

智能小型扫路机的设计与研究

景斌^{1,2} 李亮^{1,2} 谢平春^{1,2} 魏星^{1,2} 罗治强²

(1 长沙中联重科环境产业有限公司 湖南 长沙 410006;

2 广东盈峰智能环卫科技有限公司 广东 佛山 528300)

摘要: 随着城市管理精细化程度越来越高,全国各大城市已提出了环卫精细化的要求,越来越多的城市“毛细血管”需要进行清扫保洁,而当前一直以人工保洁为主,提高作业机械化率迫在眉睫,因此智能小型扫路机的发展前景广阔。同时,随着国家对节能减排和环境保护的要求,以及对新能源产业的大力支持,小型扫路机纯电动化趋势明显。文章结合轮毂电机的优点,首次在行业内将轮毂电机应用于智能小型扫路机并进行了深入地研究。本文详细介绍了轮毂电机的发展及应用,小型扫路机对驱动电机的选型设计要求,以及轮毂电机的选型设计计算。同时,完成了基于轮毂电机驱动的智能小型扫路机的产品开发总体设计,并研制了相关样机进行测试验证,且各测试验证结果与设计分析结果相符合。最后,对轮毂电机应用于智能小型扫路机的优势进行了阐述,并预测轮毂电机的应用将会越来越广泛。

关键词: 轮毂电机; 环卫; 智能小型扫路机; 机动灵活

0 引言

随着城市化的发展以及人们生活水平的提高,城市居民对生活环境的清洁要求也越来越高,从之前的城市“主动脉”——城市主、次干道到现在的城市“毛细血管”——背街小巷、人行道、辅道、步行街、公园景区、居民小区、风光带等,人们对这些地方的清洁工作都提出了新的要求。目前,城市主、次干道清洁保洁机械化率越来越高,机械化保洁率可达90%以上,而城市“毛细血管”一直以来以人工保洁为主,机械化率不足10%。同时,伴随着人口老龄化加剧,环卫从业人员逐年减少,人力成本也越来越高。因此,市场上对智能小型扫路机等小型环卫设备的需求越来越大,此类设备应用前景广阔。

1 轮毂电机的发展及应用

轮毂电机的最大特点是驱动电机安装在车轮内部,输出扭矩直接传输到车轮,舍弃了离合器、减速器、传动桥等机械传动部件,结构大为简化,具有外形尺寸小、效率高优点。另外,由于电机和车轮之间的机械环节减少,驱动系统和执行机构放置在一起,信息可以直接传递至整车的执行器——车轮上,这使得车辆的控制信号更加准确和直接。轮毂电机的直驱特点不仅可以使车辆噪声降低,同时也优化了加速性和平顺性,使车辆的舒适性也得到提升。轮毂电机可以通过左右车轮的不同转速甚至反转实现类似履带式车辆的差动转向,大大减小车辆的转弯半径,在特殊情况下几乎可以实现原地转向,这一功能对于特种车辆很有价值。目前,轮毂电机

的主要应用领域是观光车、高尔夫球车、垃圾清理车、摩托车、自行车等。

随着国家对新能源产业的大力支持,环卫装备行业也顺应国家相关政策的要求,越来越多的纯电动环卫装备走进公众视野,对节能减排和保护环境起到了一定的积极作用。智能小型扫路机为智能清扫作业装备,作业于城市“毛细血管”,工作环境要求其质量小、机动灵活、续航长等,轮毂电机各方面的特点正好能满足其要求。因此,文章将轮毂电机应用于智能小型扫路机上进行研究与设计。

2 轮毂电机选型设计分析及计算

2.1 环卫作业装备对驱动电机选型设计要求

受环卫清扫作业要求和作业工况复杂等情况,智能小型扫路机在驱动电机选型时有以下特点:

(1) 智能小型扫路机为保证连续工作时间,提高工作效率,设备厂家通常尽可能将清水箱和垃圾箱容积设计得比较大,这样会导致作业前后其空载和满载质量变化大,因此要按满载情况进行驱动电机选型设计;

