基于回归正交试验的旋风分离器结构优化研究

李华标 吴晓明 吕智

(厦门大学 航空航天学院,福建 厦门 361000)

摘 要:针对旋风分离器多结构参数变化,选取影响旋风分离器性能较大的4个结构参数作为优化变量:圆柱体高度 H/D、排气管直径 d/D、排气管插入深度 h/D、锥体高度 H_/D。以回归正交试验法为实验方案,做36 组仿真模拟实验。采用 湍流计算的雷诺应力模型(RSM)进行气固两相流场数值模拟,并用拉格朗日法追踪固体颗粒的运动轨迹;在此基础上分 别建立了旋风分离器压降和分离效率对其结构参数的回归数学模型;根据回归数学模型针对结构参数对旋风分离器的压 降和分离效率的影响程度进行了分析,得出影响压降的最主要因素是升气管直径(随着升气管直径增大压降显著减小)、 影响分离效率的最主要因素是升气管直径和锥体段高度。

关键词:旋风分离器;CFD模拟;回归正交试验法;回归模型;优化设计 中图分类号:TQ051.8 文献标识码:A 文章编号:1672-4801(2018)02-016-06 DOI:10.19508/j.cnki.1672-4801.2018.02.006

旋风分离器是一种利用离心力将固体颗粒从 气固两相流体中分离出来的分离设备,因其结构 简单,对环境适应性强而在工业领域得到了广泛 的应用印。旋风分离器结构参数对其内部气流及 尘粒的分离效率有重要影响,为提高旋风分离器 的性能,人们采用计算流体力学(CFD)对旋风分 离器的结构进行了大量研究。Stairmand¹²提出了 一种优化的设计方案,即圆柱体高度和排气管直 径分别为圆柱体直径的1.5倍和0.5倍。Hoekstra¹³通过对3种不同直径排气管的旋风分离器在 不同流速下进行实验研究发现随着排气管直径的 缩小及流速的增大,压降呈非线性增大。黄滨⁴⁴等 利用贴体网格技术,模拟得到不同排气管插入深 度时的旋风分离器各向性能,得出排气管插入深 度存在最优值,可保证较高的分离效率和较低的 压降。Ficici F¹⁵对3个直径分别为0.235D(D为圆 柱体直径),0.353D,0.471D的排气圆管的旋风分 离器,以排气管长度、气体速度和颗粒浓度作为变 量进行实验;在含尘气体流速增大时,3个旋风分 离器的分离效率都会下降,而0.353D的旋风分离 器下降程度最小:认为0.353D的排气管直径是个 临界值。L.S.Brar[®]以筒体部分长度和锥体部分长 度为变量,发现将简体部分长度增加到5.5D可以 降低34% 压降和提高9.5% 分离效率; 而如果增加 锥体部分长度到6.5D,可以降低29%压降而增加

11%分离效率。

本文讨论多结构参数变化的分离器结构优 化。多个结构参数在一定范围变化时,运用回归 正交设计(orthogonal regression design)试验方法, 选择适合的试验点,采用计算流体动力学(CFD) 中湍流计算的雷诺应力模型(RSM)对各个试验点 的旋风分离器两相流场进行数值模拟,并用拉格 朗日法追踪固体颗粒的运动轨迹,得到压降和分 离效率的模拟试验数据。根据这些模拟实验数据 建立一个回归数学模型,并根据回归数学模型针 对结构参数对压降和分离效率影响程度进行了 分析。

1 几何模型和优化参数

以Stairmand旋风分离器(见图1)为优化基础 模型。选取压降和分离效率作为评价指标,以获 得压降小且分离效率高的旋风分离器结构。

为了确定不同旋风分离器的几何相似性(这些尺寸通常由旋风分离器的圆柱体直径D作标准化),以7个比例尺寸*a/D、b/D、H/D、d/D、h/D、H_d/D、B/D*来定义旋风分离器的结构参数(见表1)。

旋风分离器入口和排料口形状及尺寸保持不变,选取影响旋风分离器性能较大的4个结构参数作为优化变量:圆柱体高度H/D、排气管直径d/ D、排气管插入深度h/D、锥体高度H_/D。优化结构参数的初始尺寸和变化范围如表2所示。

