

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.05.003

基于 SVM 的电梯制动器静态制动力矩估算方法研究*

应 征^{1,2}, 王学斌¹, 郭吉丰²

(1. 浙江省特种设备检验研究院 国家电梯产品质量监督检验中心, 浙江 杭州 310020;

2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对电梯制动器静态制动力矩估算问题,对电梯制动器的动态制动性能与静态制动性能分别进行了研究,利用电梯制动器试验台测试制动器的制动性能,根据实验测试结果提出了一种基于支持向量机的电梯制动器静态制动力矩估算方法,将利用制动器动态制动性能实验得到的制动初始速度与制动过程的平均制动力矩作为估算算法训练数据的输入值,将相同制动器对应的静态制动力矩作为估算算法训练数据的输出值,经过支持向量机算法训练得到估算模型,采用网格搜索法进一步优化估算模型。最后,通过制动实验进一步采集制动性能数据作为验证数据。实验结果显示,电梯制动器的动态制动性能与制动初始速度有关。交叉验证的结果表明,基于 SVM 的电梯制动器静态制动力矩估算方法能够便捷准确地根据电梯制动器的动态数据估算出静态制动性能。

关键词:电梯制动器;支持向量机;静态制动;动态制动;

中图分类号:TH39;U857

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)05-0438-05

Estimation of static braking torque of elevator brake based on SVM

YING Zheng^{1,2}, WANG Xue-bin¹, GUO Ji-feng²

(1. National Elevator Product Quality Supervision and Inspection Center, Zhejiang Provincial Special Equipment

Inspection and Research Institute, Hangzhou 310020, China; 2. College of Electrical

Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at estimation of the static braking torques of the elevator brakes, the dynamic and static braking performance of the elevator brakes were studied respectively. Elevator brakes were tested by an elevator brake testing system for obtaining the dynamic and static braking torques of the elevator brakes. An estimation method of static braking torques of the elevator brakes based on support vector machines was proposed according to the experiment result. Mean braking torques and initial braking velocity in dynamic braking process were defined as training set input data; meanwhile static braking torques were defined as training set target data. The multivariate regression analysis based on SVM was employed to construct estimation model of static braking torque of elevator brake, the parameters of estimation model were optimized by using grid-search algorithm. At last, the results indicate that the initial braking velocity is one of factors affect the dynamic braking performance, and the presented method is achieved easily and high accurate.

Key words: elevator brakes; supported vector machines(SVM); dynamic braking; static braking

0 引 言

电梯制动器作为电梯最重要的安全部件之一,关系着广大电梯乘客生命、财产的安全。电梯制动器具

有两种工作方式,动态制动与静态制动。动态制动为制动器在电梯运行过程中起作用,制动器通过制动瓦与制动轮毂之间的相对滑动摩擦力迫使电梯停止运动;静态制动为当电梯停止运动时,制动器通过制动瓦

收稿日期:2016-10-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677171);浙江省质监科研计划资助项目(20150221)

作者简介:应征(1983-),男,浙江金华人,博士研究生,高级工程师,主要从事电梯检验技术、电梯安全技术等方面的研究。E-mail:yingz@zjtj.org

通信联系人:郭吉丰,男,教授,博士生导师。E-mail:gjf@zju.edu.cn

与制动轮毂之间静摩擦力使得电梯保持静止状态。现如今电梯大都采用零速抱闸技术,依靠曳引机将电梯速度减至零,然后触发制动器抱死制动轮毂,因此,除非在电梯运行时出现异常情况时,例如超速、安全回路断开等情况,电梯制动器只采用静态制动方式工作。

