

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.04.006

高速电机驱动飞机环控系统仿真研究

Simulation Study of ECS Driven by High Speed Motor of Aircraft

王 佩 周洁敏 郑 罡 / WANG Pei ZHOU Jiemin ZHENG Gang

(南京航空航天大学, 南京 211106)

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

摘 要:

以波音 787 飞机为例,对多电飞机环控系统组成和原理进行介绍,探讨高速电机驱动的可行性及控制方式。该文采用高速永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor,以下简称 PMSM)驱动压气机,同时利用 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation,以下简称 SVPWM)技术进行控制,设计了双环控制策略,建立完整的高速电机驱动压气机系统,并利用 Matlab/Simulink 软件对闭环系统进行建模仿真。仿真结果表明该系统功能完善、稳定性强。

关键词:多电飞机;环控系统;高速电机;压气机

中图分类号:TM341

文献标识码:A

OSID:



[Abstract] Taking Boeing 787 aircraft as an example, this paper introduces the composition and principle of environment control system of more electric aircraft, and discusses the feasibility and control mode of high-speed motor. Choosing high speed permanent magnet synchronous motor to drive the compressor, the control mode is SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) technology. Double loop control strategy was designed to establish the complete high-speed motor driven compressor system. Then a closed loop system simulation modeling was built based on Matlab/Simulink software. The simulation results show that the system has a perfect function and strong stability.

[Keywords] more electric aircraft(MEA); environment control system(ECS); high speed motor; compressor

0 引言

多电飞机(More Electric Aircraft,以下简称 MEA)旨在更多地使用电能代替传统液压、气压和机械能,是先进飞机发展的方向。环境控制系统作为飞机重要组成部分,必须能够应对不同温度、湿度条件,确保机组人员和乘客享受安全舒适的环境,使机载仪器设备精确有效地工作^[1]。

环境控制系统的核心是空气循环制冷系统(Air Cycle Refrigeration System,以下简称 ACRS),传统的空气循环制冷系统主要是空气循环机(Air Cycle Machine,以下简称 ACM)和涡轮压气机组。传统单循环空气循环制冷系统采用发动机引气方式调节空气,这种方式效率低,而且需要大量的环境空气用于

冷却工质空气,增大了飞行阻力。因此,先进的空气循环制冷系统应采用闭环式结构,提高对引气的利用率,降低能耗。

高速电机(High Speed Motor,以下简称 HSM)及其驱动技术发展日益成熟^[2],研究者对比 HSM 和 ACM 的旋转方式后,认识到将 HSM 应用于 ACM 的可能,即 ADM(ACM Driven by HSM,以下简称 ADM)技术,由 HSM 部分或全部消除传统的 ACRS 对高压气源引气的依赖。采用高速电机驱动压气机组件结构简单、尺寸小,便于在现有的 ACRS 系统的空间设计中安装,同时不会造成整个系统结构的大范围改动。本文选择永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor,以下简称 PMSM),因其无需励磁绕组和励磁装置,无励磁功率消耗,相同功率

等级的条件下体积较小,适用于航空等对可靠性要求很高的高速运行场合^[3-4]。文献[5]提出不同高速电机驱动策略,通过对比分析矢量控制、直接转矩控制等控制策略,选择 SVPWM 矢量控制驱动策略,能达到减小电能损耗、提高电网品质和系统工作效率、增强系统稳定性和安全性的目的。

1 多电飞机环控系统

波音 787 作为典型的多电飞机,首次将电能作为环境控制系统的能量来源,采用高速电机驱动压气机,开辟了大型客机采用电环控系统的先例。参考文献[6]对波音 787 电驱动环控系统进行了详细介绍,其结构示意图如图 1 所示。

