

研
究
开
发中低速磁悬浮列车空心电抗器
设计与研究

吴馥莲, 鲁 力, 向 坤, 陈 立, 沈陈兵

(南车株洲机电科技有限公司, 湖南 株洲 412001)



摘 要: 介绍中低速磁悬浮列车空心电抗器的研制过程, 描述空心电抗器的技术要求, 重点分析电抗器的电感计算、机械结构设计、温升及屏蔽板计算。运用了 ANSOFT 有限元软件对电抗器电磁场进行模拟分析, 以达到国际非电离辐射标准要求。

关键词: 空心电抗器; 电感量; 温升; 电磁辐射; 电磁屏蔽; 中低速磁悬浮列车

中图分类号: U292.91+7; TM47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)05-0058-04

作者简介: 吴馥莲 (1967-), 女, 工程师, 主要从事轨道交通变压器、电抗器设计工作。

Design and Research of Air-core Reactor
for Middle-low-speed Maglev Train

WUFu-Lian, LU Li, XIANG Kun, CHEN Li, SHEN Chen-Bing

(Zhuzhou CSR Electromechanical Technology Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Development of air-core reactor for middle-low-speed maglev train was introduced. Key technology of air-core reactor was described, inductance calculation, structure design, temperature-rising and shielding-plate calculation of which were analyzed in emphasis. Simulation analysis on electromagnetic field with ANSOFT finite element software and three-dimensional modeling was carried out for reaching the national standard of non-ionizing radiation.

Key words: air-core reactor; inductance value; temperature rise; electromagnetic radiation; electromagnetic shield; middle-low-speed maglev train

0 引言

磁悬浮列车作为一种新型轨道交通工具, 它通过主动控制电磁铁来实现列车的悬浮和导向功能, 在直线电机的推动之下高速运行。

磁悬浮列车牵引系统主要由高压电器柜、电抗器、牵引逆变器、直线电机等主要部件组成。其中电抗器作为牵引部分中一个重要元件, 用来限制直流侧滤波单元的电压、电流波动, 滤除高次谐波, 平滑电流波形, 防止高次谐波反馈回电网。

1 磁悬浮空心电抗器技术要求

1.1 使用环境要求

海拔高度	$\leq 1\,400\text{ m}$
环境温度	$-25\sim+40^{\circ}\text{C}$
相对湿度	$\leq 90\%$

1.2 主要技术参数要求

额定电流	DC 250 A
最大电流	DC 500 A
额定电压	DC 1 500 V
电感量	4 mH
绝缘等级	H级
冷却方式	走行风冷(风速 2 m/s)
冷却介质	空气
噪声	$< 65\text{ dB}$
质量	$< 280\text{ kg}$

1.3 机械结构要求

空心电抗器允许最大外形尺寸为 $1\,080\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 650\text{ mm}$ 。

空心电抗器要求吊装在列车车体下部, 通过 4 个 M16 螺栓连接。安装尺寸为 $1\,000\text{ mm} \times 525\text{ mm}$, 吊耳的跨度及高度不仅应满足安装要求, 同时应能承受定位、支撑或吊梁弯曲等带来的应力。整个电抗器应能满足 IEC 61373 I 类 A 级的振动和冲击的要求。

收稿日期: 2012-05-29

1.4 温升要求

空心电抗器采用列车走行风冷散热, 温升应小于 125 K。由于电抗器安装空间狭小, 与前后设备之间只有 50 mm 间隔, 对空心电抗器线圈结构及机械结构设计提出了很高的要求。

1.5 电磁辐射要求

空心电抗器电感量不随电流的变化而变化, 电感值稳定, 但由于没有闭合的磁回路, 存在较大的漏磁场, 对周围的环境存在电磁辐射现象。

因车辆的频繁启动、制动, 使牵引系统主电路直流侧电流呈阶梯或锯齿波状态, 其滤波电抗器中流过直流和高次谐波电流, 直流电流产生低频磁场, 或者 100 Hz 以下的低频磁场, 高次谐波电流将产生交流磁场辐射, 磁场对车厢内部环境产生电磁污染。对于装有心脏起搏器的乘客, 电磁辐射可能引起起搏器非正常停止, 从而可能给乘客带来生命危险。因此列车电磁辐射应满足国际非电离辐射防护委员会《ICNIRP 限制时变电场、磁场和电磁场暴露的导则》标准要求 (表 1, 图 1)。

