



(21) 申请号 202410774554.0

(22) 申请日 2024.06.17

(71) 申请人 广汽埃安新能源汽车股份有限公司  
地址 510006 广东省广州市番禺区石楼镇  
龙瀛路36号

(72) 发明人 陈焯 黄楷昕 邝利兵

(74) 专利代理机构 北京维飞联创知识产权代理  
有限公司 11857  
专利代理师 赵琳琳

(51) Int. Cl.

B60L 15/20 (2006.01)

H02P 23/00 (2016.01)

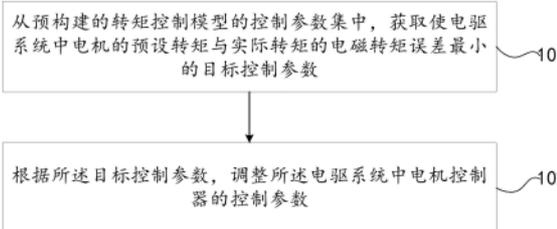
权利要求书2页 说明书11页 附图2页

(54) 发明名称

电驱系统的控制调整方法及装置

(57) 摘要

本申请涉及电驱控制技术领域,提供一种电驱系统的控制调整方法及装置,所述方法包括:从预构建的转矩控制模型的控制参数集中,获取使电驱系统中电机的预设转矩与实际转矩的电磁转矩误差最小的目标控制参数;根据所述目标控制参数,调整所述电驱系统中电机控制器的控制参数;其中,所述转矩控制模型用于调整所述电机的转矩,所述控制参数集包括多组控制参数,一组所述控制参数包括比例增益参数和积分时间参数。本申请实施例提供的电驱系统的控制调整方法能够降低电驱系统的能量损耗,提高车辆性能。



1. 一种电驱系统的控制调整方法,其特征在于,包括:

从预构建的转矩控制模型的控制参数集中,获取使电驱系统中电机的预设转矩与实际转矩的电磁转矩误差最小的目标控制参数;

根据所述目标控制参数,调整所述电驱系统中电机控制器的控制参数;

其中,所述转矩控制模型用于调整所述电机的转矩,所述控制参数集包括多组控制参数,一组所述控制参数包括比例增益参数和积分时间参数。

2. 根据权利要求1所述的电驱系统的控制调整方法,其特征在于,从预构建的转矩控制模型的控制参数集中,获取使电驱系统中电机的预设转矩与实际转矩的电磁转矩误差最小的目标控制参数,包括:

多次调整所述转矩控制模型的控制参数集,每次调整均在根据所述预设转矩、所述转矩控制模型上一次输出控制信号时所述电机的电磁转矩误差以及所述控制参数集中的各组当前控制参数,得到与各组所述当前控制参数一一对应的各转矩误差后,确定各转矩误差的最小值为所述转矩控制模型当次输出控制信号时所述电机的电磁转矩误差,以及根据各转矩误差中小于预设误差的各目标转矩误差一一对应的各组当前控制参数,更新所述控制参数集,直至所述控制参数集的调整次数达到预设次数,将各所述转矩误差的最小值对应的一组所述当前控制参数,确定为所述目标控制参数。

3. 根据权利要求2所述的电驱系统的控制调整方法,其特征在于,根据各转矩误差中小于预设误差的各目标转矩误差一一对应的各组当前控制参数,更新所述控制参数集,包括:

根据各所述目标转矩误差一一对应的各组当前控制参数,采用粒子群优化算法,更新所述控制参数集。

4. 根据权利要求1-3任一项所述的电驱系统的控制调整方法,其特征在于,还包括:

根据所述电机的损耗模型,从所述电机的磁链集中,获取使所述损耗模型的损耗值最小的目标定子磁链值;

根据所述目标定子磁链值,确定所述电机的定子磁链;

其中,所述磁链集包括多个定子磁链值。

5. 根据权利要求4所述的电驱系统的控制调整方法,其特征在于,根据所述电机的损耗模型,从所述电机的磁链集中,获取使所述损耗模型最小的目标定子磁链值,包括:

多次将所述磁链集的各定子磁链值输入所述损耗模型,每次输入均在获取所述损耗模型输出的与各所述定子磁链值一一对应的各当前损耗值后,根据各所述当前损耗值中的小于预设损耗的各目标损耗值一一对应的各所述定子磁链值,更新所述磁链集,直至所述磁链集的更次数达到预设次数,将各所述当前损耗值的最小值对应的定子磁链值,确定为所述目标定子磁链值。

6. 根据权利要求5所述的电驱系统的控制调整方法,其特征在于,根据各所述当前损耗值中的小于预设损耗的各目标损耗值一一对应的各所述定子磁链值,更新所述磁链集,包括:

根据各所述目标损耗值一一对应的各所述定子磁链值,采用粒子群优化算法,更新所述磁链集。

7. 根据权利要求1-3任一项所述的电驱系统的控制调整方法,其特征在于,所述预设转矩根据搭载所述电驱系统的车辆的车辆模型确定。

8. 一种电驱系统的控制调整装置,其特征在于,包括:

控制参数获取模块,用于从预构建的转矩控制模型的控制参数集中,获取使电驱系统中电机的预设转矩与实际转矩的电磁转矩误差最小的目标控制参数;

控制参数调整模块,用于根据所述目标控制参数,调整所述电驱系统中电机控制器的控制参数;

其中,所述转矩控制模型用于调整所述电机的转矩,所述控制参数集包括多组控制参数,一组所述控制参数包括比例增益参数和积分时间参数。

9. 一种电子设备,包括处理器和存储有计算机程序的存储器,其特征在于,所述处理器执行所述计算机程序时实现权利要求1至7任一项所述的电驱系统的控制调整方法。

10. 一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,其特征在于,所述计算机程序被处理器执行时实现权利要求1至7任一项所述的电驱系统的控制调整方法。