(2) 通常情况下,智能小型扫路机清扫作业速度为3~5km/h,而为提高工作效率,其转场速度不超过25km/h,这样对驱动电机的最高转速要求较大;

(3) 智能小型扫路机作业场景复杂多变,可能会出现满载爬坡、爬坎等情况,且行业标准要求爬坡度大于20%,因此对驱动电机的扭矩要求较大;

(4) 在作业或转场行驶过程中,智能小型扫路机可能出现频繁启停、加/减速等,驱动电机还应具有理想的调速特性和较宽的调速范围,且要求驱动电机高效区

域较大；

(5) 设备还可能遇到涉水、城市内涝等恶劣情况，因此驱动电机防水等级一般要求在 IP67 以上。

2.2 轮毂电机设计选型计算

本次智能小型扫路机采用双轮毂电机前驱后转的形式，主要设计参数为：设计总质量为 1600kg，爬坡度 20%，正常作业速度 3 ~ 5km/h，转场行驶速度 20km/h，摩擦系数取 0.02，空气阻力系数取 0.4。

2.2.1 行驶阻力计算

依据车辆驱动力和行驶阻力之间的平衡关系，平衡方程为：

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j$$

式中， F_t 为驱动力， F_f 为滚动阻力， F_w 为空气阻力， F_i 为坡道阻力， F_j 为加速阻力。根据电机转速特性、传动系统传动比及传动效率、车轮半径、空气阻力系数、迎风面积以及车辆质量等参数，可确定汽车的驱动力-行驶阻力平衡关系。

(1) 滚动阻力 $F_f = mgf \cos \alpha$ ，式中 f 为滚动阻力系数，取经验系数，根据经验公式 $f = 0.02$ ；

(2) 空气阻力 $F_w = C_D A \frac{\rho v^2}{21.15}$ ，式中 C_D 为空气阻力系数， A 为迎风面积；

(3) 坡道阻力 $F_i = mgsin \alpha$ ；

(4) 加速阻力 $F_j = \delta m \frac{dv}{dt}$ ，式中 δ 为旋转质量换算系数。

因考虑到智能小型扫路机行驶速度不高，对加速性能无明显要求，空气阻力与加速度阻力很小，均可以忽略不计。那么，行驶所需最大驱动力

$$F_t = F_f + F_i = mgf \cos \alpha + mgsin \alpha$$

根据上述相关参数，计算可得 $F_t = 3383\text{N}$ 最大驱动电机功率为

$$P_{\max} = \frac{F_t v}{3600\eta} = \frac{3383 \times 5}{3600 \times 0.9} = 5.22\text{kW}$$

2.2.2 最高车速计算

转场时，最高驱动电机速度

$$n_{\max} = \frac{v_{\max} i}{0.377 r_d} = \frac{20 \times 1}{0.377 \times 0.279} = 190\text{rpm}$$

爬坡时，驱动电机转速

$$n = \frac{v i}{0.377 r_d} = \frac{5 \times 1}{0.377 \times 0.279} = 47.5\text{rpm}$$

2.2.3 满载爬坡计算

满载爬坡时，所需最大扭矩为

$$T_{\max} = \frac{5.22}{47.5} \times 9550 = 1049.5\text{Nm}$$

2.2.4 清扫作业行驶功率计算

车辆在 3% 的坡道上，以 5km/h 的速度进行清扫作业时的功率。

根据上述参数，计算可得该状态下行驶功率为

$$P_1 = \frac{F_t v}{3600\eta} = 1.75\text{kW}$$

2.2.5 满载转场功率计算

车辆在满载情况下，以 20km/h 行驶速度驾驶转场功率。

根据上述参数，计算可得该状态下行驶功率为

$$P_2 = \frac{F_t v}{3600\eta} = 1.94\text{kW}$$

综上所述，考虑一定的安全系数，轮毂电机选型为：额定功率 4kW，最高转速 260rpm，额定扭矩为 160Nm，峰值扭矩为 600Nm。

3 智能小型扫路机总体方案设计

3.1 智能小型扫路机总体设计要求

根据城市“毛细血管”作业场景调研现场实勘，其路面狭窄、人流量大、路面情况复杂多变，对清洁设备作业安全性、机动灵活性、作业噪声、稳定可靠性，以及环卫项目运营公司对产品性价比、操作便捷性等方面要求较高。因此，在设计智能小型扫路机时，重点对产品的外形尺寸、转弯半径、行走制动性能、离地间隙、作业性能、整机结构布置等方面进行了深入研究。

