(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111812506 A
(43)申请公布日 2020.10.23

(21)申请号 202010403994.7

(22)申请日 2020.09.14

(71)申请人 东风汽车集团有限公司
地址 430056 湖北省武汉市武汉经济技术开发区东风大道特1号

(72)发明人 尹国慧 曹敏 王洪涛 李松 朱体刚

(74)专利代理机构 武汉开元知识产权代理有限公司 42104
代理人 俞鸿

(51)Int.Cl.
G01R 31/34(2006.01)
H02P 23/14(2006.01)

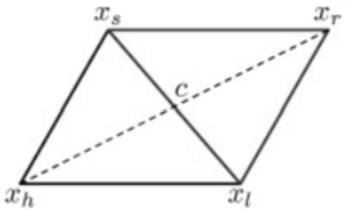
权利要求书2页 说明书11页 附图8页

(54)发明名称

基于单纯形法的永磁同步电机系统的自动标定系统及方法

(57)摘要

本发明提供了一种基于单纯形法的永磁同步电机系统的自动标定方法，包括以下步骤：对系统初始状态进行自检。对系统的功能进行自检；为针对待标定的点设定相应的冷却系统水温和流量以及台架电压；设定标定转速和标定的限制保护值及相关的边界；通直流母线电压，设定相关标定的步长；根据单纯形法进行当前待标定点的自寻优的标定，当达到扭矩精度，则进行下一个点的标定工作；当完成一个转速下的所有点，则进行升转速操作，然后重复步骤e；直至设置的所有转速都完成了自动标定寻优，最后将转速降为0，进行下一个直流母线电压的标定，直到预设的所有的母线电压。本发明自动完成升/降转速、温度范围控制的操作，提升了自动标定的自动化水平。



CN 111812506 A

1.一种基于单纯形法的永磁同步电机系统的自动标定方法,其特征在于包括以下步骤:

a.对系统初始状态进行自检;

b.对系统的功能进行自检;

c.为针对待标定的点设定相应的冷却系统水温和流量以及台架电压;

d.设定标定转速和标定的限制保护值及相关的边界;通直流母线电压并设定标定的步长;

e.根据单纯形法进行当前待标定点的扭矩标定,当达到扭矩精度,则进行下一个点的标定工作;

f.当完成一个转速下的所有点,则进行升转速操作,然后重复步骤e;直至设置的所有转速都完成了自动标定寻优,将转速降为0,进行下一个直流母线电压的标定,重新执行步骤d-f;

g.完成预设的所有的母线电压标定;结束自动标定。

2.根据权利要求1所述的基于单纯形法的永磁同步电机系统的自动标定方法,其特征在于所述步骤f包括以下步骤:假如当前扭矩标定需要进行升转速,先判断假如在当前转速增加一个转速步长后的值是否小于待标定转速的上边界;如果判断为是则进行升转速操作;如果判断为否,则进行下一个等级的直流母线电压的标定,将母线电压提升至相应的值后重新执行步骤d-f。

3.根据权利要求2所述的基于单纯形法的永磁同步电机系统的自动标定方法,其特征在于步骤e的扭矩标定包括以下步骤:

步骤1,针对当前待标定点设定目标扭矩,扭矩精度和初始电流指令;

步骤2,执行自寻优算法寻优运算;

步骤3,如果当前待标定点的目标转矩和反馈转矩的差值小于扭矩精度且满足最大转矩电流比则记录当前待标定点及其对应的目标转矩、转速和反馈扭矩;

步骤4,判断假如在当前转矩增加一个转矩步长后的值是否小于待标定转矩的上边界,如果判断为是,则进行下一个转矩点的标定操作,并重复步骤2-4;如果判断为否,则结束当前转速下的标定工作。

4.根据权利要求3所述的基于单纯形法的永磁同步电机系统的自动标定方法,其特征在于步骤2具体包括以下步骤:

S1,设置单纯形系数、目标函数及其系数;设置迭代次数及允许误差,对迭代次数进行初始化;设置起始点和搜索范围;

S2,根据随机函数和搜索范围,生成另外2个点与起始点构成变量空间的初始单纯形;

S3,将上述3个点输入电机系统,通过测试台架获取初始单纯形各顶点的反馈扭矩;并将各顶点及其对应的反馈扭矩代入目标函数获取对应的函数值;

S4,对计算得到的各顶点的函数值进行排序获得最大值、中间值、最小值及其对应的三个点,作为最差点、次差点和最优点;

S5,将最大值对应的点进行反射操作,以获得对应的反射点,将该反射点输入电机系统,获得反射点对应的反馈扭矩;

S6,根据反射点和反射点对应的反馈扭矩和目标函数,计算得到反射点对应的函数值;

S7,比较反射点对应的函数值和最优点对应的函数值,根据比较结果计算得到单纯形的坐标点及其对应的目标函数值并输出迭代次数;

S8,判断单纯形坐标点的目标函数值是否满足初始设定允许差范围;判断为是,则记录当前点完成本次点寻优;判断为否,则执行本判断是否达到了初始设置的最大迭代次数,本判断结果为“是”时,则再次判断单纯形坐标点的目标函数值是否满足初始设定允许差范围,为“否”时,跳转到S3。

5.根据权利要求3所述的基于单纯形法的永磁同步电机系统的自动标定方法,其特征在于所述步骤S7包括以下步骤:当反射点对应的函数值小于最优点对应的时,之前的反射点进行扩张得到相应的扩张点;将扩张点输入至电机系统得到反馈扭矩;根据扩张点及其对应的反馈扭矩计算得到目标函数值;将扩张点和反射点的目标函数值进行比较,当扩张点的值小于等于比反射点的值,则用扩张点替换最差点;当扩张点的值大于比反射点的,则用发射点替换最差点;替换后的最差点,再结合之前的最优点和次差点,形成新的单纯形;对迭代次数进行加一计数操作;根据得到的新的单纯形的坐标点获取其对应的目标函数值;迭代次数作为输出项。

6.根据权利要求3所述的基于单纯形法的永磁同步电机系统的自动标定方法,其特征在于所述步骤S7包括以下步骤:当反射点对应的函数值大于等于顶点函数值的最小值时,比较反射点和初始单纯形中次差点对应的函数值;

当反射点的函数值大于初始单纯形中次差点的函数值时,如果反射点的函数值小于等于初始单纯形中最差点的函数值,将反射点进行外部收缩以得到相应的收缩点;如果反射点的函数值大于初始单纯形中最差点的函数值,将反射点进行内部收缩以得到相应的收缩点;

将得到的收缩点输入电机系统得到反馈扭矩,通过反馈扭矩和收缩点获得对应的目标函数值;

收缩点对应的目标函数值与最差点的函数值进行比较,当收缩点的函数值大于最差点和反射点对应的函数值的较小值时,根据只保留最优点,对剩余的两个点其进行压缩处理,即使这两点到最优点的距离减半,然后这两个新的点替换旧单纯形顶点,构成新的单纯形;

当收缩点的函数值小于等于最差点和反射点对应的函数值的较小值时,采用用收缩点替换最差点;

当反射点的函数值小于等于初始单纯形中次差点的函数值时,

采用反射点替换点最差点;

替换后的最差点,再结合之前的最优点和次差点,形成新的单纯形;对迭代次数进行加一计数操作;根据得到的新的单纯形的坐标点获取其对应的目标函数值;迭代次数作为输出项。

7.一种基于单纯形法的永磁同步电机系统的自动标定系统,其特征在于包括上位机、电机、电机控制器、台架、电机控制器、冷却系统和功率分析仪;冷却系统用于为电机、电机控制器和台架提供冷却回路;电机控制器用于向电机发送控制指令;电机和台架向功率分析仪发送实时状态信号;上位机别与电机控制器和台架通信并分别发送相关的指令;电机控制器和台架采集信号通并发送至上位机;上位机对于采集到的信号进行判断,并执行权利要求1所述的基于单纯形法的永磁同步电机系统的自动标定方法。

基于单纯形法的永磁同步电机系统的自动标定系统及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及永磁同步电机技术领域，具体涉及一种自寻优的 永磁同步电机系统的自动标定系统及其方法。

背景技术

[0002] 全球能源与环境的严峻形势、特别是国际金融危机对汽车产 业的巨大冲击，推动世界各国加快交通能源战略转型，以混合动 力汽车、纯电动汽车和燃料电池汽车为代表的新能源汽车成为未 来汽车发展的重要方向。

[0003] 由于电动汽车在当前却面临着续驶里程短、电池价格贵、基 础设施不完善等困难，需要相当一段时间的努力才可能逐步解决；而新能源汽车在现阶段具备更好的产业化条件，新能源动力汽车 对我国汽车产业发展具有十分重要意义。

