商业建筑电气负荷密度调查与分析

常 昊[1]，李炳华[1,2]，王 成[1]，朱心月[1]，岳云涛[1]

(1. 北京建筑大学，北京 100044；

2. 悉地(北京)国际建筑设计顾问有限公司，北京 100013)

摘要：针对目前商业建筑各类负荷的功率密度资料欠缺，通过调研国内大型商业建筑各类负荷的数据，并利用统计学分析得到了动力系统、空调系统以及照明系统负荷的功率密度的选取范围建议值和各类负荷所占比例的推荐值，并且将总建筑面积与各类负荷进行了相关性分析。结果表明总安装容量和总计算有功功率与建筑面积的相关性较强，且呈现显著的线性相关关系，这将为商业建筑电气方案设计提供参考。

关键词：民用建筑；负荷分布；相关性分析；区间估计

Investigation and analysis on electrical load density of commercial buildings

CHANG Hao[1], LI Binghua[1,2], WANG Cheng[1], ZHU Xinyue[1], YUE Yuntao[1]

(1. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. CCDI Group(Beijing), Beijing 100013, China)

Abstract: In view of the lack of power density data of all kinds of loads in commercial buildings, the data of all kinds of loads in large-scale commercial buildings in China is investigated, and statistical analysis are used to obtain the recommended value of the selection range of power density of power, air conditioning and lighting loads and the recommended value of the proportion of all kinds of loads, and a correlation analysis between the total building area and all kinds of loads is made. The results show that the total installed capacity and the total calculated active power have a strong correlation with the building area and show a significant linear correlation, which will provide a reference for the electrical design of commercial buildings.

Keyword: civil building; load distribution; correlation analysis; interval estimation.

0 引言

随着我国经济社会的快速发展，为满足人们日益提高的生活需求，商业建筑作为商业发展应运而生，一般包括百货商场、大型超市、精品购物街、次主力店和沿街商铺等多种业态。商业建筑中的负荷主要包括动力系统、空调系统以及照明系统等负荷。本文调研了全国 24 个商业建筑，分析出动力系统、空调系统以及照明系统负荷的装机容量密度和各类负荷占比的推荐范围，这将为制定有序高效的用电方案提供优质参考。

1 商场建筑的负荷指标

商场建筑用电负荷指标在《全国民用建筑工程设计技术措施节能专篇(2007) 电气》[1]和 JGJ 392—2016 《商店建筑电气设计规范》[2]中均有涉及，前者建议大中型商业用电负荷指标为 60 ～ 120 W/m^2，而 JGJ 392—2016 中商店建筑的单位建筑面积用电指标如表 1 所示。

表 1 商店建筑的单位建筑面积用电指标

Tab. 1 Electricity consumption index per unit building area of shop buildings

商店建筑类别		用电指标/(W/m²)	
购物中心、超级市场、百货商场	大型购物中心、超级市场、高档百货商场	100～200	
	中型购物中心、超级市场、百货商场	60～150	
	小型超级市场、百货商场	40～100	
	家电卖场	100～150 (含空调系统冷源负荷)	60～100 (不含空调主机综合负荷)
	零售	60～100 (含空调系统冷源负荷)	40～80 (不含空调主机综合负荷)
步行商业街	餐饮	100～250	
	精品服饰、日用百货	100～250	
专业店	高档商品专业店	100～250	
	一般商品专业店	100～250	
商业服务网点		100～150(含空调系统负荷)	
菜市场		10～20	

注：表中所列用电指标中的上限值是按空调系统冷水机组采用电动压缩式机组时的数值，当空调系统冷水机组选用吸收式制冷设备(或内燃机)时，用电指标可降低 25～35 V • A。

2 调研对象

在 JGJ 48—2016《商店建筑设计规范》中，商店建筑是指为商品直接进行买卖和提供符合供给的公共建筑。本文所述的商业建筑包括商业综合体，是将城市中商业、办公、居住、旅店、展览、餐饮、会议和文娱等城市生活空间的三项以上功能进行组合，并在各部分间建立一种相互依存、相互裨益的能动关系，从而形成一个多功能、高效率以及复杂而统一的综合体。本文调查的 25 个商业建筑包括商业综合体，其建筑电气数据如表 2 所示。

