

车门驱动器输出功率算法优化对开闭稳定性的改善研究

刘元德, 王金阳, 慕博韬, 刘正建, 钟晋, 安雪梅
阿维塔科技(重庆)有限公司

【摘要】 车门驱动器是电动车门开闭动作的执行器, 其优化方向之一是要提高开闭过程的稳定性。通过对车门开闭需求功率的波动因素进行识别, 并进行量化计算、实车标定, 来逆向求解驱动器在不同场景下的输出功率, 进而优化驱动器控制算法, 降低车门开闭过程中的运行波动。

车门重量和质心在不同使用场景下, 并不是一直恒定的。将玻璃开度和地图袋储物物的影响, 纳入重量和质心计算, 可以量化旋转和质心抬升的功率需求。在风阻方面, 玻璃开度的不同, 车门迎风面积也会发生变化。通过玻璃升降器的位置参数将风阻进行关联、量化。综合多影响因素, 将驱动器的输出功率算法进行优化设计, 成功降低了驱动器功率的波动范围及调节时间, 稳定了车门开闭速度, 为后续车型开发提供了参考。

【关键词】 电动车门, 车门驱动器, 输出功率, 玻璃开度, 车身姿态

Study on the Improvement of Door Open and Close Stability by Output Power Algorithm Optimization of Doordriver

Liu Yuande, Wang Jinyang, Mu Botao, Liu Zhengjian, Zhong Jin, An Xuemei
AVATR Technology (Chongqing) Co., Ltd

Abstract: Door driver is the actuator of electric door opening and closing. One of its optimization directions is to improve the stability of the opening and closing process. By identifying the demand power fluctuation factors of door opening and closing, and conducting quantitative calculation and real vehicle calibration, the output power of the driver in different scenarios was solved in reverse, and then the driver control algorithm was optimized to reduce the operation fluctuation of the door opening and closing process.

The weight and centroid of the door are not always constant in different usage scenarios. The influence of glass opening degree and map bag storage, can be incorporated into the calculation of power demand about centroid lifting. In terms of wind resistance, the windward area of the door will also change with the different opening degree of the glass. By synthesizing many influencing factors, the output power algorithm of the driver is optimized, which successfully reduces the fluctuation range of the driver power and the adjustment time, and stabilizes the opening and closing speed of the door, which provides a reference for the development of subsequent models.

Key words: power door, door driver, output power, glass opening degree, body attitude

引言

随着车辆智能化、电动化浪潮的大发展, 车辆的智能化配置需求越来越高。很多“高端”的配置, 搭载车型都呈现爆发式增长, 搭载车型级别也逐渐下沉。这些趋势, 促使着零部件开发企业、整车厂倾力去打造更智能、更高体验感的功能和零部件。正是这一项项优化, 逐一累积, 铸就了汽车工业技术发展前进的阶梯。

电动车门即是当前搭载越来越广泛的“高端”功能之一。电动车门按车门形式, 可以分为电动侧滑门和电动旋转门。电动侧滑门在此之前已经应用广泛, 技术更为成熟^[1]。电动旋转门的布置要求和功能需求, 相对来说更为新颖和复杂。电动旋转侧门驱动系统是一套涵盖了侧门驱动器、电控单元、电子锁(带自吸合)、环境探测和障碍物探测传感器的完整车辆开闭系统, 集功能、安全、交互通讯为一体^[2]。侧门驱动器, 也直接称为车门驱动器, 是电动旋转侧门的主要执行机构。电控单元, 此处为 DCU, 是电动旋转车门的控制器, 执行对驱动器输出控制、车门运行状态监控、异常判断等功能^[3]。

在功能设定上, 车门的旋转速度, 一般按主观评价, 转化为一个客观的速度参数进行设定。因为车门旋转开闭需要经历一个启动、加速、运行、减速、停止、悬停等动作序列, 所以目标速度是一个变化的曲线。要保持车门实际运动与需求速度曲线一致, 就需要驱动器的输出可以实时调节且准确。驱动器的电机采用霍尔式电机, 通过获取的霍尔信号, 进行实时速度监控, 再通过 PWM 进行功率调节。输出功率调节的算法, 将直接影响车门开闭过程中的稳定性。本文即对现有的驱动器输出进行了逆向求解, 通过算法优化, 来降低车门运行的速度波动及调节时间。

