

航空电反推驱动用永磁同步电机振动及强度分析*

孙桂林¹, 蒋佳楠², 袁瑞林¹, 王培路³, 宋受俊¹, 刘卫国¹

(1. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072;

2. 诺丁汉大学 工程学院, 英国 诺丁汉 NG7 2RD;

3. 陕西航空电气有限责任公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 电机的模态是分析振动的基础, 由固有频率、振型和阻尼比决定。当电机工作时的激振频率与某一阶的固有频率相同或者相近时, 会产生共振, 导致电机剧烈振动, 影响其正常运转。在对应用于航空电反推系统的双通道永磁同步电机 PMSM 进行三维建模之后, 将三维模型送入 ANSYS Workbench, 在 ANSYS 工作平台上进行电机模态、响应谱分析与冲击响应的仿真。给出了该电机的前 6 阶次的固有频率和振型, 以及在外加响应谱下的电机等效应力与在瞬态冲击下的电机机械结构上的应力分布。

关键词: 永磁同步电机; 模态分析; 响应谱分析; 电机振动; 冲击响应

中图分类号: TM 341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)09-0044-07

doi: 10.12177/emca.2020.104

Vibration and Strength Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor for Aero Electric Reverse Drive*

SUN Guilin¹, JIANG Jianan², YUAN Ruilin¹, WANG Peilu³, SONG Shoujun¹, LIU Weiguo¹

(1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Faculty of Engineering, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, UK;

3. AVIC Shaanxi Aero Electric Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: The mode of motor is the basis of vibration analysis, which is determined by natural frequency, mode shape and damping ratio. When the excitation frequency of the motor is the same as or similar to the natural frequency of a certain order, resonance will occur, and the motor will vibrate violently, which will affect its normal operation. After the 3D modeling of dual-channel permanent magnet synchronous motor (PMSM) applied in aero electric reverse system, the 3D model is sent to the ANSYS Workbench, and the motor modal analysis, response spectrum analysis and impact response simulation are carried out on the ANSYS platform. The first six order natural frequencies and vibration modes of the motor, the equivalent stress of the motor under the external response spectrum and the stress distribution on the mechanical structure of the motor under the transient impact are given.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); modal analysis; response spectrum analysis; motor vibration; impact response

收稿日期: 2020-05-24; 收到修改稿日期: 2020-07-17

* 基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2018GY-185)

作者简介: 孙桂林(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电驱动系统分析与设计。

蒋佳楠(1992—), 女, 博士研究生, 研究方向为电驱动系统分析与控制。

袁瑞林(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电驱动系统控制。

0 引言

民用航空高功率密度高压直流电驱动技术是多电飞机电力传动系统中的核心技术^[1-2],从飞机的质量、可靠性和维护性考虑,缩小或取消集中式液压系统,广泛采用电力传动器和功率电传技术可以减轻飞机的质量和减少寿命周期费用,大量的飞行试验也证实了电力传动器取代液压传动器可有效提升飞机的整体性能^[3-4]。在航空等对空间有较严格限制的特殊应用场合,需要整个电驱动系统具有较小体积质量,同时还要保证较高的效率,即要求电驱动系统具有较高的功率密度^[5-6]。

高功率密度通常意味着电机在输出所需求特性的前提下,其电磁与机械部分采用尽量少的材料^[7],会直接影响系统机械强度,有必要利用有限元分析技术对应力分布情况进行校验^[8-9],这对于振动、冲击显著的航空应用显得尤为重要^[10]。

民用航空大涵道比涡扇发动机的反推装置是飞机多电技术的重要应用对象之一,该装置通过推动发动机反推罩,改变发动机外涵道的气流方向,从而产生反推力,缩短飞机在跑道上的着陆距离,增加飞机着陆安全性,同时反推装置也可用于飞机应急着陆和终止起飞。

本文旨在结合多电飞机性能需求和永磁同步电机(PMSM)的优点,以高功率密度高压直流电驱动技术作为研究方向,发动机电动反推力装置作为应用验证对象,针对多电飞机高压直流电驱动系统中的 PMSM 进行振动和强度性能的仿真分析。

