

车辆混合动力系统不确定性传播与参数优化*

王婷婷¹ 陈潇凯¹ 林逸²

(1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 北京汽车研究总院, 北京 100021)

摘要: 根据混合动力车辆的工作特性,对不确定下车辆混合动力系统参数优化的多学科设计优化方法进行研究。采用蒙特卡罗仿真估计车辆混合动力系统输入参数的不确定性对系统性能的影响;采用物理规划法构造系统性能目标的综合偏好函数和约束来满足实际需求与设计偏好;利用目标分流法对车辆混合动力系统的参数优化问题进行层次分解及协同优化。最终方案不仅使混合动力系统的功率匹配更加满足设计偏好,还使系统的设计参数达到最优配置。

关键词: 车辆 混合动力系统 多学科设计优化 不确定性传播 目标分流法 参数优化

中图分类号: U462.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)08-0021-06

Uncertainty Propagation and Parameter Optimization of Power System in Hybrid Electric Vehicle

Wang Tingting¹ Chen Xiaokai¹ Lin Yi²

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. Beijing Automotive Technology Center, Beijing 100021, China)

Abstract: According to the working characteristic of hybrid electric vehicle (HEV) in different conditions, the multidisciplinary design optimization (MDO) method in parameter optimization of power system of HEV under uncertainty was studied. To estimate the impact of uncertain input parameters on objectives of drive power system by performing the Monte Carlo simulation. The aggregate preference function of objectives and corresponding constraint equation were constructed to satisfy the designers' preference and engineering design. The power system parameters were optimized by using analytical target cascading (ATC) method which could hierarchically decompose and collaboratively optimize the system. The results showed that the values of vehicle's performance and the power system design could be optimized currently.

Key words: Vehicle Hybrid power system Multidisciplinary design optimization Uncertainty propagation Analytical target cascading Parameter optimization

引言

在车辆的整个寿命中有许多不确定因素影响其性能。首先,在概念设计阶段,由于设计人员对产品性能要求的模糊表述使得产品设计方案决策与评价出现偏差;其次,在仿真过程中由于使用近似技

术、缺乏数据及信息的不完全,特别是使用先进却不太完善的优化设计技术时,建立的多目标多学科层级式优化模型显示出不确定性。再次,在制造过程中,即将开发设计变成实际产品时,加工参数为不确定的。最后,在车辆运行过程中,环境的不确定性,如温度、湿度和地面不平度等。

收稿日期: 2012-06-08 修回日期: 2012-06-20

* 国家自然科学基金资助项目(50905017)

作者简介: 王婷婷, 博士生, 主要从事车辆总体理论与现代设计研究, E-mail: wangtt97@126.com

通讯作者: 林逸, 教授, 博士生导师, 主要从事车辆总体理论与现代设计研究, E-mail: linyi@bjev.com.cn

本文以某型并联式混合动力车辆作为对标车型进行研究,首先对不确定性在其混合动力系统中的传播以及对系统性能响应估计的影响进行研究;其次根据对标分析和用户需求重新对混合动力系统的功率进行匹配,并以此为依据确定新车型的发动机和驱动电动机的设计参数。

1 混合动力系统参数的不确定性传播

如图 1 所示,车辆混合动力系统的不确定性体现在不能精确表述和量化产品寿命中车辆状态的不完全信息^[1]。例如,不同的轮胎/路面的相互作用(不同的道路状况和/或轮胎充气压力引起的变化)引起滚动阻力系数的随机性;变化的车厢结构导致整车质量、风阻系数和迎风面积等参数的随机性;由于缺乏准确的参数信息和整个运行过程中的变化引起传动效率的随机性。因此,在整个车辆运行寿命中,将整车质量、传动效率、滚动阻力系数、风阻系数和迎风面积表述为随机变量,它们导致发动机和电动机并联工作时的总体输出功率呈现随机状态,进而影响了车辆在行驶中的动力性要求。

