

跑道型松耦合变压器在电梯轿厢无线供电系统中应用研究

林清华

(莆田学院机电工程学院, 福建 莆田 351100)

摘要: 采用无线电能传输系统对电梯轿厢进行供电, 可有效解决传统轿厢随行电缆供电方式所带来的长、重、接触不可靠和成本高等缺陷。电梯轿厢沿固定导轨停靠在目的地, 垂直安装在轿厢顶部的接收线圈与安装在井道壁的发射线圈仅存在上下偏差, 无前后左右偏差。对此, 提出一种跑道型松耦合变压器, 改善电梯轿厢无线电能传输系统的一维抗偏性能。仿真结果表明, 跑道型松耦合变压器的一维抗偏性能是等效圆盘型松耦合变压器的 1.17 倍。为对比松耦合变压器的耦合性能, 提出等效线圈外半径的概念。实验结果表明, 在线圈间距为等效线圈外半径的 88% 时, 采用跑道型松耦合变压器所构成的无线电能传输系统的一维抗偏性能达到等效线圈外半径的 62%。

关键词: 跑道型松耦合变压器; 抗偏移性能; 耦合系数; 等效线圈外半径; 电梯

Research on racetrack type loosely coupled transformer used in wireless power transfer system of elevator car

LIN Qinghua

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Putian University, Putian 351100, China)

Abstract: Using cable to deliver power to moveable elevator car will bring questions such as length, heavy, unreliable connection and high cost. Introduce wireless power transfer in elevator car can remove these obstacles. After elevator stopped, the car just has misalignment in one dimension. By this, the racetrack type loosely coupled transformer is designed to improve the resistance of misalignment in WPT which is used in elevator car. External radius of equivalent coil is adapted to judge coupling coefficient of loosely coupled transformer. Simulation result shows the resistance of misalignment of racetrack type loosely coupled transformer is 1.17 times of round type loosely coupled transformer. Experiment result shows that the resistance of misalignment of racetrack type loosely coupled transformer can reach 62% of external radius of equivalent coil when the distance of two coils is 88% of external radius of equivalent coil.

Key words: racetrack type loosely coupled transformer; resistance of misalignment; coupling coefficient; external radius of equivalent coil; elevator

0 引言

作为高层建筑内必备的垂直交通工具, 电梯

给高楼内人们的出行带来极大便利, 其安全性能也受到大众的广泛关注。电梯轿厢作为与乘客直接接触的部件, 其安全性能更需重点考虑。电梯轿厢内的控制显示面板、照明通风以及轿顶门机

福建省科技厅项目(2017J01711)

等用电设备的移动供电目前采用随行电缆供电方式。但对于高层电梯而言,采用随行电缆进行移动供电存在长、重、接触不可靠以及成本高等缺陷,高层电梯轿厢的安全供电问题亟需解决。无线充电技术具有操作灵活、无拔插安全性能高和工作环境要求低等优点,广泛应用于医疗、消费电子及新能源汽车等领域。本文研究无线充电技术在高层电梯轿厢供电系统中的应用,将无线输电系统的发射端安装在电梯井道内,接收端安装在电梯轿厢顶部,跟随轿厢移动,系统通过磁共振技术将电能无接触地输送到电梯轿厢内的储能系统,供轿厢内用电设备使用。

文献[1-2]从磁耦合结构、补偿网络和系统建模等方面综合论述了无线充电技术在新能源汽车中的应用概况。文献[3]从双线圈到多线圈应用,论述了无线输电系统在中等传输距离下最大传输效率控制和最大传输功率控制在不同场合中的应用。文献[4]综合论述了无线充电系统在电动汽车静态和动态充电中的应用,指出无线充电系统可有效解决电动汽车电池的技术瓶颈,延长电动汽车的续航。文献[5]提出基于 PCB 的绕组结构,改进了旋转式松耦合变压器的耦合系数和传输效率比。文献[6]在文献[7]的基础上,提出带电磁屏蔽绕组的混合绕制的非接触变压器结构,提升了松耦合变压器的耦合系数。文献[8]采用梯形绕组的方式,在 48 mm 的间隙下,将松耦合变压器的耦合系数提升到 0.45。文献[9]设计了能够调频调压的无线输电系统最大传输效率测试系统。文献[10]提出一种正交拾电器,改善系统的耦合系数,提升横向偏差容忍度。

