

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.08.014

基于十八扇区细分的含零矢量 PMSM-DTC 研究*

朱 军,王 栋,吴宇航,李香君,许孝卓

(河南理工大学 电气工程与自动化学院,河南 焦作 454000)

摘要:针对含零矢量的永磁同步电机直接转矩控制(PMSM-DTC)系统,在磁链圆扇区分界线处弧段出现磁链畸变、幅值调节迟缓的问题,从电压矢量与磁链的数学关系入手,根据零矢量所特有性质,分析了有效矢量和零矢量对磁链调节的影响,阐述了出现该问题的根本原因,指出零矢量在扇区分界处应用的一些缺陷,提出一种部分区域替代零矢量的解决办法。该方法将磁链圆均分为18个扇区,通过选择最优电压矢量替代扇区分界处的零矢量,从而使该区域更具可控性,使用了 Matlab/Simulink 建立了相应的仿真模型,最后对上述理论分析进行了实验验证。研究结果显示:该方案可有效改善磁链和转矩波形,为进一步研究提供了相应依据。

关键词:零矢量;直接转矩控制;磁链畸变;18扇区细分;部分区域替代零矢量

中图分类号:TH39;TM351

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)08-0885-06

PMSM-DTC containing zero vector based on 18 section subdivision

ZHU Jun, WANG Dong, WU Yu-hang, LI Xiang-jun, XU Xiao-zhuo

(School of Electric Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Aiming at the problem of that, in containing zero vector PMSM-DTC system, the flux linkage distortion and flux linkage amplitude adjustment slowly around flux linkage circle sector boundary angle. According to the character of the zero vector, the relationship between voltage vector with flux linkage was analyzed, the root cause of this problems was elucidated, some shortcomings that zero vector applied in sector boundaries was pointed out, a solution of alternative zero vector that around the sector boundary angle areas was put forward. This method, flux circle was divided into 18 sectors, then, by choosing the optimal voltage vector to replace zero vector that around sector boundary Angle area, this region adjustment was made more flexible. In the paper, simulation model was establish used Matlab/simulink to the corresponding, experimental verification of the above theoretical analysis. The results shows that this scheme can effectively improve the flux and torque waveforms, and to provide corresponding basis for further research.

Key words: zero vector; direct torque control(DTC); flux linkage distortion;18 section subdivision; replace the zero vector in partial area

0 引 言

永磁同步电机直接转矩控制系统将功率开关器件和电机本体看作一个整体,控制结构简单易行,受到广泛的关注,然而该系统存在转矩和磁链脉动的问题,影响了其在实际中的应用^[1-3]。针对该问题,国内外有许多解决方案,有的在传统 DTC 基础上进行改良,提出

新的电压矢量开关表或者转矩、磁链调节方式;有的引用模糊控制理论、滑模变结构等现代控制理论进行调节^[4-10]。

借鉴零矢量在感应电机 DTC 中抑制转矩和磁链波动的优越性能,国内外许多专家学者开始研究零矢量在 PMSM-DTC 中的应用^[11-14]。南京航空航天大学的胡育文和澳大利亚新南威尔士大学的 RAHMAN M F 将零矢量成功地引入 PMSM-DTC 系统中。然而受零

收稿日期:2017-01-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1504506);河南省高校基本科研业务费专项资金资助项目(NSFRF140115)

作者简介:朱军(1984-),男,内蒙古乌兰察布人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事特种电机驱动控制等方面的工作。E-mail: zhujun@hpu.edu.cn

矢量一些特性影响,其在 PMSM-DTC 系统应用中也存在一些问题,为了完善零矢量在 PMSM-DTC 系统中的应用,对零矢量的一些特性进行分析是非常有必要的。

扇区分细的方法在处理转矩和磁链波动应用中较为简单有效,由于电压矢量有限且不连续,扇区分界处存在不合理的搭配,这会导致转矩的急剧变化,从而出现转矩的波动。目前常见的扇区分界方法有 12 扇区、18 扇区和电压矢量细分 3 种^[15-17]。电压矢量细分是将 180° 导电方式的 6 个电压矢量和 120° 导电方式的 6 个电压矢量相结合,形成 12 个电压矢量和扇区,但是这需要考虑电压型和电流型逆变器兼容问题。常用的 12 扇区和 18 扇区虽然分界方法不同,其目的是相似的,就是将扇区分界线附近的区域单独划出,进行电压矢量重新搭配,不需改变逆变器结构,该方法与传统 DTC 系统相同,可有效保持传统 DTC 系统的简洁性。

