



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105224741 A

(43) 申请公布日 2016. 01. 06

(21) 申请号 201510626013. 4

(22) 申请日 2015. 09. 28

(71) 申请人 河南理工大学

地址 454003 河南省焦作市高新区世纪路  
2001 号河南理工大学机械与动力工程  
学院

(72) 发明人 陈国强 苏亚辉 康件丽

(51) Int. Cl.

G06F 17/50(2006. 01)

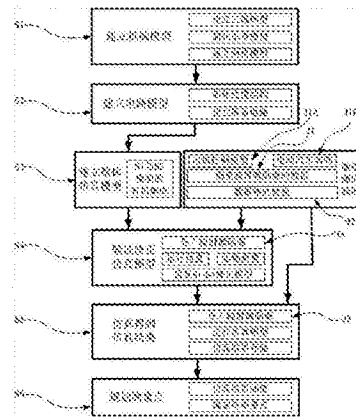
权利要求书2页 说明书8页 附图2页

(54) 发明名称

电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法

(57) 摘要

本发明公开了一种电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法。该方法首先建立机械模型,其次建立电路模型,再次建立整体仿真模型,接着验证并修正仿真模型,然后仿真得到仿真结果,最后规划测量位置点。在建立整体仿真模型之后,用少量位置点处实际测量得到辐射值验证仿真模型,并修正仿真模型。仿真过程中通过控制相邻位置点上辐射值的差值保证仿真精度,通过插值方式得到所要测量的空间区域中任意位置点的辐射值,通过优化方法确定待测量位置点的坐标。本发明提供的方法能实现电动汽车电磁辐射测量中关键测量位置点的合理选取、提高测量的效率与精度,更加有效地从电磁辐射三维场的角度来全面评价电动汽车的性能。



1. 一种电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法,其特征在于,包括如下步骤:S1:建立机械模型,S2:建立电路模型,S3:建立整体仿真模型,S4:验证并修正仿真模型,S5:仿真得到仿真结果,S6:根据仿真结果规划测量位置点。

2. 根据权利要求1所述的电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法,其特征在于,步骤S4中,验证并修正仿真模型的方法是:首先导入辐射激励源,运行仿真模型,得到至少一个所述测量位置点处的仿真结果;然后通过实物测量得到仿真时对应所述测量位置点处的实际测量辐射值;最后反复修正仿真模型,使仿真结果逐步逼近实际测量结果,直到二者之差小于设定的误差限。

3. 根据权利要求2所述的电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法,其特征在于,仿真过程中,所述辐射激励源的获取与设置方法包括如下步骤:J1:通过测量得到所述辐射激励源的电流、电压数据;J2:将测量的数据格式转换为电磁辐射仿真软件兼容的格式;J3:将转换格式后的数据作为所述辐射激励源导入到电磁辐射仿真软件。

4. 根据权利要求3所述的电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法,其特征在于,步骤J1中,测量时至少通过J1A、J1B方法的一种,J1A:在电机控制仿真软件中建立驱动系统的电机控制模型,通过仿真测量;J1B:电动汽车汽车运行中实测。

5. 根据权利要求4所述的电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法,其特征在于,步骤S5中,仿真计算时设置了一个三维长方体区域,所述长方体区域为需要测量的电动汽车辐射的范围的最小外接长方体区域。

6. 根据权利要求5所述的电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法,其特征在于,将所述长方体区域均匀分为多个子长方体区域,在所述子长方体区域的顶点上设置探针进行仿真测量。

7. 根据权利要求6所述的电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法,其特征在于,所述子长方体区域的划分方法包括如下步骤:

S51:设定初始所述子长方体区域的个数,根据此个数将所述长方体区域均匀分成所述子长方体区域;

S52:在所有的所述子长方体区域的顶点上设置探针,进行仿真,得到顶点上的仿真结果;

S53:逐个检查任意相邻的两个顶点上的仿真结果之差是否大于设定的误差限,如果是,则这两个顶点所属的每个最小的所述子长方体区域都在这两个顶点形成的棱的方向上平均划分为两个所述子长方体区域,转步骤S52,直到不大于设定的误差限。

8. 根据权利要求7所述的电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法,其特征在于,步骤S6中,规划需要所述测量位置点时,将所述测量位置点分为必测位置点与待规划测量位置点,所述必测位置点直接确定;所述待规划测量位置点根据仿真得到的辐射结果确定。

9. 根据权利要求8所述的电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法,其特征在于,步骤S6中,将所有的所述子长方体区域的顶点作为所述待规划测量位置点。

