DOI:10.12177/emca.2026.232 文章编号:1673-6540(2026)10-0993-12 中图分类号:TM 351 文献标志码:A

含 Boost 电路的电动汽车两相电机驱动技术研究

董 迪[1], 陆海峰[1,2*], 陈志涛[3]
(1. 新疆大学 电气工程学院,新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830017;
2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系,北京 100084;
3. 等磁科技公司研发部,山东 德州 253500)

Research on Two-Phase Motor Drive Technology with Boost Circuit for Electric Vehicles

Dong Di[1], Lu Haifeng[1,2*], Chen Zhitao[3]
(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;
2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Research and Development Department, Dengci Technology Company, Dezhou 253500, China)

Abstract: **[Objective]** To address the issues in traditional flux-weakening control for electric vehicle two-phase motor drives—limited power in the flux-weakening region, decreased motor output torque as speed increases, and increased system volume and cost caused by a front-end Boost circuit—this paper proposes an integrated circuit scheme that combines a Boost converter and a two-phase half-bridge inverter based on three-phase bridge multiplexing. **[Methods]** To meet the wide-speed-range operation requirements of the motor drive system for electric vehicles, the working mechanisms of the Boost circuit and the two-phase half-bridge inverter circuit were analyzed, and a system topology based on three-phase bridge multiplexing was proposed and constructed. Based on this, the key parameter design and control algorithm design were carried out, and the proposed scheme was verified by combining modeling simulation with theoretical comparison. **[Results]** The results showed that the proposed scheme effectively improved the DC voltage utilization and achieved the integrated coordination of boost and drive functions with only a slight increase in system volume and cost. Without reducing the output torque, the motor speed regulation range was expanded by 36.08%, which verified the effectiveness of the scheme in wide-speed-range operation. **[Conclusion]** The proposed scheme effectively balances the requirements of wide-speed-range performance, system cost, and structural integration, providing a feasible technical path for the low-cost and highly integrated wide-speed-range implementation of electric vehicle motor drive systems, and possesses certain theoretical significance and engineering application value.

Key words: electric vehicle; two-phase motor; three-phase bridge multiplexing; Boost circuit

摘 要:**【目的】**针对电动汽车两相电机驱动中传统弱磁控制在弱磁区功率受限、输出转矩随转速升高而下降以及前置 Boost 升压方案导致系统体积和成本增加等问题,本文提出一种基于三相桥复用的 Boost 与两相半桥逆变一体化电路方案。**【方法】**针对电动汽车电机驱动系统宽调速运行需求,分析 Boost 电路与两相半桥逆变电路的工作机理,提出并构建基于三相桥复用的系统拓扑。在此基础上,开展关键参数设计与控制算法设计,并采用建模仿真和理论对比相结合的方法对所提方案进行验证。**【结果】**结果表明,所提方案在仅少量增加系统体积和成本的前提下,能够有效提升直流电压利用率,实现升压与驱动功能的一体化配合;在不降低输出转矩的情况下,电机调速范围扩大 36.08%,验证了该方案在宽调速运行中的有效性。**【结论】**所提方案较好地兼顾了宽调速性能、系统成本与结构集成度要求,为电动汽车电机驱动系统的低成本、高集成宽调速实现提供了可行的技术路径,具有一定的理论意义和工程应用价值。

关键词:电动汽车;两相电机;三相桥复用;Boost 电路

0 引言

随着国家大力推进新能源产业[1],新能源电

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

动汽车产业呈现出快速发展的态势[2-5]。其中,动力性能与购置成本已成为消费者选购新能源电动汽车时的重要考量因素[6]。

目前,永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor,PMSM)凭借体积小、质量轻、调速范围宽和运行效率高等优势,在新能源电动汽车等诸多领域得到广泛应用[7-9]。然而,由于 PMSM 的励磁磁场由永磁体提供,其磁通基本由转子磁路结构决定并保持相对恒定。随着电机转速不断升高,永磁体产生的反电动势也随之增大。当反电动势接近逆变器的最大输出电压极限时,便会制约 PMSM 调速范围的进一步拓展[10]。

在电池电压受限条件下,为拓宽电机调速范围,当前广泛采用弱磁控制策略。该策略可有效拓宽电机的调速范围[11-12],但也存在明显弊端:弱磁控制需要在定子电流中引入额外的去磁分量,从而增加铜耗、降低电机运行效率并导致温升上升;同时,高速弱磁运行会使电机磁通减小,进而引起电磁转矩下降,影响电机带载能力[13]。

为避免弱磁调速带来的性能退化问题,有学者提出采用升压变换器提高直流侧电压[14-16],通过增设 Boost 电路提升蓄电池输出电压,避免直接采用高压直流蓄电池造成成本增加[17-19]。然而,采用附加 Boost 电路进行升压通常需要新增桥臂,这将增加电动汽车电驱动系统的结构复杂度以及设计、制造成本。此外,相关文献表明,在基于三桥臂模块的驱动系统中,额外功率器件的引入还可能带来更高的模块故障风险[20-21]。

当空间上相互垂直的两个绕组中通入相位互差 90°电角度的两相交流电流时,其各自产生的交变磁场将合成为一个旋转磁场,从而驱动转子旋转[22]。由此可知,两相 PMSM 同样具备作为电动汽车驱动电机的可行性,因此可考虑以两相 PMSM 替代现有电动汽车驱动系统中的三相 PMSM,并采用两个半桥电路实现对两相电机的驱动。基于此,为充分利用常见三桥臂模块并发挥 Boost 电路的升压作用,本文提出一种 Boost 级联两相逆变器的两级变换器拓扑。

采用 Boost 级联两相逆变器的两级变换器,可更加充分地利用现有常见的三桥臂模块,并以较低成本实现系统拓扑重构。由于 Boost 电路能够对蓄电池输出的直流电压进行升压,该方案不仅有助于进一步拓宽电机调速范围,还能够有效提高直流电压利用率。

1　Boost+两相半桥逆变器的原理及分析

本文采用前级 Boost 变换器与后级两相半桥逆变器的级联拓扑驱动两相电机。前级 Boost 变换器对直流电源进行升压,后级两相半桥逆变器将升压后的直流电逆变为两相交流电,从而为两相电机提供所需电源。鉴于两电平三相逆变器在工业与车载场景中应用广泛,且车规级三相功率模块产品体系成熟、型号与封装形式较为丰富(例如 HPD、HP1、HP2 等系列),因此可基于现成三相模块实现上述电路,从而降低器件开发与系统实现成本。Boost+两相逆变电路如图 1 所示。

