

基于微带天线的能量传输技术及其性能研究

张雪松^{①②} 朱超甫^① 李忠富^①

^①(北京科技大学机械工程学院 北京 100083)

^②(中原工学院 郑州 450007)

摘要: 对于安装在旋转部件上的监测系统来说, 供能问题一直是一个难点。该文提出了一种基于微带天线的非接触式的能量传输技术, 以代替传统的滑环或光电电池等能量传输方法。该文以扭矩监测为应用背景, 提出了能量传输系统的总体结构和天线馈源方案, 并对天线的各种能量传输情况进行了研究, 同时分析了旋转速度对能量传输的影响。

关键词: 微带天线; 能量传输; 扭矩监测; 监测系统

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0232-04

The Studies of Energy Transmission Technology and Its Performances Based on Microstrip Antennas

Zhang Xue-song^{①②} Zhu Chao-fu^① Li Zhong-fu^①

^①(Mechanical Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

^②(Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: For monitoring system which fixed on rotating component, the energy supply is a difficult problem for a long time. A non-contact energy transmission technology based on microstrip antennas is put forward to replace the traditional methods such as slip-rings or optoelectronic cell. Taking torque monitoring as the application background, the total scheme of the energy transmission system and the feeding method of antennas are presented. The various conditions of microstrip antennas in energy transmission course are studied and the influence of rotating velocity on energy transmission is analyzed.

Key words: Microstrip antennas; Energy transmission; Torque monitoring; Monitoring system

1 引言

对于大型工业设备来说, 对其旋转轴的扭矩进行监测是十分必要的, 它可以随时对设备的载荷情况以及轴的工作状况进行监测, 以保证设备运行在正常状态。特别是在冶金、石油、重型机械等相关行业, 一些重要的传动轴的运行状况就直接关系到产品的质量和设备的安全。因此, 对一些重要的大直径的轴类部件进行实时监测是十分必要的。但在监测系统工作进行时, 就必然会遇到一个问题。那就是如何向旋转部件上的监测系统提供能量。

在传统的扭矩监测系统中, 向处于旋转状态的监测系统提供能量的方法有很多种。如滑环供电, 旋转变压器供电, 以及光电电池供电等等。这些方法各有其特点, 但也有其缺点。如滑环在高速旋转状态下长期运行时, 在滑环和电刷之间就会因为电蚀而产生较大的电阻, 从而使得传输不稳定。旋转变压器在安装上要求较高, 现场的污染和温度变化对其影响较大。而光电电池法对环境的要求更高, 粉尘、油污可能会严重影响其传输效率。为更好地解决以上方法所产生的弊端,

本文提出了一种新的非接触式的能量传输方案, 即采用微带天线来传输能量^[1]。微带天线具有低剖面, 低成本, 易集成等优点。采用收发两套天线即可实现外部能量与旋转轴之间的传输。本文就针对微带天线的传输性能进行研究。

2 总体结构方案及技术条件的确定

能量传输系统的总体结构分两大部分: 能量的传输以及能量接收后的处理。系统总体结构的框图如图 1 所示, 能量传输系统的立体结构示意图如图 2 所示。

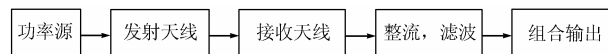


图 1 能量传输系统总体结构框图

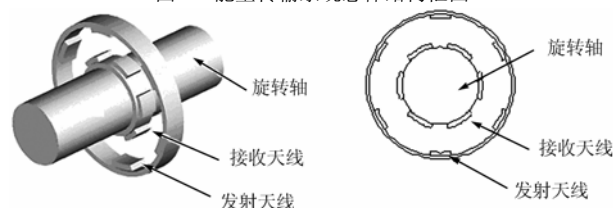


图 2 传输系统立体结构示意图

在本系统中, 发射天线的微波源, 如图 3 所示, 采用的是单独的、分散安装的功率源方案。这样省去了采用集中式

供源方案时的功率分配器, 减少了功率分配时的能量损失, 每一个单独的功率源的功率很小, 这样设计制造难度降低了, 且安全防护的难度也降低了, 便于现场使用。而且可以通过集成化设计与发射天线组合为一体, 这样在安装调整上都很方便。