表 1 车内直流磁场 ICNIRP 标准

车内位置	ICNIRP 直流磁场标准
乘客舱地板	公众标准 40 mT, 心脏起搏器患者 500 μT
乘客舱坐时心脏高度	公众标准 40 mT, 心脏起搏器患者 500 μT
驾驶室地板	职业标准 200 mT
驾驶室坐时心脏高度	职业标准 200 mT

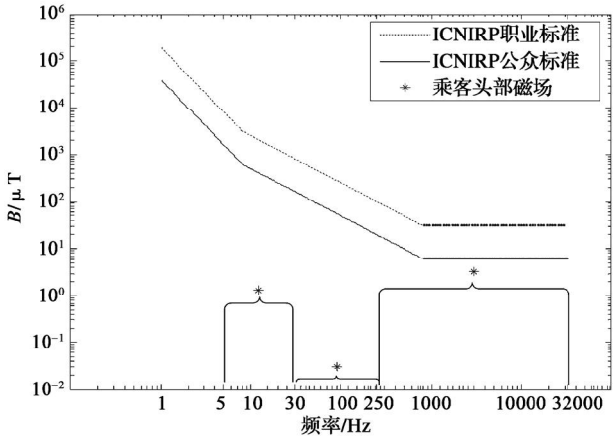


图 1 乘客头部位置磁场 (*) 与 ICNIRP 交流磁场标准的比较

2 空心电抗器设计

2.1 空心电抗器线圈设计

1) 电感计算

电抗器线圈示意图见图 2。

根据文献[1], 空心电抗器绕组的电感计算公式为

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} N^2 d \phi_L, H$$

式中: L ——线圈电感, H ; N ——线圈匝数; d ——线圈平均直径, m ; ϕ_L ——根据 α 、 β 曲线查出, 其中参数 $\alpha = h/d$, $\beta = a/d$ (图 3); h ——线圈轴向高度, m ; a ——

线圈辐向宽度, m 。

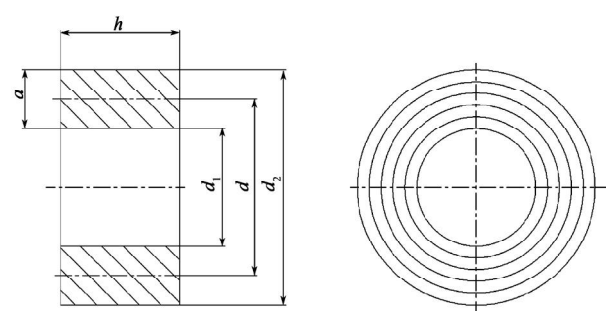


图 2 电抗器线圈示意图

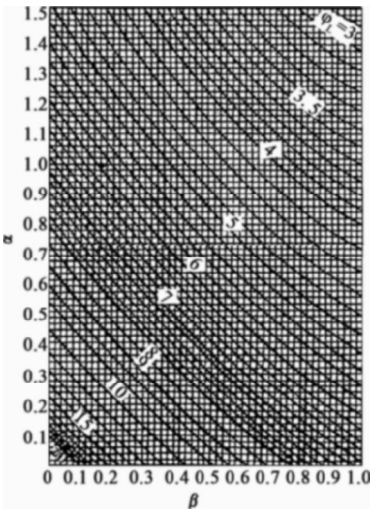


图 3 ϕ_L 与 α 、 β 曲线

2) 线圈结构

空心电抗器线圈, 常采用饼式线圈及螺旋式线圈。螺旋式线圈中间应有螺杆, 外形尺寸大, 不能满足产品外形尺寸要求, 确定使用饼式线圈。

在满足电抗器电感量及线圈长度要求下, 若采用圆形饼式线圈结构时, 内、外直径分别为 260 mm/536 mm。若采用方形饼式线圈结构时, 线圈内、外尺寸分别为 300×180/552×432 mm。2 种方案相比较, 方形饼式线圈结构更有优势, 更能满足产品外形结构的要求。具体尺寸见表 2 及图 4。

