



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110442923 A

(43)申请公布日 2019. 11. 12

(21)申请号 201910636632.X

(22)申请日 2019.07.15

(71)申请人 华中科技大学

地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路
1037号

(72)发明人 高亮 李伟 李整 肖蜜 张严
宋亚楠 李培根

(74)专利代理机构 华中科技大学专利中心
42201

代理人 曹葆青 李智

(51)Int.Cl.

G06F 17/50(2006.01)

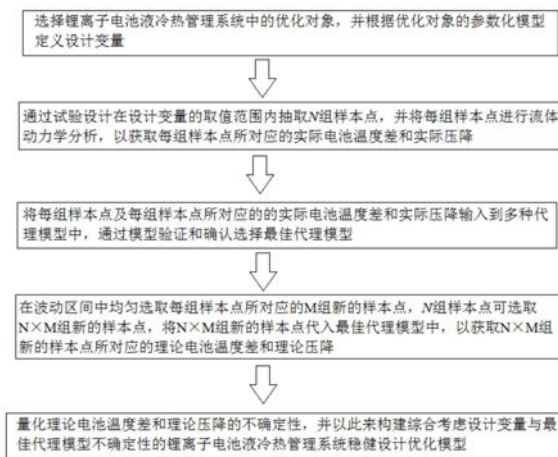
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54)发明名称

一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计
优化方法

(57)摘要

本发明属于机械产品的多学科设计优化技术领域,并具体公开了一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法。包括以下步骤:选择锂离子电池液冷热管理系统中的优化对象,并定义设计变量;抽取N组样本点,并获取每组样本点所对应的实际电池温度差和实际压降;通过模型验证和确认选择最佳代理模型;设定每组样本点的波动区间,在该波动区间中均匀选取每组样本点所对应的M组新的样本点;量化N×M组新的样本点所对应的理论电池温度差和理论压降的不确定性。本发明解决了传统设计方法中人为忽略参数和代理模型不确定因素导致设计结果不稳健,以此来获取锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法,从而提高锂离子电池产品的性能。



1. 一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1选择锂离子电池液冷热管理系统中的优化对象,并根据优化对象的参数化模型定义设计变量;

S2通过试验设计在设计变量的取值范围内抽取N组样本点,并将每组样本点进行流体力学分析,以获取每组样本点所对应的实际电池温度差和实际压降;

S3将每组样本点及每组样本点所对应的实际电池温度差和实际压降输入到多种代理模型中,通过模型验证和确认选择最佳代理模型;

S4设定每组样本点的波动区间,在该波动区间中均匀选取每组样本点所对应的M组新的样本点,N组样本点可选取 $N \times M$ 组新的样本点,将 $N \times M$ 组新的样本点代入最佳代理模型中,以获取 $N \times M$ 组新的样本点所对应的理论电池温度差和理论压降;

S5量化 $N \times M$ 组新的样本点所对应的理论电池温度差和理论压降的不确定性,并以此来构建综合考虑设计变量与最佳代理模型不确定性的锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化模型。

2. 根据权利要求1所述的一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法,其特征在于,步骤S1中,所述优化对象为锂离子电池液冷热管理系统中的冷却板,所述设计变量包括冷却板厚度 d_1 、冷却板流到间距 d_2 、冷却板流道与边缘水平间距 d_3 、冷却板流道与边缘垂直间距 d_4 以及流经冷却板的冷却液质量流量 v 。

3. 根据权利要求1所述的一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法,其特征在于,步骤S2中,所述试验设计所采用的方法为拉丁超立方抽样法。

4. 根据权利要求1所述的一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法,其特征在于,步骤S3中,所述代理模型包括多项式响应面模型、径向基函数模型和Kriging模型。

5. 根据权利要求1所述的一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法,其特征在于,步骤S3中,所示模型验证和确认采用模型保证度预测估计方法。

6. 根据权利要求1所述的一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法,其特征在于,步骤S4中,所述波动区间的范围为 $-0.1 \sim 0.1$ 。

7. 根据权利要求1所述的一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法,其特征在于,步骤S4中,采用蒙特卡洛仿真方法在该波动区间中均匀选取每组样本点所对应的M组新的样本点。

8. 根据权利要求1-7任一项所述的一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法,其特征在于,步骤S5中,量化 $N \times M$ 组新的样本点所对应的理论电池温度差和理论压降的不确定性的模型为:

$$\begin{cases} \mu_{TD} = \mu[\hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_1^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_1^M), \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_2^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_2^M), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_N^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_N^M)] \\ \mu_{\Delta p} = \mu[\hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_1^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_1^M), \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_2^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_2^M), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_N^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_N^M)] \\ s_{TD} = s[\hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_1^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_1^M), \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_2^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_2^M), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_N^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_N^M)] \\ s_{\Delta p} = s[\hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_1^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_1^M), \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_2^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_2^M), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_N^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_N^M)] \end{cases}$$

