

# 飞机胎压监测系统中的非接触能量传输

樊明迪, 林辉, 李兵强

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710129)

**摘要:**为无法采用直接供电的飞机胎压监测系统设计了一种基于旋转变压器的能量传输系统,使其能在高速旋转状态下完成电能的非接触传输,并根据实际电路对非接触能量传输系统的影响因素进行了分析。

**关键词:**非接触能量传输;旋转变压器;胎压监测系统

中图分类号:V24

文献标识码:A

## Contactless transfer of energy in aircraft tire pressure monitoring system

FAN Ming Di, LIN Hui, LI Bing Qiang

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:**The contactless transfer of energy has good application value in many areas. Based on the rotary transformer, an energy transmission system is designed for the aircraft tire pressure monitoring system which can not supply energy directly. The contactless energy transmission can be completed under the status of high-speed rotation, and the particular analysis of system is made based on factual circuit.

**Key words:**contactless transfer of energy; rotary transformer; tire pressure monitoring system

飞机胎压监测系统 ATPMS (Aircraft Tire Pressure Monitoring System) 主要用于对飞机轮胎压力进行实时监测,并通过驾驶舱显示仪表向机组人员或维护人员提供轮胎的实际压力,从而实现对轮胎压力的实时控制。目前,直接系统在飞机轮胎压力监测系统中得到了越来越广泛的应用。在直接系统中,检测模块位于轮胎内部,一般由电池供电。但在实际应用中,由于电池容量有限、体积大、安装不方便,受离心力的影响,其应用受到很大限制。同时,如果在胎压检测系统中添加压力控制装置,电池将远远不能满足系统的需求。

传统的旋转部件电能传输装置主要采用滑环供电。滑环供电属于电接触滑动连接范畴,是实现 2 个相对转动部件电能传输的精密装置。随着技术的发展,导电滑环的性能越来越好,适用的转速越来越快。然而,在高速旋转部件中,摩擦、震动、接触火花和碳积因素限制了其应用。非接触能量传输技术解决了传统导线直接接触供电的缺陷,是一种有效、安全的电能传输方法,适用于无法采用电池或直接供电的胎压监测系统。

### 1 系统组成及基本原理

非接触电能传输技术利用变压器进行能量传输,将传

统变压器的感应耦合磁路分开,初、次级绕组分别绕制于不同的磁芯结构上,实现电源和负载间的非接触能量耦合。非接触电能传输系统可以等效为一种体积小的开关电源变换器,利用旋转变压器,便可以构建小巧实用的可旋转电源传输变换器。飞机胎压监测系统主要分为中央处理模块和检测模块。其中,检测模块采用直接检测方式,置于轮胎内部。由于检测模块与外界绝对隔离,并且处于高速旋转状态,因此,无接触变压器的次级绕组固定于轮胎,与次级变换器相连接,这样便可以实现电能的稳压输出。

无接触变压器的初级绕组与电源相连接,并被固定于轮胎转轴上。这样,在实现了初、次级绕组隔离的同时,电能传输不受隔离影响。根据系统的原理以及实际的要求,基于旋转变压器的非接触电能传输系统总体设计框图如图 1 所示。

### 2 初、次级变换器的设计

#### 2.1 结构组成

初级变换器主要由高频逆变网络、PWM 控制电路、补偿网络和保护电路构成。次级变换器主要由滤波、整流、稳压构成。28 V 机载直流电源直接输入初级变换器,通过逆变网络实现变换。逆变网络主要由功率开关管组成,通过对

《微型机与应用》2009 年第 22 期

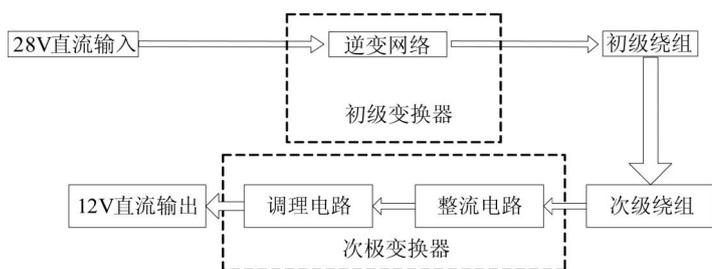


图1 系统总体设计框图

功率开关管的通断控制,完成电能的变换。这样,直流输入被转换为交流脉冲,加到无接触变压器的初级绕组两端。虽然无接触变压器的初、次级绕组处于大气隙隔离状态,但是利用初、次级绕组的感应耦合作用,会使次级绕组产生感应电动势,这样,便实现了非接触电能传输。变换器原理图如图2所示。