3.2 智能小型扫路机的结构组成

智能小型扫路机的整车结构如图 1 所示，主要包括喷水降尘系统、清扫机构、底盘总成、吸嘴总成、罩壳总成、液压系统、风机、副车架、除尘系统和提桶机构等。

其中，吸嘴总成布置于底盘总成前轴正下方，其前方设置清扫机构，提高底盘空间利用率，使前部更加紧凑。风机布置在副车架的上方，进风口与吸嘴总成出风

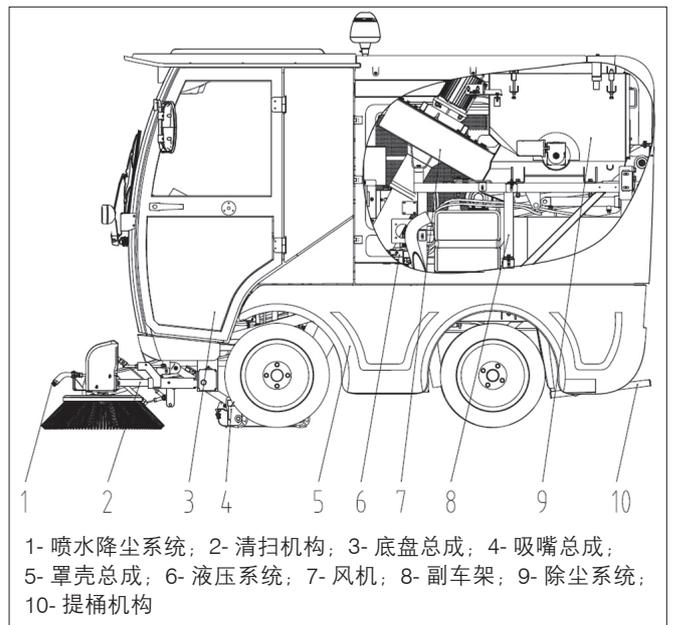


图 1 智能小型扫路机整车结构示意图

口保持于同一直线上,使得吸管直线布置无弯折,减少气力损耗,提升风机作业效率。除尘系统布置于风机正后方,其下方设置提桶机构,气力运输行程短,作业效率高。

3.3 智能小型扫路机总体方案设计

3.3.1 整机轴荷、稳定性设计计算

根据智能小型扫路机总体设计方案,建立整机结构布置三维模型,以地面、智能小型扫路机纵向对称面和前轴中心铅垂面三个平面的交点为坐标原点,Y轴向右为正、X轴向后为正、Z轴向上为正建立坐标系,分析计算得到整机质心位置和前后桥轴荷分布见表1,稳定性分析计算结果见表2。

表1 智能小型扫路机轴荷分布计算结果

工况	前桥轴荷比	后桥轴荷比
空载	47.89%	51.11%
满载	42.62%	57.38%

表2 整机稳定性分析计算结果

名称	行驶工况	空载	满载	备注
纵向行驶稳定性	上坡行驶不倾翻最大坡度	40.36°	35.2°	达标
	下坡行驶不倾翻最大坡度	38.2°	44.13°	达标
侧倾稳定性	侧倾稳定角	32.39°	32.32°	行业标准 > 20°, 达标

3.3.2 底盘总成

根据智能小型扫路机底盘总体设计要求,为提高产品的机动灵活性,底盘采用前驱后转的结构形式。为缩短整机长度,采用双轮毂电机驱动,其作业装置吸嘴可布置在两轮毂电机中间部位(见图1),设计外形尺寸仅为2880mm×1040mm×1970mm,转弯半径为2.3m。