式中, μ_{TD} 为 $N \times M$ 组新的样本点所对应的理论电池温度差的均值, $\mu_{\Delta p}$ 为 $N \times M$ 组新的样本点所对应的理论压降的均值, s_{TD} 为 $N \times M$ 组新的样本点所对应的理论电池温度差的标准

差, $s_{\Delta p}$ 为 $N \times M$ 组新的样本点所对应的理论压降的标准差, \hat{f}_{TD} 为最佳代理模型的电池温度差输出函数, $\hat{f}_{\Delta p}$ 为最佳代理模型的压降输出函数, μ 为均值函数, s 为标准差函数。

9. 根据权利要求8所述的一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法, 其特征在于, 步骤S5中, 所述综合考虑设计变量与最佳代理模型不确定性的锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化模型为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{find } \mathbf{x} = [d_1, d_2, d_3, d_4, v] \\ \text{min } \mu_{TD} + k s_{TD} \\ \text{s.t. } g = \mu_{\Delta p} - 500 + k s_{\Delta p} \leq 0 \\ \quad 1.00 \leq d_1 \leq 1.50, \\ \quad 2.00 \leq d_2 \leq 5.00 \\ \quad 5.00 \leq d_3 \leq 15.00, \\ \quad 2.00 \leq d_4 \leq 5.00 \\ \quad 0.2 \leq v \leq 2.0 \end{array} \right.$$

式子中, g 优化设计约束条件, k 为权重因子。

10. 根据权利要求9所述的一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法, 其特征在于, 所述 k 的取值范围为 $1 \sim 3$ 。

一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法

技术领域

[0001] 本发明属于机械产品的多学科设计优化技术领域,更具体地,涉及一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法。

背景技术

[0002] 锂离子电池是一种二次电池(充电电池),它主要依靠锂离子在正极和负极之间移动来工作。在充放电过程中, Li^+ 在两个电极之间往返嵌入和脱嵌:充电时, Li^+ 从正极脱嵌,经过电解质嵌入负极,负极处于富锂状态;放电时则相反。作为纯电动汽车唯一动力源的电池包,在电动车运行过程中,锂离子电池因自身不断充放电引发化学反应而持续产热;累积的热量使电池包温度不断上升,如果不能实现有效的降温,电池容量将会降低,同时也会带来寿命的大幅度缩减;过高的温度甚至会引发电池组热失控,导致漏液、起火、爆炸等安全问题。因此,电动汽车动力电池包散热系统设计是保证动力电池正常工作的重要环节,也是目前制约新能源汽车发展的关键因素之一。

[0003] 动力电池包散热系统一般采用气体冷却(包括自然冷却和强制对流)、液体冷却、相变材料冷却等方式。气体冷却适用于大型巴士等对散热效率要求不高的场合,液体冷却适用于中小型轿车等结构紧凑、单位体积发热功率高的场合,而相变材料冷却目前在现有的车型中的应用并不成熟。其中,液体冷却具有散热速度快、温度分布均衡等优点,应用前景非常广泛。

[0004] 然而目前对设计变量和参数、目标函数、约束条件和仿真模型等均视为确定性的。然而在实际工程中,不确定性因素广泛存在于复杂系统的整个生命周期中,例如一批零件的几何尺寸、一批材料的特性(如弹性模量、许用应力等)通常都不是一个定值,而是在一定范围内变化。以及假设或简化引起的仿真模型的不确定等等。针对上述问题,考虑锂离子电池液冷热管理系统中的不确定因素,并根据不确定因素来构建锂离子液冷电池热管理系统的稳健设计优化框架对,对全面提高产品性能具有重要意义。

发明内容

[0005] 针对现有技术的以上缺陷或改进需求,本发明提供了一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法,其以锂离子电池液冷热管理系统中的优化对象,并根据优化对象的参数化模型定义设计变量,相应的将优化理论、不确定分析以及热流固耦合分析结合,考虑设计变量和代理模型的不确定因素,解决了传统设计方法中人为忽略参数和代理模型不确定因素导致设计结果不稳健,以此来获取锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法,从而提高锂离子电池产品的性能。

[0006] 针对现有技术的改进需求,本发明提供了一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法,包括以下步骤:

[0007] S1选择锂离子电池液冷热管理系统中的优化对象,并根据优化对象的参数化模型定义设计变量;