[0004] 目前，大多数厂家在电机台架标定的过程中都采用人工标定 的方法，即在不同的工况(不同需求转矩T和电机转速n)下，在 电压开环模式下，通过手工改变ud或uq的数值来匹配到最佳转 矩，从而得到需要的ud和uq表格的方法。此种方法在人工处理 过程中会产生读数误差；会导致电机温度变化范围较大，影响磁 链大小，进而影响标定精度；更重要的是，会占用宝贵的工程师 资源，花费较长的时间进行标定和数据处理，从而限制了电机台架标定的精度和标定工作效率的提高。手动标定的标定周期长，在台架开发试验中需要扫描大量的工况点，每个工况点的电压、电流、有需要保持在限定的边界范围内，试验工程师和标定工程 师的时间被消耗在大量重复性工作上面。手动标定的工作量大，扭矩精度要求越高，标定扭矩点分度越细，标定工作量呈几何级 数增加；测试结果后期还需要人为编辑标定数据和测试报告，且 无法保证报告的质量。人工标定严重依赖标定工程师的经验，难 以提高实车扭矩精度，手工错误导致时间的无效使用，导致测试 计划出现一再延迟。长期占用台架资源。

[0005] 检索现有的专利，中国专利文献公开了申请号为 CN106452266B的一种车载电机自动标定方法及装置。该发明专 利主要是根据直交轴电流与扭矩的输出计算得到扭矩常数，再根 据扭矩常数去进行曲线拟合，得到扭矩-直轴电流的最佳曲线。但是实际永磁同步电机，只有部分是线性区域，虽然该专利中说 明了通过增加采样点来提高标定的精度，但对于实际温度和非线 性区域对于电机标定的影响问题无法解决。

[0006] 检索现有的专利，中国专利文献公开了申请号为 CN109818543A，的一种电机自动标定方法、装置及控制器。该 专利的主要是通过直交轴电流和直交轴电压以及电机转矩的关 系进行数据处理之后获得不同转速下的给定转矩与直交轴电流 的对应关系，当然也有过温检测功能，但是对于具体的如何进行 数据处理并没有进行详细的说明，还要缺少对于电流保护以及自 动升降转速等功能。

[0007] 检索现有的专利，中国专利文献公开了申请号为 CN108226774A，的电动汽车用永磁同步电机的自动标定系统及 方法。该专利主要是用工控机自动测量满足电机控制器的极限电 压和电流的所有电流命令值，并且记录各个命令值下的定子电压 磁通扭矩以及温

度等参数，通过插值拟合的方式找到电机控制的 最优电流命令值，虽然是通过实际测量数据进行标定，但是由于 只是通过极限值去拟合其他点的最优电流命令值，这里面涉及的运算复杂，依然是基于一种预测，在实际标定中可能会存在一定 的偏差。

发明内容

[0008] 本发明的目的就是针对现有技术的缺陷，提供一种自寻优的 永磁同步电机系统的自动标定系统及其方法，够自动完成升/降 转速、温度范围控制的操作，提升了自动标定的自动化水平。

[0009] 本发明提供了一种基于单纯形法的永磁同步电机系统的自 动标定方法，其特征在于包括以下步骤：

[0010] a.对系统初始状态进行自检。

[0011] b.对系统的功能进行自检；

[0012] c.为针对待标定的点设定相应的冷却系统水温和流量以及 台架电压；

[0013] d.设定标定转速和标定的限制保护值及相关的边界；通高 压直流母线，设定相关标定的步长。

[0014] e.根据单纯形法进行当前待标定点的自寻优的标定，当达 到扭矩精度，则进行下一个点的标定工作；

[0015] f.当完成一个转速下的所有点，则进行升转速操作，然后重 复步骤e；直至设置的所有转速都完成了自动标定寻优，将转速 降为0，进行下一个直流母线电压的标定，重新执行步骤d-f；

[0016] g.完成预设的所有的母线电压标定；结束自动标定。

[0017] 上述技术方案中，所述步骤f包括以下步骤：假如当前扭矩 标定需要进行升转速，先判断假如在当前转速增加一个转速步长 后的值是否小于待标定转速的上边界；如果判断为是则进行升转 速操作；如果判断为否，则进行下一个等级的直流母线电压的标 定，将母线电压提升至相应的值后重新执行步骤d-f。

[0018] 上述技术方案中，步骤e的扭矩标定包括以下步骤：

[0019] 步骤1，针对当前待标定点设定目标扭矩，扭矩精度和初始 电流指令；

[0020] 步骤2，执行自寻优算法寻优运算；

[0021] 步骤3，如果当前待标定点的目标转矩和反馈转矩的差值小 于扭矩精度且满足最大转矩电流比则记录当前待标定点及其对 应的目标转矩、转速和反馈扭矩；

[0022] 步骤4，判断假如在当前转矩增加一个转矩步长后的值是否 小于待标定转矩的上边界，如果判断为是，则进行下一个转矩点 的标定操作，并重复步骤2-4；如果判断为否，则结束当前转速 下的标定工作。

[0023] 上述技术方案中，步骤2具体包括以下步骤：

[0024] S1，设置单纯形系数、目标函数及其系数；设置迭代次数及 允许误差，对迭代次数进行初始化；设置起始点和搜索范围；

[0025] S2，根据随机函数和搜索范围，生成另外2个点与起始点构 成变量空间的初始单纯形；

[0026] S3，将上述3个点输入电机系统，通过测试台架虎丘初始单 纯形各顶点的反馈扭

矩;并将各顶点及其对应的反馈扭矩代入目 标函数获取对应的函数值;

[0027] S4,对计算得到的各顶点的函数值进行排序获得最大值、中 间值、最小值及其对应的三个点,作为最差点、次差点和最优点;

[0028] S5,将最大值对应的点进行反射操作,以获得对应的反射点, 将该反射点输入电机系统,获得反射点对应的反馈扭矩;

[0029] S6,根据反射点和反射点对应的反馈扭矩和目标函数,计算 得到反射点对应的函数值;

[0030] S7,比较反射点对应的函数值和最优点对应的函数值,根据 比较结果计算得到单纯形的坐标点及其对应的目标函数值并输 出迭代次数;

[0031] S8,判断单纯形坐标点的目标函数值是否满足初始设定允许 差范围;判断为是,则记录当前点完成本次点寻优;判断为否, 则执行本判断是否达到了初始设置的最大迭代次数,本判断结果 为“是”时,则再次判断单纯形坐标点的目标函数值是否满足初始 设定允许差范围,为“否”时,跳转到S3。

[0032] 上述技术方案中,所述步骤S7包括以下步骤:当反射点对 应的函数值小于最优点对应的时,之前的反射点进行扩张得到相 应的扩张点;将扩张点输入至电机系统得到反馈扭矩;根据扩张 点及其对应的反馈扭矩计算得到目标函数值;将扩张点和反射点 的目标函数值进行比较,当扩张点的值小于等于比反射点的值, 则用扩张点替换最差点;当扩张点的值大于比反射点的,则用发 射点替换最差点;替换后的最差点,再结合之前的最优点和次差 点,形成新的单纯形;对迭代次数进行加一计数操作;根据得到 的新的单纯形的坐标点获取其对应的目标函数值;迭代次数作为 输出项。

[0033] 上述技术方案中,所述步骤S7包括以下步骤:当反射点对 应的函数值大于等于顶点函数值的最小值时,比较反射点和初始 单纯形中次差点对应的函数值;

[0034] 当反射点的函数值大于初始单纯形中次差点的函数值时,如 果反射点的函数值小于等于初始单纯形中最差点的函数值,将反 射点进行外部收缩以得到相应的收缩点;如果反射点的函数值大 于初始单纯形中最差点的函数值,将反射点进行内部收缩以得到 相应的收缩点;

[0035] 将得到的收缩点输入电机系统得到反馈扭矩,通过反馈扭矩 和收缩点获得对应的目标函数值;

[0036] 收缩点对应的目标函数值与最差点的函数值进行比较,当收 缩点的函数值大于最差点和反射点对应的函数值的较小值时,根 据只保留最优点,对剩余的两个点其进行压缩处理,即使这两点 到最优点的距离减半,然后这两个新的点替换旧单纯形顶点,构 成新的单纯形;

[0037] 当收缩点的函数值小于等于最差点和反射点对应的函数值 的较小值时,采用用收缩点替换最差点;

[0038] 当反射点的函数值小于等于初始单纯形中次差点的函数值 时,

[0039] 采用反射点替换点最差点;

[0040] 替换后的最差点,再结合之前的最优点和次差点,形成新的 单纯形;对迭代次数进行加一计数操作;根据得到的新的单纯形 的坐标点获取其对应的目标函数值;迭代次数作为输出项。

[0041] 一种基于单纯形法的永磁同步电机系统的自动标定系统,其 特征在于上位机、电机、电机控制器、台架、电机控制器、冷却 系统和功率分析仪;冷却系统用于为电机、电机控制器和台架提 供冷却回路;电机控制器用于向电机发送控制指令;电机和台架 向功率分析仪发送实时状态信号;上位机别与电机控制器和台架 通信并分别发送相关的指令;电机控制器和台架采集信号通并发 送至上位机;上位机对于采集到的信号进行判断,并执行所述的 基于单纯形法的永磁同步电机系统的自动标定方法。