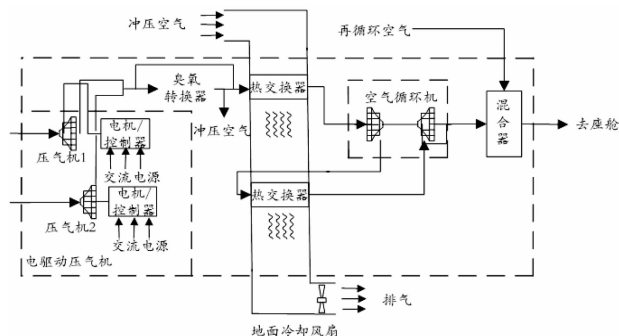


图1 波音787电驱动环境控制系统

波音 787 配备两套空调组件,组件结构相同,图 1 所示是一套组件的示意图。每套组件具有两台电驱动的电机压气机,每一台由 125 kW 的永磁调速电动机驱动,实现对永磁调速电机的控制。经过电驱动的压气机压缩后输出的空气一部分传输到臭氧转换器,经过臭氧转换器的转换获得部分冲压空气;另一部分传输到热交换器,空气经过两级热交换器输出后与再循环空气混合获得符合客舱温度和压力要求的空气,实现了对冲压空气的重复利用^[7]。

根据波音 787 电动环境控制系统,设计了由高速电机驱动的闭式 ACRS 系统,如图 2 所示。系统包含初、次级压气机和一个单级涡轮冷却器。压气机由高速电机驱动,首先对空气进行初级处理,提高温度和压力,经过次级压气机再次处理流向散热器,环境空气不断地送入散热器带走一部分热量,空气温度降低,涡轮膨胀做功,进一步处理,输出的空气传输至回热器,回热器中的气体包含外部空气和部分客舱回气,保证送向座舱的空气温度不会太低,混合空气一部分流向被冷却舱室,多余空气再流向初

级压气机构成封闭式循环,很大程度上提高了引气的利用率,有效减少了燃油损耗。

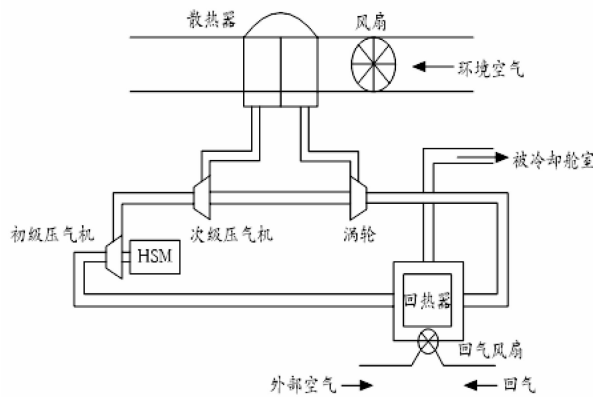


图2 高速电机驱动闭式ACRS示意图

本文所讨论的电动环控系统由三相整流器、逆变器、PMSM 和电动压气机四部分组成,如图 3 所示,三相整流器属于电源模块,负责将飞机电网传输的 230 V 变频交流电转换成 540 V 高压直流电为驱动电路供电,PMSM 和压气机负载同轴旋转,便于高速电机向压气机传递能量。

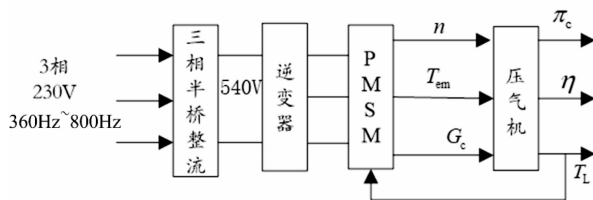


图3 电动环控系统组成结构

2 PMSM 控制系统

本文采用的高速电机为 PMSM,其采用永久磁铁励磁,无电刷和滑环,其机械结构简单,易于检测,可靠性好,电机无励磁损耗,功率因数接近 1,能够承受较大的过载电流,抗干扰能力强,同等功率等级下体积更小,适用于航空电机^[8]。控制方法采用 SVPWM 技术,即将形成旋转磁场转化为形成旋转的电压空间矢量的问题。将逆变器和电机看作一个整体,SVPWM 控制通过对逆变器开关器件的导通和关断时间的控制,产生不同的电压矢量,确保电机工作过程中产生的磁链接近理想磁链圆^[9]。