## 电驱系统的控制调整方法及装置

### 技术领域

[0001] 本申请涉及电驱控制技术领域,具体涉及一种电驱系统的控制调整方法及装置。

### 背景技术

[0002] 电驱系统是电动汽车的重要组成部分之一,其包括电机以及电机控制器,如PI (proportional integral controller,线性控制器)控制器。

[0003] 电驱系统的运行会影响电动汽车的性能,如影响电动汽车的续航里程等,因此相关技术中,通常是通过能量回收的方式,来减少电驱系统的能量损耗,从而提高电动汽车的性能。然而,这种方式只局限于特定环境,如车辆减速的工况下,并没有全面考虑整个电驱系统的综合优化,导致在某些工况下电驱系统的能量损耗无法减少,影响车辆的性能。

### 发明内容

[0004] 本申请旨在至少解决相关技术中存在的技术问题之一。为此,本申请提出一种电驱系统的控制调整方法,能够降低电驱系统的能量损耗,提高车辆性能。

[0005] 根据本申请第一方面实施例的电驱系统的控制调整方法,包括:

从预构建的转矩控制模型的控制参数集中,获取使电驱系统中电机的预设转矩与实际转矩的电磁转矩误差最小的目标控制参数;

根据所述目标控制参数,调整所述电驱系统中电机控制器的控制参数;

其中,所述转矩控制模型用于调整所述电机的转矩,所述控制参数集包括多组控制参数,一组所述控制参数包括比例增益参数和积分时间参数。

[0006] 通过从用于调整电驱系统的电机转矩的转矩控制模型的控制参数集中,获取使电驱系统中电机的预设转矩与实际转矩的电磁转矩误差最小的目标控制参数,以根据该目标控制参数,调整电驱系统中电机控制器的控制参数,从而使电驱系统能够达到较优的阶跃响应输出,提高对电机转矩控制的精确度,减少电驱系统的能量损耗。

[0007] 根据本申请的一个实施例,从预构建的转矩控制模型的控制参数集中,获取使电驱系统中电机的预设转矩与实际转矩的电磁转矩误差最小的目标控制参数,包括:

多次调整所述转矩控制模型的控制参数集,每次调整均在根据所述预设转矩、所述转矩控制模型上一次输出控制信号时所述电机的电磁转矩误差以及所述控制参数集中的各组当前控制参数,得到与各组所述当前控制参数一一对应的各转矩误差后,确定各转矩误差的最小值为所述转矩控制模型当次输出控制信号时所述电机的电磁转矩误差,以及根据各转矩误差中小于预设误差的各目标转矩误差一一对应的各组当前控制参数,更新所述控制参数集,直至所述控制参数集的调整次数达到预设次数,将各所述转矩误差的最小值对应的一组所述当前控制参数,确定为所述目标控制参数。

[0008] 根据本申请的一个实施例,根据各转矩误差中小于预设误差的各目标转矩误差一一对应的各组当前控制参数,更新所述控制参数集,包括:

根据各所述目标转矩误差一一对应的各组当前控制参数,采用粒子群优化算法,

更新所述控制参数集。

[0009] 根据本申请的一个实施例,还包括:

根据所述电机的损耗模型,从所述电机的磁链集中,获取使所述损耗模型的损耗值最小的目标定子磁链值;

根据所述目标定子磁链值,确定所述电机的定子磁链;

其中,所述磁链集包括多个定子磁链值。

[0010] 根据本申请的一个实施例,根据所述电机的损耗模型,从所述电机的磁链集中,获取使所述损耗模型最小的目标定子磁链值,包括:

多次将所述磁链集的各定子磁链值输入所述损耗模型,每次输入均在获取所述损耗模型输出的与各所述定子磁链值一一对应的各当前损耗值后,根据各所述当前损耗值中的小于预设损耗的各目标损耗值一一对应的各所述定子磁链值,更新所述磁链集,直至所述磁链集的更次数达到预设次数,将各所述当前损耗值的最小值对应的定子磁链值,确定为所述目标定子磁链值。

[0011] 根据本申请的一个实施例,根据各所述当前损耗值中的小于预设损耗的各目标损耗值一一对应的各所述定子磁链值,更新所述磁链集,包括:

根据各所述目标损耗值一一对应的各所述定子磁链值,采用粒子群优化算法,更新所述磁链集。

[0012] 根据本申请的一个实施例,所述预设转矩根据搭载所述电驱系统的车辆的车辆模型确定。

[0013] 根据本申请第二方面实施例的电驱系统的控制调整装置,包括:

控制参数获取模块,用于从预构建的转矩控制模型的控制参数集中,获取使电驱系统中电机的预设转矩与实际转矩的电磁转矩误差最小的目标控制参数;

控制参数调整模块,用于根据所述目标控制参数,调整所述电驱系统中电机控制器的控制参数;

其中,所述转矩控制模型用于调整所述电机的转矩,所述控制参数集包括多组控制参数,一组所述控制参数包括比例增益参数和积分时间参数。

[0014] 根据本申请第三方面实施例的电子设备,包括处理器和存储有计算机程序的存储器,所述处理器执行所述计算机程序时实现上述任一实施例所述的电驱系统的控制调整方法。

[0015] 根据本申请第四方面实施例的计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现上述任一实施例所述的电驱系统的控制调整方法。

## 附图说明

[0016] 为了更清楚地说明本申请实施例的技术方案,下面将对本申请实施例中所需要使用的附图作简单地介绍,应当理解,以下附图仅示出了本申请的某些实施例,因此不应被看作是对范围的限定,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他相关的附图。

[0017] 图1是本申请实施例提供的电驱系统的控制调整方法的流程示意图;

图2是本申请实施例提供的车辆的受力分析图;