[0042] 本发明具备完善对电流、温度、母线电压的保护功能,而且 只需要给定一个大致的初始点,就能完成对整个电机的MAP扫 点工作,中间运行过程无需人为操作,更无需像专利申请号为 CN106452266B的一种车载电机自动标定方法及装置和申请号 为CN109818543A的一种电机自动标定方法、装置及控制器, 这两个发明专利需要人为去计算转矩电流比,也不需要像申请号 为CN106452266B的一种车载电机自动标定方法及装置和申请 号为CN108226774A,的电动汽车用永磁同步电机的自动标定系 统及方法,去拟合参数或者曲线,大大提高了自动标定的适用范 围,而且本发明涉及到的方法是根据台架测试实时的进行寻优, 这样避免了拟合方法带来的后期不断修正,直接寻优完成后的数 据点,能够直接生成相关的MAP表,从真正意义上将标定工作 实现自动化。

[0043] 本发明公开了一种基于单纯形法的永磁同步电机系统的自 动标定方法,特别是一种基于DownHill Simplex寻优的永磁同 步电机系统的自动标定方法,包括:电机、电机控制系统、标定 上位机以及试验台架及相关电流、电压、温度传感器等组成的标 定系统,还包含在上位机中基于DownHill Simplex寻优相关算 法。由于本发明对于采用了自寻优方法,所以对于电压开环控制 系统的扭矩标定过程中能够有效的克服手工标定中的人为读数 误差,还能减小温度变化对于标定的影响,而且自寻优算法只需 要给定一个起始点,就能完成整个MAP的标定,并自动记录指 定的数据内容,相比拟合方法给定点的数量会直接影响到拟合的 精度,所以自寻优算法比基于拟合的方法对于标定结果有着更高 的精确度。而且在运行过程中不需要人为操作,上位机能够跟台 架通讯完成升/降转速、温度范围控制等操作,极大程度上减轻 标定工程师的工作量,可以实现全天候自动运行,提高了台架的 资源利用效率,极大程度提高了自动标定的自动化程度。

附图说明

[0044] 图1 downhill simplex单纯形法的反射原理图

[0045] 图2 downhill simplex单纯形法的扩张原理图

[0046] 图3 downhill simplex单纯形法的外部收缩原理图

[0047] 图4 downhill simplex单纯形法的内部收缩原理图

[0048] 图5 downhill simplex单纯形法的压缩原理图

[0049] 图6本发明的整体流程框图

[0050] 图7是本发明的局部流程框图

[0051] 图8是本发明的系统结构示意图

[0052] 图9基于downhill simplex的自动标定单点寻优方法的总流程图

[0053] 图10基于downhill simplex的自动标定单点寻优方法的子流程 1图

[0054] 图11基于downhill simplex的自动标定单点寻优方法的子流程 2图。

具体实施方式

[0055] 下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步的详细说明，便于清楚地了解本发明,但它们不对本发明构成限定。

[0056] 如图所示,本发明供了一种自寻优的永磁同步电机系统的自 动标定系统及其方法,特别是将电机系统的手动标定工作中的重 复性内容被机器所替代,大幅度减少标定工程师的工作重复度；且对手动标定过程中人为误差进行了抑制,提升了标定的整体精 度,而且对于标定工作的效率有着明显提升,缩短了电机标定周 期。对于标定过程中,程序能够自动完成升/降转速、温度范围 控制的操作,提升了自动标定的自动化水平。

[0057] 基于DownHill Simplex寻优的永磁同步电机系统的自动标 定原理框图如图六所示,因为对于标定工作,其实就是根据最大 转矩电流比以及目标转矩的值进行(ud,uq)点的综合评估,

[0058] 自动标定基于现在使用的自主开发的标定系统(MCU)和 基于DBC文件的标定软件,切换到国际标准的ASAM2协议，解析现有的数据并自动生成ASAM2标准的文件,自动生成的 ASAM2文件能导入到标定软件。

[0059] 标定软件满足如刷写标定数据、在线修改标定变量、实时监 控记录测量变量、标定数据管理以及测量数据离线分析处理。

[0060] 测量硬件连接MCU和标定软件,并与台架PUMA通讯,测 量电机的电流、电压和温度。

[0061] 自动标定软件控制标定软件以及PUMA台架,丰富的接口 和库,良好的图形化界面,自动完成大部分的标定测量任务。

[0062] 如图六简单示出了实现本发明的方法的系统流程原理。系统 主要是由台架上位机、电机控制器MCU、电机、台架冷却系统、 测功机PUMA系统组成,系统运行中涉及了电机转速控制、温 度控制及保护、电流保护限定、信号反馈、台架实测扭矩和台架 转速控制等工作过程。

[0063] 对于整个电机的具体的扫点的流程如下：

[0064] 第一步:先是通讯方面的自检,上位机跟台架和电机控制器 进行通讯测试、数据采集设备以及功率计的自检。然后是传感器 的自检,电压、电流、温度、扭矩以及转速等传感器的自检。

[0065] 第二步:是系统功能上下电自检:其中包括了对于台架基本 功能的自检,比如上下高压电、测功机的低速运行等,然后对于 整个冷却系统的水温以及流量的控制,电机系统的开关使能、以 及相关指令的响应等,最后还要涉及到采集系统能否正确的采集 到功率、扭矩、转速等指标。

[0066] 第三步:为标定设定好相应的水温以及流量,设定好标定的 限制保护值及相关的边界。然后上高压(需要标定的电压值)，设定相关标定的步长。

[0067] 第四步:根据相关的算法进行当前点的扭矩标定,当满足退 出条件(达到扭矩精度)那么则进行下一个点的标定工作

[0068] 第五步:当完成一个转速下的所有点,则需要进行升转速操 作,然后重复第四步的内容。直至设置的所有转速都完成了自动 标定寻优。最后将转速降为0,结束自动标定。

[0069] 上述技术方案中,所述第五步包括以下步骤:假如当前扭矩 标定需要进行升转

速,先判断假如在当前转速增加一个转速步长 后的值是否小于待标定转速的上边界;如果判断为是则进行升转 速操作;如果判断为否,则进行下一个等级的直流母线电压的标 定,将母线电压提升至相应的值后,重新执行步骤d-f。

[0070] 上述技术方案中,第四步的扭矩标定包括以下步骤:

[0071] 步骤1,针对当前待标定点设定目标扭矩,扭矩精度和初始 电流指令;

[0072] 步骤2,执行自寻优算法寻优运算;

[0073] 步骤3,如果当前待标定点的目标转矩和反馈转矩的差值小 于扭矩精度且满足最大转矩电流比则记录当前待标定点及其对 应的目标转矩、转速和反馈扭矩;

[0074] 步骤4,判断假如在当前转矩增加一个转矩步长后的值是否 小于待标定转矩的上边界,如果判断为是,则进行升转矩操作, 并重复步骤2-4;如果判断为否,则进行下一个点的标定工作。

[0075] 对于上面的描述是对于外围整个电机的标定点的总运行步 骤,但是对于每个点进行寻优的算法downhill simplex的内容(即 步骤2)会有如下步骤:

[0076] 2.设定目标函数及其系数,目标函数公式如下:

[0077] $$Y = f(I_d, I_q) = \left| a \times (Te_f - Te_r) + b \times \left(\sqrt{I_d^2 + I_q^2}/Te_f\right) \right| \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

[0078] 其中,Te_r指目标扭矩,Te_f指当前点的反馈扭矩,a和b为 系数值,I_d和I_q分别指d轴和q轴的电流值。

[0079] 3.设置迭代次数N及允许误差Tolerance;并对迭代次数进 行初始化,即令n=0;

[0080] 4.设置起始点(U_{d0},U_{q0});

[0081] 5.设置搜索范围([$U_{d0}-\Delta d0$,$U_{d0}+\Delta d0$],[$U_{q0}-\Delta q0$,$U_{q0}+\Delta$ q0])。

[0082] 步骤|102

[0083] 根据随机函数rand(U_{d0},U_{q0})结合102步骤中的搜索范围 ([$U_{d0}-\Delta d0$,$U_{d0}+\Delta d0$],[$U_{q0}-\Delta q0$,$U_{q0}+\Delta q0$]),生成另外2个点 (U_{d1},U_{q1})和(U_{d2},U_{q2}),与起始点(U_{d0},U_{q0})构成变量空间的初始单 纯形。

[0084] 步骤|103

[0085] 将点P_0=(U_{d0},U_{q0})、P_1=(U_{d1},U_{q1})、P_2=(U_{d2},U_{q2})输入至电机系 统,通过测试台架获取这些初始单纯形各顶点的反馈扭矩Te_f(Pi), 式中i=0、1、2;