如图 4 所示,PMSM 的控制系统由三相逆变器、PMSM、控制电路和速度与位置传感器构成。ASR、ACR 组成双闭环控制系统,即速度环和电流环。内

环系统性能决定外环系统性能,因此,电流环控制器的设计是电动环控系统具有良好性能的关键。

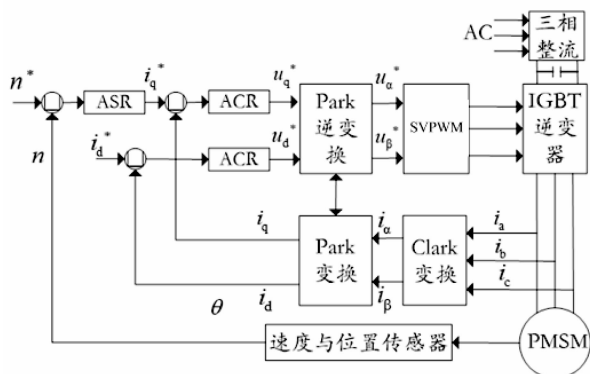


图4 PMSM 矢量控制框图

采用 $i_d = 0$ 的矢量控制策略,具体工作原理如下:首先输入指定转速,与实际转速比较,实际信号

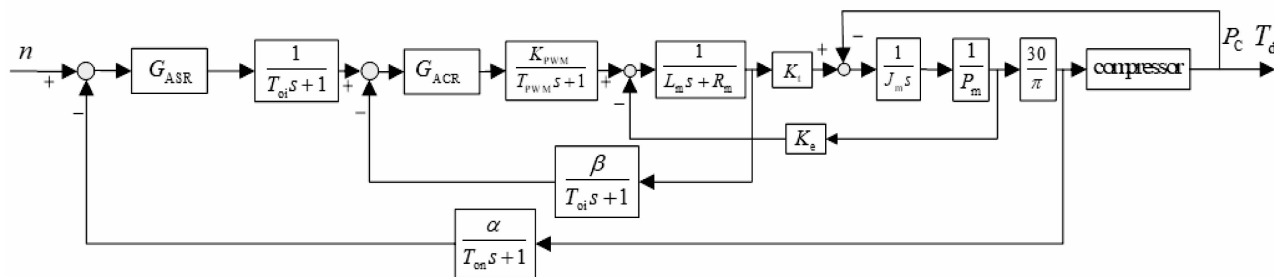


图5 双闭环控制模型

3 压气机数学模型

压气机工作状态受到多种因素的影响,如所带负载的变化,运行环境温度或者压强的变化,压气机部件的损伤等,影响压气机的基本特性参数(压比、效率、转速和流量)随着外界因素的变化而变化,压气机模型的处理方法通常情况是使用压气机特性曲线^[10]。因此,这里所说的压气机的数学模型是基于其稳态特性建立的,式(1)~(3)分别表示压气机的出口温度 T_{out} 、功率 P_c 和负载转矩 T_d 。

$$T_{\text{out}} = T_{\text{cin}} \left[1 + \frac{1}{\eta_c} (\pi_c^{0.286} - 1) \right] \quad (1)$$

$$P_c = \frac{G_c p}{\eta_c} (\pi_c^{0.286} - 1) \quad (2)$$

$$T_d = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{P_c}{n} \quad (3)$$

式中: c_p 为气体比容; G 为压气机进气口空气流量; n 为压气机和高速电机同轴旋转的转速。

包含三相电流信号经过 Clark 和 Park 变换值和传感器检测得到的转速信号 n 和位置信号 θ 。得到误差信号后,传递给速度控制器,控制器输出电流参考值。d、q 轴电流参考信号与电机实际输出的电流信号进行比较,经过电流控制器,处理后的信号经过坐标变换,得到 U_α 、 U_β ,生成 PWM (Pulse Width Modulation) 调制波,输入 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 逆变器,控制电机旋转,从而使负载达到指定转速,获得符合要求的压气机增压比和绝热效率。

