

# 能耗优化控制的研究综述

贺琛<sup>1</sup>, 王加东<sup>1</sup>, 李明<sup>2\*</sup>, 王研文<sup>2</sup>

<sup>1</sup>江麓机电集团有限公司车辆电器公司, 湖南 湘潭

<sup>2</sup>湖南科技大学信息与电气工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年3月20日; 录用日期: 2026年4月13日; 发布日期: 2026年4月21日

## 摘要

能源危机是当今人类面临最严峻的挑战之一, 节能降耗是解决能源危机的重要途径。对于大能耗工业对象与工业过程或系统, 能耗优化控制(Energy-Optimization Control, EOC)是实现节能降耗的重要手段。本文从控制理论与工程角度出发, 简要回顾了能耗优化控制理论与工程应用的发展, 综述了近年来能耗优化控制理论研究和应用领域发展的新动向, 分析了现有理论和技术所存在的局限性, 并指出能耗优化控制理论与工程应用研究将重点放在面向多时间尺度扰动的EOC鲁棒控制策略上, 以建立融入能耗指标的经典控制系统性能评价体系。

## 关键词

能源, 节能, 能耗优化, 最优控制, 综述

# Research Review on Energy Consumption Optimization Control

Chen He<sup>1</sup>, Jiadong Wang<sup>1</sup>, Ming Li<sup>2\*</sup>, Yanwen Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Vehicle Electrical Appliances Company in Jianglu Machinery Electronics Group Co., Ltd., Xiangtan Hunan

<sup>2</sup>College of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: March 20, 2026; accepted: April 13, 2026; published: April 21, 2026

## Abstract

Energy crisis is one of the most severe challenges facing humanity today, and energy conservation and consumption reduction are important approaches to addressing it. For high-energy-consuming industrial objects, industrial processes or systems, Energy-Optimization Control (EOC) serves as a

\*通讯作者。

文章引用: 贺琛, 王加东, 李明, 王研文. 能耗优化控制的研究综述[J]. 可持续能源, 2026, 16(2): 53-62.

DOI: 10.12677/se.2026.162006

key means to achieve energy saving and consumption reduction. This paper, from the perspective of control theory and engineering, briefly reviews the development of energy consumption optimization control theory and its engineering applications. It summarizes recent new trends in theoretical research and application development in this field. It also analyzes the limitations of existing theories and technologies. Furthermore, it points out that research in energy consumption optimization control theory and its engineering applications will focus on EOC robust control strategies for multi-timescale disturbances, with the aim of establishing a performance evaluation system for classical control systems that incorporates energy consumption indicators.

## Keywords

Energy, Energy Conservation, Energy Consumption Optimization, Optimal Control, Review

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

能源是人类活动的物质基础，人类社会的发展离不开能源的出现和先进能源使用技术的使用，随着人类社会的发展，人类所面临的能源利用问题日益突出。1973年第四次中东战争爆发，阿拉伯国家不满西方国家支持以色列采取的石油禁运、涨价等政策导致大量依赖进口石油的国家工业化备受影响，引起第一次世界能源危机；1979年伊朗战争爆发，产油量严重下降，导致第二次能源危机；1990年波斯湾战争爆发，导致石油价格暴涨，带来第三次世界范围内的能源危机。进入21世纪以来，全球能源短缺的问题日益严峻，能源使用过程中所造成的气候变化和环境污染持续加剧。能源的稀缺性和环境污染的不可逆性，让全球各国对能源与环境问题更加重视起来。

在目前世界能源紧张的情况下，各国科学技术工作者对如何解决能源危机问题的研究正朝两个方面进行[1]。其一是新能源发电技术的研究，诸如太阳能、风能、潮汐能、地热能、生物能、化学能、核能等，其二是节能技术的研究。新能源的研究和应用，所需的周期长、投资大，而且新能源的利用多需要特殊的“天时地利”的自然环境条件；而节能技术研究的核心是合理使用能源，使现有能源发挥最大的经济技术效果。从我国目前的情况来看，节能研究更具有现实意义，因为在各国都进行新能源的开发和利用的同时，我国的单位产值能源消耗远高于世界平均水平，达到了其2.3倍[2]，能源使用效率低，相当于每天都在浪费大量宝贵的能源，同时，也造成了更多不必要的环境污染。因此，在开发新能源的同时，要更加注重对节能技术的研究。

