



引用格式: 郭钊兵, 张 潇, 叶凡炜, 等. 多股并联蛇形导线无线充电线圈的机电特性分析及优化设计[J]. 科学与技术工程, 2020, 20(25): 10293-10300

Guo Yibing, Zhang Xiao, Ye Fanwei, et al. Analysis and optimization of mechanical and electrical characteristics of wireless charging coils with multi-strand serpentine interconnect[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(25): 10293-10300

多股并联蛇形导线无线充电线圈的 机电特性分析及优化设计

郭钊兵^{1,2}, 张 潇^{1,2}, 叶凡炜^{1,2}, 平学成^{1,2*}, 苏业旺³

(1. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222; 2. 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津 300222; 3. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘 要 无线充电系统的电能利用率和功能可靠性是人们关注的重要问题。为获得高弹性延伸率、低电阻的柔性电感线圈, 提出了多股并联蛇形导线无线充电线圈的设计思路。首先, 对比研究了多股并联蛇形导线和单股蛇形导线的电学性能和弹性延伸率, 证明了多股并联导线的优势。同时考察了导线厚度、直线段长度以及圆弧段半径和圆心角对蛇形导线的电学性能和弹性延伸率的影响。结果表明, 直线段长度、圆心角、圆弧段半径是影响蛇形导线的弹性延伸率的敏感参数。最后, 通过正交实验优化了影响蛇形导线弹性延伸率和电阻的敏感参数, 优化后的柔性可延展线圈的电阻降低了 13.5% 和弹性延伸率提高了 34.3%。研究结果为柔性可延展的无线充电线圈优化设计提供理论指导。

关键词 蛇形互连; 三股并联; 电阻; 弹性延展率; 力学特性; 电学特性

中图分类号 TM55; 文献标志码 A

Analysis and Optimization of Mechanical and Electrical Characteristics of Wireless Charging Coils with Multi-strand Serpentine Interconnect

GUO Yi-bing^{1,2}, ZHANG Xiao^{1,2}, YE Fan-wei^{1,2}, PING Xue-cheng^{1,2*}, SU Ye-wang³

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and Online Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, Tianjin 300222, China; 3. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

[Abstract] The power utilization and functional reliability of wireless charging system are important issues of concern. In order to obtain flexible inductance coil with high elastic stretchability and low resistance, the design idea of multi-strand interconnect was proposed. Firstly, the electrical properties and elastic stretchability of multi-strand serpentine interconnect and single-strand serpentine interconnect were comparatively studied, and the advantages of the multi-strand serpentine interconnect were proved. Then, the effects of wire thickness, length of straight segment, radius of arc and central angle on the electrical properties and elastic stretchability of serpentine interconnect were investigated. The results show that the length of the straight segment, the central angle and radius of arc are sensitive parameters affecting the elastic stretchability of serpentine interconnect. Finally, the sensitive parameters affecting the elastic stretchability and resistance of serpentine interconnect were optimized by orthogonal experiment. The resistance of the optimized flexible and stretchability coil is reduced by 13.5% and the elastic stretchability is increased by 34.3%. The research results provide theoretical guidance for optimal design of flexible and stretchable wireless charging coil.

[Key words] serpentine interconnect; three-strand in parallel; resistance; elastic stretchability; mechanical properties; electrical characteristics

无线充电技术具有充电便捷, 设备封闭性好, 利于防尘防水, 无直接电气接触的优点^[1-2], 未来极有可能广泛地应用于可穿戴设备^[3], 柔性电子器件、植入式医疗设备等高科技领域^[4-9]。植入体内

的医疗设备往往会因为电池耗尽而需要做手术更换, 无线充电技术可以实现体外无线充电, 可以提高设备的使用寿命, 降低患者的医疗费用。无线充电技术在电动汽车^[10-11]等领域的应用, 会极大地提

收稿日期: 2020-02-24; 修订日期: 2020-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(51975411); 天津市自然科学基金(18JCYBJC88500); 天津市高校中青年骨干创新人才培养计划(津教委人函[2017]23号)

第一作者: 郭钊兵(1992—)男, 汉族, 硕士研究生。研究方向: 柔性电子器件设计。E-mail: yibingguo123@163.com。

* 通信作者: 平学成(1975—)男, 汉族, 博士, 教授。研究方向: 柔性电子器件设计及应用。E-mail: xuechengping@hotmail.com。

高电动汽车充电的便捷性,改善新能源汽车充电站少的难题,加速电动汽车的大规模普及。

无线充电的原理是在电感线圈中通入高频交流电来产生一个交变电场,接收线圈由于交变电场的存在会感应出交变电流,从而实现电能无线传输^[12-13]。电感线圈是无线充电系统的主要组成部分之一,对于可折叠手机、人造皮肤、汽车车顶等曲面或可变形的产品,传统的直导线构成的电感线圈由于不能变形或与曲面贴合,导致充电的效率降低甚至无法实现无线充电。柔性电感线圈具有柔性可延展的特性,能够贴合到曲面物体上,将很好地解决上述问题^[4-6]。