10. 根据权利要求8所述的电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法,其特征在于,步骤S6中,所述待规划测量位置点确定的方法是:将仿真得到的所述子长方体区域顶点所表示的有限个位置点上的辐射值进行插值,得到所述长方体区域内任意位置点上的辐射值的数学表达式;设实际测量中所述测量位置点除去所述必测位置点之后剩下的

能够测量的所述待规划测量位置点的数目的上限为  $M_{\max}$ , 设规划时要求的测量误差限为  $\Delta$ , 则所述待规划测量位置点的数目  $M$  与所述待规划测量位置点  $\{P_k\} | k=1, 2, 3, \dots, M$  的坐标由下式采用大规模多目标优化算法优化确定

$$\begin{aligned} \min & \begin{cases} \max_{1 \leq k < l \leq M} |D(P_k) - D(P_{kl})| \\ M \quad (M \text{ 为正整数}) \end{cases} \\ \text{s. t.} & \begin{cases} |D(P_k) - D(P_{kl})|_{1 \leq k < l \leq M} \leq \Delta \\ M \leq M_{\max} \end{cases} \end{aligned}$$

式中,  $D(P_k)$  为所述待规划测量位置点  $P_k$  处的仿真结果;  $P_{kl}$  为以所述待规划测量位置点  $P_k$  为原点的三维空间中 8 个卦限的每个卦限内与所述待规划测量位置点  $P_k$  距离最近的所述测量位置点, 当位于所述长方体区域的边界处时  $P_{kl}$  的个数少于 8 个;  $D(P_{kl})$  为所述测量位置点  $P_{kl}$  处的仿真结果。

## 电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电动汽车性能测试的方法,具体而言,涉及电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法。

### 背景技术

[0002] 随着能源危机和环境污染问题日益突出,电动汽车可以实现世界汽车产业的可持续发展,逐渐成为国内、外研究与开发的热点。为了满足人们对安全性、舒适性、动力性等方面的要求,电动汽车中集成了大功率的电力电子装置。电动汽车上各种电子设备的系统灵敏度高、所使用的频带较宽,接受微弱信号的能力较强。这些电子设备工作时,会以电磁波形式向外界传递电磁辐射,其中电动汽车核心大功率部件的驱动电机以及动力线缆等产生电磁辐射最为严重。这些电磁波产生的电磁辐射不仅干扰电动汽车上安装的各种电子设备和整车的正常工作,甚至还影响人体健康。因此,电动汽车驱动系统电磁辐射的评测具有重要的理论意义和实际应用价值。

[0003] 目前,解决电动汽车驱动系统电磁辐射问题通常采用的方法是:前期阶段进行优化设计,然后通过测试来发现电动汽车的辐射问题,进而改进。但是,电动汽车电磁辐射的测试过程中对测试环境与设备的要求很高,费用高昂;而且,实际测量过程中不可能测量无穷个位置点处的辐射,只能选择有限个关键位置点处进行测量,进而评判辐射性能。由于辐射存在于整个三维空间,测量位置点的选取盲目性很大,常常漏掉关键的位置,进而导致辐射性能的评测误差大。

### 发明内容

[0004] 针对电动汽车驱动系统的电磁辐射测量过程中存在的费用高昂、测量位置点选取盲目、误差大等技术问题,本发明的目的在于提供一种电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法,能实现电动汽车电磁辐射测量中关键测量位置点的合理选取、提高测量的效率与精度,更加有效地从电磁辐射三维场的角度来全面评价电动汽车的性能。

[0005] 本发明所采用的技术方案如下所描述:

一种电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法,包括如下步骤:S1:建立机械模型,S2:建立电路模型,S3:建立整体仿真模型,S4:验证并修正仿真模型,S5:仿真得到仿真结果,S6:根据仿真结果规划测量位置点。

[0006] 进一步地,步骤S4中,验证并修正仿真模型的方法是:首先导入辐射激励源,运行仿真模型,得到至少一个所述测量位置点处的仿真结果;然后通过实物测量得到仿真时对应所述测量位置点处的实际测量辐射值;最后反复修正仿真模型,使仿真结果逐步逼近实际测量结果,直到二者之差小于设定的误差限。

[0007] 进一步地,仿真过程中,所述辐射激励源的获取与设置方法包括如下步骤:J1:通过测量得到所述辐射激励源的电流、电压数据;J2:将测量的数据格式转换为电磁辐射仿真软件兼容的格式;J3:将转换格式后的数据作为所述辐射激励源导入到电磁辐射仿真软

件。

[0008] 进一步地,步骤 J1 中,测量时至少通过 J1A、J1B 方法的一种, J1A :在电机控制仿真软件中建立驱动系统的电机控制模型,通过仿真测量 ;J1B :电动汽车汽车运行中实测。