上世纪60年代阿波罗登月飞行过程中，已经考虑到登月舱发动机燃料的能耗控制[3]；我国在上世纪80年代就有学者提出最小能耗控制及相关理论，并将其应用到电力、钢铁、煤炭等行业中，进而实现能源节约。目前，关于能耗控制研究的主要成果可以分为两方面：其一是对控制理论的研究，有能耗最优控制，最小能耗控制，节能优化控制以及各种能耗控制的优化算法；其二是针对某一对象的能耗控制进行研究，如针对电梯、水下自治机器人、混合动力及纯电力驱动汽车、机械臂、多足爬墙机器人等的能耗控制研究。目前的研究虽然都提出了在考虑被控对象实现目标功能的同时，要尽量降低控制系统的能耗，但是却并没有建立统一的能耗优化控制理论，也没有提出明确的面向对象的能耗性能评价指标；对控制系统的研究多是针对电机的控制，而忽略了对整个控制系统的整体能耗的研究。在控制算法的研究和应用方面也还有诸多的不足。

由于, 电机传动控制系统广泛地应用于生产和居民生活, 年耗电量约占全国用电总量的 60%和工业用电量的 80%。因此, 研究其系统能耗控制具有巨大的节能效益。对于能源受限的运动体, 如水下自治机器人、电动汽车等能源受限的对象, 节能技术的研究能够使其在特殊工况下, 保持较好的续航能力, 完成更多的任务。因此, 面向多时间尺度扰动的 EOC 鲁棒控制策略研究应以能耗控制理论体系和性能评价标准作为出发点, 解决那些多参数、非线性、大时滞、强耦合等高能耗复杂对象和特殊工况下作业的能源受限对象。

本文综述了上世纪 80 年代至今能耗控制领域的主要研究成果及其应用。文中给出了不同类型的能耗控制系统的控制策略和控制算法简析; 由于电动机是主要的能源用户, 本文涵盖了电机不同类型的能耗控制策略, 如采用高效电机, 变速驱动(VSD), 以及电容器组以提高功率因数来降低能源使用等。以上研究成果将为能耗优化控制及其优化算法的研究提供相关的理论基础和引导。

## 2. 能耗优化控制理论研究

在 20 世纪 80~90 年代, 就有学者对能耗优化控制进行研究, 它们对一类系统或对象深入研究, 从控制理论角度, 提出一套能耗优化控制理论。

### 2.1. 线性系统最小能耗控制理论

文献[4]对最小能耗控制定义如下: 最小能耗控制, 就是研究动力学系统能耗最小控制规律。文献[5]指出, 最小能耗控制规律问题就是在满足给定行程和规定时间下, 寻求一种什么样的控制规律, 能使这一工作过程消耗的能量为最小。文献对线性系统深入分析, 其中文献[1] [4] [6]提出终端时间变动系统的最小能耗控制理论、状态方程右端含有常数矢量系统的最小能耗控制理论; 文献[6]提出了线性时变系统、线性时不变系统、状态方程右端不含状态变量系统、终端时间固定系统的最小能耗控制理论。

### 2.2. 直流拖动系统最小能耗控制理论

在考虑电枢电感情况下, 文献[7]建立电力拖动最小能耗控制系统理论模型, 推导出晶闸管-直流电机调速系统的解析数值混合算法能耗最小控制理论。针对直流拖动类对象, 文献[5] [8]-[10]建立一类直流拖动系统的数学模型, 通过机理分析法, 得出了能耗最优控制的  $ID(t)$ 、角速度  $w(t)$ 和角位移  $a(t)$ 的函数。针对电梯控制系统, 文献[11]推导出直流拖动系统模型, 运用极大值原理建立哈密尔顿函数, 解出电梯系统中电流和速度的最小能耗控制的佳轨迹线。

### 2.3. 通风机类负载能耗优化控制理论

针对风机、水泵类负载的多台并联运行系统, 文献[12]提出转速能耗最优控制和台数切换能耗最优理论。文献[13]分析了相同型号和不同型号的水泵存在实际运行特性的差异, 在满足用户用水量要求的前提下, 以能耗最小为目标函数, 确定泵站的最优运行方式。文献[14]根据液压伺服马达理论, 在考虑惯性、粘性系数、弹簧负载以及油液压缩性和泄露因素时, 得到液压马达斜椭圆负载轨迹; 并以能耗最小为目标, 实现液压马达的参数设计。

## 3. 能耗优化控制工程技术研究

目前, 能耗优化控制应用研究的对象可以分为能源受限对象和能源不受限制的高能耗对象。能源受限的被控对象如电动汽车、水下自治机器人等, 由于其工作环境的特殊性, 采用能耗优化控制能够使其具有更好的续航能力, 完成更多的任务。对于一些有持续电力供应的高能耗对象, 如大型电力传动机车, 大型窑炉等, 采用能耗优化控制将会产生可观的经济效益。因此, 对于能源受限对象和能源不受限的高