作者简介:李华标(1991一),男,硕士生,从事结构优化研究。 吴晓明(1963—),男,副教授,博士,从事结构优化研究。



LI Stallmanu ACMU 内部中国初の及日

几何参数	数值	比例(相对于D)
进口尺寸a×b/mm²	145×58	0.5×0.2
圆柱体直径 D/mm	290	1
圆柱体高度H/mm	435	1.5
排气管直径 d/mm	145	0.5
排气管插入深度 h/mm	145	0.5
圆锥体高度H _e /mm	725	2.5
排尘口直径B/mm	107.3	0.37

表1 Stairmand型旋风分离器基本尺寸

优化变量	初始比例	比例变化范围
排气管直径 d/D	0.5	0.3 ~ 0.7
排气管插入深度 h/D	0.5	0.3 ~ 0.7
圆柱体高度H/D	1.5	0.9 ~ 2.1
圆锥体高度H _e /D	2.5	1.5 ~ 3.5

2 流动模拟

旋风分离器内部气相流动为高雷诺数三维强 湍流,为准确反映流场中各向异性效应,气相流场 模拟选用雷诺应力模型(RSM)^[7-9],其中压力梯度 项采用PRESTO!方法进行处理,压力耦合的求解 基于质量、动量和能量传递方程的SIMPLEC半隐 式方法,各方程对流项采用QUICK差分格式^[10]。

2.1 控制方程

RSM 输运方程:

$$u_k \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u_i \, u_j'}) = D_{ij} + P_{ij} + \theta_{ij} - \varepsilon_{ij}$$
(1)

式中: D_{ii} 输运扩散项, P_{ii} 应力产生项, θ_{ii} 压力应变 项, ε_{ii} 耗散项。

DPM模型(离散相模型)适用于颗粒体积分数 小于10%的气固两相流动,故颗粒相的模拟计算 运用DPM模型。颗粒运动在拉格朗日框架下采 用随机轨道模型求解,通过力平衡计算颗粒相的 运动轨迹,控制方程表示为:

$$\frac{\mathrm{d}\vec{u}_{p}}{\mathrm{d}t} = F_{D}\left(\vec{u}-\vec{u}_{p}\right) + \frac{\vec{g}\left(\rho_{p}-\rho\right)}{\rho_{p}} + \left(\frac{\rho}{\rho_{p}}\right)\vec{u}_{p}\frac{\partial\vec{u}}{\partial x_{i}}$$
(2)

 $\overrightarrow{g}(
ho_{\scriptscriptstyle P} -
ho)$

式中: $F_{D}(\vec{u}-\vec{u})$ 表示单位颗粒量的曳力; ρ_{P}

表示重力与浮力的合力项; $\left(\begin{array}{c} \rho \\ \rho_{r} \end{array} \right) \vec{u}_{r} \frac{\partial \vec{u}}{\partial x_{i}}$ 表示各附加 力的合力,包括热泳力、布朗力和 Saffman 升力 等,在大多数情况下,这些附加力相对于黏性阻力 很小,可忽略不计。由于颗粒的体积分数较小,颗 粒之间的碰撞会很少,对分离效率影响较弱,故忽 略了颗粒之间的相互作用。

一般对分离器的分离效率定义为:分离器的 排尘口排出颗粒量与进口气流所含颗粒量之比。 总分离效率表示为:

$$\eta = \frac{n_o}{n_i} \times 100\% \tag{3}$$

式中:n。表示排尘口处捕获的固体颗粒数,ni表示进气口处所追踪的所有固体颗粒数。

旋风分离器内的压降是指总压降(静压和动 压的总和),用旋风分离器的进出口平均全压差来 表示:ΔP=(P_i)_i-(P_i),本文采用无因次准数欧拉数 Eu表示压降:

$$Eu = \Delta P / \left(\frac{1}{2}\rho v^2\right) \tag{4}$$

欧拉数*Eu*表示分离器阻力系数,由分离器的 几何参数和气体粘度共同决定¹¹⁰。

2.2 边界条件

入口采用速度入口;假设出口处湍流流动已 达充分发展状态,所有变量在出口截面法线方向 上的梯度为零,故采用 OUTFLOW,对于离散相设 为逃逸(ESCAPE);假设排尘口气流流量为零,对 于离散相设为捕集(TRAP);壁面采用无滑移边 界,采用标准壁面函数法处理边界湍流,以给出正 确的壁面切应力,对于离散相设为反弹(RE-FLECT),且颗粒与壁面之间的碰撞为完全弹性碰 撞。切割粒径采用r-r分布的颗粒计算方法,颗粒 直径0.5~6.8 μm,平均直径5.97 μm。表3是模型 中旋风分离器的部分结构参数及操作条件。