[0009] 进一步地,步骤 S5 中,仿真计算时设置了一个三维长方体区域,所述长方体区域为需要测量的电动汽车辐射的范围的最小外接长方体区域。

[0010] 进一步地,将所述长方体区域均匀分为多个子长方体区域,在所述子长方体区域的顶点上设置探针进行仿真测量。

[0011] 更进一步地,所述子长方体区域的划分方法包括如下步骤:

S51 :设定初始所述子长方体区域的个数,根据此个数将所述长方体区域均匀分成所述子长方体区域;

S52 :在所有的所述子长方体区域的顶点上设置探针,进行仿真,得到顶点上的仿真结果;

S53 :逐个检查任意相邻的两个顶点上的仿真结果之差是否大于设定的误差限,如果是,则这两个顶点所属的每个最小的所述子长方体区域都在这两个顶点形成的棱的方向上平均划分为两个所述子长方体区域,转步骤 S52,直到不大于设定的误差限。

[0012] 再进一步地,步骤 S6 中,规划需要所述测量位置点时,将所述测量位置点分为必测位置点与待规划测量位置点,所述必测位置点直接确定 ;所述待规划测量位置点根据仿真得到的辐射结果确定。

[0013] 在一些实施方式中,步骤 S6 中,将所有的所述子长方体区域的顶点作为所述待规划测量位置点。

[0014] 在另一些实施方式中,步骤 S6 中,所述待规划测量位置点确定的方法是 :将仿真得到的所述子长方体区域顶点所表示的有限个位置点上的辐射值进行插值,得到所述长方体区域内任意位置点上的辐射值的数学表达式 ;设实际测量中所述测量位置点除去所述必测位置点之后剩下的能够测量的所述待规划测量位置点的数目的上限为  $M_{\max}$ ,设规划时要求的测量误差限为  $\Delta$ ,则所述待规划测量位置点的数目  $M$  与所述待规划测量位置点  $\{P_k\} | k = 1, 2, 3, \dots, M$  的坐标由下式采用大规模多目标优化算法优化确定

$$\min \begin{cases} \max_{1 \leq k < l \leq M} |D(P_k) - D(P_{kl})| \\ M \quad (M \text{ 为正整数}) \end{cases}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} |D(P_k) - D(P_{kl})|_{1 \leq k < l \leq M} \leq \Delta \\ M \leq M_{\max} \end{cases}$$

式中,  $D(P_k)$  为所述待规划测量位置点  $P_k$  处的仿真结果 ;  $P_{kl}$  为以所述待规划测量位置点  $P_k$  为原点的三维空间中 8 个卦限的每个卦限内与所述待规划测量位置点  $P_k$  距离最近的所述测量位置点,当位于所述长方体区域的边界处时  $P_{kl}$  的个数少于 8 个 ;  $D(P_{kl})$  为所述测量位置点  $P_{kl}$  处的仿真结果。

[0015] 本发明与现有技术相比具有显著的优点和有益效果 :

(1) 本发明提供的电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法减小设计与测量成本。首先通过工程软件建立驱动系统及整车的仿真模型,根据仿真得到的结果通过优化方法确定需要实际测量的位置点,在保证要求精度的前提下,能极大地减少测量次数。

[0016] (2) 本发明提供的电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法提高了测量精度。提供的仿真测量位置点划分过程中通过长方体区域来控制,长方体的大小采用动态自适应的方式进行划分,在保证要求测量点数的前提下,能极大地提高测量精度。

[0017] (3) 本发明提供的电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法中仿真模型准确度高,仿真结果精度高。在建立整体仿真模型之后,用少量的位置点处电动汽车实际测量得到电磁辐射去验证仿真模型的正确性,并且根据仿真结果与实测结果的差异修正仿真模型,使仿真模型逐步逼近真实模型,进而提高仿真模型的正确性。

[0018] (4) 本发明提供的电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法使关键测量位置点的选取更加准确,提高评测精度。仿真过程中通过控制相邻位置点上辐射值的差值保证了仿真精度,然后通过插值的方式得到所要测量的空间区域中任意位置点的辐射值,最后通过优化的方法确定待测位置点的坐标,有效地避免遗漏关键的测量点,提高了评测的准确性与可信度。

#### 附图说明

[0019] 图 1 为本发明提供的技术方案的流程图;

图 2 为本发明中子长方体区域划分方法示意图。

#### 具体实施方式

[0020] 本发明的目的在于提供一种电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法,以解决电动汽车驱动系统电磁辐射测量时费用高昂、位置选取盲目、误差大等技术问题。为了使本发明的发明目的、技术方案和有益效果更加清楚,下面将通过实施方式对本发明作进一步地详细描述。