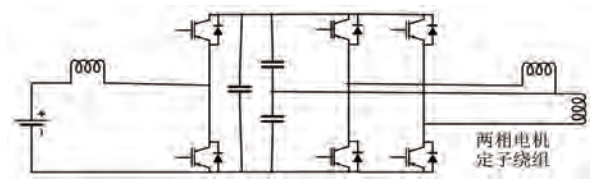


图 1　Boost+两相逆变电路

Fig. 1　Boost+two-phase inverter circuit

图 1 中,系统输入为低压直流电源。前级 Boost 变换器为典型直流—直流变换电路,用于实现直流侧升压。由于 Boost 级采用完整桥臂作为功率变换单元,该结构具备实现双向功率流及能量回收功能的拓扑扩展基础,为后续动能回收研究提供了结构上的可行性。后级两相半桥逆变器由分裂直流母线电容与四个功率开关器件构成,用于将升压后的直流母线电压逆变为两相交流电压,从而实现对两相电机的驱动与控制。逆变器直流侧的两只分裂母线电容参数对称设置,其主要作用在于形成并稳定直流母线中点电位,实现中点电压平衡、抑制中点电位偏移,同时提供直流侧滤波与电压支撑,以提高逆变器输出的稳定性。

2　Boost+两相半桥逆变电路参数计算

为提高两相驱动系统的直流侧供电质量,本文通过优化 Boost 变换器的工作状态并合理选取关键电路参数,以提升输出电压调节精度与电压品质,同时降低功率器件损耗、提高变换效率。由

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

此可为后级两相半桥逆变器提供更稳定、更精确的直流母线电压支撑，从而提高整机直流电压利用率与运行稳定性。

Boost 变换器效率的提高能够降低能量转换过程中的损耗，对提升电动汽车续航具有积极意义。为兼顾效率与器件热特性，本文选用英飞凌 FS660R08A6P2FB 车规级 HybridPACK Drive 三桥臂模块作为功率器件平台。依据器件数据手册给出的开关频率适用范围与损耗特性，该模块绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor，IGBT）单元的标称适用开关频率范围为 10~20 kHz，其中 10~15 kHz 为推荐工作频段；在该频段内，相较于 20 kHz 上限，其开关损耗明显降低。因此，本文将开关频率选取在 10~15 kHz 范围内，以在满足控制与动态性能要求的同时，降低开关损耗、提高 Boost 电路效率，并抑制器件结温温升[23-24]。此外，10~15 kHz 的开关频率范围有利于滤波器件的工程选型，可将电感与电容参数控制在 mH 级电感与 μF 级高压电容的范围内，从而满足电动汽车小型化与集成化的布置需求。同时，该频段的 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$、$\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$ 相对较低，可在一定程度上降低电磁干扰滤波器设计复杂度[25]。综合车规级模块固有特性、开关损耗、器件体积、电磁兼容与可靠性等多方面需求，本方案将 Boost 电路开关频率设定在 10~15 kHz 范围内，该区间也与电动汽车功率变换电路的行业工程实践较为契合[26]。

此外，相关文献表明，当升压比处于中高区间（如大于 4 时），Boost 变换器需在较大占空比下运行，易导致控制裕度减小、动态性能与稳定性变差，并引起器件应力与损耗增加，从而使系统效率降低[27]。因此，为兼顾电驱系统可靠性与功率器件寿命，Boost 变换器不宜通过单纯扩大占空比调节范围来追求过高升压比，以避免器件应力与损耗增加以及稳定裕度下降等问题。综合升压需求与器件工作特性，本文将开关器件占空比限制在 0~0.7 范围内[28]。若以某型老年代步车为例，其蓄电池电压为 60 V。根据 Boost 电路输出电压计算式（1），可得 Boost 电路输出电压范围为 60~200 V。

$$U_{\mathrm{o}}=\frac{t_{\mathrm{on}}+t_{\mathrm{off}}}{t_{\mathrm{off}}}U_{\mathrm{i}}=\frac{1}{1-D}U_{\mathrm{i}} \tag{1}$$

式中：U_{o}、U_{i} 分别为 Boost 电路输出电压、输入电压；t_{on}、t_{off} 分别为开关管导通时间、关断时间；D 为开关管占空比。

电动汽车的平稳运行依赖 Boost 电路输出电压的质量，较高的电压纹波因数会导致电机在运行时出现抖动或异响。根据现行国家标准《GB/T 24347-2021 电动汽车 DC-DC 变换器》，输出电压的纹波因数应不大于 5%。电感以及电容的取值应符合要求，其值应不低于式（2）的计算值。

$$\begin{cases}L=\dfrac{D(1-D)^2U_{\mathrm{o}}}{\Delta U I_0 f_{\mathrm{s}}}\\[2ex] C=\dfrac{I_{\mathrm{o}}D}{\Delta U f_{\mathrm{s}}}\end{cases} \tag{2}$$

式中：f_{s} 为开关频率；ΔU 为输出电压纹波；I_{o} 为 Boost 电路输出电流有效值。

两相半桥逆变电路分压电容的核心要求是均衡母线分压，必要时可并联均压电阻，通过电阻分流强制均压，防止因分压不均导致击穿电容，损坏电路或降低电驱系统寿命。其次，电容容量需要足够大，确保能够吸收母线纹波，从而保证电压质量，使电动汽车能够平稳运行。能够吸收直流母线电压 U_{dc} 纹波的电容值，通常根据逆变器的额定功率、开关频率进行计算，具体关系如式（3）所示。由于该电容承受较高电压，且需要面对行驶中的复杂工况，所以通常取 1.5 倍计算值以保证电驱系统的安全运行。

$$C=\frac{P}{2f_{\mathrm{s}}\Delta U U_{\mathrm{dc}}} \tag{3}$$

3 Boost+两相半桥逆变电路的建模与仿真

3.1 Boost+两相半桥逆变电路的建模

根据图 1，在 Matlab/Simulink 中完成 Boost+两相半桥逆变电路的建模，如图 2 所示。图中，U_{A}、U_{B} 分别为 A 相、B 相定子电压；T_{load} 为负载转矩；i_{a}、i_{b} 分别为 A 相、B 相定子电流；ω_{e} 为电角速度；ω_{m} 为机械角速度；T_{e} 为电磁转矩；θ_{e} 为转子电角度；θ_{m} 为转子机械角度；ψ_d、ψ_q 分别为 d、q 轴磁链；m 为测量输出端；E 为发射极；g 为栅极；C 为集电极。两相电机模型基于 Matlab 库中的 S-Function 模块建立数学仿真模型，用以模拟真实两相电机工作时的情景。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

