

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.03.018

电旋风分离器内电晕放电流场的数值模拟

郭佳才, 刘伟军*

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:为了探究电旋风除尘器内流场在电晕放电条件下的分布,课题组借助 FLUENT 软件对其进行数值模拟。建立了静电旋风分离器的单相三维湍流的 RSM 模型,采用控制体积法对其离散,用 SIMPLE 算法求解流场分布,得到了一定条件下静电旋风分离器内流场的切向速度和轴向速度分布。结果表明:施加高压电压不会改变切向速度和轴向速度的分布情况,仅改变切向速度和轴向速度的大小,且切向速度的变化大于轴向速度的变化;同时发现,在高压电压条件下能够减小颗粒的回带和提高颗粒的分离效率。

关键词:静电旋风分离器;RSM 模型;控制体积法;SIMPLE 算法

中图分类号:TU834.6;TH237.5

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2020)03-0087-05

Numerical Simulation of Flow Field under Corona Discharge in Electrostatic Cyclone

GUO Jiakai, LIU Weijun*

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to study the distribution of flow field under corona discharge in electrostatic cyclone, the numerical simulation with FLUENT software was carried out by the research group. A single phase, three dimensional turbulent flow model-RSM model of flow field in cyclone was developed. RSM model was dispersed by the control-volume method and solved by the SIMPLE algorithm. The axial velocity and tangential velocity profiles in electrostatic cyclone were obtained by numerical simulation. The results show that applying high voltage does not change the distribution of tangential velocity and axial velocity, only changes the size of tangential velocity and axial velocity, and the change of velocity in tangential is greater than the change in axial. At the same time, it is found that under the condition of high voltage, it can reduce the particle return and increase the particle separation efficiency.

Keywords: electrostatic cyclone; reynolds stress model; control-volume method; SIMPLE algorithm

电旋风分离器是利用离心力和电场力的共同作用来分离固体颗粒的设备,即拥有旋风分离器去除大粒径颗粒的性质,同时电场力的加入有利于捕捉小粒径粒子^[1](粒径 1~10 μm 左右)。由于电场力的加入,气流受到电晕放电产生的强电场影响,是三维强旋流运动,流动情况复杂。目前对电旋风分离器流场的数值模拟^[2-5]较少,且主要集中在无电晕情况或采用 κ - ε 湍流模型。由于 κ - ε 湍流模型理论中雷诺应力的求解主要基于各向同性的 Boussinesq 的湍流黏性假设,而强旋流拥有各向异性的特性,模拟精度较低。而 RSM 湍流模型直接求解雷诺应力,适用于拥有各向异性的

强旋流体。

课题组通过 FLUENT 软件的 UDS 编程接口,导入电场力数学模型,建立电旋风分离器的单相三维湍流 RSM 模型,模拟电晕放电条件下电场力对电旋风分离器三维流场的影响。

1 数学模型

1.1 电场数学模型

电旋风分离器电场电势、电场场强分别满足:

$$\nabla^2 U = -\frac{\rho_e}{\varepsilon_e}; \quad (1)$$

$$E = -\nabla U. \quad (2)$$

收稿日期:2019-06-27;修回日期:2020-01-14

第一作者简介:郭佳才(1993),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要研究方向为电旋风除尘器的数值模拟。通信作者:刘伟军(1963),男,黑龙江牡丹江人,博士,教授,主要研究方向为能源装备与节能技术。E-mail:lwj119@139.com

式中: U 为电场电势, V ; ρ_e 为电荷密度, C/m^3 ; ε_e 为介电常数(电容率), F/m ; E 为电场强度, V/m 。

电流密度方程由 3 项构成^[6-7]: 导电项(电晕场下由气流运动引起的离子迁移)、对流项(以气流为载体的电荷输运)和扩散项(带电粒子的扩散运动)。其表达式为:

$$J = K_e \rho_e E + \rho_e u_g - D_e \nabla \rho_e \quad (3)$$

式中: J 为电流密度, A/m^2 ; K_e 为离子迁移率, $m^2/(V \cdot s)$; u_g 为气流速度, m/s ; D_e 为离子扩散系数, m^2/s 。