[0021] 如图 1 所示,本发明提供的一种电动汽车驱动系统电磁辐射测试规划方法,具体实施过程中包括如下步骤。

[0022] S1:建立机械模型。根据被测电动汽车的车身结构与实际尺寸,建立电动汽车车身三维模型。

[0023] 所述机械模型由车身的三维模型、简化车身模型、划分三维模型得到的网格模型组成,利用三维建模软件建立车身三维模型。为了减少划分车身网格时的计算量,对建立的电动汽车车身三维模型进行简化,将大跨度的自由曲面和细小的孔洞与焊缝简化为多个小平面的拼接以减小仿真时曲面逼近所带来的误差。对于座椅、轮胎、方向盘、仪表、车灯,等非金属部件对电磁辐射传播波影响很小,忽略不计。车门和后备箱简化为金属实体,车身材料设为理想导体。对简化的车身模型划分网格,建立麦克斯韦方程进行求解。网格划分正确与否直接影响仿真结果的精度和计算速度。网格的疏密程度是衡量网格划分的重要指标,网格划分得越密,与车身三维模型拟合程度越高,占用计算机内存资源多,仿真时间长,计算精度高,网格划分得越粗糙,计算速度快,占用计算机内存资源少,仿真时间短,但计算精度低。例如,可在保证计算精度的前提下选用小于最小波长的  $1/8$  基本尺寸划分网格。

[0024] S2:建立电路模型。所述电气模型的建立方法包括简化线缆结构、建立等效电路。建立等效电路的方法是,根据传输线理论将多股的线缆简化为传输线双线模型。

[0025] 电动汽车动力线缆是由许多直径、材料均相同的细铜导线绑扎而成,材料、直径相同的导线具有相同的电磁辐射特性,所以在研究直流母线的电磁辐射特性时,只须以线缆内单根导线为研究对象即可。因此,直流母线的电路模型采用电磁兼容中常用的传输线法,仿真中考虑线上损耗,因此将多股的线缆简化为传输线双线模型,建立线缆的等效电路。

[0026] S3:建立整体仿真模型,将步骤S1与S2中建立的机械模型与电气模型在电磁仿真软件中有机集成。机械模型与电气模型在电磁仿真软件中有机集成的实施过程为:首先将划分过网格的车身网格模型加载进电磁辐射仿真软件;然后根据线缆所在电动汽车实际位置、实际材质、实际结构在划分过网格的车身网格模型上建立线缆的路径,根据S2建立的线缆的等效电路,创建外围电路;最后设置整体仿真模型的参数。

[0027] 例如,可以在CATIA软件中实现车身三维机械模型的建立;在Hypermesh软件中实现车身网格的划分;在FEKO软件中实现整体仿真模型的建立,并进行仿真计算。

[0028] S4:验证并修正仿真模型。实施步骤是:首先导入辐射激励源,运行仿真模型,得到至少一个所述测量位置点处的仿真结果;然后通过实物测量得到仿真时对应所述测量位置点处的实际测量辐射值;最后反复修正仿真模型,使仿真结果逐步逼近实际测量结果,直到二者之差小于设定的误差限。

[0029] 电磁辐射的激励源的获取可采用多种方法:①理论分析法:通过理论分析,建立控制系统的数学模型,计算激励源的电流及电压;②仿真测量法:在电机控制仿真软件中建立驱动系统的电机控制模型,通过仿真测量得到;③实物测量法:通过电动汽车运行的实测得到。其中第一种方法最为复杂,不方便工程应用;第二种方法最为简便,不受实验条件的限制,成本最低;第三种方法代价较高,但是能够获得真实工况的激励源数据。因此,至少采用上述三种方法的一种来获得辐射激励源的数据,或将上述三种方法的若干种进行结合。

[0030] 在获得所述辐射激励源的数据后,需要进行格式转换与设置,包括如下步骤:J1:通过测量得到所述辐射激励源的电流、电压数据;J2:将测量的数据格式转换为电磁辐射仿真软件兼容的格式;J3:将转换格式后的数据作为所述辐射激励源导入到电磁辐射仿真软件。

[0031] 实测的点数越多,仿真模型验证得就越充分,越有利于发现仿真模型中存在的规律性缺陷,进而给仿真模型的修正提供倾向性的指导。但是,越多的实测点意味着投入的测量代价越大。所以,在具体实施的过程中,需要用理论分析与经验相结合,分析估算出哪些位置点是辐射关键点,哪些是辐射大的点,尽量选择这些位置点处进行实测验证;避开那些辐射小的位置。因为,通常情况下,在相同的相对误差下,辐射大的位置点处其辐射的绝对误差也大,这有利于发现仿真结果与实测结果的差异。位置点的辐射小会导致仿真结果与实测结果之差与辐射本身的数值相差很小,甚至有些情况下出现误差大于真实值的情况。

