DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)07-0128-05

一种融合多技术的防爆轨道巡检机器人本体设计

张志坚

(南京北新智能科技有限公司,南京 211100)

摘　要:针对特种及危险作业环境的防爆巡检需求,解决常规轨道巡检机器人场景适配局限、本体结构有缺陷等问题,开展防爆轨道巡检机器人本体设计与研究。研究严格遵循防爆设计相关标准,融合隔爆、本安、浇封复合防爆技术,构建集运动、感知、控制与通信于一体的系统架构,完成轨道、驱动系统、防爆箱主体及集成传感器等核心部件的设计,打造紧凑型模块化结构并集成本安型通信系统。通过开展轨道性能、驱动能力、定位精度等系列实验,对机器人关键性能进行量化测试与验证。实验结果表明,该机器人防爆性能符合标准要求,具备稳定的结构承载能力、可靠的驱动与定位性能,可实现多参数实时检测、自主巡检与智能充电,有效突破多场景适配瓶颈,在火电、煤矿、化工等防爆区域具备良好的适应性与实用性,为极端环境下的智能化巡检提供了新方案,具有重要的工程应用价值与广阔的应用前景。

关键词:巡检机器人;多场景应用;自主巡检;防爆设计;多参数检测

中图分类号:TP242.3;TP274+.4;TD684　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1003-7241(2026)07-0128-05

A design of explosion-proof track inspection robot body integrating multiple technologyies

Zhang Zhijian

(Nanjing Beixin Intelligent Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: To meet the explosion-proof inspection demands of special and hazardous working environments and solve the problems of limited scene adaptability and defective body structure of conventional track inspection robots, this paper carries out the design and research on the body of an explosion-proof track inspection robot. Strictly complying with the relevant standards for explosion-proof design, the research integrates the composite explosion-proof technologies of flameproof protection, intrinsic safety and potting, and constructs a system architecture integrating motion, perception, control and communication. It completes the design of core components including the track, drive system, main body of the explosion-proof box and integrated sensors, and develops a compact modular structure with an integrated intrinsically safe communication system. A series of experiments on track performance, driving capacity and positioning accuracy are conducted to quantitatively test and verify the key performance of the robot. The experimental results show that the robot meets the standard requirements for explosion-proof performance, with stable structural load-bearing capacity and reliable driving and positioning performance. It can realize real-time multi-parameter detection, autonomous inspection and intelligent charging, effectively breaking through the bottleneck of multi-scene adaptability. The robot has favorable adaptability and practicability in explosion-proof areas such as thermal power, coal mining and chemical engineering, providing a new solution for intelligent inspection in extreme environments and possessing important engineering application value as well as broad application prospects.

Keywords: inspection robot; multi-scene application; autonomous inspection; explosion-proof design; multi-parameter detection

随着物联网、大数据和人工智能技术的深度发展,机器人技术的革新速度显著加快,在各行业的应用呈现出多样化的趋势。在核电、火电、煤矿、化工等特种作业和危险作业环境中,由于作业现场存在易燃易爆气体、粉尘等危险因素,传统人工巡检不仅效率低下,而且作业人员面临着极高的安全风险[1]。机器人的引入能够有效降低作业人员与危险环境的直接接触,极大地保障了人员安全。

在巡检机器人领域,轮式机器人因自身尺寸较大,在狭窄空间或复杂地形中的行动受到限制,巡检区域难以全面覆盖。而轨道式机器人借助空中轨道,不仅扩大了巡检范围,还能凭借轨道的引导,实现更精准的检测。然而,常规轨道巡检机器人由于缺乏有效的防爆设计,无法在易燃易爆的复杂危险环境中安全运行。因此,研发一种能够融合隔爆、本安、浇封等多种防爆技术,适应多场景作业的防爆轨道巡检机器人,具有重要的现实意义和理论研究价值。

现有防爆巡检机器人研究在石油化工、煤矿等场景有进展[2],如单一防爆技术应用与特定场景适配[3],但存在

收稿日期:2025-03-21;**录用日期**:2025-04-19

作者简介:张志坚(1987—),男,硕士,研究方向为智能巡检机器人。

引用本文:张志坚. 一种融合多技术的防爆轨道巡检机器人本体设计[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(7):128-132. (Zhang Zhijian. A design of explosion-proof track inspection robot body integrating multiple technologyies[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(7):128-132.)