表 2 方形饼式线圈与圆形饼式线圈尺寸比较

项目	方形饼式线圈	圆形饼式线圈	饼式比较
电感量/mH	4.078 5	4.078 5	相同
匝数	144	144	相同
线圈长度尺寸/mm	420	420	相同
线圈内部尺寸/mm	300×180	直径 260	长度方向增加 40 mm 高度方向减少 80 mm
线圈外部尺寸/mm	552×432	直径 536	长度方向增加 16 mm 高度方向减小 104 mm

采用方形饼式结构, 将导线绕成线饼, 通过导线焊接将线饼与线饼串联起来, 用拉螺杆将线饼、垫块、支撑架一起固定支撑架组件。

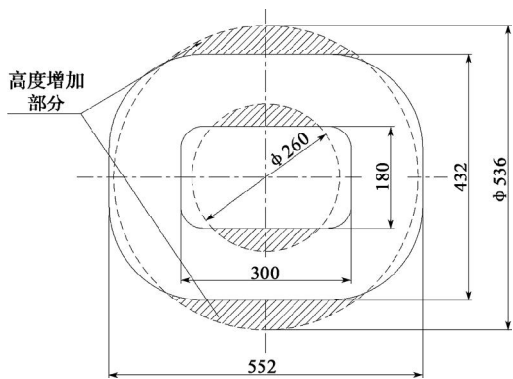


图 4 线圈内、外结构比较

2.2 空心电抗器机械结构设计

地铁空心电抗器端板常采用图5结构。此种结构制作简单,易于操作,机械强度高,抗拉强度好。

若采用地铁空心电抗器的结构设计,不仅不能满足吊装跨度及高度的要求,而且端板面会阻隔走行风,使线圈散热困难。

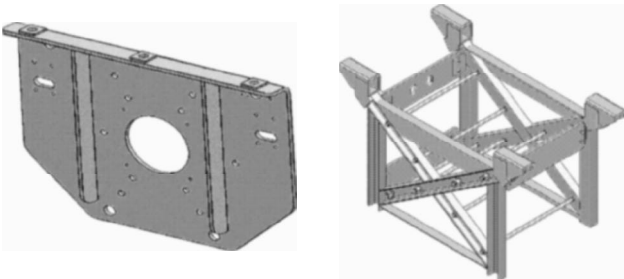


图 5 地铁电抗器端板 图 6 磁悬浮电抗器支撑架组件

电抗器端板采用支撑架组件,它由支撑槽钢、角钢、安装架、加强板等部件焊接而成(图6)。整个产品结构用8根M16拉螺杆将线圈固定在支撑架组件上,使产品成为一个刚体结构,通过受力分析,垂向、纵向与横向分别能够承受3g、5g与3g的冲击。通过强度分析,垂直方向、水平方向安全系数能满足设计要求,拉螺杆无永久变形及位移,强度与刚度性能满足要求。该产品通过了IEC 61373 I类A级的产品冲击和振动试验,满足车辆强度要求。

2.3 空心电抗器温升计算

支撑架组件采用槽钢焊接而成,焊接件之间可以通风散热。罩壳采用网格式,安装方式与列车的走行方式一致。这都有利于产品的通风散热。在列车运行时,走行风能够带走电抗器运行时所产生的一部分热量。电抗器的温升计算为70 K(表3),远低于要求值125 K。

2.4 空心电抗器电磁屏蔽设计及分析
空心电抗器工作时产生的电磁

表3 电抗器温升计算相关参数

参数	数值
150 电阻 / Ω	0.045 67
损耗 / W	2 880
散热面积 / m^2	1.753 4
风速 / $m \cdot s^{-1}$	2
温升 / K	70

辐射是磁悬浮列车所有元件器中最大的,因此,对电抗器的屏蔽研究及控制至关重要。

为了抑制直流磁场或低频交流磁场对其他设备及人体的伤害,可以使用高导磁率和低磁阻特性的铁磁性材料将敏感的器件包起来,使敏感器件周围的磁力线集中在屏蔽板材料中,从而使屏蔽体外的磁场大大减弱。为了降低滤波电抗器对轨道车辆客车室内产生的电磁场辐射,地铁车辆一般采用U型强磁性屏蔽板、铁镍合金等高磁导率材料。