[0032] S5:仿真得到仿真结果。仿真过程中,需要首先设置仿真激励源,然后运行仿真模型,最后存储仿真得到的结果。

[0033] 因为电动汽车的电磁辐射范围为整个三维区域,实际的测量只能测量有限个位置点处的辐射值,然后根据这有限个位置点处的辐射值去规划实际需要测量的位置点的坐

标。

[0034] 因此,仿真分析的过程中,应尽可能全面地获得所要测试区域中辐射的分布规律。理论上,仿真过程中,测量的位置点越多,辐射分布规律就掌握得越充分。但是,当位置点数增加到一定程度时,再继续增加位置点数获得的精度提高就很不明显;并且这个不明显程度在不同的空间区域差异巨大。因此,本发明提供的技术方案中的自适应方法来确定仿真时测量的位置点,在保证少的测量位置点数的同时能充分获得整个测试区域中的辐射规律。

[0035] 仿真计算时需要设置一个三维区域,这个区域要包含待测区域。具体实施过程中,区域的形状可以是长方体、球形、椭球形、或其他它规则或不规则的形状。

[0036] 例如,仿真计算时设置一个三维长方体区域,所述长方体区域为需要测量的电动汽车辐射的范围的最小外接长方体区域。考虑到汽车的对称性,以及研究的方便,可以使所述长方体区域的棱平行于汽车的长、宽与高方向,如图 2 所示。这时所述长方体区域则为限定条件下的需要测试的电动汽车辐射的范围的最小外接长方体区域,通常比不限定条件下的区域要大。

[0037] 仿真过程中将所述三维长方体区域进一步划分为子长方体区域,在所述子长方体区域的顶点上设置探针进行仿真测量。

[0038] 所述子长方体区域的划分方法包括如下步骤:

S51:设定初始所述子长方体区域的个数,根据此个数将所述长方体区域均匀分成所述子长方体区域;

S52:在所有的所述子长方体区域的顶点上设置探针,进行仿真,得到顶点上的仿真结果;

S53:逐个检查任意相邻的两个顶点上的仿真结果之差是否大于设定的误差限,如果是,则这两个顶点所属的每个最小的所述子长方体区域都在这两个顶点形成的棱的方向上平均划分为两个所述子长方体区域,转步骤 S52,直到不大于设定的误差限。

[0039] 需要指出的是,上述的子长方体区域的划分可以采用不均匀的方式;测量点的位置也可不选在子长方体的顶点上,而是设在子长方体的中心或其它位置。

[0040] 如图 2 所示的例子,使电动汽车辐射的范围的最小外接长方体区域的棱平行于汽车的长、宽与高方向,所述长方体区域为 P1P2P3P4P5P6P7P8。所述子长方体区域划分为所述子长方体区域的过程如下例所述。

[0041] 设定初始所述子长方体区域的个数为 4,将所述将长方体区域 P1P2P3P4P5P6P7P8 均匀分成 4 个所述子长方体区域 T1、T2、T3、T4, T1:P1P4P12P9P10P11P15P16、T2:P1P2P3P2P9P10P11P17P18、T3:P15P16P10P11P14P8P5P13、T4:P11P10P18P17P7P14P13P6,此时这 4 个所述子长方体区域一共有 18 个顶点,如图 2 中的黑色实心正方形方块所示,顶点的编号外加了方框。

[0042] 在这 18 个顶点上设置探针,进行仿真,得到这 18 个顶点上的仿真测量结果:D(P1)、D(P2)、D(P3)、...、D(P18)。

[0043] 逐个检查这 18 个顶点中任意相邻的同属于一条棱上的两个顶点上的仿真结果之差是否大于设定的误差限,也就是说需要检查每条棱相邻的两端的顶点上的仿真结果之差,例如 P1、P4 为一条棱的两个顶点,P10、P11 也为一条棱的两个顶点。经检查 P10、P11 仿



真结果之差大于设定的误差限,则需要将含有棱 P10P11 的最小的所述子长方体区域在棱 P10P11 上都平均地一分为二。此时,所述子长方体区域 T1、T2、T3、T4 都被平均地一份为二。此时,所述长方体区域被分为 8 个所述子长方体区域,顶点增加了 9 个:P19、P20、P21、…、P27,如图 2 中的黑色实心圆点所示。至此一共有 27 个顶点。在新增加了 9 个顶点 P19、P20、P21、…、P27 上设置探针,进行仿真,得到这 9 个顶点上的测量结果:D(19)、D(P20)、D(P21)、…、D(P27)。

