

基于分段输出的电动汽车电机 PWM 占空比控制系统设计

杨立英, 刘晓敏

(吉林大学 应用技术学院, 长春 130022)

摘要: 为加快电动汽车在负载量变化时所表现出来的电量响应速率, 降低执行电动机控制指令所需的电能消耗量, 设计基于分段输出的电动汽车电机 PWM 占空比控制系统; 根据带存贮电容功率变换器的连接状态, 调试功率变换器驱动电路、档位与油门给定输入电路的响应形式, 联合 DSP 控制板与软启动模块, 确保滑模转矩控制器不出现过量负载的情况, 从而将电动汽车电动机控制系统的核心设备元件组合起来, 完成硬件应用环境的搭建; 在此基础上, 研究 PWM 占空比控制原理, 利用开关磁阻电机数学模型, 确定脉冲行为成因, 并将整个脉冲行为为区间规划成多个分段结构, 完成基于分段 PWM 占空比输出电动机控制行为分析, 结合各级应用设备, 实现电动汽车电动机控制系统的设计; 实验结果显示, 在分段 PWM 占空比输出原理的作用下, 无论负载量增大或减小, 电动汽车所表现出来的电量响应速率均能保持相对较高的数值水平, 能够将电动机控制指令执行所需的电能消耗量保持在理想数值区间之内, 提升电动汽车电机的电能利用率。

关键词: 分段 PWM 占空比; 电动汽车; 电动机; 存贮电容; 软启动; 脉冲行为

Design of PWM Duty Cycle Control System for Electric Vehicle Motor Based on Segmented Output

YANG Liying, LIU Xiaomin

(College of Applied Technology, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to speed up electric quantity response rate of electric vehicle when load changes, and reduce the required electric energy consumption to execute motor control instruction, a control system of electric vehicle motor with pulse width modulation (PWM) duty cycle based on segmental output is designed. According to the storage capacitor power converter connection status, the power converter drive circuit, gear and throttle response forms of the given input circuit are debugged, which joints the DSP control board and soft start module, the sliding mode of excess load torque controller is ensured not to happen, which will be the core of the electric motor control system equipment components together, and the hardware construction of the application environment is completed. On this basis, the principle of PWM duty ratio control is investigated, the pulse behavior causes are determined by using the mathematical model of switched reluctance motor, and the whole pulse interval is divided into multiple block structures, the output motor is completed based on PWM duty ratio control behavior analysis, combined with the various applications, the design of the control system of the electric car motor is realized. Experimental results showed that, based on the segmented PWM duty cycle control principle, whether the action of load increases or decreases, the electric vehicle power can maintain the response rate of relatively high value level, and the electricity consumption for the motor control instruction execution can keep in ideal numerical range, effectively improve the electric car motor power utilization.

Keywords: piecewise PWM duty cycle; electric vehicles; motor; storage capacity; soft start; impulse behavior

0 引言

占空比指的是在一个标准的脉冲循环内, 设备通电时间在总通电时长中所占据的比例数值。对于单纯的电力驱动体系而言, 占空比能够决定输出电压的数值水平, 随着脉冲宽度值的不断增大, 占空比数值也会不断增大, 此时电量主机也可以对输出电压信号进行精确调制^[1-3]。分段

PWM 电路的主要执行功能是将已输入电压的振动幅度转换成宽度值恒定的脉冲输出波, 简单来说, 就是将输入电压的振幅资料与输出脉冲的宽度数值匹配起来。在电量供应系统中, 由于占空比指标参量的存在, 分段 PWM 电路可以长期维持相对稳定的存在状态, 不但能够实现对压差比数值的按需调控, 也可以控制电动势场强对主电路体系的影响强度, 从而使得电动机元件所输出的电量波能够满足

收稿日期: 2022-01-27; 修回日期: 2022-04-08。

作者简介: 杨立英(1971-), 女, 吉林榆树人, 博士, 副教授, 主要从事计算机仿真与控制方向的研究。

引用格式: 杨立英, 刘晓敏. 基于分段输出的电动汽车电机 PWM 占空比控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 107-112.