本文研究无线充电技术在高层电梯轿厢供电系统中的应用,用于解决高层电梯轿厢的安全供电问题。电梯运行时,轿厢沿安装在井道内的固定导轨上下移动,并在厅门处停止。电梯轿厢在目的地停止后,安装在轿厢顶部的接收线圈与井道内的发射线圈只存在上下方向的偏差。由于轿厢被轨道限制的原因,接收线圈和发射线圈无前后左右的偏差,即电梯轿厢无线充电系统仅具有一维偏置的特点。据此,提出了跑道型松耦合变

压器用于改进电梯轿厢无线供电系统的一维抗偏性能。为对比跑道型松耦合变压器的耦合性能,提出了等效线圈外半径的概念,用于对比跑道型松耦合变压器和圆盘型松耦合变压器的耦合性能。采用 ANSYS 软件仿真对比两种松耦合变压器在不同线圈间距、不同线圈偏置场合的线圈互感量和耦合系数。最后,搭建了相应的实验平台,用于验证所提出的基于跑道型松耦合变压器的电梯轿厢无线充电技术的可行性和有效性。

1 松耦合变压器等效模型分析

电梯轿厢无线供电系统的松耦合变压器间隙较大,设计要求松耦合变压器发射线圈和接收线圈底盘面积不超过 40 000 mm²,线圈之间间距不小于 100 mm。对于大间隙松耦合变压器,采用扁平型发射线圈和接收线圈可获得较高的互感性能。为简便分析,采用如图 1 所示的松耦合变压器,其一次侧和二次侧线圈分别由 1 匝的中心对称空心圆盘线圈构成,该松耦合变压器的互感为^[11]

$$M = \mu_0 \pi r_p r_s \int_0^\infty J_1(kr_p) J_1(kr_s) e^{-kg} dk \quad (1)$$

式中, $J_1()$ 为一阶贝塞尔函数; μ_0 为真空磁导率; r_p 、 r_s 分别为一、二次线圈的半径; g 为一、二次线圈之间的距离。

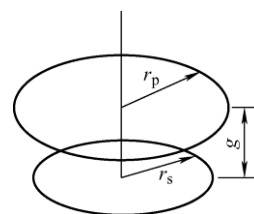


图 1 空心松耦合变压器模型

Fig. 1 Model of air core loosely coupled transformer (LCT)

对式(1)采用椭圆积分求解后,松耦合变压器的互感可表示为

$$M = \frac{2\mu_0 \sqrt{r_p r_s}}{f} \times \left[\left(1 - \frac{f^2}{2}\right) K(f) - E(f) \right] \quad (2)$$

$$K(f) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - f^2 \sin^2 \theta}} \quad (3)$$

$$E(f) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - f^2 \sin^2 \theta} d\theta \quad (4)$$

式中, $K()$ 为第一类完全椭圆积分; $E()$ 为第二类完全椭圆积分。

$$f = \sqrt{\frac{4r_p r_s}{g^2 + (r_p + r_s)^2}} \quad (5)$$

无线电能传输系统利用一、二次线圈之间耦合磁场来传递能量。发射线圈所产生的磁场向四周发散, 这有利于接收端的布置, 提升松耦合变压器的抗偏移能力。但向四周发散的磁场, 有可能影响周围其他设备, 需要将磁场限制在其工作区间之内。一种限制线圈磁场分布的方法是在一、二次线圈两边加上高导磁材料, 构成的三明治式松耦合变压器结构如图 2 所示。此时, 松耦合变压器的互感为