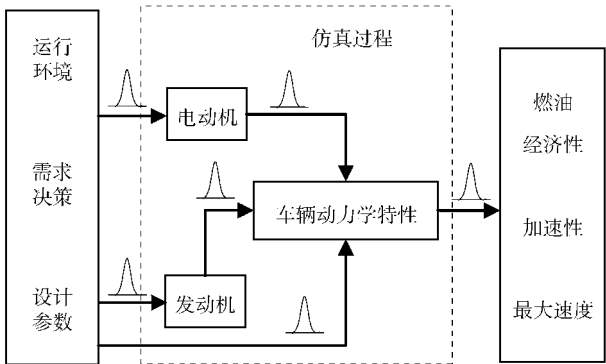


图 1 车辆混合动力系统的不确定性传播
Fig. 1 Uncertainty propagation in power system of HEV

首先对发动机和电动机在不同工况下单独工作时不确定性的传播进行仿真。

1.1 发动机系统参数的不确定性传播

根据某型并联式混合动力车辆的使用条件,发动机的最大功率满足以下动力性要求:发动机单独驱动时应达到最高车速 120 km/h(工况 1);发动机单独驱动车辆能以 60 km/h 的车速爬 15% 的坡道(工况 2)。

在水平良好路面上以 120 km/h 匀速行驶时,发动机的功率为

$$P_{e1} = \frac{1}{3\,600\eta_T} \left(m g f u_e + \frac{C_d A u_e^3}{21.15} \right) \quad (1)$$

在 15% 的坡道上以 60 km/h 的车速匀速行驶时,发动机功率为

$$P_{e2} = \frac{1}{3\,600\eta_T} \left(m g f u_{e-p} \cos\alpha + \frac{C_d A u_{e-p}^3}{21.15} + m g u_{e-p} \sin\alpha \right) \quad (2)$$

式中 P_{e1} ——发动机在工况 1 的最大功率,kW
 P_{e2} ——发动机在工况 2 的最大功率,kW
 η_T ——传动效率 m ——整车整备质量,kg
 g ——重力加速度,m/s²
 f ——滚动阻力系数(路面类型为良好的沥青或混凝土路面)
 u_e ——车辆在工况 1 的行驶速度,km/h
 u_{e-p} ——车辆在工况 2 的行驶速度,km/h
 α ——坡度角,(°) C_d ——风阻系数
 A ——迎风面积,m²

假定 5 个随机变量服从正态分布^[2]。随机变量的容差用其均值的相对值表示。表 1 给出工况 1 和工况 2 中不确定性变量的均值与容差。本文中,容差规定为标准偏差的 3 倍,此时随机变量的置信度为 99.865%。

表 1 随机变量的均值与容差
Tab.1 Mean value and tolerance of random variables

类别	整车整备质量/kg	传动效率/%	风阻系数	迎风面积/m ²	滚动阻力系数
均值	1 560	90	0.31	2.1	0.012
容差/%	±10	±5	±5	±5	±15

根据随机变量的分布对随机变量进行采样,运行 100 万次蒙特卡洛^[3]模拟可以得到输入变量的不确定性在仿真过程中传播对发动机输出功率估计的影响。

发动机在工况 2 下功率达到最大,因此对工况 2 中的不确定性传播进行仿真分析。图 2 为 P_{e2} 的概率密度分布以及与之相接近的密度曲线,图 3 是概率分布的正态性检验。