近年来因为电梯制动器失效造成的事故不断增加,甚至在近三年多地出现了影响恶劣的致人死亡的恶性事故。如何增加制动器安全可靠成为了一个热点问题。目前比较简单可行的方法为电梯空载制动测试,在电梯空载向上运行时,触发制动器制停电梯并检查制停距离。由于操作简单,对仪器、人员要求都较低,该方法被列为了每年在用电梯定期检验项目^[1-2]。然而该方法只能获得电梯制动器的动态制动性能,无法获得静态制动性能。谢志威等人^[3]公开了一种电梯制动力矩检测装置,该装置在电梯停止状态下,通过制动力矩检测模块控制变频器驱动曳引机输出递增转矩,并记录曳引机运动时的电流与编码器值,根据电流记录值计算制动力矩。该方法能够获得静态制动力矩,但是需要在被测电梯的上加装制动力矩检测模块才能完成测试。谢小鹏^[4]等人在曳引轮与钢丝绳无相对滑动的假设上构造了制动力学模型,并提出了基于试验结果估算实际制动结果的方法。Lamb 等人^[5]公开了一种电梯制动器监控装置,在制动器制动摩擦片上安装一个 U 型的传感器,通过计算,设定传感器两个端点安装的位置。当新的制动器正常运行时,传感器端点无法与金属制的制动轮毂接触,而在使用较长时间后,当摩擦片磨损变薄,传感器的两个端点便与制动轮毂接触,将两个端点短路,监控装置收到短路信号,则表示制动器存在较大风险。Wang 等人^[6]研究了一种基于小波分析与模糊神经网络的电梯制动器故障诊断方法,该方法将制动器制动过程的闸瓦间隙信号与制动状态作为训练数据,通过小波分析提取故障特征参数,然后利用 B 样条与模糊神经网络算法构建故障诊断模型,在实际应用中可以实时监控制动器制动过程的闸瓦间隙信号并判断制动器工作状态。以上两种方法都采用了比较简单实用操作方法,然而对于制动器性能的判断都来源于影响制动器性能的一个方面:制动器闸瓦与制动轮毂的间隙,该间隙值将影响制动弹簧力,这两种方法无法综合评判制动器的制动性能。

以上方法都只能获得电梯制动器动态制动性能或者静态制动性能或者是影响制动性能的某些参数值,为了全面获得两种制动性能必须至少进行两次测试,然而无论是动态制动性能检测还是静态制动性能检测都会对电梯制动器造成一定损伤。

为了能够降低测试难度的同时获得更加全面的电梯制动器制动性能数据,本研究根据实验数据寻找动

态制动性能与静态制动性能之间的联系,并利用 SVM 的多元回归算法构建静态制动力矩估算模型,可以通过该模型与电梯制动器动态制动性能的数据估算静态制动力矩。

1 电梯制动器结构

电梯制动器有多种类型,以目前使用最广泛的叠式制动器为例,叠式制动器如图 1 所示。

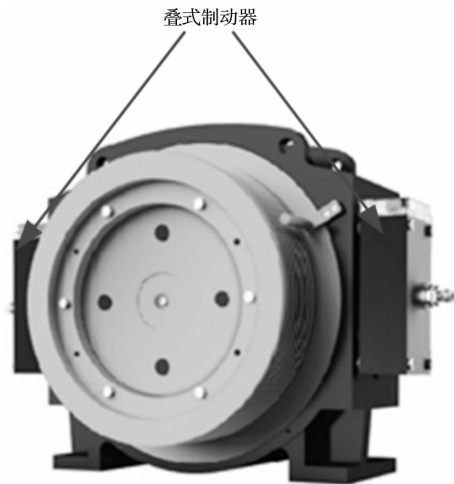


图 1 叠式制动器示意图

两个叠式制动器分别安装在曳引机两侧,为了避免对转动轴造成较大的冲击,制动过程中,两个制动器同步起作用。

叠式制动器中主要起作用的部件为静板、动板、刹车片、制动弹簧、电磁线圈。静板与曳引机的外壳固定连接,刹车片与动板固定连接。当电磁线圈断电时,制动弹簧将动板与刹车片推向制动轮毂,起到制动作用;当电磁线圈通电时,电磁线圈的磁力将克服制动弹簧制动力,将动板与刹车片拉向静板,分离刹车片与制动轮毂。单个叠式制动器结构如图 2 所示。

