

# 用于球载控制系统反捻器的仿真

蔡满意, 何长安

(西北工业大学, 陕西 西安 710072)

**摘要:**论述了一种反捻装置的构成原理,给出了系统的仿真模型,并在具有位置干扰和速度干扰的情况下,采用 MATLAB 对其进行了仿真,从仿真的结果来看,采用反捻装置的吊篮控制系统可以较好地完成控制任务。

**关键词:**反捻器;球载系统;吊篮

**中图分类号:** V249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009 - 3516(2005)06 - 0024 - 04

球载系统在很多的应用领域有着重要的、甚至是不可替代的地位和用途,但是目前国内对此研究较少,目前所知北京天文台曾研制过一球载望远镜的姿态控制系统<sup>[1]</sup>,该系统驱动机构采用 CMG 方式。作为系统的另一种驱动机构反作用轮方式还未见报道,无论采用何种驱动方式,气球与吊篮的去耦及驱动机构的卸荷是系统必不可少的。

## 1 反捻装置原理及仿真模型

球载控制系统有 2 个部分组成,一是控制吊篮姿态的驱动装置,二是作为去藕和卸荷机构的反捻装置。

### 1.1 反捻装置的基本工作原理

反捻装置工作原理见图 1。

反捻装置主要有反捻电机、扭矩传感器及相关的机械装置组成。假设气球旋转而吊篮固定,则吊绳将发生扭转,这样由吊绳扭转产生的力矩必然使扭矩传感器产生应变,从而输出电压信号,该信号被检测、放大输入到反捻电机的控制电路,从而使电机产生力矩来抵消吊绳的扭矩。当电机输出力矩小于轴承最大摩擦力矩时,电机输出的力矩与轴承上的摩擦力矩抵消,使吊绳扭力矩作用在吊篮上为零。当电机的输出力矩大于轴承的最大摩擦力矩时,则连接吊篮和气球的轴承转动,同时也消除了吊绳上的扭矩。

在图 1 中,  $T_d$  是反捻电机的输出力矩,  $T_{df}$  为轴承的摩擦力矩,  $K_s$  是吊绳扭屈常数, 设  $K_{d,T}$ 、 $K_d$ 、 $F$ 、 $R_d$ 、 $n_d$ 、 $\theta_{d,i}$  分别为反捻电机的电流力矩常数, 逆电动势常数, 内部电阻, 减速比级输入电压。  $K_h$  是扭矩传感器的灵敏度,  $K_{d,n}$  是控制系统的增益。 则其运动方程为

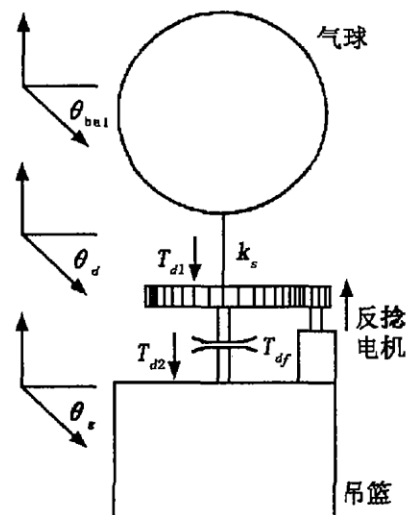


图 1 反捻装置工作示意图

收稿日期:2005-01-17

作者简介:蔡满意(1969-),男,安徽全椒人,博士生,副教授,主要从事飞行器控制与仿真;

何长安(1937-),男,上海人,教授,博士生导师,主要从事非线性控制、飞行器控制与仿真。

$$\left. \begin{aligned} T_{d,1} &= -K_s(\theta_d - \theta_{bal}) \\ T_{d,2} &= T_d - T_{d,f} \end{aligned} \right\} \quad (1) \quad T_d = (K_h T_{d,1}) K_{d,a} K_{d,\tau} n_d / R_d - \frac{n_d K_{d,f}}{R_d} (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_g) \quad (2)$$