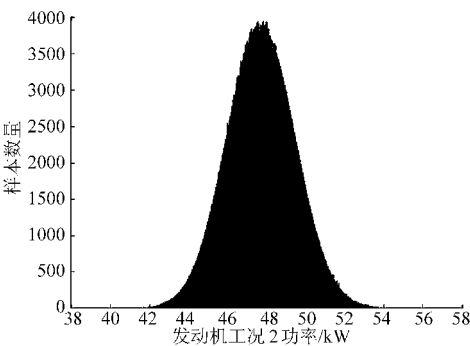


图 2 P_{e2} 的概率密度分布及与之相接近的密度曲线
Fig. 2 Probability density distribution of P_{e2}

由图 3 可以看出,这 100 万个离散点非常靠近倾斜直线段,图形为线性的,因此可以得出: P_{e2} 的概

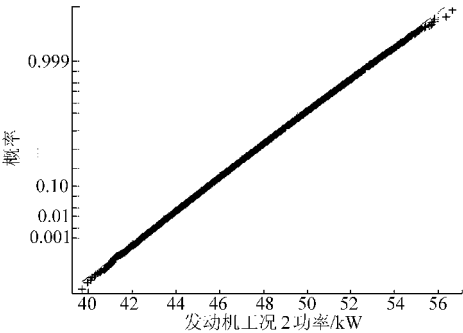


图 3 正态性检验

Fig. 3 Normality test

率密度分布近似服从正态分布,即: $\mu_{Pe_2}=47.665\ 1$,
 $\sigma_{Pe_2}=1.725\ 6$,容差与均值之比($3\sigma_{Pe_2}/\mu_{Pe_2}$)为
10.86%。

由图 2 可以看出:当设计变量为随机变量服从正态分布时,经过仿真过程的传播,发动机系统响应 P_{e2} 的概率密度分布存在一定的规律,均呈近似正态分布。 P_{e2} 的容差限与均值的相对值为 10.86%,此工况下发动机功率的容差限与均值的相对值较大,显示出不确定性在非线性模型中的传播对系统响应的偏差影响较大。并且,在不确定性因素的影响下,发动机最大功率变化范围在 $[47.5,57.8]$ (kW),远大于实际工作情况允许发动机最大功率的变化范围,这意味着发动机会处于极端工作状态,对发动机和混合动力系统的可靠性和寿命不利。发动机的额定功率为 52.5 kW (考虑负载 5 kW),当工况 2 时(图 2),发动机功率的分布超出了额定功率,即在某些工况中,在负载正常工作的情况下,发动机单独驱动时其功率无法满足以 60 km/h 的车速爬 15% 的坡道这一动力性要求,或者是要牺牲负载来满足动力性要求。

1.2 电动机系统参数的不确定性传播

根据并联式混合动力车辆的使用条件,驱动电动机的额定功率满足以下动力性要求:驱动电动机单独驱动时行驶的巡航车速应达到 75 km/h (工况 3);驱动电动机单独驱动车辆以 30 km/h 的车速爬 15% 的坡道 (工况 4)。

在水平良好路面上以 75 km/h 匀速行驶时,电动机的功率为

$$P_{m1}=\frac{1}{3\ 600\eta_r}\left(mgfu_m+\frac{C_dAu_m^3}{21.15}\right)\tag{3}$$

在 15% 的坡道上以 30 km/h 的车速匀速行驶时,电动机的功率为

$$P_{m2}=\frac{1}{3\ 600\eta_r}\left(mgfu_{m-p}\cos\alpha+\frac{C_dAu_{m-p}^3}{21.15}+mgu_{m-p}\sin\alpha\right)\tag{4}$$

式中 P_{m1} ——电动机在工况 3 的功率,kW
 P_{m2} ——电动机在工况 4 的功率,kW
 u_m ——车辆在工况 3 的行驶速度,km/h
 u_{m-p} ——车辆在工况 4 的行驶速度,km/h

同发动机系统的不确定性传播相类似,将传动效率、整车整备质量、滚动阻力系数、风阻系数、迎风面积定义为随机变量,且服从正态分布,如表 1 所示。根据随机变量的分布对随机变量进行采样,运行 100 万次蒙特卡洛模拟可以得到输入变量的不确定性在仿真过程中的传播对电机输出功率的估计的影响。