底盘总成结构组成如图2所示,驾驶室布置于前轴

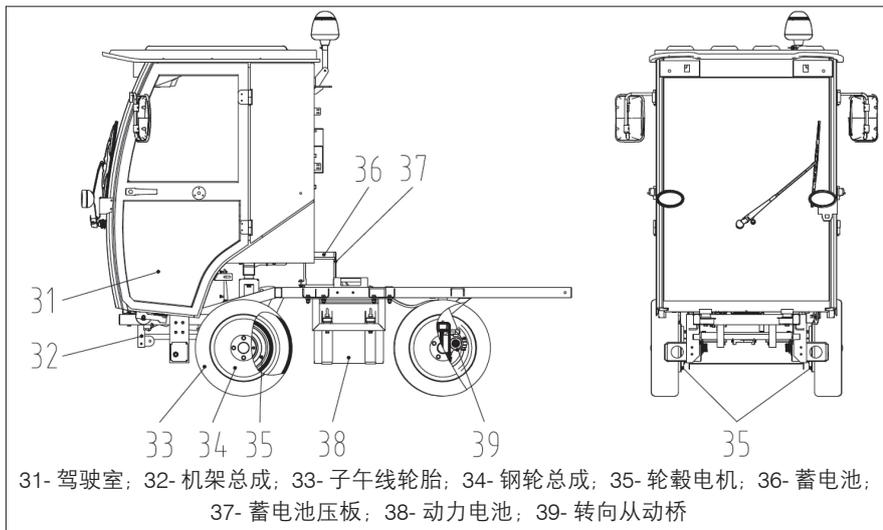


图2 底盘系统示意图

正上方,采用新设计后,作业时车门可以全部向后打开,驾驶室内通风舒适,前置双轮毂电机进行驱动,与车架的连接结构见图5,后置转向从动桥进行承载与转向,与车架的连接结构见图5。这样的前后轴布置,使得转向轮拥有更大的转向空间,可以设置更大的角度,从而整车有更小的转弯半径,动力电池放置于前后轴之间,充分利于车架空间,同时使得整体质心更低,行驶更加稳定。

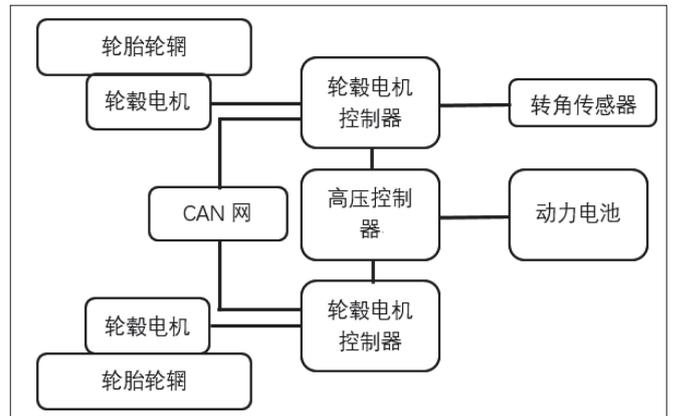


图3 底盘系统驱动控制示意图

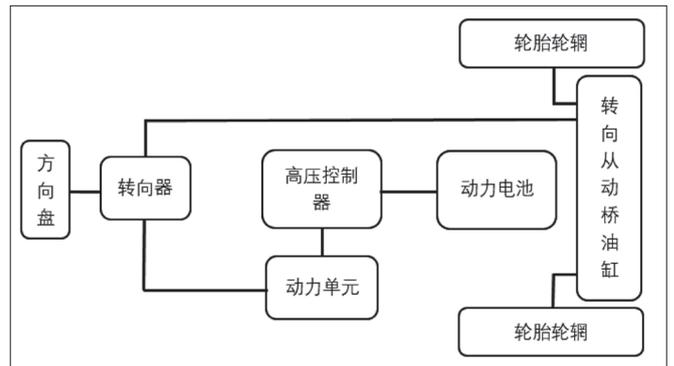


图4 底盘系统转向控制示意图

底盘系统启动后,高压电经高压控制器后进入轮毂电机控制器,驾驶员选择前进/后退挡位,用脚踩动加速踏板,轮毂电机转动,带动扫路机向前/向后行驶,原理如图3所示。同时,高压电经高压控制器进入液压系统中,启动动力单元,将液压油带入液压转向器,转动方向盘,控制转动从动桥中液压油缸工作,进而推动后轮旋转实现转向,控制示意图见图4。

