

一种高功率密度电动舵机的设计

段小帅

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要: 针对飞行器的速度和机动性不断增加, 对舵机的高功率和小型化等要求越来越高的问题, 设计了一种高功率密度电动舵机。从一体化本体结构设计、高功率伺服电机设计和轻质化材料选用等方面对电动舵机进行了研究分析。最后对该电动舵机进行了性能测试。试验结果表明, 该电动舵机能够承载 $8000\text{N} \cdot \text{m}$ 弯矩, 并且输出功率密度比常规电动舵机提高了 50% 以上。

关键词: 电动舵机; 高功率密度

中图分类号: TJ765.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2016)01-0036-04

Design of a High Power-density Electromechanical Actuator

DUAN Xiao-shuai

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: A high power-density electromechanical actuator is designed regarding the problems of high flight speed and flexibility for aircraft, which requires high power and miniaturization of electromechanical actuator more and more. The electromechanical actuator is studied based on incorporate configuration, high power servo motor and light materials. The performance is tested at last. The results show that it can bear bending moment of $8000\text{N} \cdot \text{m}$ and its output power-density increases 50% more than ordinary electromechanical actuator.

Key words: Electromechanical actuator; High power-density

0 引言

舵机是飞航导弹等飞行器制导控制系统的执行机构, 是一种高精度的位置伺服系统, 其性能直接影响飞行过程的动态品质。随着航天技术的快速发展, 飞行器的速度、射程、精度和机动性不断增加, 因此对舵机的高功率、大承载、小型化和轻质化等要求越来越高^[1-2]。本文研究设计了一种电动舵机, 相比于常规电动舵机, 具有功率密度高和承载能力强等特点。

1 舵机功能组成

电动舵机通常由本体结构、伺服电机、传动机构、输出机构和反馈装置等几部分组成, 如图 1

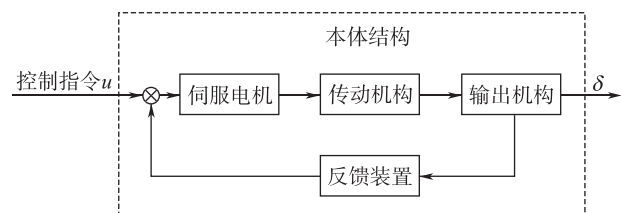


图 1 电动舵机组成示意图

Fig. 1 The scheme of electromechanical actuator

所示。伺服电机将电能转化为机械能; 传动机构将伺服电机产生的高速低转矩通过适当的减速比转化为系统要求的低速高转矩, 并通过输出机构传递给舵面; 反馈装置测量到舵偏角信号, 实现系统的闭环控制; 伺服电机、传动机构、输出机构和反馈装置等组件最终通过舵机本体结构, 集

收稿日期: 2015 - 05 - 05; 修订日期: 2015 - 06 - 05。

作者简介: 段小帅 (1985 -), 男, 硕士, 工程师, 主要从事伺服系统方面的研究。

成为一台完整的电动舵机。

2 舵机设计实现

通常情况下,一台电动舵机的伺服电机、传动机构和输出机构分别采取独立设计制造,最后再组装到一个舵机壳体中,实现整个舵机的装配和固定^[3]。按照 $8000\text{N}\cdot\text{m}$ 弯矩、额定输出 $700\text{N}\cdot\text{m}$ 转矩、 $200\text{ }(^{\circ})/\text{s}$ 角速度、 15Hz 频带的性能指标要求,最初设计的常规电动舵机如图 2 所示,伺服电机为直流电机,传动机构为齿轮+滚珠丝杠副,输出机构为摇臂+输出轴,反馈装置为齿轮+电位器,该电动舵机的重量为 11.5kg ,输出功率密度为 $210\text{W}/\text{kg}$ 。

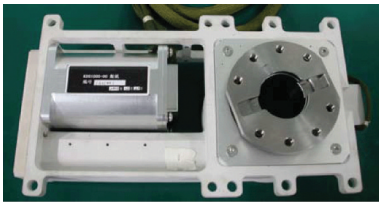


图 2 常规电动舵机

Fig. 2 Ordinary electromechanical actuator

为了进一步提高该电动舵机的功率密度,本文通过以下几个方面进行设计研究。

2.1 一体化本体结构设计

电动舵机各组件的壳体是电动舵机工作过程中的关键承力部件,同时也为各组件之间提供定位及安装位置,在电动舵机装配体中起到“基石”的关键作用。一般情况下,一台电动舵机的各组件分别具有各自的壳体结构,从而导致了电动舵机的体积和重量比较大。