1 振动模态有限元分析方法

本文中的电机模态与振动的分析方法与普通电机不同,该电机安装在航空发动机附近且电机工作制为短时间歇工作,发动机的振动比该电动机工作时的本身振动剧烈得多,因此需要给电机外加响应谱与瞬态冲击响应谱,观察电机安装在发动机附近时的振动结果。本文对所设计的表贴式和内置式 2 种电反推驱动用 PMSM 分别进行了分析,电机主要参数如表 1 与表 2 所示。

表 1 12 槽 8 极表贴式 PMSM 参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	10
转速范围/(r·min ⁻¹)	0~21 000
定子铁心内外径/mm	94/56
铁心长度/mm	48
槽满率/%	62.3
额定转矩/(N·m)	5.3
气隙/mm	1.6

表 2 24 槽 4 极内置式 PMSM 参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	10
转速范围/(r·min ⁻¹)	0~21 000
定子铁心内外径/mm	94/54.6
铁心长度/mm	48
槽满率/%	57.4
额定转矩/(N·m)	5.3
气隙/mm	0.6

首先建立简化的双通道 PMSM 几何结构模型,根据电机实际的边界条件及工作环境,结合振动模态有限元分析理论,建立响应的有限元模型,进而对其进行模态分析。

模态分析的经典定义是将线性定常系统振动微分方程中的物理坐标变换为模态坐标,使得方程组解耦为一组由模态坐标和模态参数描述的独立方程组,从而得到系统的模态参数。其中,坐标变换的变换矩阵为模态矩阵,每列为模态振型。对整个系统的各单元集合,可得振动系统的运动方程:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为系统整体的质量矩阵; $\mathbf{C}$ 为整体的阻尼矩阵; $\mathbf{K}$ 为系统整体的刚度矩阵; $\mathbf{F}$ 为节点力矢量。

无阻尼模态分析是经典的特征值问题,令式(1)中 $\mathbf{F} = \mathbf{0}$ 和 $\mathbf{C} = \mathbf{0}$,则式(1)的解可表示为

$$\{\mathbf{u}(t)\} = \{\mathbf{e}^{j\omega t}\} \{\boldsymbol{\phi}\} \quad (2)$$

其中: $j^2 = -1$; $\{\boldsymbol{\phi}\}$ 为模态向量; ω 为模态的固有频率。

将式(2)代入式(1),可得:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \{\boldsymbol{\phi}\} \mathbf{e}^{j\omega t} = \{\mathbf{0}\} \quad (3)$$

由线性方程理论有非零解的充分必要条件可得:

$$|\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}| = 0 \quad (4)$$

其中,使式(4)成立的频率 ω 和与之对应的非零解向量 $\phi_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 为电机的固有频率及自振频率 $f=\omega/2\pi$ 下对应的固有振型。

2 电机模态分析

2.1 表贴式 PMSM 模态分析

为了获得准确可靠的固有频率、模态振型等参数信息,在分析电机的机械特性时,需要将建立好的三维电机模型作响应的等效处理,得到 PMSM 有限元模型,以适应 ANSYS 模态分析时的参数设置。

对于表贴式 PMSM,在三维建模软件 Solidworks 中完成电机几何模型的建立后,将其导入到 ANSYS Workbench 中生成响应的几何模型,为了方便后续网格划分,将该电机的各个零部件切分成相对规则的形状,以便划分结构网格。表贴式 PMSM 三维模型如图 1 所示。



图 1 表贴式 PMSM 三维模型

利用 ANSYS 自带的 meshing 模块将电机各个部分相对规则地切块,然后再划分六面体网格,划分策略主要是“扫略”和“多区域”。电机网格划分结果如图 2 所示。可以看出,该电机网格几乎全部为六面体网格,网格质量较高,能更真实模拟物体实际物理特性。该表贴式 PMSM 网格节点 310 万,网格数量 80 万,能满足计算精度的要求。