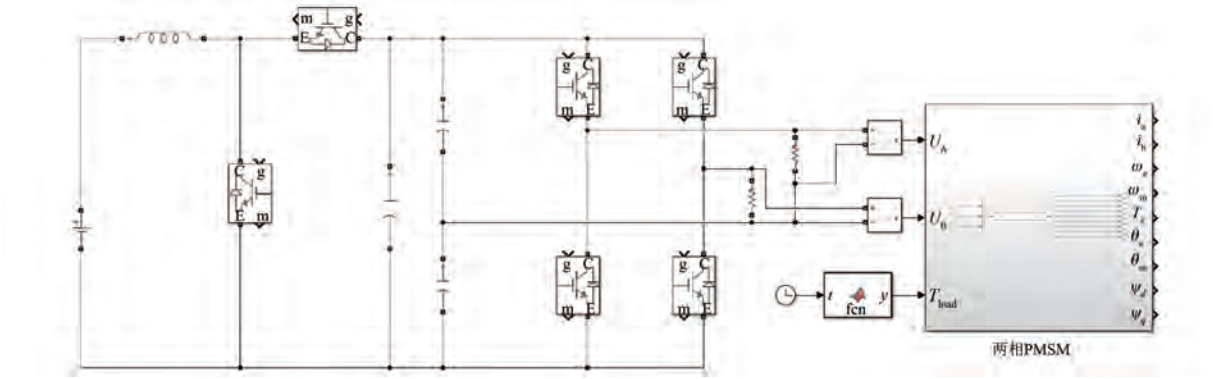


图 2　Boost+两相半桥逆变电路模型

Fig. 2　Boost+two-phase half-bridge inverter circuit model

3.2　Boost+两相半桥逆变电路的仿真

Boost+两相半桥逆变电路的仿真模型采用开环控制验证方式[29],两相半桥逆变器采用正弦脉宽调制(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)控制方式。设置 Boost 电路中 IGBT 占空比为 0.7,则 60 V 直流电源经 Boost 电路升压,根据式(1)可得输出电压应为 200 V,输出电压仿真波形如图 3 所示,符合理论计算结果。

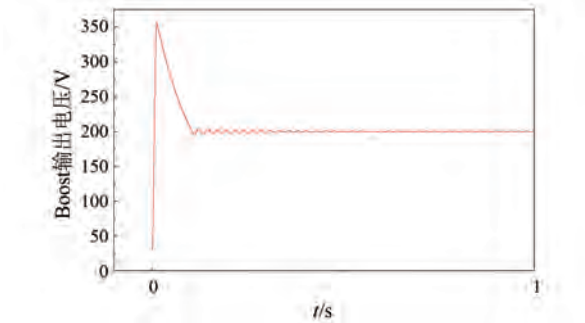


图 3　Boost 电路输出电压仿真图

Fig. 3　Simulation diagram of Boost circuit output voltage

Boost 变换器输出电压接入两相半桥逆变器直流侧后,由两只参数一致的分裂直流母线电容实现电压分配。两相半桥逆变器两电容分压仿真结果如图 4 所示。由图 4 可知,两电容电压均稳定在 100 V,验证了理论推导的正确性。

图 4 仿真电路中的电压经两相半桥逆变器逆变后得到的方波输出,作为两相电机数学模型的输入,电机定子电流输出如图 5 所示。

图 5 显示,两相电机的定子电流为两路相位互差 90°电角度的正弦波,由此验证了 Boost 电路与两相半桥逆变电路结合可稳定驱动两相电机运行。作为电动汽车电能形态转换的核心枢纽,该

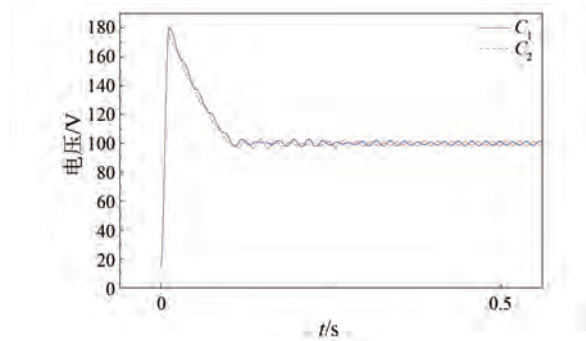


图 4　两相半桥逆变器两电容分压仿真图

Fig. 4　Simulation diagram of voltage division of two capacitors in the two-phase half-bridge inverter

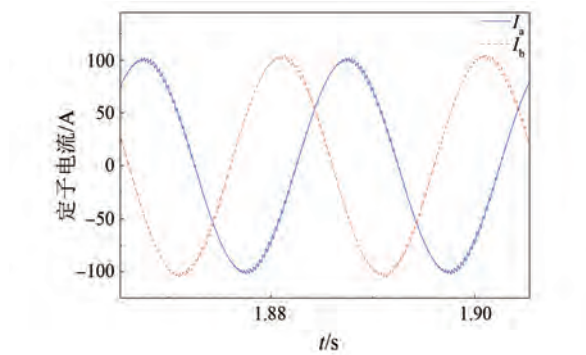


图 5　两相电机模型定子电流

Fig. 5　Stator current of the two-phase motor model

两相半桥逆变电路的可靠性直接影响供电稳定性与电机运行安全,因而具备高可靠性至关重要[30]。

两相半桥逆变电路的两个桥臂与 Boost 电路的桥臂,共用一个车规级三桥臂模块。根据图 3~5,选用英飞凌公司型号为 FS660R08A6P2FB 的 HybridPACK Drive 模块,其额定电压与额定电流为 750 V/660 A,约为 Boost 满载时输出电压峰值

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

(357.5 V)的 2.1 倍,具备充足的安全裕量,有助于提高电路运行可靠性并降低故障风险[31-32]。

3.3 Boost+两相半桥逆变电路性能理论分析

PMSM 转速 n、转矩 T_e、输入功率 P_i 及电机效率 η 的关系如式(4)所示:

$$n = \frac{9\ 550\eta P_i}{T_e} \tag{4}$$

根据式(4)可知,当电机运行在恒转矩模式下,转速与输出功率和电机效率的乘积成正比。设定两相 PMSM 与三相 PMSM 采用相同材料制造,且拥有相同的电机效率,则电机最高转速与输入功率成正比。

三相 PMSM 采用三相半桥逆变器驱动,直流母线电压为 60 V,脉宽调制(Pulse Width Modulation,PWM)生成方式选用电压利用率较高的空间矢量脉宽调制(Space Vector PWM,SVPWM)。若将电压利用率定义为输出线电压基波峰值与直流母线电压之比,则当 SVPWM 处于线性调制区上限时,SVPWM 的基本空间矢量分布如图 6 所示,其理论电压利用率可达到 1,对应的三相 PMSM 的最高输入线电压幅值为 60 V。