目前,已经有学者利用蛇形互连导线制作柔性电感线圈,实现对柔性电子器件无线充电或者无线传输数据的功能,柔性电感线圈在拉伸的过程中,其变形主要由蛇形导线承担,可以实现线圈整体结构的卓越的拉伸/弯曲性能^[14-16]。Xu等^[14]将一个蛇形互连导线构成电感线圈集成到可延展电池上,该系统可实现在没有直接物理接触的时候对电池无线充电,系统的无线充电效率可达到17.2%,电感线圈的电阻为1.92 k Ω /m,弹性延伸率可达到25%。Dang等^[15]设计了一个可共形贴附到人体皮肤的pH传感器,可以通过蛇形互连导线构成的可延展射频识别(RFID)天线实现无线传输电能和实时传输数据的功能,该柔性可延展天线的弹性延伸率为40%。Chung等^[16]设计了一个内置传感器的电子皮肤系统,电子皮肤系统内置蛇形互连导线构成的线圈可以实现无线供电和无线传输数据,该柔性可延展电感线圈可实现的最大弹性延伸率为16%。

上述学者的研究分别将柔性可延展电感线圈集成到了柔性传感器上,证明了柔性电感线圈代替直导线线圈实现无线充电的可行性,但上述研究中没有具体分析不同几何参数的蛇形导线对柔性电感线圈电学性能和力学性能的影响,而且采用的是单股的蛇形导线,其电学性能和力学性能仍有进一步优化的空间^[17]。传统的直导线线圈大多采用利兹线,它由多根独立绝缘的导线绞合而成,可以有效减小趋肤效应对交流电阻的影响,但其基本上没有弹性延展性,无法胜任复杂曲面的无线充电任务^[18]。

为了提高电感线圈的弹性延伸性并降低趋肤效应,提出多股并联蛇形导线无线充电线圈的设计理念。首先,对比分析多股和单股蛇形导线在不同几何参数的情况下,交流电阻的变化情况对趋肤效应的影响规律^[19]。然后,分析导线厚度、直线段长

度、圆弧段的半径和圆心角对多股导线和单股导线弹性延伸率的影响。采用正交实验法筛选出影响弹性延伸率和电阻的敏感参数,并优化得出一组蛇形导线的参数,以此参数设计一个73 mm \times 73 mm的柔性电感线圈,并得到该线圈的交流电阻和弹性延伸率。该研究结果将为柔性电感线圈的设计及力电特性优化提供理论指导。

1 蛇形导线模型

如图1所示,柔性可延展电感线圈是由多个周期的蛇形导线绕制的矩形平面螺旋结构。将单股的蛇形互连导线进行分割,得到了多股并联的蛇形互连导线。蛇形互连导线由圆弧段和直线段构成,其形状变化主要受以下4个参数调控:直线段长度 L 、圆弧段半径 r 、圆心角 θ 、导线线宽 w 。当其中任意一个结构参数发生改变时,互连结构的形状均会发生改变。互连结构的形状发生改变时,其弹性延伸率和电阻也会随之改变。

柔性电感线圈主要由两部分构成:基底层和导线层,如图2所示。基底层为Ecoflex,是一种超弹性材料,导线层为Cu。由于蛇形互连导线是对称结构,因此在下述分析中取蛇形导线的1/2周期进行分析。

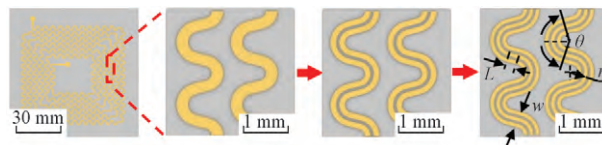


图1 柔性可延展电感线圈

Fig. 1 Flexible stretchable inductor coil

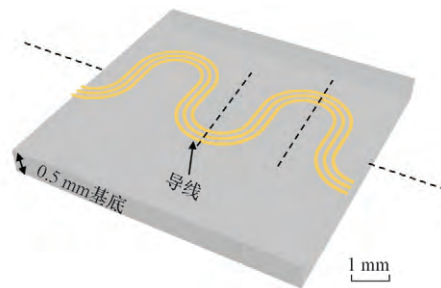


图2 蛇形导线计算模型

Fig. 2 Calculation model of serpentine wire

2 多股并联蛇形导线和单股蛇形导线的电学性能对比分析

2.1 互连导线的趋肤效应

由于柔性可延展电感线圈工作在高频交流电路中,趋肤效应的影响不可忽略。趋肤效应的影响可以用穿透深度来表示。穿透深度的计算公

式为^[20]

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}} \quad (1)$$

式(1)中: Δ 为穿透深度; ω 为角频率; μ 为真空磁导率 $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m; γ 为电导率。穿透深度 Δ 的定义是导体表面下深度为 Δ 厚度的导体流过导线的全部电流,而在 Δ 以外的导体完全不流过电流。

趋肤效应会导致导体内部的电流分布不均匀,电流集中在导体外表的薄层,如图3所示。随着频率增加,趋肤效应的影响也越显著。

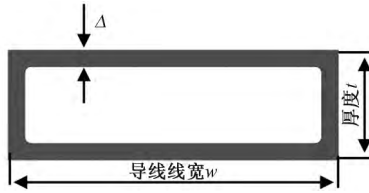


图3 趋肤效应示意图
Fig.3 Skin effect diagram

导线的材料为铜,其中 $\gamma = 58 \times 10^6$ S/m。由于柔性可延展电感线圈实现无线充电的原理是电磁感应式的,电磁感应式的工作频率一般在 300 kHz 以下,因此令 $\omega = 3\pi \times 10^5$ rad/s,经计算得到 $\Delta = 0.12$ mm。