$$M = M_0 + M_c \quad (6)$$

式中, M_0 为仅两空心线圈时, 松耦合变压器的互感, 其大小由式(1)确定; M_c 为增加了高导磁材料后, 对松耦合变压器互感的增强部分^[12-13]。

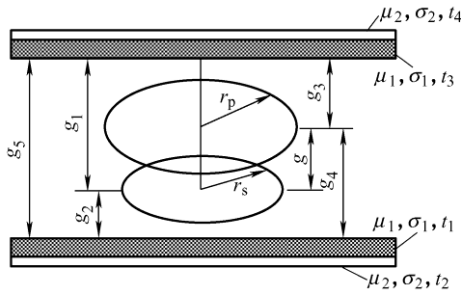


图 2 三明治式松耦合变压器模型

Fig. 2 Model of sandwich LCT

$$M_c = \mu_0 \pi r_p r_s \int_0^\infty J_1(kr_p) J_1(kr_s) [f(\lambda) + h(\lambda)] dk \quad (7)$$

$$f(\lambda) = \frac{\lambda(t_1, t_2) e^{-k(g_2 + g_4)} + \lambda(t_3, t_4) e^{-k(g_1 + g_3)}}{1 - \lambda(t_1, t_2) \lambda(t_3, t_4) e^{-kg_5}} \quad (8)$$

$$h(\lambda) = \frac{2\lambda(t_1, t_2) \lambda(t_3, t_4) e^{-2kg_5} \cosh(kg)}{1 - \lambda(t_1, t_2) \lambda(t_3, t_4) e^{-kg_5}} \quad (9)$$

$$\lambda(t_{i1}, t_{i2}) = \frac{\phi_i(k) + (\theta(t_{i2}) - m / \theta(t_{i2}) + m) e^{-2\eta_i t_{i1}}}{1 + \phi_i(k) + (\theta(t_{i2}) - m / \theta(t_{i2}) + m) e^{-2\eta_i t_{i1}}} \quad (10)$$

$$m = \frac{\mu_i \eta_i}{\mu_2 \eta_1} \quad (11)$$

$$\theta(t_i) = \frac{1 - \phi_i(k) e^{-2\eta_i t_i}}{1 + \phi_i(k) e^{-2\eta_i t_i}} \quad (12)$$

$$\phi_i(k) = \frac{\mu_i - (\eta_i / k)}{\mu_i + (\eta_i / k)} \quad (13)$$

$$\eta_i = \sqrt{k^2 + j \omega \mu_0 \mu_i} \quad (14)$$

通过上述分析可知, 采用高导磁材料可有效约束松耦合变压器的磁场分布, 减少松耦合变压器对周围设备的影响。同时高导磁材料增加了一、二次线圈所产生磁场的互连部分, 能有效增强松耦合变压器的互感。

2 电梯轿厢用松耦合变压器的优化设计

无线电能传输系统通过松耦合变压器不接触地将能量从发射线圈传递到接收线圈, 具有灵活可靠、无磨损和易自动操作等优点。但松耦合变压器发射线圈和接收线圈发生偏移时, 松耦合变压器的耦合性能也随之下降, 极大地影响无线电能传输系统的能量传递性能。在无线电能传输系统的应用场合, 通常将发射线圈和接收线圈做成扁圆盘状, 以获得较好的耦合能力和二维抗偏移能力。但电梯具有其特别的运行特点, 电梯轿厢投入服务后, 轿厢沿井道内固定轨道上下移动, 将对象运输到目的地。轿厢停靠目的地后, 由于轨道的原因, 无线电能传输系统的发射线圈和接收线圈只存在上下偏差, 不存在左右及前后偏差。电梯轿厢无线电能传输系统的发射线圈和接收线圈只存在一维偏置。对此, 本文采用跑道型线圈结构, 提升松耦合变压器的抗偏移能力。

松耦合变压器结构如图 3 所示, 利用仿真软件绘制三组松耦合变压器: 圆盘 I 型松耦合变压器、圆盘 II 型松耦合变压器和跑道型松耦合变压器。三组松耦合变压器的参数如表 1 所示。跑道型松耦合变压器的弯曲部分与圆盘 I 型的参数相同, 所占基底面积与圆盘 II 型基本相当。为对比跑道型松耦合变压器与圆盘型松耦合变压器的性能, 本文提出等效线圈外半径的概念, 其定义为其他类型松耦合变压器的线圈外半径等效于同底面积圆盘型松耦合变压器线圈的外半径。