若采用U型屏蔽板,放置在支撑架组件上部,由于产品安装位置及外形长度方向尺寸受限制,因此采用U型屏蔽板不可取。

综合考虑各种情况,在电抗器上方布置740 mm×570 mm×10 mm屏蔽板,利用前后支撑板组件上690 mm×130 mm×10 mm加强角钢、两边450 mm×130 mm×10 mm连接板,在电抗器上方一起组合成一个10 mm厚带帽屏蔽板(图7)。

利用ANSOFT有限元软件,三维建模,对组合后的屏蔽板进行电磁场进行模拟,模型如图7所示,图8为电抗器观察面设置9个测试点测量电磁的大小。

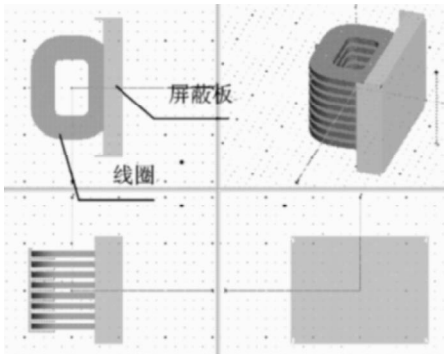


图 7 电抗器模拟

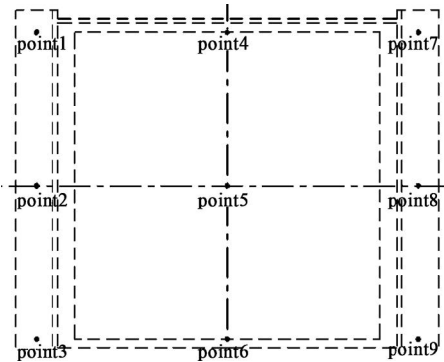


图 8 观察面中 9 点分布

线圈电流为250 A,分别在列车地板正上方50 mm、450 mm、800 mm处建立740 mm×570 mm的观察面A(图9)、B(图10)、C(图11),观察9个点的电磁场强度。

通过云图能发现观察面A、B、C上point4、point6为2个场强最大点,point2、point8为2个场强最小点。point4、point6在线圈的2个磁极附近,此处通过的磁场

电力线多、场强大; 由于屏蔽板作用, point5 中点处获得的屏蔽效果最佳, 基本为观察面的平均场强; point2、point8 处于线圈边部中点处, 离磁极距离最远, 场强自然为观察面中最小的。

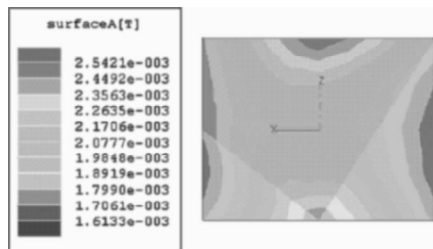


图9 A 观察面场强分布云图

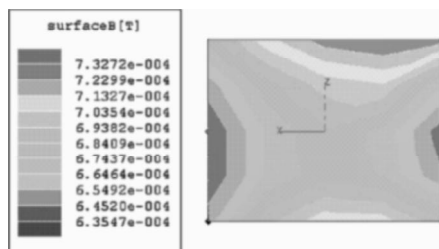


图10 B 观察面场强分布云图

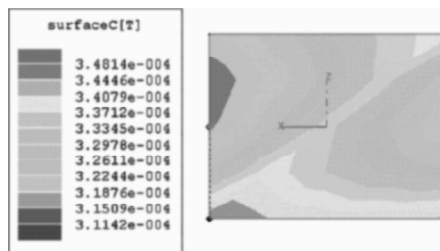


图11 C 观察面场强分布云图

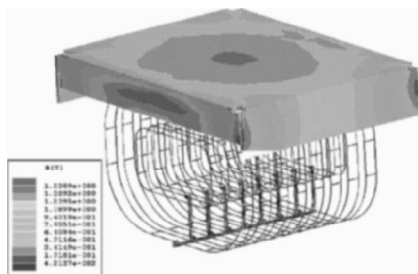


图12 屏蔽板场强云图

从图12可以看出, 屏蔽板在场强中具有引导作用, 引导磁力线顺着屏蔽板延伸, 大大减少了磁场向屏蔽板上方发散的趋势, 从而起到场强屏蔽作用, 减小了屏蔽板上方场强。通过观察图13中xy截面、图14中yz截面两个面的场强分布云图, 能更加明了地看出屏蔽板的屏蔽效果。屏蔽板面场强为1T以上级别, 而作用后的周边场强为0.15~0.003 87 T级别。