本文为电动舵机设计了一体化本体结构,如图 3 所示。该结构具有以下几方面特点:

- 1) 伺服电机、传动机构和输出机构共用一个本体结构,大大减小了电动舵机的体积和重量。
- 2) 伺服电机壳体、传动机构壳体和输出机构壳体三者之间相互连接,形成一个完整的结构件,提高了三个组件之间的连接强度和承载能力。
- 3) 该结构体现为一个零件形式,机械加工时采用统一基准,提高了三个组件之间的定位精度。
- 4) 该结构要求各组件壳体为同一种材料,尤其在高低温环境下材料特性能够保持高度一致,

提高了各组件之间的装配精度。

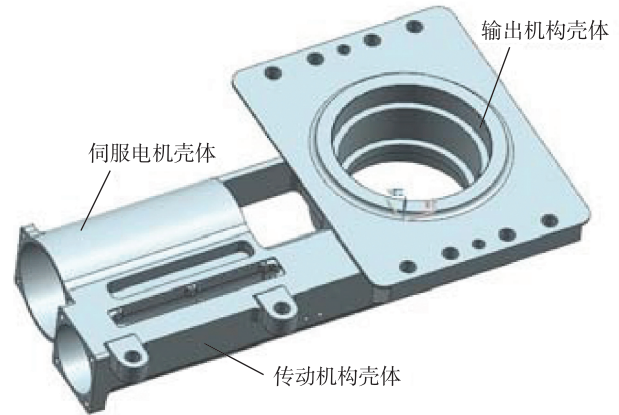


图 3 一体化本体结构示意图

Fig. 3 The scheme of incorporate configuration

2.2 高功率伺服电机设计

伺服电机是电动舵机输出转矩和角速度的源泉,相比其他伺服电机,无刷直流电机具有功率密度高、转矩输出能力强、环境适应性高等特点,本文中的电动舵机选用无刷直流电机作为执行元件,并从电机材料选取、结构和尺寸计算、电磁场分析等方面对该电机进行设计。

为了减小电机的尺寸和重量,在保证内禀矫顽力满足要求的前提下,剩余磁感应强度和磁感应矫顽力应尽量提高,同时考虑到电机的高温使用环境等综合因素,通过计算选取 SmCo28 烧结钕钴作为电机的永磁材料。电机定子铁心和转子铁心选用 35W300 电工钢带叠压而成,并采用特殊的粘接工艺进行连接。电机转轴材料采用 TC9 钛合金,该材料具有强度高、密度低、耐腐蚀及耐高温等特点。

通过磁路计算和电路计算,确定该伺服电机的主要设计参数如表 1 所示。

表 1 伺服电机设计参数

Tab. 1 The design parameter of servo motor

定子外径	64mm
定子轴向长度	90mm
转子外径	30mm
转子轴向长度	90mm
气隙宽度	0.6mm
磁钢厚度	4mm
每相绕组串联匝数	57
槽满率	60%
每相绕组电阻	0.2 Ω

该电机为6极9槽的槽极配合,该结构节距为1,绕组端部短,有利于减小转子轴向长度,适合高速运行;该结构绕组因数低,电枢反应弱,有利于电机的过载;并且在相同外径下分布的槽数少,保证了电机的齿部机械强度。伺服电机的结构外形如图4所示。

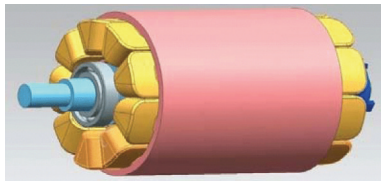


图4 伺服电机外形图

Fig. 4 The figure of servo motor

在Ansoft软件中建立伺服电机设计模型,进行电磁和性能仿真。给定伺服电机10000r/min转速时,伺服电机额定输出力矩约 $3.6\text{N}\cdot\text{m}$,曲线如图5所示;伺服电机峰值输出力矩约 $7.6\text{N}\cdot\text{m}$,曲线如图6所示。经测试,该伺服电机的输出功率达到 3.8kW ,功率密度超过 $2\text{kW}/\text{kg}$ 。该伺服电机完成加工和测试后,最终安装到一体化本体结构中,实现电动舵机的集成化装配。