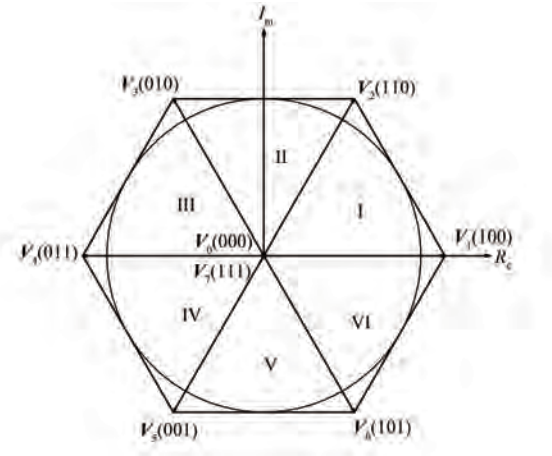


图 6 SVPWM 基本空间矢量分布图

Fig. 6 Basic space vectors distribution diagram of SVPWM

采用 Boost+两相半桥逆变拓扑驱动两相电机时,Boost 级可将直流母线电压由 60 V 升至 200 V。当两相逆变器调制度取 1 时,其空间电压矢量分布如图 7 所示。由图 7 可知,四个开关状态对应的基本电压矢量 $\boldsymbol{V}_0$、$\boldsymbol{V}_1$、$\boldsymbol{V}_2$ 和 $\boldsymbol{V}_3$ 的幅值相同,均为 141.2V;由此形成的矢量集合外接正方形,可实现线性调制的最大电压矢量圆为其内切圆,其半径为 100 V。同时由图 7 可知,当两桥臂中的任一桥臂发生故障时,系统可用的电压合成能力将受到不同程度的约束:在单个 IGBT 发生开路故障的情形下,原有 4 个可合成电压矢量将相应减少至 2 个;若同一桥臂内两只 IGBT 均发生开路故障,则用于矢量合成的开关状态将进一步受限,导致电压矢量难以实现有效构建。上述退化运行工况下,控制自由度与调制裕度均会下降,从而使容错控制的实现难度增加。相较而言,由图 6 可知,三相桥拓扑由于具备更高的冗余度与可重构空间,在故障条件下通常能够维持更为丰富的可用电压矢量集合,因此在综合容错性能方面表现更为稳健。

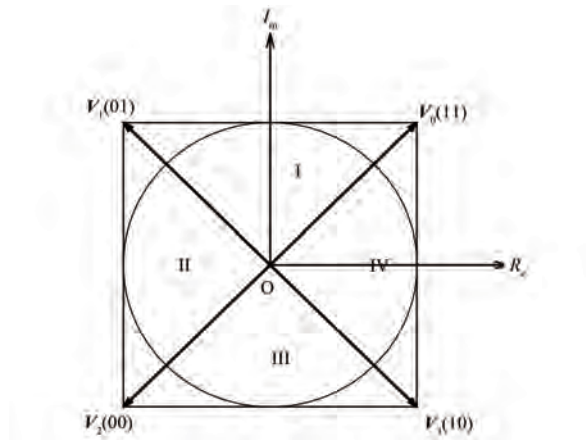


图 7 两相逆变空间矢量分布图

Fig. 7 Space vectors distribution diagram of two-phase inverter

假设两者导体材料、截面积及散热条件一致的前提下,可认为其允许的最大线电流相同。两相 PMSM 输入功率 P_{i-2} 以及三相 PMSM 输入功率 P_{i-3} 计算式为

$$\begin{cases} P_{i-2} = \sqrt{2}\,U_L I_\phi \cos\varphi \\ P_{i-3} = \sqrt{3}\,U_L I_\phi \cos\varphi \end{cases} \tag{5}$$

式中:U_L 为线电压;I_ϕ 为相电流;$\cos\varphi$ 为功率因数。

由以上推导可知,相较于传统三相 PMSM 驱动方案,采用 Boost+两相半桥逆变电路驱动两相电机可将最高转速提高 36.08%。

4 Boost+两相半桥逆变电路控制策略

4.1 Boost+两相半桥逆变电路的控制策略设计

两相半桥逆变器控制策略采用矢量控制;转速给定信号与转速检测反馈的实际转速进行比

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

较,其偏差经 PI 调节得到 q 轴电流给定;d、q 轴电流分别与给定对应反馈电流比较,偏差经 PI 调节生成 d、q 轴电压给定;通过反 Park 变换输入 SPWM 模块,生成 PWM 信号控制逆变器。

速度判断模块依据转速调节输出信号占空比 D 控制 Boost 电路,调节直流侧电压。在定转矩控制模式下,忽略定子电阻、采用 $i_d=0$ 的控制策略,根据式(6)可得电机最大转速与电压可粗略地看作线性关系。

$$\left(\frac{U}{\omega}\right)^2=(\phi_0+L_dI_d)^2+(L_qI_q)^2 \tag{6}$$

式中:ω 为电角速度;U 为定子电压空间矢量幅值;L_d、L_q 分别为 d、q 轴同步电感;I_d、I_q 分别为定子电流 d、q 轴分量;ϕ_0 为转子永磁体产生的基波磁链幅值。

根据式(6)以及 60~200 V 升压范围可得,Boost 输出电压 U_o 与机械转速 n 关系如式(7)所示:

$$U_o=\frac{n-n_0}{n_{max}-n_0}\cdot 140+60 \tag{7}$$

式中:n_{max}、n_0 分别为 Boost 电路 $D=0.7$ 及 $D=0$ 时对应的电机最高转速。

将式(7)与式(1)相结合,即可推导得到 Boost 电路占空比 D 与转速 n 的关系,如式(8)所示:

$$D=1-\frac{n_{max}-n_0}{140n+60n_{max}-200n_0}\cdot 60 \tag{8}$$

根据式(8)调节 Boost 电路的升压比,避免其持续处于高负载状态,从而延长 Boost 电路中 IGBT 等元器件的使用寿命,提高其稳定性、节省能源。

通过位置检测获取电机转子位置,为坐标变换等环节提供相位参考;转速检测持续反馈两相电机转速,二者共同构成系统闭环控制。矢量控制流程如图 8 所示,根据图 8 搭建的仿真模型如图 9 所示。图 9 中,s1~s4 为信号名称。

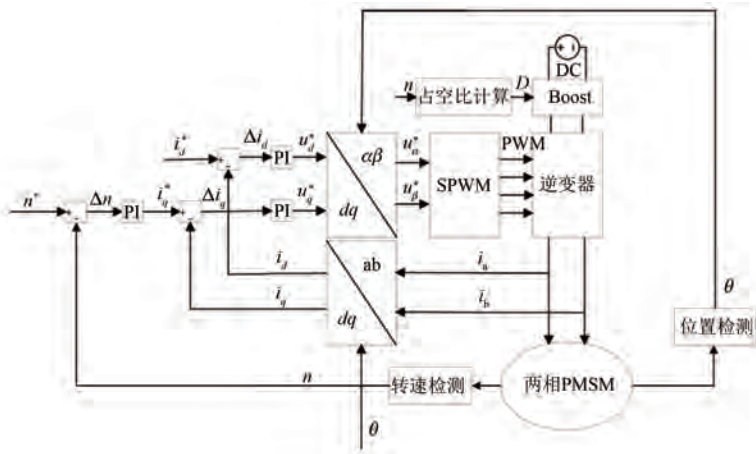


图 8　矢量控制流程

Fig. 8　Flowchart of vector control

4.2　控制策略模型的运行结果

给定转速从 0 开始,以每秒 200 r/min 的速率线性提升至 1 000 r/min,Boost 电路占空比以及输出电压,如图 10 所示。由图 10 可知,所提控制策略能够实现 Boost 级随转速变化的自适应调节功能。