表 2 商业建筑相关数据

Tab. 2 Commercial building related data

地点	建筑高度/m	地下层数/层	地上层数/层	总建筑面积/m²	总安装容量/kW	总计算有功功率/kW
深圳市	99.8	4	20	50 748	8 129	4 590
天津市	31.8	1	3	53 606	3 818	3 169
上海市	31.95	2	9	92 805.18	12 598.00	6 224.00
上海市	68.5	3	18	127 835.1	17 209	9 330
南宁市	215.35	5	50	130 341.1	12 034.56	9 288.28
苏州市	99.7	2	26	134 558.5	16 593	13 140
杭州市	91	3	24	139 467	12 896	8 259
郑州市	98.9	3	25	140 873.9	12 765	9 369
昆明市	220	3	50	148 629	16 600	8 900
日照市	128.3	2	34	156 370	9 500	7 220
福州市	273.88	3	58	167 878	24 001	13 987
宜兴市	30	—	5	188 600	23 220	12 539
无锡市	41.6	—	42	190 000	19 667	14 068
赣州市	27.6	2	5	196 750.2	21 200	14 464
上海市	292.8	3	60	197 140	29 094	17 456
广州市	309.4	4	68	210 477	24 683	14 313
济南市	150.1	3	33	223 000	15 512	12 100
深圳市	302.95	3	61	233 901	30 649.13	18 048.41
天津市	95.85	2	19	240 000	20 100	15 500
上海市	85	4	15	280 000	29 900	19 584
南昌市	300	3	59	290 000	39 527	23 680
广州市	200	4	45	292 183	35 000	24 786
上海市	41.9	—	—	342 527	49 523	30 079
广州市	100	2	29	408 400	39 150	28 188

3 数据分析

3.1 线性回归模型

对本文调研的商业建筑各类负荷数据，首先进行相关性分析，从而衡量出两个变量之间的相关密切程度。本文使用 Spearman 相关系数[3]来衡量两个变量相关性，它是衡量两个变量的依赖性的非参数指标。若相关系数越接近 1，则二者呈现正相关；越接近-1，则二者呈现负相关。若相关系数的绝对值越接近 1，则二者的相关性越强。并使用 Sig 双侧检验来说明其显著性，若 Sig<0.01 则说明相关性是显著的，如表 3 所示。可以看出建筑面积与总计算有功功率、空调系统负荷、照明系统负荷和总安装容量呈现显著的相关性，因此可以对其建立线性回归模型。

表 3　相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis

负荷类别	相关性系数	显著性检验
总安装容量	0.895	0.000 4
总计算有功功率	0.948	0.000 5
动力负荷	0.731	0.000 6
空调负荷	0.804	0.000 2
照明负荷	0.687	0.000 8

利用本文调研所得到的数据，将总建筑面积与总计算有功功率、总安装容量、动力负荷、空调系统负荷和照明负荷这几个指标之间进行线性相关分析，并对其功率密度进行结算。在这 24 组商业建筑负荷数据中，总建筑面积(x)和总计算有功功率(y_1) 、总安装容量(y_2)、动力负荷(y_3)、空调系统负荷(y_4)和照明系统负荷(y_5)的线性回归方程如下