1 车门驱动器概述

1.1 车门驱动器结构

如图 1 所示, 研究车型采用的车门驱动器主要由 9 个部分组成, 分别是电机、行星减速箱、电磁制动器、齿轮箱、螺杆、螺母、外壳、连接座、撑杆。电机的转动先通过行星减速箱减速并放大转矩, 再通过齿轮箱传动带动蜗杆转动和螺母平行移动, 从而使撑杆伸出或收回, 实现车门的电动打开和关闭。

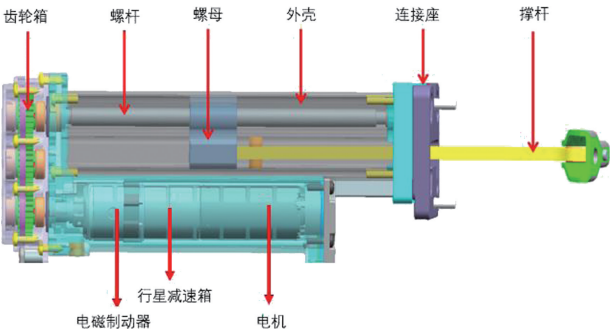


图1 车门电驱动器结构示意图

其中,电磁制动器的结构如图2所示,主要分为5部分,分别是传动轴、定子、线圈、转子、摩擦片。传动轴的一端与行星减速箱连接,另一端与齿轮箱连接。定子由耐磨性好的金属材料制成,内部包含一个线圈。转子与传动轴压接成为一个整体,摩擦片由拉簧固定在转子上。定子中的线圈由车门控制器进行控制,通电时可以产生磁力。

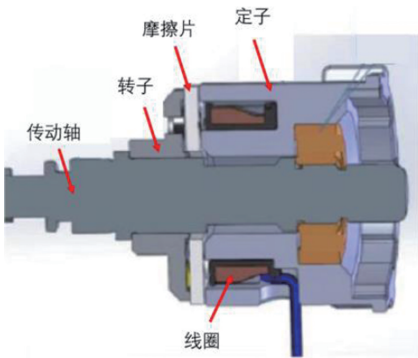


图2 电磁制动器结构示意图

1.2 PWM 调压技术基本原理

PWM (Pulse-Width Modulation) 调压技术是一种电子控制技术,通过改变信号的占空比来实现对输出电压的调节。在 PWM 调压电路中,根据要求设定一个固定的基准电平,然后将需要输出的电压与基准电平进行比较,当需要输出的电压高于基准电平时,调制器就会发出一个宽度不同的脉冲,使得输出电压稳定在所需电压附近,从而达到电压调节的目的^[4]。

PWM 调压的基本原理是通过控制开关管的导通时间占整个周期时间的比例来改变输出电压的平均值。在不同载荷下,输出电压的波形和占空比不同,但其平均值总是由占空比所决定。因此,通过改变 PWM 调制器输出脉冲的占空比,就可以实现对输出电压的调节。

1.3 电动开关门原理及功率设计

当车门需要电动开闭时,控制器按预设算法,使用 PWM 调压策略调节电机输出功率,通过撑杆传递力矩,带动车门进行旋转加速或减速运动,实现车门预设动作执行。这里以车门开启全行程为例,将启动、加速、运行、减速、停止、悬停等动作序列,预先按需求建立一个理想目标曲线,如图3所示。

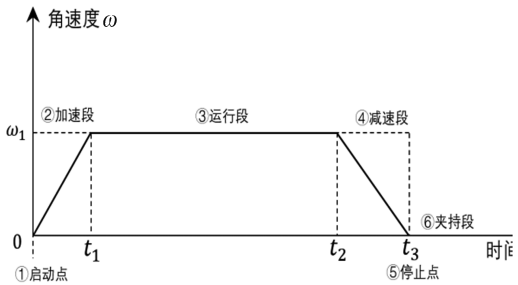


图3 车门开启运行目标速度曲线

在图示①启动点,车门尚处于关闭状态,此时需求功率 $P_{p1}=0$ 。

当接收到车门开启指令后,驱动器开始功率输出。车门进入②加速段,加速从时间0持续到时间 t_1 ,车门的角速度从0达到 ω_1 。此阶段的 t_1 和 ω_1 ,需要综合进行设计, ω_1 为车门运行阶段平稳的目标速度, t_1 为加速到需要角速度 ω_1 的时间。加速过程 t_1 不能过长或过短,否则加速过程缓慢或急剧,顾客容易感知加速段的速度变化过程,而且会影响整个开启过程时间控制。