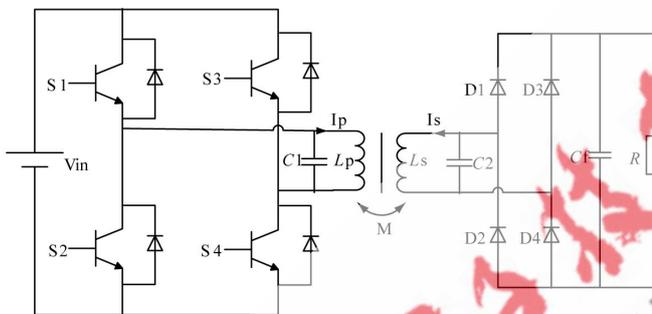


图2 初、次级变换器原理图

2.2 等效电路

初、次级的等效电路如图3所示,(a)为从初级端口看去的等效电路,(b)为从负载端看去的等效电路。初级绕组参数为  $R_p$  与  $L_p$ ,次级绕组参数为  $R_s$  与  $L_s$ ,互感为  $M$ 。图中  $Z_p=R_p+j\omega L_p$ ,  $Z_s=R_s+j\omega L_s$ ,  $M=\sqrt{L_s(L_p-L_{ps})}$ ,其中  $L_{ps}$  为次级短路时在初级测得电感,初、次级间的耦合系数为  $k=M/\sqrt{L_s L_p}$ 。

本非接触能量传输系统中,次级对初级的影响如图3(a)中所示,全部体现在反映电抗  $Z_{sp}$  上,  $Z_{sp}$  的计算公式为:

$$Z_{sp} = \frac{j\omega M \dot{I}_s}{\dot{I}_p} = \frac{\omega^2 M^2 (R_s + R_L - j\omega L_s)}{(R_s + R_L)^2 + \omega^2 L_s^2} \quad (1)$$

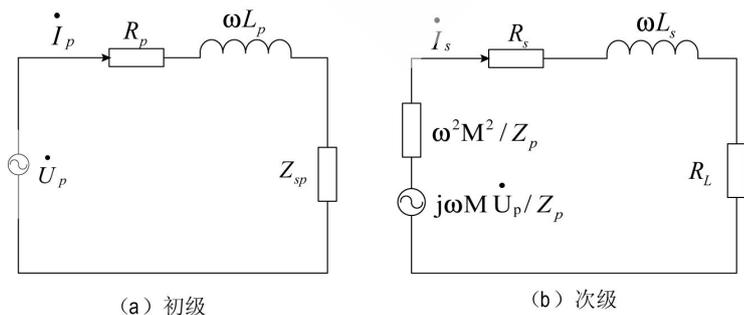


图3 初、次级变换器等效电路图

当供电电源为恒压源,忽略绕组电阻时,由图3(b)可以得到负载输出功率表达式:

$$P_o = \frac{U_p^2 M^2 R_L}{L_p^2 R_L^2 + \omega^2 L_s^2 L_{ps}^2} \quad (2)$$

2.3 补偿网络

限制有功功率传输的是旋转变压器中的漏电感,为了尽量减少系统消耗的无功功率,通常采用补偿容抗来平衡电路中的感抗。初级的补偿电容是为了平衡初级的漏感抗和次级的反映感抗,从而减小感应电源的视在功率,提高供电质量。次级的补偿是为了减小副边的无功功率,增大感应电源的输出功率。

电容串联补偿和电容并联补偿是基本补偿的2种形式。采用电容补偿,初级与次级共有4种补偿方式:串联-串联、串联-并联、并联-串联、并联-并联。若系统工作在谐振状态,忽略线圈电阻,次级采用串联补偿时,次级感抗与补偿容抗抵消,次级输入端口近似等效于电压源;采用并联补偿输入端口近似等效于电流源。初级串联补偿时,电容电压补偿了初级绕组上的电压,从而降低了电源的电压定额;初级并联补偿时,流过并联电容的电流补偿了初级绕组中电流的无功分量,从而降低了对高频电源的电流要求。如图2中所示,本文采用是并联-并联的补偿形式。