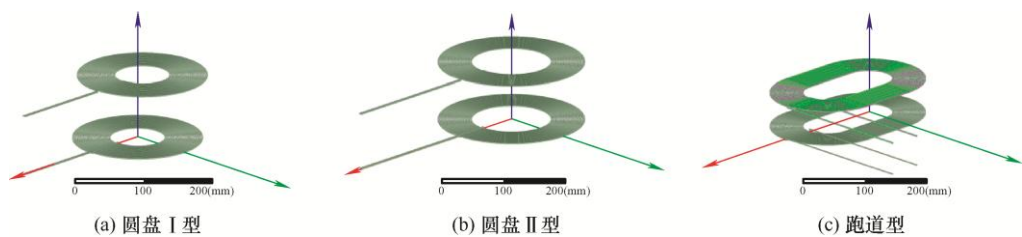


图 3 松耦合变压器结构
Fig. 3 Structure of LCT

表 1 松耦合变压器参数
Tab.1 Parameter of LCT

	圆盘 I 型	圆盘 II 型	跑道型
内半径/mm	40	65	40
外半径/mm	97.5	122.5	97.5
直线部分/mm	—	—	100
基底尺寸/mm	200×200	245×245	200×300
线径/mm	1	1	1
匝数/匝	23	23	23
线圈面积/mm ²	24 838	33 870	36 338
总面积/mm ²	40 000	60 025	60 000
一二次边间距/mm	100	100	100

仿真实验分别从松耦合变压器的线圈间距(无偏置)和线圈偏置(固定间距)两个方面对比三

组松耦合变压器的性能。
2.1 线圈间距改变对松耦合变压器的耦合性能影响

三组松耦合变压器的一、二次线圈间距在 50~140 mm 之间变化时,线圈间距变化范围相当于圆盘 I 型松耦合变压器线圈外半径的 51.3%~143.6%;相当于圆盘 II 型松耦合变压器线圈外半径的 40.8%~114.3%。在该变化范围,三组松耦合变压器的仿真结果如表 2 所示,间距变化对耦合系数的影响如图 4 所示。

表 2 间距变化时松耦合变压器仿真结果
Tab. 2 Simulation results of LCT as the gap changes

间距/mm	圆盘 I 型			圆盘 II 型			跑道型		
	漏感/ μH	互感/ μH	耦合系数	漏感/ μH	互感/ μH	耦合系数	漏感/ μH	互感/ μH	耦合系数
50	64.95	14.02	0.216	99.22	25.84	0.260	99.85	23.94	0.240
60	68.69	12.34	0.180	105.63	23.89	0.226	106.91	22.27	0.208
70	71.36	10.63	0.149	110.34	21.62	0.196	112.18	20.31	0.181
80	73.30	9.05	0.123	113.85	19.29	0.169	116.29	18.27	0.157
90	74.68	7.64	0.102	116.46	17.04	0.146	119.41	16.28	0.136
100	75.72	6.42	0.085	118.43	14.96	0.126	121.84	14.42	0.118
110	76.49	5.38	0.070	119.95	13.08	0.109	123.73	12.7	0.103
120	77.07	4.51	0.058	121.10	11.41	0.094	125.25	11.15	0.089
130	77.52	3.78	0.049	122.01	9.94	0.081	126.43	9.76	0.077
140	77.84	3.16	0.040	122.69	8.65	0.071	127.35	8.54	0.067

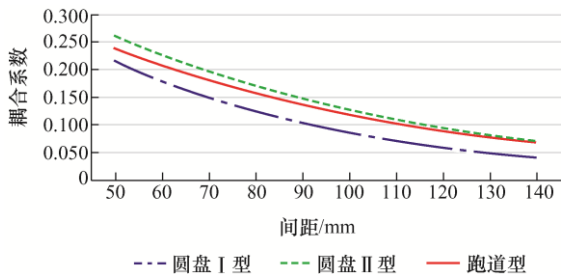


图 4 间距变化对耦合系数的影响
Fig. 4 Influence of coupling coefficient when gap changes

仿真结果表明,松耦合变压器的线圈间距从 50 mm 增加到 140 mm,松耦合变压器的线圈互感量减小,耦合性能下降,自身漏感量增加。对比三组数据可以得出:

1) 在线圈间距变化整个范围,圆盘 II 型松耦合变压器的耦合系数均优于圆盘 I 型松耦合变压器。说明在相同间距下,发射线圈和接收线圈的直径越大,松耦合变压器的耦合性能就越好。

2) 在间距变化的整个范围,圆盘 II 型松耦合变压器的耦合系数略优于跑道型松耦合变压器,是跑道型松耦合变压器的 1.05~1.08 倍。说明在相同间距、相同底盘面积下,圆盘型松耦合变压器的耦合性能优于跑道型松耦合变压器。但对比图 4 中三条曲线的趋势,随着两线圈间距的增加,跑道型松耦合变压器的耦合性能接近圆盘 II 型松耦合变压器的耦合性能,跑道型松耦合变压器的耦合性能可以接受。

2.2 线圈偏置对松耦合变压器的耦合性能影响

圆盘 II 型松耦合变压器的线圈为中心对称,在二维平面内 X 轴方向偏置和 Y 轴方向偏置一致,

因此圆盘 II 型松耦合变压器只仿真 X 轴(长轴)方向偏置情况。跑道型松耦合变压器的 X 轴偏置模拟轿厢停车时上下方向偏差引起的线圈偏置;同时也仿真了跑道型松耦合变压器在 Y 轴(短轴)方向的偏置情况。设定圆盘 II 型松耦合变压器和跑道型松耦合变压器的发射线圈和接收线圈之间的间距为等效线圈外半径的 81.6%,即 100 mm,偏置距离为圆盘 II 型松耦合变压器线圈外半径的 0%~106.1%,即 0~130 mm 之间变化时,松耦合变压器的仿真结果如表 3 所示,偏置变化时耦合系数的影响如图 5 所示。

表 3 偏置变化时松耦合变压器仿真结果
Tab. 3 Simulation results of LCT as coils misalignment

偏置/mm	圆盘 II 型偏置			跑道型 X 轴偏置			跑道型 Y 轴偏置		
	漏感/ μH	互感/ μH	耦合系数	漏感/ μH	互感/ μH	耦合系数	漏感/ μH	互感/ μH	耦合系数
0	118.43	14.96	0.126	121.84	14.42	0.118	122.08	13.75	0.113
10	118.63	15.00	0.126	121.90	14.38	0.118	122.66	13.94	0.114
20	118.80	14.77	0.124	121.91	14.18	0.116	123.08	13.74	0.112
30	118.91	14.31	0.120	121.95	13.83	0.113	123.42	13.20	0.107
40	119.00	13.62	0.114	121.98	13.34	0.109	123.66	12.36	0.100
50	119.05	12.74	0.107	121.99	12.74	0.104	123.85	11.27	0.091
60	119.12	11.72	0.098	122.02	12.04	0.099	124.00	9.99	0.081
70	119.17	10.58	0.089	121.99	11.25	0.092	124.12	8.59	0.069
80	119.21	9.37	0.078	122.00	10.41	0.085	124.20	7.13	0.057
90	119.23	8.11	0.068	122.02	9.53	0.078	124.29	5.66	0.046
100	119.23	6.85	0.057	122.04	8.62	0.071	124.36	4.25	0.034
110	119.30	5.62	0.047	122.02	7.70	0.063	124.43	2.92	0.023
120	119.33	4.43	0.037	122.06	6.78	0.056	124.48	1.73	0.014
130	119.33	3.32	0.028	122.03	5.86	0.048	124.54	0.68	0.006

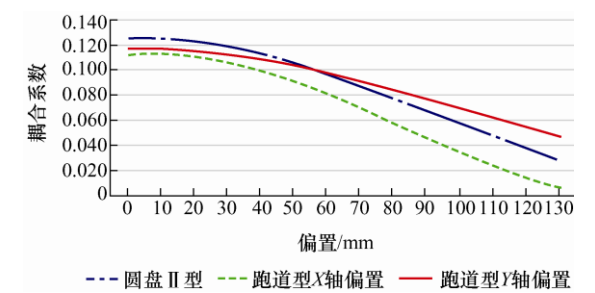


图 5 偏置变化对耦合系数的影响
Fig. 5 Influence of coupling coefficient when coils misalignment