驱动电路的实际应用需求^[4-6]。

当前电动汽车的种类有：纯电动汽车、混合动力汽车、燃料电池汽车三类，本文所设计的电动车控制系统适用于纯电动汽车。纯电动机驱动的电动汽车与传统燃油汽车的能源供应方式有很大不同，前者的系统结构中包含多个分支体系，能够借助能量转换单元，将所有传输电量聚合起来，并可以将其暂时存储于动力电池结构之中^[7]。随着电动汽车行驶距离的延长，能源电池所承担的力学负载量也会不断增大，此时点电荷会在输电通路内大量累计，从而导致电量响应速率持续下降，并最终增大了电动机控制指令执行所需的电能消耗量。为避免上述情况的发生，文献^[8]提出基于 Quasi-Z 源间接矩阵变换器的控制系统通过确定电流收敛速度的方式，确定电动机元件的当前执行状态，再根据电机参数的变化域区间，完成对能源供应量的有效控制。然而此系统在单位时间内对传输电量的按需规划能力有限，并不能使得电动汽车电量响应速率达到预期数值水平。文献^[9]提出基于 IW 电机驱动的电动汽车主动振动控制系统，首先，通过理论推导检验了一般电动车轮结构平顺性差的原因，建立 6 自由度车辆模型，提出了一种模糊最优滑模控制方法，并应用该控制理论设计了电动汽车电机主动振动系统。然而此系统对电动汽车电量响应的时延较大。

为解决上述问题，设计基于分段输出的电动汽车电机 PWM 占空比控制系统，并通过对比实验的方式，突出该系统的实际应用价值。

1 电动汽车电动机控制系统整体结构

电动汽车电动机控制系统的整体架构由功率变换器、主电路体系、DSP 控制板、软启动模块、滑模转矩控制器几部分共同组成，电动汽车电动机控制系统整体结构示意图如图 1 所示。

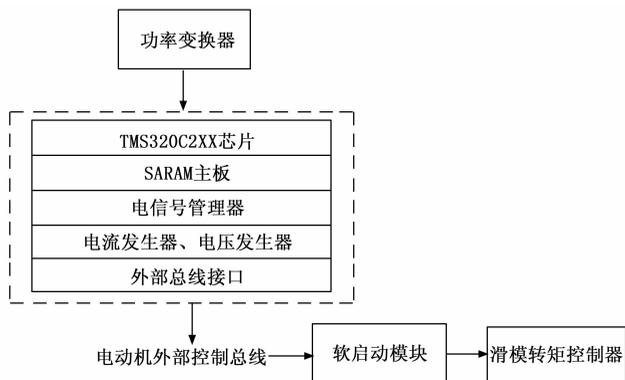


图 1 电动汽车电动机控制系统整体结构图

具体设计如下。

1.1 带存储电容的功率变换器

在电动汽车电动机控制系统中，带存储电容的功率变换器负责将波动式输入电量转换成稳定的直流输出电量，并可以将这些电量传输信号存放于电阻电容结构中，以便

于 PWM 电路可对这些信号参量进行提取与利用^[10]。存储电容接入区域位于功率变换器顶端，有多个连接卡槽组成，且卡槽与卡槽之间必须放置一个薄片状挡板结构，一方面屏蔽了负载电量信号对功率变换器造成的影响，另一方面也可以避免相邻电容元件之间出现互相侵扰的情况下，从而使得电动汽车电动机的电量输出行为得到较好保障。功率变换器核心主板并不是一个完全闭合的物理结构，其外表面上具有多个圆形通路，负责将发电动汽车电动机所产生的物理热量传导至控制系统外部，从而使得电动机体系内的感应温度始终维持相对较低的数值状态^[11]。

为使分段 PWM 占空比指标的数值水平达到实际应用需求，所有电容连接结构都需要具有极大的电量存储空间，且出于安全性考虑，电容元件还应具有较强的电量感知能力，必须将已存储电量完全整合成标准的传输格式，以促进功率变换器结构能够具有充足地储备电参量。

