

电力机车牵引电传动系统关键参数 自动优化方法研究*

金淼鑫^{1,2}, 蒋忠城^{1,2}, 李旺^{1,2}, 张波^{1,2}

(1. 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室, 湖南 株洲 412000;

2. 中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412000)

摘要: 为了使电力机车牵引电传动系统参数匹配最佳, 对电力机车牵引电传动系统关键参数自动优化方法进行了研究。首先, 建立了某型号电力机车牵引电传动系统的仿真模型, 仿真结果证明了建模的准确性及合理性。其次, 针对原模型开展试验设计(DOE)仿真, 获得一簇反映系统运行规律的仿真结果, 基于仿真结果建立了映射系统输入参数与输出特性的近似模型。再次, 基于近似模型采用多目标粒子群优化算法进行寻优, 获得了优化的设计参数。最后, 对比分析几种模型仿真优化的结果, 验证了采用近似模型进行全局寻优方法的效果, 且在保证仿真精度的前提下, 达到了极高的仿真效率。研究结果对于电力机车牵引电传动系统的高效率仿真具有参考意义。

关键词: 电力机车; 牵引电传动系统; 近似模型; 自动优化

中图分类号: U264.6 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)08-0034-07

doi: 10.12177/emca.2022.063

Research on Automatic Optimization Method of Key Parameters of Electric Locomotive Traction Electric Drive System*

JIN Miaoxin^{1,2}, JIANG Zhongcheng^{1,2}, LI Wang^{1,2}, ZHANG Bo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Heavy Duty AC Drive Electric Locomotive Systems Integration,

Zhuzhou 412000, China;

2. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)

Abstract: For the purpose of optimizing the parameters of electric locomotive traction electric drive system for more reasonable matching relationship, an automatic optimization method for the key parameters of electric locomotive traction electric drive system is studied. Firstly, the traction electric drive system simulation model of a certain electric locomotive is established, and the simulation results prove the accuracy and rationality of the modeling method. Secondly, simulation based on design of experiment (DOE) of the model is carried out, and a cluster of simulation results reflecting the system operation law is obtained. Based on the simulation results, an approximate model mapping the input parameters and output characteristics of the system is established. Thirdly, the optimized design parameters are obtained by the multi-objective particle swarm optimization algorithm. Finally, the results of simulation optimization of several models are compared and analyzed, which verifies the effect of the global optimization method based on the approximate model, and high simulation efficiency is achieved as well as high

收稿日期: 2022-03-22; 收到修改稿日期: 2022-06-15

* 基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2022WK2013); 科技部创新方法工作专项项目(2019IM050100)

作者简介: 金淼鑫(1986—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为轨道交通牵引电传动技术。

蒋忠城(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为轨道交通集成技术。

李旺(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为轨道交通牵引电传动技术。

simulation accuracy. The research has certain reference value for the high-efficiency simulation of electric locomotive traction electric drive system.

Key words: electric locomotive; traction electric drive system; approximate model; automatic optimization

0 引言

电力机车的牵引力特性与列车的整体性能密切相关,其脉动幅值影响到列车的噪声、振动、舒适性、轮轨关系等多个方面。牵引力的脉动幅值受到运行线路、牵引控制算法、中间直流环节电压等因素的影响。在相同的运行线路及相同牵引控制算法下,牵引电传动系统中间直流环节的电压纹波特性是影响牵引力脉动幅值的主要因素,因此针对牵引电传动系统的变压器二次侧短路电感、变压器二次侧短路电阻、谐振电感、谐振电容、中间直流环节支撑电容等系统关键电气参数进行优化,从而改善中间直流环节的电压纹波特性,可以实现极低的牵引力脉动幅值。

电力机车的定制化设计比重日趋增大,各整车厂也竞相开展新一代列车的研发,在此行业背景下,上述关键参数需要结合新车型的性能要求进行优化设计。由于关键参数能够形成多种组合方案,传统的设计-试验-修正方法推高了设计成本,而且对于优化潜力的挖掘力度不足,已经不能适应当前轨道交通装备“数字化”“智能化”设计需求^[1],亟需一种智能、高效的方法实现对电力机车牵引电传动系统关键参数的自动优化设计。