[0008] S2通过试验设计在设计变量的取值范围内抽取N组样本点,并将每组 样本点进行流体力学分析,以获取每组样本点所对应的实际电池温度差 和实际压降;

[0009] S3将每组样本点及每组样本点所对应的实际电池温度差和实际压降输 入到多种代理模型中,通过模型验证和确认选择最佳代理模型;

[0010] S4设定每组样本点的波动区间,在该波动区间中均匀选取每组样本点 所对应的M组新的样本点,N组样本点可选取N×M组新的样本点,将N ×M组新的样本点代入最佳代理模型中,以获取N×M组新的样本点所对 应的理论电池温度差和理论压降;

[0011] S5量化N×M组新的样本点所对应的理论电池温度差和理论压降的不 确定性,并以此来构建综合考虑设计变量与最佳代理模型不确定性的锂离子 电池液冷热管理系统稳健设计优化模型。

[0012] 作为进一步优选的,步骤S1中,所述优化对象为锂离子电池液冷热管 理系统中的冷却板,所述设计变量包括冷却板厚度 d_1 、冷却板流到间距 d_2 、冷却板流道与边缘水平间距 d_3 、冷却板流道与边缘垂直间距 d_4 以及流经冷 却板的冷却液质量流量 v 。

[0013] 作为进一步优选的,步骤S2中,所述试验设计所采用的方法为拉丁超 立方抽样法。

[0014] 作为进一步优选的,步骤S3中,所述代理模型包括多项式响应面模型、径向基函 数模型和Kriging模型。

[0015] 作为进一步优选的,步骤S3中,所示模型验证和确认采用模型保证度 预测估计方 法。

[0016] 作为进一步优选的,步骤S4中,所述波动区间的范围为-0.1~0.1。

[0017] 作为进一步优选的,步骤S4中,采用蒙特卡洛仿真方法在该波动区间 中均匀选取 每组样本点所对应的M组新的样本点。

[0018] 作为进一步优选的,步骤S5中,量化N×M组新的样本点所对应的理 论电池温度差 和理论压降的不确定性的模型为:

$$[0019] \begin{cases} \mu_{TD} = \mu[\hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_1^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_1^M), \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_2^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_2^M), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_N^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_N^M)] \\ \mu_{\Delta p} = \mu[\hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_1^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_1^M), \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_2^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_2^M), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_N^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_N^M)] \\ s_{TD} = s[\hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_1^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_1^M), \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_2^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_2^M), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_N^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_N^M)] \\ s_{\Delta p} = s[\hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_1^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_1^M), \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_2^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_2^M), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_N^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_N^M)] \end{cases}$$

[0020] 式子中, μ_{TD} 为N×M组新的样本点所对应的理论电池温度差的均值, $\mu_{\Delta p}$ 为N×M组 新的样本点所对应的理论压降的均值, s_{TD} 为N×M组新的样 本点所对应的理论电池温度差 的标准差, $s_{\Delta p}$ 为N×M组新的样本点所对应 的理论压降的标准差, \hat{f}_{TD} 为最佳代理模型的电 池温度差输出函数, $\hat{f}_{\Delta p}$ 为最 佳代理模型的压降输出函数, μ 为均值函数, s 为标准差函数。

[0021] 作为进一步优选的,步骤S5中,所述综合考虑设计变量与最佳代理模 型不确定性的 锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化模型为:

$$\begin{cases}
 \text{find } \mathbf{x} = [d_1, d_2, d_3, d_4, v] \\
 \text{min } \mu_{TD} + ks_{TD} \\
 \text{s.t. } \mathbf{g} = \mu_{\Delta p} - 500 + ks_{\Delta p} \leq 0 \\
 1.00 \leq d_1 \leq 1.50, \\
 2.00 \leq d_2 \leq 5.00 \\
 5.00 \leq d_3 \leq 15.00, \\
 2.00 \leq d_4 \leq 5.00 \\
 0.2 \leq v \leq 2.0
 \end{cases}$$

[0023] 式子中, \mathbf{g} 优化设计约束条件, k 为权重因子。

[0024] 作为进一步优选的, 所述 k 的取值范围为 1~3。

[0025] 总体而言, 通过本发明所构思的以上技术方案与现有技术相比, 主要具备以下的技术优点:

[0026] 1. 本发明通过将优化理论、不确定分析以及热流固耦合分析结合, 考虑设计变量和代理模型的不确定因素, 解决了传统设计方法中人为忽略参数和代理模型不确定因素导致设计结果不稳健, 运用本发明方法能提高复杂机械产品的性能。