屏蔽板两侧场强云图如图15。线圈侧中心场强约为10 mT, 经过屏蔽板后削弱到5.8 mT。

增加屏蔽板能够很好地引导磁场走向, 削弱屏蔽板外侧场强, 达到场强屏蔽效果。

以上分析可以发现, 组合后的屏蔽板在场强中具

有引导作用, 引导磁力线顺着屏蔽板延伸, 大大减少了磁场向屏蔽板上方发散的趋势, 从而起到场强屏蔽作用, 减小了屏蔽板上方场强。

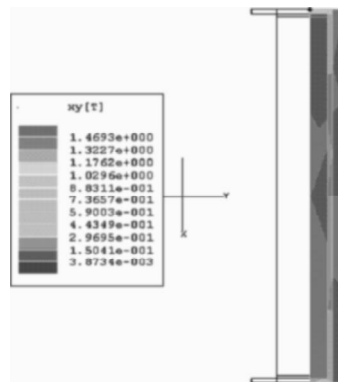


图13 xy 截面场强云图

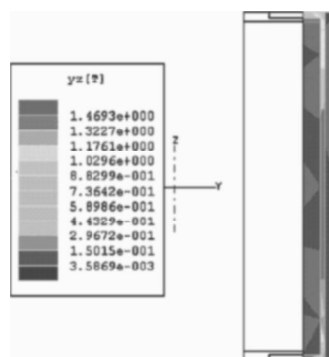


图14 yz 截面场强云图

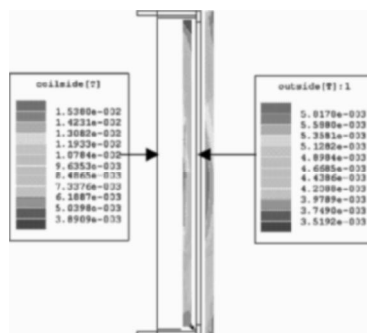


图15 屏蔽板两侧场强云图

3 空心电抗器型式试验

空心电抗器样机通过了温升、振动和冲击的型式试验, 满足产品技术条件要求。

空心电抗器的电磁场辐射测试在唐山中低速磁悬浮试验线进行试验。

列车载荷AW2 状况下, 运行速度为50 km/h, 在列车地板上方0.05 m、0.8 m、1.15 m、1.7 m处测量电抗器的直流磁场和交流磁场。用直流磁场测试仪测量直流磁场, 交流电磁场采用分段测量, 用ESM-100测量频率范围为5 Hz~400 kHz的交流磁场, 用EMR-300测量频率范围为3 kHz~30 MHz的交流磁场。测量结果见表4。

(下转第65页)

心脏高度的磁场低于 80 μT ，与列车距离大于 3 m 处的直流磁场约为 40 μT ，趋于地磁场水平。具体测量值与 ICNIRP 标准对比如表 8 所示。

表8 车外直流磁场测量值与 ICNIRP 标准对比

位置	测量值 / μT	ICNIRP 直流磁场 公众标准
距轨道 1 m 站台乘客 心脏高度	80	公众标准 40 mT，心脏 起搏器患者 500 μT
距轨道 3 m 与轨道持平	40	公众标准 40 mT，心脏 起搏器患者 500 μT
距轨道 5 m 与轨道持平	38	公众标准 40 mT，心脏 起搏器患者 500 μT

3 结论

本文通过对于中低速磁悬浮交通系统电磁辐射机理分析、数值仿真计算和现场测试，得出如下结论：

①中低速磁悬浮列车运行时车内外 30 kHz~30 MHz 交流电磁场与未通电时的背景电磁场相比均无明显差异，表明中低速磁悬浮列车系统没有额外的高频电磁辐射。

②中低速磁悬浮列车运行时，车内直流磁场不超过国际非电离辐射防护委员会 (ICNIRP) 的静磁场暴露

标准限值；车外距离轨道 1 m 以外直流磁场不超过 ICNIRP 的静磁场暴露标准限值。车外大于 3 m 处的直流磁场趋于地磁场水平。

③中低速磁悬浮列车停靠站台过程中，站台处的直流和 5 Hz~32 kHz 各频段交流磁场均不超过 ICNIRP 电磁辐射公众标准值。

④中低速磁悬浮列车运行时，车内 5 Hz~32 kHz 各频段交流磁场不超过 ICNIRP 电磁辐射公众标准限值；车外 5 Hz~32 kHz 各频段交流磁场均不超过 ICNIRP 电磁辐射公众标准限值。