为了优化设计指标,系统设计环节通常会采用寻优算法对系统中的关键参数进行自动优化设计,进而达到提升系统性能的目的。目前,基于参数自动优化的设计方法在越来越多的工程领域得到了推广和应用。文献[2]采用响应面近似模型技术,构造了以经济性为主的柴油机喷射系统参数综合优化目标函数,利用全局优化与局部优化相结合的优化方法对该近似模型进行了寻优,优化后的柴油机燃油消耗率降低了5%、NO_x和碳烟排放分别降低10%和18%。文献[3]以某款功率分流式混合动力客车为研究对象,利用组合优化算法对动力系统部件参数进行500次联合优化仿真,优化后整车综合油耗降低了4.5 L/100 km,节油率达16.6%。文献[4]针对XMQ6838Y客车怠速时方向盘抖动和座椅振动剧烈的问题,以其动力总成悬置系统各

阶模态的解耦率最大为目标、固有频率的分配为约束,对悬置系统进行设计参数优化,优化后该车型在启、闭空调时方向盘和各排座椅的三向振动均明显降低,提升了乘坐舒适性。在轨道交通领域,文献[5]为探究车辆与轨道参数多目标优化问题,基于径向基函数(RBF)神经网络代理模型对车辆/轨道参数开展多目标优化以改善车辆的动力学性能,结果表明,车辆与轨道参数优化后,最优解对脱轨系数的优化率达到13.14%,且对轮重减载率的优化率达到14.63%。

鉴于在轨道交通领域,针对电力机车牵引电传动系统关键参数的自动优化设计尚无有效方法,本文提出一种电力机车牵引电传动系统关键参数自动优化方法。基于电力机车牵引电传动系统的仿真模型开展试验设计(DOE)抽样仿真,获得一簇反映系统运行规律的仿真结果,建立映射系统输入参数与输出特性的近似模型,针对近似模型采用多目标粒子群优化算法进行寻优,实现对系统关键参数的优化设计。

1 总体技术框架

本文基于数字化、智能化设计的理念,提出了一种电力机车牵引电传动系统关键参数自动优化方法,技术框图如图1所示。首先建立电力机车牵引电传动系统模块化仿真模型,再通过样本DOE抽样仿真获得一簇反映系统运行规律的仿真结果。基于输入样本参数与仿真结果之间的映射关系建立牵引电传动系统数字化近似模型,然后利用优化算法对该近似模型开展自动寻优。最后自动输出优化参数。

2 电力机车牵引电传动系统模块化模型

某型号电力机车的牵引电传动系统结构如图2所示,主要包括受电弓、牵引变压器、四象限整流器、中间直流环节、逆变器、牵引电机、牵引控制单元等电气设备^[6]。牵引工况下,主断路器闭合,牵

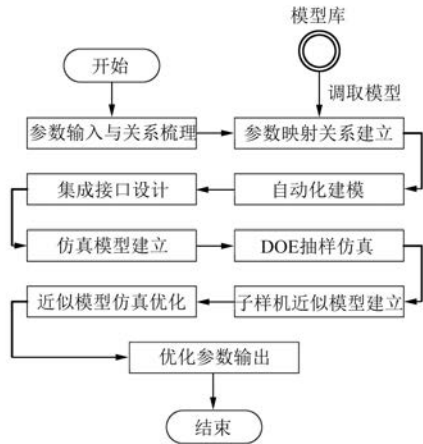


图1 技术框图

引供电网上的工频 25 kV 交流电压经由受电弓接入到牵引电传动系统中, 25 kV 交流电经牵引变压器降压后作为四象限整流器的输入电压。在牵引控制单元控制下, 四象限整流器将交流电压整流成中间直流环节的直流电压, 逆变器将直流电压调制成脉冲宽度调制 (PWM) 电压驱动牵引电机输出牵引力。制动工况为牵引工况的逆向过程, 再生制动能量由电机经逆变器、中间直流环节、四象限整流器、牵引变压器、受电弓回馈给牵引供电网。