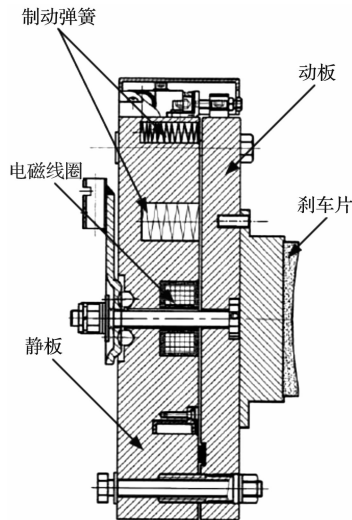


图 2 单个叠式制动器结构图

2 基于 SVM 估算模型

支持向量机是一种监督式学习的数据处理方法,由 Corinna Cortes 和 Vapnik^[7] 于 1995 年提出,能够用于统计分类与回归分析。对于 SVM 线性回归,目的是构造一个高维空间线性回归函数,如下式所示:

$$f(x) = w^T x + b \quad (1)$$

系数的优化目标函数为:

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) \quad (2)$$

约束函数为:

$$y_i - w^T x - b \leq \varepsilon + \xi_i, \quad (3)$$

$$-y_i + w^T x + b \leq \varepsilon + \xi_i^*, \quad (4)$$

$$\xi_i, \xi_i^* \geq 0, i = 1, 2, \dots, l \quad (5)$$

式(2~5)中: $\{x_i\} \{y_i\}$ —训练样本集的输入数据与目标数据; C —一个大于0的惩罚因子; ξ_i, ξ_i^* —松弛参数; ε —不敏感损失函数参数。

对于非线性问题需要通过变换函数 $\Phi(\cdot)$ 将训练样本映射到更高维的空间,并在此空间中完成线性回归计算,最终得到 $f(\Phi(x))$ 。 $K(x_i, x_j) = \Phi(x_i)^T \Phi(x_j)$ 称为核函数,核函数的选择将影响回归的效果,较常用的核函数有线性核函数、多项式核函数、径向基核函数(radial basis function, RBF)与 Sigmoid 核函数。

本研究采用 RBF 核函数, RBF 核函数为一种非线性核函数,定义如下:

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2), \gamma > 0 \quad (6)$$

式中: γ —一个可调参数。

为了优化回归效果,需要将输入数据 x 进行规范化,将数据 x 线性映射至 $[-1, 1]$ 。

3 估算模型参数优化

对于采用 RBF 核函数的 SVM,需要优化确定 3 个参数: ε 、 C 与 γ 。参数的选择将影响回归的精度,由于这 3 个参数是相互独立的,目前比较常用的优化方法为粒子群算法、遗传算法等随机算法与网格搜索算法等^[8-10]。与随机算法相比,网格搜索法具有较好的稳定性,实现简单等优点,本研究优化参数的维度不多,因此采用较为网格搜索法优化。

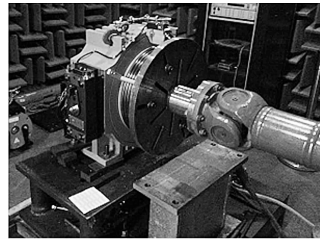
为了可以涵盖较大的取值范围的同时并加快搜索速度,本研究使用指数递增方式将 ε 、 C 与 γ 离散为两个序列,例如, $\{2^{-13}, 2^{-12}, \dots, 2^{11}, 2^{12}\}$ 。本研究通过三重循环对 ε 、 C 与 γ 所有取值逐项计算目标数据与计算数据的均方误差(mean squared error, MSE):

$$\text{MSE} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (f(\Phi(x_i)) - y_i)^2 \quad (7)$$

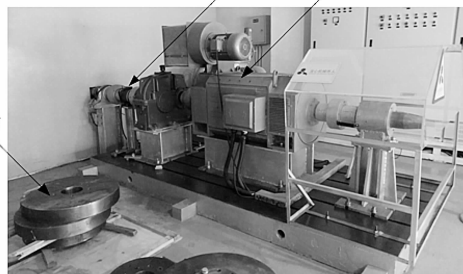
选取当 MSE 最小时的 ε 、 C 与 γ 。

4 动态制动与静态制动实验

本研究使用电梯制动器试验台测试制动器的动态制动与静态制动性能。电梯制动器试验台如图 3 所示。



扭矩传感器 加载电机



飞轮

图 3 电梯制动器试验台

电梯制动器试验台主要由加载电机、扭矩传感器与飞轮组成。被测电梯制动器安装在成品电梯曳引机上,曳引机转轴与加载电机通过万向联轴器与刚性轴连接,扭矩传感器安装在刚性轴,通过改变飞轮组调整系统转动惯量。

