

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.11.021

恒高拖靶舵机系统的设计

陶德桂,刘关心,王 雷

(中国人民解放军92419部队,辽宁兴城125106)

摘要:为了实现某型掠海恒高拖靶系统的高度控制功能,设计了舵机执行机构和舵回路控制电路。舵机执行机构由组合式螺杆驱动系统、滑动块、支撑架、摇臂及翼角反馈电位器等组成。舵回路控制电路由电流环和位置环组成的双闭环控制结构。针对具体性能指标要求,采用了螺旋滑动丝杠传动机构,确定了牙形角、公称直径和导程等参数,并计算了螺母和螺纹的长度,验证了机构自锁条件;通过对减速比的计算,选择了合适的减速箱型号;通过对电机功率及速度常数的计算,参照电机样本数据表资料,完成了电机的正确选型,并进行了指标验算;设计了以L292功放模块为直流电机驱动器的舵回路控制电路,并对位置反馈和电流反馈作了简要说明。实际使用结果表明,该设计合理、可靠,各项性能能够满足使用要求。

关键词:拖靶;直流电机;螺旋滑动丝杠;舵机;PWM功放

中图分类号:TH39;TH132.1;TM381

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)11-1393-04

Design of electric actuator for height keeping towed target

TAO De-gui, LIU Guan-xin, WANG Lei

(PLAC 92419 Unit, Xingcheng 125106, China)

Abstract: To achieve the height control function of a certain sea-skimming and height keeping towed target system, the electric actuator and the rudder loop control circuit were designed. The electric actuator was composed of combined screw drive system, sliding block, bracket, rocker arm and wing angle feedback potentiometer. The rudder loop control circuit was the double closed-loop structure which was made up of position loop and current loop. According to the performance index requirements, the spiral sliding screw spindle drive mechanism was adopted and the related parameters of tooth-shaped angle, nominal diameter and lead were determined. According to these parameters, the lengths of nut and thread were calculated, and then the self-locking condition of drive mechanism was verified. By the calculation of reduction ratio, the type of reduction gearbox was chosen appropriately. Through the calculation of motor power and speed constant and with the sample data sheets as reference, the type of motor was chosen and index's checking computation was completed. The rudder loop control circuit was designed, in which the L292 power amplifier module was used as DC motor drive. The brief explanation of the position feedback and current feedback was given. The experiments and application results show that, the system has reasonable design and meets the requirements of the practical application.

Key words: towed target; DC motor; spiral sliding screw spindle; electric actuator; PWM power magnifier

0 引 言

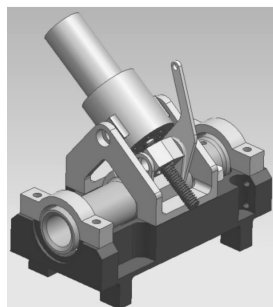
随着科技的进步和行业需求的扩大,空中无人飞行器事业发展迅猛,不同种类、不同用途的无人飞行器大量涌现。这些无人飞行器都不可避免地要完成对舵翼面的控制,需要设计合适的驱动系统。

驱动系统问题的解决方案通常不是一件容易的工作,甚至对一个有经验的研发工程师来讲也是如此。基本的驱动机构(丝杆、齿轮箱、传动带等等)可以通过总体设计来详细说明,但是,诸如丝杆导程、齿轮箱减速比等等最佳参数的选择在很大程度上由所使用的电机和电机减速箱组合来确定。系统动态响应、控制

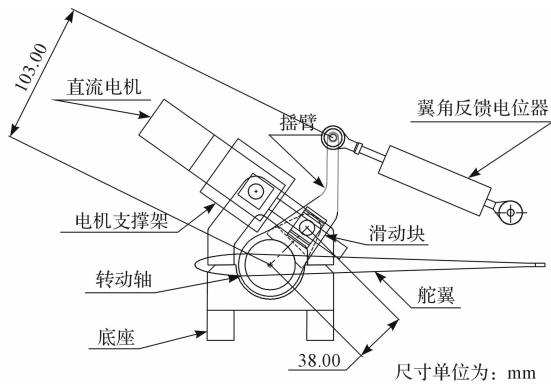
品质和精度(例如定位精度)与驱动系统中所有的元部件相互影响^[1-2]。

某型拖曳式硬体空中靶标自身不带动力装置,由拖曳母机通过拖缆拖曳其飞行,位于拖靶靶体中部两侧装有一副共轴对称水平翼面,现要求设计一套传动系统,通过控制该水平翼面的偏转控制其飞行高度。