能耗对象的能耗优化控制应用研究非常必要且具有重要意义。

### 3.1. 能源受限对象

特殊工况的机器人对象主要分为水下作业机器人、建筑作业爬墙机器人等。此类对象在一个运行周期内无法续能,仅靠自身携带的能源完成一次作业。蓄电池技术的瓶颈限制了此类对象的作业时间和作业量,若要在固定储能容量的限制下实现持久的续航能力,采用能耗优化控制具有重要意义。针对建筑行业中的爬墙机器人,文献[15]提出以能耗为目标的爬墙机器人足力控制方法,采用三段回路 PID 实现最佳的电机关节驱动力控制。针对非线性摩擦的工业机器人关节驱动系统,文献[16]指出电机的热损耗和非线性摩擦直接限制了能耗高效利用。对于自主作业型水下机器人控制系统,文献[17]通过协调运动规划,以阻力最小为优化指标,运用系统运动学反解将削弱阻力系数较大的自由度运动,从而达到能源消耗最小;文献将惩罚因子引入系统运动学逆矩阵,采用梯度投影法优化出最小的系统推力;文献[18]针对水下机器人近水面低速航行情况,以能耗作为性能指标提出了横摇广义预测控制算法;文献[19]分析了水下航行器作业环境具有时变、非线性并且会出现不确定的流体动力等状况的水下航行器,提出了基于泰勒-拉格朗日方程的滑膜能耗最优控制器。

### 3.2. 高能耗对象

能源消耗大户分为频繁启/制动的传动系统(可逆轧机、车床、电梯、工业机械手等)、复杂锅炉系统(工业锅炉、燃煤热水炉等)、重型运载设备(矿用电动轮车、混合动力汽车和挖掘机等)和感应电机等。

#### 3.2.1. 频繁启/制动对象能耗优化控制

电力传动系统的启动电流约为额定工作电流的 5~10 倍,对于频繁启/制动传动控制系统,如果仅追求动态过程的快速性,则会浪费大量能量。针对大型机床启动过程,文献[20]提出了星-三角节能控制器;文献[21]提出了电极启动、液阻软启动、磁控软启动、晶闸管软启动、变频软启动等节能启动策略。针对车床调速控制,文献[18]提出了开关磁阻调速控制器。针对频繁升降的电梯传动系统,文献[22]采用粒子群算法和自学习粒子群算法找到能耗最小的电梯高阶标准运动轨迹。针对多关节机械手系统,文献[23]提出最小时间-能耗控制器,从而使时间指标和能耗指标达到最优。针对曲柄剪切系统的高度非线性,文献[24]根据负载特性,提出了最优运动轨迹,进而使系统运行在最小电流轨迹线上。针对工业中性冗余系统,文献[25]通过惩罚策略实现对系统输入的控制,构造系统哈密顿函数,由边界条件得到系统能耗最优轨迹线。

#### 3.2.2. 锅炉类复杂系统能耗优化控制

工业锅炉、燃煤热水炉等控制系统具有非线性、多参数、大时滞等特点,是一类复杂控制系统。锅炉为高耗能对象,其热效率受限于锅炉本体的制造工艺、运行管理的操作水平、燃料与控制的配比控制等因素。在锅炉浪费的能量中,占燃空比控制不合理占主要部分。为此,合理控制燃空比具有重要的节能意义。针对环形加热炉系统,文献[26]提出启发式寻优策略,寻找出均热段、加热段和预热段的最佳燃空比。在工业锅炉方面,文献[27][28]指出空气过剩系数  $\alpha = \frac{21}{21 - o_2}$  取值为 1.25~1.3 时,燃烧效率最

好,为达到这个最佳空气过剩系数,文献[28]提出热效率自寻优控制,此种方法不需要精确数学模型,就可以找到最优点;文献[27]提出了炉温寻优,有效解决了大滞后锅炉系统寻优周期长的缺陷。针对钢厂推钢式连续加热炉,文献[29]运用有限差分原理,建立加热炉的动态数学模型,利用乘子法同 Pontryagin 最大值原理相结合的迭代算法将加热炉燃料消耗的高维约束优化问题转变成低维无约束问题,得出了以节能为目的的加热炉炉温设定曲线,从而达到节能降耗的目的。