2.2 互连导线的交流电阻

1/2 周期的蛇形互连交流电阻可由式(2)计算得出:

$$R_{AC} = \begin{cases} \rho \frac{2 \frac{\theta\pi}{180^\circ} r + L}{wt - (w - 2\Delta)(t - 2\Delta)}, & t > 2\Delta, w > 2\Delta \\ \rho \frac{2 \frac{\theta\pi}{180^\circ} r + L}{wt - (w - 2\Delta)t}, & t \leq 2\Delta, w > 2\Delta \\ \rho \frac{2 \frac{\theta\pi}{180^\circ} r + L}{wt}, & t \leq 2\Delta, w \leq 2\Delta \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: ρ 为导体材料的电阻率; θ 为圆心角; L 为直线段长度; r 为圆弧段半径; w 为导线线宽; t 为导线的厚度; R_{AC} 为导线的交流电阻。

2.3 不同参数对导线交流电阻的影响分析

对于矩形截面导线,其趋肤效应只与导线的线宽和厚度有关,因此取设计几何参数如表1所示。

2.3.1 厚度对交流电阻的影响分析

图4所示为蛇形导线 Cu 材料的厚度与 1/2 个周期蛇形导线电阻的关系。从图4中可以看出,当 Cu 厚度 $t < 0.24$ mm 时,由于三股并联导线的线宽小

于 2Δ ,所以三股并联导线的趋肤效应几乎为零,其交流电阻小于单股和双股蛇形导线。当导线厚度 $t \geq 2\Delta$ 时,三股并联导线由于趋肤效应的影响其交流电阻随厚度的变化趋向于稳定。相比单股和双股蛇形导线,三股并联导线趋肤效应要更小一些。

表1 几何参数设计

Table 1 Geometry parameter design

组别	t /mm	w /mm	r /mm	$\theta/(^\circ)$	L /mm
第一组	0.000 2~0.4	0.6	1.25	180	1
第二组	0.1	0.6~1.35	1.25	180	1

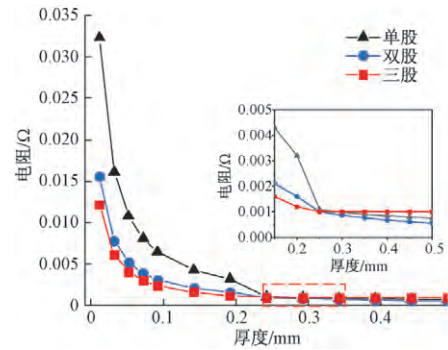


图4 厚度对蛇形导线交流电阻的影响

Fig.4 Effect of thickness on AC resistance of serpentine wire

2.3.2 导线线宽对交流电阻的影响分析

图5所示为蛇形导线线宽与 1/2 个周期蛇形导线交流电阻的关系。从图5中可以看出,当线宽 $w > 0.72$ mm 时,由于趋肤效应的影响,使得导线实际通过电流的横截面积不会随着线宽的增加而增加,所以单股导线、双股导线和三股导线的交流电阻随着线宽的增加基本不变。当线宽 $w \leq 0.72$ mm 时,由于三股导线的趋肤效应基本为 0,所以导线的交流电阻与直流电阻相等,随着线宽的增加,电阻逐渐减小。从总体上看,由于单股导线受趋肤效应的影响最大,使得导线实际通过电流的横截面积减小,因此三股导线的交流电阻小于单股导线和双股导线。

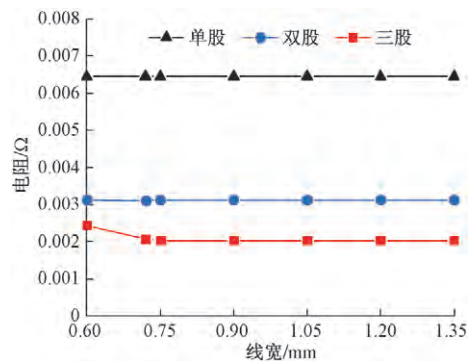


图5 导线宽度对蛇形导线交流电阻的影响

Fig.5 Effect of width on AC resistance of serpentine wire

3 多股并联蛇形导线和单股蛇形导线的力学性能对比分析

三股并联导线的力学计算模型如图 2 所示,将 Cu 导线贴附在一个厚度为 1 mm 的基底上,基底的材料为 Ecoflex, Ecoflex 的材料模型设定为超弹性材料,选用 Mooney-Rivlin 本构模型,定义 $C_{10} = 0.008\ 054\ \text{MPa}$, $C_{01} = 0.002\ 013\ \text{MPa}$, $D_1 = 2.0\ \text{MPa}^{-1}$ 。Ecoflex 采用 8 节点的实体单元。Cu 导线采用 4 节点壳单元,其材料模型为弹塑性模型,杨氏模量为 124 GPa,泊松比为 0.34,屈服应力为 372 MPa。

影响蛇形导线力学性能的参数主要有 5 个: Cu 导线厚度 t 、直线段长度 L 、圆弧段半径 r 、圆心角 θ 、导线的线宽 w 。设计几何参数如表 2 所示。

表 2 几何参数设计

Table 2 Geometry parameter design

组别	t/mm	L/mm	r/mm	$\theta/(\text{^\circ})$	w/mm
第一组	0.000 2~0.4	1	1.25	180	0.6
第二组	0.1	0~5	1.25	180	0.6
第三组	0.1	1	0.75~2	180	0.6
第四组	0.1	1	1.25	100~200	0.6
第五组	0.1	1	1.25	180	0.6~1.35