不足:防爆技术碎片化、场景适配局限,轨道式机器人本体结构有缺陷,多场景协同作业能力不足,防爆性能与检测功能存在耦合矛盾。本文提出融合多技术的防爆轨道巡检机器人本体设计,构建复合防爆体系,设计可变曲率自适应机构,采用紧凑型模块化结构,集成本安型通信系统,突破多场景适应性等瓶颈,为极端环境智能化巡检提供新范式。

1 系统总体架构

1.1 设计目标

本机器人设计严格遵循 GB 3836 系列防爆标准,旨在满足特种和危险作业环境的防爆要求,确保整机和各电气件均达到相应的防爆等级,适用于火电、煤矿、化工等典型防爆区域[4]。运用传感器技术,实现对作业环境中的温湿度、气体成分、粉尘浓度等多种关键参数的实时检测[5]。

1.2 系统架构

防爆轨道巡检机器人构建集运动、感知、控制和通信于一体的复杂系统[6]。该系统主要由运行轨道、行走总成、防爆箱主体、各类传感器、防爆云台、无线通信模块和充电模块等组成[7],如图 1 所示。运行轨道作为机器人的运动载体,为其提供稳定的运动路径;行走总成基于机械传动原理[8],实现机器人在轨道上行走;防爆箱主体将内部电气设备与外部危险环境有效的隔离;各类传感器运用信号检测与转换理论,采集作业环境信息;防爆云台通过图像采集技术,获取现场图像[9];无线通信模块实现数据的实时传输;充电模块则为机器人的持续运行提供能源保障[10]。

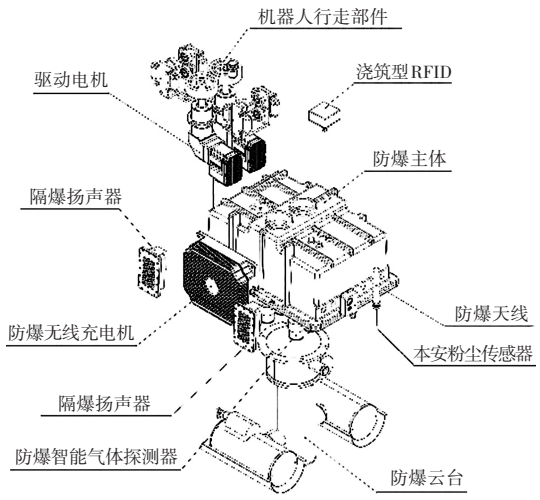


图 1 巡检机器人基本构成

Fig. 1 Basic composition of inspection robot

2 系统组成及核心部分设计

2.1 轨道设计及承重分析

轨道系统由轨道、调节螺杆、膨胀螺丝、C 型钢、抗震连接件、抗震固定件、无线射频识别(radio frequency identification,RFID)标记点和霍尔标记点组成。轨道采用 6061-T5 铝合金材质,表面阳极氧化处理。依据材料力学中拉伸强度与抗压强度理论,6061-T5 铝合金的屈服强度 σ_y 可达 276 MPa,通过截面力学计算,可知其单米承重 W 满足:

$$W = \frac{\sigma_y \times A}{L} \tag{1}$$

式中,A 为轨道有效承载截面积,L 为轨道长度。

经实际测试,选取 3 组不同长度轨道,轨道有效承载截面积 A = 500 mm^2,当 L 分别为 1 m、2 m、3 m 时,理论单米承重均超 150 kg。实际加载测试中,轨道在承受 200 kg/m 的重量时,未出现明显变形,验证了理论计算的准确性。该材质在保证单米承重超 150 kg 的同时,具备良好的抗腐蚀性。轨道间通过槽条连接件连接,便于安装与维护。在轨道上方,每隔一定距离设置 RFID 标记点,充电桩位置设置霍尔标记点,运用射频识别技术和电磁感应原理,实现机器人的位置信息校准和充电控制。通过 T 型螺栓、六角长螺母和调节螺杆组成的调节机构,实现可调松紧的抗震支架。抗震固定件可通过膨胀螺丝固定在水泥顶或焊接在钢结构顶部,使整体吊架具备抗震、抗拉、可调节和场景兼容的特性[11]。