3.3.3 吸嘴

吸嘴布置于轮毂电机之间,合理利用该部分空间,通过液压油缸传动提升,设置双连杆进行导向,且与清扫机构同步联动,结构示意图见图5。

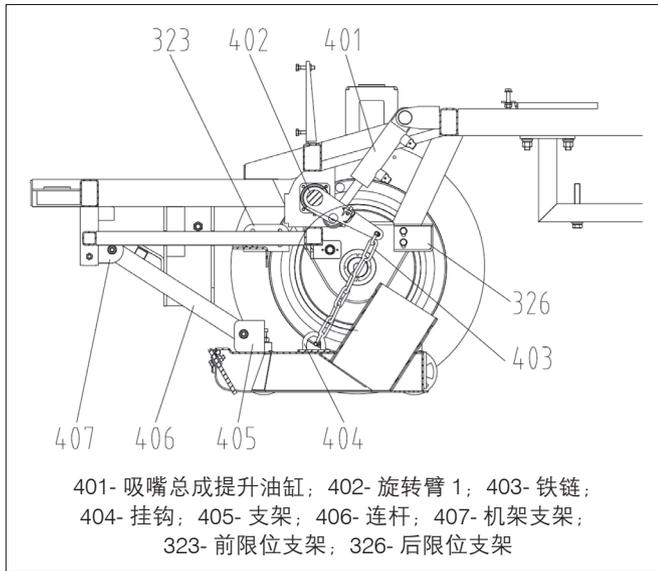


图5 吸嘴总成结构示意图

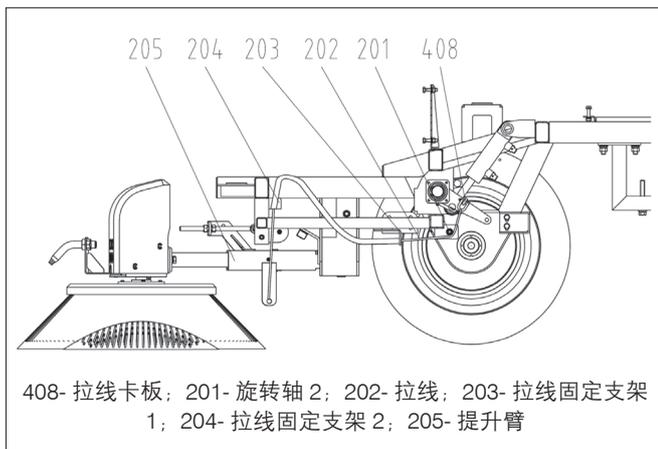


图6 清扫机构结构示意图

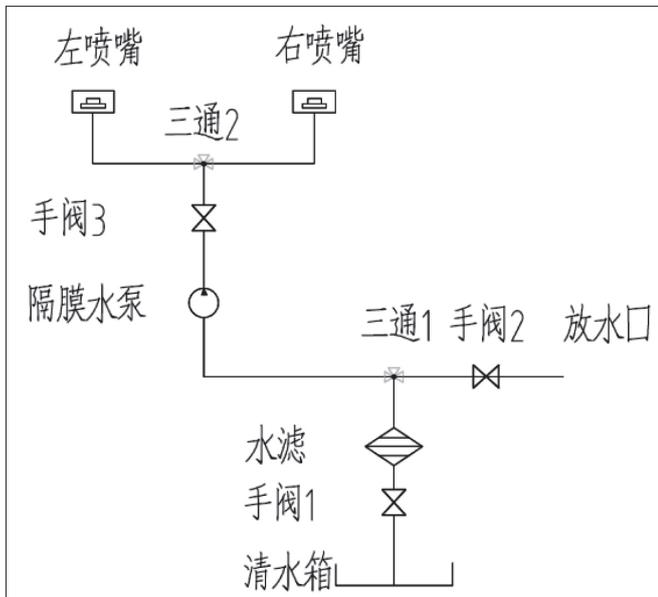


图7 喷水降尘系统原理图

3.3.4 清扫机构

清扫机构是扫路机的重要执行元件，将垃圾从路边清扫至吸嘴可以吸收到的范围内。一般包括扫盘、扫盘电机、控制器、支架、提升装置等，如图6所示。根据清扫作业特点，本设计为减少执行元件，通过拉线设计将清扫机构的升降和吸嘴保持同步联动。

3.3.5 喷水降尘系统

喷水降尘系统主要对扫盘清扫作业时产生的扬尘进行喷雾降尘，主要包含清水箱、水过滤器、隔膜泵、球阀、管路等，如图7所示。

3.3.6 液压系统