[0027] 2. 本发明所述优化对象为锂离子电池液冷热管理系统中的冷却板, 并以冷却板的具体参数最为设计变量, 其中, 冷却板厚度 d_1 、冷却板流到间距 d_2 、冷却板流道与边缘水平间距 d_3 、冷却板流道与边缘垂直间距 d_4 以及流经冷却板的冷却液质量流量 v 都是影响锂离子电池工作性能的关键参数, 因此, 将这些参数作为设计变量, 使得获取的优化方案更加稳健、结果更加准确。

[0028] 3. 本发明所述试验设计所述代理模型包括多项式响应面模型、径向基函数模型和Kriging模型, 其涵盖了优化锂离子电池液冷热管理系统的常见代理模型, 同时, 综合考虑设计变量与最佳代理模型不确定性的情况下, 锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化模型, 解决了传统设计方法中人为忽略参数和代理模型不确定因素导致设计结果不稳健。

[0029] 4. 本发明采用蒙特卡洛仿真方法在该波动区间 $[-0.1, 0.1]$ 中均匀选取每组样本点所对应的 M 组新的样本点, 从而在约束条件下进一步扩大了样本组数, 使得后期获取的结果更加稳健。

[0030] 5. 本发明 $N \times M$ 组新的样本点所对应的理论电池温度差和理论压降的不确定性进行量化, 并根据该量化的不确定性来构建最终锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化模型, 其考虑了设计参数和代理模型的不确定因素, 解决了传统设计方法中人为忽略参数和代理模型不确定因素导致设计结果不稳健, 从而提高锂离子电池产品的性能。

附图说明

[0031] 图1是本发明涉及的一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法的流程图;

[0032] 图2是本发明涉及的锂离子电池液冷热管理系统中的冷却板的主视图;

[0033] 图3是图2中锂离子电池液冷热管理系统中的冷却板的侧视图；

[0034] 图4是现有技术中采用确定性方法获取的锂离子电池液冷热管理系统的电池温度优化的结果图；

[0035] 图5是现有技术中采用确定性方法获取的锂离子电池液冷热管理系统的冷却板压降优化的结果图；

[0036] 图6是本发明实施例1获取的锂离子电池液冷热管理系统的电池温度优化的结果图；

[0037] 图7是本发明实施例1获取的锂离子电池液冷热管理系统的冷却板压降优化的结果图。

具体实施方式

[0038] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。此外，下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

[0039] 如图1至图3所示，本发明一种锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化方法具体包括以下步骤：

[0040] 步骤1：选择锂离子电池液冷热管理系统中的优化对象，并根据优化对象的参数化模型定义设计变量。

[0041] 本发明以锂离子电池液冷热管理系统作为优化对象，对锂离子电池液冷系统的冷却板进行参数化建模和定义设计变量，具体为：影响散热效率的关键性设计变量有冷却板厚度 d_1 (mm)、冷却板流道间距大小 d_2 (mm)、冷却板流道与边缘水平间距大小 d_3 (mm)、冷却板流道与边缘垂直间距大小 d_4 (mm)、以及冷却液质量流量 v (g/s)。

[0042] 步骤2：通过试验设计在设计变量的取值范围内抽取多组样本点，并将每组样本点进行流体动力学分析，以获取每组样本点所对应的实际电池温度差和实际压降，其中，试验设计采用的方法为拉丁超立方抽样法，同时在进行流体动力学分析时，冷却液的流动方式定义为层流。

[0043] 步骤3：将每组样本点及每组样本点所对应的实际电池温度差和实际压降输入到多种代理模型中，通过模型验证和确认选择最佳代理模型；在本发明中，通过对比每组样本点所对应的理论电池温度差的均值和方差以及理论压降的均值和方差来确定最佳代理模型；本发明的多种代理模型包括多项式响应面模型、径向基函数模型和Kriging模型，但是，不限于以上三种模型。模型验证和确认采用模型保证度预测估计方法。

[0044] 步骤4：设定每组样本点的波动区间，采用蒙特卡洛仿真方法在该波动区间中均匀选取每组样本点所对应的M组新的样本点，N组样本点可选取 $N \times M$ 组新的样本点，将 $N \times M$ 组新的样本点代入最佳代理模型中，以获取 $N \times M$ 组新的样本点所对应的理论电池温度差和理论压降；所述波动区间的范围为 $-0.1 \sim 0.1$ 。