[0086] 步骤|104

[0087] 然后将点Pi=(U_{di},U_{qi})以及其对应的反馈扭矩Te_f(Pi)代入目 标函数公式(1)进行计算对应的Y值。

[0088] 步骤|105

[0089] 对在104中计算的其函数值Yi进行排序,形成$Y_{min} \leqslant Y_{mid} \leqslant Y_{Max}$;这三个对应的点($U_d$,$U_q$)分别记为$P_{min}$,$P_{mid}$,$P_{max}$

[0090] 步骤|106

[0091] 对这P_{min}(U_d,U_q),P_{mid}(Ud,Uq),P_{max}(U_d,U_q)中,最差的点P_{max}进行“反射”操作,根据前文中介绍的反射变换理论,得到相应 的反射点$P_{reflection}$=(U_{dr},U_{qr}),步骤|107

[0092] 然后将106中得到的这个反射点$P_{reflection}$=(U_{dr},U_{qr})输入至 SVPWM闭环控制的电机系统,得到反射点相应的反馈扭矩 $Te_{reflection}$(U_{dr},U_{qr})。

[0093] 步骤|108

[0094] 将107中得到的$Te_{reflection}(U_{dr},U_{qr})$、$U_{dr}$、$U_{qr}$这三个变量值，根据公式(1)计算相应的目标函数$Y_{reflection}(U_{dr},U_{qr})$的值。

[0095] 步骤|109

[0096] 然后将108中得到的反射点函数值$Y_{reflection}(U_{dr},U_{qr})$与105 中得到的$Y_{min}$进行比较操作。

[0097] 步骤|110

[0098] 本分支是对应在109中的判断为“是”时，即反射点比初始 单纯形的最优点更好，去执行子流程2。

[0099] 步骤|111

[0100] 本分支是对应在109中的判断为“否”时，即反射点比初始 单纯形的最优点更差，去执行子流程1。

[0101] 步骤|112

[0102] 本分支是对应在113中的判断为“否”时，即没有达到目标 值，去执行本判断是否达到了初始设置的最大迭代次数N，即判 断条件为$n \geq N$。本判断结果为“是”时，则跳转到114；为“否” 时，跳转到103。

[0103] 步骤|113

[0104] 本判断是对应在110或111中的计算过程中的Y值，当所 有的Y值是否满足在初始设定的允许误差范围内，即判断Y值 ≤允许误差时。

[0105] 步骤|114

[0106] 本分支是对应在113或者112中的判断为“是”时，去记录 当前的点(U_d,U_q)。然后完成本次点的寻优。

[0107] 步骤|201

[0108] 本步骤子流程2对应在步骤110的起始，根据步骤109中判 断为“是”时，执行本子模块。

[0109] 步骤|202

[0110] 根据步骤109中判断为“是”时，那么代表反射点 $Y_{reflection}(U_{dr},U_{qr})$比初始单纯形中的最优点$Y_{min}$还要好，所以需 要进行同向的试探，从而进行扩张操作，根据前文中介绍的扩张 变换理论，将之前的反射点$P_{reflection}$进行扩张得到相应的扩张点 $P_{expansion}=(U_{dr},U_{qr})$。

[0111] 步骤|203

[0112] 根据步骤202中得到的扩张点$P_{expansion}=(U_{de},U_{qe})$，输入至 SVPWM闭环控制的电机系统得到反馈扭矩$Te_{expansion}(U_{de},U_{qe})$。

[0113] 步骤|204

[0114] 根据将203中得到的$Te_{expansion}(U_{de},U_{qe})$、$U_{de}$、$U_{qe}$这三个变 量值，根据公式(1)计算相应的目标函数$Y_{expansion}(U_{de},U_{qe})$的值。

[0115] 步骤|205

[0116] 将204中扩张点的$Y_{expansion}(U_{de},U_{qe})$值与反射点的 $Y_{reflection}(U_{dr},U_{qr})$进行比较，当扩张点$P_{expansion}(U_{de},U_{qe})$值比反射 点的$P_{reflection}(U_{dr},U_{qr})$还要好，即$Y_{expansion}(U_{de},U_{qe}) \leq$

$Y_{reflection}(U_{dr},U_{qr})$，那么跳转执行206；否则即$Y_{expansion}(U_{de},U_{qe})$ ＞$Y_{reflection}(U_{dr},U_{qr})$去执行207。

[0117] 步骤|206

[0118] 根据步骤205中判断为“是”时，那么代表$P_{expansion}(U_{de},U_{qe})$ 值比反射点的$P_{reflection}(U_{dr},U_{qr})$还要好，所以用扩张点 $P_{expansion}=(U_{de},U_{qe})$替换$P_{max}$。

[0119] 步骤|207

[0120] 根据步骤205中判断为“否”时，那么代表$P_{expansion}(U_{de},U_{qe})$ 值比反射点的$P_{reflection}(U_{dr},U_{qr})$差一些，所以用反射点$P_{reflection}=$ (U_{dr},U_{qr})替换P_{max}。

[0121] 步骤|208

[0122] 根据步骤206或者207中对点P_{max}做替换之后，再结合之前 的P_{min},P_{mid}这两个点，又形成新的单纯形；并且在本步骤中对 迭代次数进行加一计数操作，即n＝n+1。

[0123] 步骤|209

[0124] 根据步骤208中得到单纯形的坐标点$Pi=(U_{di},U_{qi})$其中i＝0,1,2；以及其对应的Yi值；以及迭代次数n作为子流程2的 输出项。

[0125] 步骤|301

[0126] 本步骤子流程1对应在步骤111的起始，根据步骤109中判 断为“否”时，执行本子模块。

[0127] 步骤|302

[0128] 根据步骤109中判断为“否”时，执行本判断$Y_{reflection}(U_{dr},U_{qr})$ 与初始单纯形中的次差点Y_{mid}的值进行对比，即$Y_{reflection}(U_{dr},U_{qr})$ ＞Y_{mid}作为判断条件。当判断结果为“是”时，进行303；否 则执行311。

[0129] 步骤|303

[0130] 根据步骤302中判断为“是”时，执行本判断$Y_{reflection}(U_{dr},U_{qr})$ 与初始单纯形中的最差点Y_{max}的值进行对比，即$Y_{reflection}(U_{dr},U_{qr})$ ＞Y_{max}作为判断条件。当判断结果为“是”时，进行305进行 内部收缩；否则执行304外部收缩。

[0131] 步骤|304

[0132] 那么代表反射点$Y_{reflection}(U_{dr},U_{qr})$比初始单纯形中的最差点 Y_{max}要好一些，所以需要进行反向的试探，从而进行外部收缩 操作，根据前文中介绍的外部收缩变换理论，将之前的反射点 $P_{reflection}$进行收缩得到相应的收缩点$P_{contraction}=(U_{dc},U_{qc})$，此时收 缩点在初始单纯形外部。

[0133] 步骤|305

[0134] 那么代表反射点$Y_{reflection}(U_{dr},U_{qr})$比初始单纯形中的最差点 Y_{max}还要差，所以需要进行反向的试探，从而进行收缩操作， 根据前文中介绍的内部收缩变换理论，将之前的反射点$P_{reflection}$进行收缩得到相应的收缩点$P_{contraction}=(U_{dc},U_{qc})$，此时收缩点在 初始单纯形内部。

[0135] 步骤|306

[0136] 根据步骤304或者305中得到的收缩点$P_{contraction}=(U_{dc},U_{qc})$， 输入至SVPWM闭环控制的电机系统得到反馈扭矩$Te_{contraction}$ (U_{dc},U_{qc})的值。

[0137] 步骤|307

[0138] 根据将306中得到的$Te_{contraction}(U_{dc},U_{qc})$、$U_{dc}$、$U_{qc}$这三个 变量值，根据公式(1)计算相应的目标函数$Y_{contraction}(U_{dc},U_{qc})$的 值。

[0139] 步骤|308

[0140] 将307中收缩点$P_{contraction}=(U_{dc},U_{qc})$对应的$Y_{contraction}(U_{dc},U_{qc})$ 值与最坏点的Y_{max}进行比较，当收缩点$P_{contraction}=(U_{dc},U_{qc})$比最 坏点的$P_{max}$还要差，即$Y_{contraction}(U_{dc},U_{qc})>\min(Y_{max},Y_{reflection})$， 说明单纯形太大，需要进行压缩，那么执行309；否则即$Y_{contraction}(U_{dc},U_{qc})\leqslant\min(Y_{max},Y_{reflection})$，去跳转执行310。

[0141] 步骤|309

[0142] 根据步骤308中判断为“是”时，那么收缩点 $P_{contraction}=(U_{dc},U_{qc})$比反射点$P_{max}$还要差，说明单纯形太大，需要 进行压缩，根据前文中介绍的单纯形shrink压缩变换理论，所以只保留相对最优的点P_{min}，剩余的两个点P_{mid}，P_{max}对其进行 压缩处理，即使这两点到Pm_{in}点的距离减半，然后这两个新的 点替换旧单纯形顶点，构成新的单纯形。