同样地,电动机在工况 4 下功率达到最大,因此,对工况 4 中的不确定性传播进行仿真分析,结果如图 4~5 所示。

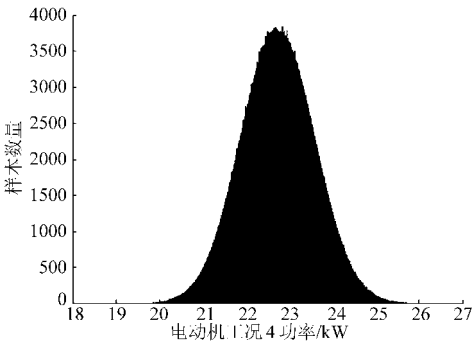


图 4 P_{m2} 的概率密度分布及与之相接近的密度曲线

Fig. 4 Probability density distribution of P_{m2}

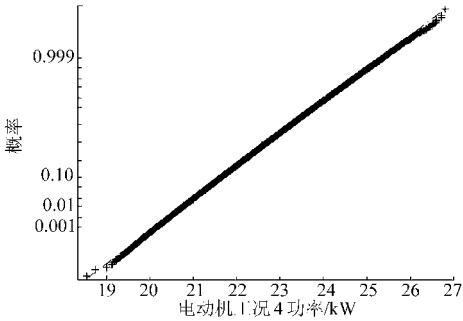


图 5 正态性检验

Fig. 5 Normality test

由图 5 可以看出,这 100 万个离散点非常靠近倾斜直线段,图形为线性的,以此,可以得出 P_{m2} 的概率密度分布近似服从正态分布,即 $\mu_{Pm_2}=22.706\ 3$,
 $\sigma_{Pm_2}=0.839\ 0$,容差与均值比($3\sigma_{Pm_2}/\mu_{Pm_2}$)为
11.1%。

由图 4 可以看出,当设计变量为随机变量服从正态分布时,经过仿真过程的传播,驱动电动机系统响应 P_{m2} 的概率密度分布存在一定的规律,呈近似正态分布。 P_{m2} 的容差限与均值的相对值为 11.1%,此工况下电机功率的容差限与均值的相对值较大,显示出不确定性在非线性模型中的传播对

系统响应的偏差影响较大。并且,在不确定性因素的影响下,驱动电动机最大功率的变化范围在[25.2,30.2](kW),远大于实际工作情况允许驱动电动机最大功率的变化范围,这意味着驱动电动机处于极端工作状态,对驱动电动机和混合动力系统的可靠性和寿命不利。电动机的额定功率为28 kW(考虑负载5 kW),当工况4时,如图4所示,电动机功率的分布超出了额定功率,即在某些工况中,在负载正常工作的情况下,电动机单独工作时其功率无法满足以30 km/h的车速爬15%的坡道这一动力性要求,或者是要牺牲负载来满足动力性要求。

2 混合动力系统参数优化

混合动力车辆的动力系统有两种能量来源:发动机驱动和电动机驱动。在实际工况中,混合动力

车辆的负载功率随着工况的变化而改变。此负载功率由两部分组成^[4]:一是相对稳定的平均功率,它近似为定值;二是具有零平均功率的动态功率。混合动力系统进行动力分配时一般为发动机满足稳态需求功率,驱动电动机提供动态功率。因此车辆混合动力系统匹配的关键是确定满足设计者要求的发动机功率与驱动电动机功率。

2.1 多目标决策

对混合动力系统匹配进行决策的问题可视为多目标优化问题。采用物理规划法^[5~6]对决策不确定的多目标优化问题进行求解,最终获得最优解。设置发动机和电动机功率的偏好区间^[7]如表2所示。

根据文献[8]中的公式计算各个区间点偏好值;对偏好区间的边界值进行规范化处理;采用多项式函数对区间点的偏好值进行拟合,拟合曲线如图6所示。

表 2 发动机和电动机功率的偏好区间

Tab.2 Preference range of engine power and motor power

kW

设计目标	非常不期望	不期望	可容忍	期望	非常期望	期望	可容忍	不期望	非常不期望
发动机功率 P_e					47.5	49.72	53.4	55.9	57.8
电动机功率 P_m	25.2	25.82		27.45	28.45		30.2		

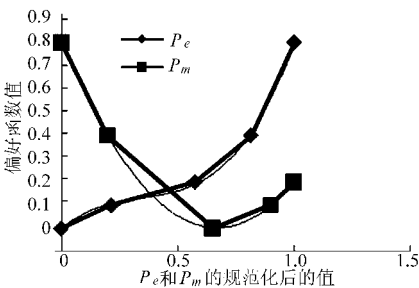


图 6 P_e 和 P_m 的偏好拟合曲线

Fig.6 Preference fitting curves of P_e and P_m

拟合曲线函数为

$$f_1 = -0.002\,2 + 0.852P_e - 2.050\,6P_e^2 + 1.997P_e^3$$
(5)

$$f_2 = 0.8 - 2.4P_m + 1.8P_m^2$$
(6)