[0045] 步骤5：量化 $N \times M$ 组新的样本点所对应的理论电池温度差和理论压降的不确定性，该模型为：

$$[0046] \begin{cases} \mu_{TD} = \mu[\hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_1^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_1^M), \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_2^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_2^M), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_N^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_N^M)] \\ \mu_{\Delta p} = \mu[\hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_1^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_1^M), \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_2^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_2^M), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_N^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_N^M)] \\ s_{TD} = s[\hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_1^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_1^M), \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_2^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_2^M), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_N^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_N^M)] \\ s_{\Delta p} = s[\hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_1^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_1^M), \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_2^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_2^M), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_N^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_N^M)] \end{cases}$$

[0047] 式子中, μ_{TD} 为 $N \times M$ 组新的样本点所对应的理论电池温度差的均值, $\mu_{\Delta p}$ 为 $N \times M$ 组新的样本点所对应的理论压降的均值, s_{TD} 为 $N \times M$ 组新的样本点所对应的理论电池温度差的标准差, $s_{\Delta p}$ 为 $N \times M$ 组新的样本点所对应的理论压降的标准差, \hat{f}_{TD} 为最佳代理模型的电池温度差输出函数, $\hat{f}_{\Delta p}$ 为最佳代理模型的压降输出函数, μ 为均值函数, s 为标准差函数。

[0048] 并根据该模型来构建综合考虑设计变量与最佳代理模型不确定性的锂离子电池液冷热管理系统稳健设计优化模型:

$$[0049] \begin{cases} \text{find } \mathbf{x} = [d_1, d_2, d_3, d_4, v] \\ \min \mu_{TD} + ks_{TD} \\ \text{s.t. } g = \mu_{\Delta p} - 500 + ks_{\Delta p} \leq 0 \\ 1.00 \leq d_1 \leq 1.50, \\ 2.00 \leq d_2 \leq 5.00 \\ 5.00 \leq d_3 \leq 15.00, \\ 2.00 \leq d_4 \leq 5.00 \\ 0.2 \leq v \leq 2.0 \end{cases}$$

[0050] 式子中, g 优化设计约束条件, k 为权重因子, 其取值范围为 1~3。

[0051] 实施例 1

[0052] 步骤一: 对锂离子电池液冷系统的冷却板进行参数化建模和定义设计变量, 具体为: 影响散热效率的关键性设计变量有冷却板厚度 d_1 (mm)、冷却板流道间距大小 d_2 (mm)、冷却板流道与边缘水平间距大小 d_3 (mm)、冷却板流道与边缘垂直间距大小 d_4 (mm)、以及冷却液质量流量 v (g/s)。参数化建模结构如图 2 所示。

[0053] 步骤二: 在初始区间范围内用拉丁超立方体抽样生成 60 组样本点, 采用 FLUENT 15.0 生成网格并进行计算得到电池温度差 TD 和冷却板压降 Δp 。在进行流体动力学分析时, 冷却液的流动方式定义为层流。

[0054] 根据液冷电池热管理的物理特性和性能要求, 表 1 给出了 6 个设计变量的详细信息。

[0055] 表 1 设计变量的上下界

	变量	符号	下界	上界
	x_1	$d_1 (mm)$	1.00	1.50
[0056]	x_2	$d_2 (mm)$	2.00	5.00
	x_3	$d_3 (mm)$	5.00	15.00
	x_4	$d_4 (mm)$	2.00	5.00
	x_5	$v (g/s)$	0.20	2.00

[0057] 在流体动力学分析需要相关方程如下:

[0058] 根据能量守恒方程,可以求解单个电池的温度。

$$[0059] \quad \rho_b C_b \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_b \nabla T) + Q$$

[0060] ρ_b 为质量密度。 C_b 为比热值, T 为温度, ∇ 为梯度算子, k_b 为电池导热系数, Q 为细胞的产热率。

[0061] 除上式外,还需要了冷却水的能量守恒方程、连续方程和动量守恒方程:

$$[0062] \quad \rho_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w c_w \bar{v} T_w) = \nabla \cdot (k_w \nabla T_w)$$

$$[0063] \quad \nabla \cdot \bar{v} = 0$$

$$[0064] \quad \rho_w \frac{d\bar{v}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{v}$$

[0065] 其中 T_w , ρ_w , C_w , k_w , T_w , \bar{v} , p , μ 分别表示冷却水的温度、密度、比热、导热系数、温度、流速、静压和动粘度。

[0066] 步骤3:将60组样本点及每组样本点所对应的目标输出值输入到响应面模型、径向基函数模型和Kriging模型中,通过模型验证和确认选择最佳代理模型。本例中经过计算Kriging模型最合适。