图3是本申请实施例提供的电驱系统的控制调整装置的结构示意图；

图4是本申请实施例提供的电子设备的结构示意图。

### 具体实施方式

[0018] 为使本申请的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合本申请实施例中的附图，对本申请中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例是本申请一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例，本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本申请保护的范围。

[0019] 下面，将通过几个具体的实施例对本申请实施例提供的电驱系统的控制调整方法及装置进行详细介绍和说明。

[0020] 在一些实施例中，提供了一种电驱系统的控制调整方法，该方法应用于终端设备，用于进行电驱系统的控制参数的调整。其中，终端设备可以是台式终端、移动终端、车载终端以及服务器等电子设备，服务器可以是独立的服务器或者是多台服务器组成的服务器集群来实现，还可以是提供云服务、云数据库、云计算、云函数、云存储、网络服务、云通信、中间件服务、域名服务、安全服务、CDN、以及大数据和人工智能采样点设备等基础云计算服务的云服务器。

[0021] 如图1所示，本实施例提供一种电驱系统的控制调整方法，该方法包括：

步骤101，从预构建的转矩控制模型的控制参数集中，获取使电驱系统中电机的预设转矩与实际转矩的电磁转矩误差最小的目标控制参数；

步骤102，根据所述目标控制参数，调整所述电驱系统中电机控制器的控制参数；

其中，所述转矩控制模型用于调整所述电机的转矩，所述控制参数集包括多组控制参数，一组所述控制参数包括比例增益参数和积分时间参数。

[0022] 在一些实施例中，在进行电驱系统的控制调整之前，可预先构建搭载该电驱系统的车辆的车辆模型，以及构建用于调整电驱系统中电机的转矩的转矩控制模型，如用于调整三相交流电机或永磁同步电机的转矩的转矩控制模型。其中，车辆为电动车辆，如电动汽车。车辆模型包括行驶动力学关系模型和电气模型，行驶动力学关系模型用于对车辆的机械部分进行仿真，电气模型用于对车辆的电气部分进行仿真。转矩控制模型用于对电驱系统中的电机控制器进行仿真。

[0023] 其中，对于车辆模型中的机械部分构建，即行驶动力学关系模型的构建，可以根据汽车力学和空气动力学概念，来确定汽车驾驶所需的功率和能量。如图2所示，可根据车辆的受力，来确定车辆的行驶总阻力  $F_r$  为：

$$\begin{aligned} F_r &= F_{roll} + F_{air} + F_c \\ &= m_{EV} \mu \cos \theta + \frac{1}{21.15} C_{\omega} A (v_{EV} + v_a)^2 \pm m_{EV} g \sin \theta \end{aligned}$$

[0024] 其中， $F_{roll}$  表示滚动阻力， $F_{air}$  表示空气阻力， $F_c$  表示坡度阻力， $m_{EV}$  表示车辆重量， $\theta$  表示坡度角， $v_{EV}$  表示车辆速度， $\mu$  表示轮胎滚动阻力系数， $g$  表示重力加速度， $C_{\omega}$  表示空气阻力系数， $A$  表示迎风面积， $v_a$  为逆风速度。

[0025] 车辆的电机提供牵引力  $F_f$  以克服阻力，具体为：

$$F_f - F_r = m_{EV} I_z \frac{dv_{EV}}{dt}; \text{其中, } I_z \text{ 表示转动惯量系数。}$$

[0026] 车辆这个每个车轮驱动的机械方程式表示为:

$$T_m = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{R}{i} F_r + (J_v + J_\omega); \text{其中, } T_m \text{ 为电机转矩, } T_L \text{ 为负载转矩, } \omega_m \text{ 表}$$

示电机机械速度,  $J$  表示总惯量, 其由轴惯性力矩和车轮惯性力矩之和表示,  $R$  为车轮半径,  $i$  为传动比,  $\eta_t$  为减速器的传动效率。

[0027] 进一步地, 减速器由下述公式计算得到:

$$\begin{cases} T_{Wheel} = i\eta_t T_m \\ \omega_{Wheel} = \frac{\omega_m}{i} \end{cases}$$

[0028] 综合上述公式, 可确定车辆的行驶动力学关系模型如下表示:

$$\frac{T_m \eta_t i}{R} = F_r$$

[0029] 对于车辆模型中的电气部分构建, 即电气模型的构建, 可以是基于车辆的电力和电池充电状态, 来构建电气模型。具体的, 车辆在实际行驶过程中, 其电池的开路电压根据荷电状态变化使电机电压变化, 影响电机损耗。同时, 电池的荷电状态会影响电池电阻变化, 导致电池损耗。因此, 构建的电气模型可如下所示:

$$\begin{cases} P_{motor} = (T_m \omega_m) / \gamma_m \\ P_{battery} = V_{battery} I_{battery} - I_{battery}^2 R_{battery} \\ I_{battery} = \frac{V_{battery} - \sqrt{V_{battery}^2 - 4R_{battery} P_{battery}}}{2R_{battery}} \end{cases}$$

[0030] 其中,  $\gamma_m$  为电机效率,  $P_{motor}$  为电机功率,  $T_m$  为电机转矩,  $P_{battery}$  为电池功率,  $V_{battery}$  为电池的电压,  $I_{battery}$  为电池的电流,  $R_{battery}$  为电池电阻,  $P_{battery}$  与车辆的速度  $v_{EV}$  成正比。

[0031] 在一些实施例中, 转矩控制模型可基于电驱系统中用于向电机输出控制信号的电机控制器构建。其中, 该电机控制器可以包括PI (Proportional-Integral Controller, 线性控制器) 控制器。传统PI控制器的时域表达式为:

$$u(t) = K_{pi} e(t) + \frac{1}{\tau} \int e(t) dt = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt$$