本研究将从电压矢量对电机磁链影响的理论分析入手,通过分析有效矢量和零矢量对磁链幅作用的机理,得出含零矢量 PMSM-DTC 系统中在扇区分界角处磁链圆畸变的根本原因,并结合 18 扇区分细,提出一种部分区域替代零矢量的方法,并结合 Matlab/simulink 仿真模型验证该方法的有效性。

1 电压矢量与定子磁链的数学关系

PMSM-DTC 电压与磁链矢量图如图 1 所示。

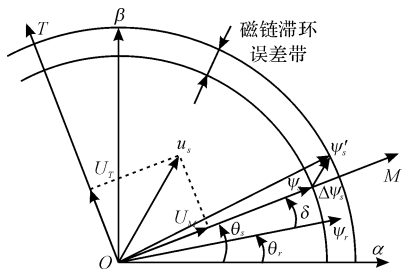


图 1 PMSM-DTC 电压与磁链矢量图

注: u_s —作用的电压矢量; $\psi_s, \theta_s, \psi_r, \theta_r$ —定、转子磁链和磁链角; δ —定、转子磁链的夹角,即负载角; u_M, u_T — u_s 在 $M-T$ 坐标轴上的分量

图 1 中, ABC 为三相静止坐标系, $\alpha\beta$ 为两相静止坐标系, $M-T$ 为定子磁场同步旋转坐标系。

ψ_s 与 M 轴重合,以 ω_s 的角速度旋转, ψ_r 以角速度 ω_r 与转子同步旋转。磁链与电压矢量的数学关系如下:

$$\psi_s = \int (u_s - i_s R_s) dt \quad (1)$$

在忽略绕组阻抗的情况下,可表示为:

$$\psi_s \approx \int u_s dt \quad (2)$$

可见 ψ_s 可以近似看作对电压矢量在时间轴上的

积分,受滞环比较器限制,在滞环带内每个电压矢量的作用时间极短,因此式(2)可表示为: $\Delta\psi_s \approx u_s \Delta t$,即定子磁链的变化量可以看作是电压矢量与作用时间的乘积。

电压与磁链的关系也可以表示为导数形式:

$$u_s = \frac{d|\psi_s|}{dt} e^{j\omega_s t} + j\omega_s \psi_s = u_M + u_T \quad (3)$$

其中:

$$u_M = \frac{d|\psi_s|}{dt} \quad (4)$$

$$u_T = \omega_s |\psi_s| \quad (5)$$

$$\sigma_s = \int \omega_s dt \quad (6)$$

式中: u_M, u_T — u_s 在 $M-T$ 轴上的分量。

u_M 在 M 轴上,与 ψ_s 同向,由公式(4)可知其作用是改变磁链幅值的变化,不影响磁链的转速; u_T 在 T 轴上,与磁链圆径向垂直,指向磁链圆的切线方向,其对磁链幅值变化没有影响,主要改变磁链的转速。

对于三相 H 桥电压型逆变器,在 180° 导电角控制方式下,共存在 6 个有效矢量和两个零矢量。有效矢量的配合使用,在滞环误差带内,即可实现对定子磁链追踪控制。然而受滞环误差带限制,定子磁链以及转矩达到预定值之后,却因为没有达到磁链和转矩滞环误差带限值而继续变化,这是在电机稳态下,磁链和转矩波动的根本原因。

零矢量作用下,由于 $|u_s| = 0$,只有线圈电阻压降可以轻微作用于磁链变化,因此零矢量作用瞬间定子磁链可以近似看作静止状态。零矢量和有效矢量交替动作,使得对给定值的追踪类似于一个走走停停圆周运动。由此可见,零矢量的加入增加了磁链变化缓冲时间,起到了保持磁链恒定的作用。