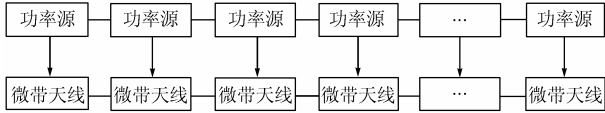


图 3 分散式功率源方案

在通信工程中通常要求天线要有较宽的频带, 而在本系统中并不要求这一点, 因为天线是在一个固定的频率点工作。由于微带天线在本系统中是用来传输能量的, 频率高有利于能量的集中, 所以工作频率应该在微波波段, 一般应选在 2 GHz 以上, 提高频率对缩小天线的尺寸是有益的, 但频率太高又会增加功率源等其他设备的制造困难, 而且对防护问题也会提出更高的要求, 所以根据现有设备的情况在本文中将其确定为 2.5 GHz。考虑到制造成本和对人体的影响, 本文将功率源的输出功率确定为 18 dBm。

在本系统中是选用的是微带天线来作为能量的辐射和接收单元。微带天线型式选定为矩形。先按照经典的微带天线设计方法确定天线的原始尺寸为 $L=3.62 \times 10^{-2}$ m, $W=4.3 \times 10^{-2}$ m, 背馈 $Y_0=1.143 \times 10^{-2}$ m。然后通过实验, 采用加载短路探针的方案实现了微带天线的小型化。本实验系统如图 4 所示。在本文中主要研究接收到的功率, 对于将接收到的功率进行直量化处理的技术将另文研究。

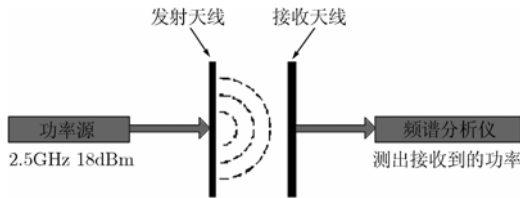


图 4 实验系统示意图

3 天线能量传输分析

对于天线来说, 其发射、接收性能是互易的。即在将天线作为发射使用时, 其发射性能与天线作为接收使用时的接收性能是一致的。也就是说天线具有互易性。在研究一对天线间的发射和接收性能时, 除了天线本身设计的合理性外, 还要求天线对必须是匹配的。这样才能使天线的发射和接收效率达到最佳状态。下面对使用天线来进行能量传输时的功率互易性进行分析^[3]。

3.1 功率互易原理

任意两个天线系统都可以看作一个二端口网络。而一个二端口网络的匹配条件是, 若它在端口 1-1' 和 2-2' 接有适当阻抗 Z_{01}^* , Z_{02}^* , 这两个阻抗必须同时满足下面两个条件。

(1) 端口 2-2' 接 Z_{02}^* (Z_{02} 的复共轭) 时, 从端口 1-1' 看进去的阻抗是 Z_{01} (图 5(a))。

(2) 端口 1-1' 接 Z_{01}^* (Z_{01} 的复共轭) 时, 从端口 2-2' 看进去的阻抗是 Z_{02} (图 5(b))。

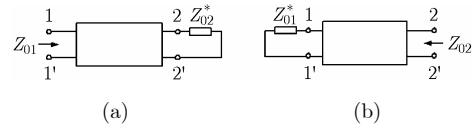


图 5 阻抗匹配条件网络图

在匹配条件下, 流入端口 1-1' 的功率与端口 2-2' 的端接负载 Z_{02}^* 的吸收功率 (如图 6(a)) 之比要等于流入端口 2-2' 的功率与端口 1-1' 的端接负载 Z_{01}^* 的吸收功率 (如图 6(b)) 之比。即 $P_{1a}/P_{2a} = P_{2b}/P_{1b}$, P_{1a} , P_{2a} 分别是流入端口 1-1' 和负载 Z_{02}^* 所吸收的功率; P_{1b} , P_{2b} 分别流入端口 2-2' 与端接负载 Z_{01}^* 所吸收的功率。

如果天线是无损耗的, 则可认为 P_{1a} 是天线 1 的辐射功率, P_{2a} 是天线 2 的接收功率。 P_{1b} 和 P_{2b} 也同样如此。所以功率互易也可以表达为: 对一个给定的系统, 在匹配条件下, 辐射功率与接收功率之比为常数。这里对两个天线之间的距离未作任何假定。一般来说, 随着两天线间的距离变化, Z_{01} 和 Z_{02} 都要发生变化。只有当两天线之间的距离很大时, Z_{01} 和 Z_{02} 才会是常数, 它们实际上就是天线 1 和 2 的自阻抗。