具体使用性能指标为:水平翼面的最大转矩为 0.92 kg·m,转角范围为 -7° ~ +3°,转角误差为



(a)三维模型图



(b)结构剖视图

图 1 机械传动结构视图

该结构直接在转动轴上跨装电机支撑架,通过组合式螺杆驱动系统带动与转轴固连的摇臂从而使舵面转动。具体工作原理为:直流电机经减速箱通过螺旋滑动丝杠带动滑动块运动,滑动块通过转轴带动摇臂转动,摇臂和舵翼都固联在转动轴上,它们一起绕转动轴转动,达到操纵舵翼面实现高度控制的目的。在运动过程中,摇臂还带动翼角反馈电位器实现对舵翼位置的测量和控制。

为了减小对直流电机的功率要求,在操纵舵翼运动过程中,设计时尽可能使螺旋滑动丝杠的轴线与转动轴和滑动块轴心连线保持接近 90° 的角度。设计舵翼转动轴线到滑动块转轴中心的距离为 38 mm,到翼角反馈电位器伸缩端的距离为 103 mm(见图 1 中的剖面截图)。

根据舵翼行程(-7° ~ +3°)的技术要求,可以算出滑动块运动的最大行程约为:

$$L_r = 38 \times 2 \times \sin((3 + 7)/2) \approx 6.6 \text{ mm} \quad (1)$$

翼角反馈电位器最大有效伸缩行程约为:

$$L_f = 103 \times 2 \times \sin((3 + 7)/2) \approx 18 \text{ mm} \quad (2)$$

根据舵翼面的最大转速为 6°/s,可以算出滑动块的最大运动速度约为:

$$v_{out} = 38 \times 2 \times \sin(6/2) \approx 3.98 \text{ mm/s} \quad (3)$$

$\pm 0.3^\circ$,最大转速为 6°/s,能断电自锁。为此,本研究设计由直流电机及传动机构构成的舵机系统,以及由 L292 为功放的舵机驱动电路,操纵舵翼面,实现对拖靶的高度控制。

1 机械传动设计

考虑到靶体内部空间狭窄,所要求的舵翼面转动精度较高,设计的拖靶机械传动结构如图 1 所示。

2 部件的选型及验算

2.1 滑动螺旋丝杠主要参数设计及选型

由前面机械传动设计可知:舵翼转动轴线到滑动块转轴中心的距离为 38 mm,则要求丝杠输出轴向力^[3]为:

$$F_{out} = \frac{0.92 \times 9.8 \times 1000}{38} = 237 \text{ N} \quad (4)$$

丝杠有效行程 $L_r = 6.6 \text{ mm}$,综合考虑传动效率和传动精度及螺纹的当量摩擦系数,反行程的自锁性等因素,确定选用牙形半角 $\beta = 15^\circ$ 、公称直径 $d = 10 \text{ mm}$ 、导程 $p = 2 \text{ mm}$ 的梯形螺纹滑动螺旋丝杠。

螺母长度可由式 $H = \Psi d_2$ 求得,其中对于整体式螺母可取 $\Psi = 1.5 \sim 2.5$,外螺纹中径 $d_2 = d - p/2 = 9 \text{ mm}$,取 $\Psi = 1.5$,则螺母长度 $H = 1.5 \times 9 = 13.5 \text{ mm}$,螺纹长度 $L \geq H + L_r = 13.5 + 6.6 = 20.1 \text{ mm}$,取 $L = 60 \text{ mm}$,此时 $L/d_1 = 60/8 = 7.5 < 10 \sim 15$,保证了螺杆的刚度,不用进行稳定性验算。