1.2 主电路体系

电动汽车电动机控制系统的主电路体系以功率变换器驱动电路、档位与油门给定输入电路作为核心结构，其具体结构特征如下。

1) 功率变换器驱动电路：

功率变换器驱动电路以 IR2110 芯片作为核心设计结构，能够借助多个负载结构，将电动机电量信号反馈至模态电阻、电磁干扰器、电量仪表等多个设备结构中，并可以在 R 级电阻元件的作用下，对已堆积的电量传输信号进行疏导处理，从而使得控制系统内的电信号供应需求得到较好保障^[12]。IR2110 驱动芯片具有较强的电量信号感知能力，可以决定电动汽车电动机在单位时间内所承担的电压与电流水平，并以此为基础，促使模态电阻长期处于相对稳定的供电状态。具体电路结构如图 2 所示。

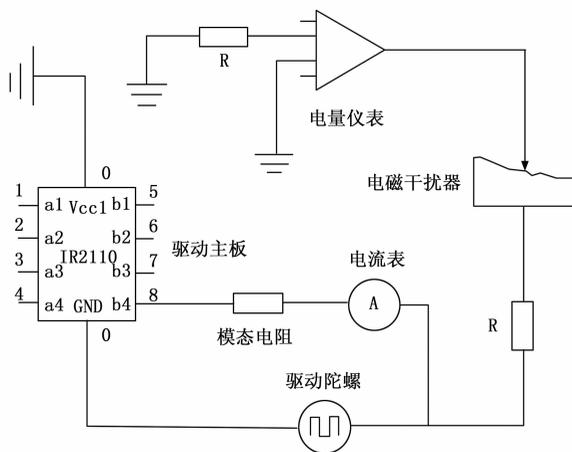


图 2 功率变换器驱动电路示意图

驱动陀螺能够负载所有剩余电量信号，对于电动汽车电动机元件而言，该结构负责对功率变换器驱动电路提供保障作用。在电动汽车电动机控制系统中，由于功率变换器内所存储感应电容的数值水平相对较高，所以整个驱动

电路必须同时具备电量整合与电信号反馈的执行能力。

2) 档位与油门给定输入电路:

电动汽车电动机控制系统利用 LF2407A 芯片的 I/O 模拟接口, 来完成 4 个基础档位之间的输出关系变换^[13]。具体示意结构如图 3 所示。

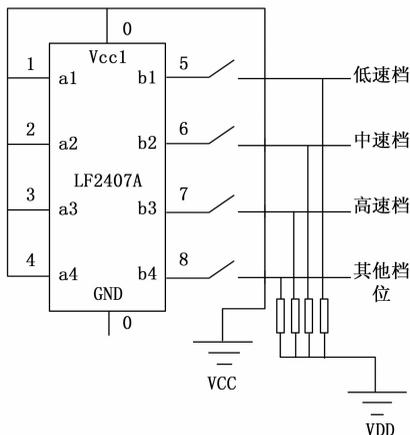


图 3 档位与油门给定输入电路示意图

1 号接口与 5 号接口对应, 管控电动汽车电动机的低速档变换需求; 2 号接口与 6 号接口对应, 管控电动汽车电动机的中速档变换需求; 3 号接口与 7 号接口对应, 管控电动汽车电动机的高速档变换需求; 4 号接口与 8 号接口对应, 管控电动汽车电动机的其他档位变化需求; 两个 0 号接口互相对应, 管控电动汽车电动机与给定输入电路之间的物理连接关系。出于应用安全性考虑, 各个物理接口之间不具备互相转化的能力。

1.3 DSP 控制板

DSP 控制板也叫 DSP 控制器主机, 存在于 I/O 总线与程序总线之间, 且由于电量控制信息寄存通路的存在, 相关数据信息指令始终得到流畅地传输与处理, 这也是电动汽车在负载量变化时所表现出来的电量响应速率依然不会出现大幅下降情况的主要原因^[14]。电动汽车电动机控制程序经由外部总线接口进入外部控制总线中, 但由于其物理结构相对简单, 所以总线及接口结构仅负责对控制指令进行传输, 不具备任何的处理与分辨能力。完整的 DSP 控制板功能框图如图 4 所示。