[0032] 其中,  $u(t)$  表示第  $t$  个采样时间输出的控制信号,  $K_p$  表示比例增益参数,  $K_i$  表示积分时间参数,  $e_{Te}$  表示预设转矩与实际转矩的电磁转矩误差。该时域表达式即可为转矩控制模型。

[0033] 对于预设转矩, 可根据实际情况进行设定, 如可根据车辆模型来预测车辆所需的

转矩,即预设转矩。示例性的,可将通过行驶动力学关系模型确定的电机转矩 $T_m$ ,作为预设转矩 $T_e^*$ 。而在转矩控制模型向电机输出控制信号时,可确定实际转矩为 $T_e = n_p L_m (I_{sq} I_{rd} - I_{sd} I_{rq})$ ,其中, $n_p$ 为极对数, $L_s$ 表示定子电感, $I_{s(d,q)}$ 表示在dq轴上的定子电流值。

[0034] 在一些实施例中,可预先构建包括多组控制参数的控制参数集,每一组控制参数均包括比例增益参数 $K_p$ 和积分时间参数 $K_i$ 。为使电控系统能够达到最佳的阶跃响应输出,可确定转矩控制模型的目标函数为: $\min f = \int_0^{\infty} [e_{Te}(t)]^2 dt$ ,此时可将各组控制参数,分别代入转矩控制模型,然后针对任一组控制参数,获取在使用该组控制参数进行电机转矩控制时,电机的预设转矩与实际转矩之间的电磁转矩误差。这样,便可得到与各组控制参数一一对应的电磁转矩误差。

[0035] 在得到与各组控制参数一一对应的电磁转矩误差后,即可从各组控制参数中,确定对应的电磁转矩误差最小的控制参数,作为目标控制参数。

[0036] 在确定目标控制参数后,即可根据该目标控制参数,调整电驱系统中电机控制器的控制参数,如将目标控制参数作为该电机控制器的控制参数,以完成对电驱系统中电机控制器的控制调整,使电机控制器基于该目标控制参数,生成相应的控制信号对电机进行转矩控制,从而使电驱系统能够达到较优的阶跃响应输出,减少电驱系统的能量损耗。

[0037] 通过从用于调整电驱系统的电机转矩的转矩控制模型的控制参数集中,获取使电驱系统中电机的预设转矩与实际转矩的电磁转矩误差最小的目标控制参数,以根据该目标控制参数,调整电驱系统中电机控制器的控制参数,从而使电驱系统能够达到较优的阶跃响应输出,提高对电机转矩控制的精确度,减少电驱系统的能量损耗。

[0038] 此外,通过提高对电驱系统中电机转矩控制的精确度,使得搭载该电驱系统的车辆在加速、减速等工况下能够实现更快速、更稳定的动态响应,提高了车辆的稳定性和可靠性,进而提升了行驶的舒适性和驾驶体验。

[0039] 而为提高对电机转矩控制的精确度,在一些实施例中,从预构建的转矩控制模型的控制参数集中,获取使电驱系统中电机的预设转矩与实际转矩的电磁转矩误差最小的目标控制参数,包括:

多次调整所述转矩控制模型的控制参数集,每次调整均在根据所述预设转矩、所述转矩控制模型上一次输出控制信号时所述电机的电磁转矩误差以及所述控制参数集中的各组当前控制参数,得到与各组所述当前控制参数一一对应的各转矩误差后,确定各转矩误差的最小值为所述转矩控制模型当次输出控制信号时所述电机的电磁转矩误差,以及根据各转矩误差中小于预设误差的各目标转矩误差一一对应的各组当前控制参数,更新所述控制参数集,直至所述控制参数集的调整次数达到预设次数,将各所述转矩误差的最小值对应的一组所述当前控制参数,确定为所述目标控制参数。

[0040] 在一些实施例中,转矩控制模型第k次输出控制信号时,电机的电磁转矩误差为:

$$e_{Te}(k) = T_e(k)^* - e_{Te}(k-1) \times (K_p(k) + \frac{1}{S} K_i(k))$$

[0041] 其中,S为预设系数。

[0042] 在转矩控制模型第K次输出控制信号时,针对控制参数集中的任一组当前控制参数,可以将预设转矩、该组当前控制参数 $[K_p, K_i]$ 、以及根据转矩控制模型第K-1次输出控制信号时的预设转矩和实际转矩,得到的转矩控制模型第K-1次输出控制信号时的电磁转矩误差,输入上述公式,得到转矩控制模型第K次输出控制信号时的电磁转矩误差,以将该电磁转矩误差作为与该组当前控制参数对应的转矩误差。这样,在转矩控制模型第K次输出控制信号时,即可得到与各组当前控制参数一一对应的各转矩误差。

[0043] 在得到各转矩误差后,可将各转矩误差中的最小值,确定为转矩控制模型第k次输出控制信号时电机的电磁转矩误差,并从各转矩误差中,获取小于预设误差的各目标转矩误差,以将各目标转矩误差对应的各组当前控制参数,采用进化算法进行处理,以得到新的控制参数添加至控制参数集中。如将各目标转矩误差对应的各组当前控制参数,作为选中的个体进行再生与繁衍,模拟生物的遗传变异过程,通过遗传算法中的交叉和变异操作产生后代,以得到新的控制参数添加至控制参数集中,以利用更新后的控制参数集中的各组控制参数,调整转矩控制模型第k+1次输出的控制信号。

[0044] 示例性的,设 $P_i^j$ 和 $P_j^i$ 为父代个体,其子代 $P_k$ 通过以下交叉公式产生:

$$P_k = \gamma P_i^j + (1-\gamma) P_j^i$$

[0045] 其中, $\gamma$ 是交叉系数,决定了父代遗传信息的融合比例; $P_i^j$ 和 $P_j^i$ 表示作为父代个体的两组控制参数。示例性的, $\gamma$ 可设置为0.7。