[0143] 步骤|310

[0144] 根据步骤308中判断为“否”时，那么收缩点 $P_{contraction}=(U_{dc},U_{qc})$比最差点$P_{max}$要好，所以用收缩点 $P_{contraction}=(U_{dc},U_{qc})$替换$P_{max}$。

[0145] 步骤|311

[0146] 根据步骤302，判断出反射点的值$Y_{reflection}(U_{dr},U_{qr})$与初始单 纯形中的最差点$Y_{max}$的关系满足$Y_{reflection}(U_{dr},U_{qr})\leqslant Y_{max}$，说明 当前反射点介于最好最差点之间，那么用点$P_{reflection}$替换点$P_{max}$。

[0147] 步骤|312

[0148] 根据步骤(309或310或311)中对点P_{max}做替换之后，再 结合之前的P_{min}，P_{mid}这两个点，又形成新的单纯形；并且在本 步骤中对迭代次数进行加一计数操作，即$n=n+1$。

[0149] 步骤|313

[0150] 根据步骤312中得到的单纯形的坐标点$Pi=(U_{di},U_{qi})$其中 $i=0,1,2$；以及其对应的Yi值；以及迭代次数n作为子流程1的 输出项。

[0151] 本发明能够实时监测电机温度，并且将电机温度自动控制在 指定的范围内进行自动标定，这样能够尽量减少温度波动对标定 的影响。根据设置的目标外特性曲线，程序不仅能够在同一转速 下自动跳转至下一个扭矩点进行寻优，而且能够与台架进行通讯 并完成升/降转速的操作。根据不同的(u_d,u_q)，送入至电机系 统，然后根据台架的反馈扭矩Te_f，在上位机中进行DownHill Simplex寻优运算，如此循环直到达到设定的次数上限或者满足 设定的目标函数的允许误差后，退出循环并记录当前寻优的$(u_d,\ u_q)$点。对于是否达到目标扭矩有相应的毫秒级判断，这样能够 避免人工判断和记录带来的工作量和误差。当完成每个点的寻优 后，将寻优点的(u_d,u_q)和对应的转速、目标扭矩Te_r、当前 点的反馈扭矩Te_f，进行自动记录。

[0152] 本具体实施例中涉及的寻优算法DownHill Simplex是一种 常用的寻优算法，算法原理如下：

[0153] 尽管该方法非常简单，但实现的方式多种多样。除了基本算 法中一些次要的计算细节外，不同点主要区别在于初始单纯形的 构造，以及用于结束迭代过程的收敛或终止测试的选择。下列主 要介绍的算法适用对象是二维空间的单纯形。

[0154] 初始单纯形

[0155] 初始单纯形S通常是由给定的输入点，$P_{in}=P_0(U_{d0},U_{q0})$来生 成另外的两个单纯形顶点，$Pj=P_0+h_j*e_j$，j＝1,2,其中$h_j$是沿单位向 量$e_j$的步长。而且S单纯形为规则单纯形，其中所有边具有相 同的指定长度。

[0156] 单纯形计算算法如下。

[0157] 排序：确定系数min/mid/max分别代表最优点、次差点、最 差点。

[0158] 所以排序必须满足$Y_{min}\leqslant f_{mid}\leqslant f_{max}$。

[0159] 质心：计算质心c最佳边的对边是最差顶点的对边，在本算 法中，质心

[0160] C＝(P1+P2)/2；

[0161] 变换函数：基于当前的单纯形用于计算新的运算单纯形。第 一点，通过反射，扩张或者收缩去取代最差点P_{max}去满足最好 的一侧。算法中所有的尝试点都位于最差点P_{max}和质心C构成 的直线上，而且在每一次迭代都去计算他们中的两个。如果成功， 那么新接受的点会变成运算单纯形新的顶点。如果失败，则向最 优点P_{min}对单纯形进行shrink压缩操作。

[0162] 首先说明下，反射系数是α，contraction收缩系数是β，扩 张系数是γ，shrink压缩系数是δ。这些系数应该满足：

[0163] α＞0,0＜β＜1,γ＞1,γ＞α,0＜δ＜1.

[0164] 本具体实施采用的算法中设置的值为α＝1,β＝0.5,γ＝2, δ＝0.5

[0165] 下面介绍算法中用到的几种变换的原理。

[0166] 反射：如图1所示，计算反射点$P_{reflection}=C+\alpha(C-P_{max})$而且 $Y_{reflection}=Y(P_{reflection})$。假如$Y_{min}\leqslant Y_{reflection}<Y_{mid}$，那么接受该反 射点$P_{reflection}$并终止迭代。

[0167] 扩张：如图2所示，如果$Y_{reflection}<Y_{min}$，计算扩张点$P_{expansion}=C+\gamma(P_{reflection}-C)$，如果扩张点$Y_{expansion}<Y_{reflection}$，那 么接受扩张点$P_{expansion}$而且终止迭代。否则(如果$Y_{expansion}\geqslant Y_{reflection}$)，接受反射点$Y_{reflection}$，并且终止迭代。

[0168] contraction收缩：如果$Y_{reflection}\geqslant Y_{mid}$，用两个更好的点$P_{max}$和$P_{reflection}$计算收缩点$P_{contraction}$，

[0169] 外部收缩：如图3所示，$Y_{mid}\leqslant Y_{reflection}<Y_{max}$，计算 $P_{contraction}=C+\beta*(P_{reflection}-C)$，如果$Y_{contraction}\leqslant Y_{reflection}$，那么接受 收缩点$P_{contraction}$且终止迭代。

[0170] 内部收缩：如图4所示，$Y_{reflection}\geqslant Y_{max}$，计算$P_{contraction}=C+\beta*(P_{max}-C)$，而且$Y_{contraction}<Y_{max}$，接受收缩点$P_{contraction}$并且 终止迭代。

[0171] 其他情况，如图5所示，则采用shrink压缩转换。

[0172] shrink压缩转换：如图5所示，计算另外另两个新的顶点， $P_j=P_{min}+\delta*(P_j-P_{min})$，其中j＝0,1,2…，但是j≠min值。

[0173] 最后的shrink压缩变换主要是是为了阻止算法陷入以下的 情况：

[0174] 失败的contraction收缩虽然是非常少见，但当一个“山谷” 是弯曲的，且单纯形的一个点比其他点离谷底远得多时，这种情 况就会发生contraction收缩失败；

[0175] contraction收缩可能会导致反射点向逃离谷底移动而不是 向谷底移动。然后进一步的收缩是无用的。所以建议的动作将单 纯形采用contraction向最低点收缩，并最终将所有的点都带入 “山谷”。