在电机给定转速 1 000 r/min、负载转矩 10 N·m 的工况下,Boost 变换器占空比取 0.7。为模拟负载扰动,在运行过程中将负载转矩由 10 N·m 阶跃至15 N·m,再阶跃至 5 N·m,以表征电机负载波动工况。电机运行状态如图 11~14 所示。

由图 11 可知,电机转速在 0.5 s 内到达给定转速并在 1.1 s 内收敛至给定值;当负载转矩波动时,转速能在 1 s 内重新收敛至稳态,动态响应特性良好。

由图 12 可知,在起动及负载转矩变化工况下,电机电磁转矩能够较快完成调节并保持稳定,验证了所提控制策略在扰动条件下的可行性。

由图 13 可知,Boost 电路达到稳态时输出电压纹波不到 1%;在 5 s 处转矩波动最大时,纹波也仅为 1%,低于国标要求的 5%,符合相关规范。

由图 14 可知,在负载变化工况下,定子电流能够及时完成动态调节且过渡过程较为平稳,表明电流环具有较好的跟踪特性与抗扰能力,从而为电机转矩的稳定输出提供了有力支撑。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

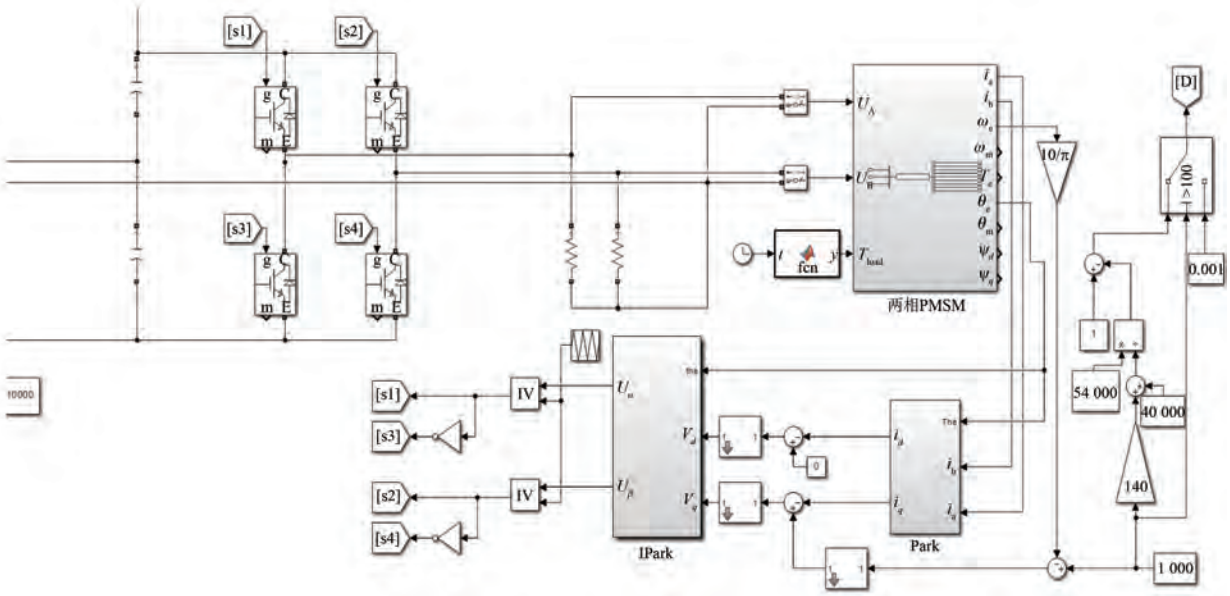


图 9　控制策略仿真建模

Fig. 9　Simulation modeling of control strategy

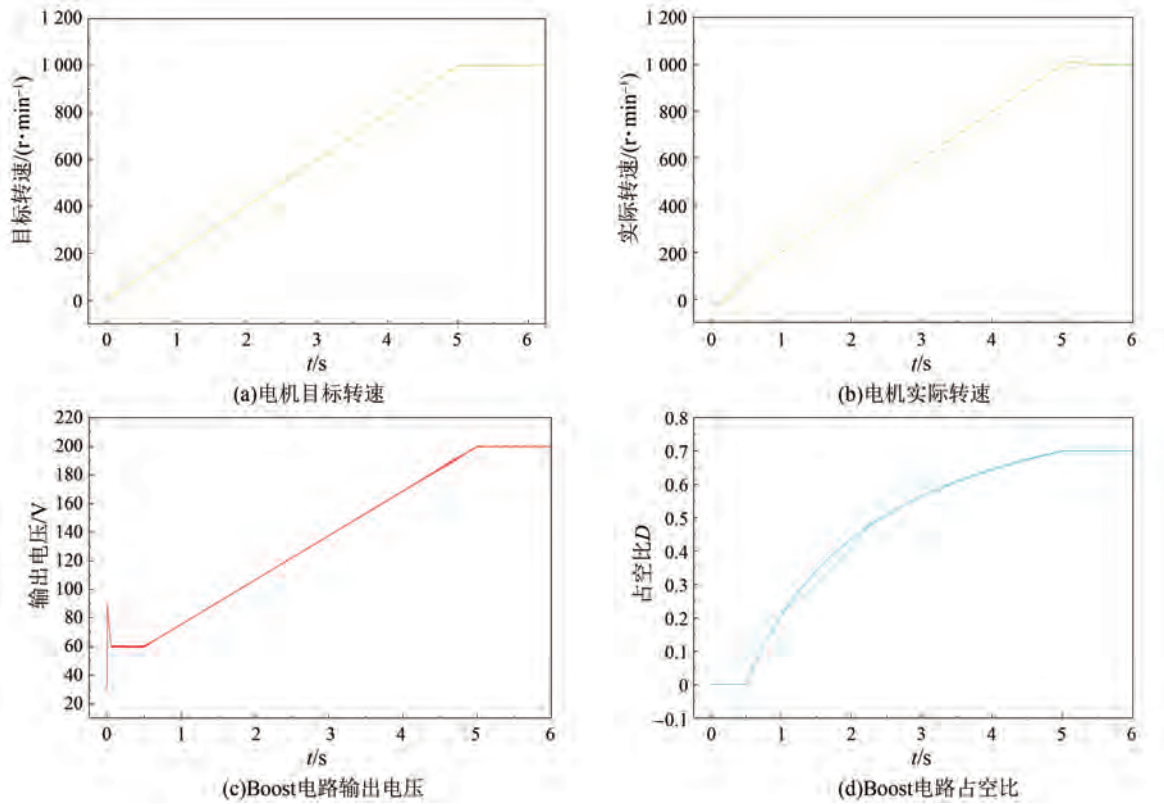


图 10　Boost 占空比调节

Fig. 10　Boost converter duty cycle regulation

4.3　基于标准 SVPWM 控制下的对比仿真研究

为进一步验证本文所提方案的有效性，建立了如图 15 所示的 Simulink 仿真模型。图中，ASR 为自动转速调节器；ACR1、ACR2 分别为 d、q 轴电流调节器。模型中三相电机参数由两相电机参数折算得到，以确保二者的一致性；在此基础上，基