电流密度、流场速度连续性方程分别为:

$$\nabla J = 0; \quad (4)$$

$$\nabla u_g = 0. \quad (5)$$

将方程(3)代入方程(4)中,结合方程(2)和(5)可得电荷密度输运方程:

$$\nabla (K_e E + u_g) \rho_e - \nabla^2 \rho_e = 0. \quad (6)$$

结合方程(1)、(2)和(6)形成电旋风分离器电场数学模型。

1.2 流场数学模型

流场数学模型采用雷诺应力输运模型(RSM),其中雷诺平均连续性方程、雷诺平均动量方程和电场力方程分别为:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0; \quad (7)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial (\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j)}{\partial x_j} + \bar{f}_i; \quad (8)$$

$$\bar{f} = -\rho_e \nabla U. \quad (9)$$

式中: $\bar{u}$, $\bar{u}'$ 为速度系综平均、脉动速度, m/s ; 下标 $i, j = 1, 2, 3$; $\bar{f}$, $\bar{f}'$ 为电场力向量、电场力系综平均, N/m^3 ; t 为时间, s ; x 为笛卡尔坐标分量。

雷诺应力输运方程:

$$\rho \frac{\partial \bar{u}'_i \bar{u}'_j}{\partial t} + C_{ij} = P_{ij} + \Phi_{ij} + D_{T,ij} + D_{L,ij} - \varepsilon_{ij}. \quad (10)$$

式中: C_{ij} , P_{ij} , Φ_{ij} , $D_{T,ij}$, $D_{L,ij}$, ε_{ij} 分别为对流项、应力生成项、压力应变项、湍流扩散项、分子扩散项和耗散项。

由于 C_{ij} , P_{ij} , $D_{L,ij}$ 与雷诺应力相关,不需要做新模型。对 Φ_{ij} 采用 Gibson, Fu, Launder 和 Brian 等^[8-11]的方案,构建了线性压力-应变模型。 $D_{T,ij}$ 采用 Daly 和 Harlow^[12]的广义梯度扩散模型,并使用 Lien 和 Leschziner^[13]的标量湍流扩散系数简化,而 ε_{ij} 按 κ - ε 模型建模。

方程(7)、(8)和(10)加上 κ - ε 模型构成了流场湍流数学模型,并在流场数学模型中加入电场力。

2 物理模型和边界条件

本研究主要针对刘伟军教授的电旋风分离器^[14],以 1:10 的比例缩小原工业模型,进行数值模拟,得到圆筒内径为 100 mm,电极直径为 2 mm 的电旋风除尘器,具体结构尺寸如图 1 所示。使用 ICEMCFD 进行网格划分,采用六面体结构化网格,电极结构做 solid 处理,局部网格如图 2 所示。

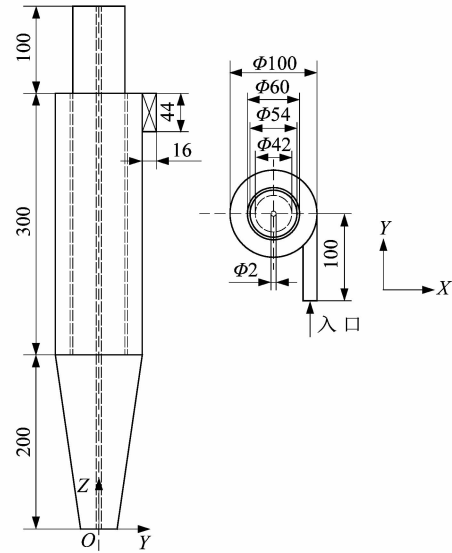


图 1 分离器模型示意图

Figure 1 Schematic of cyclone model

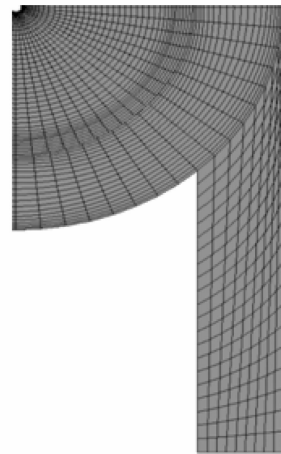


图 2 分离器 1/4 平面网格

Figure 2 1/4 surface mesh of cyclone

边界条件的设定如表 1 所示,给定湍流强度 $I = 0.05\%$ 和入口水力直径 $D_{in} = 4A/L = 23.47$ mm。在壁面上采取无滑移条件。由于近壁区域,黏性力起主导作用,对 RSM 模型在近壁区域采用标准壁面函数^[15]进行修正。