3 旋转变压器的设计

3.1 结构设计

旋转变压器是整个非接触能量传输系统的核心部分,利用了同轴旋转变压器能量传输不受转速影响的特点,将传统变压器的感应耦合方式改为旋转变压器的耦合方式,初、次级绕组实现分离,可以保持相对静止和旋转运动状态,在电源和负载单元之间不需要物理连接的情况下就能进行能量耦合。其中,初级线圈与初级变换器相连,次级线圈与次级变换器相连,旋转变压器内部结构如图4所示。

由图4可以看出,在系统中初级绕组和次级绕组是2个并排的线圈,它们的轴线一致,初级绕组固定在基座上,次级绕组固定在旋转轴上跟随转轴一起旋转。由于磁芯为圆形,一个磁芯相对另一磁芯作同轴转动时,穿过次边的由线圈原边产生的磁力线不会发生变化,其互感也不会发生变化,从而使能量传递在旋转时不受转速影响。

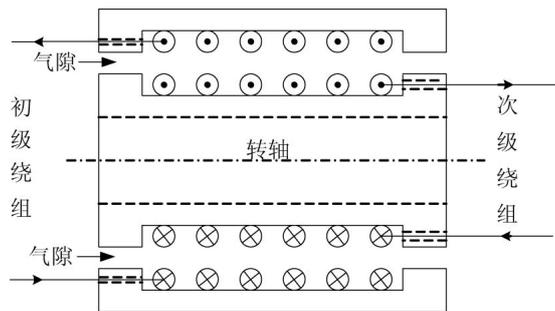


图4 旋转变压器的结构

3.2 有限元分析

有限元分析是测定旋转变压器电气特性的一种方法<sup>[5]</sup>。本设计具有轴向对称性,通过量纲分析可得出精确的结果。通过研究可以得出变压器设备的静态磁场,计算磁场参数便可以得出绕组感抗。有限元分析方法由3个基本阶段组成:画二维模型、规定材料性质和外形并求解、处理结果。软件采用Ansoft的麦克斯韦二维部分。

对能量在二维图模型的具体区域进行积分,可以计算相应的感抗。例如保存在磁芯和空隙能量是与相应的绕组的电磁感应相对应的。通过在漏磁能量出现的地方对能量积分,可以获得相应绕组的磁漏电感。静态磁场中能量E保存在感抗L中,因此电流I与能量E的关系式是:

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (3)$$

通过 $\vec{A}$ 、 $\vec{J}$ ( $\vec{A}$ 场矢量和 $\vec{J}$ 电流密度矢量)对绕组线圈的体积积分可以计算能量E,即:

$$E = \frac{1}{2} \int_R \int_Z \int_\Phi \vec{A} \cdot \vec{J} dr dz d\phi \quad (4)$$

根据上述式(3)、式(4)导出感抗:

$$L = \frac{\pi \int_R \int_Z \vec{A} \cdot \vec{J} dr dz}{I^2} \quad (5)$$

由于轴向对称性,所以积分只能在二维图导体表面进行。就磁漏电感而言,由于很难确定漏磁路径,所以计算稍微复杂一些。图5描述的是1.5 mm空气隙下旋转变压器的磁场仿真曲线。

通过对磁阻进行分析,可以更加容易地识别磁通路径,而且可以按下式计算保存它们中的能量E:

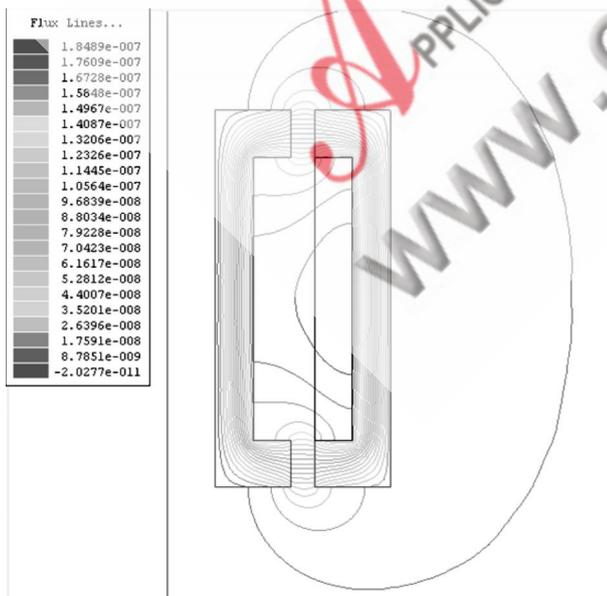


图5 旋转变压器内部磁场仿真曲线

$$E = \frac{1}{2} \int_R \int_Z \vec{H} \cdot \vec{B} dr dz \quad (6)$$

结合式(1)可以得出感抗L的计算公式:

$$L = \frac{\pi \int_R \int_Z \vec{H} \cdot \vec{B} dr dz}{I^2} \quad (7)$$

3.3 实际应用

在具体设计中选用坡莫合金1J50作为旋转变压器的磁芯,它具有较高的饱和磁感应强度和磁导率,而且易加工、价格也不高。初级、次级绕组的匝数均为200匝,线径为0.35 mm。

由于随着气隙的增大变压器初级、次级电感会减小,初次级互感减小、漏感增大、效率降低,具体变化关系曲线如图6所示。为了保证正常旋转,气隙不能太小,在满足机械装配的基础上会尽量减小气隙,实验中选择的气隙大小为1.5 mm。

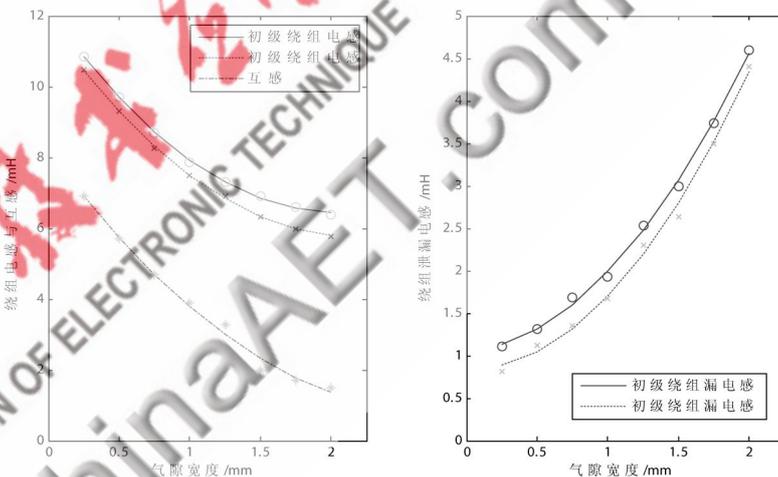


图6 旋转变压器绕组电感、互感、漏感随气隙变化曲线

表1 系统参数

参数	额定值
输入电压(直流)	28 V
输入电流	0.52 A
工作频率	20 kHz
占空比	0.48
输出电压	12 V
输出功率	10 W
传递效率	68.7%

本文根据上述原理,设计了小功率的非接触能量传输系统原理样机。系统参数如表1所示。

非接触能量传输技术作为一种新的能量传输形式变得越来越有吸引力。本文首先介绍了非接触能量传输系统的组成及基本原理,然后重点介绍了系统的核心组件旋转变压器的结构以及电气特性。经过理论分析、参数计算和器件

## 硬件纵横

Hardware Technique

选择,制作了基于旋转变压器的非接触电能传输系统的原理样机,并进行了相关的实验,较好地实现了能量的传输,满足了飞机胎压监测的能量需求。

### 参考文献

- [1] 李兵强,林辉.飞机轮胎压力监控系统研究[J].计算机测量与控制,2007,15(1):48-51.
- [2] 秦海鸿,王慧贞,严仰光.非接触式松耦合感应电能传输系统原理分析与设计[J].电源技术应用,2004,7(5):257-263.
- [3] 武瑛,严陆光,徐善纲.新型无接触能量传输系统[J].变压器,2003,40(6):1-6.
- [4] 林辉,王辉.电力电子技术[M].武汉:武汉理工大学出版社,2002.
- [5] KONSLANTINOS D P,MACPHERSON D E. Contact-less transfer of energy by means of a rotating transformer[J].IEEE ISIE 2005(20-23):1738-1739.
- [6] ESSER A, HANS-S. A new approach to power supplies for robots[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1991, 27(5): 827-875.
- [7] HEERES B J, NOVOTNY D W. Contactless underwater delivery[J]. IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, 1994: 418 - 423.
- [8] KLONTZ K W ,DIVAN D W ,NOVOTNOY D W ,et al.Contact less power delivery system for mining applications[J].IEEE Transaction on industry Applications,1995,31(1):27-35.

(收稿日期:2009-06-17)