在设计阶段,预先设计加速时间 t_1 ,按角速度 ω_1 下车门整体惯量,综合考虑旋转惯量需求功率、摩擦阻力、风阻、质心抬升来做初步计算,设定功率 P_{p2} 。

$$P_{p2}=P_j+P_f+P_w+P_G \tag{1}$$

式中, P_{p2} 功率按 t_1 时间内的平均功率计算。 P_j 为车门旋转需求功率,计算方法如下。

$$P_j=\frac{1}{2}J\frac{\omega_1^2}{t_1}=\frac{1}{2}(M_d r_d^2)*\frac{\omega_1^2}{t_1} \tag{2}$$

式中, J 为车门整体旋转惯量,等于 $M_d r_d^2$, M_d 为车门整体质量, r_d 为车门整体质心离车门旋转轴线,即铰链轴线的距离。

P_f 为克服摩擦力做功,可以分为克服驱动器系统摩擦做功和铰链等车门系统阻力做功。克服驱动器系统摩擦做功,方向均垂直于驱动力方向,摩擦系数恒定,跟驱动器的夹持力相关。克服铰链等车门系统阻力做功,方向均垂直于驱动力方向,按恒定值计算,可以进行标定得到。

P_w 为克服风阻做功,车门整体面积恒定,且方向均垂直于驱动力方向,在无风速的情况下数值恒定,可以进行计算和标定得到。

P_G 为克服车门质心抬升做功,在数据阶段即可以进行计算得到。

当然综合上述计算,可以确定一个设计阶段的初始功率需求 P_{p2} ,实车阶段进行实车的标定再做修正。

图3中,在车门开启达到 t_1 时,进入③运行段。此时由霍尔传感器读取当前霍尔信号来判断电机转速是否达到目标设定值,若未达到目标值则继续进行调速。在运动过程中通过霍尔脉冲计数来判断车门是否运动到规定位置^{[5]-[7]}。此阶段需要保持恒定的角速度 ω_1 ,此阶段 $P_j=0$ 。驱动器需要的驱动功率 P_{p3} 的计算方式如下:

$$P_{p3}=P_f+P_w+P_G \tag{3}$$

式中, P_{p3} 功率为理论需求功率,此时 PWM 开始介入调速,实际输出存在波动。DCU 根据电机的霍尔信号进行实时速度监控,再根据实时速度与 ω_1 的差值进行功率输出调节,

来稳定速度，克服标定偏差及不同场景的影响。

图 3 中，当运行时间到达 t_2 时点，系统到达④减速段。此时系统负载和质心抬升正向做功，减速需求功率 P_{pd} 的计算方式如下：

$$P_{pd}=P_j-P_f-P_w-P_G$$

(4)

同 t_1 一样，此时的减速时间 (t_3-t_2) 也需要进行预先设计，按主观评价可以接受并系统可以实现的时间为宜。

1.4 车门悬停基本原理

在车门开启到最大设定角度或中途需要停止时，如车门运行到④减速段结束，进入⑤停止点，此时需要靠驱动器的夹持力来车门停止状态。其原理为控制器使用 PWM 调压策略给电磁制动器供电，线圈产生磁力，将转子上的摩擦片吸附在定子上，并产生一定正压力，使定子和摩擦片之间产生摩擦力。并产生一定正压力，使定子和摩擦片之间产生摩擦力矩。在摩擦力矩作用下，摩擦片和定子静止，从而使传动轴停止旋转，在车门驱动器撑杆方向提供一个悬停力，实现车门悬停的功能。车门电驱动器悬停力计算方法：

$$F=\frac{2\pi T}{L}=\frac{2\pi N\mu_{s1}}{L}$$

(5)

式中， F 为车门驱动器撑杆方向的夹持悬停力， T 为摩擦片

与定子间产生的摩擦力矩， L 为车门驱动器丝杆导程， r 为摩擦片半径。 μ_{s1} 为驱动器静摩擦力系数，与定子及摩擦片的材料和粗糙度相关，在本论文中可以认为其是一个定值。