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

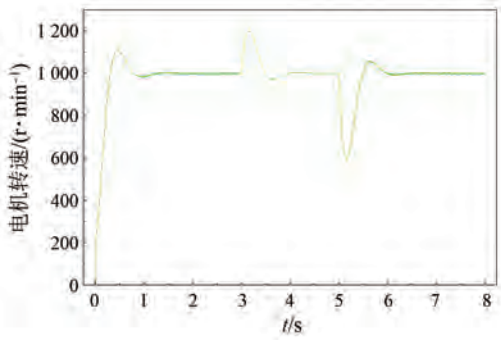


图 11　电机转速

Fig. 11　Motor speed

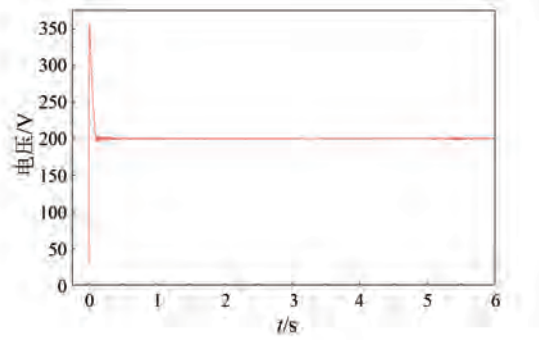


图 13　Boost 电路输出电压

Fig. 13　Boost circuit output voltage

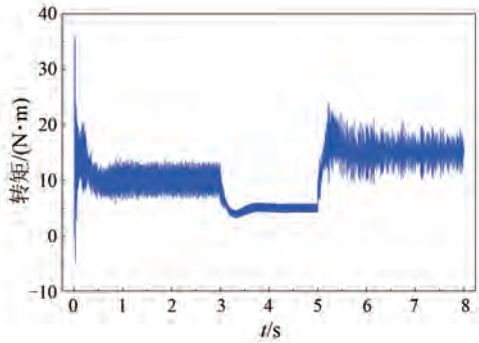


图 12　电机输出转矩

Fig. 12　Motor output torque

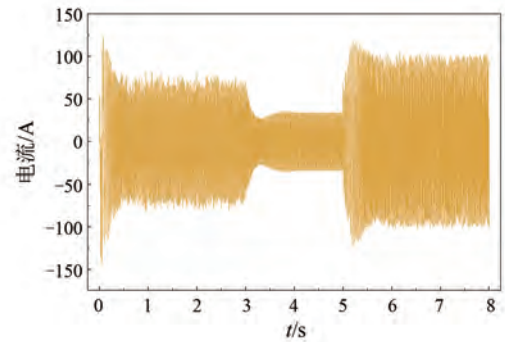


图 14　定子电流 I_a

Fig. 14　Phase-a stator current

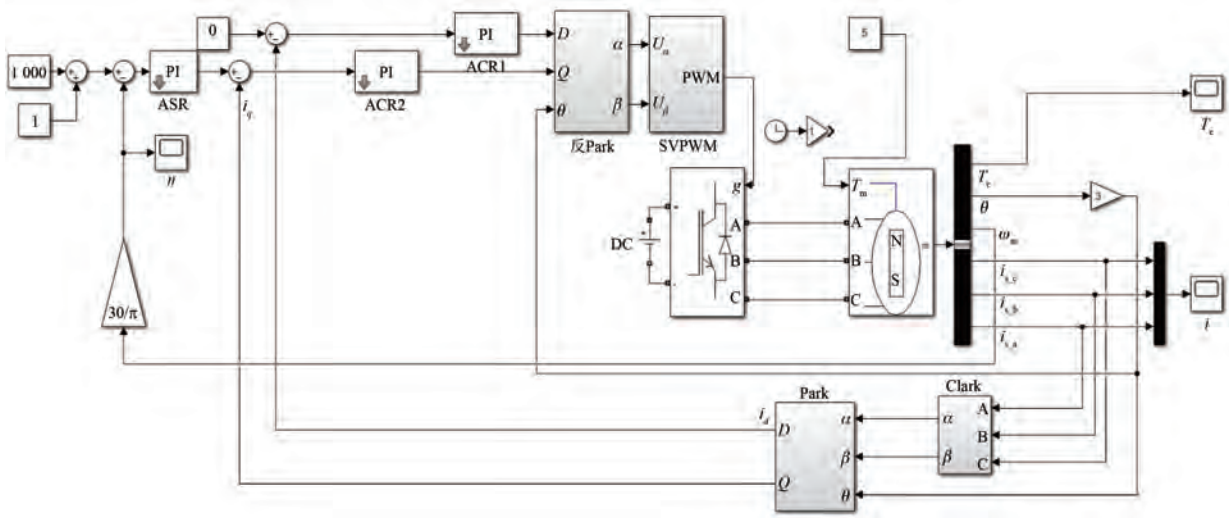


图 15　传统三相桥臂逆变器标准 SVPWM 控制系统仿真模型

Fig. 15　Simulation model of the conventional three-phase bridge arm inverter control system with standard SVPWM

于标准 SVPWM 控制条件,开展所提方案与传统三相桥臂逆变器方案的对比仿真研究。

在两种模型给定转速均为 1 000 r/min 的工况下,负载转矩由 0 开始以 1 N·m/s 的速率逐渐增加,两种模型 PMSM 的输出转矩对比结果如图 16 所示。