图 5 为电动压气机驱动控制系统双闭环控制模型,其中:电流环 $f_i = 5 \text{ kHz}$,速度环 $f_n = 1 \text{ kHz}$ 。取电流反馈放大系数 $\beta = 1$,速度反馈放大系数 $\alpha = 1$,逆变器的放大系数 $K_{\text{PWM}} = 1$,电流环的周期 $T_{oi} = 0.0002 \text{ s}$,速度环周期为 $T_{on} = 0.001 \text{ s}$,逆变器的时间常数为 $T_{\text{PWM}} = 0.00005 \text{ s}$ 。

4 Simulink 软件建模与仿真

4.1 电动环控系统建模

电动环控系统由三个小模块组成:驱动电源模块(三相电压整流器)、驱动电机模块(永磁同步电机)和负载模块(压气机)。图 6 是在 Matlab/Simulink 软件平台上设计的系统整体模型。

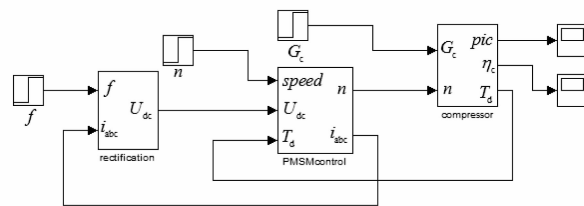


图6 电动环境控制系统整体模型

图 6 中: f 为电网电压频率; n 为驱动电机转速; G_c 为压气机进口空气流量; pic 为压气机的增压比; η_c 为压气机负载的绝热效率。rectification 为电压

4.2 系统 Simulink 仿真

根据所建模型,选取如表 1 所列的电动机仿真参数进行仿真。

表 1 电动机仿真参数

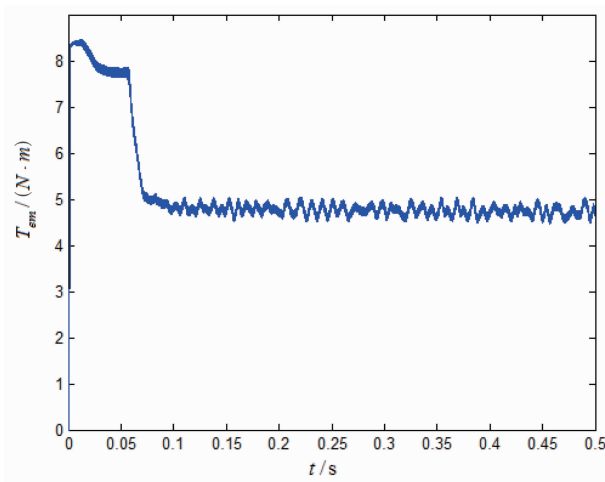
序号	名称	符号	仿真参数
1	逆变器的工作电压/V	U_{dc}	540
2	额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	n	10 000
3	转子转动惯量/($kg \cdot m$)	J_m	3.617×10^{-4}
4	绕组电阻/ Ω	R_m	0.62
5	电枢电感/H	L_m	2.075×10^{-3}
6	极对数	p_n	4
7	进口空气流量/($kg \cdot S^{-1}$)	G_c	20

仿真结果如图 10 所示。

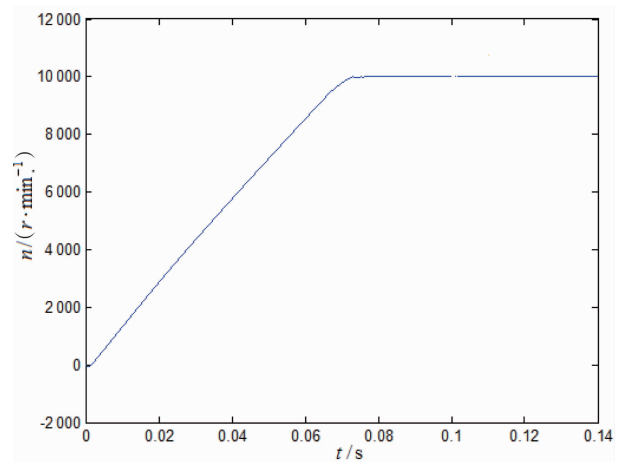
图 10 反映出电机起动时力矩较大,振幅偏高,但随着电机的转速达到目标值,力矩收敛,系统在 0.08 s 趋于稳定,稳定后转速约为 10 000 r/\min ,可见系统响应速度较快,超调量也比较小,此时压气机正常运行。