表3 结构参数和操作条件

几何参数	数值	几何参数	数值
进口尺寸a×b/mm²	145×58	粒子密度ρ₅/kg·m ⁻³	2700
圆柱体直径 D/mm	290	进气速度v/m·s ⁻¹	16.1
气体密度ρ _g /kg·m⁻³	1.225	排尘口直径B/mm	107.3

3 回归正交实验设计和数值仿真计算 结果

分别用 X_1, X_2, X_3, X_4 来表示表2中所选取的优 化参数排气管直径d/D、排气管插入深度h/D、圆 柱体高度H/D、锥体高度 H_e/D 。当优化参数连续 变化时,会得到无穷多种分离器组合,为此离散优 化参数变量为等步长5水平变化。以方程 $X_i = (X_i - X_0)/\Delta X$ 对 X_i 的5水平变化编码为-2,-1,0,+ 1,+2, Δj 为变化步长,因素和水平表见表4。

表4 二次回归试验因素和水平编码值表

水平	X ₁ (排气管 直径 <i>d/D</i>)	X ₂ (插入 深度 <i>h/D</i>)	X ₃ (圆柱体 高度 <i>H/D</i>)	X ₄ (锥体 高度 <i>H</i> _e /D)
-2	0.3	0.3	0.9	1.5
-1	0.4	0.4	1.2	2.0
0	0.5	0.5	1.5	2.5
1	0.6	0.6	1.8	3.0
2	0.7	0.7	2.1	3.5
Δj	0.1	0.1	0.3	0.5

4个优化参数变量5水平变化时,分离器的结构尺寸组合数为5⁴=625种。要对625种分离器进行数值模拟仿真,计算量非常大,为此引入正交试验设计。根据以上4因素、5水平试验样本,采用正交旋转组合设计,试验次数为36次,在FLUENT中进行36次分离器计算分离效率和欧拉数仿真实验。

以第6组试验为例:从图2——X=0剖面上的 切向速度分布云图可以看出,切向速度在轴心处 接近于0。从图3——X=0剖面上压力分布云图可 以看出,剖面上压力由轴心向壁面方向不断增大, 存在明显的径向梯度;这是由旋流中离心力造成 的。从图4——旋风分离器内粒子的运动轨迹图 可以看出,颗粒在旋风分离器中的运动状况非常 复杂,且带有很大的随机性,其运动轨迹随着颗粒 的进口速度、粒径的不同而不同。从图5——圆柱 和圆锥交界面上的速度矢量图可以看出,在旋风 分离器内部,气流大致可分为外旋转气流和内旋 转气流两个区域。



4 回归分析与结果讨论

建立分离器性能指标分离效率和压降与优化 参数变量的回归方程。本文采用三次回归方法, 假设有m个试验因素(自变量)x_i(*j*=1,2,…),试验 指标为因变量y,则三次回归方程的一般形式为:

$$y = c + \sum_{i=1}^{m} b_i x_i + \sum_{i \le j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i \le j \le k} b_{ijk} x_i x_j x_k$$
(5)

式中,*c*,{*b_i*},{*b_{ii}*},{*b_{ii}*}回归系数。针对仿真试验 所得到的欧拉数和分离效率数据,分别进行多元 三次回归分析,构造回归方程。

4.1 欧拉数Eu

根据每组旋风分离器欧拉数的计算结果,运用 EViews 软件,保留常数项,采用逐步向后回归 法拟合,剔除 P 值较大的项,得到保留项的欧拉数 回归系数,其结果列于表5。