气球的惯性矩非常大,其转角  $\theta_{bal}$  除受气流影响外,几乎不会因反捻器的工作而起变化。假如吊篮的方位角可以控制,角度  $\theta_g$  也独立变化,故对反捻器控制而言,  $\theta_{bal}$  可以视为独立的外加转角,反捻器的运动作对其影响仍可以忽略。另外,轴承的摩擦力矩经过简化并作为外部施加给系统的扰动来处理。

### 1.2 反捻装置的仿真模型

反捻装置的作用有2个:去耦及卸荷。去耦就是消除气球对吊篮的影响,而卸荷则是稳定驱动装置的工作点,那么反捻装置能否达到我们的预期呢?为了验证反捻装置的作用,下面将给出能用于系统仿真的反捻装置的仿真模型及系统仿真所需的相关模型。

首先给出反捻装置的仿真模型,从图1看到,反捻装置一个主要的组成部分是反捻电机,运动方程为<sup>[2]</sup>:

$$T_n = C_{mn} I_d \quad (3) \quad U_{d0} - E = R_n (I_d + T_{ln} dI_d/dt) \quad (4) \quad E = C_{en} n \quad (5)$$

式中:  $U_{d0}$ ,  $I_d$ ,  $R_n$  分别为电机的电枢电压、电枢电流和电枢电阻,  $C_{mn}$ ,  $C_{en}$ ,  $T_{ln}$ ,  $n$  分别为转矩电流比、电枢回路电磁时间常数和电机转速,其中由于电机定子固定于吊篮,而吊篮是可转动的,所以转速  $n$  是吊篮转速与电机转子转速的差值。参考图1可画出反捻装置的仿真模型图2。

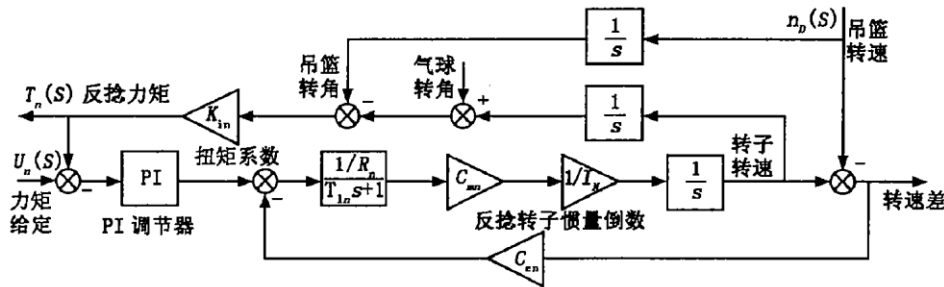


图2 反捻装置仿真模型

为了验证反捻装置,必须对整个球载控制系统进行系统仿真,下面给出包括反捻器在内的整个球载系统的简单模型。图3是一个球载方位控制系统框图,结合图2和图3,可以知道,反捻装置的卸荷作用由驱动装置的工作点决定,而去耦则由吊篮和气球转速决定。不论去耦还是卸荷,最终的解决方法都是通过反捻电机输出反捻力矩来解决。