表1 边界条件

Table 1 Boundary conditions

边界	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	压强/Pa	k/J	$\varepsilon/\%$	雷诺应力/ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)	电势/kV	电荷密度/ ($\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$)
进口	5	5	$3I^2 U_{g,\text{inlet}}^2/2$	$0.164k_{\text{inlet}}^{1.5}/(0.07D_{\text{inlet}})$	$2k_{\text{inlet}}\delta_{ij}/3$	0	0
出口	$\partial u_g/\partial n = 0$	$\partial p/\partial n = 0$	$\partial k/\partial n = 0$	$\partial \varepsilon/\partial n = 0$	$\partial \bar{u}'_i \bar{u}'_j / \partial n = 0$	$\partial U/\partial n = 0$	$\partial \rho_e/\partial n = 0$
电晕电极	0	0	0	0	0	0, 30, 40	$\rho_e = j/(Ek_e)$
收尘筒壁	0	0	0	0	0	0	$\partial \rho_e/\partial n = 0$

注: δ_{ij} 为克罗内克函数。

RSM 计算方法选择:压力-速度耦合方式选择适用性广的 SIMPLE 算法,压力离散格式选择适用于旋流的 PRESTO! 方案,对于动量使用 QUICK 算法提高精度,收敛因子设置为 1×10^{-5} 。对于电势和电荷密度方程的离散保存默认设置。

模型假设:①流体为单相理想气体,当粉尘浓度低时,可不考虑颗粒的影响;②气流运动与时间无关;③电晕放电是一个稳定的过程;④在单相流场中,气体电离后主要受到静电库仑力的影响,雷诺平均动量方程中的外力考虑库仑力的作用。物性参数如表2所示。

表2 物性参数

Table 2 Physical parameters

气体密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	气体动力黏度/ ($\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$)	介电常数/ ($\text{pF} \cdot \text{m}^{-1}$)
1.225	17.9	8.854
离子迁移率/($\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	离子扩散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	
2×10^{-4}	5.2×10^{-6}	

3 模拟结果分析

3.1 电势、电场强度和电荷密度分布

电势径向分布如图3所示,电势随径向增大而下降,在电晕电极附近急剧减小,随后缓慢减小。当施加30 kV 高压电压时,电晕极电势为30 kV,收尘极电势为0 kV;当电压增加到40 kV 时,电晕极电势为40 kV,收尘极电势为0 kV。

电场强度分布如图4所示。电晕电压为30 kV 时,电场强度沿径向增大而减小。在电晕电极附近,电场强度梯度变化剧烈,最大电场强度约为 $5.3 \times 10^6 \text{ V/m}$;在收尘极附近,电场强度梯度变化趋于平缓,此时场强约为 $4.5 \times 10^5 \text{ V/m}$ 。当电晕电压升高至40 kV 时,电场强度分布形状一致,但电场强度曲线上移;电极附近电场强度与30 kV 比显著增大,增大到 $5.9 \times 10^6 \text{ V/m}$,电场强度增加10.2%;收尘极附近电场强度也同样增大,约为 $6.9 \times 10^5 \text{ V/m}$,电场强度增加53.3%。