在工作时间为 0.1 s 处,加入负载为的机械负载,电机的工作特性曲线如图 11 所示。

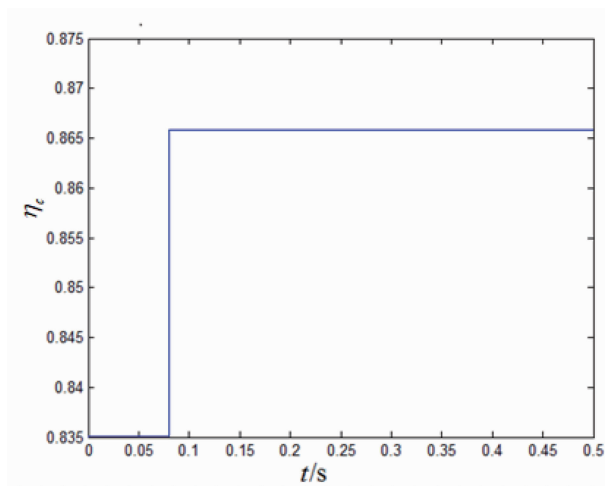
突加负载后,系统发生震荡,持续时间约为 0.05 s,迅速恢复稳定。观察转速波形,几乎趋于稳定值,没有因为突加负载而出现明显的变化,表明系统稳定,调节能力强。