[0044] 根据仿真结果:D(1)、D(P2)、D(P3)、…、D(P27) 逐个检查任意相邻的两个顶点上的仿真结果之差是否大于设定的误差限。经检查 P19、P20 仿真结果之差大于设定的误差限,则需要将含有棱 P19P20 的最小的所述子长方体区域都平均地一分为二。即所述子长方体区域 P20P27P10P18P6P19P26P13、P27P20P17P11P14P26P19P7 都在棱 P19P20 上被一分为二。至此,又增加了两个所述子长方体区域,顶点增加了 6,顶点如图 2 中的黑色实心三角形所示,一共 33 个顶点。在增加了 6 个顶点上设置探针,进行仿真,得到这 6 个顶点上的测量结果,再次判断同一棱上的两个顶点之间的仿真结果是否大于设定的误差限,如果大于,则继续细分,直到都小于设定的误差限为止。

[0045] 其中,相邻的两个顶点指的是:所述长方体区域细分到当前情况下,没有被细分过的所述子长方体的棱的两个顶点。例如:在经过棱 P10P11 细分之后,得到 27 个顶点时,P7 与 P17 是相邻的,因为线段 P7P17 中间没有任何其它的顶点;但是在经过棱 P19P20 细分之后,得到 33 个顶点时,P7 与 P17 已经不再是相邻的顶点了,因为它们中间又加入了一个新的顶点(图 2 中表示为实心黑色三角形)。

[0046] 上述的细分中,P10 与 P11 之间、P19 与 P20 之间的仿真结果之差大于设定的误差限;但是,可能同时会有好几条棱上的两个顶点之间的仿真结果之差都大于设定的误差限,此时,对这几条棱所属的所述子长方体区域都进行细分即可。在细分的过程,在这些棱的方向上进行细分,如棱 P10P11 与棱 P19P20。

[0047] S6:根据仿真结果规划测量位置点。将所述测量位置点分为必测位置点与待规划测量位置点。所述必测位置点直接确定,因为这部分是在实际测量中必须测量的,不参与规划。所述待规划测量位置点根据仿真得到的辐射结果确定。

[0048] 将所有的所述子长方体区域的顶点作为所述待规划测量位置点。在所述长方体区域的顶点总数较小的情况下,这种方式非常可行、有效。

[0049] 在所述长方体区域的顶点总数较大的情况下,所有的顶点都参与实际测量可能会导致在要求的精度下有大量测量点冗余。为了减小所述待规划测量位置点的总个数的同时提高精度,采用如下的一种实施方式。此实施方式中主要的两步为:将仿真的结果在长方体区域进行插值,然后优化确定待测量位置点。

[0050] 将仿真得到的有限个子长方体区域顶点所表示的有限个三维点上的测量结果进行插值,得到所述长方体区域内任意位置点上的电磁辐射的数学表达式。例如,任意三维位置点 Q 处的插值结果 D(Q) 为

$$D(Q) = \frac{1}{\sum_{i=1}^8 \frac{1}{d_i^2}} \sum_{i=1}^8 \frac{D(Q_i)}{d_i^2}$$

式中,  $\{D(Q_i)\} | i=1,2,3,\dots,7,8$  为包含三维位置点  $Q$  的最小的所述子长方体区域的 8 个顶点  $\{D(Q_i)\} | i=1,2,3,\dots,7,8$  上的仿真结果,  $\{d_i\} | i=1,2,3,\dots,7,8$  为位置点  $Q$  与 8 个顶点在三维空间的欧式距离。

[0051] 设实际测量中所述测量位置点除去所述必测位置点之后剩下的能够测量的所述待规划测量位置点的数目的上限为  $M_{\max}$ , 设规划时要求的测量误差限为  $\Delta$ , 则所述待规划测量位置点的数目  $M$  与所述待规划测量位置点  $\{P_k\} | k=1,2,3,\dots, M$  的坐标由下式采用大规模多目标优化算法优化确定

$$\min \begin{cases} \max_{1 \leq k \leq M} |D(P_k) - D(P_{k'})| \\ M \quad (M \text{ 为正整数}) \end{cases}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} |D(P_k) - D(P_{k'})|_{1 \leq k \leq M} \leq \Delta \\ M \leq M_{\max} \end{cases}$$

式中,  $D(P_k)$  为所述待规划测量位置点  $P_k$  处的仿真结果;  $P_{k'}$  为以所述待规划测量位置点  $P_k$  为原点的三维空间中 8 个卦限的每个卦限内与所述待规划测量位置点  $P_k$  距离最近的所述测量位置点, 当位于所述长方体区域的边界处时  $P_{k'}$  的个数少于 8 个;  $D(P_{k'})$  为所述测量位置点  $P_{k'}$  处的仿真结果。