2.2 驱动系统设计

驱动系统包括驱动组和两个从动组[12],如图 2 所示。驱动组由两个减速电机通过轴系直接驱动,电机输出扭矩 T 经轴系传递至驱动轮,驱动轮与轨道间的摩擦力 F_f 为

$$F_f = \mu \times N \tag{2}$$

式中,μ 为驱动轮与轨道间的摩擦系数,N 为驱动轮对轨道的正压力。

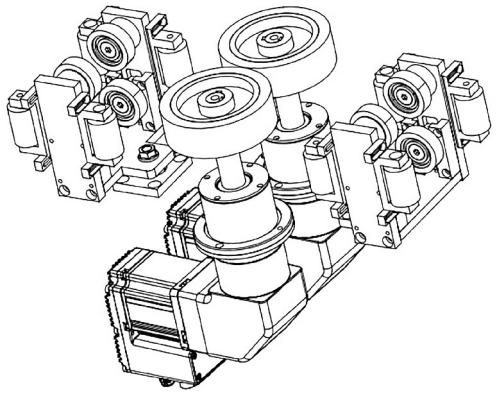


图 2 驱动系统

Fig. 2 walking assembly

通过实验测定,驱动轮与轨道间的摩擦系数 μ =0. 3。两个驱动轮夹紧轨道,利用摩擦力带动机器人运动。前后两个从动组以压轨方式在轨道上运动,从动轮采用聚氨酯成形轴承轮子,每个轮子容许负载 274 N,四个从动轮整体可负载 1 096 N,满足机器人在轨道上的安全运行要求,其负载能力安全系数 S 为

$$S = \frac{1\,096}{G} \tag{3}$$

式中，G 为机器人总重力。经测量，机器人总重力 G = 500 N，计算可得安全系数 S = 2.19，表明机器人在轨道上运行具有较高的安全性。从动组通过旋转轴和滚珠轴承固定在防爆箱上。

2.3 机器人主体防爆箱

防爆箱主体为机器人的核心部分[13]，采用6061铝合金经计算机数控系统（computer numerical control，CNC）加工一体成型，壳体壁厚大于 12 mm，如图3所示。该箱体能够承受内部爆炸产生的压力 P_{in}，并阻止爆炸火焰和高温向外部传播。根据压力容器设计理论，箱体可承受的最大压力 P_{max} 为

$$P_{max} = \frac{2 \times \sigma_{all} \times t}{D} \tag{4}$$

式中，σ_{all} 为材料许用应力，t 为箱体壁厚，D 为箱体等效直径。经计算，箱体可承受的最大压力 P_{max} = 10 MPa。在防爆性能实验中，对防爆箱主体内部施加8 MPa的爆炸压力，箱体未出现破裂、变形等情况，外部环境也未受到爆炸影响，验证了防爆箱主体的可靠性。内部包含两个驱动电机、电路控制板、36 V电池、485安全栅和发光二极管（light emitting diode，LED）灯安全栅。两块电路板安装板固定在箱体内，主控制电路板安装在其上，方便接线调试。36 V电池通过铝加工固定架固定在箱内，485安全栅和LED灯安全栅固定在箱盖上，便于接线、过线调试。

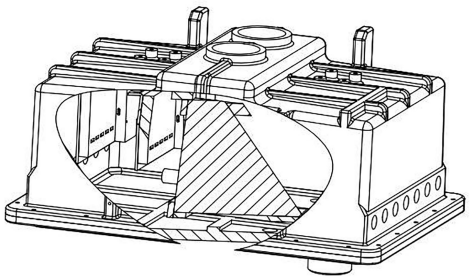


图3 防爆腔体

Fig. 3 Explosion-proof chamber

2.4 集成传感器

温湿度传感器、气体探测器、超声波传感器[13]、拾音器和扬声器采用隔爆方式，加工隔爆腔体外壳，包裹传感器电路板和检测元件，确保内部爆炸不会引发外部环境爆炸。粉尘传感器采用本安防爆处理，以聚四氟乙烯为材质加工外壳和盖板，包裹传感器，通过限制电路能量输出，依据本质安全理论，确保在危险环境中安全运行。无线保真（wireless fidelity，Wi-Fi）模块天线、霍尔开关和RFID读卡器采用浇封型防爆处理，用环氧树脂胶封，运用浇封技术原理，有效防止电气部件与外部环境接触，降低爆炸风险。防爆云台和无线充电器根据需求购买相应型号和防爆等级的产品，并做好安装连接件。应急充电口在防爆箱主体上开设，配备螺纹盖，不使用时用隔爆螺纹盖盖严，确保不影响防爆性能。