定子磁链矢量运行轨迹控制如图 2 所示。

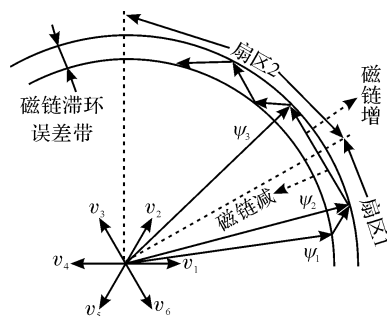


图 2 定子磁链矢量运行轨迹控制

在磁链扇区分界角处,零矢量的加入出现一些问题。在 V_3 的作用下,磁链由扇区 1 进入扇区 2, V_3 与

扇区分界线垂直,其在磁链旋转方向上的分量较大,而在磁链圆径向分量较小,所以 V3 主要作用是加快磁链旋转,而对磁链幅值上的调节作用较弱,这类与扇区分界线垂直的电压矢量在扇区分界线两侧对磁链幅值变化的作用刚好相反。V3 和零矢量减小磁链幅值的作用叠加后,在扇区 1,其对磁链幅值微弱的减小作用得到加强,这是有益的;在扇区 2,则使 V3 对磁链幅值微弱的增加作用进一步抵消,出现扇区分界线一侧磁链圆幅值失调的情况。根据公式(1)可知,若定子电阻过大,零矢量的这种作用会更加明显,甚至在扇区开始弧段会出现磁链幅值持续减小的现象,从而致使磁链局部波动甚至失调。

含零矢量和不含零矢量定子磁链运行轨迹如图 3(a)、4(a)所示,不含零矢量和含零矢量转矩变化曲线如图 3(b)、4(b)所示。

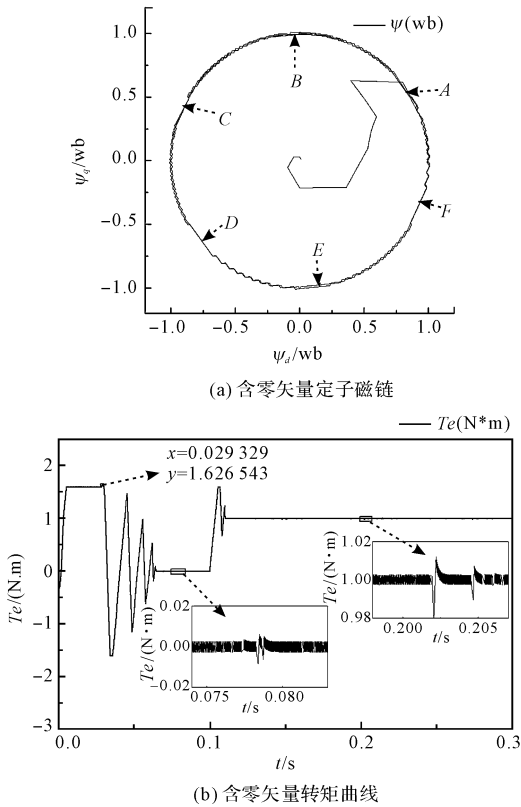


图3 含零矢量(6扇区)磁链及转矩响应

可以看出,图 3(a)中磁链幅值出现了变化迟缓、畸变(箭头所指)的现象。电机空载起动,在 0.1 s 处加入 $1\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载,可以看出两种情况下 PMSM 启动转矩峰值分别为 $1.6\text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $2.45\text{ N}\cdot\text{m}$,零矢量的加入起到软启动作用,附图中可以看出,电机运行平稳之后,含零矢量转矩波动也远小于不含零矢量的情况,从而印证了零矢量在抑制转矩波动的有效性。