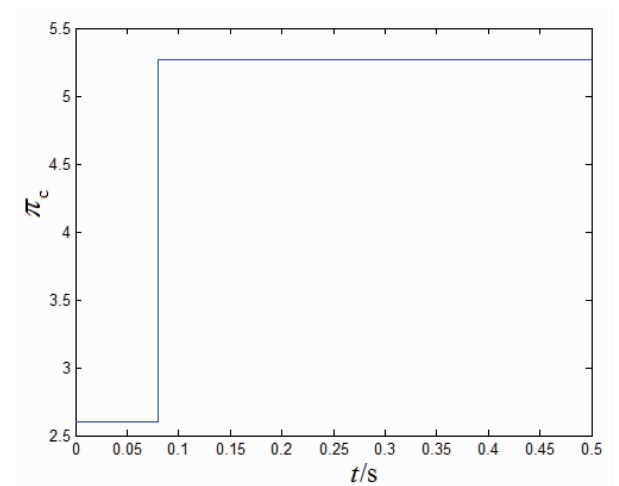
(a) 电动机电磁转矩波形



(b) 电动机转速波形

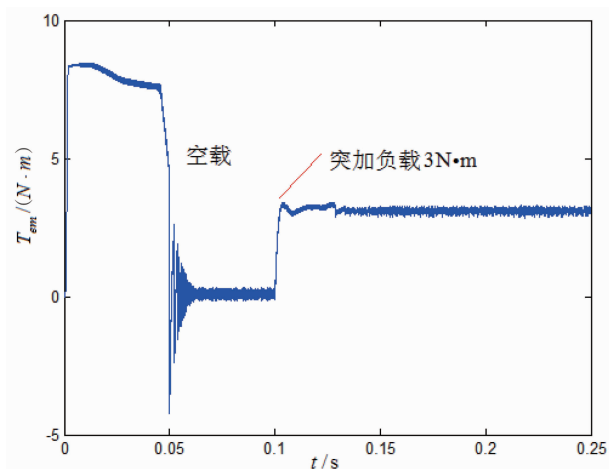


(c) 压气机增压比曲线

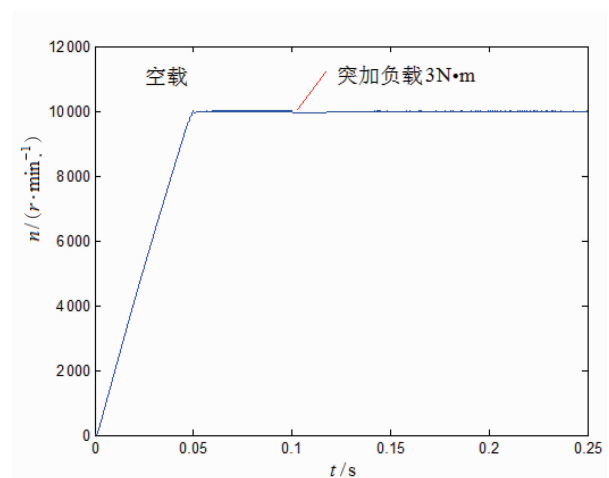


(d) 压气机绝热效率曲线

图 10 环控系统特性仿真结果



(a) 电动机电磁转矩波形



(b) 电动机转速波形

图 11 $t = 0.1 \text{ s}$ 时突加负载环控系统仿真结果

5 结论

电动环控控制系统采用高速电机驱动压气机,取消发动机引气,简化飞机结构,减少燃油消耗,为飞机飞行效率、可靠性、维修性、节能减排的实现奠定了理论基础。本文确定了高速电机和压气机负载的建模方式,根据电动环境控制系统的负载功率特性,进行控制策略的研究,并设计了双闭环控制系统,使其具有较强稳态和动态性能。

研究过程中为简化系统模型,采用基于压气机特性曲线的负载建模方式,与传统的机械化结构模型相比,精确度较低。优化压气机负载模型是环境控制系统研究的重点之一。电动环境控制系统作为

大功率负载,其负载特性对电网品质影响较大,为提高系统鲁棒性,可采用新型控制策略如最大电流转矩比控制、滑模变结构控制等,对比不同控制策略对电驱动空气循环系统动性能的改善和驱动功率等级。

参考文献:

- [1] 秦海鸿,严仰光. 多电飞机的电气系统[M]. 北京,北京航空航天大学出版社,2016.
- [2] 崔高伟. 飞机环境控制系统的优化方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.
- [3] ATHANASOPOULOS D K, KASTROS V I, KAPPATOU J C. Electromagnetic analysis of a PMSM with different rotor topologies[C]//2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, Switzerland, 2016,306-312.
- [4] 孙雨,周洁敏,王瑶. 基于 Simpler/MATLAB 的多电飞机环控系统研究[J]. 航空计算技术,2015,45(3):131-134.
- [5] PARRILLA J. Hybrid environmental control system integrated modeling trade study analysis for commercial aviation[D]. Cincinnati:University of Cincinnati, 2014.
- [6] 徐李云. 民用飞机环境控制系统研究[J]. 航空科学技术,2015,26(7):42-45.
- [7] 姜春燕. 多电飞机电气负载驱动控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
- [8] GAO F, ZHENG X, BOZHKO S, et al. Modal analysis of a PMSG-Based DC electrical power system in the more electric aircraft using eigenvalues sensitivity[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification,2015,1(1):65-76.
- [9] LI B, WANG C. Comparative analysis on PMSM control system based on SPWM and SVPWM[C]//2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Yinchuan, [S. l.]: IEEE,2016: 5071-5075.
- [10] 赵晨. 多电化机电系统电-机械负载的建模方法与仿真研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.

作者简介

王 佩 女,硕士研究生在读。主要研究方向:飞机电气自动化。E-mail: wangpei@nuaa.edu.cn

周洁敏 女,硕士,教授,硕士生导师。主要研究方向:飞机电气自动化、电力电子技术、航空电源。E-mail: jieminzh@nuaa.edu.cn

郑 罡 男,博士,副教授,硕士生导师。主要研究方向:交通信息工程及控制、磁共振灌注功能成像技术。E-mail: gang.zheng@nuaa.edu.cn