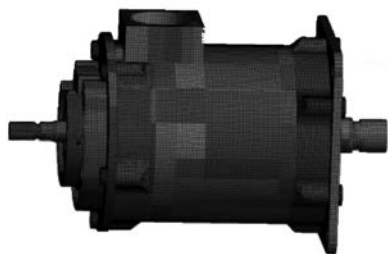


图 2 电机网格剖分结果

模态仿真时先进行电机的静力学分析,再将分析结果作为模态的预应力计算电机模态。表贴式 PMSM 静力学仿真结果如图 3 所示。模态仿真后的前六阶次的固有频率和振型相对较大的一阶与二阶固有频率下的振型如图 4 所示。

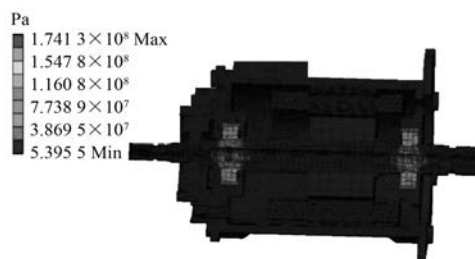
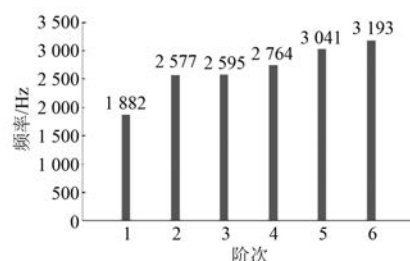
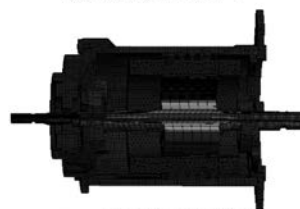


图 3 静力学仿真结果



(a) 前六阶固有频率



(b) 一阶固有频率振型



(c) 二阶固有频率振型

图 4 表贴式 PMSM 前六阶模态和一、二阶振型

由上述仿真分析表明,电机在标准重力场的作用下电机的主要应力分布在轴承处,为 174 MPa。轴承钢是用来制造滚珠、滚柱和轴承套圈的材料,具有硬度高且均匀、耐磨性和弹性极限高等优点。轴承钢的化学成分分布、非金属物含量和分布、碳化物的分布等要求非常严格,其屈服极限可达到 400 MPa 以上,因此电机工作下的应力不会对轴承造成损害。

由电机模态分析可知,该表贴式 PMSM 的一阶固有频率在 1 882 Hz,其一阶固有频率较高,电机工作时电磁力的激振频率不会达到电机的一阶固有频率,电机不会发生共振现象。

2.2 内置式 PMSM 模态分析

内置式 PMSM 与表贴式 PMSM 较大的区别主要是转子形状不同,内置式 PMSM 转子内部开有大量用于安装永磁体的磁槽和通风孔,使转子结构趋于复杂。冲片强度受到了严重削弱,转子刚度也有所减小。电机在飞机发动机振动源附近的主要应力集中在转子上,因此本文主要分析转子的振动及强度。

在 ANSYS 中建立转轴的三维模型,划分网格并赋予材料之后,设置轴与轴承接触面的接触方式为轴承接触,其刚度为 80 N/m。内置式 PMSM 转子网格剖分图,如图 5 所示。模态仿真结果和内置式 PMSM 转子一、二阶振型,如图 6 所示。分析可知,内置式 PMSM 的一阶固有频率为 1 925 Hz,其值较高,不会发生共振。

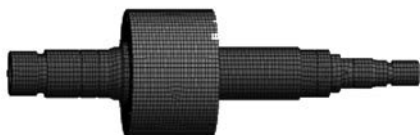


图 5 转子网格剖分图

3 响应谱分析

3.1 表贴式 PMSM 响应谱分析

响应谱分析是谱分析的一种,是用准静态的方法模拟动态过程的分析方法,其一般用于模拟地震运动对结构的影响,在该项目中,则模拟飞机发动机振动对电动机结构的影响。响应谱相对于瞬态动力学分析,方式简单,计算量也大大减少,还能得到基本满足工程需要的计算结果。在第 2 节计算得到的模态的基础上,分别给电机加载 3 个方向上振动谱曲线,分析表贴式 PMSM 在各阶固有频率下加载振动谱上所给出的载荷时电机的形变与等效应力。表贴式 PMSM 振动谱分析结果如图 7 所示。分别为电机振动谱分析等效应力分布和电机振动谱分析总的形变量。