[0067] 步骤4:设定每组样本点的波动区间 $\Delta x = \pm (0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1)$,在该波动区间中均匀选取每组样本点所对应的200组新的样本点,60组样本点可60×200组新的样本点,将60×200组新的样本点代入最佳代理模型中,以获取60×200组新的样本点所对应的理论电池温度差和理论压降;

[0068] 步骤5:量化60×200组新的样本点所对应的理论电池温度差和理论压降的不确定性。

[0069] 其模型为:

$$[0070] \quad \begin{cases} \mu_{TD} = \mu[\hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_1^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_1^M), \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_2^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_2^{200}), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_{60}^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_{60}^{200})] \\ \mu_{\Delta p} = \mu[\hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_1^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_1^M), \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_2^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_2^{200}), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_{60}^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_{60}^{200})] \\ s_{TD} = s[\hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_1^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_1^{200}), \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_2^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_2^{200}), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_N^1), \dots, \hat{f}_{TD}(\mathbf{x}_{60}^{200})] \\ s_{\Delta p} = s[\hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_1^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_1^{200}), \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_2^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_2^{200}), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_{60}^1), \dots, \hat{f}_{\Delta p}(\mathbf{x}_{60}^{200})] \end{cases}$$

[0071] 然后并以此来构建综合考虑设计变量与最佳代理模型不确定性的锂离子电池液

冷热管理系统稳健设计优化模型。

[0072] 计算结果如表2所示。考虑三种情况,情况1为确定性优化优化结果(如图4和图5所示),情况2仅考虑参数不确定性优化结果,情况3是考虑参数和代理模型的不确定性的优化结果(如图6和图7所示)。从结果可以发现,确定性优化的 Δp 是最大的为490.66Pa,当考虑到参数和代理建模的不确定性, Δp 是最小的,为452.94Pa。因此,考虑参数和代理模型不确定性后计算结果更稳健。

[0073] 表2电池液冷系统的优化结果

[0074]

	符号	区间	情况 1	情况 2	情况 3
设计变量	d_1	[1.00, 1.50]	1.1038	1.2562	1.2157
	d_2	[2.00, 5.00]	4.8492	4.2236	4.1255
	d_3	[5.00, 15.00]	5.9515	8.7557	10.2796
	d_4	[2.00, 5.00]	3.3983	4.0379	4.0301
	v	[0.2, 2.0]	1.2872	1.0631	0.9987
目标值	$TD(K)$	min	8.7147	9.6378	9.9184
约束条件	$\Delta p(Pa)$	≤ 500	490.66	469.97	452.94

[0075] 本发明通过将优化理论、不确定分析以及热流固耦合分析结合,考虑参数和代理模型的不确定因素,解决了传统设计方法中人为忽略参数和代理模型不确定因素导致设计结果不稳健,运用本发明方法能提高复杂机械产品的性能。