考虑智能小型扫路机设备运行的稳定、可靠，本产品采用液压驱动形式。同时，因设备外形尺寸小、布置空间紧凑，采用液压动力单元来驱动各个执行机构，主要包含吸嘴升降、垃圾桶升降、转向系统等，液压系统原理见图8。

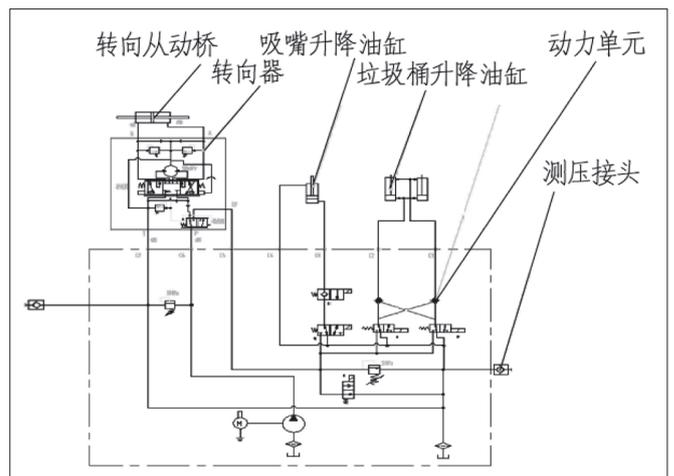


图8 液压系统原理图

3.3.7 清扫作业气力系统

风机设置在副车架的顶上前部，除尘系统在风机的后部，两者紧密连接，提桶机构设置于除尘系统正下方，在除尘系统箱体下部粘贴有密封圈，提桶机构将垃圾桶提起使其与密封圈压紧贴合，保证气密性，其布置位置以及工作时气力传输方向见图9。

风机电机启动工作，带动叶轮旋转，在风机蜗壳内部产生负压，将空气和垃圾从吸嘴处吸入，经吸管传输，进入风机内部，垃圾被高速旋转的叶轮打碎，而后随风进入垃圾桶内。垃圾桶内设一级过滤网，除尘系统下部设置有二级过滤网，能有效过滤随风上涌的轻飘垃圾，且设计为快拆结构，方便拆卸处理，剩余的灰尘随空气进入除尘系统内，经滤布过滤灰尘后，气流从后方排出。