定子电阻 $4.52\ \Omega$ 和 $9\ \Omega$ 时的仿真曲线如图 5 所示。

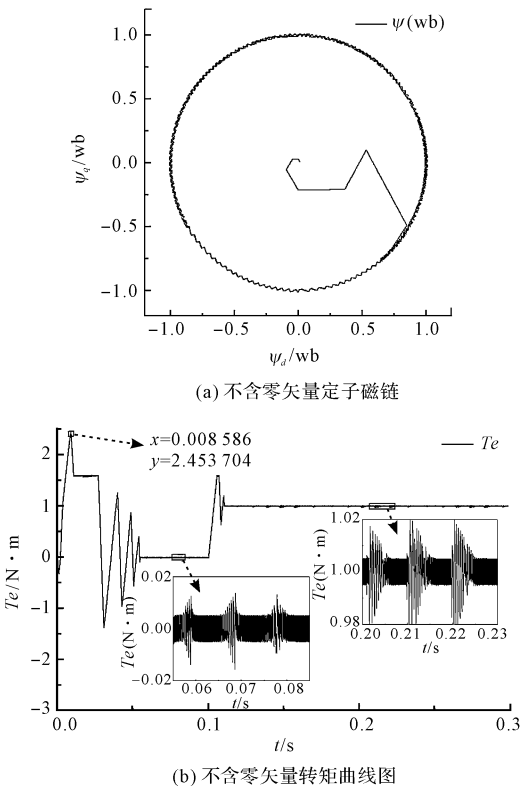


图4 不含零矢量磁链及转矩响应

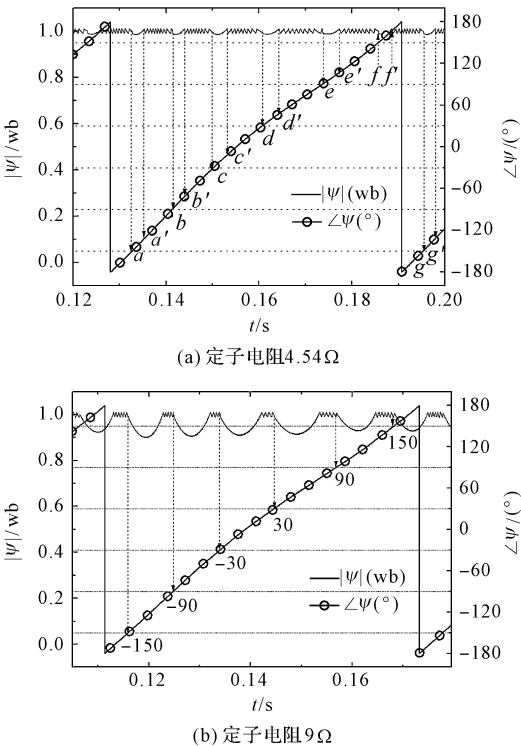


图5 含零矢量的与对照图

通过对比可以发现,随着定子电阻的增大,零矢量的作用越明显,扇区分界线处磁链畸变的越严重。在图 5(a)中磁链变化异常起始处选取 14 个点,采样表如表 1 所示。

表 1 磁链采样表

采样点	t/s	$\Theta/(^{\circ})$	角度差/ $(^{\circ})$
a	0.130 178	-150	18.18
a'	0.133 002	-131.82	
b	0.139 001	-90	15.45
b'	0.141 191	-74.55	
c	0.147 658	-30	18.59
c'	0.150 416	-11.41	
d	0.157 385	30	17.70
d'	0.160 694	47.78	
e	0.168 314	90	18.38
e'	0.173 812	108.38	
f	0.182 720	150	17.17
f'	0.185 812	167.17	
g	0.193 165	-150	20.91
g'	0.195 922	-130.91	

由表 1 可见异常弧段起始于每个扇区的分界处,并随电阻增大,畸变范围在扩大。这种异常是正是零矢量和有效矢量在扇区分界脚处的叠加造成的。表 1 数据分析可知,异常弧段平均 18.07°左右,占整个扇区的 30.1%,不容小觑,该异常弧段的存在,势必会影响转矩精确的控制。

2 部分区域替代零矢量的扇区细分方法

18 扇区分界图如图 6 所示。

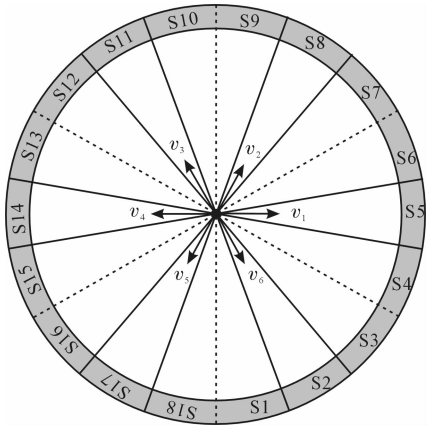


图 6 18 扇区分界图

针对以上问题,本研究提出一种部分区域替代零矢量的 18 扇区分界方法,首先将原扇区均分为 18 份,然后按需求选择最优矢量,具体如下:

(1)对于第 2、5、8、11、14、17 扇区,为原六扇区的中间区域,零矢量降低转矩和磁链波动的作用明显,继续保留;

(2)对于第 1、4、7、10、13、16 扇区,由于磁链幅值调节被零矢量削弱,此处选择一个合适的有效矢量,使

磁链幅值变化更具可调性;
(3)对于 3、6、9、12、15、18 扇区,磁链幅值的调节被零矢量加强,所以无需再选择新的矢量替换零矢量。
本研究根据以上电压矢量选取方法,新的开关表如表 2 所示。