[0176] 本说明书未作详细描述的内容属于本领域专业技术人员公 知的现有技术。

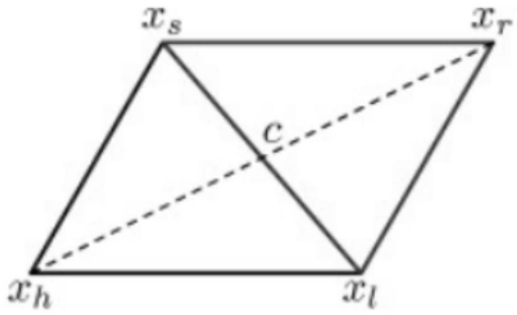


图1

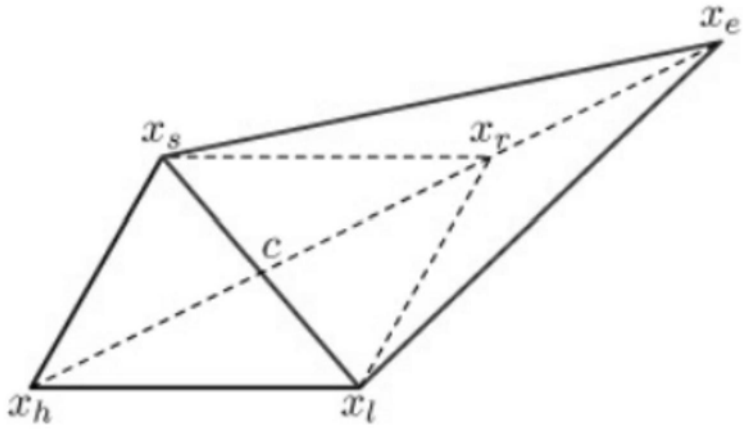


图2

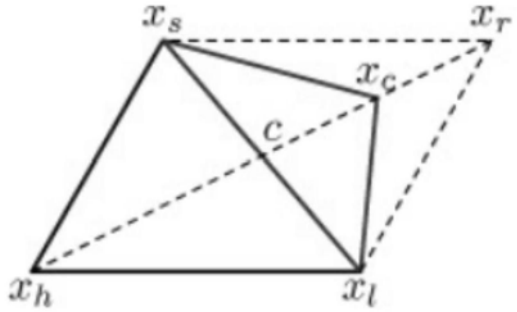


图3

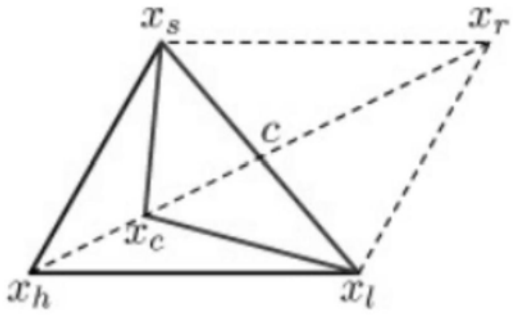


图4

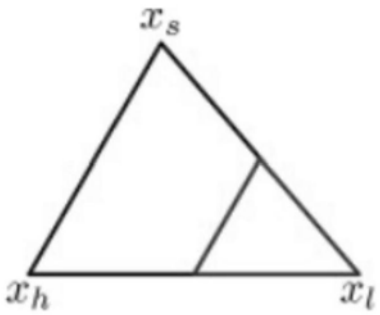


图5

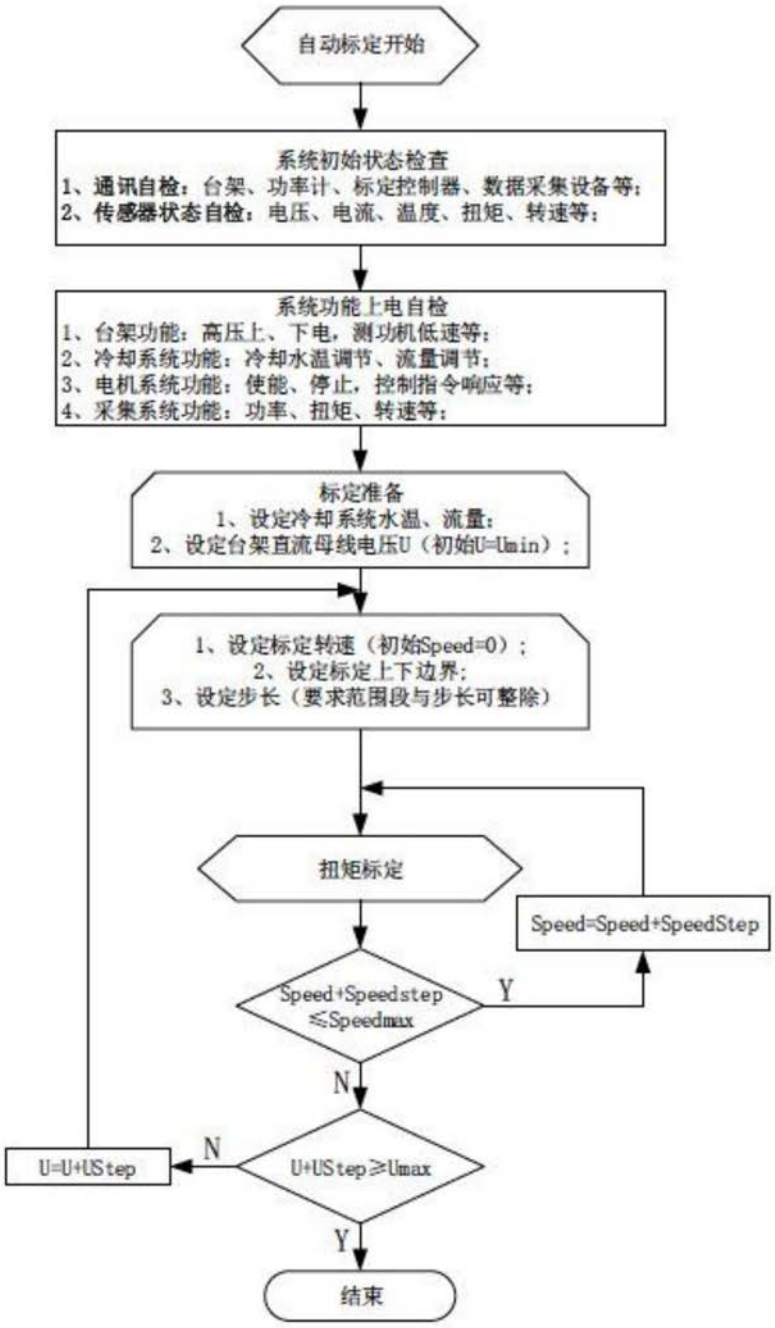

自动标定开始
系统初始状态检查
1、通讯自检：台架、功率计、标定控制器、数据采集设备等；
2、传感器状态自检：电压、电流、温度、扭矩、转速等；
系统功能上电自检
1、台架功能：高压上、下电，测功机低速等；
2、冷却系统功能：冷却水温调节、流量调节；
3、电机系统功能：使能、停止，控制指令响应等；
4、采集系统功能：功率、扭矩、转速等；
标定准备
1、设定冷却系统水温、流量；
2、设定台架直流母线电压U（初始U=Umin）；
1、设定标定转速（初始Speed=0）；
2、设定标定上下边界；
3、设定步长（要求范围段与步长可整除）
扭矩标定
Speed=Speed+SpeedStep
Speed+Speedstep≤Speedmax
Y
N
U+UStep≥Umax
N
U=U+UStep
Y
结束

图6

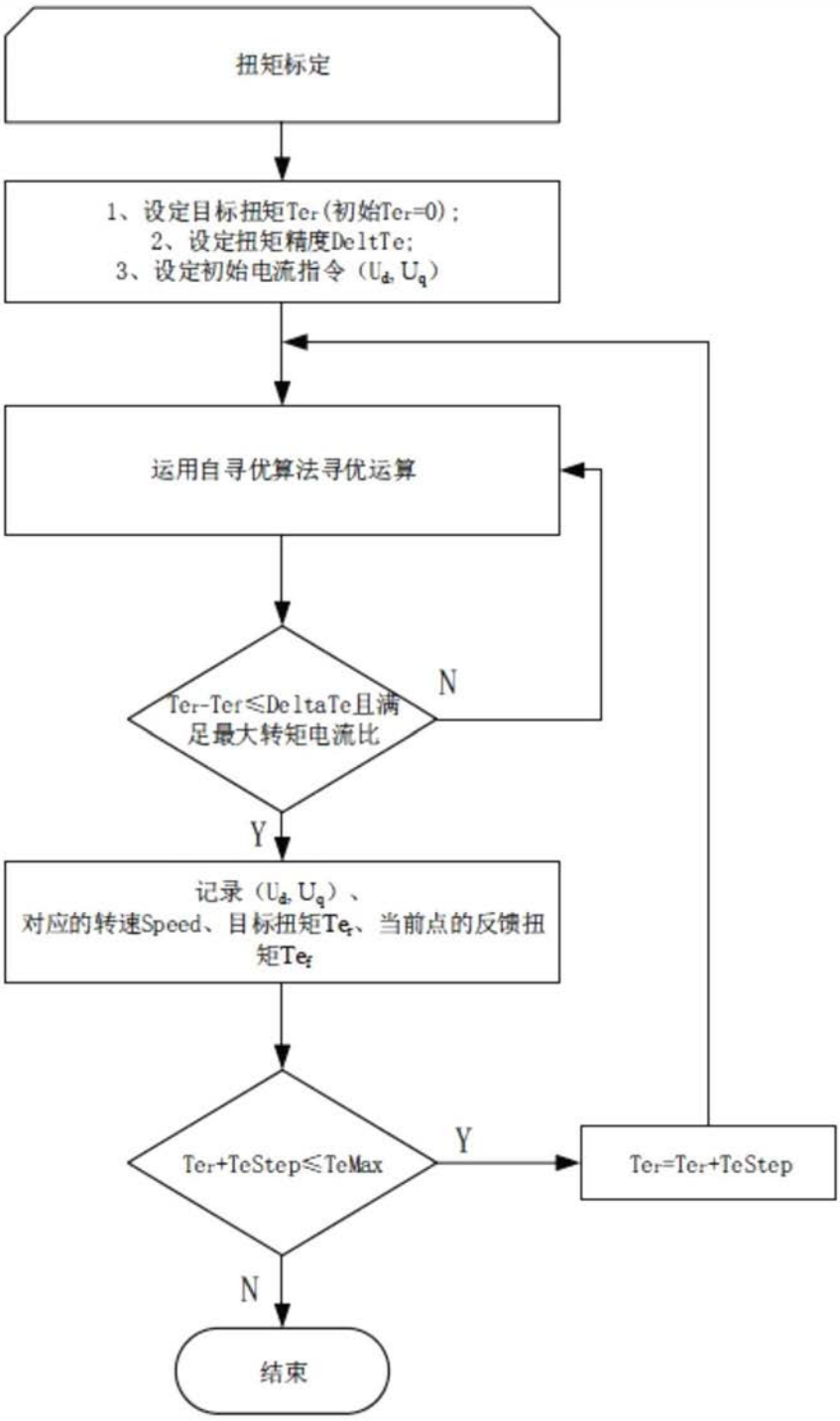

扭矩标定
1、设定目标扭矩Ter(初始Ter=0)；
2、设定扭矩精度DeltTe;
3、设定初始电流指令（Ud, Uq）
运用自寻优算法寻优运算
Ter-Tef≤DeltaTe且满足最大转矩电流比
N
Y
记录（Ud, Uq）、对应的转速Speed、目标扭矩Te、当前点的反馈扭矩Tef
Ter+TeStep≤TeMax
Y
Ter=Ter+TeStep
N
结束