由图 16 可知,相较于三相 PMSM,两相 PMSM 的输出转矩波动更明显,转矩变化范围也

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

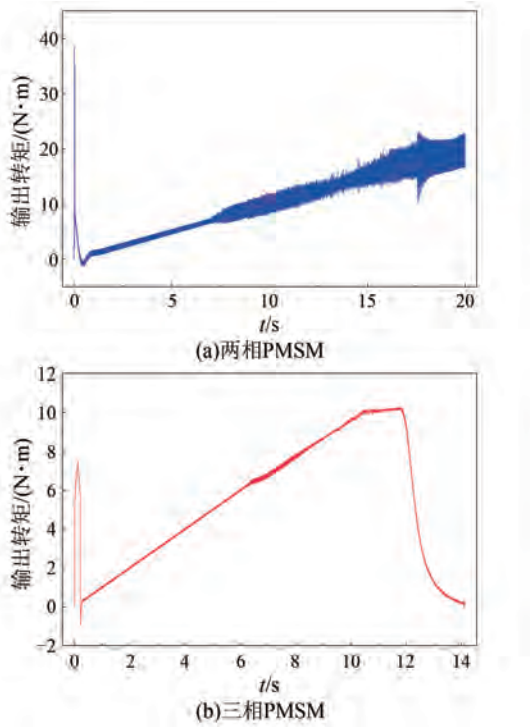


图 16　两相 PMSM 与三相 PMSM 输出转矩对比

Fig. 16　Comparison of output torque between two-phase PMSM and three-phase PMSM

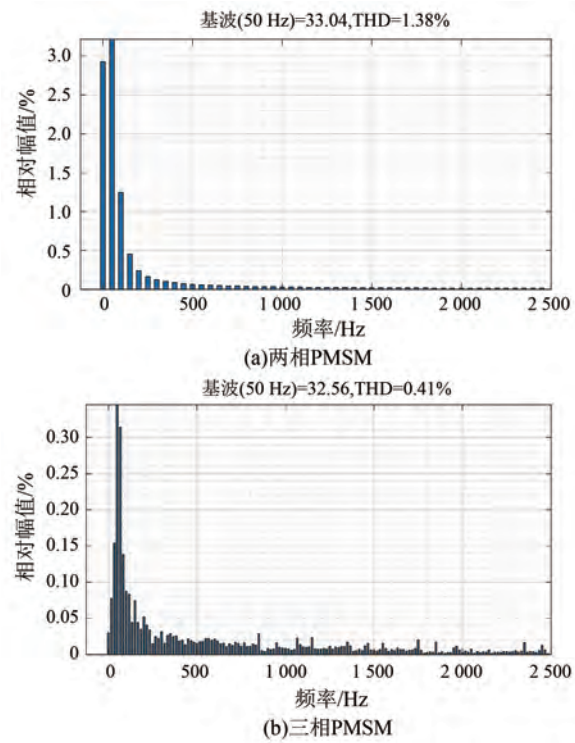


图 17　电机定子电流谐波频谱图对比

Fig. 17　Comparison of harmonic spectrum of motor stator currents

更大。当两相 PMSM 负载转矩超过 14 N·m 时，其转矩脉动幅值随负载转矩增加而逐渐增大。相比之下，当三相 PMSM 负载转矩超过 10 N·m 时，其输出转矩难以保持稳定，且转速也难以维持在 1 000 r/min。综合对比可知，本文所提方案在转矩平稳性方面仍有进一步优化空间，但其在较高负载工况下表现出更强的转矩输出能力。

在两种模型给定转速均为 1 000 r/min、负载转矩均为 5 N·m 的工况下，两种模型的电机一相定子电流的谐波频谱图对比结果如图 17 所示。

由图 17 可知，两相 PMSM 与三相 PMSM 的基波电流幅值接近，分别为 33.04 和 32.56，表明两者在相同工况下均能够建立有效的基波电流分量。然而，两相 PMSM 定子电流总谐波失真（Total Harmonic Distortion，THD）为 1.38%，明显高于三相 PMSM 的 0.41%，表明两相 PMSM 电流中包含更多谐波成分。电流谐波与磁链谐波相互作用后，会引起电磁转矩波动增大，因此两相 PMSM 表现出较大的转矩脉动。相比之下，三相 PMSM 定子电流谐波含量较低，因而其转矩输出更为平稳。综合来看，本文所提两相驱动方案在转矩平滑性方面仍有进一步优化空间，但其仍能够保持较好的转矩输出能力。

5　结语

通过 Matlab/Simulink 建模与仿真验证，所提 Boost+两相半桥逆变级联拓扑可实现两相 PMSM 稳定运行。理论推导和对比分析表明，与传统三相半桥逆变驱动方案相比，该方案在直流电压利用率与调速范围方面具有改进潜力，且复用三桥臂功率模块有助于降低系统实现成本与体积。此外，控制策略的设计与仿真验证进一步证实了该方案的可实现性。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

陆海峰、董迪进行了方案设计、内容总结、论文撰写、理论分析以及仿真验证，陆海峰、陈志涛

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

Lu Haifeng and Dong Di were responsible for scheme design, content summarization, paper writing, theoretical analysis, and simulation verification. Lu Haifeng and Chen Zhitao participated in the review and revision of the paper. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参 考 文 献

[1] 秦空, 张德龙, 赵妍, 等. 双碳背景下港口能源系统多级优化管理方法研究[J]. 电测与仪表, 2026, 63(2): 34-44.
Qin K, Zhang D L, Zhao Y, et al. Research on multi-level optimization management method for port energy system under the dual-carbon background [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2026, 63(2): 34-44.

[2] 龚梦泽. 智能电动汽车发展高层论坛(2026): 2030 年新能源车有望成市场主体[N]. 中国证券报, 2026-04-13(A05).

[3] 薛娟, 马运来, 杜晓波, 等. 新能源汽车市场的增长动因分析——基于技术政策与营销的多维视角[J]. 时代汽车, 2026(8): 94-96.
Xue J, Ma Y L, Du X B, et al. Analysis on the growth motivation of new energy vehicles market——based on the multidimensional perspective of technology, policy and marketing [J]. Auto Time, 2026(8):94-96.

[4] Sreedevi S, Selvi K T, Geetha B, et al. A holistic urban development for the electric vehicle charging infrastructure to foster efficient energy distribution and smart transportation networks [J]. Journal of Energy Storage, 2026, 154(PC): 121277.

[5] 颉浩浩, 吴杞康, 鲍久圣, 等. 新能源汽车驱动电机技术现状及混合励磁研究进展[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(1): 36-51.
Jie H H, Wu Q K, Bao J S, et al. Current status of new energy vehicle drive motor technology and research progress on hybrid excitation [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(1): 36-51.

[6] 张浩, 陈可仁, 沈恬遥, 等. 新能源汽车消费者偏好研究——以长三角地区为例[J]. 河北企业, 2026(1): 9-15.

[7] 乔月阳. 新能源汽车永磁同步电机控制策略研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2024.
Qiao Y Y. Research on control strategy of permanent magnet synchronous motor for new energy vehicles [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2024.

[8] 马鹤林, 安辉, 陆艳君, 等. 深井泵用永磁同步潜水电机性能分析与成本计算[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(4): 82-89.
Ma H L, An H, Lu Y J, et al. Performance analysis and cost calculation of permanent magnet synchronous submersible motor for deep well pumps [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(4): 82-89.

[9] 陈鑫杰, 王慧贞. 航空电源系统用高速实心式永磁同步电机设计[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(2): 61-70.
Chen X J, Wang H Z. Design of high-speed solid permanent magnet synchronous motor for aviation power system [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(2): 61-70.