$$y_1 = 0.078x - 1065 \quad R^2=0.90 \tag{1}$$

$$y_2 = 0.116x - 659 \quad R^2=0.80 \tag{2}$$

$$y_3 = 0.029x + 133 \quad R^2=0.53 \tag{3}$$

$$y_4 = 0.053x - 1\ 717 \quad R^2=0.65 \tag{4}$$

$$y_5 = 0.037x + 172 \quad R^2=0.47 \tag{5}$$

式中，R^2 为相关系数 R 的二次方，若 R^2 越接近 1，则二者的线性关系越强，结果如图 1 和图 2 所示。

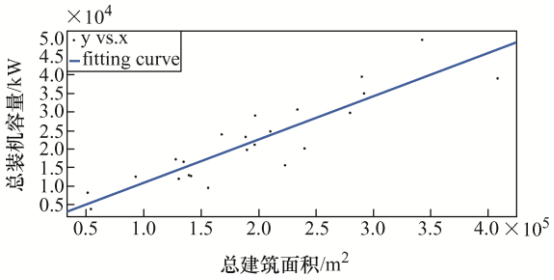


图 1　总安装容量拟合结果

Fig. 1 Fitting results of total installed capacity

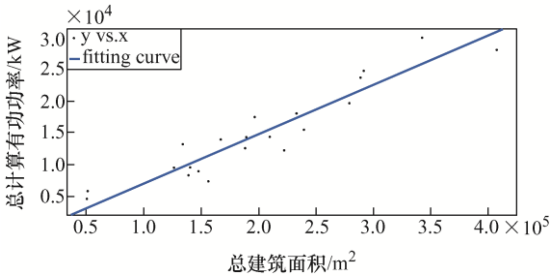


图 2　总计算有功功率拟合结果

Fig. 2 Fitting results of total calculated active power

由总计算负荷、总安装容量与总建筑面积的决定系数 R^2≥0.8 可知，这两个线性回归模型具有很强的线性相关关系，所以对其进行回归分析。并且进行了 Sig 双侧检验，Sig<0.000 1，故模型是有效的，回归方程分别为式(1)和式(2)。

可以使用此方程对建筑的总安装容量密度和总计算有功功率密度进行估算，并对其进行误差分析，结果如表 4 所示。虽然拟合效果较为准确，但是每个工程项目都存在其特有的问题和要求，会存在差异，这里使用此方法提供一种估算时的思路。

表 4 误差分析结果

Tab. 4 Error analysis results

回归评价指标	平均相对误差(MRE)	相关系数(R^2)	均方根误差(RMSE)
总计算有功功率密度	0.14	0.90	12.4
装机总容量功率密度	0.22	0.80	30.9

3.2 各类负荷分析

3.2.1 各类负荷功率密度分析

在本文所调研的商业建筑中，在总安装容量方面最大的功率密度为 160 W/m^2，使用中央空调冷水机组，厨房为电炊具，所以用电功率较大；最小的功率密度为 60 W/m^2。在总计算有功功率方面，最大的功率密度为 99 W/m^2，最小的功率密度为 46 W/m^2。与全国民用建筑工程设计技术措施节能专篇(2007)相吻合，说明可以用来进行电气方案设计阶段时的功率估算。

在大型商业建筑中，动力系统、空调系统和照明系统负荷的占比情况受到许多条件的制约，且与建筑面积的线性相关性不强，难以准确估计用电负荷，故本文进行了统计学分析，求出各类负荷的功率密度区间。

首先进行正态分布检验，若服从正态分布，则计算相应的置信区间，根据数理统计学原理，显著性取值一般为 0.1、0.05 和 0.01 等[5]，其越大则原假设为假的可能性越大。由于样本量较小，且商业内部较为复杂，本文选取 0.1，即得到 90%置信区间。置信区间是一种常用的区间估计方法，所谓置信区间就是分别以统计量的置信上限和置信下限为上下界构成的区间[6]。动力系统、空调系统和照明系统负荷数据正态 Q-Q 图如图 3 所示。

由表 5 可以看出根据 K-S 和 S-W 检验法得到动力系统负荷、空调系统负荷和照明系统负荷的显著性，并其值均大于 0.05 且根据 Q-Q 图(见图 3)，各点均在基准线附近，即样本服从正态分布。利用所得到的均值和标准差借助 SPSS 数据分析软件计算出置信度为 90%的置信区间，如表 6 所示。