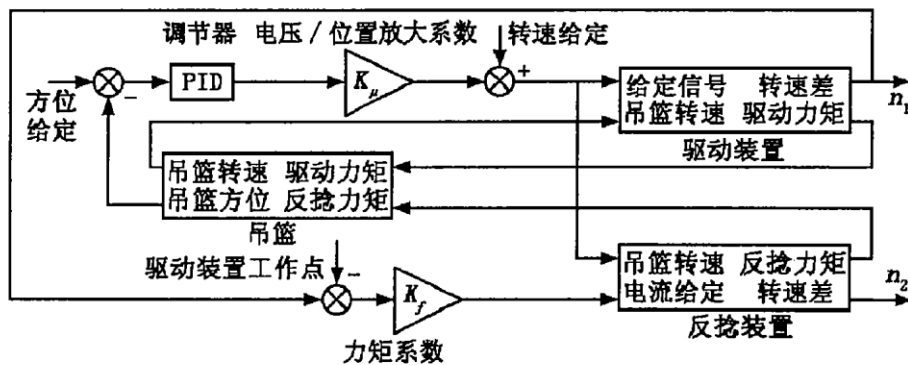


图3 球载控制系统简单结构图

## 2 系统仿真

### 2.1 系统干扰情况

高空气球一般处于 30 km - 40 km 的高度,此高度的大气层为平流层,大气运行比较平稳,气流运行速度大约几十 km/h。但是由于微量气流的紊乱使气球受到的风压各处不等,会造成气球的缓慢旋转<sup>[3]</sup>,其转动

一般为  $0.1 \text{ r/min}$  以上,为了从最恶劣的条件来考虑,可以认为气球会受到最大可能  $1.0 \text{ r/min}$  的干扰,即相当于  $0.1 \text{ rad/s}$  的速度干扰。

吊篮由气球吊于空中,两者的连接由于采用了反捻电机,摩擦力非常小,但是无论如何都不可能完全消除摩擦力,所以必须考虑气球转动时摩擦力矩对吊篮的影响。

根据以上分析,系统运行时有 2 种干扰:①速度干扰②摩擦力矩干扰。

## 2.2 仿真参数

惯性矩:飞轮惯性矩  $3 \text{ kgm}^2$ ;吊篮惯性矩  $166 \text{ kgm}^2$ ;反捻电机转子惯性矩  $0.04 \text{ kgm}^2$  飞轮电机的主要参数: $R=0.5 \Omega, T_1=0.17 \text{ s}, C_m=0.95 \text{ Nm/A}, C_e=0.1 \text{ Vmin/r}, K_n=0.2 \text{ Vmin/r}$ 。

反捻电机的主要参数: $R=1 \Omega, T_1=0.01 \text{ s}, C_m=0.89 \text{ Nm/A}, C_e=0.07 \text{ Vmin/r}, K_{in}=0.02 \text{ Vmin/r}$ 。

PI 调节器: $5(S+0.3)/S$  及  $5(S+0.1)/S$ 。

主系统的 PID 调节器: $(0.8S^2+0.8S+0.1)/S$

其他数据:给定的方位为转动  $0.1 \text{ rad}$ ,飞轮电机的工作点给定为  $15 \text{ r/min}$ ,工作点误差(死区)给定为  $1 \text{ r/min}$ ,系统的减速比定为 10。系统仿真时间为  $200 \text{ s}$ , $80 \text{ s}$  后加入位置给定信号, $120 \text{ s}$  后再分别加入干扰信号,加入的速度干扰为  $0.1 \text{ rad/s}$ ,力矩干扰为  $0.02 \text{ Nm}$ 。

## 2.3 仿真曲线

图 4 是没有反捻装置,在干扰的作用下,系统稳定运行时,吊篮的方位仍然维持在预定的  $0.1 \text{ rad}$ 。但是从图 5 中可以看到,驱动装置的输出力矩却保持在一个不为零(约  $0.02 \text{ Nm}$ )的位置,而其转速工作点由  $15 \text{ r/min}$  下降到  $-40 \text{ r/min}$  左右,而且还在一直下降。驱动装置转速的下降原因是,必须产生一定的电磁力矩,以抵消干扰对吊篮的影响。如果不采取措施,驱动装置将很快达到饱和,这样就会失去对吊篮的控制。由于这种干扰会影响驱动装置运行的工作点,所以在设计系统时,必须考虑设置一个合适的工作点。