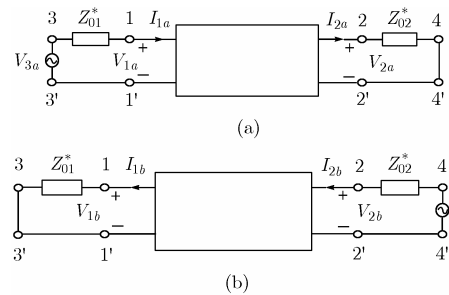


图 6 功率互易二端网络图

3.2 能量传输的一般计算方法

在图 5(a) 中, 令 S 是包围天线 1 或天线 2 的任意曲面, 根据场的互易定理有

$$V_{3a} I_{1b} = \int_S (\mathbf{H}_b \times \mathbf{E}_a + \mathbf{E}_b \times \mathbf{H}_a) \cdot \hat{\mathbf{n}} ds = V_{4b} I_{2a} \quad (1)$$

根据匹配条件有

$$V_{3a} = 2R_{01} I_{1a} \quad (2)$$

$$V_{4b} = 2R_{02} I_{2b} \quad (3)$$

将式(2)和式(3)代入(1)式, 于是得到

$$2I_{1a} I_{2b} R_{01} = \int_S (\mathbf{H}_b \times \mathbf{E}_a + \mathbf{E}_b \times \mathbf{H}_a) \cdot \hat{\mathbf{n}} ds = 2I_{2a} I_{2b} R_{02} \quad (4)$$

上式取共轭, 有

$$2I_{1a}^* I_{2b}^* R_{01} = \left\{ \int_S (\mathbf{H}_b \times \mathbf{E}_a + \mathbf{E}_b \times \mathbf{H}_a) \cdot \hat{\mathbf{n}} ds \right\}^* = 2I_{2a}^* I_{2b}^* R_{02} \quad (5)$$

将式(4)和式(5)相乘, 得

$$\frac{\frac{1}{2}|I_{2a}|^2 R_{02}}{\frac{1}{2}|I_{1a}|^2 R_{01}} = \frac{\frac{1}{2}|I_{1b}|^2 R_{01}}{\frac{1}{2}|I_{2b}|^2 R_{02}} = \frac{\left| \int_S (\mathbf{H}_b \times \mathbf{E}_a + \mathbf{E}_b \times \mathbf{H}_a) \cdot \hat{\mathbf{n}} ds \right|^2}{16 \left(\frac{1}{2}|I_{1a}|^2 R_{01} \right) \left(\frac{1}{2}|I_{2b}|^2 R_{02} \right)}$$

即

$$\frac{P_{2a}}{P_{1a}} = \frac{P_{1b}}{P_{2b}} = \frac{\left| \int_S (\mathbf{H}_b \times \mathbf{E}_a + \mathbf{E}_b \times \mathbf{H}_a) \cdot \hat{\mathbf{n}} ds \right|^2}{16P_{1a}P_{2b}} \quad (6)$$

若天线是无耗的, 则

$$P_{1a} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{S_a} (\mathbf{E}_a \times \mathbf{H}_a^*) \cdot \hat{\mathbf{n}}_a ds, \quad S_a \text{ 为包含天线 1 的区域,}$$

$\hat{\mathbf{n}}_a$ 为外法线单位矢量;

$$P_{2b} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{S_b} (\mathbf{E}_b \times \mathbf{H}_b^*) \cdot \hat{\mathbf{n}}_b ds, \quad S_b \text{ 为包含天线 2 的区域, } \hat{\mathbf{n}}_b$$

为外法线单位矢量。

于是, 式(6)变成

$$\frac{P_{2a}}{P_{1a}} = \frac{P_{1b}}{P_{2b}} = \frac{\frac{1}{4} \left| \int_S (\mathbf{H}_b \times \mathbf{E}_a + \mathbf{E}_b \times \mathbf{H}_a) \cdot \hat{\mathbf{n}} ds \right|^2}{\left\{ \operatorname{Re} \int_S (\mathbf{E}_a \times \mathbf{H}_a^*) \cdot \hat{\mathbf{n}}_a ds \right\} \left\{ \operatorname{Re} \int_S (\mathbf{E}_b \times \mathbf{H}_b^*) \cdot \hat{\mathbf{n}}_b ds \right\}} \quad (7)$$

这个公式对任意两无耗天线都是严格成立的, 并且与两天线的相对距离无关。在计算场 \mathbf{E}_a , \mathbf{H}_a , \mathbf{E}_b 和 \mathbf{H}_b 时, 都假定两天线同时存在, \mathbf{E}_a 和 \mathbf{H}_a 是天线 1 作发射, 天线 2 作接收时的场, \mathbf{E}_b 和 \mathbf{H}_b 则是天线 2 作发射, 天线 1 作接收时的场。但由于两天线之间的相互耦合, 场 \mathbf{E}_a , \mathbf{H}_a , \mathbf{E}_b 和 \mathbf{H}_b 是很难计算的, 通常是天线 1 为发射天线时假定天线 2 不存在, 反之亦然。