[0052] 如果  $P_k$  位于所述长方体区域的棱角位置附近很小的邻域时,  $P_{k'}$  为 1 个位置点; 如果位于其它的边界面上时,  $P_{k'}$  为 4 个位置点。当位置点位于卦限的交界面上时, 可将其归结于其中一个卦限; 或者不将其归结于任何一个卦限, 而是在每相邻两个卦限的交界面上至多再增加一个与原点  $P_k$  距离最近的位置点, 最大可增加 8 个位置点, 也就是说位置点的个数最大可增加增加到 16 个。

[0053] 如果设规划时要求的测量误差限与所述待规划测量位置点的数目的上限设置得太小, 可能导致优化失败, 这就需要放宽优化约束条件。

[0054] 当然, 可以只限定测量误差限  $\Delta$ , 不限定所述待规划测量位置点数目  $M$  的上限  $M_{\max}$  进行优化; 或者限定测量误差限  $\Delta$  的同时, 将所述待规划测量位置点的数目  $M$  设为一个定常数, 进行优化。

[0055] 当所述长方体区域较大、所述待规划测量位置点的数目的上限设置的很大、测量误差限  $\Delta$  很小时, 由于上述的大规模优化涉及的优化变量很多, 可能会导致长久不能收敛到最优解的情况, 此时可将搜索得到的可行解中相对最优的解作为优化结果。或者将其与第一种实施方式比较, 从中选择最优的实施方式。

[0056] 需要注意的是, 上述具体实施例仅仅是示例性的, 在本发明的上述教导下, 本领域技术人员可以在上述实施例的基础上进行各种改进和变形, 而这些改进或者变形均落在本发明的保护范围内。本领域技术人员应该明白, 上面的具体描述只是为了解释本发明的目