电动汽车电动机控制程序由 DARAM 主板制定, 能够在 TMS320C2XX 芯片的短暂存储作用下, 顺利进入 SARAM 主板之中, 并可以完全释放程序指令中的剩余数据信息参量^[15]。电信号管理器同时协调下级电流发生器与电压发生器, 可在调取电流与电压传输信号的同时, 分析程序指令的传输价值, 从而使得电动汽车的档位转换需求得到较好满足。

1.4 软启动模块

在启动电动汽车电动机结构时, 电信号负载量会快速出现变化, 在此情况下, 电量指标的响应速率也会受到明显影响。而由于软启动模块的存在, IPM 装置可以不断将



图 4 DSP 控制板的功能框图

控制电流与控制电压中的电量成分分离出来, 再借助晶闸管结构将这些信号参量反馈给开关器件, 不但满足了系统主机对于电动汽车电动机元件的控制需求, 也使得各级电量传输信号得到了有效利用^[16]。在仅考虑 IPM 装置、晶闸管、开关器件、限流电阻四类用于结构的情况下, 可将软启动模块内的设备连接模式如图 5 所示。

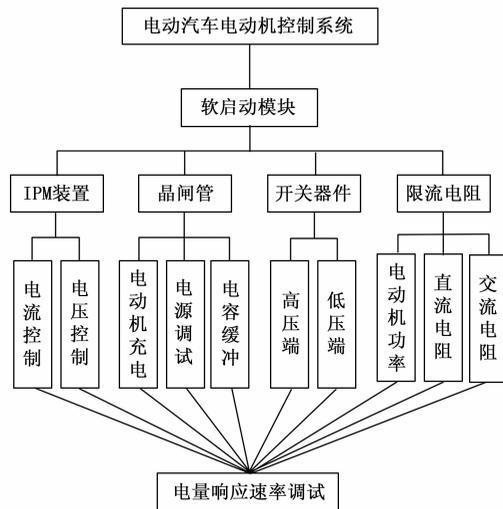


图 5 软启动模块内的设备连接模式

从功能性角度来看, 软启动模块的存在是为了使电动汽车电动机元件的电量响应速率能够长期保持相对稳定的数值状态。在实际应用过程中, 由于限流电阻的安插位置并不完全固定, 所以电阻元件必须同时包含直流、交流两种连接形式。

1.5 滑模转矩控制器

滑模转矩控制器负责将 DSP 控制板、软启动模块与核心电动机控制设备连接起来, 并可在不改变电量信号传输方向的前提下, 更改电压的输入数值, 从而使得电动汽车单位电量区间内的传输电流水平得到较好控制, 避免电动机元件承担不必要的电量击穿作用。一般来说, 整个滑模转矩控制器始终呈现立方体连接状态, 在电动汽车电动机

控制系统中,只要存在物理导线装置,该结构即可存在于任何连接位置处,不但节省了系统内的位置空间,也可大幅缩短控制器元件与核心控制主机直连的导线连接长度,从而在根本上解决控制指令传输时间过长的问题^[17]。由于主控制器与转矩单位之间始终保持直行连接关系,所以滑模组织的行为方向不会受到电量信号传输方向的影响,一方面使得电动汽车电动机的电量响应速率水平得到有效保障,另一方面也可以将电动机元件内的电信号损耗量控制在较低数值水平。

为适应电动汽车电动机对于电量信号的利用需求,滑模转矩控制器的转速数值必须具备一定的可调试空间。在考虑软启动模块作用能力的情况下,滑模转矩控制器的转动速率越快,则表示主电路体系对于 DSP 控制板的实时调控能力越强,反之则越弱。