因此,发动机与电动机功率匹配的优化问题可描述为提高设计者对发动机功率和电动机功率满意度的问题

$$\min F = \frac{1}{2}(f_1 + f_2) = -0.002\,2 + 0.852P_e - 2.050\,6P_e^2 + 1.997P_e^3 + 0.8 - 2.4P_m + 1.8P_m^2$$
(7)

其中

$$P_e = \frac{1}{3\,600\eta_T} \left(mgfu_e \cos\alpha_e + \frac{C_d A u_e^3}{21.15} + mg u_e \sin\alpha_e \right)$$
$$P_m = \frac{1}{3\,600\eta_T} \left(mgfu_m \cos\alpha_m + \frac{C_d A u_m^3}{21.15} + mg u_m \sin\alpha_m \right)$$

s. t. $47.5 \leq P_e \leq 57.8$ $25.2 \leq P_m \leq 30.2$
 $0.855 \leq \eta_T \leq 0.945$ $1.995 \leq A \leq 2.205$
 $0.01 \leq f \leq 0.014$ $1\,404 \leq m \leq 1\,716$
 $0.294\,5 \leq C_d \leq 0.325\,5$

2.2 多学科设计优化

混合动力系统功率匹配的多目标优化问题包含一个顶层系统优化问题:提高设计者满意度;两个子系统优化问题:发动机参数优化和电动机参数优化。采用广泛应用的多学科设计优化方法——目标分流法可同时求解混合动力系统的功率匹配与参数优化问题。

目标分流法 (Analytical target cascading, ATC) 是 Michelena 等^[9]于1999年提出的基于部件的分级优化方法,其级数不受限制,可以根据需要选择合适的级数,自上而下称为系统级、一级子系统和二级子系统等。它以系统的各个部件为标准进行分解,分解后为树形结构^[10],结构节点称为单元,包括设计模型和分析模型,如图7所示。设计模型调用分析模型来计算元素的响应。ATC方法中的设计模型可以调用多个分析模型。如果一个设计模型中有多个分析模型,且这些分析模型互相耦合,则可以使用其他MDO算法对分析模型进行协调^[10]。

原始设计优化问题的系统层的一般性ATC公式表述^[11]为

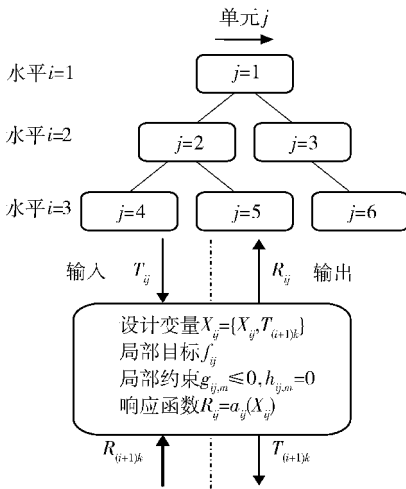


图 7 目标分流法的流程

Fig. 7 Design flow of analytical target cascading

$$\min_x \| \mathbf{r}(\mathbf{x}) - \mathbf{T} \| + \varepsilon_R + \varepsilon_y$$

$$\text{s. t. } \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0$$

式中 $\mathbf{T}$ ——目标矢量 $\mathbf{r}$ ——目标响应函数矢量
 $\mathbf{x}$ ——设计变量矢量

$\mathbf{g}, \mathbf{h}$ ——不等式约束函数和等式约束函数

$\| \|$ ——范数(通常是 2-范数)

ε_R ——目标值与响应之间的偏差

ε_y ——联系变量目标值与响应之间的偏差

将 2.1 节中的单层的优化问题转换为一个 2 层的改进的 ATC 问题,其中底层有两个单元。

系统层 0(设计者的满意度)优化模型,其中 m 、 η_T 、 f 、 A 、 C_d 为子系统层共享变量,则有

$$\min F = \frac{1}{2}(f_1 + f_2) + \varepsilon = -0.0022 + 0.852P_{e0} - 2.0506P_{e0}^2 + 1.997P_{e0}^3 + 0.8 - 2.4P_{m0} + 1.8P_{m0}^2 + \varepsilon$$