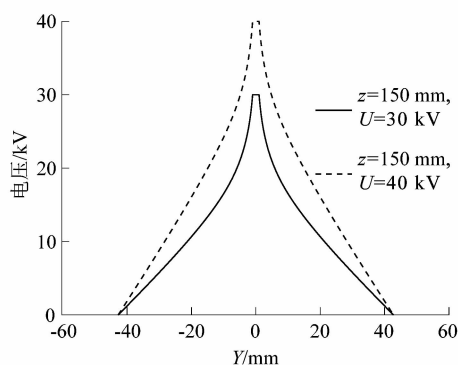


图3 电势径向分布

Figure 3 Radial distribution of electric potentials

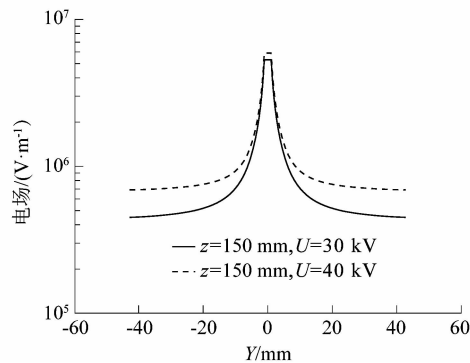


图4 电场径向分布

Figure 4 Radial distribution of electric fields

电荷密度径向分布如图5所示。当电晕电压为30 kV 时,电荷密度径向分布呈现中间高、两端低的特性,电荷密度梯度沿径向增大而逐渐减小,电晕电极侧有 $3.6 \times 10^{-4} \text{ C/m}^3$ 的最大电荷密度,收尘极侧有 $0.9 \times 10^{-4} \text{ C/m}^3$ 的最小电荷密度。当电晕电压升高至40 kV 时,电荷密度分布曲线上移,与30 kV 相比电荷密度在电晕和收尘电极附近均显著增大,此时电晕电极侧最大电荷密度为 $7.5 \times 10^{-4} \text{ C/m}^3$,相对增加108.3%;收尘极侧最小电荷密度约为 $1.4 \times 10^{-4} \text{ C/m}^3$,相对增加55.5%。

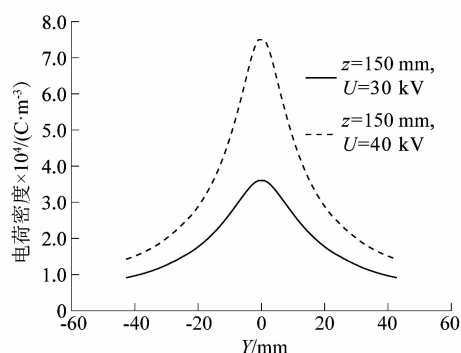


图5 电荷密度径向分布

Figure 5 Radial distribution of electric charge densities

3.2 轴向速度分布

轴向速度分布如图6所示,施加高压电场后,轴向速度分布形态并无明显变化,但轴向速度大小发生变化:在放电极区域为上行流,收尘极区域为下行流。表明流体先沿收尘极区域向下旋流,到达灰尘出口返回过程会沿放电极区域向上旋流。当不施加电晕电压,流体沿收尘极区域向下流动过程中,向下流动轴向速度缓慢减小;而流体沿放电极区域向上流动过程中,轴向速度明显增加。

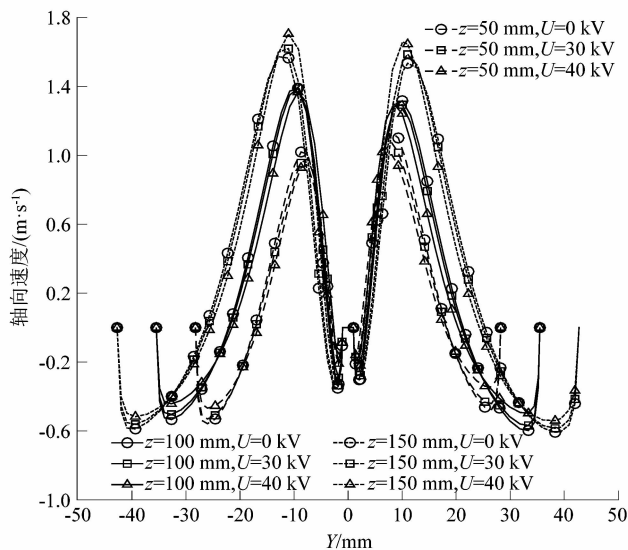


图6 分离器内轴向速度分布的数值模拟

Figure 6 Numerical simulation results of axial velocity distribution in cyclone

当施加高压电场后,收尘极区域下行流速度有所减小;且施加电压越高,下行流速度减小的越多。施加30 kV电晕电压时,下行流轴向速度减小约4%~8%;施加40 kV电晕电压时,下行流轴向速度减小约12%~22%。随着电压增加,轴向速度减小会导致流体向下旋流的时间增加,有利于增加颗粒的荷电量。