### 3.2.3. 感应电机能耗优化控制

感应电机为工业中主要的耗能对象, 据统计, 感应电机耗能占工业中总耗能的 60%以上[6]。电机系统具有多变量、强耦合、非线性、大滞后、时变等特点, 为一个复杂控制系统, 为此, 国内外学者针对感应电机控制进行大量的研究。文献[30]提出变增益控制法、文献[31]提出了 DTC-SVM 滑膜控制法、文献[32]-[36]提出了磁场定向控制和直接转矩控制, [36] [37]提出基于空间矢量的直接转矩控制。文献[38] [39]提出损耗模型控制法(Loss Model Control, LMC), [40] [41]提出功率检测搜索法(Search Control, SC)通过调节励磁电流, 使异步电机运行在输入功率最优曲线上, 并取得了一定的成效。基于传统搜索法之上, 有许多学者提出提出 TABU 算法[42]、粒子群算法[22]、遗传算法 - 粒子群(GA-PSO)算法[43] [44]、神经网络算法[45]等搜索优化算法。针对搜索法收敛时间长、易于陷入局部最优值等缺点, 文献[46]提出模糊搜索法; 文献[41]提出黄金分割法; 文献[47] [48]提出在线式直流功率最小模糊搜索控制算法(FLSC)。

### 3.2.4. 大型运载设备能耗优化控制

大型运载设备对象主要分为交通运输车辆、挖掘机、矿用电动轮车等。此类对象在运行期间没有持续能源供应, 但当自带能源耗尽时可以随时进行续能后继续作业。随着科技的发展, 汽车、混合动力车已经成为人们普遍使用的交通工具。近年来, 汽车数量的迅速增多, 对能源的消耗已经占据交通运输行业总能耗的很大一部分。作为交通运输方面的能耗大户, 对其进行能耗优化控制有重大的意义。文献[38]对汽车运行过程中起步突变、急停、忽然转向等特殊情况进行研究, 将免疫反馈原理引入 PID 控制中, 建立免疫 PID 能耗模型, 采用单层神经网络作为抑制抗体的调节系数, 实现对发动机喷油的精确节能控制。在混合动力车方面: 文献[41] [46]提出了基于动态规划的全局优化控制策略, 文献[49] [50]提出了等效燃油实施优化的最小控制策略; 文献[51]提出了自适应等效燃油最小控制策略; 文献[40]提出了 LVQ 神经网络学习训练制定一种工况自适应实时优化控制策略; 文献[52]研究了混合动力汽车能量消耗数学模型, 假设在发动机功率  $P_{eng}$  固定的前提下, 通过混合动力汽车的控制策略, 使发动机工作在最佳转速转矩点。在混合动力挖掘机方面: 文献[53]提出了超级电容 SOC 参数补偿及瞬时优化控制策略; 文献[54] [55]提出了液压挖掘机模糊控制策略; 文献[56]提出了液压挖掘机恒功率与变功率相结合的功率协调控制策略。重型电动轮车是矿山开采用运输过程中最重要耗能对象, 目前针对电动轮车能耗优化控制研究主要分为双能源技术[57]、燃油预热技术[58]、基于超级电容的再生制动技术[59] [60]等。

### 3.2.5. 不同电机节能控制策略对比与演进驱动力分析

不同电机节能控制策略对比见表 1。

Table 1. Comparison of different energy-saving control strategies for motors

表 1. 不同电机节能控制策略对比

控制策略	控制原理	性能指标	鲁棒性	实现复杂性	应用成本
晶闸管 - 直流电机调速系统	考虑电枢电感, 建立系统数学模型, 采用解析数值混合算法求解最优能耗控制规律。	节能效果好, 动态响应较快	中等	中等	中等
电梯系统最小能耗控制	建立直流拖动系统模型, 运行极大数值原理建立哈密顿函数, 求解电流和速度的最优解。	节能效果好, 动态响应满足电梯工况要求	中等	中等	中等
变增益控制	根据工况变化调整控制器增益	节能效果一般, 动态响应较快	较高	中等	中等
DTC-SVM 滑膜控制	结合直接转矩控制与空间矢量调节, 采用滑膜变结构控制。	节能效果好, 动态响应快	高	较高	较高