2 基于分段 PWM 占空比输出电动机控制行为分析

针对各级硬件应用结构,按照 PWM 占空比控制原理,建立完整的开关磁阻电机数学模型,再联合已知的脉冲行为成因,对电量传输信号的分段区间进行规划,在已知分段区间规划标准的情况下,系统控制主机可以直接调度电动汽车电机所需的功率信号,消除不必要的用电行为,从而解决控制指令执行过多导致的用电问题,完成基于分段 PWM 占空比输出电动机控制行为分析。

2.1 PWM 占空比控制原理

PWM 占空比控制原理可以理解为在电量信号出现占空状态时,PWM 电路所具备的电量输出能力不会快速发生改变。在初期变化阶段,电流与电压的输出行为依然可以维持原有形式;而随着变化行为的不断深入,电流与电压的单位输出量会出现逐渐下降的变化状态,且这种低量级输出行为会持续到电量信号恢复至正常供应状态为止。

设 U_i 表示 PWM 电路的实际电压输出量, U_0 表示 PWM 电路的原有电压输出量, θ 表示电压信号的占空比系数。利用上述物理量,可将电压量 U_0 与电压量 U_i 的影响强度表示为:

$$U_i = \theta \cdot U_0 \quad (1)$$

设 I_i 表示 PWM 电路的实际电流输出量, I_0 表示 PWM 电路的原有电流输出量, φ 表示电流信号的占空比系数。利用上述物理量,可将电流量 I_0 对电流量 I_i 的影响强度表示为:

$$I_i = \frac{I_0}{\varphi} \quad (2)$$

规定 λ 表示 PWM 电路内的电量误差值指标, β 表示与电动汽车电动机元件匹配的电量定标值, e_i 表示电量信号的实际输出强度, e_0 表示电量信号的原有输出强度。在上述物理量的支持下,联立公式 (1)、公式 (2),可将 PWM 占空比控制原理表达式定义为:

$$W = \frac{(\lambda - 1) \cdot |U_i \cdot I_i|^2}{\beta \times \sqrt{e_i^2 - e_0^2}} \quad (3)$$

式中, W 表示 PWM 控制占空比值。在电动汽车电动机控制系统中,PWM 电路对于电量信号的占空比控制能力越强,就表示电流与电压的输出行为越稳定,电量信号所表现出来的响应速率水平也就相对更高。

2.2 开关磁阻电机数学模型

开关磁阻电机数学模型是分段 PWM 占空比控制算法得以顺利应用的核心参考条件,可作为数值标准,对电动汽车电动机元件内的电量输出行为进行约束,不但解决了负载量变化情况下电量指标响应速率过慢的问题,也可将系统控制主机调试到相对稳定的应用状态,从而使得电动机控制指令执行所需的电能消耗量数值大幅缩小^[18]。

规定 q_{\max} 表示电动汽车电动机开关元件的满额磁阻作用强度, q_{\min} 表示电动汽车电动机开关元件在占空输出情况下的磁阻作用强度, χ_{\max} 表示与 q_{\max} 系数匹配的电动机运转常量, χ_{\min} 表示与 q_{\min} 系数匹配的电动机运转常量,联立公式 (3),可将开关磁阻电机所承担的电量负载作用定义为:

$$S = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{(\chi_{\max} - \chi_{\min})^2} \quad (4)$$

设 δ 、 γ 表示两个不同的 PWM 电路占空比定标值, d_1 、 d_2 分别表示与 δ 和 γ 指标匹配的电信号输出量, β 表示电量信号的占空传输权限, ΔD 表示电信号的单位传输量。在上述物理量的支持下,联立公式 (4),可将开关磁阻电机的数学模型定义为:

$$\alpha_s = S \frac{\delta d_1}{\gamma d_2} + \beta(\Delta D) \quad (5)$$

为避免 PWM 电路内的电量占空比指标取值结果过大,开关磁阻电机数学模型的建立必须以 PWM 占空比控制原理表达式作为关键参考条件。

2.3 脉冲行为成因

脉冲行为描述了电量信号的传输状态,在占空比情况下,PWM 电路的分段区间越多,电量信号的主动传输能力就越强,脉冲波的主动行为趋势也就越明显,此时与电动汽车电动机匹配的电量响应速率水平较高,是控制系统所追求的理想化行为模式^[19]。在电动机元件分段 PWM 占空比输出能力不发生改变的情况下,电量信号脉冲行为的主要成因包含如下几类。