N 为摩擦片与定子之间的正压力，与线圈的电压大小成正比相关。这里的 N 值需要根据需求来进行计算和标定。

$$F=\frac{2\pi N\mu_{s1}r}{L}=G_a-f_n-f_d$$

(6)

$$N=\frac{(G_a-f_n-f_d)L}{2\pi\mu_{s1}r}$$

(7)

式中， G_a 为车门质心在驱动器撑杆方向的分力，分力角度等于车门铰链轴线与 Z 向倾角的余角，与铰链轴线倾角和整车停放倾角相关， f_n 为车门驱动器内部阻力， f_d 为车门系统静摩擦力。由此，可以根据实际需求，控制线圈的电压，调整电磁制动器输出的悬停力。

1.5 运行稳定性影响因素

在车门开闭各阶段按照上述设计方法进行参数的初步设定，实车阶段再进行参数的标定，研究车型设定 $t_1=0.5s$ ， $\omega_1=0.47rad/s$ ，即 $27^\circ/s$ 。 $t_2=2s$ ， $t_3=0.5s$ 。通过获取驱动器电机霍尔信号，得出研究车辆前车门从关闭到打开过程实测运行速度曲线如图 4 所示。

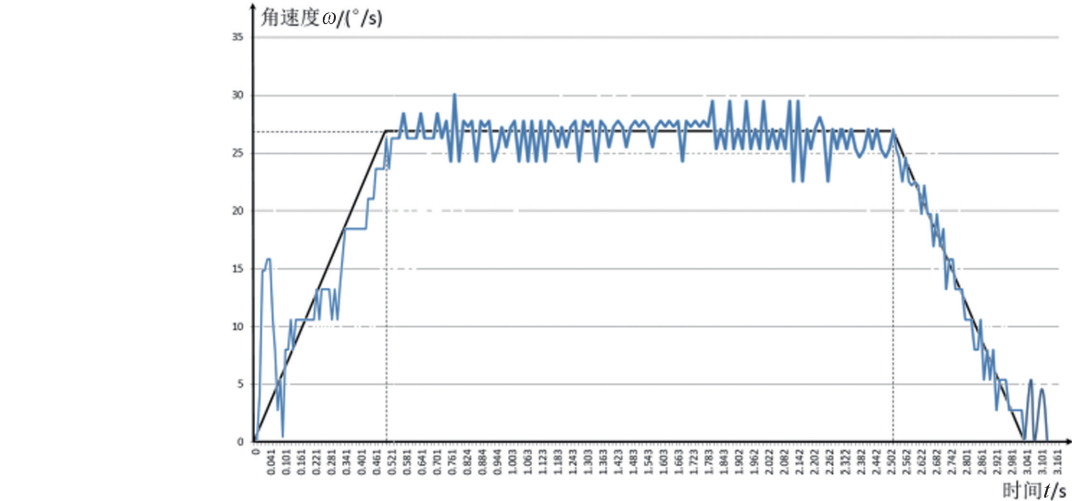


图 4 前车门开启过程实测角速度曲线图

如图 4 所示，实测的角速度波动较大。在加速段开始时，出现了一个速度峰值，此时为解锁点位。在运行段因为 PWM 的实时调节，速度一直在设计速度上下波动。在停止点，悬停并不能一次完成动作，存在一定的晃动。总体来说，与标定参考曲线仍然符合度较高。

根据现有的算法，参数计算和标定，在不同的使用场景下，不能都完美适配需求。主要原因，在于车门稳定开闭需要的功率并不固定，影响因素未纳入管理。如车门重量和质心在不同使用场景下，并不是一直恒定的。因为玻璃升降线 与车门旋转的铰链轴线不平行，玻璃开度不同将导致车门质心的变化。同时，玻璃开度不同，车门迎风面积变化，也将影响风阻的大小。地图袋储物质量也是影响车门质量和质心的因素之一，额外增加的储物质量，将影响前期计算和标定质量、质心。

我们变更图 4 测量的车辆状态，选定前门玻璃全闭改为全开，地图袋空置变更为放置两瓶饮用水，停放在水平地面，进行实测速度随时间的变化，来研究其波动。实测运行速度曲线如图 5 所示。