[0076] 本领域的技术人员容易理解,以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

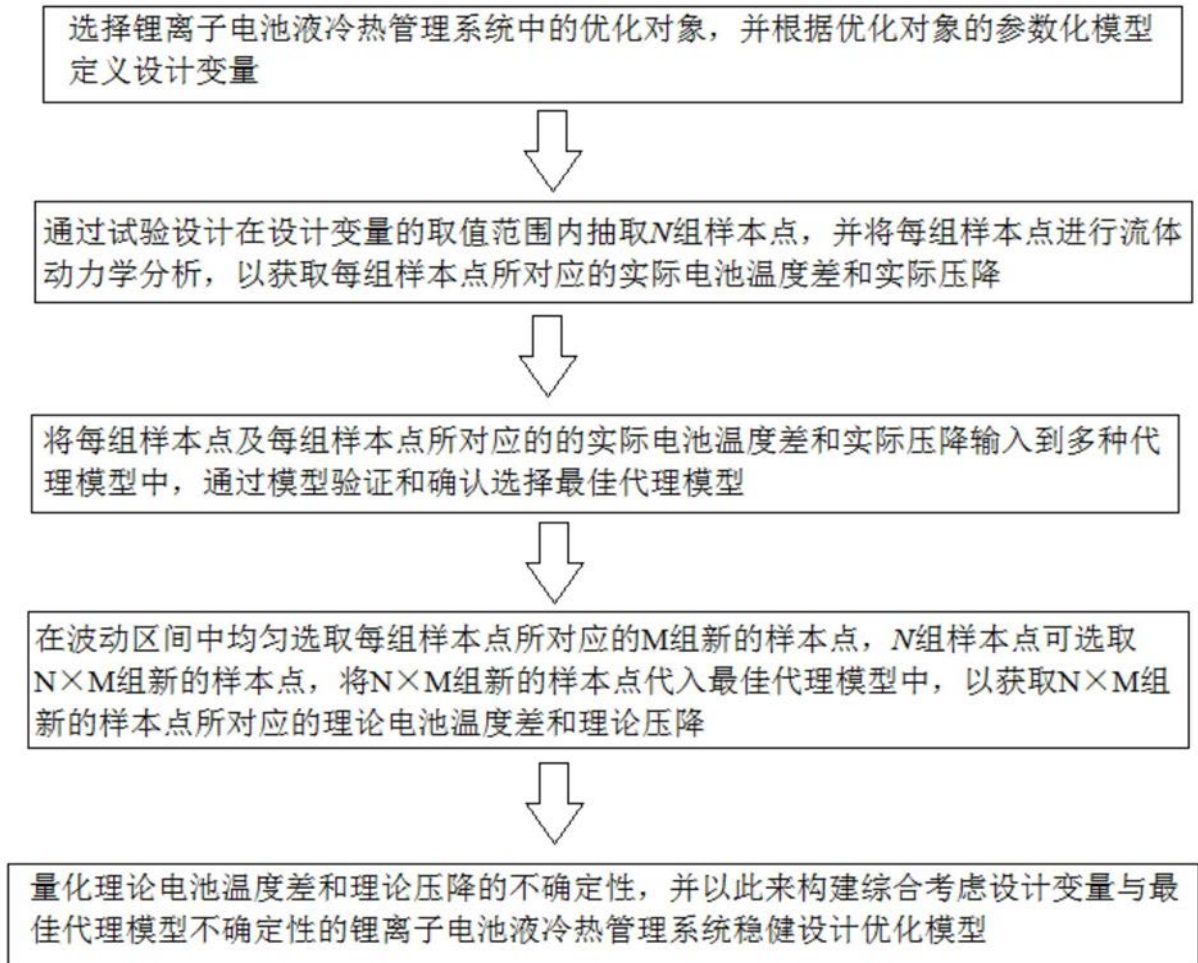


图1

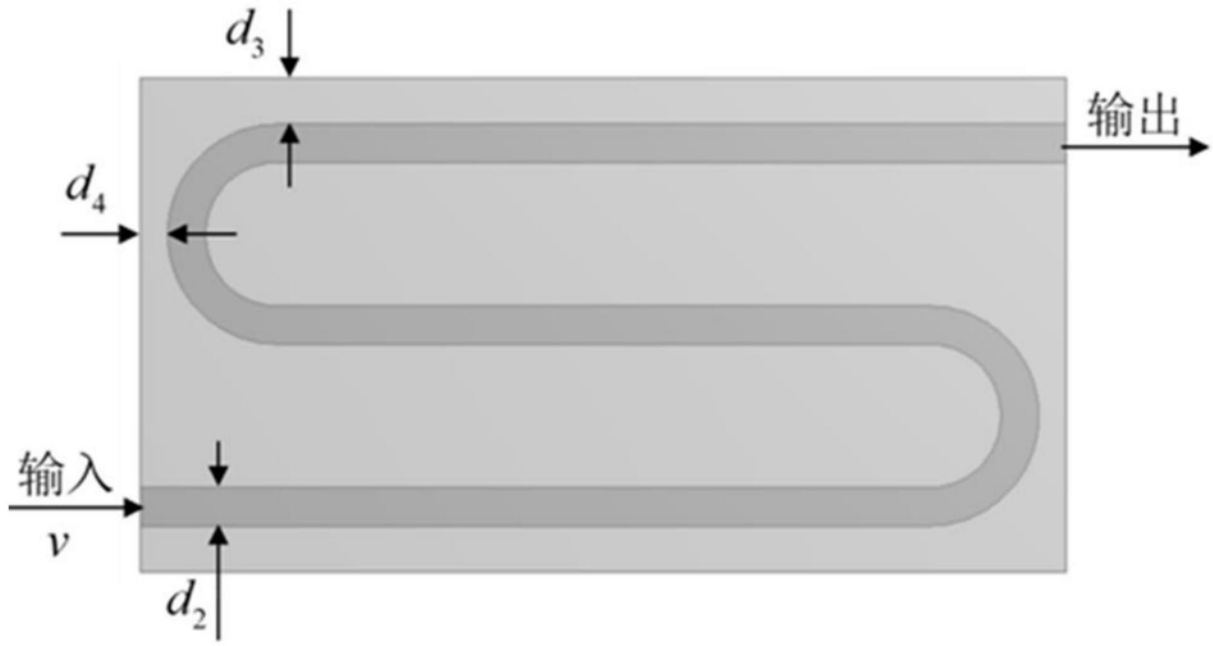


图2



图3