4.1 动态制动实验

动态制动过程中,制动器与制动轮毂之间的摩擦属于滑动干摩擦,对于此类问题使用较为广泛的是 Coulomb 模型^[11-15]:

$$F_f = \mu F_n \quad (8)$$

式中: F_f —摩擦力; μ —摩擦系数, μ 只与接触面的材料属性相关与其他因素无关; F_n —垂直接触面的摩擦力。

虽然应用广泛,但是 Coulomb 模型也有其自身的缺陷,文献[16-18]指出滑动摩擦相对速度将影响摩擦力的稳定性,认为相对速度能改变摩擦物体表面材料的摩擦系数从而影响摩擦力。本研究为了确定影响电梯制动器动态制动性能的因素对 3 对制动器进行测试。

单个电梯制动器的制动力矩为:

$$M = F_f R = \mu F_n R \quad (9)$$

式中: M —制动力矩, R —制动轮毂的半径。

制造调试完毕的电梯制动器 R 与 F_n 不变,如果测试过程中 M 变化,则 μ 被改变了。实验中重点观察负载惯量与初始制动速度对制动力矩的影响。

模拟电梯制动器动态制动过程,给电磁线圈通电吸合动板,加载电机驱动曳引机旋转,当速度达到设定

值时断开电磁线圈供电,触发制动器动作并按照时间序列采集制动过程中的制动力矩值。采集 34 组数据,采用单因子方差分析负载惯量与初始制动速度对制动力矩的影响^[19]。分析结果表明负载惯量对制动力矩无影响,初始制动速度对制动力矩有较大影响。采用平均制动力矩 \bar{M} 代表制动过程中制动力矩:

$$\bar{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i \quad (10)$$

式中: M_i —制动过程中第 i 次采样数值, n —制动过程总的采样次数。

通过对比制动器的 \bar{M} 与初始制动速度,可以发现初始制动速度较大的情况下,平均制动力矩 \bar{M} 也随之增大。一对制动器在不同初始制动速度下的制动力矩如图 4 所示。

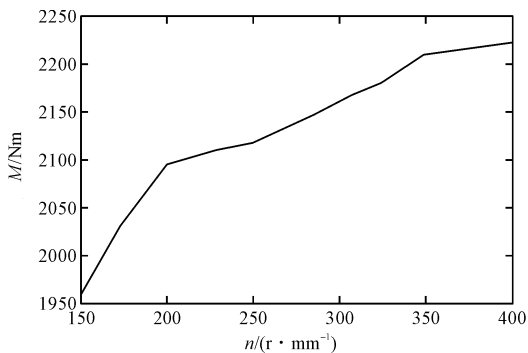


图 4 制动器初始转速 - 平均制动力矩

4.2 静态制动实验

本研究在曳引机处于静止状态下,触发电梯制动器,驱动加载电机,逐渐加大扭矩,当制动轮毂与制动器产生相对运动时,记录扭矩值。测试一台曳引机的制动器,得到静态实验数据为:2 461.73 Nm,2 466.91 Nm,2 465.33 Nm 与 2 459.87 Nm。试验结果表明对于同一对制动器,在安装调整完毕之后静态制动性能比较稳定。

5 实验及结果分析

本研究对同一型号 3 对制动器进行不同速度的动态制动性能实验于静态制动性能实验,安装制动器曳引机的制动轮毂直径相同,在动态制动性能实验中获取制动时的初始角速度 ω_i 与平均制动力矩 \bar{M}_i ,在静态制动性能实验中获取最大静态制动力矩 M_{s_i} 。一共得到 48 组数据,在其中随机挑选 32 组作为训练集,其余 16 组作为交叉检验 (cross-validation) 数据集。将集合 $\{(\omega_i, \bar{M}_i)\}$ 作为输入数据, $\{M_{s_i}\}$ 作为目标数据,定义 $\{Me_i\}$ 为通过输入数据估算出的制动器最大静态摩擦力矩。使用 python 作为编程接口工具,调用开源库 LibSVM 函数实现基于 SVM 回归与网格搜索算法^[20]。