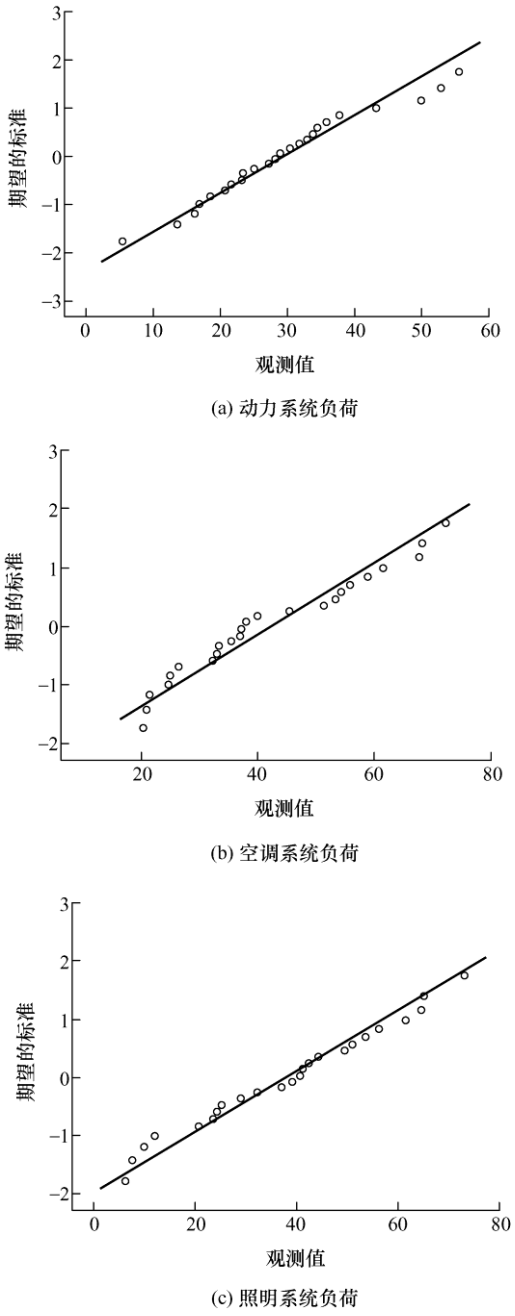


图 3 数据正态 Q-Q 图

Fig. 3 Data normal Q-Q diagram

表 5 数据正态分布检验结果

Tab. 5 Test results of normal distribution of data

检验方法	K-S 检验法			S-W 检验法		
	统计量	自由度	显著性	统计量	自由度	显著性
动力系统负荷密度	0.095	24	0.200	0.972	24	0.710
空调系统负荷密度	0.148	24	0.186	0.935	24	0.128
照明系统负荷密度	0.080	24	0.200	0.970	24	0.655

表 6　置信区间(α=0.10)

Tab. 6 Confidence interval (α=0.10)

项目			统计量/(W/m²)	标准误差
动力系统负荷功率密度	均值		29.42	2.528
	均值的 90%置信区间	下限	25.09	
		上限	33.75	
	5%修整均值		29.26	
	中值		28.50	
空调系统负荷功率密度	均值		42.26	3.299
	均值的 90%置信区间	下限	36.60	
		上限	47.92	
	5%修整均值		41.85	
	中值		37.56	
照明系统负荷功率密度	均值		37.83	3.92
	均值的 90%置信区间	下限	31.10	
		上限	44.56	
	5%修整均值		37.70	
	中值		39.78	

根据 SPSS 数据分析软件结果，商业建筑动力系统负荷功率密度的 90%置信区间为(25.09 W/m^2，33.75 W/m^2)；空调系统负荷功率密度的 90%置信区间为(36.60 W/m^2，47.92 W/m^2)；照明系统负荷功率密度的 90%置信区间为(31.10 W/m^2，44.56 W/m^2)。考虑 1.2 倍的可靠系数，取整可得各类负荷的功率密度推荐值，如表 7 所示。