在线圈偏置为零,表 3 仿真结果中跑道型松耦合变压器 X 轴偏置初始值和 Y 轴偏置初始值不

同,其原因是仿真施加激励的引出线布置的位置不同,不影响整体的判断。仿真结果表明,当线圈间距固定为 100 mm 时,松耦合变压器的发射线圈和接收线圈之间偏置变化范围为等效线圈外半径的 25%之内,发射线圈和接收线圈之间耦合性能基本不变,耦合系数偏差在 5%之内。在线圈间距为等效线圈外半径的 82%,此处为 100 mm 时,跑道型松耦合变压器的一维偏置容忍度达到等效线圈外半径的 67%,此处为 82 mm,是圆盘 II 型的 117%。因此在一维偏置上,同底面积的跑道型松耦合变压器耦合性能优于圆盘 II 型松耦合变压器。

对于电梯轿厢用松耦合变压器，由于轿厢沿固定轨道上下移动，因此只会在 X 方向有较大的偏置，在其他方向的偏置极小。跑道型松耦合变压器和圆盘 II 型松耦合变压器的仿真结果表明，随着线圈间距的增加，跑道型松耦合变压器的耦合性能接近于圆盘 II 型；而跑道型松耦合变压器的单维度偏置容忍度表现优于圆盘 II 型，因此跑道型松耦合变压器适合于电梯轿厢的无线电能传输系统。

3 实验验证

本文对电梯轿厢无线供电系统中松耦合变压器进行了优化设计，采用跑道型扁平线圈提升松耦合变压器在一维偏置中的耦合性能。根据上述分析，对所采用的跑道型松耦合变压器的无线电能传输系统搭建了相应平台并进行了实验。跑道型松耦合变压器线圈用 $0.01\text{ mm} \times 300$ 股的 LITZ 线绕制 22 匝，线圈内半径为 40 mm，外半径为 95 mm，直线段长度为 80 mm，线圈衬底为 $190\text{ mm} \times 270\text{ mm}$ 。根据前文的设计，本次设计的跑道型松耦合变压器的等效线圈外半径为 113 mm。跑道型松耦合变压器的发射线圈和接收线圈采用相同的对称结构，两线圈外侧采用 $85\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚) 的锰锌铁氧体磁心进行磁屏蔽，每侧分布 12 根磁心，并摆成类“米”字形以减轻重量。在线圈间距为其等效线圈外半径的 88.5% (此处为 100 mm)，线圈偏置分别为其等效线圈外半径的 0% 和 62% (此处为 70 mm) 时，检测跑道型松耦合变压器的自感量、互感量和耦合系数大小，如表 4 所示。线圈偏置分别为其等效线圈外半径的 62%，松耦合变压器的互感系数下降为 72.7%，与仿真结果相符。

表 4 线圈偏置时跑道型松耦合变压器参数

Tab. 4 Parameter of racetrack type LCT when coils misalignment

	偏置 0 mm	偏置 70 mm
线圈间距/mm	100	100
发射端自感量/ μH	160.6	160.1
接收端自感量/ μH	160.0	159.6
互感量/ μH	27.6	20.0
耦合系数	0.172	0.125