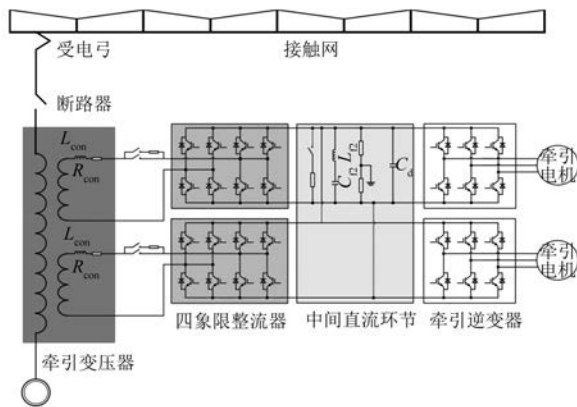


图2 某型号电力机车牵引电传动系统结构图

2.1 牵引电传动系统仿真模型

电力机车牵引电传动系统仿真模型主要包括 4 个模块: 牵引供电网模块、牵引变压器与四象限整流器模块、牵引逆变器与牵引电机模块、控制台与仪表模块。

牵引供电网模块采用传统自耦变压器 (AT) 供电网拓扑, 上下行复线运行。四象限整流器模

型结构示意图如图 3 所示, R 、 L 分别为网侧电阻和电感; S_{1a} 和 S_{2a} 为 a 桥臂自带反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 功率模块; S_{1b} 和 S_{2b} 为 b 桥臂自带反并联二极管的 IGBT 功率模块; C_d 为直流侧支撑电容; R_L 为直流侧等效负载。

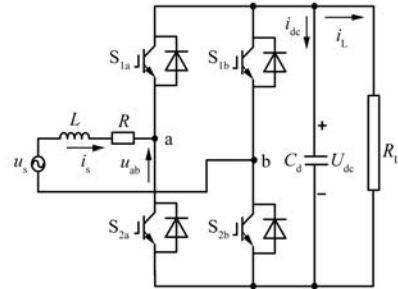


图3 四象限整流器模型结构示意图

四象限整流器的控制算法采用瞬态直接电流控制法。瞬态直接电流控制是目前电力机车和高速动车组中采用较多的控制策略, 该控制策略具有实现简单、能够有效抑制二次侧牵引绕组的电流谐波、直流侧电压纹波小、动态响应好等优点。

牵引变流器为典型的两电平三相整流拓扑, 其采用的控制方法为基于牵引特性曲线的恒转矩控制与恒功率控制, 核心控制算法为多边形磁链轨迹直接转矩控制方法。在额定工作点之前, 控制子模块对牵引电机采用恒转矩控制方式, 为了抑制电机电气参数中的谐波分量, 在此阶段随着电机转速的升高依次采用近似圆磁链轨迹直接转矩控制^[7] (对应 0~30 km/h 车速以及 240~217 kN 的单电机牵引力变化范围)、三十边形磁链轨迹直接转矩控制^[8] (对应 31~80 km/h 车速以及 216~182 kN 的单电机牵引力变化范围)、十八边形磁链轨迹直接转矩控制^[9] (对应 81~120 km/h 车速以及 181~169 kN 的单电机牵引力变化范围)、六边形磁链轨迹直接转矩控制^[10] (对应 121~200 km/h 车速以及 168~101.6 kN 的单电机牵引力变化范围)。在额定工作点之后, 控制子模块对牵引电机采用恒功率控制方式。进入额定工作点后逆变器对直流母线电压的利用已经达到极限, 因此该阶段主要采用方波驱动电平实现弱磁控制^[11]。图 4 为不同的核心控制算法对应的磁链空间矢量运行轨迹, 分别为近似圆形轨迹、双折角三十边形轨迹、单折角十八边形轨迹以及正六边形轨迹。

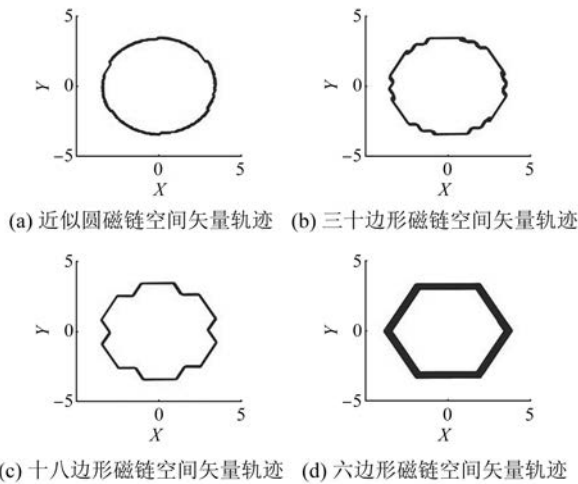


图4 不同多边形磁链轨迹直接转矩控制对应的磁链空间矢量运行轨迹

控制台与显示模块部分可以模拟司机控制台的手柄操作模式以及恒速控制模式,显示部分可以对网侧电压、电流、功率因数以及牵引电机转矩、列车运行速度等变量的检测结果予以显示。