[10] 郭伟, 张承宁. 反电势限幅对宽调速范围同步磁阻永磁电机设计的影响[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(10): 860-864.
Guo W, Zhang C N. Effect of the back-EMF limiting of broad adjustable speed synchronous reluctance permanent magnet motors [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(10): 860-864.

[11] 徐龙, 李培鹤, 罗欣, 等. 一种改进的内置式永磁同步电机弱磁控制策略[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(3): 231-240.
Xu L, Li P H, Luo X, et al. An improved flux-weakening control strategy for interior permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(3): 231-240.

[12] Park H, Baek D, Jeon H, et al. Relay-based fault-tolerant flux-weakening control of three-level T-type NPC inverter-fed induction motor drives [J]. Journal of Power Electronics, 2026, 26: 1408-1419.

[13] 杜浩. 永磁同步电机弱磁控制策略研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2024.
Du H. Research on flux weakening control strategy for permanent magnet synchronous motor [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2024.

[14] 杜建华. 低输出电压纹波轻载效率提升 BOOST 转

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

换器[D]. 西安：西安电子科技大学，2024.
Du J H. Boost converter design for reduced output voltage ripple and enhanced light-load efficiency [D]. Xi'an：Xidian University，2024.

[15] 王志强. 基于 Boost 的相对升压电路设计[D]. 西安：西安电子科技大学，2024.
Wang Z Q. Design of the relative boost circuit based on Boost [D]. Xi'an：Xidian University，2024.

[16] 蒋威，张少如，杜秀菊，等. 一种非隔离改进二次型 Boost 高增益 DC-DC 变换器[J]. 电机与控制应用，2021，48(6)：100-107+113.
Jiang W，Zhang S R，Du X J，et al. A non-isolated improved quadratic boost high-gain DC-DC converter [J]. Electric Machines & Control Application，2021，48(6)：100-107+113.

[17] 侯聪玲，杨俊华，严心然，等. 基于电池老化感知的车联网能量管理系统研究[J]. 电测与仪表，2025，62(11)：182-191.
Hou C L，Yang J H，Yan X R，et al. Research on the energy management system of internet of vehicle-to-everything based on battery aging perception [J]. Electrical Measurement & Instrumentation，2025，62(11)：182-191.

[18] 李雪阳，谭兵，谈红艳，等. 基于“动力系统成本和电池能量密度”预测纯电动重卡车型的市场应用前景[J]. 装备维修技术，2026(2)：11-15.
Li X Y，Tan B，Tan H Y，et al. Predict the market prospects of pure electric heavy truck models based on the “power system cost and battery energy density” [J]. Equipment Technology，2026(2)：11-15.

[19] 袁小康. 原料涨价施压电池行业迎深度变革[N]. 经济参考报，2026-04-09(06).

[20] 郭子庆，王学华. 基于神经网络的 IGBT 模块剩余使用寿命预测模型[J]. 电测与仪表，2023，60(1)：132-138.
Guo Z Q，Wang X H. Prediction model of neural network-based IGBT module remaining service life [J]. Electrical Measurement & Instrumentation，2023，60(1)：132-138.

[21] 杨培盛，张润泽，郝帅，等. 三电平 Boost 电路动态前馈稳压控制策略研究[J]. 电气传动，2021，51(14)：40-44+80.
Yang P S，Zhang R Z，Hao S，et al. Research on the dynamic feedforward voltage-stabilized control strategy of three-level Boost circuit [J]. Electric Drive，2021，51(14)：40-44+80.

[22] 郭婧. 两相力矩电机低谐波驱动系统研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015.
Guo J. Research on low harmonics drive system of two-phase torque motor [D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2015.

[23] 陕志龙，程鑫，彭程. 面向开关损耗优化的永磁同步电机双矢量模型预测电流控制[J]. 数字制造科学，2026，24(1)：18-22.
Shan Z L，Cheng X，Peng C. Optimal vector control of permanent magnet synchronous motor for switching loss minimization [J]. Digital Manufacture Science，2026，24(1)：18-22.

[24] Pham N L，Phan D Q，Nguyen N V. Current-based SVDPWM with reduced common-mode voltage for switching loss minimization in four-level NPC inverters [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology，2026，21(3)：1-19.

[25] 杨路，罗奕，王岩，等. 基于 ADC 采样电路对电能表计量算法研究与分析[J]. 电测与仪表，2025，62(11)：44-52.
Yang L，Luo Y，Wang Y，et al. Research and analysis of electricity meter metering algorithm based on ADC sampling circuit [J]. Electrical Measurement & Instrumentation，2025，62(11)：44-52.

[26] 夏衍，孙立鹏，李军伟，等. 基于三状态 PWM 的电动汽车电机驱动系统多模式调制策略研究[J]. 电工技术学报，2024，39(4)：1010-1021.
Xia Y，Sun L P，Li J W，et al. Research on multi-mode modulation strategy of motor drive system based on tri-state PWM in EV [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2024，39(4)：1010-1021.

[27] 李鹏飞，蒋赢，陈宗祥，等. 一种新型 Boost 变换器 [J]. 电力电子技术，2008，(11)：37-39.
Li P F，Jiang Y，Chen Z X，et al. A novel Boost converter [J]. Power Electronics，2008，(11)：37-39.

[28] Forouzesh M，Siwakoti Y P，Gorji S A，et al. Step-up DC-DC converters：A comprehensive review of voltage-boosting techniques，topologies，and applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2017，32(12)：9143-9178.

[29] 李晨昊，彭金龙，尤硕，等. 单相 Boost 升压电路开闭环控制仿真研究[J]. 电子制作，2024，32(12)：31-34.

[30] 顾捷，邓孝华，叶萌，等. 电动汽车永磁同步电机

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

IGBT 驱动系统硬件设计[J]. 机电元件, 2022, 42(6): 14-17.
Gu J, Deng X H, Ye M, et al. Hardware design of permanent magnet synchronous motor IGBT drive system for electric vehicle [J]. Electromechanical Components, 2022, 42(6): 14-17.

[31] 李阳, 刘进军, 张岩, 等. 输变电装备 IGBT 寿命周期安全工作区动态标定方法[J]. 高电压技术, 2026, 52(9): 4254-4264.
Li Y, Liu J J, Zhang Y, et al. Method to adaptively calibrate IGBT life-cycle safe operating area in power transmission and transformation equipment [J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(9): 4254-4264.

[32] 沙妍蓓. IGBT 模块驱动与保护技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2025.
Sha Y B. Study on technologies for IGBT module driving and protection [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2025.

收稿日期:2026-05-12
收到修改稿日期:2026-06-29

作者简介:

董　迪(2002—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子技术,17638066247@163.com;

*通信作者:陆海峰(1976—),男,博士,教授,研究方向为电力电子技术、电机及其控制系统,目前主要聚焦于电动汽车高性能电驱动系统,luhaifeng@mail.tsinghua.edu.cn。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.