从表5可以看出各项的P值远小于0.05,P值 小于0.05说明该因素影响非常显著,计算所得结

表5 欧拉数Eu的回归系数

变量	系数	标准误差	T统计量	P值
С	59.45435	1.884991	31.54092	0.0000
X_1	-202.3100	7.891551	-25.63628	0.0000
X_{1}^{2}	283.6667	15.82719	17.92275	0.0000
$X_2 * X_3$	2.029475	0.603365	3.363592	0.0026
X_{1}^{3}	-145.4167	10.51646	-13.82753	0.0000
X_3	-10.16960	2.630298	-3.866329	0.0007
X_{3}^{2}	4.722685	1.758576	2.685516	0.0129
$X_1 * X_2 * X_3$	-3.144231	1.190755	-2.640536	0.0143
$X_1 * X_4$	2.830000	0.364301	7.768304	0.0000
X_{3}^{3}	-0.942901	0.389499	-2.420808	0.0234
$X_1 * X_3$	3.222115	0.850369	3.789079	0.0009
X_4	-1.864167	0.184563	-10.10043	0.0000
指标	数值	指标		数值
拟合度	0.998974	因变量均值		5.330694
调整后的拟合度	0.998504	因变量标准差		1.884045
回归标准差	0.072860	赤迟信息准则		-2.139347
残差平方和	0.127407	施瓦茨准则		-1.611508
拟然估计值	50.50825	汉南-奎因准则		-1.955117
F统计量	2125.357	杜宾-瓦特森统计量		1.109969
显著概率	0.000000			

果与二阶模型吻合良好。该回归方程的F= 2125.357>F0.05(3,27)=2.96,且其显著概率为 0.00000,回归方程拟合效果很好。在多元回归分 析中,拟合度在0.8~1之间可认为方程对样本的 拟合较好。本研究中,拟合度为0.998974。根据 表5中所列出的回归系数,可得到欧拉数回归 方程:

 $Eu = 59.45435 - 202.31*X_1 + 283.6667*X_1*X_1$ +2.029475*X₂*X₃ - 145.4167*X₁³ - 10.1696*X₃ +4.722685*X₃² - 3.144231*X₁*X₂*X₃ + 2.83*X₁ *X₄ - 0.942901*X₃³ + 3.222115*X₁*X₃ -1.864167*X₄ (6)





在 Matlab 中绘制方程(6)在固定两因素时欧 拉数对其余两个因素的影响三维曲面图,如图6~ 9所示。由图中可知,升气管直径d/D和直筒段高 度H/D是影响压降Eu的主要因素,随着它们增 大,Eu显著减小,而且升气管直径d/D比直筒段高 度H/D对压降的影响更大。这是由于:气流涡旋 强度是导致能量损失的主要原因,因此升气管直 径增大时,外旋流范围变小,漩涡强度减弱导致压 降减小; 直筒段高度 H/D 增加时, 器壁摩擦增加导 致涡旋强度减弱,压降减小。升气管插入深度h/D 和锥体高度He/D对压降的影响较小,随着它们的 增加,压降也有相对较小的降低。这是由于:直筒 高度和锥体高度越大,气流与桶壁之间的摩擦增 大,旋转强度降低从而使压降降低。Surmen^[12]的 结论也表明这一点。由图8可知,随着升气管插 入深度h/D的不断增大,Eu也随之增大,但增大的 幅度较小。由图7、9可知,随着升气管直径d/D的 增大,Eu不断减小且变化较显著,这是由于:气流 在器壁和旋转涡核中的摩擦损失将直接导致机械 能的损失,升气管直径越小,外旋流范围越大,漩 涡强度越大,则由静压转化目耗散在升气管中的 动压增大,导致压降显著增大。

4.2 分离效率η

根据每组旋风分离器分离效率η的仿真计算 值,在Eviews中运用相同的方法作回归拟合,剔除 其他P值较大的项,得到保留项分离效率η的回 归系数,其结果列于表6。

从表6可以看出所保留的P值均远小于0.05, 说明这些因素的影响非常显著;该回归方程的F= 710.5658>F0.05(3,27)=2.96,且其显著概率为 0.00000,可以认为建立的回归方程拟合效果很 好;拟合度为0.998512,方程对样本的拟合较好。 根据表6中所列出的回归系数,可得到分离效率 的回归方程:

表6 分离效率η的回归系数

变量	系数	标准误差	T统计量	P值
С	-90.37020	15.44939	-5.849436	0.0000
X_1	479.7917	49.03882	9.783916	0.0000
X_{1}^{2}	29.87500	5.662515	5.275924	0.0001
$X_{2}*X_{3}$	-10.16612	3.328510	-3.054255	0.0068
X_{1}^{3}	1.288333	0.392311	3.283963	0.0041
X_3	-88.24142	16.71855	-5.278054	0.0001
X_{3}^{2}	-5.667763	3.311992	-1.711286	0.1042
$X_1 * X_2 * X_3$	670.3855	49.27717	13.60438	0.0000
$X_{1}^{*}X_{4}$	-911.7812	73.80301	-12.35426	0.0000
X_{3}^{3}	23.53201	10.11803	2.325749	0.0319
$X_1 * X_3$	47.79792	8.497169	5.625158	0.0000
X_4	-8.696250	2.952120	-2.945764	0.0086
С	-64.94100	10.03113	-6.473947	0.0000
X_1	-146.9918	49.92765	-2.944095	0.0087
X_{1}^{2}	45.56617	16.86339	2.702076	0.0146
$X_{2}*X_{3}$	0.255090	0.147805	1.725857	0.1015
X_{1}^{3}	24.83953	13.14430	1.889757	0.0750
X_3	31.54681	7.430392	4.245646	0.0005
指标	数值	指标		数值
拟合度	0.998512	因变量均值		76.63000
调整后的拟合度	0.997107	因变量标准差		6.316500
回归标准差	0.339751	赤迟信息准则		0.985645
残差平方和	2.077752	施瓦茨准则		1.777404
拟然估计值	0.258397	汉南-奎因准则		1.261990
F统计量	710.5658	杜宾-瓦特森统计量		1.780952
显著概率	0.000000			

 $\eta = -90.3702 + 479.7917 * X_1^3 + 29.875 * X_1 * X_3 * X_4$ -10.16612*X_3 * X_4 + 1.288333 * X_4^3 - 88.24142 * X_1 * X_3 - 5.667763 * X_2 * X_3 * X_4 + 670.3855 * X_1 -911.7812 * X_1^2 + 23.53201 * X_1 * X_2 * X_4 + 47.79792 * X_4 - 8.69625 * X_4^2 - 64.941 * X_1 * X_4 - 146.9918 * X_1 * X_2 + 45.56617 * X_1 * X_2 * X_3 + 0.25509 * X_3^3 + 24.83953 * X_2 + 31.54681 * X_3 (7)

在 Matlab 中绘制方程(7)在固定两因素时分 离效率对其余两个因素的影响三维曲面图,如图 10~13 所示。由图 10、12 可知,分离效率随着直 筒段高度 H/D 和锥体段高度 H/D 的增大而增大, 这是由于:旋风分离器高度增大时,尾涡旋转强度 减弱而难以夹带颗粒逃逸,从而使得分离效率提



高。由图 10、12 可知,分离效率随着升气管插入 深度 h/D 的增加先增大后减小,这是由于:当升气 管插入深度较小时,颗粒较易通过短路流直接从 升气管逃逸,而当升气管插入深度过大时,颗粒难 以逃逸也不易被捕集,会聚集在旋风分离器上部 形"顶灰环"现象^[13]造成分离效率降低;因此分离 效率对升气管插入深度 h/D 有一个最佳值,这可 以由方程(7)对变量 X₂求极值得到。由图 13 可 知,分离效率随着升气管直径 d/D 的减小而不断 增大,因为:升气管直径越小,则外旋流区域增加, 内旋流区域减小,颗粒难以被内旋流卷入升气管 逃逸,从而使得分离效率增大;这与李昌剑^[14]在研 究旋风分离器分离效率时的结论一致。

5 结论

1)旋风分离器的压降最主要影响因素是升气 管直径,随着升气管直径增大压降显著减小;其次 是直筒段高度,随着直筒段高度的增大压降也明 显降低;锥体段高度和升气管插入深度影响较弱, 随着锥体段高度增大和升气管插入深度减小压降 缓慢降低。

2)对旋风分离器的分离效率最主要影响因素 是升气管直径和锥体段高度,随着升气管直径减 小和锥体段高度的增大,分离效率显著增大;其次 是直筒段高度,随着直筒段高度增大,分离效率也 逐渐增大;升气管插入深度影响较弱,且其最佳插 入深度与直筒段高度有密切联系,当直筒段高度 较大时升气管插入深度越小效率越高。

参考文献:

[1] 吴晓明,陈晓波.旋风分离器不同排气管形状对性能影响研究[J]. 机电技术,2017(2):7-11.