2.2 牵引电传动系统模型仿真结果分析

将最高时速为 200 km/h 的某型号电力机车牵引电传动系统参数作为建模的输入参数,通过仿真对模型的输出特性进行分析。当模型启动仿真运行时,牵引电机在逆变器控制下,输出与给定牵引特性曲线相匹配的牵引力特性。

给定牵引力特性曲线与仿真所得牵引力特性曲线的对比如图 5 所示,给定牵引力特性曲线位于仿真所得牵引力曲线包络的中心位置。仿真所得牵引力特性相对给定牵引力特性的标准方差变化趋势如图 6 所示,在全速域范围内(0~200 km/h),仿真所得牵引力特性相对给定牵引力特性的平均标准方差为 0.072 1。图 5、图 6 的仿真结果说明在全速域范围内的仿真牵引力能够较好地匹配给定牵引力特性曲线,证明了仿真建模的准确性。

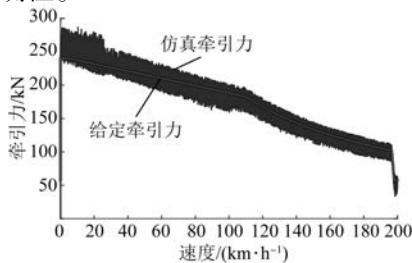


图5 给定牵引力与仿真牵引力对比

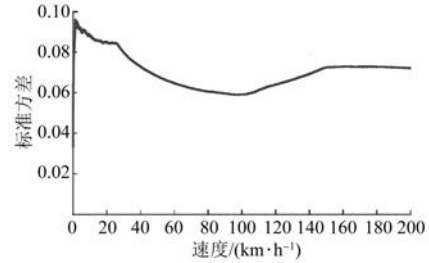


图6 仿真牵引力平均标准方差示意图

该型号电力机车牵引电传动系统模型的其他动力学特性、电气特性仿真结果如表 1 所示。根据仿真结果,输出参数均满足设计指标要求,证明了仿真结果的合理性。

表 1 某型号电力机车牵引电传动模型仿真结果与设计指标对比

| 参数名称 | 仿真结果 | 设计指标 |
|---|---------|-------|
| 机车功率因数 P_{t_train} | 0.999 3 | >0.98 |
| 等效谐波干扰电流 c_{emc}/A | 1.162 1 | <2.50 |
| 起动平均加速度 (0~40 km·h ⁻¹) $a_{init_40}/(m·s^{-2})$ | 0.372 8 | >0.37 |
| 全速域平均加速度 (0~200 km·h ⁻¹) $a_{all}/(m·s^{-2})$ | 0.297 0 | >0.22 |
| 200 km/h 剩余加速度(平直道) $a_{remain_200}/(m·s^{-2})$ | 0.107 3 | >0.05 |
| 牵引力相对给定值的平均标准方差 δ | 0.072 1 | <0.10 |

3 牵引电传动系统关键参数的自动寻优设计

3.1 自动寻优的输入输出参数

牵引电传动系统的变压器二次侧短路电感、变压器二次侧短路电阻、谐振电感、谐振电容、直流侧支撑电容等电气参数是影响中间直流环节的电压纹波特性的关键因素。其中,变压器二次侧短路电感、变压器二次侧短路电阻主要对中间直流环节电压的谐波成分及幅值具有影响^[12],而谐振电感、谐振电容主要抑制网侧电压二倍频成分对中间直流母线电压脉动幅值的影响^[13],直流侧支撑电容主要影响中间直流环节电压的平稳性。这 5 个参数的优化设计是电力机车牵引电传动系统设计中的重要环节,因此,将变压器二次侧短路电阻 R_{con} 、变压器二次侧短路电感 L_{con} 、谐振电容 C_{r2} 、谐振电感 L_{r2} 、直流侧支撑电容 C_d 作为优化设计变量。

根据实车设计要求,实车的全速域平均加速度、起动平均加速度、200 km/h 剩余加速度、等效谐波干扰电流、网侧功率因数应满足表 1 中的设计指标,因此将以上 5 种变量作为判断仿真结果是否合理有效的约束型输出变量。