3.1 厚度对弹性延伸率的影响

蛇形导线的几何参数选取表 2 中第一组数据,如图 6 所示,蛇形互连的弹性延伸率随着厚度的增加先升高再降低,再升高再降低再升高最后趋于平缓。在厚度为 8 μm 时,蛇形互连的弹性延伸率最大,厚度达到 20 μm 时,蛇形互连的弹性延伸率开始趋于平缓。

蛇形导线的应变 ε 分布情况如图 7 所示,从图 7 中可以看出应变最大的地方在圆弧段的最高处,

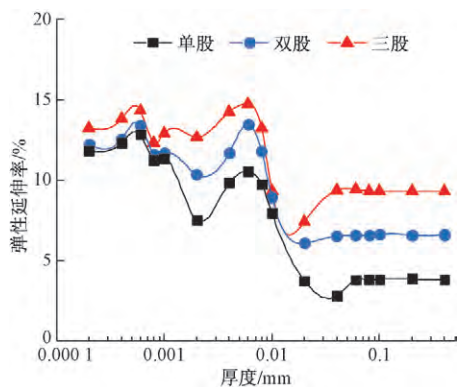


图 6 厚度对蛇形导线弹性延伸率的影响

Fig. 6 Effect of thickness on elastic stretchability of serpentine wire

而直线段的应变最小。

图 8 中的变形模态对应图 6 中的红色曲线部分,互连导线的曲线段半径为 $r = 1.25\ \text{mm}$,直线段长度为 $L = 3\ \text{mm}$ 。从图 8 中可以看出,随着 Cu 导线厚度的增加,互连导线的变形模态不同。当 Cu 导线的厚度小于 1 μm 的时候,互连导线呈现褶皱的变形模态。随着 Cu 导线的厚度增加,互连导线产生更大的波长。当 Cu 导线的厚度增加到 40 μm 的时候,互连导线的变形模态由褶皱/屈曲阶段转移到非屈曲阶段。对于更厚的 Cu 导线,互连导线的变形模态主要为非屈曲。在非屈曲阶段,互连导线呈现剪刀状的变形模态,在这个阶段只发生面内弯曲而不是侧向屈曲,因为其临界屈曲应变大于弹性延伸率,在其弹性变形的过程中并不会触发侧向屈曲。

处于非屈曲阶段^[21-22]的互连导线的 Cu 导线由

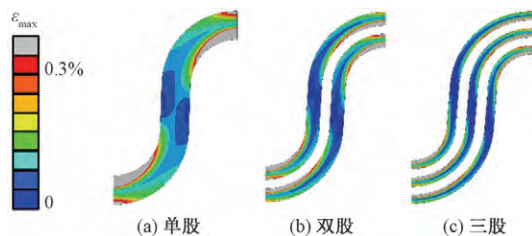


图 7 蛇形导线的应变分布情况

Fig. 7 Strain distribution of serpentine wire

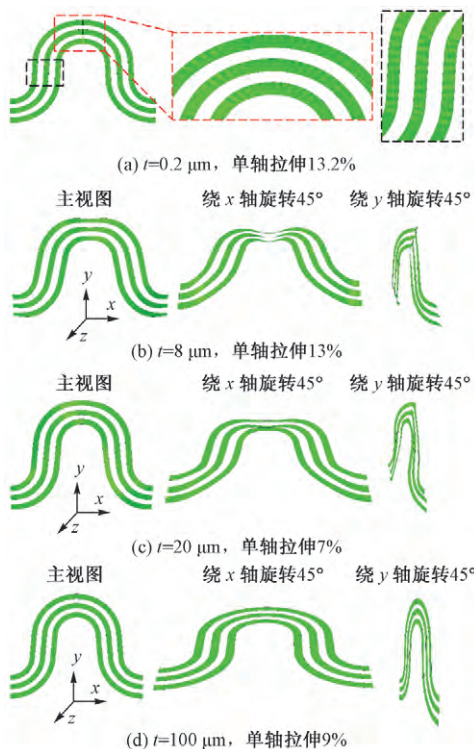


图 8 不同厚度导线对应的变形模态

Fig. 8 Deformation mode of wire of different thickness

于厚度更大,具有天然电阻小的优势,并且该阶段仍然具有不错的弹性延伸率。同时柔性可延展电感线圈需要通入高频交流电,趋肤效应的影响不可忽略,图4中显示,当厚度小于 $2\Delta=0.24\text{ mm}$ 时,三股并联蛇形导线不受趋肤效应的影响,导线的交流电阻随厚度的增加而降低。根据上面的分析可得出Cu导线的厚度的取值范围为 $0.04\sim 0.24\text{ mm}$ 。

3.2 直线段长度对弹性延伸率的影响

蛇形导线的几何参数选取如表2所示第二组数据,不同的直线段长度的单股、双股、三股蛇形互连导线对弹性延伸率的影响如图9所示,其中直线段 $L=0\text{ mm}$ 和 $L=5\text{ mm}$ 的蛇形导线应变的分布情况如图10所示。随着直线段长度 L 的增加,蛇形导线的弹性延伸率增加,并且三股并联导线的弹性延伸率始终大于单股导线。