续表

磁场定向控制	通过坐标变换实现励磁与转矩独立控制	节能效果好, 动态响应快	中等	较高	较高
直接转矩控制	直接控制定子磁链与电磁转矩, 无需坐标变换。	节能效果中等, 动态响应极快	高	中等	中等
基于空间矢量的直接转矩控制	在 DTC 基础上引入空间矢量调制, 优化电压的矢量选择	节能效果较好, 动态响应快	高	中等	中等
损耗模型控制(LMC)	建立电机损耗数学模型, 在线计算使得总损耗最小的励磁电流	节能效果好, 动态响应快	较低	中等	中等
功率检测搜索控制(SC)	直接检测输入功率, 搜索最小的功率点, 调节励磁电流	节能效果较好, 动态响应慢	高	低	低
TABU 算法	基于禁忌搜索的启发全局优化算法, 避免重复搜索	节能效果好, 动态响应较慢	高	高	高
粒子群算法(PSO)	模拟鸟类觅食行为, 通过群体协作进行全局优化	节能效果好, 动态响应较快	高	高	高
遗传-粒子群混合算法(GA-PSO)	结合 GA 的全局搜索能力与 PSO 的局部收敛速度	节能效果好, 动态响应较快	高	高	高
模糊搜索法	引入模糊规则调整搜索步长和方向	节能效果较好, 动态响应较传统 SC 有改善	较高	中等	中等
黄金分割法	采用黄金分割比例确定搜索区间	节能效果较好, 动态响应快	较高	中等	中等
在线式直流功率最小模糊搜索控制算法(FLSC)	在线检测直流侧功率, 结合模糊逻辑自适应调整控制量	节能效果较好, 动态响应较传统的 SC 有改善	较高	中等	中等
高效电机	采用高效率电机代替低效电机, 降低铁耗和铜耗	节能效果好, 动态响应取决于电机本体	高	中等	中等
变频调速(VSD)	根据负载需求调节电机转速	节能效果好, 动态响应取决于控制方式	高	低	较高
电容器组功率因数校正	并联电容器补偿无功功率, 降低线路损耗	节能效果中等, 对动态响应无直接影响	高	低	低

不同电机能耗控制策略的演进源于工程应用中的现实需求。早期主要是直流拖动系统, 虽然其节能效果好, 但直流电机维护成本高、效率有限, 感应电机逐步受到关注。感应电机控制方法从损耗模型控制(LMC)到功率检测搜索控制(SC), 再到引入模糊搜索、黄金分割等改进策略。本文感应电机控制策略从最初依赖模型演进为数据驱动, 从固定模式演进为自适应搜索模式。变频调速(VSD)、高效电机、电容器组功率因数校正系统因成本合理, 易实现等现实因素, 在实际工业中应用广泛。电机节能控制策略的演进本质上是在节能效果、动态响应、鲁棒性、复杂度和成本之间不断推进的过程, 不同的控制策略各有

应用场景，在实际应用中需要结合不同的因素进行选择。

### 3.3. 前沿技术在能耗优化的应用

近年来，能耗优化控制研究的重点已从传统方法向着更复杂的控制方法。例如模型预测控制(MPC)、强化学习、数字孪生等前沿控制技术。文献[61]通过对比模型预测控制(MPC)与功率检测搜索控制(SC)在感应电机中损耗最小的性能分析，得到了模型预测控制在低转速的动态工况下拥有更好的鲁棒性。文献[62]研究了暖通空调系统的各种控制方法，发现若将模型预测控制与学习驱动控制相结合，形成的混合控制方法可以提高性能指标。文献[63]阐述了强化学习在混合动力汽车的能量管理方面的应用，总结出了强化学习在高维状态空间下解决繁琐问题时表现出较好的性能。文献[64]研究了数字孪生在插电式混合动力汽车能量管理中的应用，采用了不同的算法进行等效消耗最小化策略实现在线控制，数字孪生技术提高了燃油经济性。

## 4. 面临的问题及未来发展趋势

从能耗优化控制发展现状来看，目前能耗优化控制研究面临的问题主要有以下几个方面。

### (1) 没有形成通用的能耗优化控制理论

虽然文献[1] [3] [4]在 20 世纪 80 到 90 年代提出了最小能耗控制理论；文献[5]-[12]提出了能耗最优控制理论，并实施到一些被控对象，起到了不错的节能效果。但这些理论只是在特定的对象成立，没有建立起一类或一套通用的或者在一定范围内通用的控制理论。

### (2) 复杂对象能耗优化控制模型难以建立。

对一个对象或系统实施控制前，建立模型是非常重要的。目前仅对于一些感应电机、电梯等模型相对简单对象建立起了能耗优化控制模型，像电动轮车、复杂锅炉系统等，很难建立起精准的模型。

### (3) 没有形成融合能耗指标的性能评价体系

目前，对控制器或控制算法的优良评价标准主要突出在准、快、稳等方面，能耗优化控制效果的评价多从节能效果来评价，而没有从综合指标出发给出一种评价标准。当考虑能耗指标时如何建立一种可被广泛认可的评价函数是一个很重要的问题。

### (4) 智能优化控制算法处理多目标优化的缺陷

智能优化算法是近年来的研究热点，各行各业的学者通过研究智能优化算法，进而应用到不同的领域处理不同的优化问题。但当优化指标过多时，优化算法面临着维度灾难、收敛性差、易陷入局部最优等一系列问题。