$$(9)$$

$$\text{s. t. } P_{e0} + P_{m0} = 80 \quad \| P_{e0} - P_{e1} \| - \varepsilon \leq 0$$

$$\| P_{m0} - P_{m1} \| - \varepsilon \leq 0$$

$$\frac{1}{2}(\| m_0 - m_{11} \| + \| m_0 - m_{12} \|) - \varepsilon \leq 0$$

$$\frac{1}{2}(\| A_0 - A_{11} \| + \| A_0 - A_{12} \|) - \varepsilon \leq 0$$

$$\frac{1}{2}(\| C_{d0} - C_{d11} \| + \| C_{d0} - C_{d12} \|) - \varepsilon \leq 0$$

$$\frac{1}{2}(\| f_0 - f_{11} \| + \| f_0 - f_{12} \|) - \varepsilon \leq 0$$

$$\frac{1}{2}(\| \eta_{T0} - \eta_{T11} \| + \| \eta_{T0} - \eta_{T12} \|) - \varepsilon \leq 0$$

$$47.5 \leq P_e \leq 57.8 \quad 25.2 \leq P_m \leq 30.2$$

子系统 1(发动机功率)的优化模型为

$$\min \| P_{e1} - P_{e0} \| + \| m_{11} - m_0 \| + \| \eta_{T11} - \eta_{T0} \| + \| f_{11} - f_0 \| + \| A_{11} - A_0 \| + \| C_{d11} - C_{d0} \| \quad (10)$$

分析模型为

$$P_{e1} = \frac{1}{3600\eta_{T1}} \left(m_{11} g f_{11} u_e \cos \alpha_e + \frac{C_{d11} A_{11} u_e^3}{21.15} + m_{11g} u_e \sin \alpha_e \right)$$

$$\text{s. t. } 0.855 \leq \eta_{T1} \leq 0.945 \quad 1.995 \leq A_{11} \leq 2.205$$

$$0.01 \leq f_{11} \leq 0.014 \quad 1404 \leq m_{11} \leq 1716$$

$$0.2945 \leq C_{d11} \leq 0.3255$$

子系统 2(电动机功率)的优化模型为

$$\min \| P_{m1} - P_{m0} \| + \| m_{12} - m_0 \| + \| \eta_{T12} - \eta_{T0} \| + \| f_{12} - f_0 \| + \| A_{12} - A_0 \| + \| C_{d12} - C_{d0} \| \quad (11)$$

分析模型为

$$P_{m1} = \frac{1}{3600\eta_{T2}} \left(m g f_{12} u_m \cos \alpha_m + \frac{C_{d12} A_{12} u_m^3}{21.15} + m g u_m \sin \alpha_m \right)$$

$$\text{s. t. } 0.855 \leq \eta_{T12} \leq 0.945 \quad 1.995 \leq A_{12} \leq 2.205$$

$$0.01 \leq f_{12} \leq 0.014 \quad 1404 \leq m_{12} \leq 1716$$

$$0.2945 \leq C_{d12} \leq 0.3255$$

基于目标分流法的优化设计框架,在 iSIGHT 软件环境中建立优化流程^[12],对设计变量和设计参数设置初始值。针对各个层级的优化模型,调用其相应的分析模型^[13]。图 8 显示了优化问题在 iSIGHT 软件中的模块设计与数据传递的流向。

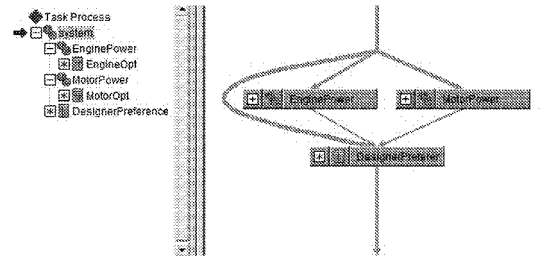


图 8 iSIGHT 软件中的模块优化设计与数据流向

Fig. 8 Module design and data flow in iSIGHT

在整个优化设计框架中,针对不同层级的优化特点采用不同的优化算法。系统层问题的优化对初始值的敏感程度较低,适宜采用全局优化算法;子系统层问题的优化对初始值的敏感程度较高,宜采用局部优化算法。采用组合式优化算法^[14],先粗略筛选,后精细梯度搜索寻优,不仅可以减少计算成本,还可以保证优化结果的有效性。针对车辆混合动力系统的功率匹配与参数优化问题,在系统层采用多岛遗传算法,在子系统层采用序列二次规划算法,优化计算的结果如表 3 所示。