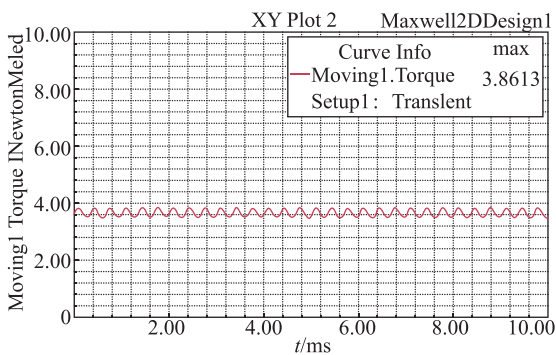


图5 电机额定输出力矩曲线

Fig. 5 The graph of rated torque

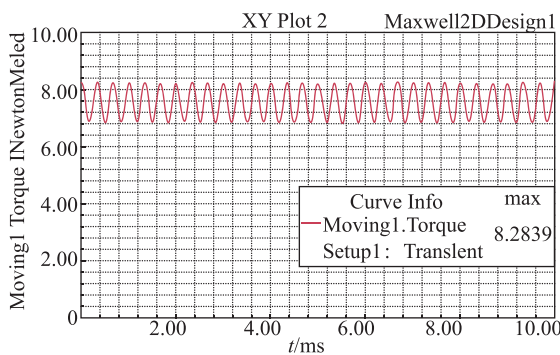


图6 电机峰值输出力矩曲线

Fig. 6 The graph of peak torque

2.3 轻质化材料选用

电动舵机的一体化本体结构、传动机构和输出机构等关键承力部件采用轻质高强度材料设计加工。其中,一体化本体等壳体类零件选用ZK61M镁合金代替铝合金,抗拉强度达到 315MPa ,密度仅 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ (常用的3A21铝合金的抗拉强度为 165MPa ,密度为 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$);传动机构和输出机构等运动部件选用TC9钛合金代替合金钢,抗拉强度达到 1060MPa ,密度仅 $4.5\text{g}/\text{cm}^3$ (常用的40Cr合金钢的抗拉强度为 980MPa ,密度为 $7.8\text{g}/\text{cm}^3$)。通过轻质化设计,该电动舵机的重量为 7.5kg ,输出功率密度超过 $330\text{W}/\text{kg}$,比常规电动舵机提高了50%以上,如图7所示。

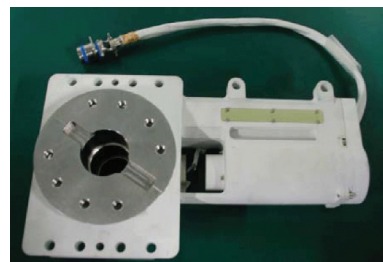


图7 高功率密度电动舵机

Fig. 7 High power-density electromechanical actuator

在Ansys软件中对一体化本体结构强度进行仿真分析,在舵机输出轴上加载 $8000\text{N}\cdot\text{m}$ 弯矩,一体化本体结构上的应力分布如图8所示。结构上最大应力点 359MPa ,为局部应力集中点,绝大部分区域处于材料的抗拉强度以下,结构强度能够满足指标要求。

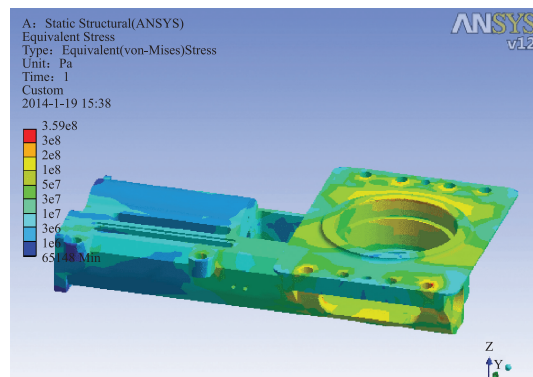


图8 强度仿真结果

Fig. 8 Intensity emulation

对电动舵机实物进行了弯矩加载试验,将舵机安装固定在弹体上,在该舵机上安装舵面后,在舵面上加载 $8000\text{N}\cdot\text{m}$ 弯矩,电动舵机的结构完好、工作正常,表明了该轻质化材料选用的可靠性。