能源危机是 21 世纪全世界面临的最困难的挑战之一，节约能源是实现可持续发展的重要途径。相对于发达国家，在节能研究和应用领域，我们还有很长的一段路要走。除了要积极开发新能源，在“开源”的同时更加重要的是“节流”，在现有的条件下积极寻求节能方法，其中最关键的是寻求能耗最小控制方案。未来能耗优化控制的发展会从完整的控制理论体系和评价标准出发，解决那些多参数、非线性、大时滞、强耦合等高能耗复杂对象和特殊工况下作业的能源受限对象。

## 5. 结束语

本文回顾了我国的能源现状，分析了目前的能耗优化控制的理论研究以及面向应用的能耗优化控制研究，从能源不受限到能源受限的各个领域对象的能耗优化控制策略与方法，分析目前能耗优化控制面临的问题，指出开发模型与数据混合驱动的复杂系统能耗在线优化方法在于建立完整的能耗优化控制理论和复杂系统的数学模型，提出考虑能耗指标的评价体系与先进的多目标优化算法。

## 基金项目

湖南省区域联合基金, 动态数据与机理模型协同驱动的水管网实时优化调度方法研究, 2024JJ7179。

## 参考文献

- [1] 胡中楫. 控制与能源[J]. 浙江大学学报(工学版), 1981(2): 57-64.
- [2] 李伟. 探究我国能源利用效率的影响因素[J]. 经济视野, 2014(2): 276.
- [3] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 第5版. 北京: 科学出版社, 2007: 543.
- [4] 胡中楫. 最小能耗控制及其应用[J]. 制造业自动化, 1982(4): 10-13.
- [5] 任兴权. 近代控制理论在电力拖动系统中的应用[J]. 冶金自动化, 1985(4): 33-39.
- [6] Selvaraj, D.E., Karthik, C.R., Arun, R., Geethadevi, S. and Ganesan, J. (2014) Energy Efficient Three Phase Squirrel Cage Induction Motor Fed AC Drives. *International Journal of Science and Engineering Applications*, **3**, 18-21. <https://doi.org/10.7753/ijsea0302.1003>
- [7] 童调生. 考虑电枢电感的电力拖动最小能耗控制及奇异解算法的研究[J]. 自动化学报, 1988(3): 199-206.
- [8] 任兴权, 田扬. 电力拖动能耗最小状态反馈闭环最优控制系统[J]. 鞍钢自动化, 1992(3): 1-6.
- [9] 任兴权. 最优控制理论在电力拖动系统中应用——电力拖动最优控制[J]. 控制工程, 1994(4): 1-7.
- [10] 任兴权. 直流拖动系统位置最优控制及准确定位[J]. 冶金自动化, 1982(3): 24-30.
- [11] Shreelakshmi, M.P. and Agarwal, V. (2018) Trajectory Optimization for Loss Minimization in Induction Motor Fed Elevator Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **33**, 5160-5170. <https://doi.org/10.1109/tpel.2017.2735905>
- [12] 王鉴光. 泵站最优节能控制[J]. 石油钻采工艺, 1995(3): 80-84.
- [13] 刘家春, 吴鹰. 能耗最小法确定泵站经济运行方案[J]. 水泵技术, 2005(2): 39-41.
- [14] 曾励, 朱派龙, 黄民双, 等. 以能耗最小为目标优化设计液压伺服马达[J]. 大众用电, 1994(2): 28-31.
- [15] 魏武, 蔡钊雄, 邓高燕. 基于能耗目标优化的多足爬墙机器人足力控制研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(9): 1099-1104.
- [16] 张尚星, 朱学军, 泉照之. 关节驱动系统非线性摩擦最小能耗分析[J]. 微计算机信息, 2010, 26(8): 157-158.
- [17] 张奇峰, 张艾群. 基于能源消耗最小的自治水下机器人-机械手系统协调运动研究[J]. 机器人, 2006, 28(4): 444-447.
- [18] 王宏健, 王琳琳, 潘立鑫. 水下机器人近水面横摇与能耗控制[C]//中国自动化学会控制理论专业委员会. 中国自动化学会控制理论专业委员会 D 卷. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院; 呼和浩特: 内蒙古工业大学信息工程学院; 北京: 中国空间技术研究院北京控制工程研究所, 2011: 25-30.
- [19] Sarkar, M., Nandy, S. and Shome, S.N. (2015) Energy Efficient Trajectory Tracking Controller for Underwater Applications: Arobust Approach. *Aquatic Procedia*, **4**, 571-578. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.074>
- [20] 汪洪洲, 施鸣歧. 机床电机节能控制器原理及优越性[J]. 节能技术, 1986(5): 11-16.
- [21] 王守鹏. 电动机的节能运行分析[J]. 华东科技, 2013(2): 278, 280.
- [22] Chen, K.Y., Huang, M.S. and Fung, R.F. (2013) Adaptive Minimum-Energy Tracking Control for the Mechatronic Elevator System. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **25**, 1790-1799.
- [23] 钟斌, 韩致信, 张秀秀. 机械手的近最小时间-能耗控制[J]. 机械与电子, 2012(5): 75-77.
- [24] Snider, D.R. (1992) A Control for a Crank Shear That Minimizes the RMS Current. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **28**, 1309-1313. <https://doi.org/10.1109/28.175282>
- [25] Halevi, Y., Carpanzano, E. and Montalbano, G. (2014) Minimum Energy Control of Redundant Linear Manipulators. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, **136**, 562-576. <https://doi.org/10.1115/1.4027419>
- [26] 邱夏陶, 韩小良. 加热炉最低能耗控制模型的研究[J]. 工业炉, 1990(1): 44-47.
- [27] 梁道君, 郑金吾. 燃煤热水锅炉节能优化控制研究[J]. 节能, 1999(2): 5-9.
- [28] 王鉴光. 工业锅炉热效率自寻优计算机控制系统[J]. 化工自动化及仪表, 1994(3): 31-35.
- [29] 杜佳璐, 林叶锦. 加热炉最小能耗优化控制策略的研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2000(2): 9-11.
- [30] 齐昕, 任佳仕, 石向阳, 等. 具有低开关频率的感应电机无传感器控制[J]. 工程科学学报, 2024, 46(3): 491-502.