对图 7(a) 和图 7(b) 分析可知,在正弦振动试验谱的载荷下,电机主要应力集中在轴上,轴上

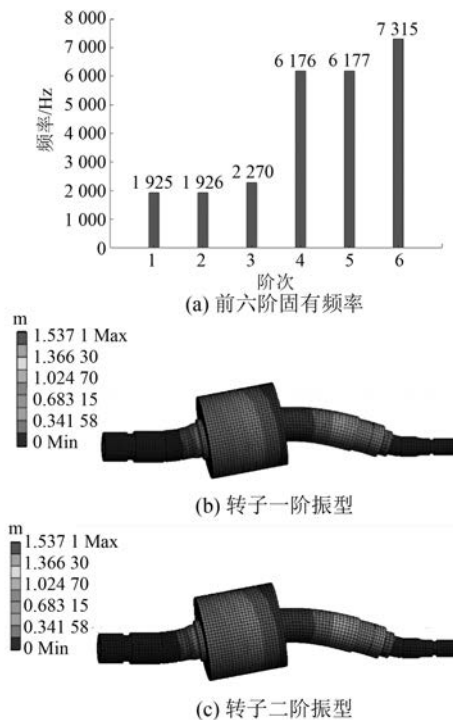


图 6 内置式 PMSM 转子前六阶模态和一、二阶振型

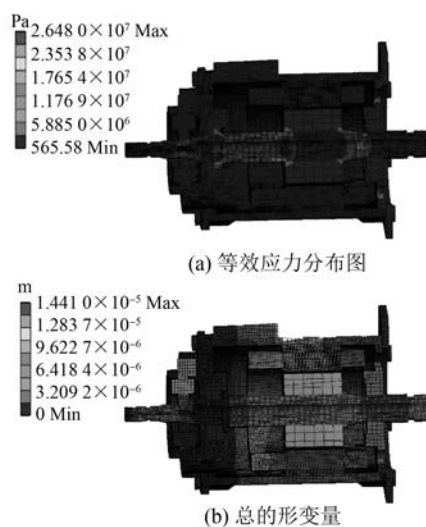


图 7 表贴式 PMSM 振动谱分析结果

的应力约为 17 MPa,最大应力为 26.5 MPa,依然远远小于材料的屈服极限。电机的最大形变也主要集中在轴上,形变的最大值发生在轴的两端,最大形变量为 0.014 4 mm。满足振动试验谱上所给出的试验要求,验证了该电机在飞机发动机振动中,可以正常工作,不会因为发动机的振动产生损坏。

3.2 内置式 PMSM 响应谱分析

加载振动谱曲线,得到内置式 PMSM 转子的等效应力和总的形变量如图 8 所示。从图 8 可以看出,内置式 PMSM 的应力也主要集中分布在转子轴上,并且较小。最大等效应力为 7.9 MPa,最大形变量为 2.5×10^{-6} m。

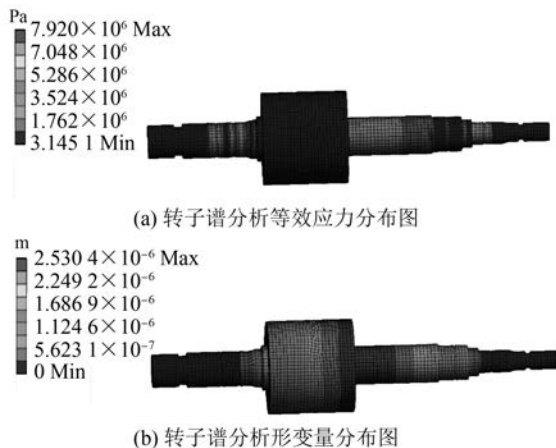


图 8 内置式 PMSM 振动谱分析结果

4 电机强度分析

4.1 表贴式 PMSM 强度分析

瞬态动力学分析相对静力学分析均考虑了时间这个第四维度,并且考虑运动惯性和阻尼等情况,是一种更加符合实际现象的模拟分析方法,但是计算量较大,需要设置的参数很多,这也限制了其使用范围。