---

的,并非用于限制本发明。本发明的保护范围由权利要求及其等同物限定。

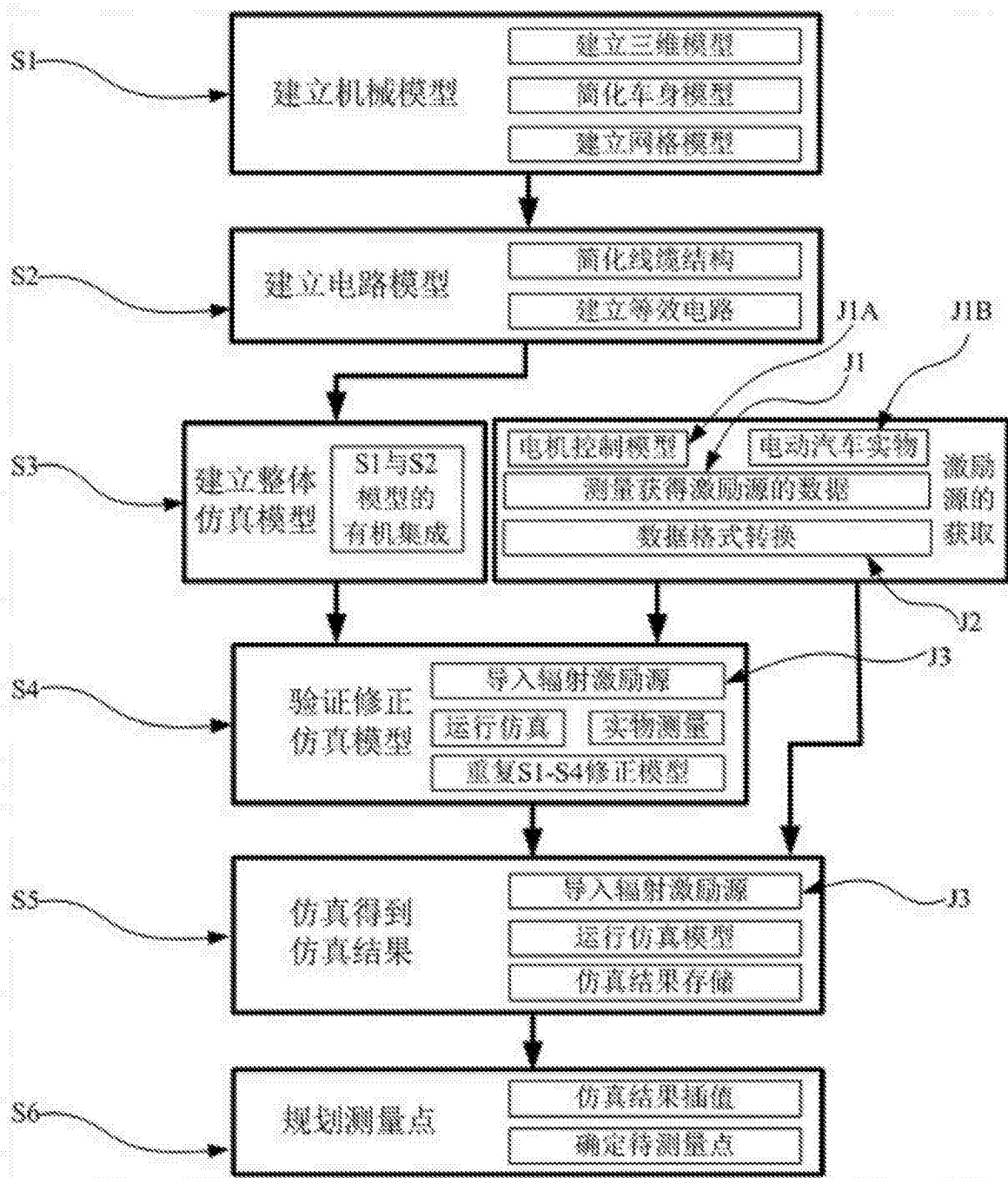


图 1

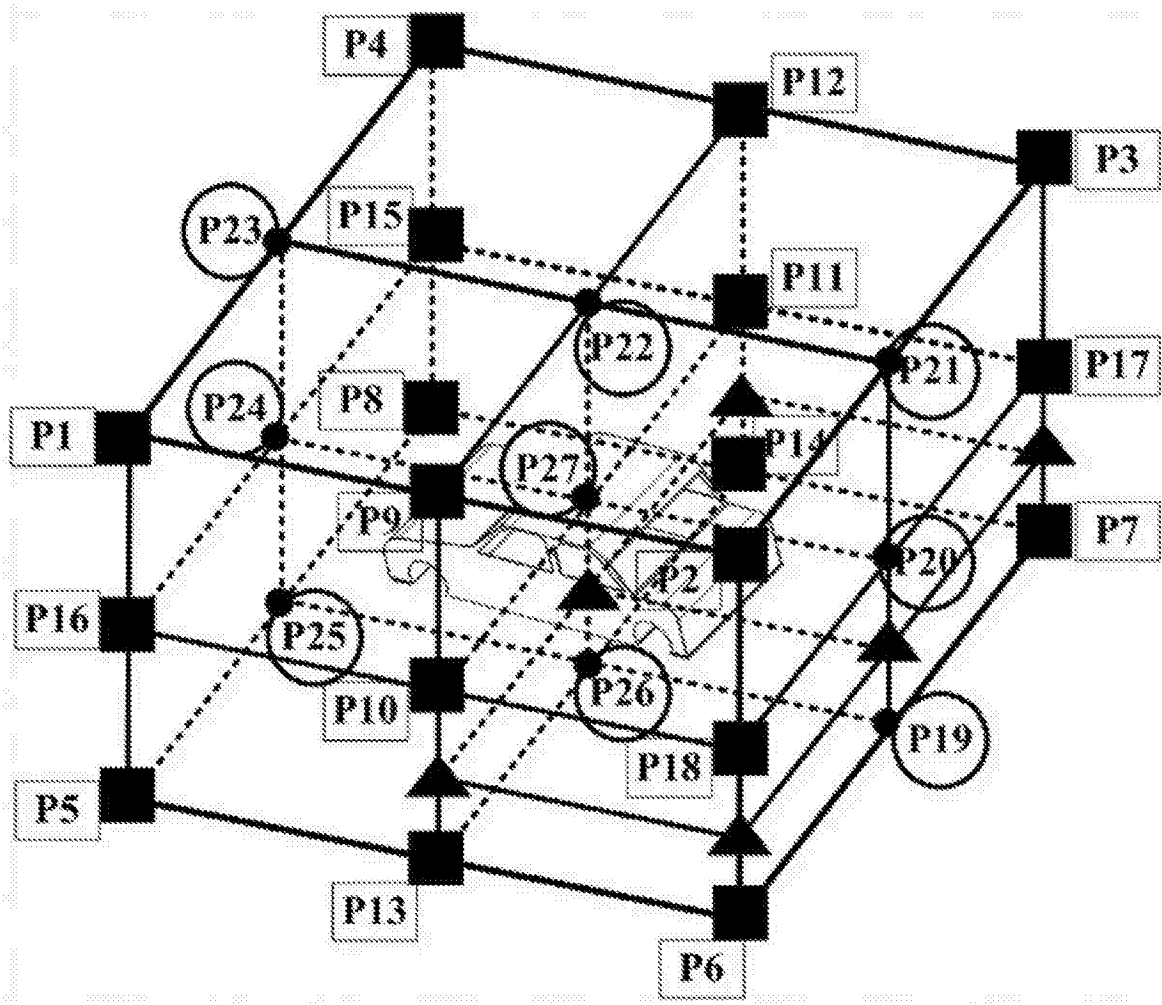


图 2