由于松耦合变压器的耦合系数较低，发射线

圈和接收线圈存在较大的漏感，需用电容进行补偿。根据电容补偿的位置和连接方法，电容补偿可分为串联-串联(SS)、串联-并联(SP)、并联-串联(PS)和并联-并联(PP)四种补偿方式^[14-18]。本文所搭建的无线电能传输测试平台，采用串联-串联补偿方式，补偿电容采用单体 4.70 nF、耐压 700 V 的薄膜电容，由 4 个串联成一组，5 组并联组成容量为 5.88 nF、耐压 2 800 V 的电容器。逆变模块采用 4 个 IRFP4868 开关管组成的全桥逆变电路，开关管驱动由 TMS320F28035 模块及 IR2113 驱动模块完成，开关频率设定为 184 kHz，逆变模块的输入直流电压为 120 V。输出全波整流后接至电子负载上，电子负载采用恒电阻工作状态，电阻值恒定为 60 Ω 。系统采用开环控制来测试跑道型松耦合变压器在一维偏置情况下的工作性能。在线圈间距为其等效线圈外半径的 88.5% (此处为 100 mm) 条件下，分别测试了发射线圈和接收线圈偏置其等效线圈外半径的 0% (0 mm)、18% (20 mm)、35% (40 mm)、53% (60 mm) 以及 62% (70 mm) 这五种情况下的输出电压及系统效率，测试结果如图 6 所示。

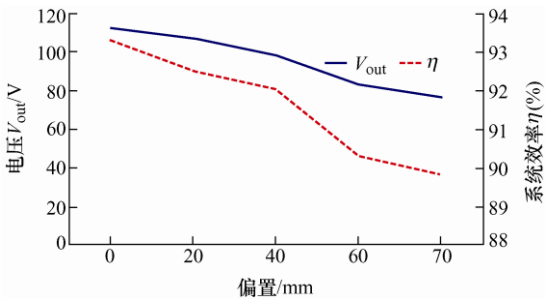


图 6 线圈偏置时输出电压及系统效率

Fig. 6 System output voltage and efficiency when coils misalignment

实验结果表明，随着线圈偏置量的增加，无线充电系统的输出电压从 112.4 V 下降到 76.3 V，系统效率从 93.3% 降到 89.8%。输出电压下降是由于系统的耦合状态变差，在输出端感应的电压也变小。在跑道型松耦合变压器的偏移达到等效线圈外半径的 62% 时，无线充电系统的输出可达其预期的 68%，接近其输出的 0.7 倍，与仿真结果相符。无线电能传输系统的发射线圈

和接收线圈偏移 70 mm 时, 电路的关键波形如图 7 所示。

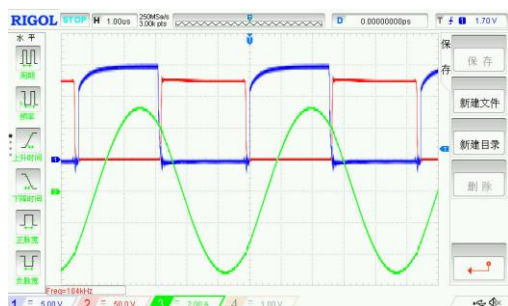


图 7 偏置 70 mm 时电路关键波形
Fig. 7 Key waveform of circuit when coils misalignment 70 mm

图 7 中, 波形 1 为逆变模块下开关管的驱动电压波形, 波形 2 为该开关管漏源两端的电压波形, 波形 3 为一次电流波形。从图 7 中可以看出, 逆变模块的开关管工作在零电压导通状态, 有利于提升系统效率。

4 结束语

本文采用无线充电技术为电梯轿厢供电, 有效避免高层电梯轿厢随行电缆供电所带来的长、重、接触不可靠及成本高等缺陷, 解决高层电梯轿厢的安全供电问题。建立了松耦合变压器的等效模型, 推导了松耦合变压器线圈互感的表达式。根据电梯轿厢无线供电仅一维偏置的特点, 提出采用跑道型松耦合变压器, 提升松耦合变压器在一维偏置上的耦合性能。为对比跑道型松耦合变压器的耦合性能, 提出了等效线圈外半径的概念, 即同底面积圆盘型松耦合变压器线圈的外半径。ANSYS 仿真结果表明, 在线圈间距为等效线圈外半径的 81.6% 时, 跑道型松耦合变压器的一维偏置达到等效线圈外半径的 67%, 是圆盘 II 型松耦合变压器的 117%。最后搭建对应实验平台, 验证了基于跑道型松耦合变压器的无线充电系统在各种线圈偏置下的系统特性。实验结果表明, 在线圈间距为其等效线圈外半径的 88.5% 条件下, 跑道型松耦合变压器的偏移达到等效线圈外半径的 62%。