对于表贴式 PMSM,根据试验测试谱中的数据,在 ANSYS 中添加基本冲击 3 个方向的载荷,载荷随时间的变化如图 9 所示。在 ANSYS 中按图 9 的曲线添加载荷,由于采用三维模型,电机的网格数量较多,为了方便计算但又不影响其仿真结果,因此将求解时间步长设置的稍微大一点,本文设置 ANSYS Mechanical 的瞬态冲击响应模块的时间求解步长为 1 ms。

仿真结果表明,在最大为 3g 的加速度工作冲击下电机的应力较小,得到表贴式 PMSM 最大应力发生在 22 ms,其值约为 1.42 MPa,应力随时间响应曲线如图 10(a) 所示,发生最大应力时电机整体应力分布云图如图 10(b) 所示。可见在正常工作冲击载荷下电机结构稳定,电机不会有应力集中,不会破坏电机的结构。

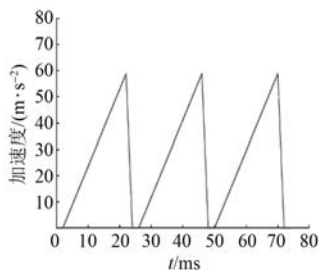


图 9 工作冲击加载曲线

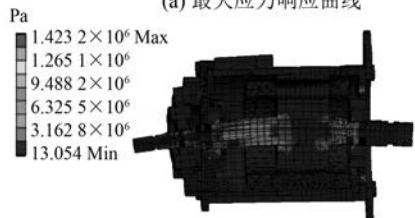
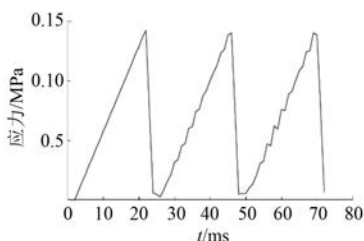


图 10 表贴式 PMSM 工作冲击下应力仿真结果

表贴式 PMSM 的形变量随时间变化和发生最大形变时电机整体的形变量分布云图如图 11 所示。由图 11 可知,电机的形变量随着施加的载荷的变化而变化,是一个相似曲线,电机最大形变发生在 70 ms,其值为 0.001 23 mm,不会破坏电机的结构。

坠撞冲击是民用航空机载设备必须测试的试验项目,以验证机载设备在剧烈冲击下的可靠性。有别于工作冲击,坠撞冲击波的幅值较大,但是作用时间较短。在 ANSYS 中加载坠撞冲击的曲线图,如图 12 所示。仿真得到表贴式 PMSM 坠撞冲击载荷下,不同时间电机的应力分布不同,但最大应力出现的部位基本相同。最大应力发生在 22 ms 时,电机轴上对应最大应力值,约为 4.74 MPa,其应力随时间响应图和当发生最大应力时电机的整体应力分布如图 13 所示。从图 13 可以明显地看出,最大应力集中在轴上,但是也远远没有达到轴的屈服极限,因此电机载坠撞冲击载荷下依然是