表 3 为优化前后发动机和电动机的功率及设计参数的对比。由此可以看出,优化前发动机功率在可容忍域内,电动机功率落在期望域内;优化后发动机功率调整到期望域,而电机功率则接近非常期望

表 3 优化结果
Tab.3 Optimization results

项目	P_e /kW	P_m /kW	m /kg	η_r	f	A/m^2	C_d
优化前	52.5	28.0	1 560	0.900	0.012 0	2.10	0.31
优化后	51.5	28.5	1 520	0.915	0.011 6	2.13	0.32

点。经过优化,调整了设计参数以获得车辆混合动力系统的功率匹配更好地满足设计者的偏好要求。

3 结束语

首先采用 100 万次蒙特卡罗仿真估计发动机系

统和电动机系统的不确定性传播,定量地表述了设计变量的不确定性对系统性能响应(输出功率)的不确定性估计的影响,进而得到对系统可靠性设计的影响。而后,使用物理规划法与目标分流法相结合的优化方法对混合动力系统的功率匹配与参数优化问题进行了求解。这一综合方法既包含物理规划处理多个相互冲突的设计目标的灵活机制,又体现了目标分流法所提供的分解多层次多学科设计优化问题的能力。协同寻优不仅获得了更加满足设计者偏好的发动机和驱动电动机的功率,还得到混合动力系统的最优设计方案。

参 考 文 献

1 Charles D Mcallister. Uncertainty propagation in multidisciplinary design optimization [D]. University Park, PA: The Pennsylvania State University, 2002.

2 陈立周. 稳健设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 13 ~ 18.

3 Jin Ruichen, Chen Wei, Sudjianto A. On sequential sampling for global metamodeling in engineering design [C] // ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2002, 2:539 ~ 548.

4 伊海霞. 混合动力商用车系统设计与分析研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009:9 ~ 26.

Yi Haixia. Drivetrain system design and analysis for hybrid electric commercial vehicle [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009: 9 ~ 26. (in Chinese)

5 Messac A. Physical programming: effective optimization for computational design [J]. AIAA Journal, 1996, 34(1) : 149 ~ 158.

6 王允良,李为吉. 物理规划方法及其在飞机方案设计中的应用[J]. 航空学报,2005, 26(5) : 562 ~ 565.

Wang Yunliang, Li Weiji. Physical programming and its application in aircraft concept design [J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(5) : 562 ~ 565. (in Chinese)

7 王伟,王庆年,初亮,等. 混合动力汽车驱动电动机性能评价体系研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8) : 20 ~ 25.

Wang Wei, Wang Qingnian, Chu Liang, et al. Evaluation regime of traction motor for hybrid electric vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8) : 20 ~ 25. (in Chinese)

8 Messac A, Gupta S, Akbulut B. Linear physical programming: a new approach to multiple objective optimization [J]. Transactions on Operational Research, 1996, 8(10) : 39 ~ 59.

9 Michelena N, Kim H M, Papalambros P Y. A system partitioning and optimization approach to target cascading [C] // Proceedings of the 12th International Conference on Engineering Design, Munich, Germany, 1999.

10 Kim H M. Target cascading in optimal system design [D]. Michigan: University of Michigan, 2001.

11 Michelena N, Park H, Papalambros P Y. Convergence properties of analytical target cascading [J]. AIAA Journal, 2003, 41 (5) : 897 ~ 905.

12 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 170 ~ 186.

13 李剑锋,汪建兵,林建军,等. 机电系统联合仿真与集成优化[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 163 ~ 177.

14 陈潇凯,陈勇,林逸. 目标分流法理论及其在汽车开发中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(6) : 515 ~ 519.

Chen Xiaokai, Chen Yong, Lin Yi. Theory and application of analytical target cascading in automobile product development [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(6) : 515 ~ 519. (in Chinese)