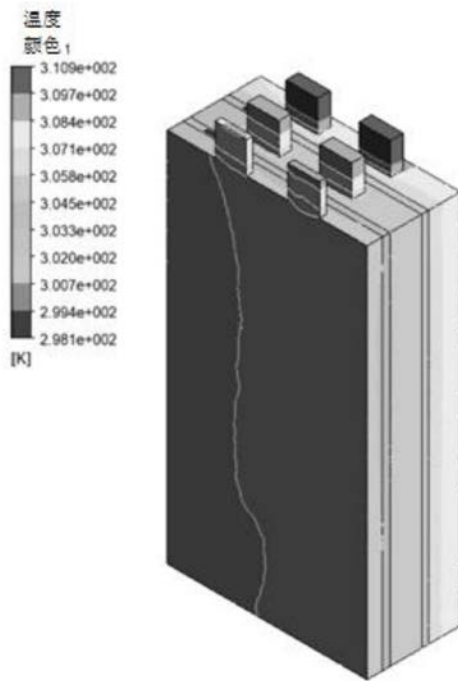


图4

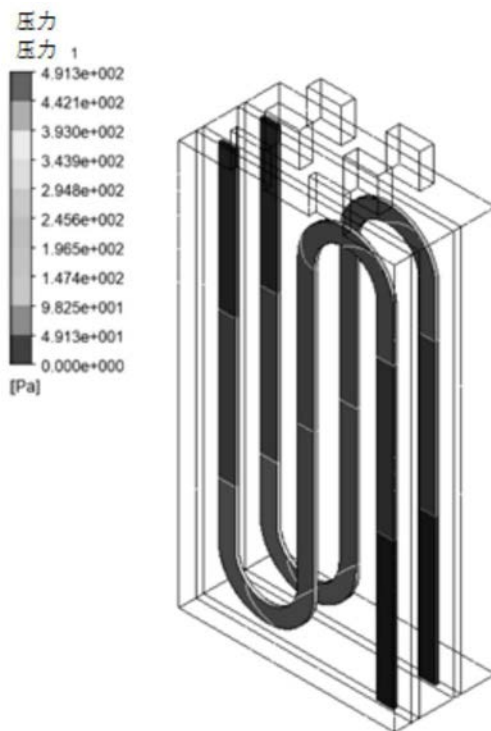


图5

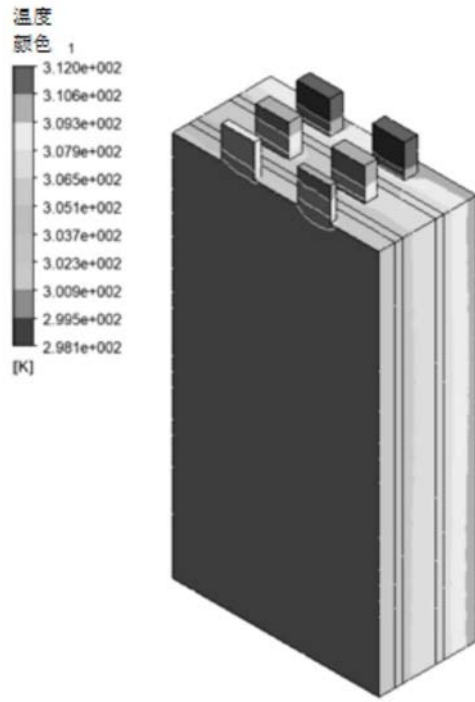


图6

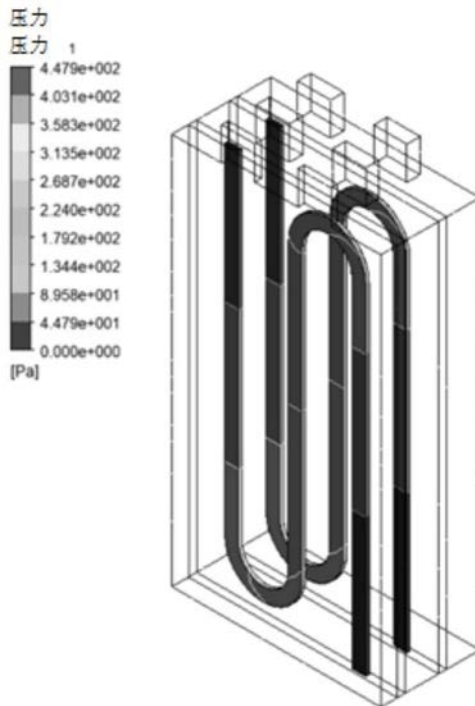


图7