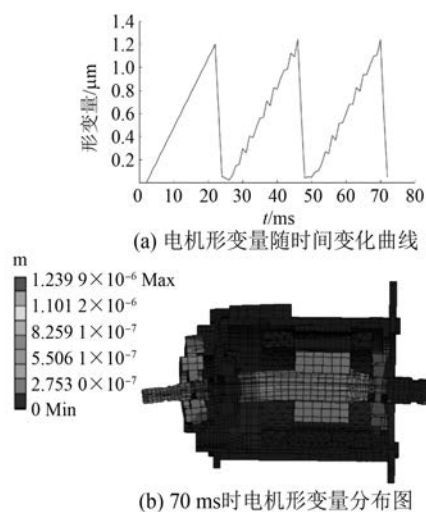


图 11 表贴式 PMSM 工作冲击下形变仿真结果

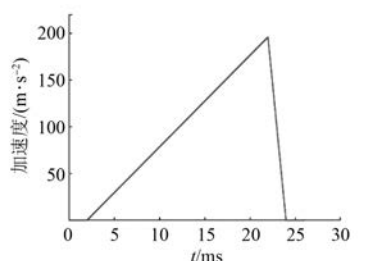


图 12 坠撞冲击加载曲线

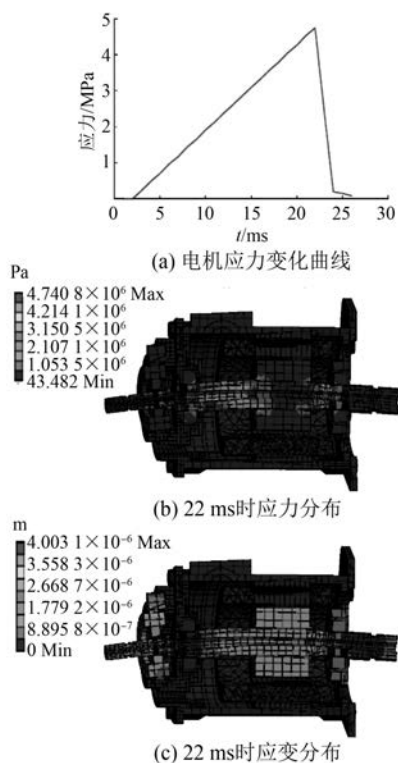


图 13 表贴式 PMSM 坠撞冲击仿真结果

可靠的。

4.2 内置式 PMSM 强度分析

分析过程与表贴式 PMSM 类似, 内置式 PMSM 仅是转子与表贴式 PMSM 有较大差异, 因此不再赘述分析过程。给出内置式 PMSM 转子工作冲击仿真结果, 如图 14 所示。坠撞冲击仿真结果如图 15 所示。

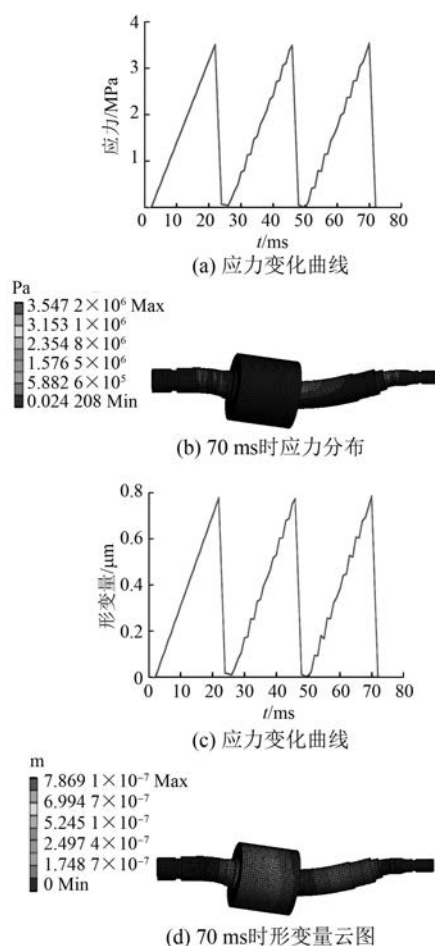


图 14 内置式 PMSM 转子工作冲击下仿真结果

仿真结果表明, 内置式 PMSM 转子在工作冲击下最大应力为 3.4 MPa, 最大应变为 0.78 μm ; 坠撞冲击载荷下最大应力为 11.8 MPa, 最大应变为 2.55 μm 。工作冲击与坠撞冲击载荷下电机应力远小于材料屈服强度。因此, 内置式 PMSM 转子在 3g 工作冲击下不会发生明显的形变, 不会破坏转子的结构。