1) 低速档:低速档位下,电动汽车电动机所需的驱动电量相对较少,此时电量脉冲行为将主导控制系统的实时执行能力;

2) 中速档:中速档位下,电动汽车电动机可能出现占空比运转状态,此时只有充分抑制电量脉冲行为,才能使控制系统的执行能力得到保障^[20];

3) 高速档:高速档位下,电动汽车电动机一定会出现占空比运转状态,此时 PWM 电路中的电信号输出量并不完全可控,因此需要通过电动机自身的电量复原作用,对已产生的电量脉冲行为进行抵抗;

4) 其他档位:与低速档情况下电量脉冲行为的成因完全一致。

2.4 分段区间规划

分段区间规划能够满足 PWM 电路在占空比运行状态下的所有电量输出需求。在已知分段区间规划标准的情况下, 系统控制主机能够直接调度电动汽车电动机所需的电量信号, 省去了不必要的电量消耗行为, 从而解决了因控制指令过度执行而带来的电信号消耗过量问题, 使得电动汽车具备了长久行进的能力^[21-23]。

设 ω 表示最小的分段定量指标, g_ω 表示指标取值为 ω 时的 PWM 占空比区间规划权限, k 表示既定的占空比标准度值, f 表示电动汽车电动机在当前情况下所选择的档位系数^[24-25]。在上述物理量的支持下, 联立公式 (5), 可将分段区间规划标准定义为:

$$H = \frac{\sum_{\omega=1}^{+\infty} f\alpha_s - kg_\omega^2}{v + c(1 - \xi)} \quad (6)$$

式中, \bar{v} 表示单位时间内的占空比电量均值, ξ 表示 PWM 电量波的传输强度, c 表示电量感应系数。一般来说, 电动汽车电动机控制系统对于电量信号的管控处理行为只能发生在 PWM 占空比输出的标准分段区间之内。

3 实例分析

为突出说明基于 Quasi-Z 源间接矩阵变换器控制系统、基于分段 PWM 占空比输出型控制系统的实际应用价值, 设计如下对比实验。具体实验流程如下。

步骤一: 选取图 6 所示电动汽车作为实验对象, 分别应用基于分段 PWM 占空比输出型应用系统、基于 Quasi-Z 源间接矩阵变换器应用系统对实验用汽车进行控制, 其中前者作为实验组、后者作为对照组;



图 6 电动汽车实验对象

步骤二: 将图 7 所示电动机供电设备装入实验用电动汽车之中, 分别记录在实验组、对照组系统控制下, 相关实验指标参量的具体数值变化情况;



图 7 电动机供电设备

步骤三: 对比实验组、对照组指标参量;

电量响应速率能够反映执行电动机控制指令时, 供应电能的消耗量水平, 其具体计算式如下:

$$P = \frac{|\tau|\sigma^2 \cdot \psi^2}{\bar{V}} |T| \quad (7)$$

其中: τ 表示电动汽车负载量, \bar{V} 表示电量响应速率, P 表示单位时间内的供应电能消耗量, σ 、 ψ 表示两个不同的电量负载系数, T 表示实验时间。在 σ 、 ψ 取值结果保持不变的情况下 (σ 、 ψ 取值均为自然数“1”), 根据公式 (7) 可知, 电量响应速率越快, 单位时间内的供应电能消耗量也就越少, 即 \bar{V} 取值越大, P 取值越小。