这里讨论的只是能量传输时的一般性原理。当传输距离较远时, 我们可以根据麦克斯韦方程进行具体的计算。但当传输距离较近时, 特别是当天线处于本文中所应用的近场区域时, 其场关系较为复杂, 很难给出一个明确的解析表达式。下面利用实验的方法来对其进行研究。

4 天线能量传输过程及其性能研究

4.1 单对天线的能量传输研究

在天线能量传输系统中最基本的能量传输模型就是一对天线间的能量传输。这里先一对天线的能量传输情况进行研究。天线为正对面放置, 距离从 3 mm 逐步远离到 10 mm。接收天线所接收到的能量与距离的关系如图 7 所示。

从图 7 中可以看出, 当距离较远时(10 mm)由于微波的衰减特性, 功率损失很大, 接收到的功率仅为 14.53 dBm, 亦即 28.38 mW, 为发射功率的 45%。但随着距离的缩短, 接收功率便提升很快。当在 5 mm 的位置时其接收功率为 16.79 dBm, 即 47.75 mW, 相当于发射功率的 75.68%。在该能量传输状态下, 天线都是工作在近场区, 即接收和发射天线都分别位于对方的近场区, 这种能量传输是辐射作用和耦合作用的综合, 但主要还是通过耦合的作用来传输能量的。

4.2 多对多天线的能量传输研究

多对多天线是指能量传输系统有多个发射天线和多个

接收天线, 即发射天线和接收天线都为阵列时的情况。当接收天线从发射天线上耦合了能量之后, 根据互易原理它本身也会有发射效应。这样它也会对旁边的接收天线产生影响。

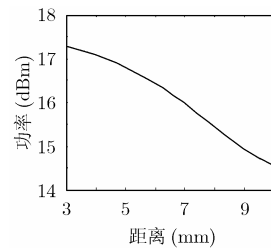


图 7 单对天线能量传输接收功率-距离图

这里将发射和接收天线都正对面布置, 以考察在这种情况下其接收功率与距离之间的关系。接收功率与距离的关系如图 8 所示, 从图 8 可以看出多对多天线的情况与单对多天线的情况基本上是一样的。每片接收天线的输出功率略有提高, 但并不很明显。这说明接收天线数量的增加对每片天线功率接收的影响很小。这样在进行阵列布置时可以适当地增加接收天线的数量, 以提高能量的接收率。

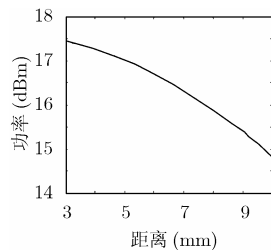


图 8 多对多天线能量传输接收功率-距离图

4.3 交错速度对接收性能影响的研究

图 9 为天线交错情况时的位置示意图。图中 e 为交错距离。

图 10 显示的是天线横向交错的距离与接收功率之间的关系曲线。从图中可以看出随着天线对交错距离的增加, 接收功率逐渐下降。这主要是由于位置的交错使得接收天线逐渐从发射天线的中心场的位置向边缘场移动, 发射天线的电磁场逐渐减弱, 从而使得接收天线的输出功率也随之下降。当发射和接收天线的交错距离为 10 mm 时, 接收到的功率为 14.96 dBm, 即 31.33 mW, 传输效率为 50%。如果交错距离继续增加, 则发射的大部分能量将散失, 而且经过后续能量转换后的直流电压将会更低, 这将达不到系统对电压的要求。以上述结果为依据, 通过综合考虑, 天线对的交错距离最好不要超过 10 mm。这样, 在布置一个天线阵列时, 相邻两个天线间的距离不应大于 20 mm。

在实际应用时发射天线和接收天线总是处于动态的交错之中, 所以有必要研究发射、接收天线处于动态时的情况。

这里发射天线为一个阵列, 接收天线以不同的速度横向运动, 即交错运动, 发射和接收天线阵中相邻的两个天线间的距离为 20 mm, 发射和接收天线的正面垂直距离保持为 5 mm, 其位置与前面静止时的情况相似, 不过此处有相对运