可以看出车辆状态变化后，车门开启过程实测速度曲线存在较大的变化。在②加速段，因为加速时间 t_1 是恒定的，标定功率输出是按恒定设计的，但是因为储物重量、玻璃开度的原因，导致加速过程缓慢，当到达 0.5s 时，角速度还没达到 $27^\circ/s$ ，0.7s 时首次达到，时间延迟波动达 40%。此时进入③运行段，PWM 调速开始介入，开启急加速，导致速度波动范围加大，主要波动范围由 $24\sim30^\circ/s$ ，恶化到 $22\sim32^\circ/s$ ，波动范围较中值恶化 14.8%。同样，④减速段波动幅度的加大，停止时间延长，夹持晃动等。以上波动都是车辆状态差异导致的运行稳定性波动，需要进行优化。

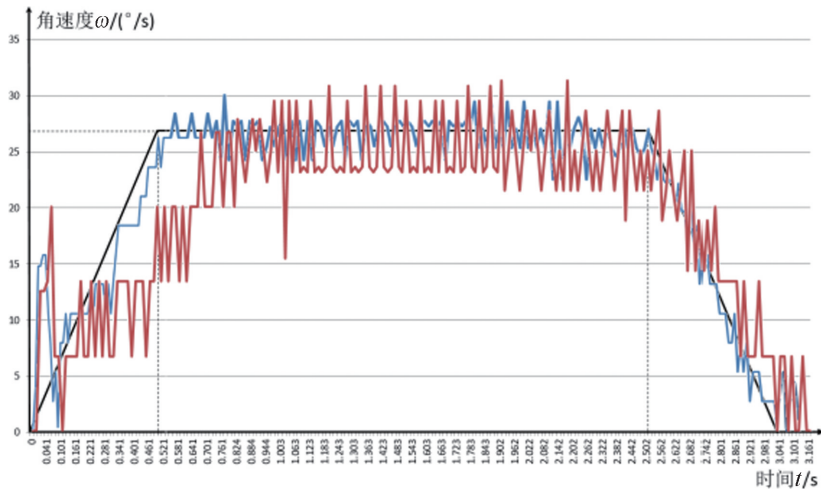


图5 开启过程实测角速度对比曲线图

2 旋转需求功率算法优化

2.1 车门旋转需求功率计算方法

根据式(2)车门旋转需求功率 P_j 的计算方法,其值为固定值。优化算法将 M_d 车门整体质量, r_d 车门整体质心离车门旋转轴线,进行拆分计算,纳入玻璃开度和地图袋储物物的变量。

$$J = J_g + J_s + \sum_{i=1}^n J_i \quad (8)$$

式中, J 为车门整体惯量, J_g 为玻璃惯量, J_s 为地图袋放置物品的惯量估算。 $\sum_{i=1}^n J_i$ 为车门其他固定部件的惯量,为固定值, i 为固定部件的编号, n 为固定部件的数量, J_i 为编号 i 的固定部件惯量, M_g 为车窗玻璃的重量, r_g 为车窗玻璃在某开度与车门铰链轴线的距离, M_l 为地图袋放置物品的重量,由传感器获取参数, r_s 为地图袋放置物品质心与车门铰链轴线的距离, M_i 为编号 i 的固定部件的质量, r_i 为编号 i 的固定部件在某开度与车门铰链轴线的距离。

将旋转需求功率影响因素一,车门玻璃开度,与玻璃质心、玻璃质心据铰链轴线距离进行关联。可以求解玻璃质心、玻璃质心据铰链轴线距离与玻璃开度关联的函数曲线,作为已知变化参数带入。

$$J_g = M_g r_g^2 \quad (9)$$

以前门玻璃为例,重量为4.4kg,全闭时 r_g 为609mm,全开时 r_g 为592mm。 J_g 的最大波动范围为2.8%。

将旋转需求功率影响因素二,地图袋储物质量,以地图袋底部位置布置两个重量传感器的方式,来获取其参数。并通过估算质心位置和据铰链轴线距离,带入旋转需求功率的计算。

$$J_s = M_s r_s^2 \quad (10)$$

研究车型左前车门25.6kg的重量计算,以常用使用状态,地图袋放置两瓶500ml,共计1kg的饮用水,叠加 r_s 变化, J_s 最大波动范围为3.4%。

按式(2)综合计算, J 最大波动范围为3.1%。

2.2 风阻需求功率算法优化

风阻的计算公式如下:

$$P_w = F \omega r \quad (11)$$

$$F = \frac{1}{2} C \rho S (\omega r)^2 \quad (12)$$

式中, F 为风阻的力值, C 为空气阻力系数, ρ 为空气密度, S 为迎风面积, ω 为相对空气的运动角速度, r 为综合空气阻力作用点与车门铰链轴线的距离。分别计算玻璃全开和全关状态的风阻大小, P_w 最大波动范围为14.2%。

2.3 质心抬升功率算法优化

车门的整体质心在开闭过程会有相对驱动器输出力矩方向的高度变化,需要消耗其功率。

$$P_C = (G_g \Delta L_g + G_s \Delta L_s + G_l \Delta L_l) / t \quad (13)$$

式中, G_g 为车门玻璃重力在驱动器输出力矩方向的分力, G_s 为地图袋存放物品在驱动器输出力矩方向的分力, G_l 为车门其他部品在驱动器输出力矩方向的分力。 ΔL_g 为车门玻璃质心相对驱动器输出力矩方向的位移量, ΔL_s 为地图袋存放物品质心在驱动器输出力矩方向上的位移量, ΔL_l 为车门其他部品在驱动器输出力矩方向上的位移量。 P_C 的计算,需综合整车陀螺仪获取的车辆整车所处地面倾角、车门轴线倾角计算。以 α_x 、 α_y 、 α_z 分别表示车门铰链 X 、 Y 、 Z 方向倾角。以 β_x 、 β_y 、 β_z 分别表示整车陀螺仪实时获取的车辆在 X 、 Y 、 Z 方向倾角。

以研究车型前门铰链内倾 2° ,后倾 2.5° ,车辆玻璃全闭、地图袋空置,以及玻璃全开、地图袋放置1kg物品来做差异对比, P_C 最大波动范围为2.6%。

3 算法优化效果验证

经过第2节的优化后,导入新的功率输出算法,我们重新按图4和图5测量状态进行实测,获得新的角速度曲线。

如图6所示为现有设计算法下实测曲线及优化后曲线。测量状态车门为标定状态,即车门玻璃全关、地图袋无储物、车辆停放水平地面时。图6与图4无较大差异,可以视为测量误差。即原算法在标定状态未受到影响因素的波动影响。

如图7中所示为现有设计算法下实测曲线及优化后曲线。测量状态车门为图5选定状态,即车门玻璃全开、地图

袋放置两瓶饮用水，停放在水平地面的实测运行速度曲线。可以发现图 7 与图 5 相比，加速段波动减小，加速时间与设定的 0.5s 基本相等。运行段波动幅度大幅减小，主要波动