图 8 反映了在电动汽车负载量不断变化的情况下, 实验组、对照组电量响应速率指标的数值记录结果。

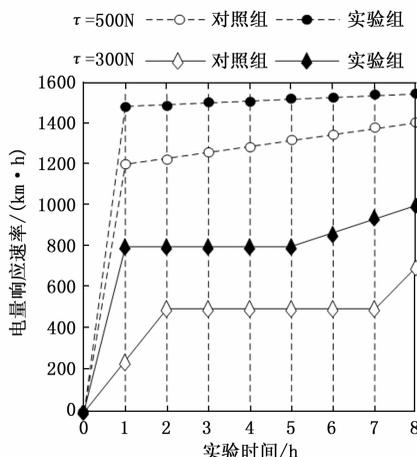


图 8 电量响应速率指标的记录数值

分析图 8 可知, 当 τ 指标取值为 300 N 时, 实验组、对照组电量响应速率 (\bar{V}) 均呈现出先上升、再稳定、最后继续上升的数值变化趋势, 但实验组均值水平始终高于对照组, 从极限值角度来看, 对照组最大值仅能达到 700 kW·h, 与实验组最大值 1 000 kW·h 相比, 下降了 300 kW·h; 当 τ 指标取值为 500 N 时, 实验组、对照组电量响应速率 (\bar{V}) 均呈现出不断上升的数值变化趋势, 实验组均值水平依然高于对照组, 从极限值角度来看, 对照组最大值达到了 1 400 kW·h, 与实验组最大值 1 527 kW·h 相比, 下降了 127 kW·h。

对照图 8 中 \bar{V} 指标的取值结果, 对单位时间内的供应电能消耗量 P 进行计算, 具体计算结果如表 1 所示。

分析表 1 可知, 当 τ 指标取值为 300 N 时, 对照组供应电能消耗量 (P) 呈现出下降、再上升、最后继续下降的数值变化趋势, 实验组供应电能消耗量 (P) 则呈现出先下降、再上升的数值变化趋势, 整个实验过程中, 实验组最大值达到了 2.40 kW, 与对照组最大值 4.20 kW 相比, 下降了 1.8 kW, 且实验组均值水平也相对较低; 当 τ 指标取值为 500 N 时, 实验组、对照组供应电能消耗量 (P) 均呈现出不断增大的数值变化趋势, 实验组最大值 1.57 kW, 与对照组最大值 1.71 kW 相比, 下降了 0.14 kW。

表 1 单位时间内的供应电能消耗量

实验时间/(h)	供应电能消耗量(P)/(kW)			
	$\tau = 300\text{ N}$		$\tau = 500\text{ N}$	
	对照组	实验组	对照组	实验组
1	1.36	0.38	0.25	0.20
2	1.20	0.75	0.49	0.40
3	1.80	1.13	0.71	0.60
4	2.40	1.50	0.93	0.80
5	3.00	1.88	1.41	0.99
6	3.60	2.04	1.36	1.18
7	4.20	2.28	1.51	1.38
8	3.43	2.40	1.71	1.57

综上所述,在基于分段 PWM 占空比输出型应用系统的作用下,当电动汽车负载量等于 300 N 与 500 N 时,电量响应速率指标的数值水平平均会出现明显增大的数值变化趋势,此时若电量负载系数取值保持不变,则能够降低执行电动机控制指令所需的电能消耗量,能够有效提升电动汽车的电能利用率。

4 结束语

与基于 Quasi-Z 源间接矩阵变换器控制系统相比,新型电动汽车电动机控制系统通过计算分段 PWM 占空比输出系数的方式,确定功率变换器、DSP 控制板、软启动模块、主电路体系、应用电阻电容等多个硬件设备结构的连接形式,又根据开关磁阻电机数学模型,完成对分段区间的按需规划,从而实现对电量脉冲行为的准确分析。从实用性的角度来看,在这种新型应用系统的作用下,电动汽车电动机的电能消耗量能够得到有效控制,这对于供应电能的节约与高效利用能够起到较强的促进性影响作用。

参考文献:

- [1] 刘迪,赵永生,范云生,等.基于 TSF 的开关磁阻电机脉宽调制变占空比控制[J].电机与控制应用,2020,47(1):15-20,35.
- [2] 张雨,张一鸣,王旭红.PSFB-PWM 变换器峰值电流无差拍控制算法研究[J].电力电子技术,2021,55(1):112-115.
- [3] 吴迪瑞,田韶鹏.基于 TLGI 技术的纯电动汽车车用电动机新型控制[J].江苏大学学报(自然科学版),2021,42(1):9-14.
- [4] 陈之晟,张锋.一种降低 3-D VRRAM 热串扰的并行输入重编码电路[J].微电子学与计算机,2021,38(11):95-100.
- [5] 焦皎,孟润泉,任春光,等.交直流微电网 AC/DC 双向功率变换器控制策略[J].电力系统保护与控制,2020,48(16):84-92.
- [6] 王上行,贾学翠,王立华,等.混合储能系统的功率变换器电流预测控制方法[J].电力建设,2020,41(1):71-79.
- [7] 王占国,郑凯元,张维戈,等.基于 GaN HEMT 的隔离型 DC-DC 变换器驱动电路设计[J].电源技术,2020,44(9):1366-1370.
- [8] 郭明珠,刘硕,刘钰山,等.具有低电压穿越能力的 Quasi-Z

源间接矩阵变换器电机驱动控制系统[J].电机与控制学报,2020,24(1):128-136.

- [9] HE R, WANG J C. Vertical vibration control of an in-wheel motor-driven electric vehicle using an in-wheel active vibration system[J]. Asian Journal of Control; Affiliated with ACPA, the Asian Control Professors Association, 2020, 22(2): 879-896.
- [10] 詹瑜坤,孙佳伟,罗继亮,等.无刷直流电机 DSP 逻辑控制程序的 Petri 网设计方法[J].华侨大学学报(自然科学版),2020,41(6):816-823.
- [11] 高家豪,夏晓娟.具有预偏置电压保护的软启动电路设计[J].固体电子学研究与进展,2020,40(3):211-218.
- [12] 李春艳,周念成,王强钢,等.基于软启动的变压器励磁涌流抑制方法[J].电工技术学报,2020,35(17):3640-3651.
- [13] 宁博文,周凤星,卢少武.基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制[J].控制与决策,2021,36(4):953-958.
- [14] 刘勇智,李杰,鄢成龙.开关磁阻电机最优分数阶 PID- μ 控制器设计[J].电子测量与仪器学报,2020,34(1):105-110.
- [15] 郝浩楠,徐俊,蒲晓晖,等.面向新能源汽车的悬架振动能量回收在线控制方法[J].西安交通大学学报,2020,54(4):19-26.
- [16] 李军,黄志祥,周伟.基于模糊 PID 控制的削峰填谷式电池均衡系统研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(10):132-138.
- [17] 曹鑫,陈化腾,邓智泉.两类多自由度开关磁阻电机原理与控制的类比[J].南京航空航天大学学报,2020,52(2):171-180.
- [18] 杨文浩,苟斌,雷渝,等.基于模型预测控制的开关磁阻电机转矩脉动抑制方法研究[J].电工电能新技术,2020,39(8):18-28.
- [19] 吴铁洲,路成东,黄柱越.一种提高锂电池脉冲充电能量利用率的方法[J].电源技术,2020,44(12):1775-1778,1799.
- [20] 刘鹏,潘越,王哲铭,等.基于套管屏蔽环的开关柜脉冲电流法在线局部放电检测系统[J].水电能源科学,2021,39(2):160-164.
- [21] 张琦,孙亮,申家锴,等.考虑电量执行进度公平性的月度电能交易计划四阶段建模[J].电力系统自动化,2020,44(14):101-110.
- [22] 杨洪朝,牛犇,孟科,等.考虑可控负荷功率调整的电力服务商分段式补偿定价决策[J].电力系统保护与控制,2020,48(22):100-108.
- [23] 李晓庆,孟德智,杨家强.基于单位矩阵的电动汽车永磁同步电机制电流解耦技术研究[J].大电机技术,2021(4):6.
- [24] 张会娟,姚艳艳,刘建娟,等.基于矢量控制的永磁同步电机控制方法研究[J].计算机测量与控制,2021,29(1):77-81,86.
- [25] 赵蕾,白甲丽.基于差分进化的幕墙百叶伺服电机自抗扰控制[J].计算机测量与控制,2021,29(11):88-94.