动。由于实验手段的限制,在运动状态下记录每个瞬间接收天线的输出功率有一定的困难,所以这个实验就直接记录接收功率通过能量转换后的直流电压值。关于能量转换器的技

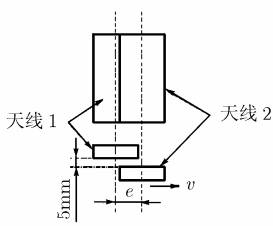


图 9 天线交错位置示意图

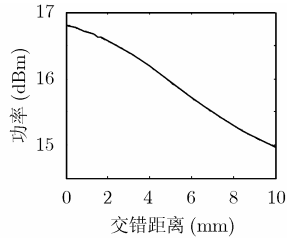


图 10 天线对交错距离-功率图

术问题将在今后进行研究,这里只是使用其来记录实验结果。图 11、图 12 分别显示的是交错速度为 5 m/s 和 10 m/s 时的时间-电压关系。

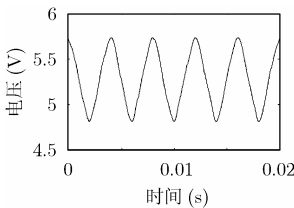


图 11 交错速度为 10 m/s 的时间-电压图

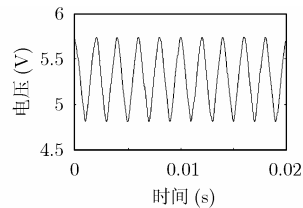


图 12 交错速度为 5 m/s 的时间-电压图

从图 11 和图 12 可以看出,输出电压值随时间轴做周期性的变化。而且交错速度的增加也会使得电压值变化的频率增加。如当交错速度为 5 m/s 时电压变化频率为 2.5×10^2 Hz, 交错速度为 10 m/s 时电压变化频率则为 5×10^2 Hz。对于接收天线来说它所处的电磁场环境也是呈周期性变化的,当它与一片发射天线正对面时,这时的电磁场强度达到极大值,其电压值也达到极大值;随着它的偏移,电磁场逐渐减弱,电压值也随之逐渐减小,当其处于两片发射天线的中间时电磁场最弱,相应的电压值也达到极小值;再往后又开始进入下一片发射天线的近场区,电磁场又逐渐增强,电压值也逐渐提高,当与下一片发射天线正对面时,电磁场以及电压值均达到极大值。如此循环往复,接收天线所处的电磁场环境以及其输出的电压值就表现为周期性变化。这种变化的频率与交错速度是密切相关的,速度越快,频率越高。在这个过程中,接收天线在某个瞬间所处位置的输出电压值与静态时的输出电压值基本上是相等的,这是因为交错速度与电磁场的传播速度相比是很小的,所以交错速度对能量的接收的影响也是很小的,交错速度只能影响所接收能量周期变化的频率,而不能改变接收的效率。

接收天线接收到的能量转换为直流电后,由于接收能量本身波动的原因,输出的电压值也是波动的。要考察该波动直流电的作功能力,我们参照交流电的有效值概念来计算该波动直流电的有效值。通过计算,在交错速度为 5 m/s 时的等效理想直流电压值与速度为 10 m/s 时的等效理想直流电压值相当,为 5.4V。虽然这里的电压值只是空载时的值,当接上负载后端电压会有所降低。但将所有接收天线的输出能量经转换后的电压源并联后,带负载能力会有较大提高。

5 结束语

本文对基于微带天线的能量传输过程进行了详细的研究。首先提出了以扭矩监测为应用背景的总体布局方案,以及分散式功率源的供能方案。研究了单对天线,多对天线的能量传输情况,以及交错速度对接收性能的影响。单对天线正对面布置时,其传输功率可达到 49mW,而交错距离为 10mm 时的传输功率也可达到 31mW。当将发射和接收天线布置为一个阵列时,如布置 20 片发射天线时,这时就可接收到 620~980mW 的功率。对于一个采用低功耗设计的扭矩监测系统来说,其功耗最多只需要 500mW,所以采用本方案来传输能量是可以满足实际应用需要的。本文中基于微带天线的能量传输技术为非接触式能量传输技术提供了一个新的方法,其在扭矩监测系统及其他相关领域中有着广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 张雪松,朱超甫,顾颐. 使用微带天线进行近距离能量传递[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(6): 587-589.
Zhang Xue-song, Zhu Chao-fu, and Gu Yuan. Energy transfer over a close range by microstrip antennas. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2003, 25(6): 587-589.
- [2] 钟顺时. 微带天线理论与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991: 1-71.
- [3] 文舸一著. 电磁理论的新进展[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 251-257.

张雪松: 男, 1971 年生, 博士, 研究方向为设备故障诊断、机械电子工程。

朱超甫: 男, 1951 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为设备故障诊断、机械电子工程。

李忠富: 男, 1973 年生, 硕士, 研究方向为冶金机械设备技术开发。