- [31] Hajian, M., Arab Markadeh, G.R., Soltani, J. and Hoseinnia, S. (2009) Energy Optimized Sliding-Mode Control of Sensorless Induction Motor Drives. *Energy Conversion and Management*, **50**, 2296-2306. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.05.006>
- [32] 王锋, 潘莹月, 林立松, 等. 感应电机预测功率控制器设计与调优策略[J]. 电气工程学报, 2023, 18(1): 24-31.
- [33] 刘鹏. 感应电机固定时间预定性能位置跟踪优化控制[J]. 制造业自动化, 2025, 47(7): 108-120.
- [34] Albalawi, H., Zaid, S.A., El-Shimy, M.E. and Kassem, A.M. (2023) Ant Colony Optimized Controller for Fast Direct Torque Control of Induction Motor. *Sustainability*, **15**, Article 3740. <https://doi.org/10.3390/su15043740>
- [35] Bertoluzzo, M., Buja, G. and Menis, R. (2006) Direct Torque Control of an Induction Motor Using a Single Current Sensor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **53**, 778-784. <https://doi.org/10.1109/tie.2006.874415>
- [36] Ben Salem, F., Almousa, M.T. and Derbel, N. (2024) Direct Torque Control with Space Vector Modulation (DTC-SVM) with Adaptive Fractional-Order Sliding Mode: A Path Towards Improved Electric Vehicle Propulsion. *World Electric Vehicle Journal*, **15**, Article 563. <https://doi.org/10.3390/wevj15120563>
- [37] Rodríguez, J., Pontt, J., Silva, C., Huerta, R. and Miranda, H. (2004) Simple Direct Torque Control of Induction Machine Using Space Vector Modulation. *Electronics Letters*, **40**, 412-413. <https://doi.org/10.1049/el:20040299>
- [38] 郭新峰, 孟春岩. 汽车发动机节能优化控制仿真与研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(12): 160-163.
- [39] Cabezas Rebolledo, A.A. and Valenzuela, M.A. (2015) Expected Savings Using Loss-Minimizing Flux on IM Drives—Part I: Optimum Flux and Power Savings for Minimum Losses. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **51**, 1408-1416. <https://doi.org/10.1109/tia.2014.2356643>
- [40] 林歆悠, 孙冬野. 基于 ECMS 混联式混合动力客车工况识别控制策略[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2012, 39(10): 43-49.
- [41] Chen, J., He, H., Wang, Y., Quan, S., Zhang, Z., Wei, Z., et al. (2024) Research on Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles Based on Improved Dynamic Programming and Air Supply Optimization. *Energy*, **300**, Article 131567. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131567>
- [42] Fang, Y., Fan, C., Ye, Y. and Chen, Y. (2003) Application of Stochastic Method to Optimum Design of Energy-Efficient Induction Motors with a Target of LCC. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, **4**, 270-275. <https://doi.org/10.1631/jzus.2003.0270>
- [43] Kim, D.H. (2007) GA-PSO Based Vector Control of Indirect Three Phase Induction Motor. *Applied Soft Computing*, **7**, 601-611. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2006.04.001>
- [44] Kim, D.H. and Hirota, K. (2008) Vector Control for Loss Minimization of Induction Motor Using GA-PSO. *Applied Soft Computing*, **8**, 1692-1702. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2006.09.001>
- [45] Prymak, B., Moreno-Eguilaz, J.M. and Peracaula, J. (2006) Neural Network Flux Optimization Using a Model of Losses in Induction Motor Drives. *Mathematics and Computers in Simulation*, **71**, 290-298. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2006.02.015>
- [46] Tang, W., Wang, Y., Jiao, X. and Ren, L. (2023) Hierarchical Energy Management Strategy Based on Adaptive Dynamic Programming for Hybrid Electric Vehicles in Car-Following Scenarios. *Energy*, **265**, Article 126264. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126264>
- [47] Zhang, L., Liu, J. and Wen, X. (2005) A New Fuzzy Logic Based Search Control for Efficiency Optimization of Induction Motor Drives. 2005 *International Power Engineering Conference*, Singapore, 29 November 2005-2 December 2005, 1-526. <https://doi.org/10.1109/ipec.2005.206964>
- [48] 张立伟. 电动汽车用异步电机系统效率优化控制研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院(电工研究所), 2006.
- [49] Sahwal, C.P., Sengupta, S. and Dinh, T.Q. (2024) Advanced Equivalent Consumption Minimization Strategy for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles. *Journal of Cleaner Production*, **437**, Article 140366. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140366>
- [50] Yao, D., Lu, X., Chao, X., Zhang, Y., Shen, J., Zeng, F., et al. (2023) Adaptive Equivalent Fuel Consumption Minimization Based Energy Management Strategy for Extended-Range Electric Vehicle. *Sustainability*, **15**, Article 4607. <https://doi.org/10.3390/su15054607>
- [51] Onori, S., Serrao, L. and Rizzoni, G. (2010) Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy for Hybrid Electric Vehicles. *ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference*, Volume 1, Cambridge, 12-15 September 2010, 499-505. <https://doi.org/10.1115/dscc2010-4211>
- [52] 曾小华, 王庆年, 王伟华. 混合动力汽车能耗最优数学建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(18): 4309-4311.
- [53] 刘昌盛, 何清华, 龚俊, 等. 液压挖掘机混合动力系统节能特性及试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),