[0046] 在更新控制参数集后,即可将更新后的控制参数集,作为转矩控制模型在第k次输出控制信号时的控制参数集,以确定转矩控制模型第k+1次输出控制信号时电机的电磁转矩误差,并再一次更新控制参数集,以此类推,直至控制参数集的更新次数达到预设次数,如更新次数达到100次,此时则将控制参数集中,与转矩控制模型本次输出控制信号时得到的各转矩误差的最小值对应的一组当前控制参数,作为目标控制参数。从而通过对控制参数集进行迭代和优化,使从控制参数集获取到的目标控制参数能够使电磁转矩误差进一步减小,进而提高对电机转矩控制的精确度,进一步减少电驱系统的能量损耗。

[0047] 为进一步提高对电机转矩控制的精确度,在一些实施例中,根据各转矩误差中小于预设误差的各目标转矩误差一一对应的各组当前控制参数,更新所述控制参数集,包括:

根据各所述目标转矩误差一一对应的各组当前控制参数,采用粒子群优化算法,更新所述控制参数集。

[0048] 在一些实施例中,可采用粒子群优化算法,来更新控制参数集。示例性的,粒子群算法中包含一个粒子种群,一个粒子对应一组控制参数,此时粒子群体即表示不同控制参数解集的集合。每个粒子包含一个位置 $x$ 和一个速度 $v$ 。粒子局部最优和全局最优的位置表示为:

$$P_{best,i}^{t+1} \begin{cases} P_{best,i}^t & \text{if } f(x_i^{t+1}) > P_{best,i}^t \\ x_{best,i}^{t+1} & \text{if } P_{best,i}^t \geq f(x_i^{t+1}) \end{cases}$$

[0049]  $G_{best}^t = \min(P_{best,1}^t, P_{best,2}^t, \dots, P_{best,n}^t)$

[0050] 粒子个体的速度更新公式为:

$$\mathbf{v}_i^{t+1} = \omega^t \mathbf{v}_i^t + c_1 r_1 [P_{best,i}^t - \mathbf{x}_i^t] + c_2 r_2 [G_{best}^t - \mathbf{x}_i^t]$$

[0051] 其中,全局最优位置表示在所有粒子个体中,使电驱系统中电机的电磁转矩误差最小的粒子对应的参数值。 $P_{best,i}^t$  和  $G_{best}^t$  分别表示第t次迭代时粒子i个体最优位置和全局最优位置,  $\mathbf{v}_i^t$  表示第i个粒子在第t次迭代时的速度,  $\mathbf{x}_i^t$  为第i个粒子在第t次迭代时的位置,  $P_{best,i}^t$  表示粒子i的个体最佳位置,  $G_{best}^t$  表示在[0, t]范围内找到的粒子i的个体最佳位置,  $c_1$   $c_2$  表示加速度因子,  $r_1$ 、 $r_2$  为随机系数,  $\omega^t$  表示惯性权重,其线性递减范围为[0.4, 0.9]。

[0052] 所有粒子的更新位置如下:

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \mathbf{v}_i^{t+1}。$$

[0053] 在转矩控制模型第k次输出控制信号,从控制参数集中确定各目标转矩误差一一对应的各组当前控制参数后,即可将各组当前控制参数作为各粒子,搜索实际迭代的全局最佳位置,并与前一次迭代的最优解进行对比,决定保留上一代最优解或更新最优解,以基于更新后的最优解更改粒子的位置,即用新的控制参数更换上一代粒子的控制参数,所有粒子更新后,各自对应的一组控制参数构成新的控制参数集。利用新的多组控制参数,调整转矩控制模型第k+1次输出的控制信号。

[0054] 而为进一步降低电驱系统的能量损耗,在一些实施例中,还包括:

根据所述电机的损耗模型,从所述电机的磁链集中,获取使所述损耗模型最小的目标定子磁链值;

根据所述目标定子磁链值,确定所述电机的定子磁链;

其中,所述磁链集包括多个定子磁链值。

[0055] 在一些实施例中,电机的损耗主要包括绕组铜损、铁损、机械损耗和杂散损耗。基于绕组铜损、铁损、机械损耗和杂散损耗中的至少一种,可以建立电机的损耗模型。

[0056] 示例性的,在电机运行时,电流经过电机绕组,其损失的功率与电流的平方成正比,能量以热能消耗,该部分能量为绕组铜损。总的能耗可表示为三相定子绕组的铜损和,即:

$$P_{cu} = \frac{3}{2} I_s^2 R_s = \frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2)$$

[0057] 其中,  $R_s$  表示各相绕组的等效电阻,  $I_s$  表示相电流的有效值,  $i_d$ 和 $i_q$ 分别表示相电流在dq轴的分量。而在dq坐标系电机模型下,电机的绕组铜损由经过  $R_s$  电阻的发热来表示:

$$P_{cu} = R_s (i_d^2 + i_q^2) = R_s \left[ \left( i_{dt} - \frac{\omega_e L_q i_{qt}}{R_{fe}} \right)^2 + \left( i_{qt} + \frac{\omega_e L_d i_{dt} + \omega_e \phi_f}{R_{fe}} \right)^2 \right]$$

[0058] 其中,  $L_d, L_q$  分别为定子间的相电流dq轴的电感, 其和为  $L_r$ ;  $\omega_e$  为转子旋转电角度,  $\varphi_f$  为定子磁链,  $R_{fe}$  表示转子铁心的电阻。