表 7　各类负荷功率密度推荐值

Tab. 7 Recommended values of power density for various loads

负荷类型	功率密度推荐值/(W/ m^2)
动力系统负荷	30~41
空调系统负荷	44~58
照明系统负荷	37~53

3.2.2　各类负荷占比情况分析

根据本文所调研的数据，在商业建筑中，大部分建筑空调系统负荷占比最大，其次是照明系统负荷，最后是动力系统负荷，如图 4 所示。

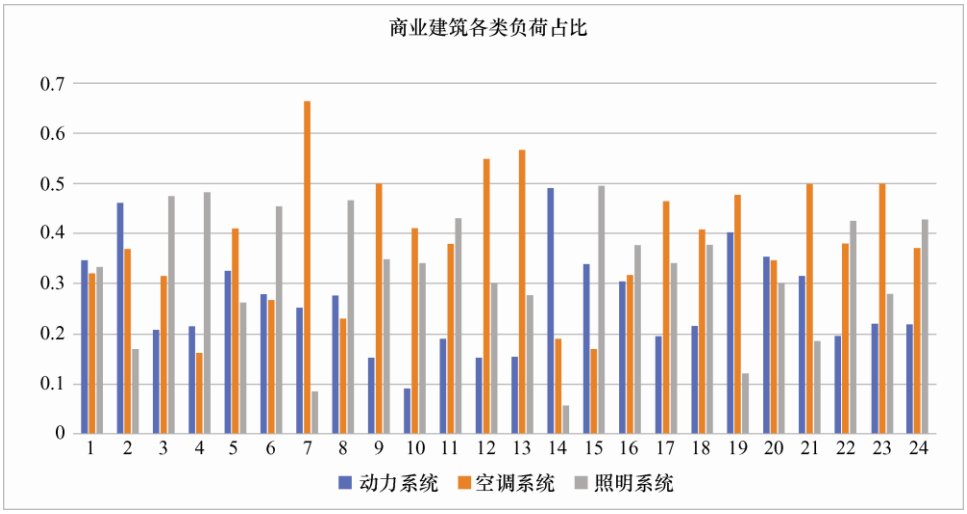


图 4　商业建筑各类负荷功率密度

Fig. 4 Power density of various loads in commercial buildings

依据本文调研所得到的数据进行正态分布检验，而后求出各类负荷所占比重的 90%置信区间，正态分布 Q-Q 图如图 5 所示，正态分布检验如表 8 所示。

由表 8 可以看出，根据 K-S 和 S-W 检验法得到动力系统负荷、空调系统负荷和照明系统负荷的显著性，并其值均大于 0.05。且根据 Q-Q 图(见图 5)，各点均在基准线附近，即样本服从正态分布。利用所得到的均值和标准差借助 SPSS 数据分析软件计算出置信度为 90%的置信区间，如表 9 所示。