- [2] STAIRMAND C J. The design and performance of cyclone separators[J]. Trans.Inst.Chem.Eng., 1951, 29(3): 356-373.
- [3] HOEKSTRA A J. Gas Flow Field and Collection Efficiency of Cyclone Separators[J]. Applied Sciences, 2000.
- [4] 黄滨,王乐勤,焦磊,等.升气管插入深度对旋风分离器内部流场影响的数值模拟[J].化工机械,2010,37(1):53-57.
- [5] FICICI F, ARI V. The influence of diameter of vortex finder on cyclone collection efficiency[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2015, 34(3):669-673.
- [6] BRAR LS, SHARMA R P, ELSAYED K, et al. The effect of the cyclone length on the performance of Stairmand high-efficiency cyclone[J]. Powder Technology, 2015, 286:668-677.
- [7] ELSAYED K, LACOR C. CFD modeling and multi-objective optimization of cyclone geometryusing desirability function, artificial neural network and genetic algorithms[J]. Appl. Math. Model., 2013, 37(8):5680–5704.
- [8] SGROTT JR O L, COSTA K K, NORILER D, et al. Geometric optimization f cyclones for combination of nonlinear mathematical programming and computational fluid dynamics techniques (CFD)[C]. 2012 Annual Meeting, AmericanInstitute of Chemical Engineers (AIChE), 2012.
- [9] SHUKLA S K, SHUKLA P, GHOSH P. The effect of modeling of velocity fluctuations on prediction of collection efficiency of cyclone separators[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(8): 5774–5789.
- [10] SGROTT JR O L, COSTA K K, NORILER D, et al. Cyclone's project optimization by combination of an inequality constrainedproblem and computational fluid dynamics techniques (CFD)[C]. Chem. Eng. Trans.2013,32:2011–2016.
- [11] SGROTT JR O L, NORILER D, WIGGERS V R, et al. Cyclone optimization by COMPLEX method and CFD simulation[J]. Powder Technology, 2015, 277:11-21.
- [12] SURMEN A, AVCI A, KARAMANGIL M I. Prediction of the maximum-efficiency cyclone length for a cyclone with a tangential entry [J]. Powder Technology, 2011, 207(1/3): 1–8.
- [13] 万古军, 孙国刚, 薛晓虎, 等. 旋风分离器内颗粒质量浓度分布数值模拟[J]. 化学工程, 2008, 36(10): 41-44, 51.

[14] 李昌剑,陈雪莉,于广锁,等.基于响应曲面法径向入口旋风分离器的结构优化[J]. 高校化学工程学报,2013(1):24-31.

电动机为小车在行驶过程中提供动能。车模的转向除舵机打角外还需要差速装置的辅助,但车模本身并没有机械差速装置,所以为了实现在转向时所需的差速效果,在算法上进行处理,实现电动机自动差速。

具体过程如下:当对摄像头采集回来的信息处 理后算得车模偏差很小时,说明车模正处于直道 上,舵机打角也很小,此时控制加在左右电动机的 电压值几乎相同即可;当车模偏差很大时,说明车 模已偏离赛道;当车模向左偏移时,舵机向右打角, 为了能顺利转向,首先把左右轮的速度统一降下来 一点,但要保证降速过程中左轮电动机转速要比右 轮电动机快,即控制加在左右电动机两端电压值比 在直道上两端电压值小,但同时左电动机两端电压 值要比右电动机两端电压值大,从而实现向右转向 的目的;当车模向右偏移时,反之即可。

4 结束语

本智能车双车追逐系统,涉及模式识别、自动 控制、无线通信,在项目组成员的共同努力下,此 双车追逐系统能够在符合比赛规则的前提下快速 和稳定地在赛道上运行,并顺利完成超车,经受住 了比赛的考验。项目组成员也因此提升了自己的 实践能力与科研能力,并积累了一些解决实际工 程问题的经验。

参考文献:

[1]邓志鹏,黄润烨,马超,等.基于恩智浦K60单片机的双车追逐设计与实现[J].机电技术,2017(4):20-22,28.

[2] Maniktala S. 精通开关电源设计[M]. 王志强, 等译. 北京: 人民邮电出版社, 2015.

[3] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 6版. 北京:科学出版社, 2013.

[4] 王日明,廖锦松,申柏华,等.轻松玩转ARM CORTEX-M4微控制器——基于KINETIS K60[M].北京:机械工业出版社,2007.

[5] 高正中,赵丽娜,李世光,等. 基于摄像头的智能车控制系统设计[J]. 自动化与仪表, 2015(6):1-4.

[6] 刘涛,吕勇,刘立双.智能车路径识别与控制性能提高方法研究及实现[J].电子技术应用,2016,42(1):54-57.