螺纹升角 $\lambda = \arctg(p/\pi d_2) = \arctg(2/9\pi) = 4.047^\circ$,设螺杆材料为 45 号钢,螺母材料为 CuSn12,则摩擦系数 $f = 0.08 \sim 0.10$,取 $f = 0.08$,则当量摩擦角 $\rho_\Delta = \arctg(f/\cos\beta) = \arctg(0.08/\cos 15^\circ) = 4.734^\circ$,显然 $\lambda < \rho_\Delta$,满足机构自锁条件。

丝杆上的最大转矩为:

$$T = F_{\text{out}} \times \frac{d_2}{2} \times \tan(\lambda + \rho_{\text{v}}) = 237 \times 4.5 \times \tan(4.047 + 4.734) \approx 165 \text{ mNm} \quad (5)$$

据此选择瑞士 maxon motor 公司^[4]生产的组合式螺杆驱动系统 GP32S,其参数指标为:梯形丝杠,公称直径 10 mm,导程 2 mm,不锈钢材质,螺纹机械自锁,最大效率可达 47%,螺母材质为 CuSn12,轴向间隙小于 0.008 mm,采用行星轮直齿齿轮箱,有多种减速比可选,推荐输入速度小于 $8\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,最大轴向负载 2 700 N。在此基础上,笔者选用合适的齿轮减速箱减速比和直流电机组合,以满足使用要求。

2.2 齿轮减速箱和直流电机的选型

根据技术条件,舵翼面的最大负载转速 $\omega_{\text{LP}} = 6^\circ/\text{s}$,折算到丝杠上的负载转速为:

$$n_B = \frac{38 \times 6 \times 2\pi}{360 \times 2} \times 60 = 119.4 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \quad (6)$$

减速箱的推荐输入转速为小于 $8\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,因此最大允许的减速比为:

$$i_{\text{max}} = \frac{n_{\text{max},c}}{n_B} = \frac{8\,000}{119.4} = 67:1 \quad (7)$$

减速箱的减速比应比 67:1 小一些,参考 Maxon Motor 公司提供的减速箱资料^[5],因此笔者选择减速比为 51:1 的三级传动减速箱,最高效率 70%。

计算折算到电机轴上的转速和转矩为:

$$n_{\text{mot}} = i \times n_B = 51 \times 119.4 = 6\,089 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \quad (8)$$

$$M_{\text{mot,max}} = \frac{T}{i \times \eta} = \frac{165}{51 \times 0.70} \approx 4.7 \text{ mNm} \quad (9)$$

舵翼最大负载转矩 $T_{\text{LP}} = 0.92 \text{ kg} \cdot \text{m}$,最大负载转速 $\omega_{\text{LP}} = 6^\circ/\text{s} \approx 0.105 \text{ rad/s}$,考虑电机在峰值转矩下以最高转速连续驱动负载,则电机功率可按下式估算:

$$P_M = (1.5 \sim 2.5) \frac{T_{\text{LP}} \times \omega_{\text{LP}}}{1\,020 \times \eta} \quad (10)$$

式中: P_M —电机功率,kW; T_{LP} —负载峰值转矩,N·m; ω_{LP} —负载最高角速度,rad/s; η —传动效率。

其中,1.5~2.5 系数为经验数据,考虑了可能的负载转矩的遗漏及电机转子和传动装置的功率消耗。

对小功率系统取系数为 2,设传动效率 $\eta = 0.9 \times 0.7 \times 0.47 = 0.2961$,则:

$$P_M = 2 \times \frac{0.92 \times 9.8 \times 0.105}{1\,020 \times 0.2961} \times 1\,000 = 6.29 \text{ W} \quad (11)$$