表1 主要传感器型号及参数

Tab. 1 Main sensor models

名称	型号	主要参数	参数值
防爆粉尘传感器	BX-FB-FC DC5	检测范围	0~1 000 ug/m^3
防爆音频转换器	BX-FB-YSQ	功率	10 W
RFID	QT1-18 GM-R4-V1	频率 最大读距离	13.56 MHz 55 mm
温湿度传感器	HTS40L	宽范围	-40~120 ℃，0~100%RH
超声波传感器	UC800-F77S	感应范围	60~800 mm

3 主要功能实现

3.1 驱动设计

机器人工作时，两个集成式伺服驱动电机启动，带动驱动轴和驱动轮[14]。两个电机旋转方向相反，轨道两侧的驱动轮夹紧轨道，利用摩擦力实现机器人的前后运动。机器人前后从动机构上的从动轮挂在轨道表面，抵消自身重力。在遇到轨道上坡、下坡、转弯时，从动机构的限位机构通过内部压缩弹簧和限位轮，对机器人进行左右和上下限位，防止脱轨和抖动。在爬坡实验中，设置轨道坡度角 θ 分别为10°、20°、30°，根据力学分析，机器人所需驱动力 F_d 为

$$F_d = G \times \sin\theta + \mu_r \times G \times \cos\theta \tag{5}$$

式中，μ_r 为机器人运动阻力系数，经测定 μ_r = 0.2。当 θ = 10° 时，理论计算驱动力 F_d = 185.28 N，实际测量驱动力为186.3 N；当 θ = 20° 时，理论计算驱动力 F_d = 264.97 N，实际测量驱动力为267.2 N；当 θ = 30° 时，理论计算驱动力 F_d = 336.6 N，实际测量驱动力为337.9 N。实验结果与理论计算基本相符，验证了机器人驱动能力。

表2 电机选型

Tab. 2 Motor selection

型号	功率/W	转速/(r·min^{-1})	扭矩/(N·m)
DM-56040CA2A-204	400	3 000	1.27

3.2 定位与充电

机器人通过轨道上的RFID标记点和霍尔标记点[15]，结合编码器采集到的数据[16]，实现机器人实时定位。在电量不足时，机器人根据提前设定好的充电桩位置，移动至充电桩，待霍尔传感器感应到标记点后，启动充电功能[17]。以定位精度 ΔL 为例，其与RFID标记点间距 ΔL_0、

编码器分辨率 N 相关,满足:

$$\Delta L = \frac{\Delta L_0}{N} \tag{6}$$

实验设置 RFID 标记点间距 $\Delta L_0 = 1$ m,编码器分辨率 $N = 1\ 000$,理论定位精度 $\Delta L = 1$ mm 。在实际定位测试中,多次测量机器人的定位误差均在 2 mm 以内,验证了定位系统的准确性。

3.3 数据采集与传输

在巡检过程中,各类传感器实时采集温湿度、气体、粉尘等环境信息[18],防爆云台拍摄现场画面。数据通过机器人内部的 Wi-Fi 模块与巡检现场无线基站通信[19],无线基站数据通过光缆传输至监控室[20],操作人员可根据现场情况对机器人进行远程操控。机器人内部的对讲模块实现现场人员与监控室操作人员的实时对讲[21-22]。

4 防爆设计

4.1 隔爆设计

隔爆设计是通过外壳将可能产生火花、电弧和危险温度的电气部件与周围爆炸性气体环境隔开[23]。本机器人的防爆箱主体、温湿度传感器、气体探测器、超声波传感器、拾音器和扬声器均采用隔爆设计,依据隔爆外壳的设计标准,确保外壳能够承受内部爆炸压力,并阻止爆炸产物向外部传播,从而避免引发外部环境爆炸。在模拟爆炸实验中,对采用隔爆设计的部件内部施加爆炸压力,外部环境均未受到爆炸影响,验证了隔爆设计的有效性。