表 2 18 扇区开关表

φ	1			0		
τ	1	0	-1	1	0	-1
S1	V1	V5	V5	V2	V7	V4
S2	V1	V0	V5	V2	V7	V4
S3	V1	V0	V5	V2	V7	V4
S3	V2	V6	V6	v3	V0	V5
S5	V2	V7	V6	V3	V0	V5
S6	V2	V7	V6	V3	V0	V5
S7	V3	V1	V1	V4	V7	V6
S8	V3	V0	V1	V4	V7	V6
S9	V3	V0	V1	V4	V7	V6
S10	V4	V2	V2	V5	V0	V1
S11	V4	V7	V2	V5	V0	V1
S12	V4	V7	V2	V5	V0	V1
S13	V5	V3	V3	V6	V7	V2
S14	V5	V0	V3	V6	V7	V2
S15	V5	V0	V3	V6	V7	V2
S16	V6	V4	V4	V1	V0	V3
S17	V6	V7	V4	V1	V0	V3
S18	V6	V7	V4	V1	V0	V3

注: φ, τ —磁链和转矩的开关因子;Si—扇区, $i = 1、2、3、\dots、18$;V0, V7—零矢量;粗体部分为替代矢量

3 仿真模型及结果分析

含零矢量 DTC 系统与传统 DTC 的区别在于,其需要一个三限值转矩滞环比较器插入零矢量,从而对应转矩的 3 个输出的状态。当 $T_e < T_e^* - \Delta T_e$ 时转矩需要增加,转矩滞环比较器输出因子 τ 取 1;当 $|T_e - T_e^*| \leq \Delta T_e$ 时 τ 取 0,插入零矢量,转矩保持;当 $T_e > T_e^* + \Delta T_e$ 时转矩需要减小, τ 取 -1,根据公式 $s = 3\varphi + \tau + 2$ 和扇区数来确定电压矢量, s 的值是表 2 的列数。

PMSM-DTC 系统仿真参数设置如下:转子惯量 $8 \times 10^{-4} \text{ J/Kg} \cdot \text{m}^2$;磁链给定 $\psi_s^* = 1 \text{ Wb}$;转矩给定 $T_e^* = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$;极对数 $p = 2$;交、直轴电感均为 12.16 mH;转子磁链 $\psi_r = 0.175 \text{ Wb}$;定子电阻 $R_s = 4.54 \text{ } \Omega$;转速给定 $\omega_r^* = 100 \text{ rad/s}$;粘滞系数 $B = 0$;磁链和转矩滞环都为 $[-0.005 \text{ } 0.005]$ 。仿真结果如下:

扇区细分后转矩和磁链的仿真曲线如图 7 所示。

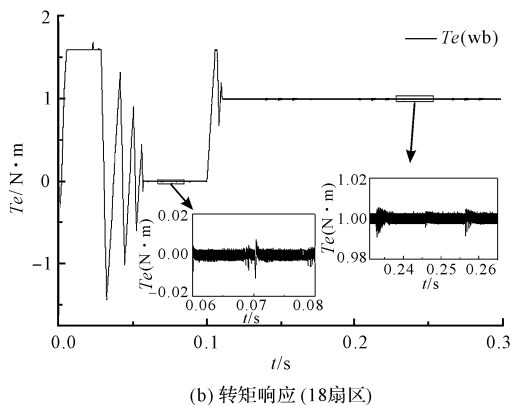
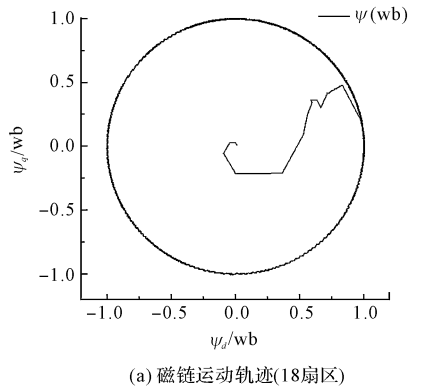
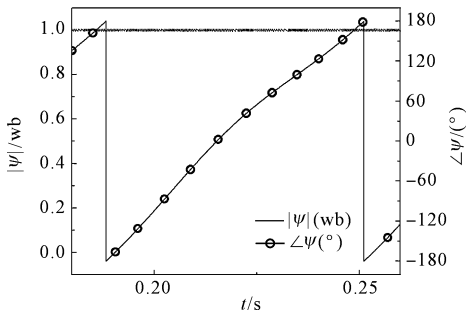