2015, 42(8): 40-46.

- [54] 金立生, 赵丁选, 黄运华, 等. 液压挖掘机节能油门模糊控制器的开发研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 119-122.
- [55] 高峰, 冯培恩. 挖掘机载荷自适应节能控制策略[J]. 同济大学学报, 2001(9): 1036-1040.
- [56] 何清华, 郝鹏, 常毅华. 基于功率协调控制的液压挖掘机节能系统研究[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(2): 188-191.
- [57] 张强. 电动轮矿用自卸车节能技术研究[J]. 矿用汽车, 2011(1): 17-20.
- [58] 邓熙. 浅谈电动轮矿用自卸车节能技术[J]. 中国机械, 2014(5): 57.
- [59] 李洪亮, 樊平. 基于超级电容器的矿用电动轮自卸车再生制动的研究[J]. 煤矿机械, 2013, 34(3): 61-63.
- [60] 李浩. 架线式电动轮自卸车再生制动储能系统研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [61] Graciola, C.L., Goedel, A., Castoldi, M.F., Souza, W.A., Nunes, E.A., Santos, T.H., *et al.* (2025) Comparison between Predictive and Scalar Control Strategies for Minimizing Losses in Induction Motors. *Systems Science & Control Engineering*, **13**, Article 2481942. <https://doi.org/10.1080/21642583.2025.2481942>
- [62] Liu, J.L., Pan, S., Cui, Y. and Liu, Y.Q. (2026) Comparative Analysis of Algorithmic Paradigms for HVAC Control across Diverse Building Systems: A Systematic Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **1587**, Article 012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1587/1/012042>
- [63] Boukoberine, M.N., Zia, M.F., Berghout, T. and Benbouzid, M. (2025) Reinforcement Learning-Based Energy Management for Hybrid Electric Vehicles: A Comprehensive Up-to-Date Review on Methods, Challenges, and Research Gaps. *Energy and AI*, **21**, Article 100514. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025.100514>
- [64] Zhang, C. (2024) Cyber-Physical Merged Learning for Online Optimisation of Multi-Mode Hybrid Vehicles with Diverse Time-Scale Objectives. Ph.D. Thesis, University of Birmingham.