5 结 语

本文基于民用航空高功率密度高压直流电驱

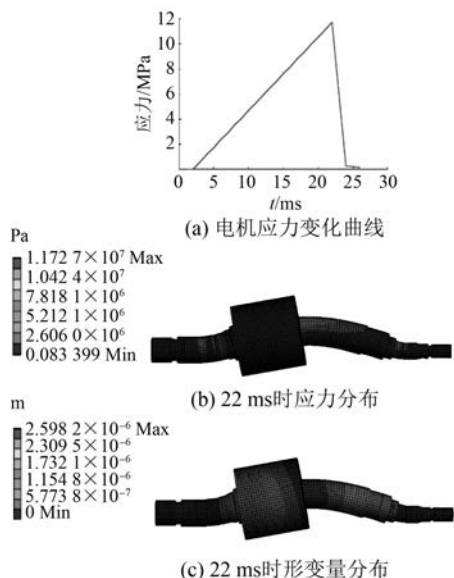


图 15 内置式 PMSM 转子坠撞冲击仿真结果

动系统,针对当前技术还相对薄弱的飞机发动机电反推系统,给出了 2 种电反推用 PMSM 的振动和强度仿真分析。

利用 ANSYS Workbench 对电机建模,并在不影响分析结果的基础上适当简化,结果表明表贴式 PMSM 的一阶固有频率相对较高。电机在响应谱、工作冲击、坠撞冲击下均不会超过材料的屈服极限,因此安全可靠。由于内置式 PMSM 仅电机转子与表贴式 PMSM 有较大的区别,在分析表贴式 PMSM 之后,发现定子没有集中分布应力,因此对内置式 PMSM 的转子进行了模态、响应谱和瞬态冲击计算。结果表明:转子一阶固有频率 1 925 Hz,并且转子在不同载荷下也不会超过材料的屈服极限。

【参考文献】

- [1] LIUF, XU L, LI Y, et al. Permanent magnet synchronous machine starter/generators based high-voltage DC parallel electric power system for the more electric aircraft [J]. The Journal of Engineering, 2018, 2018(13): 565.
- [2] BENNETT J W, MECROW B C, ATKINSON D J, et al. Fault-tolerant electric drive for an aircraft nose wheel steering actuator [J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2011, 1(3): 117.
- [3] SARLIOGLU B, MORRIS C T. More electric aircraft: review, challenges, and opportunities for commercial transport aircraft [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(1): 54.
- [4] 张卓然, 于立, 李进才, 等. 飞机电气化背景下的先进航空电机系统 [J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(5): 622.
- [5] 杨钟鼎. 多电机作动电机控制技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [6] 关栋, 杨小辉, 刘更, 等. 功率电传动系统用电机关键技术及其发展趋势 [J]. 微特电机, 2012, 40(5): 71.
- [7] 刘奇林, 沈启平. 车用高功率密度永磁同步电机设计及试验研究 [J]. 电机与控制应用, 2016, 43(1): 88.
- [8] 李伟力, 候富余, 沈稼丰. 计及转子护套与永磁体机械强度的高速永磁同步电机多物理场研究 [J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(5): 110.
- [9] WANG W, LIU Y, WANG M, et al. Optimization and mechanical strength analysis of less-rare-earth interior permanent-magnet synchronous machines used for electric vehicles [C]. // 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2018.
- [10] ZHAO X, RINDERKNECHT S. Investigation of actuator placement approaches for active vibration control in the aircraft engine [C]. // 2015 IEEE Aerospace Conference, 2015.

[1] LIUF, XU L, LI Y, et al. Permanent magnet

(上接第 43 页)

- [6] YEPES A G, FREIJEDO F D, DOVAL-GANDOY J, et al. Effects of discretization methods on the performance of resonant controllers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(7): 1692.
- [7] 王剑, 郑琼林, 高吉磊. 基于根轨迹法的单相 PWM

整流器比例谐振电流调节器设计 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 251.

- [8] 黄华, 周波达, 费建平, 等. 基于根轨迹法的链式 STATCOM 比例谐振电流控制器设计 [J]. 江苏电机工程, 2015, 34(2): 1.