图7

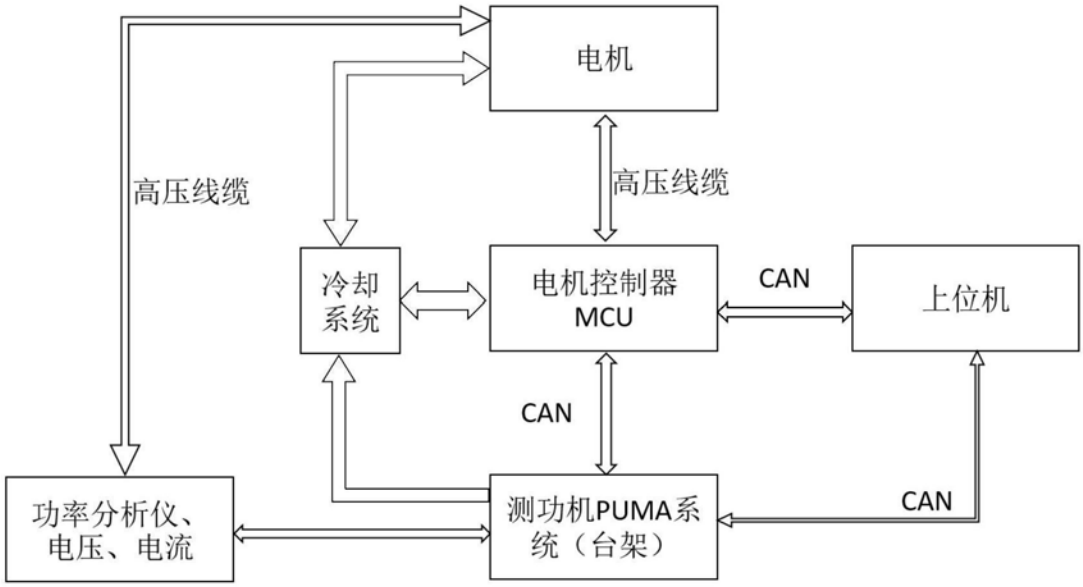

电机
高压线缆
高压线缆
冷却
系统
电机控制器
MCU
CAN
上位机
CAN
功率分析仪、
电压、电流
测功机PUMA系
统（台架）
CAN

图8

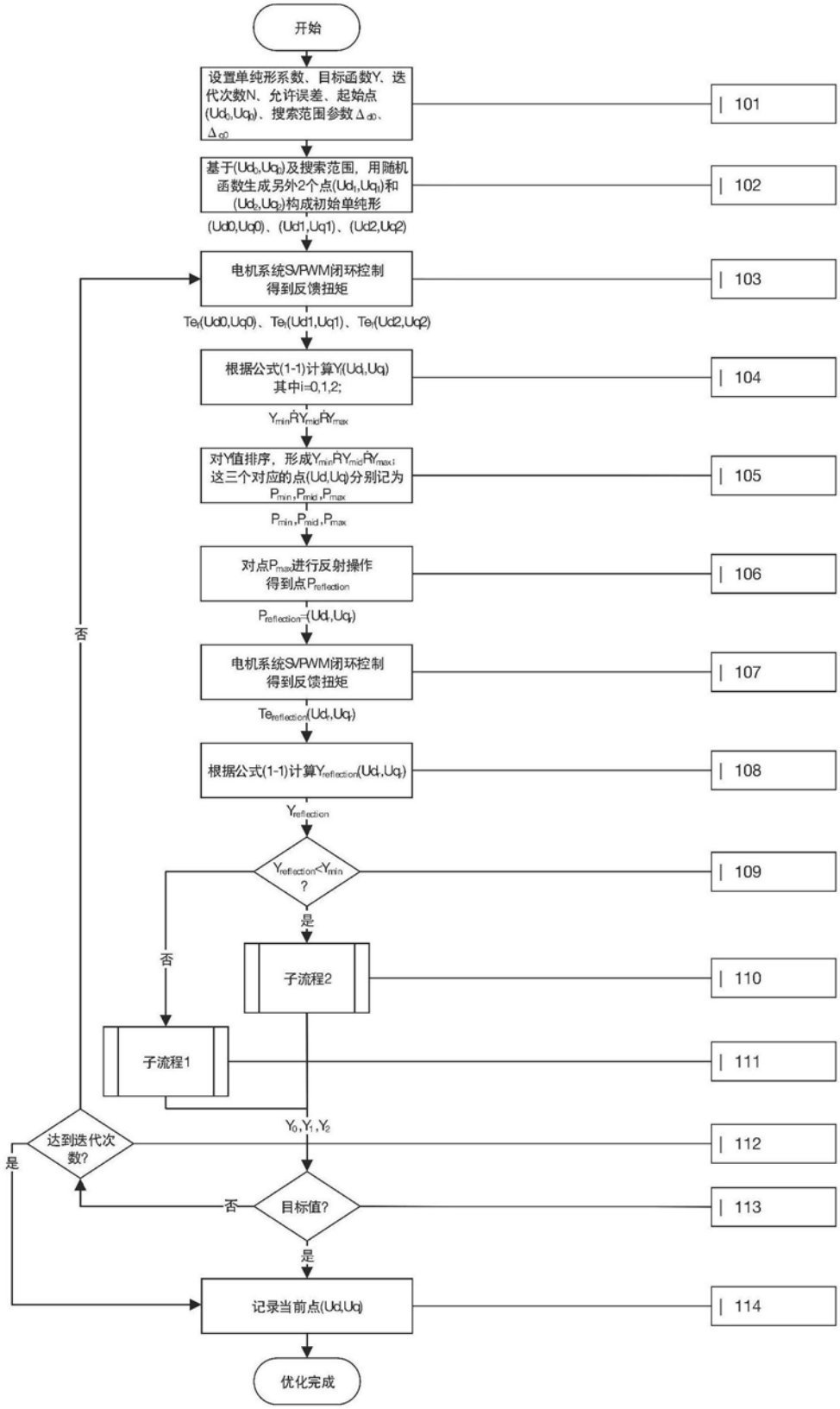

开始
设置单纯形系数、目标函数Y、迭代次数N、允许误差、起始点(Ud_0,Uq_0)、搜索范围参数Δ_{d0}、Δ_{q0}
101
基于(Ud_0,Uq_0)及搜索范围，用随机函数生成另外2个点(Ud_1,Uq_1)和(Ud_2,Uq_2)构成初始单纯形
102
(Ud0,Uq0)、(Ud1,Uq1)、(Ud2,Uq2)
电机系统SVPWM闭环控制得到反馈扭矩
103
Te_i(Ud0,Uq0)、Te_i(Ud1,Uq1)、Te_i(Ud2,Uq2)
根据公式(1-1)计算Y(Ud,Uq)其中i=0,1,2;
104
Y_{min}、Y_{mid}、Y_{max}
对Y值排序，形成Y_{min}、Y_{mid}、Y_{max}；这三个对应的点(Ud,Uq)分别记为P_{min},P_{mid},P_{max}
105
P_{min},P_{mid},P_{max}
对点P_{max}进行反射操作得到点$P_{reflection}$
106
$P_{reflection}$=(Ud,Uq)
电机系统SVPWM闭环控制得到反馈扭矩
107
$Te_{reflection}$(Ud,Uq)
根据公式(1-1)计算$Y_{reflection}$(Ud,Uq)
108
$Y_{reflection}$
$Y_{reflection}$<Y_{min} ?
109
是
否
子流程2
110
子流程1
111
Y_0,Y_1,Y_2
达到迭代次数?
112
是
否
目标值?
113
是
记录当前点(Ud,Uq)
114
否
优化完成