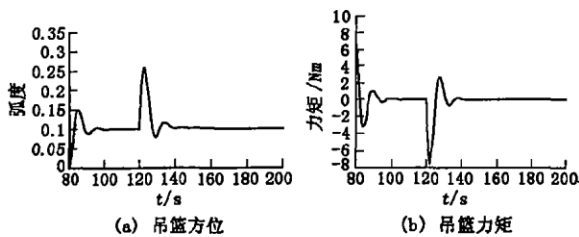


图 4 无反捻时吊篮方位及力矩曲线

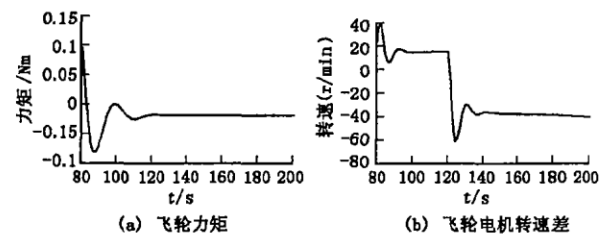


图 5 无反捻时驱动装备力矩和转速曲线

图 6、图 7 是加了反捻装置时吊篮方位和力矩曲线及驱动装置运行曲线。可以看到,这时吊篮方位稳定在  $0.1 \text{ rad}$ ,驱动装置稳定运行时输出力矩为零,同时其运行工作点维持在所设定的  $15 \text{ r/min}$  左右。

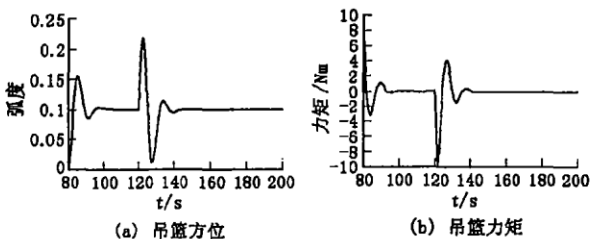


图 6 有反捻时吊篮方位及力矩曲线

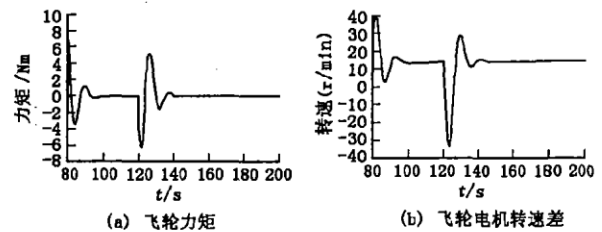


图 7 有反捻时驱动装备力矩和转速曲线

图 8 是反捻电机的力矩输出曲线,在没有干扰时,反捻力矩输出应该为零,当有常值干扰时,反捻力矩输出将不为 0,但是由于系统 10 倍减速比的关系,反捻力矩的输出比较小。

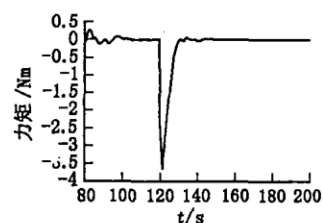


图 8 反捻力矩曲线

### 3 结 论

采用该反捻装置以后,球载系统和吊篮之间可以实现解耦,同时反捻装置还可以解决球载控制系统驱动装置饱和的现象,采用类似这种反捻装置的球载系统目前已经研制成功并投入使用。

#### 参考文献:

- [1] 叶祥明. 大型球载望远镜高精度姿态控制及指向技术研究[D]. 北京: 中国科学院北京天文台, 1999.
- [2] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [3] YE Xiangming , HU Keliang , SUN Caihong. Stabiltion Control and Realizarlon of Precision Pointing Control for A Large Balloon Borne Solar Telescope[M]. Beijing: Astro . obs, 1998.

(编辑:姚树峰)

## Simulation Study of Decoupling Mechanism Used for Balloon – borne Gondola Control System

CAI Man – yi, HE Chang – an

( Northwestern Polytechnical University, Xi’an 710072, China )

**Abstract:** For Decoupling Mechanism, a principle is presented and a model is constructed. When positional and velocity disturbances are exerted, the control system is imitated with the MATLAB in this test. The results of simulation show that the gondola control system achieves the desired results.

**Key words:** DM; balloon – borne system; gondola