为了保持足够的功率余量,本研究选择 A-max26 11 W 系列的电机产品,具体型号可依据公司所提供的该系列电机绕组样本数据表选择。

经查电机样本数据表,A-max26 11 W 系列电机的速度-转矩曲线的平均斜率为 $120 \text{ r}/\text{min}/\text{mNm}$,则空载转速为:

$$n_{0,\text{theor}} = n_{\text{Mot}} + \left(\frac{\Delta n}{\Delta M} \right)_{\text{avg}} \times M_{\text{Mot}} = 6\,089 + 120 \times 4.7 = 6\,653 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \quad (12)$$

由于拖靶上所使用直流电源是由 23 节镍镉蓄电池单体串联而成,故其额定电压为:

$$U_{\text{Mot}} = 23 \times 1.2 = 27.6 \text{ V} \quad (13)$$

因此,所需的电机速度常数为:

$$k_n = \frac{n_{0,\text{theor}}}{U_{\text{Mot}}} = \frac{6\,653}{27.6} = 241 \text{ r}/\text{min}/\text{V} \quad (14)$$

与电机样本数据表中现有的电机速度常数相比较,考虑到拖靶的舵翼面实际工作情况并非是连续工作在最大力矩情况下,这里可以选择最接近的电机速度常数,因此最佳地满足要求的电机的订货号为 No. 110964,其电机速度常数为 $k_n = 238 \text{ r}/\text{min}/\text{V}$,额定电压为 30 V。

在工作点上的电流消耗为:

$$I = \frac{M_{\text{Mot}}}{K_M} + I_0 = \frac{4.7}{40.1} + 0.00189 = 0.119 \text{ A} < 0.455 \text{ A} \quad (15)$$

其中,0.455 A 为电机连续工作情况下的正常消耗电流,即在此工作点上电机可以连续工作而不会失效。

2.3 验算

依据电机订货号为 No. 110964 的样本数据表可知其在额定电压 30 V 下的空载转速为 $7\,020 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,据此可算出其在 27.6 V 的工作电压下空载转速为:

$$n_{0,\text{work}} = 7\,020 - 238 \times (30 - 27.6) = 6\,448 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \quad (16)$$

换算为舵翼面转速为:

$$\omega_{\text{NP}} = \frac{6\,448}{51} \times \frac{360 \times 2}{(60 \times 38 \times 2\pi)} \approx 6.35^\circ/\text{s} \quad (17)$$

同理,依据数据表中在额定电压 30 V 下的负载转速 $4\,910 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,可以算出在 27.6 V 的工作电压下舵翼面负载转速为 $4.27^\circ/\text{s}$ 。由于拖靶全靶用电负载较轻,另外舵翼面大部分时间工作在额定负载以下,实际工作中其舵翼面转速会比上述计算值高,满足舵翼面响应速度要求。

为了验证舵翼面的转矩是否满足使用性能指标要求,本研究将重量为 0.923 kg 长度为 1.10 m 的均匀铝型材一端固定在舵翼上并垂直于舵翼转轴,另一端加挂重量为 0.5 kg 的配重块,则加载的总力矩为 $0.923 \times 1.10/2 + 0.5 \times 1.10 = 1.05765 \text{ kg} \cdot \text{m}$,电机通电工作,舵机执行机构转动正常,说明舵翼面转矩满足大于

0.92 kg · m 的转矩要求。

3 舵回路设计

为了精确实现传动系统的要求,本研究设计了由电

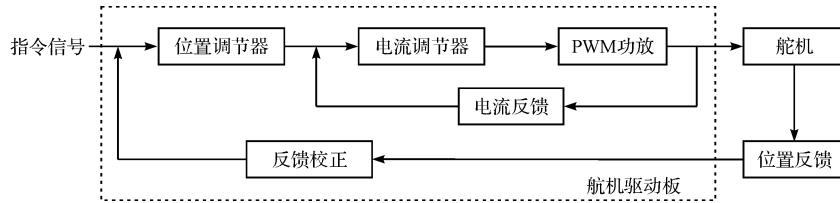


图2 舵回路结构框图

PWM 功放^[8]采用直流电机驱动器专用集成电路 L292 模块^[9],与线性功放相比,PWM 功放具有功耗低、效率高、工作稳定可靠等优点,尤其是它的动力润滑作用,对减小舵机死区,改善静态精度和低速爬行非常有利。L292 模块的驱动能力可达 2 A/36 V,集成度高,开关频率可外部设定,片内设有过载保护和欠压保护等功能,完全满足舵机的功率要求。

