 20-23