本研究采用预测值与目标数据的 MSE 与皮尔逊

积矩相关系数 r 评价回归效果:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^l (Ms_i - \bar{Ms})(Me_i - \bar{Me})}{\sqrt{\sum_{i=1}^l (Ms_i - \bar{Ms})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^l (Me_i - \bar{Me})^2}} \quad (11)$$

对 48 组数据的输入值进行规范化之后,使用训练集构建并优化模型参数。经过网格搜索之后得到优化参数为 $\varepsilon = 0.03125$ 、 $C = 512$ 、 $\gamma = 0.5$ 。

3 组制动器的静态制动力矩分别为,2 463.46 Nm、1 189.57 Nm 与 1 143.57。训练集的 $MSE = 1147.45$,相关系数 $r = 0.9986$,交叉检验数据集的 $MSE = 1015.81$,相关系数 $r = 0.9988$ 。

训练数据集估算结果偏差如表 1 所示。

表 1 训练数据集估算结果偏差

序号	差值/(Nm)	偏差/(%)	序号	差值/(Nm)	偏差/(%)
1	-97.89	-0.04	17	-33.68	-2.83
2	-28.91	-1.17	18	-24.91	-2.09
3	-1.52	-0.06	19	-13.91	-1.17
4	24.15	0.98	20	14.69	1.23
5	24.91	1.01	21	32.46	2.73
6	21.83	0.89	22	43.93	3.84
7	18.12	0.74	23	30.90	2.70
8	7.52	0.31	24	25.62	2.24
9	0.52	0.02	25	18.23	1.59
10	-5.37	-0.22	26	16.97	1.48
11	-10.85	-0.44	27	18.12	1.58
12	-74.99	-3.04	28	19.86	1.74
13	-24.91	-2.09	29	24.91	2.18
14	-34.71	-2.92	30	27.58	2.41
15	-38.08	-3.20	31	41.65	3.64
16	-37.52	-3.15	32	50.61	4.43

交叉检验数据集估算结果偏差如表 2 所示。

表 2 交叉检验数据集估算结果偏差

序号	差值/(Nm)	偏差/(%)	序号	差值/(Nm)	偏差/(%)
1	79.76	3.24	9	-30.28	-2.55
2	-1.75	-0.07	10	-8.75	-0.74
3	24.39	0.99	11	9.86	0.86
4	-61.05	-2.48	12	61.59	5.39
5	-83.86	-3.40	13	-28.56	-2.50
6	-1.76	-0.07	14	16.89	1.48
7	21.94	1.84	15	33.77	2.95
8	23.03	1.94	16	6.28	0.55

从数据的 MSE 可以发现无论是训练数据集还是交叉检验数据集的整体的估算精度都是比较高的。估算结果与实测值的线性相关性非常高。对于单个采样数据的偏差如表 1、表 2 所示。对于训练数据集的 32 个数据,偏差绝对值最大值为 4.43%,偏差绝对值最小值为 0.02%,差值绝对值最大值为 97.89 Nm,差值绝对值最小值为 0.51 Nm。数据之间的估算精度偏差较小。对于交叉检验数据集的 16 个数据,偏差绝对值最大值为 5.39%,偏差绝对值最小值为 0.07%,差值

绝对值最大值为 83.83 Nm, 差值绝对值最小值为 1.75 Nm。相对训练数据集交叉检验数据集的偏差范围较大。实验结果显示, 基于 SVM 回归模型的估算结果能够满足实际需求。

6 结束语

本研究提出了一种基于 SVM 的电梯制动器静态制动力矩估算方法, 该方法可以用于在获得电梯制动器动态制定性能的基础上, 估算电梯制动器的静态制动性能。通过实验表明, 初始制动速度影响制动器动态制动力矩, 因此在估算电梯制动器静态力矩时需要将考虑初始制动速度的影响。将动态制动过程的平均制动力矩与初始制动速度作为数据, 静态制动力矩作为目标数据。本研究将以上数据作为训练数据输入基于 SVM 的回归算中, 计算得到回归估算模型, 并对算法参数进行优化, 最后通过实验验证了回归模型的性能, 精度达到实际使用的要求, 验证了该估算方法的有效性。