在全速域范围内,整车的运行在牵引算法的控制下,遵循给定牵引力特性曲线运行,因此在全速域范围内,整车的实际牵引力特性曲线相对于给定牵引力特性曲线的平均标准方差是评判牵引力脉动幅值大小的直接标准。本文将仿真牵引力特性曲线相对给定牵引力特性曲线的平均标准方差作为比较优化结果的目标型输出变量。

3.2 DOE 仿真

DOE 作为数理统计学中的一个重要分支,在实际的工程与科研中有着非常广泛的应用,同时也是在产品开发、过程优化等方面运用非常广泛的统计方法之一。DOE 方法的用途很多,其中包括辨识关键的试验因子、确定最佳的参数组合以及研究输入与输出参数间的关系与趋势等。

基于某成熟的商业优化软件工具,针对原模型的 5 个设计输入变量开展 400 组 DOE 抽样仿真,获得一簇反映系统运行规律的仿真结果。其中仿真结果最优即牵引力相对给定值的平均标准方差最小的一组参数组合见表 2。

表 2 DOE 抽样仿真所得最优参数组合

| 参数名称 | 仿真结果 |
|-----------------------------|----------|
| 变压器二次侧短路电阻 R_{con}/Ω | 0.026 29 |
| 变压器二次侧短路电感 L_{con}/H | 0.002 52 |
| 谐振电容 C_{12}/F | 0.005 08 |
| 谐振电感 L_{12}/H | 0.000 50 |
| 直流侧支撑电容 C_d/F | 0.004 94 |

3.3 近似模型建立

近似模型的建立首先需要剔除样本库中的无效样本,其次对近似模型的近似方法、验证方法等进行相应的配置,最后得到能够反映牵引电传动系统模型输入输出映射关系的近似模型。为了比较各种方法所建立近似模型的精度,本文采用 12 种方法下的不同拟合函数,基于同样的 352 组样本建立近似模型(剔除了 18 组无效点),采用另外 30 组固定的样本对近似模型进行交叉验证。

表 3 以 30 组用于交叉验证的样本为验模基准,列出了 12 种近似模型输出变量与原模型输出变量之间的方差。表 3 中最后一列列出每种近似模型对应的输出变量方差的最大值。通过对比可知,响应面+四阶多项式拟合模型对应的 6 个输出变量的整体方差值最小,因此用该方法建立的近似模型精度最高。

表 3 12 种基于交叉验证的近似模型输出变量方差对比

| 建立近似模型方法 | a_{all} | a_{init_40} | a_{remain_200} | δ | i_{emc} | P_{f_train} | δ_{max} |
|-----------------|-----------|----------------|-------------------|----------|-----------|----------------|----------------|
| 克里金插值+高斯拟合 | 0.202 69 | 0.147 48 | 0.190 80 | 0.244 61 | 0.194 81 | 0.271 80 | 0.271 80 |
| 克里金插值+指数拟合 | 0.091 59 | 0.119 99 | 0.188 69 | 0.079 14 | 0.134 06 | 0.119 84 | 0.188 69 |
| 克里金插值+线性马特恩拟合 | 0.291 53 | 0.150 57 | 0.194 91 | 0.357 44 | 0.217 50 | 0.344 34 | 0.357 44 |
| 克里金插值+三次样条马特恩拟合 | 0.183 07 | 0.143 18 | 0.190 98 | 0.215 89 | 0.184 33 | 0.239 38 | 0.239 38 |
| 正交多项式+切比雪夫多项式拟合 | 0.096 63 | 0.112 68 | 0.220 16 | 0.112 82 | 0.162 84 | 0.136 61 | 0.220 16 |
| 正交多项式+迭代拟合 | 0.147 92 | 0.109 41 | 0.191 18 | 0.148 75 | 0.144 70 | 0.154 94 | 0.191 18 |
| 椭圆基向基拟合 | 0.076 47 | 0.125 12 | 0.212 99 | 0.007 02 | 0.140 84 | 0.095 18 | 0.212 99 |
| 径向基拟合 | 0.079 62 | 0.110 11 | 0.207 40 | 0.089 98 | 0.147 35 | 0.100 09 | 0.207 40 |
| 响应面+线性差值拟合 | 0.185 58 | 0.121 21 | 0.195 35 | 0.226 74 | 0.156 33 | 0.228 27 | 0.228 27 |
| 响应面+最小二乘拟合 | 0.108 16 | 0.106 01 | 0.190 06 | 0.113 95 | 0.144 43 | 0.141 13 | 0.190 06 |
| 响应面+三次样条插值拟合 | 0.099 54 | 0.109 22 | 0.182 21 | 0.101 68 | 0.146 12 | 0.143 47 | 0.182 21 |
| 响应面+四阶多项式拟合 | 0.100 54 | 0.106 90 | 0.179 01 | 0.099 72 | 0.144 18 | 0.146 42 | 0.179 01 |