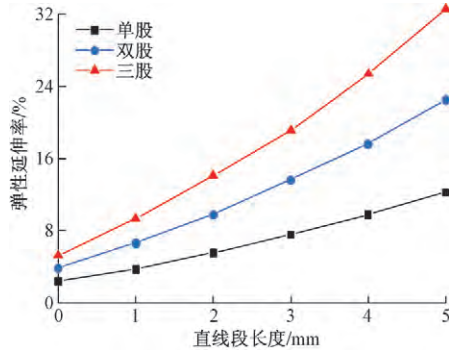


图9 直线段长度对蛇形导线弹性延伸率的影响
Fig. 9 Effect of the straight segment length on elastic stretchability of serpentine wire

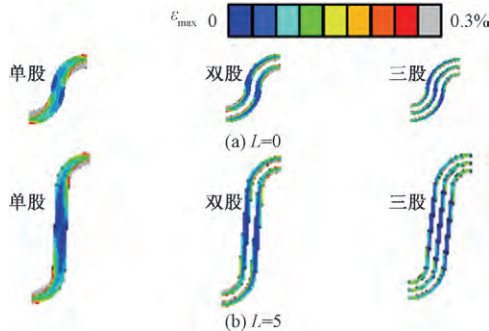


图10 不同直线段长度的蛇形导线应变云图
Fig. 10 Strain distribution of serpentine wire with different the straight segment lengths

3.3 圆弧段半径对弹性延伸率的影响

蛇形互连导线的几何参数选取表2中第三组数据,不同圆弧段半径对弹性延伸率的影响如图11所示。随着圆弧段半径的增加,蛇形导线的弹性延伸率增加。如图11所示表明三股导线的弹性延伸率始终优于单股导线的弹性延伸率。如图12所示为 $r=0.75、2\text{ mm}$ 的蛇形导线的应变分布云图。

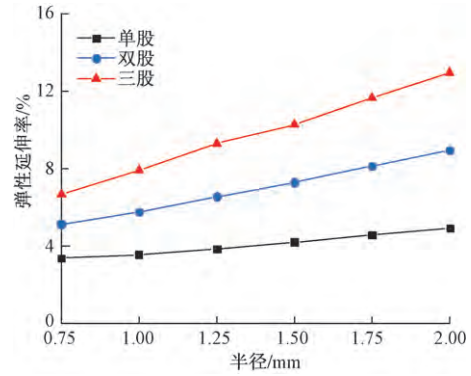


图11 圆弧段半径对导线弹性延伸率的影响
Fig. 11 Effect of arc segment radius on elastic stretchability of wire

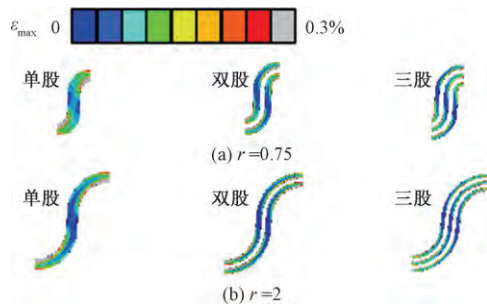


图12 不同圆弧段半径的蛇形导线应变云图
Fig. 12 Strain distribution of serpentine wire with different radius of arc segment

3.4 圆心角对弹性延伸率的影响

蛇形互连导线的几何参数选取表2中第四组数据,不同圆心角对弹性延伸率的影响如图13所示。由图13可知,随着圆心角的增加,蛇形导线的弹性延伸率增加,并且三股导线的弹性延伸率始终大于单股和双股导线。 $\theta=100^\circ、\theta=200^\circ$ 的单股和多股蛇形导线的应变分布情况如图14所示。

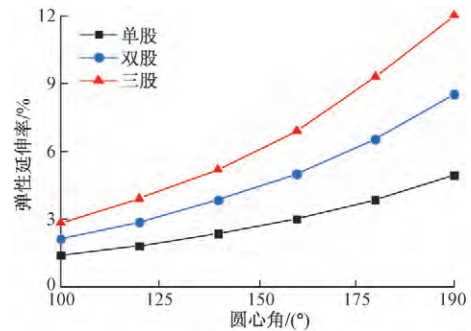


图13 圆心角对蛇形导线弹性延伸率的影响
Fig. 13 Effect of central angle on elastic stretchability of serpentine wire

3.5 导线的线宽对弹性延伸率的影响

蛇形互连导线的几何参数选取表2中第五组数

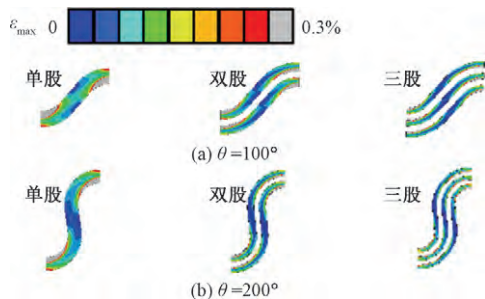


图 14 不同圆心角的蛇形导线应变云图

Fig. 14 Strain distribution of serpentine wire with different central angle

据不同导线宽度对弹性延伸率的影响如图 15 所示。随着导线宽度的增加,弹性延伸率降低,并且 3 股导线的弹性延伸率始终大于单股和双股导线的弹性延伸率。线宽 $w = 0.6、1.35$ mm 的蛇形导线应变分布情况如图 16 所示。