虽然基于 SVM 的回归算法比较适用于小样本的操作, 但是适量的提高训练样本的数量能进一步提高回归模型精度, 之后的研究将采用更多的训练数据。由于目前的训练样本数据来自于制动器试验台而不是现场在用电梯的实际制动数据, 该模型无法直接在检验现场使用。下一步工作将采集在用电梯的制动性能数据作为训练集, 完善回归模型, 直接用于现场检测。

参考文献 (References):

- [1] TSG T7001-2009. 电梯监督检验和定期检验规则—曳引与强制驱动电梯[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [2] 邓贤远, 江爱华, 何 山. 制动器对电梯安全的影响分析[J]. 机电工程技术, 2016, 45(4): 129-152.
- [3] 谢志威, 汪 浩. 一种电梯制动力矩检测装置[P]. 中国: 205257708, 2016-05-25.
- [4] 谢小鹏, 牛高产, 浦汉军, 等. 电梯制动器性能检测方法的研究[J]. 中国机械工程, 2011, 22(22): 2667-2671.
- [5] LAMB M P, MARTIN M. Apparatus for monitoring elevator brakes[P]. 美国专利: 5419415, 1995-05-30.
- [6] WANG P, HE W, YAN W. Fault diagnosis of elevator braking system based on wavelet packet algorithm and fuzzy neural network[C]. Electronic Measurement & Instruments, 9th International Conference on, New York: IEEE, 2009.
- [7] CORTES C, VAPNIK V. Support-vector networks[J]. **Machine learning**, 1995, 20(3): 273-297.

- [8] HUANG C L, DUN J F. A distributed PSO-SVM hybrid system with feature selection and parameter optimization[J]. **Applied Soft Computing**, 2008, 8(4): 1381-1391.
- [9] POURBASHEER E, RIAHI S, GANJALI M R, et al. Application of genetic algorithm-support vector machine (GA-SVM) for prediction of BK-channels activity[J]. **European journal of medicinal chemistry**, 2009, 44(12): 5023-5028.
- [10] LI J, ZHANG C, LI Z. Battlefield target identification based on improved grid-search svm classifier[C]. Computational Intelligence and Software Engineering, International Conference on, New York: IEEE, 2009.
- [11] HASLINGER J, NEDLEC J C. Approximation of the Signorini problem with friction, obeying the coulomb law [J]. **Mathematical Methods in the Applied Sciences**, 1983, 5(1): 422-437.
- [12] ALART P, CURNIER A. A mixed formulation for frictional contact problems prone to newton like solution method [J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 1991, 92(3): 353-375.
- [13] ACARY V, CADOUX F, LEMARÉCHAL C, et al. A formulation of the linear discrete coulomb friction problem via convex optimization[J]. **Journal of Applied Mathematics and Mechanics**, 2011, 91(2): 155-175.
- [14] DE SAXCÉ G, FENG Z Q. The bipotential method: a constructive approach to design the complete contact law with friction and improved numerical algorithms [J]. **Mathematical and Computer Modelling**, 1998, 28(4): 225-245.
- [15] SIMO J C, LAURSEN T A. An augmented Lagrangian treatment of contact problems involving friction[J]. **Computers & Structures**, 1992, 42(1): 97-116.
- [16] RICE J R, RUINA A L. Stability of steady frictional slipping[J]. **Journal of applied mechanics**, 1983, 50(2): 343-349.
- [17] FLINT J, HULTÉN J. Lining-deformation-induced modal coupling as squeal generator in a distributed parameter disk brake model[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2002, 254(1): 1-21.
- [18] KRÖGER M, NEUBAUER M, POPP K. Experimental investigation on the avoidance of self-excited vibrations[J]. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, 2008, 1866(366): 785-810.
- [19] 卢小广. 统计学教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [20] CHANG C C, LIN C J. LIBSVM: a library for support vector machines [J]. **ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology**, 2011, 2(3): 1-27.

[编辑: 张 豪]

本文引用格式:

应 征, 王学斌, 郭吉丰. 基于 SVM 的电梯制动器静态制动力矩估算方法研究[J]. 机电工程, 2017, 34(5): 438-442.

YING Zheng, WANG Xue-bin, GUO Ji-feng. Estimation of static braking torque of elevator brake based on SVM [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(5): 438-442.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>