3.4 基于近似模型开展全局寻优

针对近似模型采用多目标粒子群优化算法进行寻优,优化迭代 5 000 次,其中仿真结果最优即

牵引力相对给定值的平均标准方差最小的一组参数组合见表 4。

表 4 近似模型优化所得最优参数

| 参数名称 | 仿真结果 |
|-----------------------------|----------|
| 变压器二次侧短路电阻 R_{con}/Ω | 0.028 13 |
| 变压器二次侧短路电感 L_{con}/H | 0.002 34 |
| 谐振电容 C_{l2}/F | 0.005 32 |
| 谐振电感 L_{l2}/H | 0.000 46 |
| 直流侧支撑电容 C_d/F | 0.005 60 |

3.5 参数优化效果分析

将近似模型寻优后的最优参数仿真结果、该组最优参数代入牵引电传动系统原模型仿真的结果列入表 5 进行误差对比。

根据对比的结果可知采用近似模型进行寻优,全速域平均加速度、起动平均加速度、网侧功

率因数、牵引力相对给定值的平均标准方差这 4 项输出参数相对于牵引电传动系统原模型的误差均低于 1%,而 200 km/h 剩余加速度与等效谐波干扰电流这 2 项输出参数的误差率较大,分别为 16.820% 和 24.271%,但是这 2 项输出变量为约束型输出变量,而寻优之前已经对约束型变量的边界进行了限定,寻优后的约束型输出变量是符合实际设计指标的,因此这 2 项输出参数的误差率并不是判断近似模型拟合原模型精度的决定性指标。另一方面,仿真牵引力特性曲线与给定牵引力特性曲线方差作为目标型输出变量,是判断近似模型拟合原模型精度的决定性指标,其对应的低于 1% 的误差率证明了近似模型对原模型具有足够的拟合精度。

表 5 近似模型与原模型仿真精度对比

| 仿真类别 | 约束条件 | | | | | 优化目标 |
|---------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------|----------------|-----------|
| | $a_{all}/(m \cdot s^{-2})$ | $a_{init_40}/(m \cdot s^{-2})$ | $a_{remain_200}/(m \cdot s^{-2})$ | i_{emc}/A | P_{t_train} | δ |
| 近似模型寻优后的最优参数仿真 | 0.297 010 | 0.372 84 | 0.110 43 | 1.112 26 | 0.998 55 | 0.071 209 |
| 近似模型寻优后的最优参数代入原模型仿真 | 0.297 011 | 0.372 83 | 0.132 76 | 1.468 73 | 0.999 97 | 0.071 599 |

将牵引电传动系统原模型进行 DOE 抽样仿真的最优结果、近似模型寻优的结果、近似模型寻优后最优参数代入牵引电传动系统原模型仿真的结果进行优化率对比,如表 6 所示。

通过对比表 6 各仿真项可知,参数寻优后获

得了比原设计参数更优的输入参数组合,DOE 抽样仿真优化率达 1.041%,近似模型寻优仿真优化率达 1.285%,近似模型寻优后最优参数代入原模型仿真优化率达 0.744%。