3 舵机试验分析

采用专用电动舵机加载测试设备对该电动舵机进行典型信号响应测试。由于大尺寸舵面带来的惯量负载对电动舵机性能有一定的影响^[4],且本文中的电动舵机所驱动的舵面转动惯量为 $0.36\text{kg}\cdot\text{m}^2$,因此以下性能测试均在附加相同的惯量负载下进行。

对该电动舵机在输出 $700\text{N}\cdot\text{m}$ 转矩负载下进行角速度测试,输入 30° 方波信号,响应曲线如图9所示,测得输出角速度超过 $200\text{ }(\text{ }^\circ)/\text{s}$ 。

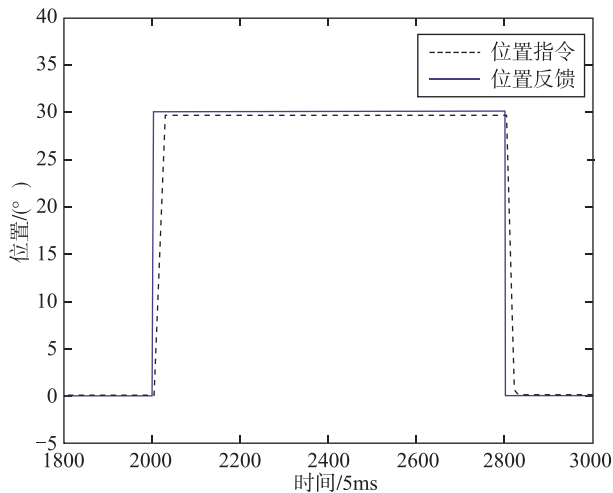


图9 角速度测试曲线

Fig. 9 Test curve of angular velocity

对该电动舵机在输出 $700\text{N}\cdot\text{m}$ 转矩负载下进行频率响应测试,输入 15Hz 、 2.5° 正弦信号,响应曲线如图10所示,测得幅值衰减了约10%,满足了系统响应快速性的要求。

4 结论

本文介绍的电动舵机,通过一体化本体结构设计、高功率伺服电机设计和轻质化材料选用等措施,电动舵机的功率密度和承载能力得到大幅提高。通过测试,该电动舵机能够承载 $8000\text{N}\cdot\text{m}$

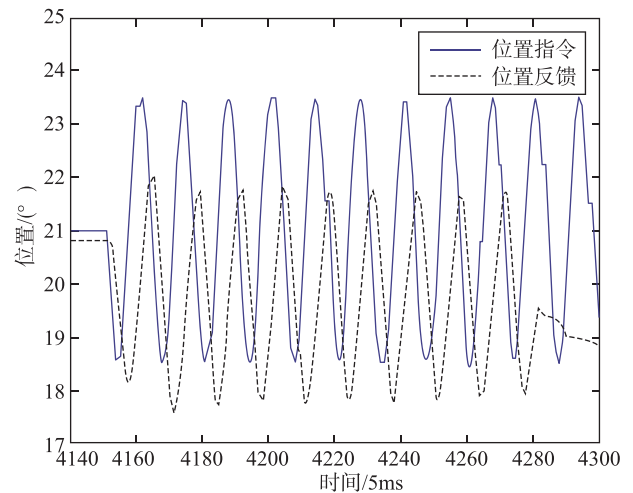


图10 频带测试曲线

Fig. 10 Test curve of frequency

弯矩,并且在大惯量负载和转矩负载条件下,能够满足系统快速响应的要求。

参考文献

- [1] 汪军林,解付强,刘玉浩. 导弹电动舵机的研究现状及发展趋势[J]. 飞航导弹, 2008 (3): 42-46.
- [2] 郭宏,邢伟. 机电作动系统发展[J]. 航空学报, 2007, 28 (3): 620-627.
- [3] 高荣华,徐军,章枫,郑富磊. 通用飞机电动舵机的设计[J]. 科技资讯, 2014 (3): 127-129.
- [4] 徐方洁,李四保,谢劲松. 浅析大惯量负载对机电舵系统的影响[J]. 导航定位与授时, 2014, 1 (1): 52-57.