4.2 本质安全设计

本质安全设计指是在正常工作或规定故障条件下产生的电火花或热效应均不能点燃规定的爆炸性气体环境。粉尘传感器采用本安防爆处理,通过特殊的电路设计和外壳防护,依据本质安全电路的设计原则,限制能量输出,确保在危险环境中安全运行。在故障模拟实验中,对粉尘传感器电路施加短路、过载等故障,传感器均未产生能够点燃爆炸性气体的火花或热效应,验证了本安设计的安全性[24]。

4.3 浇封设计

浇封设计是将可能产生点燃爆炸性混合物的电弧、火花或高温的部件浇封在浇封剂中,使其不能点燃周围的爆炸性混合物。无线天线、霍尔开关和 RFID 读卡器采用浇封型防爆处理,运用浇封技术的工艺要求,有效防止电气部件与外部环境接触,降低爆炸风险。在防水、防尘实验中,经过浇封处理的部件在恶劣环境下仍能正常工作,未出现因外部环境影响导致的故障,验证了浇封设计的可靠性。

5 实验

5.1 实验条件

实验材料包括:轨道摩擦力实验小车、铝合金轨道,巡检机器人本体[25],拉力计。

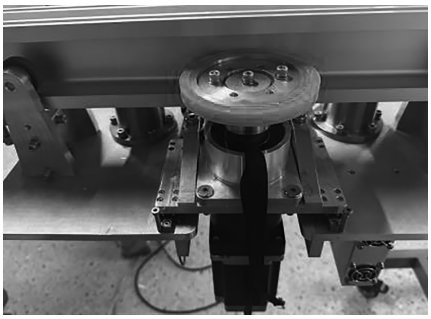


图 4 摩擦力试验小车照片

Fig. 4 Photo of friction test cart



图 5 铝合金轨道照片

Fig. 5 Photo of aluminum alloy track



图 6 巡检机器人本体照片

Fig. 6 Photo of the body of the inspection robot



图 7 拉力计照片

Fig. 7 Photo of tensile force meter

实验地点:公司测试实验区。

实验环境温度:26 ℃。

实验环境湿度:46%Rh。

5.2 实验数据

摩擦系数取均值:0.3。

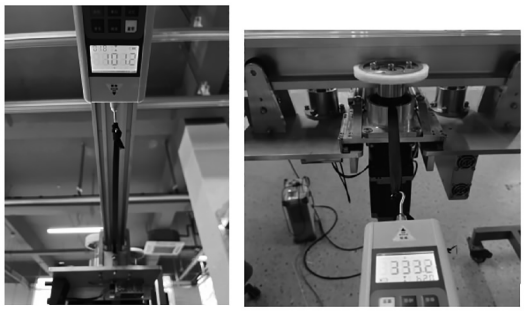
测试方法:拉动摩擦力实验小车匀速行走,记录拉力值。

实验图例如图 8 所示。

表3 摩擦系数实验

Tab. 3 Friction coefficient experiment

实验编号	拉力/N	正压力/N（驱动轮对轨道加紧力）	摩擦系数
1	101.2	333.2	0.303 7
2	103.2	340.4	0.303 1
3	107.6	355.2	0.302 9
4	109.2	362.7	0.301 0
5	111.3	369.3	0.301 3



（a）行走拉力 （b）驱动轮正压力

图8 摩擦系数实验照片

Fig. 8 Photo of friction coefficient experiment

表4 驱动力测量实验结果

Tab. 4 Results of driving force measurement experiment N

驱动力测试	理论计算	实际测量
10°轨道拉力计值	185.28	186.3
20°轨道拉力计值	264.97	267.2
30°轨道拉力计值	336.6	337.9

测试方法：控制机器人在不同轨道上从静止到匀速行走，记录拉力值。

实验图例如图9所示。



（a）设备本体 （b）拉力计

图9 驱动力测量实验照片

Fig. 9 Photo of driving force measurement experiment

5.3 实验结论

通过实验为机器人驱动系统设计提供数据支撑，验证了机器人驱动设计理论依据科学性、合理性。

6 结论

本文设计的防爆轨道巡检机器人，通过合理的系统系统设计和防爆设计，综合运用多种理论和技术，并结合计算进行量化分析，引入实测数据验证，具备多场景适应、自主巡检、多参数检测等功能。该机器人在火电、煤矿、化工等防爆区域具有广阔的应用前景，能够有效降低作业人员的风险，提高巡检效率和安全性。未来，可进一步优化机器人的性能，如增加传感器类型、提升数据处理能力和通信稳定性，以满足更复杂的巡检需求。