[0059] 定子磁链  $\varphi_f$  可以包括dq坐标系上的定子磁链, 具体为:

$$\varphi_{fd} = I_{sd}L_s + I_{rd}L_m$$

$$\varphi_{fq} = I_{sq}L_s + I_{rq}L_m$$

[0060] 电机的铁损是定转子铁芯内部和永磁体内部电磁效应产生的损耗, 其由磁滞损耗  $P_h$ 、涡流损耗  $P_c$ 、附加损耗  $P_e$  构成。铁损的一般模型如下:

$$P_{Fe} = P_h + P_c + P_e = K_h f B_m^\alpha + K_c f^2 B_m^2 + K_e f^{1.5} B_m^{1.5} = \frac{3}{2} R_{Fe} I_m^2 = \frac{3}{2} R_{Fe} I_m^2 \left( \frac{L_m \omega_s}{R_{Fe}} \right)^2$$

[0061] 其中,  $K_h, K_c, K_e$  分别为磁滞损耗系数、涡流损耗系数和附加损耗系数,  $f$  为磁密频率,  $B_m$  为正弦磁密的幅值。  $L_m$  表示定子与转子间的互感,  $\alpha$  为经验系数,  $I_m$  表示充磁电流。充磁电流的表述如下:

$$I_m = \frac{1}{L_m} \omega_s \sqrt{\left( \frac{R_r}{g} \right)^2 + (L_r \omega_s)^2} I_r$$

[0062] 其中,  $\omega_s$  表示同步转子电角速度,  $R_r$  表示转子电阻,  $L_r$  为流向转子间的电感,  $I_r$  为流向转子电流。

[0063] 根据上述公式, 可确定电机的铁损的经过  $R_s$  电阻的发热表示如下:

$$P_{Fe} = R_{fe} (i_{dfe}^2 + i_{qfe}^2) = \frac{\omega_e^2}{R_{fe}} [(L_q i_{qt})^2 + (L_d i_{dt} + \varphi_f)^2]$$

[0064] 基于电机的绕组铜损和铁损, 可确定电机的损耗模型为:

$$P_E = P_{Fe} + P_{Cu}$$

[0065] 由于电机的实际转矩  $T_e$  的表达式为  $T_e = \varphi_f i_{qt} + (L_d - L_q) i_{dt} i_{qt}$ , 同时电机的损耗模型越小, 则电驱系统的能量损耗越小, 因此可得到定子磁链与电机损耗的目标函数为:

$$\text{Min} P_E = a \varphi_f^2 + b \left( \frac{T_e}{\varphi_f} \right)^2, \text{ 其中, } a, b \text{ 分别为关于转子旋转角速度的系数。}$$

[0066] 在一些实施例中, 预先向电机的损耗模型输入电机在不同转速下的损耗, 如电机在不同转速下的铜损和铁损, 随机初始化电机的磁链集, 得到包括多个定子磁链值的磁链集。

然后基于目标函数  $\text{Min} P_E = a \varphi_f^2 + b \left( \frac{T_e}{\varphi_f} \right)^2$ , 计算损耗模型在任一定子磁链值下的损耗

值, 以得到各定子磁链值一一对应的各损耗值。

[0067] 在得到各定子磁链值一一对应的各损耗值后, 即可将各损耗值中的最小损耗值对

应的定子磁链值,作为目标定子磁链值,以将该目标定子磁链值,作为定子磁链 $\varphi_r$ 的磁链值。这样,便可通过优化电机的定子磁链,来减少电机的损耗,如减少电机的铁损耗和铜损耗等,从而减少电驱系统的能量损耗,提高了整个电驱系统的能源利用效率。

[0068] 而为进一步减少电驱系统的能量损耗,在一些实施例中,根据所述电机的损耗模型,从所述电机的磁链集中,获取使所述损耗模型最小的目标定子磁链值,包括:

多次将所述磁链集的各定子磁链值输入所述损耗模型,每次输入均在获取所述损耗模型输出的与各所述定子磁链值一一对应的各当前损耗值后,根据各所述当前损耗值中的小于预设损耗的各目标损耗值一一对应的各所述定子磁链值,更新所述磁链集,直至所述磁链集的更次数达到预设次数,将各所述当前损耗值的最小值对应的定子磁链值,确定为所述目标定子磁链值。

[0069] 在一些实施例中,对于磁链集的第k次更新,针对磁链集中的任一定子磁链值,可将电机的当前实际转矩和定子磁链值输入损耗模型,以得到损耗模型输出的当前损耗值,以将该当前损耗值作为与该定子磁链值对应的当前损耗值。这样,便可得到第k次磁链集更新过程中,与各定子磁链值一一对应的当前损耗值。

[0070] 在得到与各定子磁链值一一对应的当前损耗值后,可从各当前损耗值中获取小于预设损耗的各目标损耗值,以将各目标损耗值对应的各定子磁链值,采用进化算法进行处理,以得到新的定子磁链值添加至磁链集中,以利用更新后的磁链集中的各定子磁链值,确定第k+1次磁链集更新过程中,与各定子磁链值一一对应的当前损耗值。以此类推,直至磁链集的更次数达到预设次数,则将各当前损耗值的最小值对应的定子磁链值,确定为目标定子磁链值。从而通过对磁链集进行迭代和优化,使从磁链集获取到的定子磁链值能够使电机损耗进一步减小,进而进一步减少电驱系统的能量损耗。

[0071] 在一些实施例中,根据各所述当前损耗值中的小于预设损耗的各目标损耗值一一对应的各所述定子磁链值,更新所述磁链集,包括:

根据各所述目标损耗值一一对应的各所述定子磁链值,采用粒子群优化算法,更新所述磁链集。

[0072] 在一些实施例中,可采用粒子群优化算法,来更新磁链集。示例性的,可将任一定子磁链确定为一个粒子,此时磁链集即表示一个粒子群。

[0073] 在第k次磁链集更新过程中,得到与各目标损耗值对应的各定子磁链值后,即可将与各目标损耗值对应的各定子磁链值作为粒子,搜索实际迭代的全局最佳位置,并与前一次迭代的最优解进行对比,决定保留上一代最优解或更新最优解,以基于更新后的位置,来形成新的粒子,即新的定子磁链值添加至磁链集,以利用新的磁链集,进行第k+1次的磁链集更新,直至更新次数达到预设次数,则从磁链集中,选取使损耗模型的损耗值最小的定子磁链值,作为目标磁链值来更新电机的定子磁链。