位置反馈是舵回路的主反馈,舵面的定位精度主要取决于位置传感器的精度^[10]。由第 1 部分可知,翼角反馈电位器的最长伸缩行程为 $L_f \approx 18 \text{ mm}$,这里选用了型号为 KPM - 25 mm 微型绞接直线位移传感器作为位置反馈传感器,其电气行程达 25 mm,标准阻值为 1 k Ω ,线性精度为 $\pm 0.01\%$,完全可满足转角精度 $\pm 0.3^\circ$ 的使用要求。

标准电阻是小功率系统中常用的一种电流传感器,因其简单可靠、阻值稳定、精度高、频响好、输出标准电压值直接比例于所流过的电流,因此在 PWM 系统中得到了广泛应用。这里的舵回路采用标准取样电阻作为电流传感器,在 H 型桥臂下端各串入一个 0.2 $\Omega/3 \text{ W}$ 的标准电阻进行电流取样。

需要注意的是,在利用 PWM 控制直流电机运动时,一定要做好 PWM 信号对 L292 供电电源品质的反向干扰滤波,否则会影响到共用电源的其他模拟器件的正常工作。

4 结束语

恒高拖靶舵机系统的设计除了需要对传动机构进行精心设计外,还需要对减速箱和电机的各项参数进

行精确计算和正确选型,并设计好相应的驱动电路。流环和位置环组成的双闭环控制结构的舵回路^[6-7]。电流环作为内环,用于抑制转矩和电流的波动,减小功放死区,提高线性度;位置环是舵回路的主回路,目的是保证较好的位置控制精度。舵回路结构框图如图 2 所示。

行精确计算和正确选型,并设计好相应的驱动电路。

本研究所设计的拖靶舵机系统结构紧凑、传动简单、舵面转动误差小、电机及减速箱选型科学合理、理论计算和实际测试满足自锁要求,经装配测试和实际使用获得了非常满意的效果,其舵翼面力矩、转角范围、转角误差、转速等主要性能指标完全满足实际使用要求。

参考文献 (References):

- [1] KAFADER U. 高精度微型驱动系统选型[M]. Maxon Academy, Sachseln, 2006.
- [2] FAULHABER GROUP. 微型驱动系统[M]. FAULHABER GROUP, 2008.
- [3] 成大先. 机械设计手册:机械传动(单行本)[M]. 5 版. 北京:化学工业出版社, 2010.
- [4] 成大先. 机械设计手册:减(变)速器·电机与电器(单行本)[M]. 5 版. 北京:化学工业出版社, 2010.
- [5] Maxon Motor Co., Ltd. 高精度驱动和系统产品目录[M]. Maxon Motor Co., Ltd., 2008.
- [6] 黄健,应浩,阮承治. 某型高速无人机舵控系统的设计[J]. 机电工程, 2011, 28(12): 1488-1490.
- [7] 夏青元,徐锦法. 无人机舵回路及其新型控制策略设计和应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(6): 704-709.
- [8] 解恩,王璞. 一种新颖的直流电机 PWM 调制方式[J]. 电机与控制应用, 2012, 39(11): 29-32.
- [9] 潘厚宏,张智明,王清龙. 基于 H 桥电机驱动模块 L292 的埋弧焊送丝电路[J]. 电焊机, 2010, 40(10): 52-55.
- [10] 闫莉敏,郭俊良,吴青松. 微调装置设计与应用[J]. 机械传动, 2012, 182(2): 91-92.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

陶德桂,刘关心,王雷. 恒高拖靶舵机系统的设计[J]. 机电工程, 2013, 30(11): 1393-1396.

TAO De-gui, LIU Guan-xin, WANG Lei. Design of electric actuator for height keeping towed target[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(11): 1393-1396.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>