图7 18扇区含零矢量磁链及转矩响应

在0.1 s时有1 N·m负载加入,对应180°左右弧段的电机磁链角度与幅值对照图如图8所示。



对比图3(a)、图7(a)以及图5(a)、图8可以发现,在图8中没有出现图5(a)中的磁链幅值大角度无法得到有效调节的现象,磁链畸变问题在扇区细分后得到解决。

从图3(b)、图4(b)、图7(b)以及其附图中不难看出:不含零矢量转矩波动最明显,每隔一定时间(扇区分界处)会出现一次转矩脉动,最大波动超过0.02 N·m;含零矢量(6扇区)的情况下转矩波动得到很好的抑制,但是扇区分界处仍有少量大幅度脉动,峰值也超过了0.02 N·m;扇区细分后转矩波动趋于平稳,虽然有波动,幅度相对较小,最大波动在0.01 N·m左右。

仿真结果表明,该方案在扇区分界角处用有效矢量替代零矢量,可使磁链的调节更具灵活性,可以很好地实现对定子磁链圆的追踪和转矩的控制,同时由于对原双滞环控制方式仅作较小的调整,其控制系统的简洁性得到了保留。

4 结束语

本研究对电压矢量在PMSM-DTC系统的作用进行了详细分析,指出了电压矢量对磁链和的影响。零矢量可以起到保持磁链稳定不变的作用,一定程度上造成电机磁链的变化迟缓,尤其在扇区分界处,这种作用与有效矢量的作用叠加,使得磁链圆出现较大角度的无法跟随给定的弧段,这种磁链反应迟缓的现象势必会PMSM-DTC的精度。

针对该问题本研究提出一种18扇区细分方法,该方法在扇区分界角附近使用最优有效矢量代替零矢量,使得系统的调控更具灵活性,同时尽量避免对原系统的更改,保持了原双滞环控制系统的简洁性。实验结果表明,该方案可以改善磁链和转矩波形,使得该方法对直接转矩控制系统的改善有很大的实际意义。

参考文献(References):

- [1] 王成元,夏加宽,孙宜标. 现代电机控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
- [2] 陈 荣. 永磁同步电机控制系统[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [3] 姚绪梁. 现代交流调速技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2009.
- [4] 杨 帆,林 珍. 改进滑模观测器的永磁同步电机 SVM-DTC 系统[J]. 电气自动化,2015,37(1):4-6,30.
- [5] 牛 峰,李 奎,王 尧. 永磁同步电机模型预测直接转矩控制[J]. 电机与控制学报,2015,19(12):60-67,74.
- [6] 李耀华,刘卫国. 永磁同步电机直接转矩控制不合理转矩脉动[J]. 电机与控制学报,2007,11(2):148-152.
- [7] LI Yao-hua, DIETER G, LIU Wei-guo. A novel swi-tching table to suppress unreasonable torque ripple for the PMSM DTC drives [C]. International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan: IEEE,2008.
- [8] 黄守道,黄 庆,伍倩倩,等. 一种新的直接转矩控制转矩脉动抑制方法[J]. 控制工程,2014,21(2):193-198.
- [9] 张 果,田 飞,王剑平,等. 基于模糊控制的直接转矩控制系统研究[J]. 控制工程,2013,20(6):1023-1026.
- [10] 潘月斗,张义海. 基于模糊控制的直接转矩控制系统的仿真分析[J]. 系统仿真学报,2010,22(10):2347-2351.
- [11] 胡育文,高 瑾,杨建飞,等. 永磁同步电机直接转矩控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
- [12] ZHONG L, RAHMAN M, HU W, et al. Analysis of direct

- torque control in permanent magnet synchronous motor drives [J]. **IEEE Trans. on Power Electronics**, 1997, 12(3): 528 ~ 536.
- [13] 田 淳, 胡育文. 永磁同步电机直接转矩控制系统理论及控制方案的研究[J]. 电工技术学报, 2002, 17(1): 7-11.
- [14] 李铭峰, 赵新媛, 张春辉, 等. 零矢量参与控制的永磁同步电动机直接转矩控制[J]. 微特电机, 2010, 38(9): 47-49.
- [15] 魏保立, 张瑞坤. 永磁同步电动机定子磁链扇区细分控制分析[J]. 微特电机, 2015, 43(11): 57-59.
- [16] 徐子峻, 郭平波, 崔利通. 高速列车牵引电机直接转矩控制仿真与分析[J]. 机械工程与自动化, 2015(1): 27-28, 31.
- [17] 徐艳平, 雷亚洲, 沙登卓, 等. 矢量细分占空比控制的改进直接转矩控制方法[J]. 电力电子技术, 2016, 50(2): 71-73.