[0074] 下面对本申请提供的电驱系统的控制调整装置进行描述,下文描述的电驱系统的控制调整装置与上文描述的电驱系统的控制调整方法可相互对应参照。

[0075] 在一实施例中,如图3所示,提供了一种电驱系统的控制调整装置,包括:

控制参数获取模块210,用于从预构建的转矩控制模型的控制参数集中,获取使电驱系统中电机的预设转矩与实际转矩的电磁转矩误差最小的目标控制参数;

控制参数调整模块220,用于根据所述目标控制参数,调整所述电驱系统中电机控

制器的控制参数；

其中,所述转矩控制模型用于调整所述电机的转矩,所述控制参数集包括多组控制参数,一组所述控制参数包括比例增益参数和积分时间参数。

[0076] 通过从用于调整电驱系统的电机转矩的转矩控制模型的控制参数集中,获取使电驱系统中电机的预设转矩与实际转矩的电磁转矩误差最小的目标控制参数,以根据该目标控制参数,调整电驱系统中电机控制器的控制参数,从而使电驱系统能够达到较优的阶跃响应输出,提高对电机转矩控制的精确度,减少电驱系统的能量损耗。

[0077] 在一实施例中,控制参数获取模块210具体用于:

多次调整所述转矩控制模型的控制参数集,每次调整均在根据所述预设转矩、所述转矩控制模型上一次输出控制信号时所述电机的电磁转矩误差以及所述控制参数集中的各组当前控制参数,得到与各组所述当前控制参数一一对应的各转矩误差后,确定各转矩误差的最小值为所述转矩控制模型当次输出控制信号时所述电机的电磁转矩误差,以及根据各转矩误差中小于预设误差的各目标转矩误差一一对应的各组当前控制参数,更新所述控制参数集,直至所述控制参数集的调整次数达到预设次数,将各所述转矩误差的最小值对应的一组所述当前控制参数,确定为所述目标控制参数。

[0078] 在一实施例中,控制参数获取模块210具体用于:

根据各所述目标转矩误差一一对应的各组当前控制参数,采用粒子群优化算法,更新所述控制参数集。

[0079] 在一实施例中,控制参数调整模块220还用于:

根据所述电机的损耗模型,从所述电机的磁链集中,获取使所述损耗模型的损耗值最小的目标定子磁链值;

根据所述目标定子磁链值,确定所述电机的定子磁链;

其中,所述磁链集包括多个定子磁链值。

[0080] 在一实施例中,控制参数调整模块220具体用于:

多次将所述磁链集的各定子磁链值输入所述损耗模型,每次输入均在获取所述损耗模型输出的与各所述定子磁链值一一对应的各当前损耗值后,根据各所述当前损耗值中的小于预设损耗的各目标损耗值一一对应的各所述定子磁链值,更新所述磁链集,直至所述磁链集的更次数达到预设次数,将各所述当前损耗值的最小值对应的定子磁链值,确定为所述目标定子磁链值。

[0081] 在一实施例中,控制参数调整模块220具体用于:

根据各所述目标损耗值一一对应的各所述定子磁链值,采用粒子群优化算法,更新所述磁链集。

[0082] 在一实施例中,所述预设转矩根据搭载所述电驱系统的车辆的车辆模型确定。

[0083] 图4示例了一种电子设备的实体结构示意图,如图4所示,该电子设备可以包括:处理器(processor)810、通信接口(Communication Interface)820、存储器(memory)830和通信总线840,其中,处理器810,通信接口820,存储器830通过通信总线840完成相互间的通信。处理器810可以调用存储器830中的计算机程序,以执行电驱系统的控制调整方法,例如包括:

从预构建的转矩控制模型的控制参数集中,获取使电驱系统中电机的预设转矩与

实际转矩的电磁转矩误差最小的目标控制参数；

根据所述目标控制参数,调整所述电驱系统中电机控制器的控制参数；

其中,所述转矩控制模型用于调整所述电机的转矩,所述控制参数集包括多组控制参数,一组所述控制参数包括比例增益参数和积分时间参数。

[0084] 此外,上述的存储器830中的逻辑指令可以通过软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用,可以存储在一个计算机可读取存储介质中。基于这样的理解,本申请的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品存储在一个存储介质中,包括若干指令用以使得一台计算机设备(可以是个人计算机,服务器,或者网络设备等)执行本申请各个实施例方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括:U盘、移动硬盘、只读存储器(ROM,Read-Only Memory)、随机存取存储器(RAM,Random Access Memory)、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

[0085] 另一方面,本申请实施例还提供一种存储介质,存储介质包括计算机程序,计算机程序可存储在非暂态计算机可读存储介质上,计算机程序被处理器执行时,计算机能够执行上述各实施例所提供的电驱系统的控制调整方法。

[0086] 以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的,其中作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的,作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元,即可以位于一个地方,或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部模块来实现本实施例方案的目的。本领域普通技术人员在不付出创造性的劳动的情况下,即可以理解并实施。

[0087] 通过以上的实施方式的描述,本领域的技术人员可以清楚地了解到各实施方式可借助软件加必需的通用硬件平台的方式来实现,当然也可以通过硬件。基于这样的理解,上述技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品可以存储在计算机可读存储介质中,如ROM/RAM、磁碟、光盘等,包括若干指令用以使得一台计算机设备(可以是个人计算机,服务器,或者网络设备等)执行各个实施例或者实施例的某些部分所述的方法。