参考文献

[1]明连勋，邵晓，江贤镁，等. 输油场站防爆机器人的设计与应用探索[J]. 中国信息界，2025(2)：34-38.
[2]马成. 天然气场站防爆巡检机器人系统的应用[J]. 上海煤气，2024(2)：17-20.
[3]鞠哲. 综采工作面三维防爆巡检机器人设计及试验[J]. 煤矿机械，2024，45(4)：8-10.
[4]韩磊，高宁宁，姜荣吉，等. 电解厂房防爆巡检机器人使用总结[J]. 氯碱工业，2024，60(1)：39-41.
[5]王志伟，唐欣，张煜. 危化品堆场智能巡检机器人应用研究[J]. 港口装卸，2023 (6)：42-45.
[6]李迎伟，单新云，聂建军，等. 防爆型自主移动巡检机器人开发及性能研究[J]. 石油化工自动化，2023，59(3)：68-71.
[7]刘华，路园，刘雨晴. 智能防爆巡检机器人应用[J]. 煤气与热力，2023，43(2)：26-29.
[8]龙再萌，夏景刚. 煤矿井下皮带输送机防爆巡检机器人研究[J]. 机电产品开发与创新，2022，35(6)：26-28.
[9]李鑫宝. 石化巡检机器人设计与组合导航研究[D]. 天津：河北工业大学，2022.
[10]郑武略，郑扬亮，张鑫，等. 复杂环境输电线路巡检机器人协同路径规划[J]. 自动化技术与应用，2025，44(2)：13-16，25.
[11]王晓晖，兰建辉，韩玉鑫，等. 基于巡检机器人的燃气发电主厂房异常问题图像识别报警方法[J]. 自动化技术与应用，2024，43(9)：64-68.
[12]朱道华，郭雅娟，韦磊，等. 基于5G软件定义网络的变电站巡检智能控制系统设计[J]. 自动化技术与应用，2024，43(7)：111-116.
[13]袁兴宇，唐立军，杨家全，等. 基于无线传感器的电力巡检机器人轨迹跟踪研究[J]. 自动化技术与应用，2022，41(7)：16-20.
[14]王日升. 管道巡检机器人倾斜管道通过性能优化[J]. 山东煤炭科技，2025，43(3)：84-88.
[15]周建. 带式输送机运行状态巡检机器人越障控制方法研究[J]. 中国设备工程，2025(5)：209-211.
[16]赵蓓蓓. 综合管廊巡检机器人行走驱动系统设计[J]. 高科技与产业化，2025，31(2)：61-63.
[17]陆世权. 隧道巡检机器人关键技术应用探索[J]. 中国战略新兴产业，2025(5)：35-37.
[18]唐士奇. 新型巡检机器人输煤栈桥智能识别技术及应用效果[J]. 中国高新科技，2025(3)：16-18.
[19]岳刚，程贝贝，井平安. 电缆隧道巡检机器人研究[J]. 山西电子技术，2024(6)：110-113.
[20]李程远，郭晓栋，常宏，等. 隧道巡检机器人自主定位及巡检策略研究[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版)，2025，44(1)：17-22.
[21]陈国翠，管帅，陈冬冬，等. 交通隧道巡检机器人运动形态及检测技术[J]. 时代汽车，2024(11)：172-174.
[22]钟涛. 轨道式巡检机器人的机械结构设计[J]. 中国机械，2024(13)：10-14.
[23]宋正起，王燕，王仁臻. 一种工业巡检机器人的控制系统设计[J]. 现代制造技术与装备，2024，60(4)：105-107，114.
[24]屠天奇. 曲率自适应防爆挂轨式巡检机器人的设计与实现[D]. 北京：北京邮电大学，2024.
[25]陈乐. 胶带输送系统智能巡检机器人研究[D]. 淮南：安徽理工大学，2024.