图9

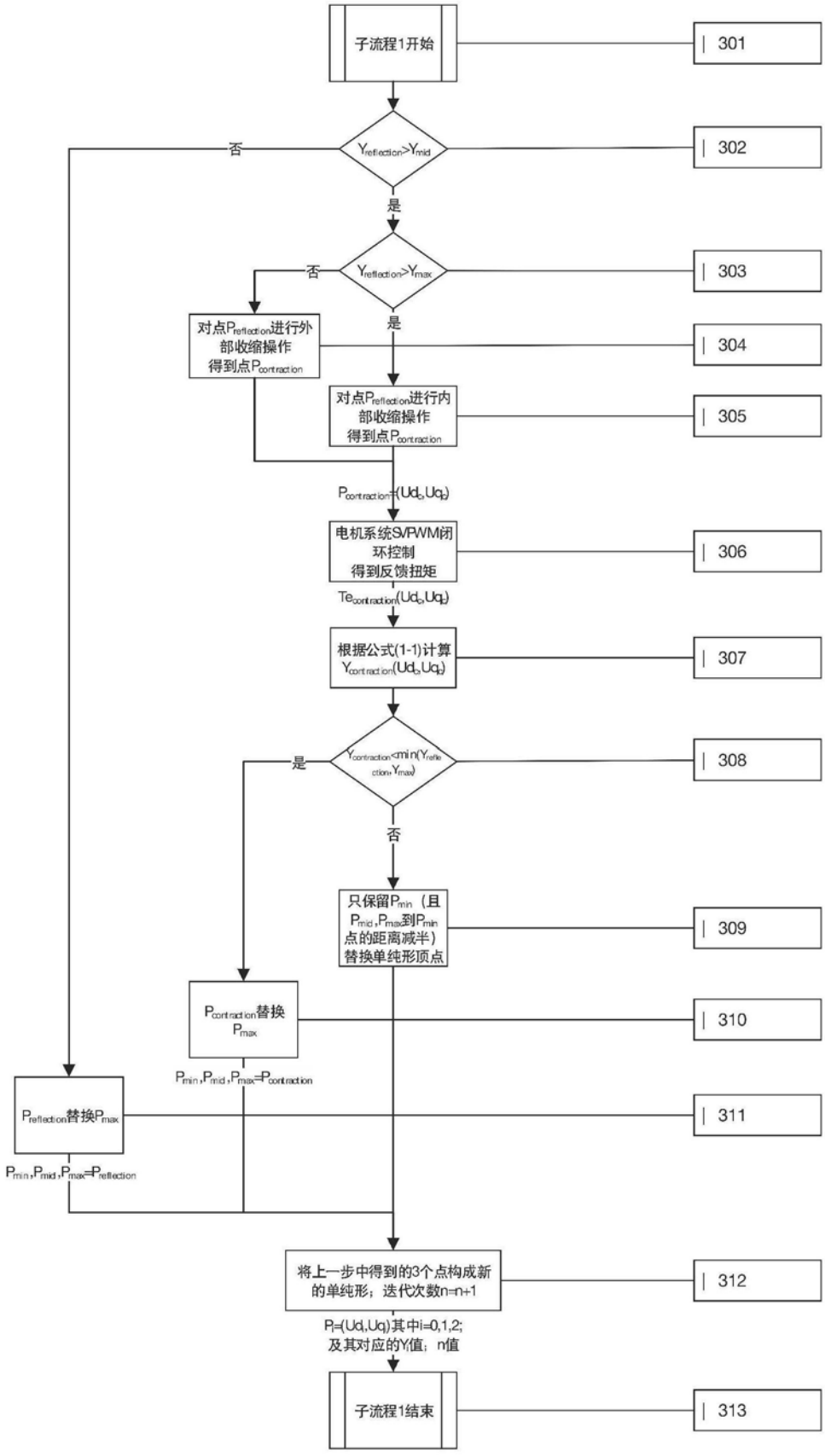

子流程1开始
301
$Y_{reflection}>Y_{mid}$
302
否
是
$Y_{reflection}>Y_{max}$
303
否
是
对点$P_{reflection}$进行外部收缩操作得到点$P_{contraction}$
304
对点$P_{reflection}$进行内部收缩操作得到点$P_{contraction}$
305
$P_{contraction}=(Ud_2,Uq_2)$
电机系统SVPWM闭环控制得到反馈扭矩
306
$Te_{contraction}(Ud_2,Uq_2)$
根据公式(1-1)计算$Y_{contraction}(Ud_2,Uq_2)$
307
$Y_{contraction}<min(Y_{reflection},Y_{max})$
308
是
否
只保留P_{min}（且P_{mid},P_{max}到P_{min}点的距离减半）替换单纯形顶点
309
$P_{contraction}$替换P_{max}
310
P_{min},P_{mid},$P_{max}=P_{contraction}$
$P_{reflection}$替换P_{max}
311
P_{min},P_{mid},$P_{max}=P_{reflection}$
将上一步中得到的3个点构成新的单纯形；迭代次数n=n+1
312
$P_i=(Ud_i,Uq_i)$其中i=0,1,2;及其对应的Y值；n值
子流程1结束
313

图10

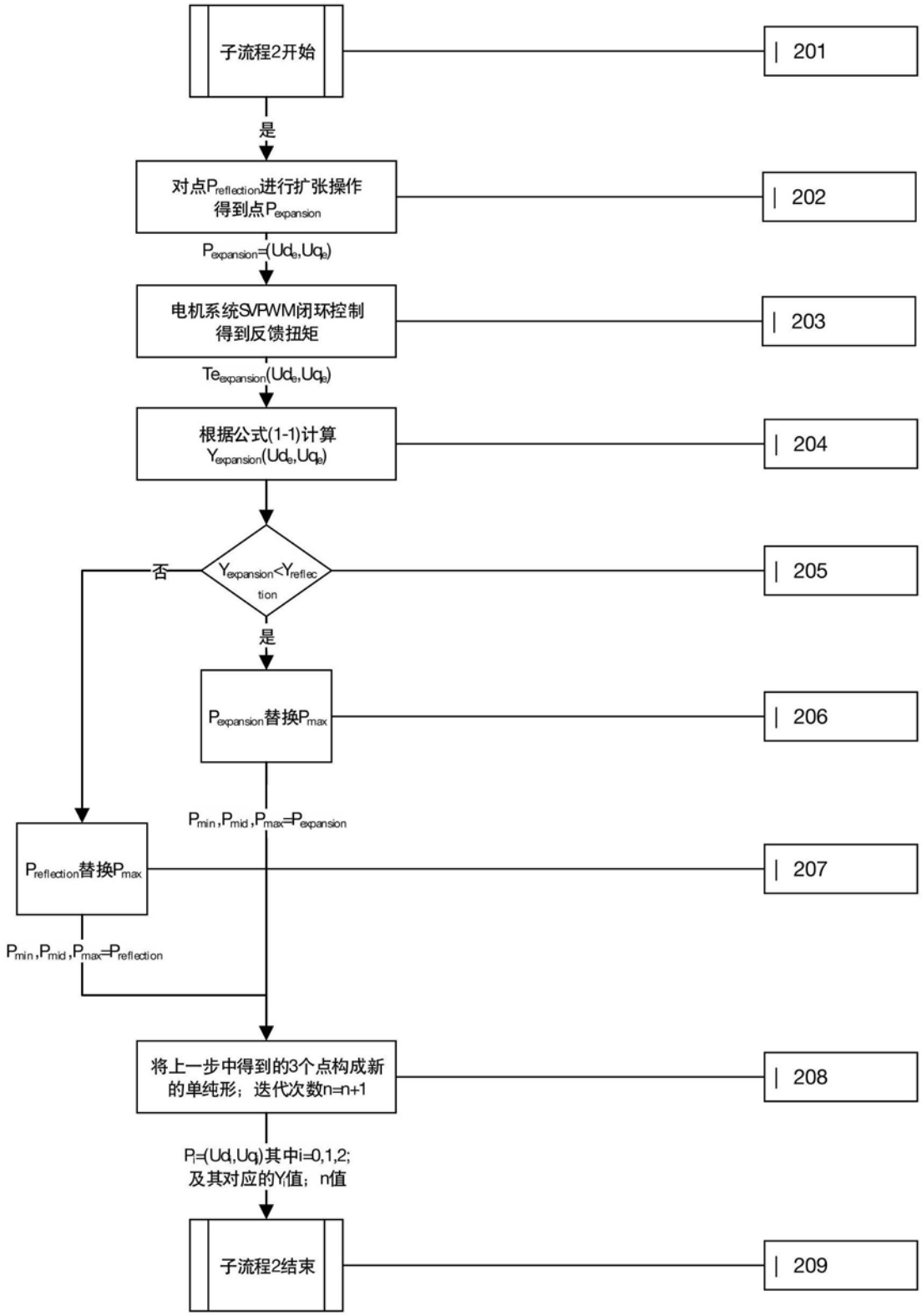

子流程2开始
201
是
对点$P_{reflection}$进行扩张操作
得到点$P_{expansion}$
202
$P_{expansion}=(Ud_e,Uq_e)$
电机系统SVPWM闭环控制
得到反馈扭矩
203
$Te_{expansion}(Ud_e,Uq_e)$
根据公式(1-1)计算
$Y_{expansion}(Ud_e,Uq_e)$
204
否
$Y_{expansion}<Y_{reflection}$
205
是
$P_{expansion}$替换P_{max}
206
$P_{min},P_{mid},P_{max}=P_{expansion}$
$P_{reflection}$替换P_{max}
207
$P_{min},P_{mid},P_{max}=P_{reflection}$
将上一步中得到的3个点构成新
的单纯形；迭代次数n=n+1
208
$P_i=(Ud_i,Uq_i)$其中i=0,1,2;
及其对应的Y_i值；n值
子流程2结束
209

图11