[编辑: 张 豪]

本文引用格式:

朱 军, 王 栋, 吴宇航, 等. 基于十八扇区细分的含零矢量 PMSM-DTC 研究[J]. 机电工程, 2017, 34(8): 885 ~ 890.

ZHU Jun, WANG Dong, WU Yu-hang, et al. PMSM-DTC containing zero vector based on 18 section subdivision[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(8): 885 ~ 890.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 864 页)

6σ 稳健性最优解的尾门最大凹陷位移 y_4 是 1.45 mm, 较确定性优化方案的 1.53 mm 减小了 0.06 mm, 仍然满足企业要求, 而且其质量水平从 4.56σ 增大到 8σ 水平, 说明尾门抗凹性能对不确定性因素和设计变量波动的敏感性降低, 稳健性提高。 6σ 稳健性最优解的尾门结构的前三阶模态频率较确定性优化方案变化微小, 但质量水平分别从 3.67σ 、 6.45σ 和 5.32σ 提高至 8σ , 前三阶模态频率对不确定性因素和设计变量的波动的敏感性降低, 稳健性和可靠度均得到提高。

3 结束语

本研究以多目标优化和 6σ 稳健性分析为基础, 对微客尾门结构的轻量化进行了研究:

(1) 根据设计变量与不同响应函数的 Pareto 图, 从初步选定的 11 个设计变量中筛选出影响较大的设计变量来进行样本点的采样;

(2) 根据尾门输出响应的近似模型和多目标优化的 NSGA-II 遗传算法, 构建尾门结构多目标优化数学模型, 得到尾门质量与第一阶模态频率、弯曲刚度的 Pareto 非劣解的解集, 并从其中挑选出满足优化条件的最优解;

(3) 通过蒙特卡洛模拟中的描述性抽样技术对多目标优化后的尾门进行 6σ 质量水平和可靠度分析, 并对其进行 6σ 稳健性多目标优化。

结果表明, 尾门结构各性能满足 6σ 质量水平, 并降低了不确定性因素和设计变量波动的敏感性。该方法可为汽车轻量化设计提供参考。

参考文献 (References):

- [1] 张继游, 门永新, 彭 鸿, 等. 稳健性和轻量化在整车侧面碰撞性能优化中的应用[J]. 汽车安全与节能学报, 2013, 4(4): 339-347.
- [2] ZHU P, ZHANG Y, CHENG L. Metamodel based lightweight design of an automotive front body structure using robust optimization [J]. **Proc Institution of Mech Engi, Part D: J Automobile Engi**, 2009, 223(9): 1133-1147.
- [3] 马彬彬. 白车身及车门性能开发关键技术研究与应用[D]. 合肥: 合肥工业大学汽车工程学院, 2015.
- [4] 彭 涛. 微型轿车车门系统分析与研究[D]. 武汉: 武汉理工大学汽车工程学院, 2013.
- [5] 黄石华, 成艾国. 基于 6σ 稳健性的拼焊板车门轻量化研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(3): 262-266.
- [6] 韦永平, 邓国红, 杨鄂川, 等. 某乘用车车门抗凹陷性能分析及优化[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2014, 28(3): 28-32.
- [7] KHURI A I, MUKHOPADHYAY S. Response surface methodology[J]. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics**, 2010, 2(2): 128-149.
- [8] 高 媛. 非支配排序遗传算法 (NSGA) 的研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学控制科学与工程学院, 2006.
- [9] 子 添, 黄 旭, 范格非. 基于神经网络和遗传算法的机床床身优化设计研究[J]. 机械, 2016, 45(3): 25-27.
- [10] 钱立军, 丁 玲, 祝安定. 基于 ISIGHT 的薄壁梁件抗撞性多目标优化[J]. 合肥工业大学学报, 2014, 37(2): 145-149.

[编辑: 李 辉]