参考文献

- [1] 吴理豪, 张波. 电动汽车静态无线充电技术研究综述 (上篇)[J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1153-1165.
- [2] 吴理豪, 张波. 电动汽车静态无线充电技术研究综述 (下篇)[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1662-1678.
- [3] HUI S Y R, ZHONG W X, LEE C K. Critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 4500-4511.
- [4] LI siqi, MI C C. Wireless power transfer for electric vehicle applications[J]. Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 4-17.
- [5] 杨玉岗, 吴瑶, 黄伟义. 旋转式松耦合变压器的绕组优化设计[J]. 电工技术学报, 2019, 34(13): 2782-2792.
- [6] 侯佳, 陈乾宏, 任小永. 一种带电磁屏蔽的绕组混合绕制非接触变压器[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 91-96.
- [7] 张巍, 陈乾宏, WONG S C, 等. 新型非接触变压器的磁路模型及其优化[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 108-116.
- [8] 徐罗那, 杜玉梅, 史黎明. 非接触变压器磁路模型及结构优化[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(1): 15-22.
- [9] 丰江波, 李岩松, 赵蒙蒙, 等. 基于松耦合变压器的效率测试系统设计[J]. 电测与仪表, 2018, 55(13): 111-116.
- [10] 樊亚超, 王景芹, 崔玉龙, 等. 感应耦合电能传输系统正交拾电器的设计研究[J]. 现代电子技术, 2019, 42(22): 26-29.
- [11] HURLEY W G, DUFFY M C. Calculation of self and mutual impedances in planar magnetic structures[J]. IEEE Transactions on Magnetics 1995, 31(4): 2416-2422.
- [12] HURLEY W G, DUFFY M C. Calculation of self-and mutual impedances in planar sandwich inductors[J]. IEEE Transactions on Magnetics. 1997, 33(3): 2282-2290.

(下转第 89 页)

类负荷的功率密度,在进行初步电气设计估算负荷时可以作为一种辅助手段提供优质参考。

参考文献

- [1] 建设部工程质量安全监督与行业发展司. 全国民用建筑工程设计技术措施(节能专篇建筑 2007)[M]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [2] 商店建筑电气设计规范: JGJ 392—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [3] 武松, 潘发明. SPSS 统计分析大全[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [4] 郭睿, 沈怿焯, 叶傲霜. 电/气能源消耗与温度的相关性研究[J]. 能源工程, 2016(3): 74-78.

- [5] 李炳华, 覃剑戈, 岳云涛, 等. 充电主机系统需要系数的研究[J]. 建筑电气, 2017, 36(5): 6-10.
- [6] 博斯劳统计学及其应用[M]. 孙怡帆, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2016.

作者简介:



常昊

常昊(1996—), 硕士研究生, 主要研究方向为照明优化、建筑电气与智能化。

(收稿日期: 2021-01-12)EA

(上接第 28 页)

- [13] SU Y P, LIU X, RON HUI S Y. Mutual inductance calculation of movable planar coils on parallel surfaces[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(4): 1115-1123.
- [14] 陈庚, 陈渊睿, 吴飞. 适用于分段动态无线充电的变间距抗偏移结构[J]. 电力电子技术, 2020, 54(5): 28-31.
- [15] 谭菊华, 李晓芳, 郭小春. 磁耦合谐振式电动汽车无线充电线圈设计与优化分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(1): 84-89.
- [16] 郑端端, 陈为, 陈庆彬. 无线充电平面螺旋线圈变匝宽新方案分析与优化[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 1215-1223.
- [17] 王宏远. 高速旋转部件非接触感应电能传输装置设

计[J]. 现代电子技术, 2015, 38(24): 111-113.

- [18] 吝伶艳, 方成刚, 宋建成, 等. 磁谐振无线输电系统不同补偿方式的传输特性[J]. 电机与控制学报, 2019, 39(4): 1215-1223.

作者简介:



林清华

林清华(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力电子与电力传动、特种设备节能。

(收稿日期: 2020-08-18)EA