综上所述，中低速磁悬浮列车交通系统是一种电磁环境良好的绿色城市轨道交通系统。

参考文献：

[1] 北京控股磁悬浮技术发展有限公司. CMS04 型中低速磁浮交通电磁辐射测试报告 [R]. 北京：北京控股磁悬浮技术发展有限公司，2010.

[2] 国际非电离辐射防护委员会. ICNIRP 电磁辐射公众标准 (1998) [S]. 国际非电离辐射委员会，1997.

[3] 国际非电离辐射防护委员会. ICNIRP 静磁场暴露标准 (2009) [S]. 国际非电离辐射委员会，2008.

[4] 北京控股磁悬浮技术发展有限公司. CMS04 中低速磁浮列车总体设计技术条件 [M]. 北京：北京控股磁悬浮技术发展有限公司，2007.

(上接第 61 页)

表4 电抗器电磁场数值

测量仪器	测量点高度 / m			
	0.05	0.8	1.15	1.7
直流磁场测试仪， 250Hz，30 $\mu\text{T}/300\text{ mT}$	0.45 mT	0.3 mT	0.09 mT	0.055 mT
交流磁场测试仪 EMS - 100(5 Hz~400 kHz)	59.03 μT	10.00 μT	10.05 μT	6.65 μT
交流磁场测试仪 EMR - 300 (3 kHz~30 MHz)	0.020 6 A/m	0.014 7 A/m	0.014 2 A/m	0.012 4 A/m

由表 4 实测数据可知，直流磁场测试仪在 0.8 m 处测量值为 0.3 mT，低于国际非电离辐射委员会 (ICNIRP) 推荐的静磁场暴露标准 40 mT，也低于心脏起搏器植入患者的推荐标准 0.5 mT。ESM-100 5 Hz~400 kHz 交流磁场测试仪器在 0.8 m 处测试点最大值为 10.03 μT ，小于国际非电离辐射委员会 (ICNIRP) 推荐的职业暴露限值 30.7 μT (0.82~65 kHz)。ESM-300 3 kHz~30 MHz 在 0.8 m 处测试最大值为 0.014 7 A/m，小于 ICNIRP 职业暴露推荐限值 0.53 A/m (均方根限值)，完全符合国际非电离辐射防护委员会 ICNIRP 电磁辐射标准要求。

4 结语

本文通过对磁悬浮空心电抗器技术要求的分析，

明确了空心电抗器的技术关键点，并对空心电抗器电感性、温升进行设计计算，对电抗器的机械结构进行优化，着重对空心电抗器的电磁场屏蔽进行三维模拟分析及现场在线实测。模拟分析及在线检测都充分表明，采用组合式屏蔽板，极好地解决了磁悬浮列车电抗器电磁场辐射超标的问题。此产品已应用到北京 S1 线中低速磁悬浮列车、南车磁悬浮列车项目中。

空心电抗器的电磁辐射直接关系到轨道车辆运行的可靠性和安全性，针对电抗器的电磁屏蔽设计还应进行深入的理论研究、运行试验，必要时还应采用新型的高导磁性材料，以彻底解决电抗器的电磁辐射问题。

参考文献：

[1] 卡兰塔罗夫 П П，采伊特林 Л А. 电感计算手册 [M]. 北京：机械工业出版社，1992.

[2] 崔立君. 特种变压器理论与设计 [M]. 北京：科学技术文献出版社，1995.

[3] 杨士元. 电磁屏蔽理论与实践 [M]. 北京：国防工业出版社，2006.

[4] 刘少克，倪鸿雁. 中低速磁悬浮列车悬浮电磁铁线圈电感计算 [J]. 机车电传动，2008(1).

[5] 鲁 力. 地铁牵引电传动系统空心滤波电抗器的国产化研制 [J]. 机车电传动，2011(1).