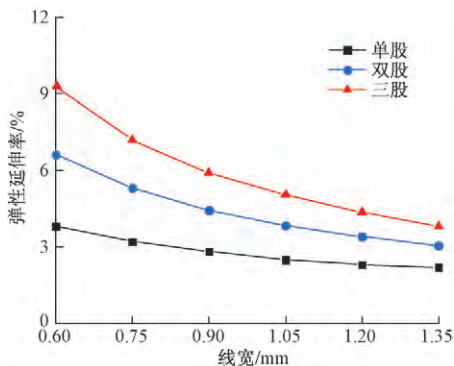


图 15 线宽对蛇形导线弹性延伸率的影响

Fig. 15 Effect of central angle on elastic stretchability of serpentine wire

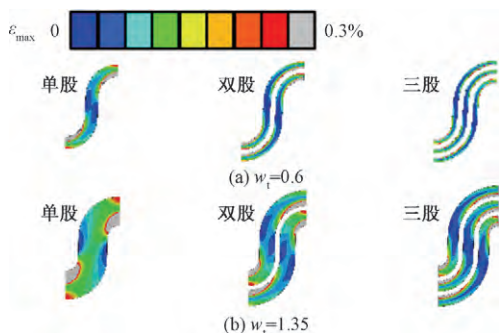


图 16 不同线宽的蛇形导线应变云图

Fig. 16 Strain distribution of serpentine wire with different central angle

4 应用举例

以上的分析可用与指导柔性电感线圈的优化设计,该柔性电感线圈可用于汽车无线充电系统。如图 17 所示,将接收线圈集成在车顶覆盖件上,通

过可升降装置和导轨,来控制发射线圈的移动,去跟接收线圈对中,贴合到汽车车顶覆盖件上。由于柔性电感线圈具有柔性可延展性,可以保证发射线圈能够贴合到不同曲率的车顶覆盖件上,降低发射线圈和接收线圈的轴向位移,减少无线充电过程中的漏磁损耗,确保在给不同车型充电时都能够保证最佳的充电效率,为电动汽车无线充电技术的大规模商业化起到推动作用。

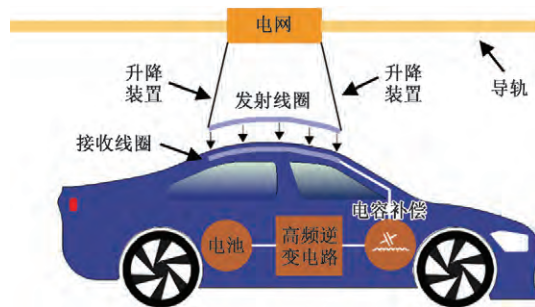


图 17 电动汽车无线充电示意图

Fig. 17 Schematic diagram of wireless charging for electric vehicles

根据工程实际需要,导线的电阻应较小以降低线圈的能量损耗,弹性延伸率应较大以确保线圈可以贴附到曲面物体上。根据第 2 节和第 3 节的分析,不同几何参数会影响蛇形互连导线的弹性延展性和电阻。为寻找最优的蛇形导线的几何参数,获得最佳电学性能和力学性能的柔性可延展线圈,选择四个关键几何参数:直线段长度、线宽、圆弧段半径和圆心角作为变量。

4.1 正交实验

正交实验设计^[23]是基于数理统计原理用最少的实验组合代替全部实验来了解全部实验结果,并对结果进行统计分析的多因子实验方法。为了综合分析各因素对电阻 R 和弹性延伸率 A 的影响,结合互连导线设计准则,设计 4 因素 3 水平 $[L_9(3^4)]$ 的正交实验。设定实验指标为电阻和弹性延伸率,对不同参数组合进行正交仿真实验,实验结果如表 3 所示。

4.2 极差分析

为分析不同几何参数对实验结果造成影响的敏感度,利用极差分析方法对分析结果进行处理。互连导线的电阻和弹性延伸率的极差分析结果分别如表 4 和表 5 所示。

由表 4 得出,以电阻为评价指标,各因素对结果的敏感度按照从大到小的原则依次排序为导线线宽 > 圆弧段圆心角 > 直线段长度 > 圆弧段半径。根据电阻越小越好的原则,互连导线最优的参数组

表 3 L9(3⁴) 正交实验结果

Table 3 Results of L9(3⁴) orthogonal test

实验 次数	实验因素				实验指标	
	$\theta/(^\circ)$	w/mm	r/mm	L/mm	R/Ω	$A/\%$
1	120	0.2	1	1	0.001 4	3.36
2	120	0.3	1.25	2	0.001 3	4.82
3	120	0.4	1.5	3	0.001 2	3.86
4	150	0.2	1.25	3	0.002 7	12
5	150	0.3	1.5	1	0.001 6	4.52
6	150	0.4	1	2	0.000 8	3.92
7	180	0.2	1.5	2	0.003 2	15
8	180	0.3	1	3	0.001 6	12.24
9	180	0.4	1.25	1	0.001	4.48

表 4 电阻极差分析结果

Table 4 Results of range analysis with resistance

序号	K_1/Ω	K_2/Ω	K_3/Ω	k_1/Ω	k_2/Ω	k_3/Ω	R/Ω
θ	0.003 9	0.005 1	0.005 8	0.001 3	0.001 7	0.001 9	0.000 6
w	0.007 3	0.004 5	0.003	0.002 4	0.001 5	0.001	0.001 4
r	0.003 8	0.005	0.004 4	0.001 3	0.001 7	0.001 9	0.000 4
L	0.004	0.005 3	0.005 5	0.001 3	0.001 8	0.001 8	0.000 5