[0088] 最后应说明的是:以上实施例仅用以说明本申请的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本申请进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本申请各实施例技术方案的精神和范围。

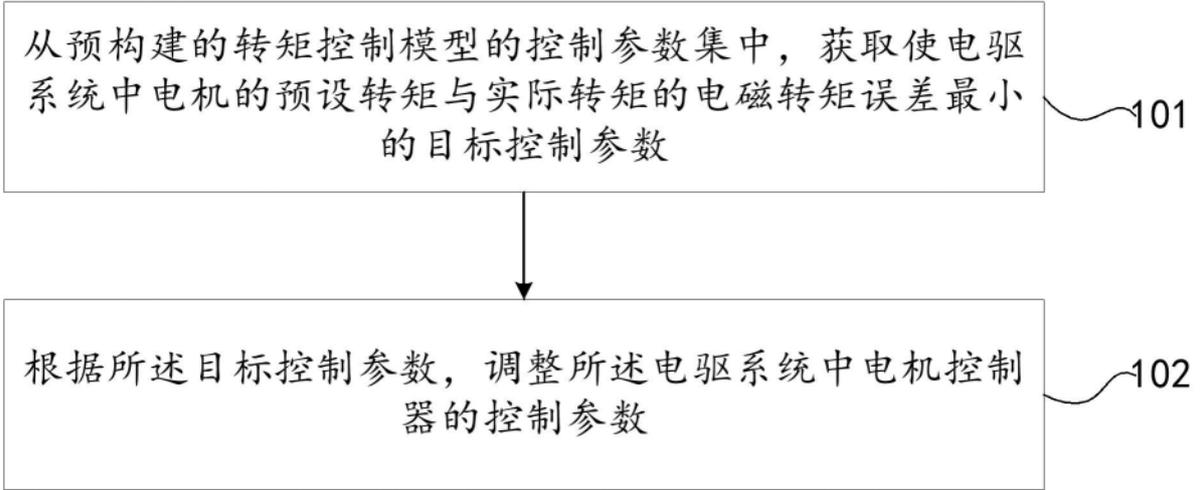


图1

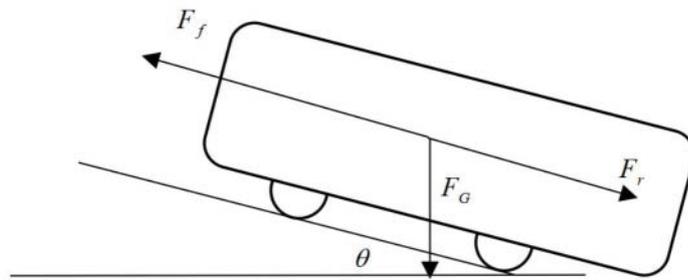


图2

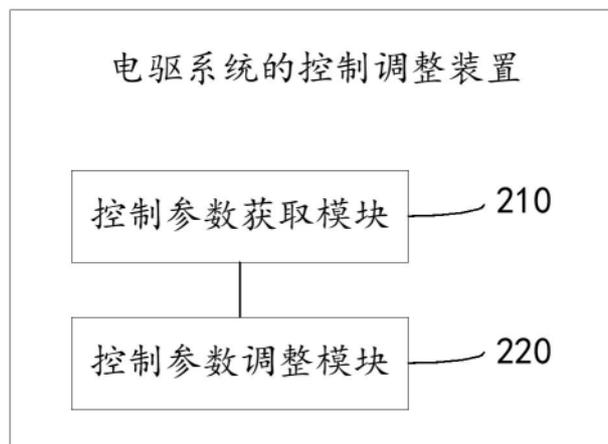


图3

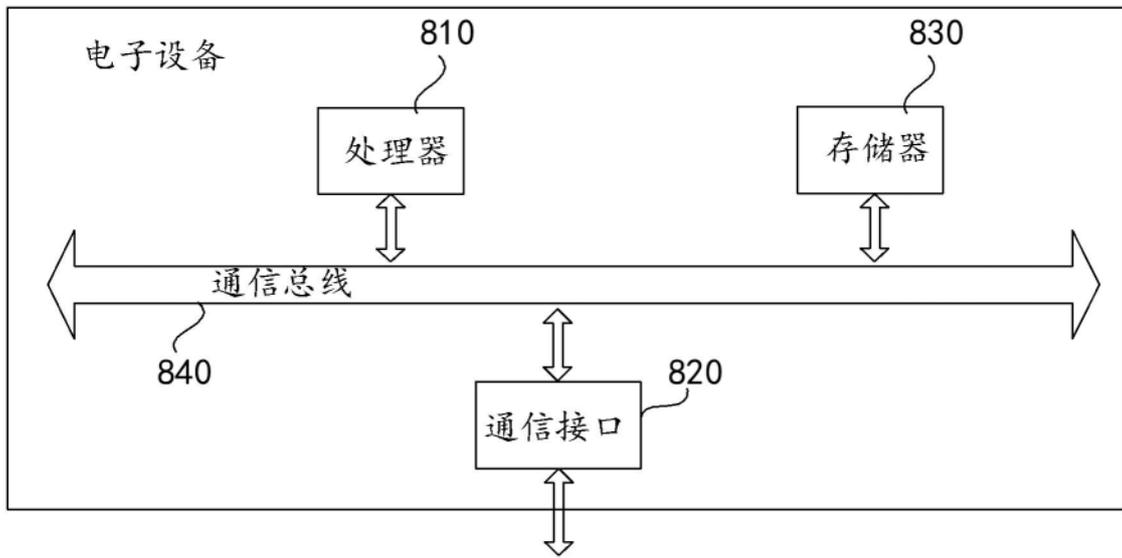


图4