3.3.8 提桶机构

提桶机构主要由提升机构、垃圾桶等组成，布置在整车后端，连接固定在副车架上，通过液压油缸驱动连

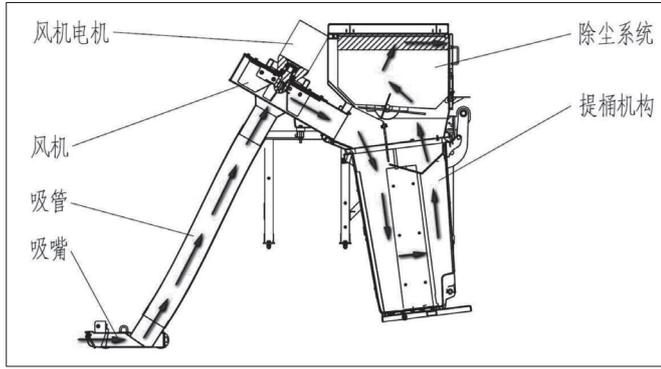


图9 气力传输示意图

杆机构实现垃圾桶的升降。同时，可通过旋转调节螺纹杆长度，调整垃圾桶放置的水平角度，使其能与除尘系统紧密相连。

4 试验及结果

根据上述智能小型扫路机总体设计方案，进行了样机试制并完成了相关测试验证，各项测试结果均与设计值相符合，且满足其性能要求，其测试结果见表3~表5。

5 结语

智能小型扫路机通过采用双轮毂前驱后转的底盘结构形式，使整机总体结构布置更加紧凑，设备作业性能得到提高，主要表现在以下几个方面：

(1) 转弯半径可大幅减小，产品机动灵活性更高，作业场地适应性更广，可充分满足城市“毛细血管”清扫保洁作业需求；

(2) 吸嘴布置于两轮毂电机之间，气力系统设计更加优化，避免垃圾在吸管中流动不顺畅、堵管等问题，且有效降低风机负载和作业噪声，提升吸扫作业性能；

目前，轮毂电机已在电动摩托车、自行车等行业的应用上取得巨大成功。可以预见，轮毂电机将以其诸多优势成为未来电动车辆或设备的主要驱动形式。同时，随着研究的不断深入、电机性能的不断提高，以及电池技术、动力控制系统和整车能源管理系统等相关技术的突破，轮毂电机必将在电动汽车领域获得更广泛的应用。

参考文献：

[1] 孔垂毅，代颖，罗建. 电动汽车轮毂电机技术的发展现状与发展趋势[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(2): 101-108+113.

表3 智能小型扫路机轴荷测试验证结果

工况	前桥轴荷比	后桥轴荷比
空载	48.6%	51.4%
满载	41.6%	58.4%

表4 整机稳定性测试验证结果

名称	行驶工况	空载	满载	备注
纵向行驶稳定性	上坡行驶不倾翻最大坡度	35.2°	32.5°	达标
	下坡行驶不倾翻最大坡度	34.7°	36.2°	达标
侧倾稳定性	侧倾稳定角	29.4°	32.1°	行业标准 > 20°，达标

表5 智能小型扫路机产品性能测试结果

项目	单位	型号及参数
整备质量	kg	1400
最大总质量	kg	1600
外形尺寸(长×宽×高)	mm	3200×1040×1990
最小离地间隙	mm	150
清扫宽度	mm	1750
清扫速度	km/h	0~5
扫净率	%	≥97
最大清扫能力	g/m ²	300
最高行驶速度	km/h	21.5
爬坡度	%	>20
最小转弯半径	m	≤2.25

[2] 曾恒，杨自栋，等. 基于轮毂电机驱动的电动拖拉机总体设计与试验[J]. 农机化研究, 2021(10): 246-253.

[3] 李安. 轮毂电机驱动电动汽车的四轮转向操纵稳定性分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2021(2): 118-122.

[4] 胡凯，黄东方，王变变. 电动车的驱动模式和发展趋势[J]. 时代汽车, 2021(12): 93-94.

[5] 王迪，尚秉旭，等. 轮毂电机及其电动车技术发展综述[J]. 汽车文摘, 2019(11): 40-44.

[6] 欧阳联格，肖强，等. 基于气固两相流的电动扫路机吸嘴结构参数设计[J]. 现代制造工程, 2020(6): 115-123.

[7] 张斌，滕新科，等. 扫路机专用风机内部气固两相流场仿真分析[J]. 机电工程, 2018(3): 246-250.

[8] 刘建华. 小型扫路机的技术特点与发展趋势[J]. 中国城市环境卫生, 2003(6): 32-38.