注: K_1 、 K_2 、 K_3 分别为水平 1、2、3 对应的电阻之和; k_1 、 k_2 、 k_3 分别为水平 1、2、3 对应的电阻平均值; R 为各因素对应的电阻值的极差。

表 5 弹性延伸率极差分析结果

Table 5 Results of range analysis with elastic stretchability

序号	$K_1/\%$	$K_2/\%$	$K_3/\%$	$k_1/\%$	$k_2/\%$	$k_3/\%$	$R/\%$
θ	12.04	20.44	31.72	4.013	6.813	10.57	6.557
w	30.36	21.58	12.26	10.12	7.193	4.087	6.033
r	19.52	21.3	23.38	6.057	7.1	7.793	1.123
L	12.36	23.74	28.1	4.12	7.91	9.367	5.047

注: K_1 、 K_2 、 K_3 水平 1、2、3 对应的弹性延伸率之和; k_1 、 k_2 、 k_3 为弹性延伸率的平均值; R 为弹性延伸率的极差。

合为导线线宽为 0.4 mm, 圆弧段半径为 1 mm, 圆弧段圆心角为 120°, 直线段长度为 1 mm。在表 5 中, 以弹性延伸率为评价指标, 各因素对结果的敏感度按照从大到小的原则依次排序为圆弧段圆心角>导线线宽>直线段长度>圆弧段半径。根据弹性延伸率越大越好的原则, 互连导线最优的参数组合为圆弧段圆心角为 180°, 导线线宽为 0.2 mm, 直线段长度为 3 mm, 圆弧段半径为 1.5 mm。由于在实际应用中, 柔性可延展电感线圈的面积是有限的, 因此需要对互连导线的几何参数进行平衡。综合考虑, 最优的几何参数为圆弧段圆心角为 180°, 导线线宽为 0.2 mm, 圆弧段半径为 1.25 mm, 直线段长度为 1 mm。

根据此蛇形导线参数分别设计了两个 73 mm × 73 mm, 匝数为 5 的三股导线和单股导线柔性可延展电感线圈, 柔性可延展线圈的交流电阻可由式 (3) 计算。

$$R_{\text{coil}} = 2nR_{\text{AC}} \quad (3)$$

式(3)中: n 为蛇形导线的周期数; R_{AC} 为 1/2 周期蛇形导线的交流电阻; R_{coil} 为柔性可延展线圈的交流电阻。经过计算该线圈的电阻为 0.800 8 Ω , 单股蛇形导线构成的线圈电阻为 2.366 Ω 。未优化的三股柔性电感线圈参数为圆心角为 150°, 直线段长度为 1 mm, 半径为 1.35 mm, 线宽为 0.3 mm, 其电阻为 0.909 2 Ω 。对柔性可延展线圈进行有限元分析, 柔性线圈的应变分布情况如图 18 所示。优化之后的三股柔性线圈的最大弹性延伸率为 16%, 应变分布情况如图 18(a) 所示; 单股导线组成的柔性线圈弹性延伸率为 9.57%, 应变分布情况如图 18(b) 所示; 未优化的三股导线柔性线圈弹性延伸率为 10.51%, 应变分布情况如图 18(c) 所示。相比单股导线线圈, 优化之后的三股柔性线圈交流电阻降低了 195%, 弹性延伸率提高了 40.2%; 相比未优化的三股柔性线圈, 优化之后的三股柔性线圈交流电阻降低了 13.5%, 弹性延伸率提高了 34.3%。

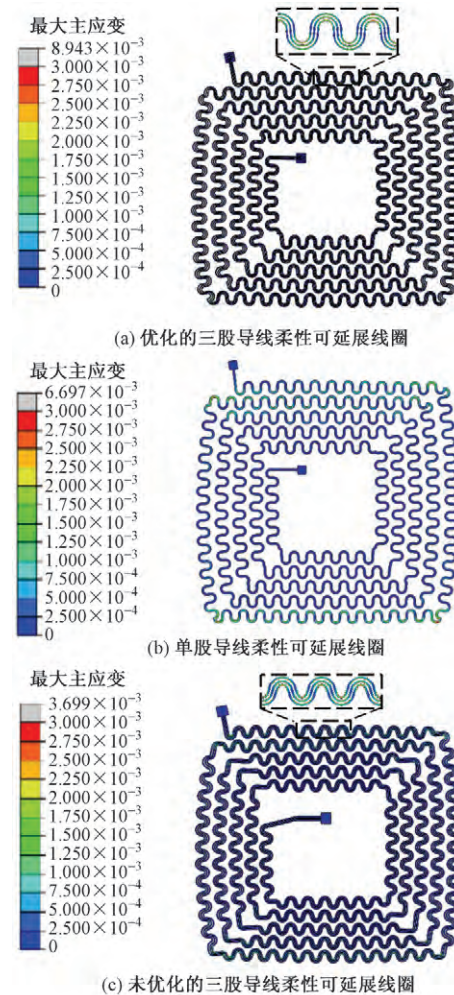


图 18 柔性可延展线圈的应变分布情况

Fig. 18 Strain distribution of flexible stretchable coils

5 结论

提出了多股并联导线设计柔性电感线圈的概念,通过对三股并联蛇形导线的电学性能和力学性能的分析,得出了以下结论。

(1) 在导线的等效总线宽相同的情况下,相比传统的单股蛇形导线,三股并连导线受趋肤效应的影响更小,在 $t < 2\Delta$ 时,三股导线的交流电阻小于单股和双股蛇形导线。并且,三股导线的最大弹性延伸率是单股导线的最大弹性延伸率的 2.4 倍。