表 6 不同模型的仿真优化率对比

| 仿真类别 | 设计变量 | | | | | 优化目标 | 优化率/ |
|---------------------|------------|---------|------------|-------------|------------------|-----------|-------|
| | C_{l2}/F | C_d/F | L_{l2}/H | L_{con}/H | R_{con}/Ω | δ | % |
| 原设计参数的原模型仿真 | 0.007 2 | 0.004 7 | 0.000 35 | 0.002 92 | 0.024 44 | 0.072 136 | - |
| DOE 抽样仿真 | 0.005 1 | 0.004 9 | 0.000 50 | 0.002 52 | 0.026 29 | 0.071 385 | 1.041 |
| 近似模型寻优后的最优参数仿真 | 0.005 3 | 0.005 6 | 0.000 46 | 0.002 34 | 0.028 13 | 0.071 209 | 1.285 |
| 近似模型寻优后的最优参数代入原模型仿真 | 0.005 3 | 0.005 6 | 0.000 46 | 0.002 34 | 0.028 13 | 0.071 599 | 0.744 |

此外,采用牵引电传动系统原模型进行一组参数仿真需要 2 h,而建立了近似模型后,基于近似模型进行全局寻优仿真只需要 0.2 h,极大提高了仿真效率,验证了采用近似模型进行全局寻优方法的效果。

4 结 语

为使电力机车牵引电传动系统参数匹配最

佳,本文对电力机车牵引电传动系统关键参数自动优化方法进行了研究。首先,建立了某型号电力机车牵引电传动系统的仿真模型,仿真结果满足设计指标,证明了建模的准确性及合理性;其次,针对原模型开展 DOE 抽样仿真,获得一簇反映系统运行规律的仿真结果,基于仿真结果建立了映射系统输入参数与输出特性的近似模型;再次,基于近似模型采用多目标粒子群优化算法进

行寻优,获得了优化的设计参数;最后,以原设计参数的仿真结果为对照,DOE 抽样仿真优化率达 1.041%,近似模型寻优仿真优化率达 1.285%,近似模型寻优后最优参数代入原模型仿真优化率达 0.744%,均实现了对原设计参数的优化,验证了采用近似模型进行全局寻优方法的效果。

综上所述,本文所提方法对于牵引电传动系统参数匹配的优化具有积极的意义,以建立近似模型的方式代替原模型进行仿真优化能够在兼顾仿真精度的前提下,实现较高的仿真效率。本文所提方法对于牵引电传动系统的高效率仿真将起到促进作用。

【参考文献】

- [1] 齐健. 西门子 Xcelerator:以工业数字化思维加速创新[J]. 智能制造,2020(10): 22.
- [2] 刘振明,邵利民,欧阳光耀. 基于近似模型的共轨柴油机喷射系统参数优化研究[J]. 内燃机工程,2011,32(6): 63.
- [3] 余佳衡,程相,孟焱,等. 功率分流式混合动力系统参数匹配优化研究[J]. 现代制造工程,2021(9): 33.
- [4] 盛精,潘迎春,王志敏,等. XMQ6838Y 客车动力总成悬架系统参数的优化设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2020,41(3): 292.
- [5] 肖乾,程玉琦,罗佳文,等. 车辆/轨道耦合作用下高速列车车轮振动影响灵敏度分析[J]. 交通运输工程学报,2021,21(6): 160.
- [6] 任宝珠,王乃福,周鹏. 几种和谐型电力机车牵引变流器主电路对比分析与研究[J]. 铁道机车与动车,2020(3): 24.
- [7] 范文进,郑琼林,杨中平,等. 基于对称多边形平滑磁链轨迹的直接转矩控制算法[J]. 电机与控制学报,2016,20(7): 32.
- [8] 廖永衡,冯晓云,王珍. 低开关频率下基于直接自控制的谐波抑制方法[J]. 电工技术学报,2012,27(8): 126.
- [9] 张靖,冯晓云,葛兴来. 异步牵引电机全速域直接转矩控制仿真研究[J]. 电气传动,2013,43(1): 3.
- [10] 廖永衡. 电力牵引传动系统直接转矩控制若干关键问题研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.
- [11] 周明磊. 电力机车牵引电机在全速度范围的控制策略研究[D]. 北京:北京交通大学,2013.
- [12] 郭其灏. 机车车辆牵引变压器谐波模型研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.
- [13] 章予曦. 混合动力动车组二次脉动问题研究[D]. 北京:北京交通大学,2021.

[主要栏目]

- 控制与应用技术
- 研究与设计
- 故障诊断与保护
- 新能源发电与局域电网
- 新能源汽车技术
- 发电机组及其控制
- 测试技术与测控系统
- 材料与工艺
- 电机生产及质量管理
- 电力电子变流器技术
- 智能制造
- 节能应用
- 实用技术成果