在放电极区域流体向上旋流的过程中。随着电压增加:在高度为 $z=50$ mm处,放电极区域上行流速度减小;在高度为 $z=100$ mm处,放电极区域上行流速度略有减小;在高度为 $z=150$ mm处,放电极区域上行流速度增加。施加电压越高,轴向速度增加的幅度变大。由于流体向上回流的初始过程中,轴向速度减小,有利于减小固体颗粒的回带效果,且电压越高效果越显著。

3.3 切向速度分布

切向速度分布如图7所示,施加高压电压,切向速度分布形态也无明显变化,但切向速度大小改变。切向速度沿径向呈现“M型”结构,以“M型”结构沿左右两侧最大的切向速度为分界点,收尘极区域为自由涡,放电极区域为强制涡。自由涡伴随着向下旋流过程,强制涡伴随着返回过程的向上旋流。当电晕电压为0 kV时,随着高度的增加,切向速度增大。

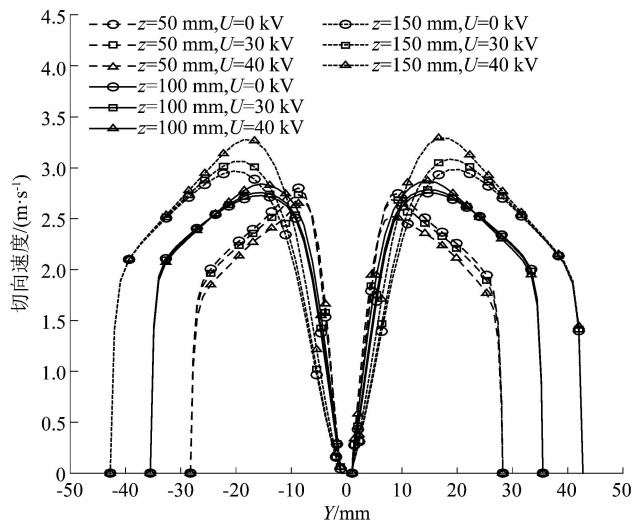


图7 分离器内切向速度分布的数值模拟

Figure 7 Numerical simulation results of tangential velocity distribution in cyclone

当施加电晕电压后,随着电压增加:在高度 $z=50$ mm处,切向速度略有减小;在高度 $z=100$ mm处,切向速度稍有增加;在高度 $z=150$ mm处,切向速度增加明显。随着电压增加,切向速度增加的幅度变大,且切向速度增加幅度大于轴向速度增加幅度。这是由于施加高压电场,流体向下旋流过程中,切向速度整体增大,可以促进颗粒的分离;且电压越高,分离效果越显著。

4 结语

课题组在RSM的基础上,通过UDS接口添加电场数学模型,从而导入电场力,实现电场力对于电旋风分离器流场的影响。在电场数学模型中,考虑了电场、

流场和电荷扩散对于电荷密度方程的影响。

电势、电场和电流密度沿径向分布曲线都呈现中间高、两端低的特性。三者的变化梯度在电晕电极侧显著大于收尘极侧。

高压电压的施加对轴向速度和切向速度分布形态无明显影响,仅改变了速度大小,且对切向速度的影响大于轴向速度。高压电场能够减小向下旋流轴向速度、同时减小返回过程中的上旋流轴向速度,既能提高颗粒荷电时间,又能减小颗粒的回带效果。同时,高压电场能有效提高流体切向速度,可以促进颗粒的分离。

参考文献:

- [1] LIM K S, LEE K W, KUHLMAN M R. An experimental study of the performance factors affecting particle collection efficiency of the electrocyclone [J]. *Aerosol Science & Technology*, 2001, 35(6): 973-976.
- [2] 汤光华, 顾中铸, 王式民, 等. 无电晕式高温静电旋风除尘器三维流场数值分析[J]. *锅炉技术*, 2005, 36(6): 43.
- [3] 李济吾, 蔡伟建. 旋风静电除尘器单相三维流场数值模拟[J]. *化工学报*, 2005, 56(8): 1433-1434.
- [4] 张吉光. 静电旋风分离器气相流场的数值模拟及实验研究[D]. 上海: 东华大学, 2005: 56-62.
- [5] 张吉光, 张竹茜, 沈恒根. 静电旋风分离器气相流场的数值模拟[J]. *应用力学学报*, 2006, 23(1): 44-45.
- [6] TASSICKER O J. Boundary probe for measurement of current density and electric-field strength; with special reference to ionised gases [J].

Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1974, 121(3): 213-220.

- [7] 刘志强, 李鹏, 柴建荣, 等. 电除尘器内电晕放电流体场的数值模拟[J]. *工业加热*, 2009, 38(6): 12.
- [8] GIBSON M M, LAUNDER B E. Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric boundary layer [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, 86(3): 491-511.
- [9] FU S, LAUNDER B E, LESCHZINER M A. Modelling strongly swirling recirculating jet flow with Reynolds stress transport closures [C]//Symposium on Turbulent Shear Flows. Toulouse, France: Pennsylvaniq State University, 1997: 9.
- [10] LAUNDER B E. Second-moment closure and its use in modeling turbulent industrial flows [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2010, 9(8): 963-985.
- [11] BRIAN E L. Second-moment closure: present... and future? [J]. *International Journal of Heat & Fluid Flow*, 1989, 10(4): 282-300.
- [12] DALY B J, HARLOW F H. Transport Equations in Turbulence [J]. *Physics of Fluids*, 1970, 13(13): 2636-2649.
- [13] LIEN F S, LESCHZINER M A. Assesment of turbulence transport models includeing non-linear RNG eddy-viscosity formulation and second-moment closure [J]. *Computers and Fluids*, 1994, 23(8): 983-1004.
- [14] 刘伟军. 多级复合式电旋风除尘器的机理和性能研究及技术开发[D]. 上海: 上海理工大学, 2005: 49-50.
- [15] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 2014, 3(2): 269-289.

(上接第 86 页)

5 结论

课题组结合 Hypermesh 和 Ansys Workbench 对电动汽车动力电池箱进行模态分析, 求解出动力电池箱的各阶模态频率和振型; 通过模态测试验证了有限元模态仿真的准确性。为避免动力电池箱因车轮不平衡激励产生共振, 课题组提出了结构优化方案, 并得到以下结论:

1) 对比 3 种优化方案, 选用更改底板材料和增加纵梁相结合的方案。改进后电池箱 1 阶频率提高到 18.93 Hz, 高于车轮不平衡激励, 提高了箱体的抗振性。

2) 考虑布局与轻量化, 在动力电池箱上增加 2 道纵梁来提高箱体的刚度, 增大了 1 阶模态频率。

3) 鉴于碳纤维复合材料具有高强度、耐腐蚀和轻量化等优良特性, 将底板材料更换为碳纤维复合材料; 更换材料后动力电池箱箱体的质量和之前相比减轻比例达到 55.44%, 实现了整车轻量化, 有效提高了电动汽车经济性。

参考文献:

- [1] 常正雷, 付一民, 司铎, 等. 纯电动汽车电池包即时发泡密封胶研究[J]. *电源世界*, 2018(11): 37-39.
- [2] 路致远, 张卫国, 赵明宇, 等. 基于扫频法的电动汽车快换电池箱结构仿真与优化[J]. *现代制造工程*, 2013(5): 63-68.
- [3] 桑林, 叶健诚, 董晨. 电动汽车动力电池箱模态分析和试验研究[J]. *制造业自动化*, 2013, 35(22): 77-79.
- [4] 杨书建. 电动汽车电池箱动静特性分析及其结构优化设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2012: 42-50.
- [5] 储毅, 刘华峰, 赵明宇, 等. 基于 FEM 的电动汽车快换电池箱模态分析与优化[J]. *制造业自动化*, 2012, 34(24): 104-107.
- [6] 李夕亮, 郭世永. 基于 NASTRAN 蓄电池箱有限元分析与实测研究[J]. *湖北汽车工业学院学报*, 2007, 21(4): 13-16.
- [7] 李良, 杨金相, 秦艳芳. 某纯电动客车电池箱的静强度与模态分析[J]. *电源世界*, 2016(8): 47-49.
- [8] 马天飞, 王登峰, 刘文平. 重型商用车驾驶室白车身的模态分析与实验研究[J]. *汽车工程*, 2009, 31(7): 616-619.
- [9] 孙小卯. 某型电动汽车电池包结构分析及改进设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2013: 24.
- [10] 邵慧. 基于底盘激励的汽车高速状态转向系统抖动分析及优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2014: 58-59.