范围由 22~32°/s，优化到 24~29°/s，波动范围较中值优化 18.5%，与图 4 标定基本相当。即优化算法有效，且效果明显。

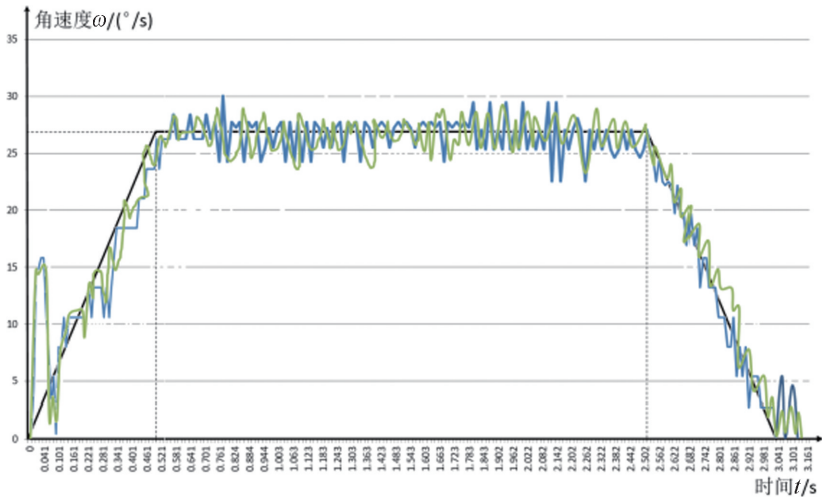


图 6 优化后标定状态开启过程实测角速度对比曲线图

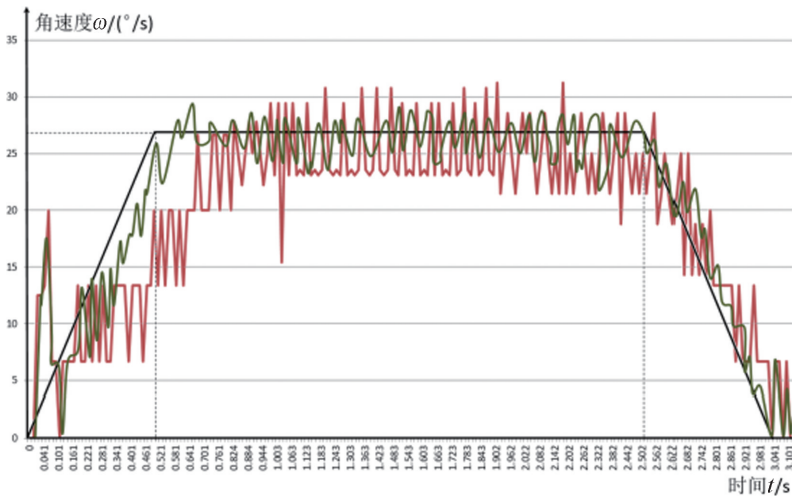


图 7 优化后选定状态开启过程实测角速度对比曲线图

4 结论

- 1) 现有车门驱动器输出功率算法，未计算车门玻璃开度、地图袋储物影响，在开度变化、储物增加的状态下，车门运行稳定性恶化。
- 2) 当车门全开、地图袋储物 1kg 时，恶化指标主要体现在加速段设定 0.5s，延迟到 0.7s，时间延迟波动达 40%。运行段，主要波动范围由 24~30°/s，恶化到 22~32°/s，波动范围较中值恶化 14.8%。减速段波动幅度加大，停止时间延长，悬停晃动。
- 3) 经过计算，未纳入玻璃开度影响因素时，旋转功率需求最大波动范围为 2.8%。

- 4) 未纳入地图袋储物影响因素时，旋转功率需求最大波动范围为 3.4%。综合结论 3)，旋转功率需求最大波动范围为 3.1%。
- 5) 未纳入车门开度影响因素时，风阻需求功率最大波动范围为 14.2%
- 6) 未纳入车门开度及地图袋储物时，车门质心的抬升需求功率，最大波动范围为 2.6%。
- 7) 将影响因素纳入算法优化后，对比车门玻璃全开、地图袋放置两瓶饮用水、停放在水平地面的实测运行速度曲线，优化后波动范围较中值优化 18.5%。优化算法有效，且效果明显。

参 考 文 献

[1] 刘海明,王汉明,罗承忠. 电动侧滑门控制策略的研究 [J]. 汽车工程, 2008, 30 (7): 663-667.

[2] 电动侧门驱动系统打造舒适出行体验 [J]. 汽车制造业, 2020, 660 (11): 44-45.

[3] 李鹏程,徐强,张晓林,等. 电动旋转侧门驱动器控制系统设计 [J]. 专用车辆, 2018 (4): 56-59.

[4] YE H J, XIE X D, HU J M. A method of passengers de-tection inside the subway under complex circumstances [C]// IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. [S. l.: s. n.], 2014.

[5] 张霞, 荣祖兰. 客车电动车门防夹控制系统设计研究 [J]. 制造业自动化, 2011, 33 (06): 67-70.

[6] 苗文博, 徐洋, 谭伟等. 基于模糊 PID 算法的电动侧开门控制器的设计 [J]. 汽车零部件, 2023, 177 (03): 17-21. DOI: 10. 19466/j. cnki. 1674-1986. 2023. 03. 004.

[7] 宋璐, 卫亚博. 基于模糊 PID 的无刷直流电机速度控-制系统的设计与仿真 [J]. 大电机技术, 2022, 284 (05): 40-44+82.