(2) 在非屈曲阶段,随着厚度的增加,三股导线的弹性延伸率基本不变,长的直线段、大的圆弧段半径,以及大的圆心角有利于提高蛇形互连导线的弹性延伸率。

(3) 通过正交实验设计得出了不同几何参数对三股并联导线电阻和弹性延伸率的敏感性,给出了三股并联导线的最佳的几何参数,圆弧段圆心角为 180° ,导线线宽为 0.2 mm,圆弧段半径为 1.25 mm,直线段长度为 1 mm。通过仿真分析得出了,优化之后的三股导线构成的柔性可延展线圈的交流电阻比未优化的线圈降低了 13.5%,弹性延伸率提高了 34.3%。相比单股线圈,优化之后的三股柔性线圈的交流电阻降低了 195%,弹性延伸率提高了 40.2%。

参 考 文 献

- Covic G A, Boys J T. Inductive power transfer[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(6): 1276-1289.
- Ho S, Wang J, Fu W, et al. A comparative study between novel witrlicity and traditional inductive magnetic coupling in wireless charging [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5): 1522-1525.
- Sun D, Chen M, Podilchak S, et al. Investigating lexible textile-based coils for wireless charging wearable electronics [J]. Journal of Industrial Textiles, <https://doi.org/10.1177/1528083719831086>.
- 常若菲,冯雪,陈伟球,等.可延展柔性无机电子器件的结构设计力学[J].科学通报,2015,60(22):2079-2090.
Chang Ruofei, Feng Xue, Chen Weiqiu, et al. Structural design mechanics of stretchable and flexible inorganic electronics [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(22): 2079-2090.
- Rogers J A, Someya T, Huang Y. Materials and mechanics for stretchable electronics [J]. Science, 2010, 327(5973): 1603-1607.
- Huang Y, Tao J, Meng W, et al. Super-high rate stretchable polypyrrole-based supercapacitors with excellent cycling stability [J]. Nano Energy, 2015, 11: 518-525.
- Yeo W H, Kim Y S, Lee J, et al. Multifunctional epidermal electronics printed directly onto the skin [J]. Advanced Materials, 2013, 25(20): 2773-2778.
- Kim D H, Lu N, Ma R, et al. Epidermal electronics [J]. Science, 2011, 333(6044): 838-843.
- Segev-Bar M, Haick H. Flexible sensors based on nanoparticles [J]. ACS Nano, 2013, 7(10): 8366-8378.
- Lu F, Zhang H, Mi C. A two-plate capacitive wireless power transfer system for electric vehicle charging applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 964-969.
- Yang Y, El-Baghdadi M, Lan Y, et al. Design methodology, modeling, and comparative study of wireless power transfer systems for electric vehicles [J]. Energies, 2018, 11(7): 1716-1738.
- Aditya K. Analytical design of archimedean spiral coils used in inductive power transfer for electric vehicles application [J]. Electrical Engineering, 2018, 100(3): 1819-1826.
- Budhia M, Covic G A, Boys J T. Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3096-3108.
- Xu S, Zhang Y, Cho J, et al. Stretchable batteries with self-similar serpentine interconnects and integrated wireless recharging systems [J]. Nature Communications, 2013, 4: 1543-1551.
- Dang W, Manjakkal L, Navaraj W T, et al. Tretchable wireless system for sweat PH monitoring [J]. Biosensors & Bioelectronics, 2018, 107: 192-202.
- Chung H U, Kim B H, Lee J Y, et al. Binodal, wireless epidermal electronic systems with in-sensor analytics for neonatal intensive care [J]. Science, 2019, 363(6430): 947-959.
- Wang C, He C, Huang Z, et al. Materials and structures toward soft electronics [J]. Advanced Materials, 2018, 30(50): 1801368.
- Liu J, Deng Q, Czarkowski D, et al. Frequency optimization for inductive power transfer based on AC resistance evaluation in litz-wire coil [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2355-2363.
- 卢秋朋,张清鹏,秦润杰.传输线中趋肤效应的介绍及仿真 [J].电子测量技术,2015,38(6):27-30.
Lu Qiupeng, Zhang Qingpeng, Qin Runjie. Introduction and simulation of skin effects in transmission lines [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(6): 27-30.
- 吴德会,游德海,柳振凉,等.交流漏磁检测法趋肤深度的机理与实验研究 [J].仪器仪表学报,2014,35(2):327-336.
Wu Dehui, You Dehai, Liu Zhenliang, et al. Mechanism and experimental study on skin depth of AC magnetic flux leakage detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(2): 327-336.
- Su Y, Ping X, Yu K, et al. In-plane deformation mechanics for highly stretchable electronics [J]. Advanced Materials, 2017, 29(8): 1604989.
- Liu H, Xue R, Hu J, et al. Systematic study on the mechanical and electric behaviors of the nonbuckling interconnect design of stretchable electronics [J]. Science China-Physics Mechanics & Astronomy, 2018, 61(11): 114611.
- 任露泉.试验优化设计与分析方法 [M].北京:高等教育出版社,2003:10-55.
Ren Luquan. Experimental optimization design and analysis method [M]. Beijing: Higer Education Press, 2003: 10-55.