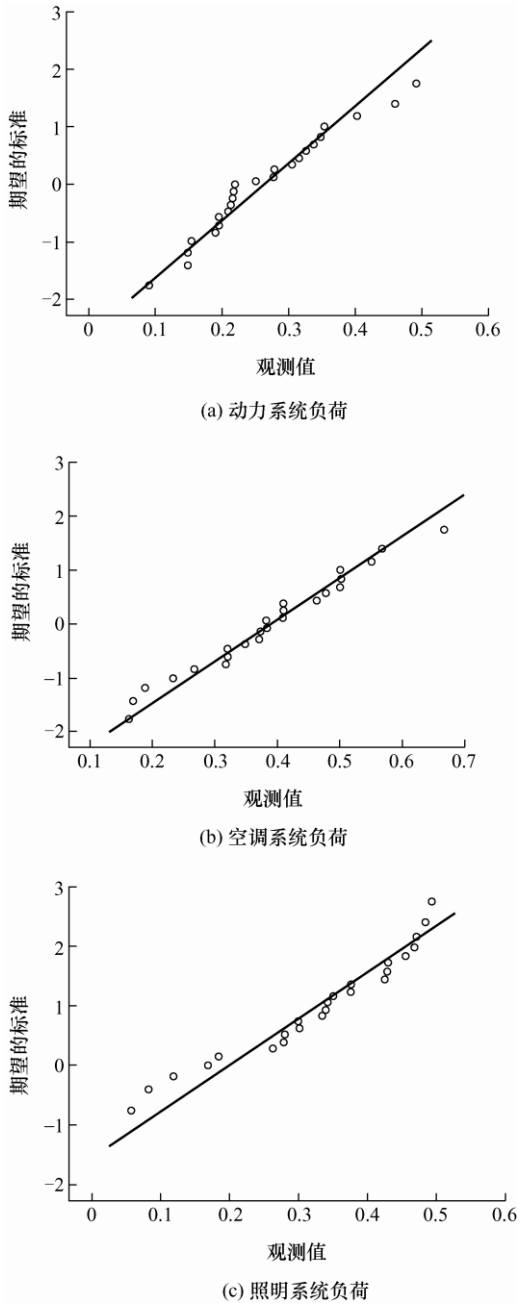


图 5　数据正态 Q-Q 图

Fig. 5 Data normal Q-Q diagram

表 8　数据正态分布检验结果

Tab. 8 The test results of data normal distribution

检验方法	K-S 检验法			S-W 检验法		
	统计量	自由度	显著性	统计量	自由度	显著性
$P_{动力}/P_{总安装容量}$	0.170	24	0.069	0.958	24	0.399
$P_{空调}/P_{总安装容量}$	0.093	24	0.200	0.977	24	0.845
$P_{照明}/P_{总安装容量}$	0.116	24	0.200	0.933	24	0.108

表 9　置信区间(α=0.10)

Tab. 9 confidence interval(α=0.10)

项目			统计量	标准误差
$P_{动力}/P_{总安装容量}$	均值		0.264 5	0.020 58
	均值的 90%置信区间	下限	0.229 2	
		上限	0.299 8	
	5%修整均值		0.262 1	
	中值		0.235 7	
$P_{空调}/P_{总安装容量}$	均值		0.386 6	0.026 36
	均值的 90%置信区间	下限	0.341 4	
		上限	0.431 7	
	5%修整均值		0.384 5	
	中值		0.380 0	
$P_{照明}/P_{总安装容量}$	均值		0.325 2	0.026 09
	均值的 90%置信区间	下限	0.280 4	
		上限	0.369 9	
	5%修整均值		0.330 5	
	中值		0.341 1	

综上所述，动力系统负荷的所占比重为0.23～0.30；空调系统负荷的所占比重为 0.34～0.43；照明系统负荷的所占比重为 0.28～0.37。

4　结束语

本文通过对国内商业建筑数据调研统计后，分析了在此类建筑中动力系统、空调系统和照明系统负荷在其中的占比情况。其中照明系统负荷在商业建筑中所占比重较大，并使用统计学理论得出动力负荷的功率密度为 30～41 W/m^2；空调系统负荷的功率密度为 44～58 W/m^2；照明系统负荷的功率密度为 37～53 W/m^2。在各类负荷所占比重方面，动力系统负荷的所占比重为 0.23～0.30；空调系统负荷的所占比重为 0.34～0.43；照明系统负荷的所占比重为 0.28～0.37。本文对各类负荷和总建筑面积之间进行了相关性分析，结果表明总安装容量和总计算有功功率与建筑面积的相关性最强，且具有很强的线性相关关系，并进行了线性回归分析。在以后的研究中，可以增加研究对象，以获得更为准确的回归模型和各

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.

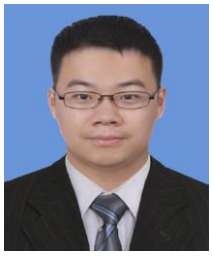
[3] 武松，潘发明. SPSS 统计分析大全[M]. 北京：清华大学出版社，2014.

[4] 郭睿，沈怿烨，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